平成29年度－令和3年度　文部科学省　科学研究費助成事業　「新学術領域研究　（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

研究成果報告書

All photos & figures
@ K. Kawamura, K. Ohshima, K. Ono, M. Ikehara, R. Makabe, S. Sugiyama, S. Tsutaki, Y. Suganuma, J. Okuno, Y. Aoyama, K.Yamagata, T. Obase, D. Hirano, Y. Kato

目次

はじめに **4**

成果概要、背景と目的・方法、連携体制 **5**

研究項目毎の目標と達成度 **10**

当該学問分野及び関連学問分野への貢献 **12**

若手研究者の育成に関する取り組み **13**

研究費の使用状況（総括班経費の連携への活用、共有設備・装置・試料など） **14**

計画研究の基本情報 **16**

公募研究の基本情報 **23**

研究成果サマリー **34**

研究成果

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）

東南極における氷床・海洋相互作用１：リュツォ・ホルム湾－白瀬氷河 39
平野大輔, 草原和弥, 田村岳史, 青木茂

東南極における氷床・海洋相互作用２：トッテン氷河沖 44
溝端浩平, 平野大輔, 草原和弥, 青木茂

南極底層水を起点とした物質循環 50
大橋良彦, 川合美千代

観測航海から明らかになった底層水の変動 －塩分と南北循環の変動－ 56
勝又勝郎, 青木茂

ケープダンレー沖底層水の係留系観測 －2019-2020 年の結果－ 60
水田元太, 大島慶一郎

南極底層水を導く大量のフラジルアイス生成過程 －ケープダンレーポリニヤでの係留観測の成果－ 63
大島慶一郎, 深町康, 伊藤優人, 中田和輝, 田村岳史

A01-2 南大洋の古海洋変動ダイナミクス(古海洋班)

人工知能を用いた微化石自動分類・ピッキングシステム(miCRAD)の開発 66
板木拓也

海底コアと氷床コアの年代精密対比 75
松井浩紀, 池原実, 菅沼悠介, 関宰, 大藪幾美, 川村賢二

南大洋の古海洋変動ダイナミクス －古環境プロキシの高精度化と海底コアによる古海洋変動復元－ 81
池原実, 井尻暁, 関宰, 板木拓也, Matthieu Civel-Mazens, 竹原景子

鮮新世から更新世にかけての南大洋の古海洋変動 －過去の温暖期の南大洋の気候状態－ 87
関宰, 下野智大, 池原実

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用(生態系班)

海氷と生態系・物質循環 94
真壁竜介, 高橋啓伍, 佐野雅美, 松田亮, 伊藤優人, 高尾信太郎, 立花愛子, 柏瀬陽彦, 川合美千代, 黒沢則夫, 野村大樹, 茂木正人

海氷下の食物網構造 100
茂木正人

南大洋における低次生態系変動 107
高尾信太郎, 真壁竜介, 溝端浩平, 山本彬友, 岡顕, 平譯享

DNA メタバーコーディングからみえる南大洋季節海氷域の生態系 112
立花愛子, 真壁竜介, 茂木正人

ハシボソミズナギドリからみた南極海生態系 116

綿貫豊，安積沙羅々, J-B Thiebot,高橋晃周，國分亙彦，安藤靖浩，新妻靖章, Fernando Arce, Mary-Anne Lea, Mark Hindell，茂木正人

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用(氷床班)

ドームふじアイスコアによる古気候研究の成果 －エアロゾルと気温復元－ 124
植村立

アイスコアの年代構築と応用 132
大藪幾美，川村賢二

南極氷床内陸における広域の表面質量収支とドームふじ周辺の基盤地形 137
津滝俊

リュツォ・ホルム湾における氷河変動と海洋との相互作用
－ラングホブデ氷河での熱水掘削と人工衛星データによる解析－ 142
杉山慎，箕輪昌紘，近藤研

A02-2 固体地球と氷床の相互作用(固体地球班)

南極での絶対重力測定 －GIA 解明に向けた絶対重力測定の概要ならびにその成果－ 150
土井浩一郎，福田洋一，青山雄一，奥野淳一

測地観測データを用いた GIA 変動の研究－Lützow-Holm 湾周辺での観測による GIA モデルの拘束－ 156
土井浩一郎，服部晃久，奥野淳一，青山雄一

衛星データによる南極氷床変動の研究
－衛星重力データの ICA 解析および SAR データによる氷河流動速度解析－ 161
福田洋一，土井浩一郎

東南極氷床変動の復元と大規模氷床融解メカニズムの解明
－地形・地質調査および固体地球モデリングによる長期的氷床変動の復元と解析－ 170
菅沼悠介，石輪健樹，川又基人，奥野淳一

南極氷床変動と固体地球のレスポンス
－GIA モデリングと測地学的観測データの比較より推定する地球内部構造と氷床融解史－ 176
奥野淳一，入江芳矢，服部晃久，石輪健樹，土井浩一郎，福田洋一

A03 未探査領域への挑戦(探査班)

海氷・棚氷下を探査する自律型海中ロボット（AUV）の開発 183
巻俊宏，山縣広和，吉田弘，野木義史

南極海沿岸プロファイラブイの開発 189
青木茂，小野数也

積雪環境調査に向けた UAV による表面地形測量 192
青山雄一，服部晃久，土井浩一郎

南大洋の海底地形 －海洋底ダイナミクス研究から海洋モデル・古環境研究との連携へ－ 196
藤井昌和，野木義史，沖野郷子

A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング(モデル班)

南大洋周極モデル・高解像度領域モデルによる棚氷－海氷－海洋相互作用に関する研究
－南大洋・南極氷床新学術を振り返って－ 200
草原和弥

気候と氷床のシミュレーションから示される退氷期の気候システムの変動
－スーパー間氷期遷移、現在の南極氷床の存在要因への示唆－ 207
小長谷貴志，阿部彩子

三千年紀の南極氷床の将来変動 212
Ralf Greve，齋藤冬樹

海洋炭素循環モデルによる氷期の待機中 CO_2 低下メカニズムの解明 215
小林英貴，岡顕

公募研究

南大洋縁辺部における準リアルタイムな人為起源二酸化炭素の動態解明 220
渡辺豊
南大洋南極周極流域における乱流鉛直混合
－高速水温計観測に準拠したパラメタリゼーション手法の提示－ 222
安田一郎，佐々木雄亮
南極海における微小底生動物の進化を探る物語、ここに始まる 225
辻本惠，嶋田大輔，山崎博史，藤本心太
南大洋インド洋区南極前線南側 ECR-1 の沈降粒子フラックスに関する予察 228
池上隆仁，林亮太，岡崎裕典，池原実
南大洋における窒素固定と硝化の分布 231
塩崎拓平
南極氷床上における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究 236
新谷昌人
ラングホブデ氷河と白瀬氷河の接地線位置に関する研究 241
奈良間千之，山之口勤，杉山慎，青木綾乃，田殿武雄
南半球における中高緯度大気循環の不確実性、南極暖湿化の原因とその影響の定量化 248
猪上淳，佐藤和敏
地表面フラックス見積もりスキームの改良 －氷床の表面質量収支評価改善にむけて－ 251
西澤誠也
衛星観測を用いた南大洋の雲の研究 253
千喜良稔
極域気候モデルを用いた南極氷床表面質量収支高精度計算 256
庭野匡思
衛星観測に基づいた沿岸ポリニヤにおける海氷生産量ならびに海氷域の熱塩フラックス 259
二橋創平
衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床質量変動と GIA の分離 262
山本圭香，奥野淳一，土井浩一郎，福田洋一
宇宙線変動に基づくスーパー間氷期古気候記録の陸海同期 264
堀内一穂
南極大気・雪・アイスコア中の硫酸および硝酸の安定同位体組成とその応用 266
服部祥平，石野咲子
珪藻遺骸群集が示す東南極沿岸湖沼の百年規模の周期的変動 －宗谷海岸・スカルブスネスの小氷期－ 269
香月興太，菅沼悠介，川又基人，鎌田唯斗
無視されてきた微化石「黄金色藻シスト」 272
加藤悠爾
白鳳丸の南大洋航海 KH19-1 で得られた堆積物コアのリンと鉄のスペシエーション 275
山口耕生，大竹有裕美，佐山奈緒，吉岡茜，池原実
南極ドームふじにおける最終氷期終盤～完新世初期のダスト及びブラックカーボンの変動 277
東久美子，平林幹啓，尾形純，福田かおり，茂木信弘，森樹大，近藤豊，大畑祥，小池真，北村享太郎，
塚川佳美，藤田秀二，川村賢二，中澤文男，米倉綾香，奥村裕美
東南極海岸堆積物のルミネッセンス特性と予察年代 280
田村享，石輪健樹，徳田悠希，板木拓也，佐々木聡史，菅沼悠介

成果リスト 282

プレスリリース集 315

ニュースレター集 393

はじめに
－南極環境システム学の創成－

地球温暖化をはじめとする人為起源の気候変化が目に見える形で現れてきており、南極も例外ではありません。巨大な氷床の存在や全海洋への底層水供給などにより、地球環境における南極の役割は大きいのですが、変化の時間スケールが非常に長いことや観測が困難であることなどから、実態把握やメカニズムの理解は容易ではありません。例として氷床を取り上げると、本領域研究が開始した2017年頃は、南極氷床が全体として増えているのか減っているのかにも論争があり、IPCC第5次評価報告書（2013）には氷床縮小による海面上昇予測は掲載されていませんでした。その後、衛星観測による重力や表面高度、流動速度等のデータや解析手法の向上や、変化そのものが大きくなってきたこともあり、過去数十年間の氷床量が減少してきていることは確実となりました。将来予測についても、本領域研究が大きく貢献した氷床モデル国際比較プロジェクトの進展により、IPCC の海洋・雪氷圏特別報告書（2019）と第 6 次評価報告書（2021）には海面上昇の予測結果がまとめられました。しかし、特に CO_2 高排出シナリオでの不確実性が大きく（2300年に 2 - 7m の海面上昇、ただし 15m を超える可能性も排除できない）、メカニズムの理解がまだまだ不足していることも示されました。

氷床の質量変動は主に、大陸全域における降雪による質量増加と、末端における氷山分離や棚氷底面融解などによる質量減少の差で決まります。南極氷床と基盤岩との接地線の大半は海中にあるため、氷に接する海水の起源や温度、循環、それらの時間変化などが重要になります。西南極では大陸の近くの表層下に暖かい海水がありますが、東南極では暖水が大陸から遠くにあるため、なぜ氷床末端の融解が加速している地域があるのか、本領域研究の開始前には分かっていませんでした。また、末端の融解増加は内陸からの氷床流動の加速につながりますが、氷床下の基盤地形や地殻変動などの違いにより、各地域での応答は一様ではありません。今後温暖化が進むにつれ、大気による氷床表面の融解の増大や涵養の変化が質量変化により大きく寄与してくることも考えられます。さらに、氷床融解の影響は海面上昇だけでなく、莫大な熱と CO_2 の吸収源である南大洋などへの影響を通じて、全球規模の気候や炭素循環に影響します。

新学術領域研究「南極の海と氷床」（略称）では、現在の南極氷床と南大洋の実態と変化や相互作用に直接観測と高解像度モデリングからアプローチすることと、長期で大きく変動する南極氷床と気候との相互作用に過去の環境復元と大陸規模・全球規模モデリングからアプローチすることを両輪として、南極環境に関するシステム学の構築を目指しました。初めて顔を合わせるメンバーが大半という状況からスタートし、メンバー全員が連携を意識して取り組んだ結果、多数の船舶による分野融合の集中観測や、大陸上の外国基地や広範囲の海域への観測展開、無人観測技術の開発、南極氷床モデルと全球気候モデルの開発と精緻化、そして観測・復元研究とモデル研究との融合などに大きな進展があり、その過程で多くの若手研究者が成長し大活躍しました。新たに南極研究に参画した多くの研究者の活躍もありました。また、南極地域観測事業による研究観測や過去数十年にわたる多様なデータの蓄積が、高度な融合研究に発展する重要な機会ともなりました。いずれも新学術領域研究でなければ達成し得なかったものであり、本領域研究のメンバーの皆様に改めて感謝申し上げます。

本冊子には、主要な論文成果の解説のほか、新学術領域研究の特徴である領域内連携に関する記述や、事後評価報告以降の最新状況も盛り込まれています。今後の連携研究に活かして頂けるとともに、南極環境研究に携わっていない方々に興味を持って読んで頂き、南極研究に参画頂くきっかけになればとの思いを込めて作成しました。また、資料として、申請書や報告書等から本領域の目的・方法や基本情報、成果リスト（学会発表以外）、アウトリーチ関連などをまとめました。領域発足直後に出版した総説集（低温科学 2018 vol.76「巨大リザーバ：南大洋・南極氷床」※）とともに、日本の南極環境研究の重要な通過点を記録するものとして、また南極環境システム学の創成過程の記録として、ご活用頂ければ幸いです。

2022年12月

領域代表　川村賢二（国立極地研究所、総合研究大学院大学）

※以下よりダウンロード可能　https://www2.lowtem.hokudai.ac.jp/pdf/LTS76.pdf

本領域研究の成果概要、背景と目的、研究方法

領域設定期間：平成 29 年度～令和 3 年度
領域番号：4902
研究領域名（和文）熱-水-物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床
研究領域名（英文）Giant reservoirs of heat/water/material : Global environmental changes driven by the Southern Ocean and the Antarctic Ice Sheet

成果の概要

本領域により新たな分野融合・連携研究体制が構築され、南極氷床と南大洋を中心とする南極環境をシステムとして研究する「南極環境システム学」が創成された。各分野単独では不可能であった様々な成果を得て、*Nature, Science, Nature Communications, Science Advances* などの学際誌を含む合計 418 本の論文を国際査読誌に公表した。分野間連携による成果の例を以下に挙げる。

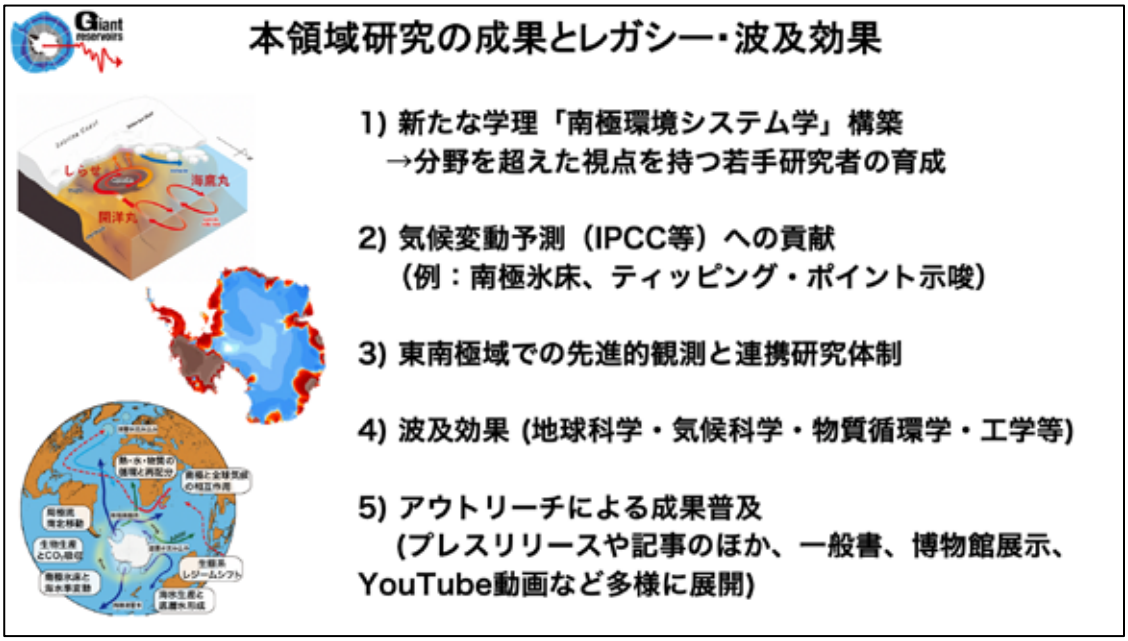
南大洋については、我が国の 5 船と外国の 2 船により多様な観測や試料採取を実施し、雪氷分野や海洋－棚氷相互作用モデリングとも連携して、昭和基地があるリュツォ・ホルム湾や東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河域への暖水流入と棚氷融解過程を解明した。また、東南極での南極底層水の物理・化学・物質循環の実態と近年の変化や、海氷と生態系・物質輸送の関係の解明、過去の南大洋の温度・塩分の復元や年代の精密統合など、多様な連携研究成果を得た。

南極氷床については、氷河上から氷床末端部やその直下の海を直接観測し、海洋分野との連携で、暖かい海水が氷を融解し、淡水が海水と混合して流出する様相や、氷河の流動速度と海洋環境の関係を捉えた。また、沿岸から内陸の基盤地形と表面質量収支・形状の観測や、外国基地を含む氷床縁辺部での重力観測や測位を展開し、過去の観測や人工衛星のデータと合わせた解析から、氷床質量変化と固体地球変形の制約が進んだ。過去の気候・氷床変動については、アイスコアからの詳細かつ高精度な古環境復元や年代の高精度化、南極大陸縁辺部の地形調査や試料による過去の大規模氷床変動とその原因解明が進んだほか、数値モデルとの連携も進んだ。

新技術の開発による探査については、海氷・棚氷下を観測できる無人探査機の開発に成功したほか、氷下の海洋や氷上の地形観測、表面地形の精度評価、海底地形データの解析などで成果を得て、他班の観測研究やモデリング研究へ貢献し、多様な連携研究につながった。

数値モデルについては、気候モデルや氷床モデル、海洋物質循環モデル、海洋領域モデルなどを高度化し、南極周辺での性能を精査した上で、現場観測や古気候データとの連携を進めた。その結果、棚氷融解の鍵となる暖水流入のメカニズムや、過去の氷床縮小をもたらした温暖化の原因、将来 1000 年間の南極氷床の予測とティッピング・ポイントの提案などの成果が上がった。

また本領域では、若手研究者の段階に応じた多岐にわたる若手人材育成（連携研究への中心的参加、若手会、海外研究支援、学際フィールド教育、南極春の学校、年次報告会や国際シンポジウムでの議論などの取り組み）を行ったことにより、次世代の融合・連携研究を担える有力な若手研究者が多数育った。



研究開始当初の学術的背景と目的

地球の氷の約 90%を占める南極氷床は、海水準で約 60m に相当する淡水リザーバである。例えば、約 300 万年前の CO_2 濃度は現在より低い 300－400 ppm であったにもかかわらず、南極氷床は現在よりも小さく海水準は最大 20 m 高かったと推測されている（図 1)。南極氷床は比較的安定であると考えられてきたが、近年になって南極氷床の縮小が相次いで報告され（図 2)、大きな関心と論争の的となっている。一方、南大洋では南極底層水という地球で最も重い水が生成される。全海水の 3040%を占める巨大な（負の）熱のリザーバであり、その量や温度は地球表層の熱の分配に大きく影響し、長期の全球気候を左右する。さらに、南大洋は最大の CO_2 リザーバであり、氷期-間氷期サイクルにおける CO_2 変動は南大洋が決めてきたという説が有力である。このように、熱・水・CO_2 の巨大リザーバである南極氷床と南大洋は、全球気候や海水準を決定づける重要要素である。

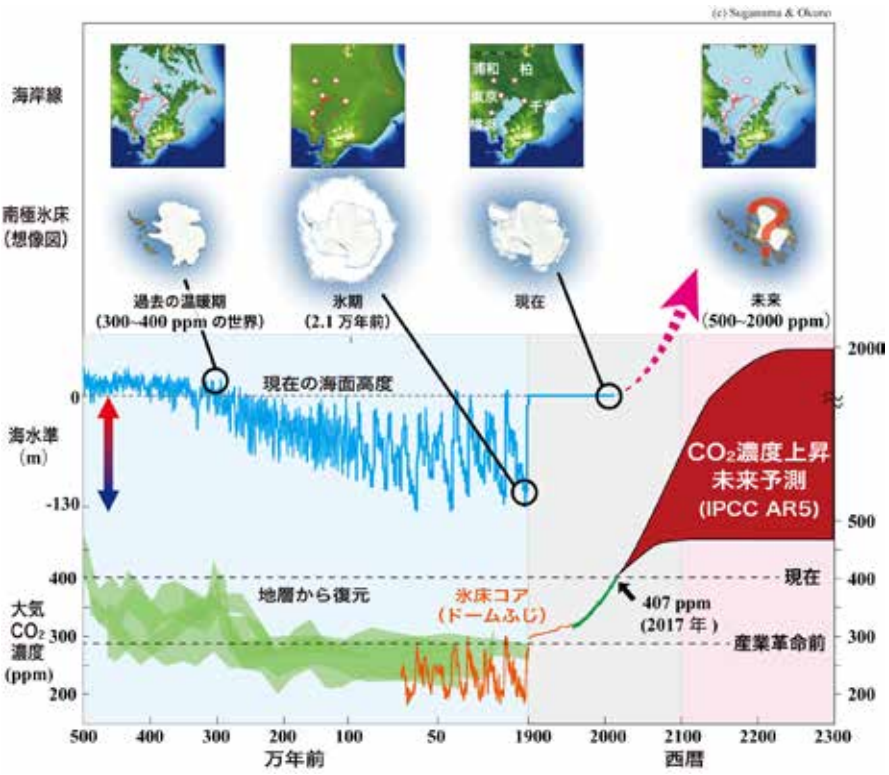


図 1　海水準、大気 CO_2 濃度、南極氷床の変遷と予想図。過去に CO_2 濃度が高い時代には、南極氷床は現在より縮小し海水準を押し上げた。 現在、CO_2 濃度は数百万年来の最高値を超えて上昇を続けており、南極氷床への影響が人類的な懸念となっている。

南極氷床と南大洋との間には強い相互作用がある（図 3)。例えば、南極氷床の縮小がもたらす淡水は、海水の低塩(低密度)化を招き、海洋の成層構造を安定化させる。これは南極底層水の生成を弱化させて亜表層の水温上昇を招き、氷床末端部を底面から融解してさらなる氷床損失をもたらすと考えられる。また、CO_2 増加による海洋酸性化は極域で最大となり、海洋生態系への影響を通じて CO_2 吸収を鈍化させ、さらなる温暖化と氷床融解をもたらしうる。

巨大リザーバである南極氷床や南大洋は相互に影響し合いながら変動し、全球環境の大変動をもたらす可能性が高い。しかし、観測の困難さから理解やモデル化が遅れており、特に南極氷床の 9 割以上を有する広大な東南極においてその傾向が顕著である。IPCC（国連の気候変動に関する政府間パネル）第 5 次評価報告書は、「20 世紀後半の温暖化が人為起源である可能性は極めて高い」と報告したが、南大洋と南極氷床において気候モデルによる再現と観測結果との差が大きいなど、理解の遅れを指摘した。西南極では気温や南大洋深層水温の上昇が観測されているが、海面水温や東南極の気温は有意に温暖化しておらず、海氷も北極海のように単調に減少してはいない。東南極には氷床が厚みを増している地域さえある。古環境の研究から、

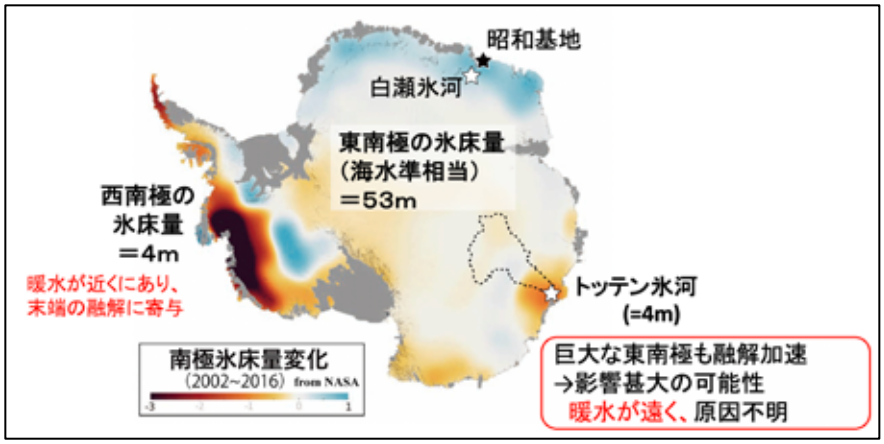


図 2　南極大陸の地理的特徴と氷床量（海水準相当）。氷床厚の変化を色で示す。(NASA)

南極氷床や底層水には一度超えてしまうと容易には後戻りできない「ティッピング・ポイント（Tipping point）」が存在し、そこに近づいている可能性も指摘されているが、観測やモデリング研究の圧倒的不足から、その実態は不明である。

南大洋・南極氷床の変動には、異なる時間・空間スケールの様々な相互作用が関与している。南極氷床では、棚氷下の海洋への暖水貫入による底面融解が鍵であり、氷床-海洋の相互作用の理解が重要である。一方で、温暖化には積雪増加により氷床を成長させる働きもあるため、大気－氷床の相互作用や、南極周極流と極前線帯の南北移動といった要素も重要である。南極アイスコアからは、南極の気温と CO_2 濃度が同期して変動したことが示され、全球炭素循環における南大洋の物理・生物・化学過程の重要性は明らかである。南大洋では栄養塩濃度の変化が観測され、その海洋循環や海氷変動との関連、莫大な生物生産量を持つ南大洋生態系への影響の解明が喫緊の課題となっている。

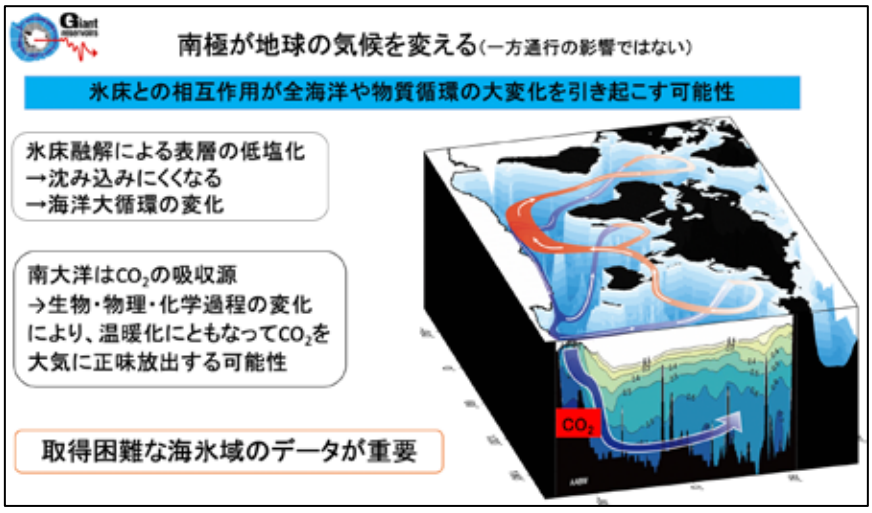


図３ 南大洋の役割と影響の例

本領域では、南大洋および南極氷床に関して、観測とモデリングにより素過程を理解し、種々の相互作用の実態とメカニズムを明らかにすることを目的とする。さらに、南大洋及び南極氷床を起点として生じる全球環境変動の将来予測につながる融合研究をめざす。本領域は、多分野の研究者が連携、融合研究することで、このシステムの理解と将来予測をめざして「南極環境システム学」を創成する。

革新的・創造的な学術研究の発展が期待される点

南大洋・南極氷床の複雑な相互作用を紐解く鍵は、現在の氷床・海洋・大気の相互作用に重点を置いた現場観測データに加え、アイスコア・海底コアや地形情報などによる古環境データを取得し解析すること、また、それらの知見を取り入れた気候-氷床モデルや海洋・物質循環モデルを用いた数値実験を総合的に展開することである。本領域は、それらの観測とモデルの融合から、過去-現在-将来を通した南極氷床・海洋・物質循環の応答特性を定量的に明らかにする。様々な相互作用の理解が本質的であり、既存の学問分野を超えた融合領域研究を進めることで、我が国の学術水準の向上・強化につながることが期待される。そのため、地質学、地形学、測地学、地球力学、気候力学、気象学、雪氷学、海洋物理学、海洋化学、生物学、計算科学、機械工学の多岐にわたる分野の研究者を組織した。

本領域では、日本が実績を持つ東南極に観測の軸足を置いて研究を進める。東南極（図2）は西南極より 1 桁大きい氷床体積を持つため、日本が地の利を活かして東南極の空白域に研究を展開すれば、南極氷床や南大洋が海水準や全球気候に深刻な影響を与える可能性を先んじて捉えられる。分野融合研究を加速し、南大洋・南極氷床結合システムの理解と全球環境へのインパクトを含めた学術研究の発展が期待される。

本領域の具体的な成果は以下に集約される。

・東南極氷床の代表的な流域と周辺海域をターゲット観測域として、表面や底面での融解過程、広域の表面質量収支や流動といった素過程や諸量を押さえ、衛星観測も合わせて現在および過去数十年の氷床質量収支と海洋・海氷・生態系の変動を明らかにする。

・観測の知見を取り入れた南極氷床モデルと海洋モデルを開発・結合し、アイスコアや古海洋のデータによる検証を経て、南極氷床融解による海水準上昇を予測する。

これらの成果は、南極氷床や底層水の不可逆的な激変への臨界点である「ティッピング・ポイント（Tipping point）」の条件（海洋や気候の状態）やメカニズム解明を通じ、IPCC やフューチャー・アース等への貢献が期待される。

南大洋・南極氷床の理解には、長期の継続的な観測が不可欠である。本領域が中心となり、東南極に軸足を置く諸外国との連携を進め、長期のモニタリングに向けた国際協力体制の整備も期待される。また、無人海中探査機や無人航空機を展開し、氷の下の海洋データ取得や氷床変化の広域マッピングを可能にする。外国でも開発と応用が模索されている分野であり、国際協力への寄与が期待される。

さらに、若手研究者が融合研究を進めることにより、個々の研究分野を超越した広い視点を持つ研究者に育ち、本領域が創出する「南極環境システム学」の発展への大きな継承財産となることが期待される。

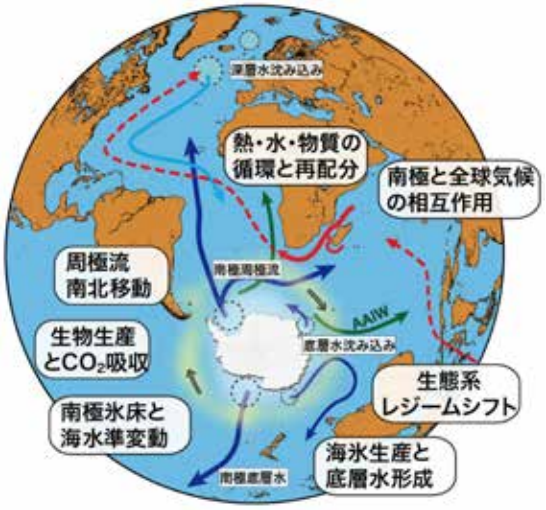


図４　全球変動を駆動する南大洋・南極氷床

研究分野：気候力学、気象学、雪氷学、海洋物理学、海洋化学、地質学、地形学、測地学、地球力学、生物学、計算科学、機械工学

キーワード：南極環境システム、南大洋、南極氷床、気候変動、海水準、ティッピング・ポイント

研究の方法

南極域では、大気場・氷床・海氷・海洋場が周極的に分布し、各環境要素の間には強い相互作用があるので、これらを一つのシステムとして捉える。観測とモデリングにより素過程を理解し、種々の相互作用の実態とメカニズムを明らかにする。観測は特に東南極をターゲットとし、海洋・氷床・固体地球・生態系の研究を展開する。また、氷床や海洋は長い時間スケールで変化するため、アイスコアや堆積物、岩石等を用いて過去の変動を復元する。局所スケールから半球・全球スケールまでを対象とした大気・氷床・海氷・海洋・固体地球のモデル研究を行い、観測や分析データとの連携による高度化を通じ、南大洋と南極氷床の変動要因と各種の相互作用を解明する。研究対象と研究体制の関係を図５に示す。

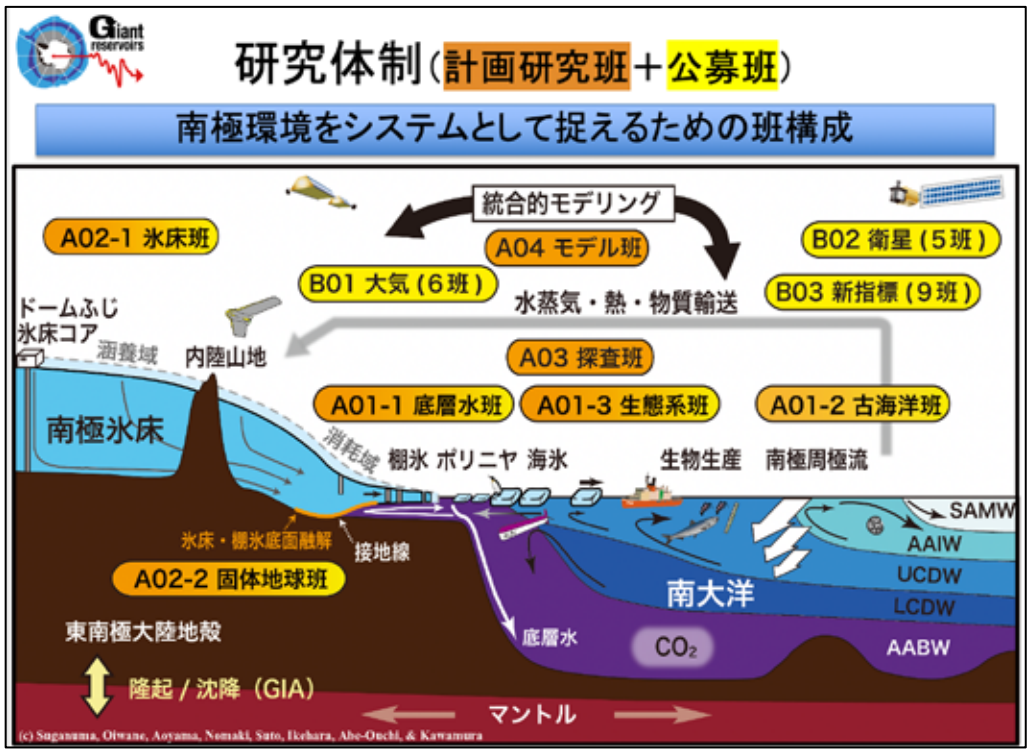
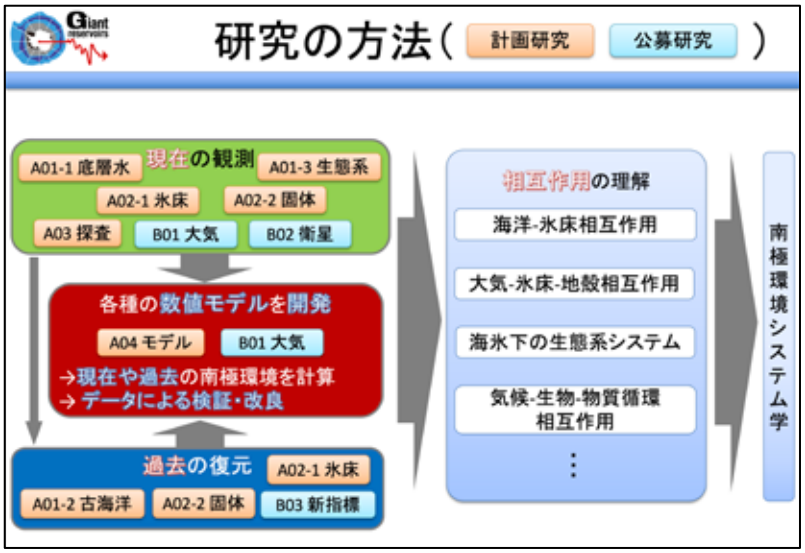


図５：南極環境システムの構成要素の横断面図。計画研究班（A）および公募研究（B）の主な研究対象領域を示す。

(1)研究項目 A01 熱-物質リザーバ南大洋とその変動（計画研究３班、公募６件）：海洋物理・化学、生物、地質等の観測や試料分析により、氷床-海洋間や海洋－生態系間などの相互作用プロセスや、過去の南大洋の物理環境・物質循環・生物動態等の変動の研究に取り組む。
(2)研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動（計画研究２班、公募３件）：南極大陸上の観測や衛星観測、アイスコアや堆積物の試料分析を行い、現在から氷期－間氷期スケールまでの南極の氷床・気候変動や固体地球との相互作用を解明する。
(3)研究項目 A03 未探査領域への挑戦（計画研究１班）：探査困難な領域に新たな観測機器を導入し、研究にブレークスルーをもたらすデータを取得する。特に、無人探査機および通年観測測器の氷下の海への導入や、無人航空機による氷河形状や地形の広域マッピングを行う。
(4)研究項目 A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（計画研究１班）：各種モデルの開発や観測データによる検証・改良を経て、観測と直接連携可能な高解像度シミュレーションから、過去の大規模気候・炭素循環変動や将来の長期氷床予測などの多彩な数値実験を展開することで、南極環境システムの総合理解を進める。
(5)研究項目 B01 大気の物理とモデリング（公募６件）：南極域における雲の物理と放射過程や、大気境界層プロセス、大気大循環と南極気候との関連など、大気科学を基本とした研究を進める。
(6)研究項目 B02 各種の衛星観測（公募５件）：氷床・海氷・海洋の変動を南極全域で連続して捉えるため、新たな衛星やセンサー、アルゴリズムを用いた研究を進める。
(7)研究項目 B03 新しい観測・分析手法を用いた研究（公募９件）：現場観測で得られる各種試料の新手法による分析や、それによる環境代理指標の開発、新手法を用いた観測研究などによる新知見の獲得を進める。



研究組織の連携体制

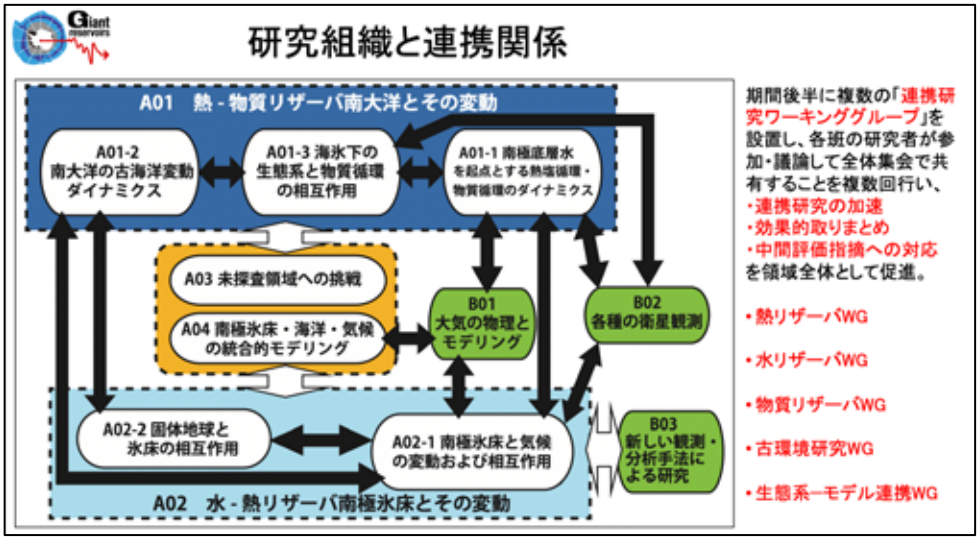
計画研究班は研究項目「A」に配置し、以下の連携体制をとった。

- **研究項目 A01：熱-物質リザーバ南大洋とその変動**：A02、A03 との連携観測や、試料・データ共有での A02 との連携、各種のプロセスや相互作用解明のための A04 との連携体制をとった。
- **研究項目 A02：水-熱リザーバ南極氷床とその変動**：上記 A01 との連携のほか、氷床・氷河の質量変動に関する観測で項目内や A03 との連携、各種プロセスや相互作用解明のための A04 との連携体制をとった。
- **研究項目 A03：未探査領域への挑戦**：無人機（水中、空中）の開発で A01 と A02 と連携し、詳細な海底地形データの作成と提供により A04 と連携した。
- **研究項目 A04：南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング**：過去から現在のデータによるモデルの高度化や制約のため、全ての計画研究班との連携体制をとった。

公募研究は、研究項目「A」に属して計画研究と直接連携する以外に、研究項目「B」を配置して**多分野間の連携を促進する体制**を構築した。

- **研究項目 B01：大気の物理とモデリング**：エネルギー・物質循環や氷床表面質量収支、気候モデルなどについて A02、A04 との連携体制をとった。
- **研究項目 B02：各種の衛星観測**：　海洋循環や海氷生産、氷床変動などに関して A01、A02 との連携体制をとった。
- **研究項目 B03：新しい観測・分析手法を用いた研究**：新たな環境指標の開発や境界領域の観測研究を進めるべく、試料やデータの共有や連携観測のため A01、A02 との連携体制をとった。

以上の連携体制は、計画班班長及び主要メンバーに若手研究者や公募研究を加えた「**拡大総括班**」での議論により構築し、当初より効果的な連携が行われるように配慮した。

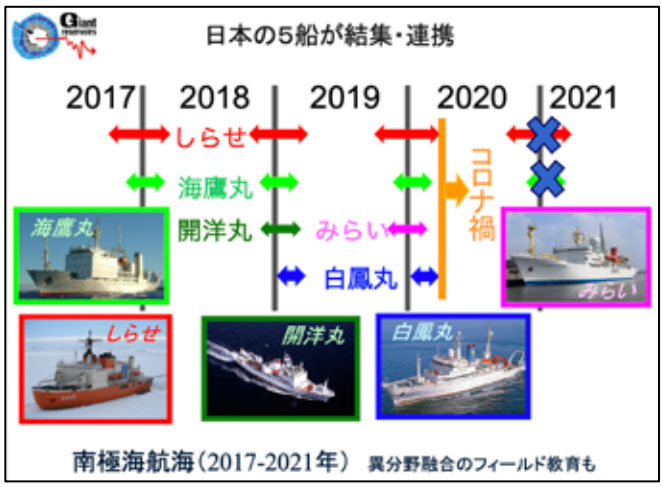


領域期間の後半（2019 年度以降）には、公募を含む各班からの参加により、3 つの**巨大リザーバーに対応するワーキンググループ（熱リザーバ WG、水リザーバ WG、物質リザーバ WG）**および**古環境研究 WG、生態系－モデル連携タスクチーム**を結成し、領域目標や中間評価所見を意識した連携研究議論や成果取りまとめを行い、それらを全体会合で共有・議論する活動を行った。これら一連の活動により、個々のメンバーが領域全体の目標を意識し、それぞれの研究進捗を踏まえた共通課題の発見やデータの共有、強化すべき課題の議論などを経て、さらなる連携研究を構築・実施することにつながった。

研究項目毎の目標と達成度

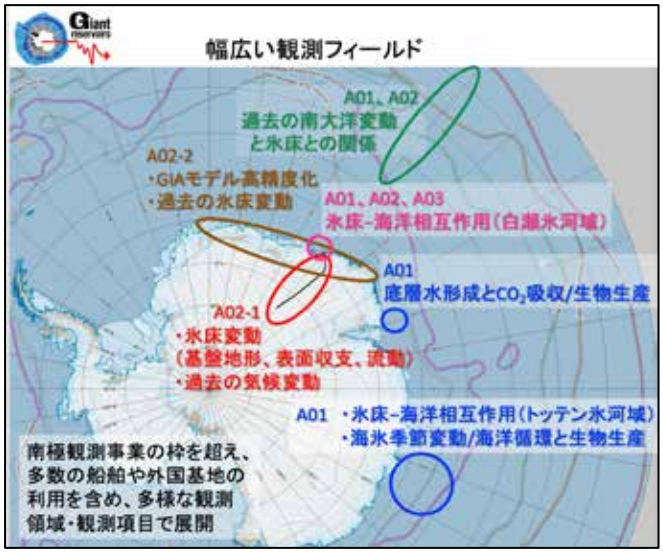
研究項目 A01 熱-物質リザーバ南大洋とその変動（略称：南大洋）

海洋観測や試料分析により、氷床-海洋相互作用プロセスや、過去から現在の海洋・物質循環、生物動態等の変動の解明を目指した。日本の 5 船による総合観測を行い(右図)、外国の 2 船も用いて多様な観測や試料採取を実施した。なお、主な連携観測は 2019 年度までに終了したため、コロナ禍による航海延期の影響は軽微であった。しらせ氷河域に加え、当初計画を超えて、2019 年度には東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河域の観測も実施した。棚氷が周極深層水により融解されるプロセスの解明や、底層水の動態把握、海底コア解析による水温と南極前線位置の復元、海氷変動が生態系に及ぼす過程の解明など、南大洋・南極氷床の相互作用と全球環境への影響に関する成果を得て、当初目的以上の達成を得た。



研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動（略称：南極氷床）

東南極を中心に現場観測や衛星データ解析、アイスコアや堆積物の分析を行い、現在から氷期－間氷期スケールまでの南極氷床変動や固体地球との相互作用、南極と全球気候の関係等の解明を目指した。棚氷の熱水掘削による観測や、広域の表面質量収支、基盤・表面地形、重力、GNSS や無人機による測量等の観測が成功し、過去の復元では、ドームふじアイスコアによる年代制約と古環境復元や、地形地質調査・試料解析による過去数万年間の氷床変動の規模とタイミングの制約などの成果を得た。氷床質量と気候変動の関連の理解



が進んだ上、GIA モデルが高精度化され、他班との連携による南極氷床の実態と変動の解明や気候モデル検証への寄与なども着実に進捗し、当初目的を十分達成した。

研究項目 A03 未探査領域への挑戦（探査班）

南極の海氷域と沿岸域に対して、無人観測技術の開発とデータ取得を目指した。海氷域から氷床縁で運用可能な無人海中探査機を中心として、設計から組立を経て、コロナ禍の影響は国内での氷海試験などにより回避し、南極海で運用可能なシステムを完成させた。また、無人通年観測システムの導入・運用による海洋鉛直構造の時系列データの取得や、沿岸域での無人航空機による氷床・露岩・海氷の表面地形広域マッピング、地上定点無人連続観測システムのデータ回収を実現した。厳しい自然環境を持つ南極域における無人観測技術開発等を大きく進展させ、当初目的を十分達成した。

研究項目 A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）

各種モデルの開発や数値実験により、南極の気候と氷床、南大洋の物理・化学過程や物質循環等からなる南極環境システムの理解を進めるとともに、現場観測および分析データとの連携によるモデル検証を経た変動メカニズムの解明を目指した。日射や温室効果ガスを入力して気候を計算する気候モデルや、大気と海洋の温度や降水量を入力する氷床力学モデル、海洋表面フラックスを入力する海洋物質循環モデルや領域モデルなどの高度化に成功し、観測研究との連携により棚氷融解に関する氷床－海洋相互作用を解明した。古気候に関するモデル計算とデータとの比較検証や、氷床モデルによる 1000 年間の長期予測や氷床のティッピングポイントの把握など、当初目的以上の達成を得た。

研究項目（公募）B01 大気の物理とモデリング

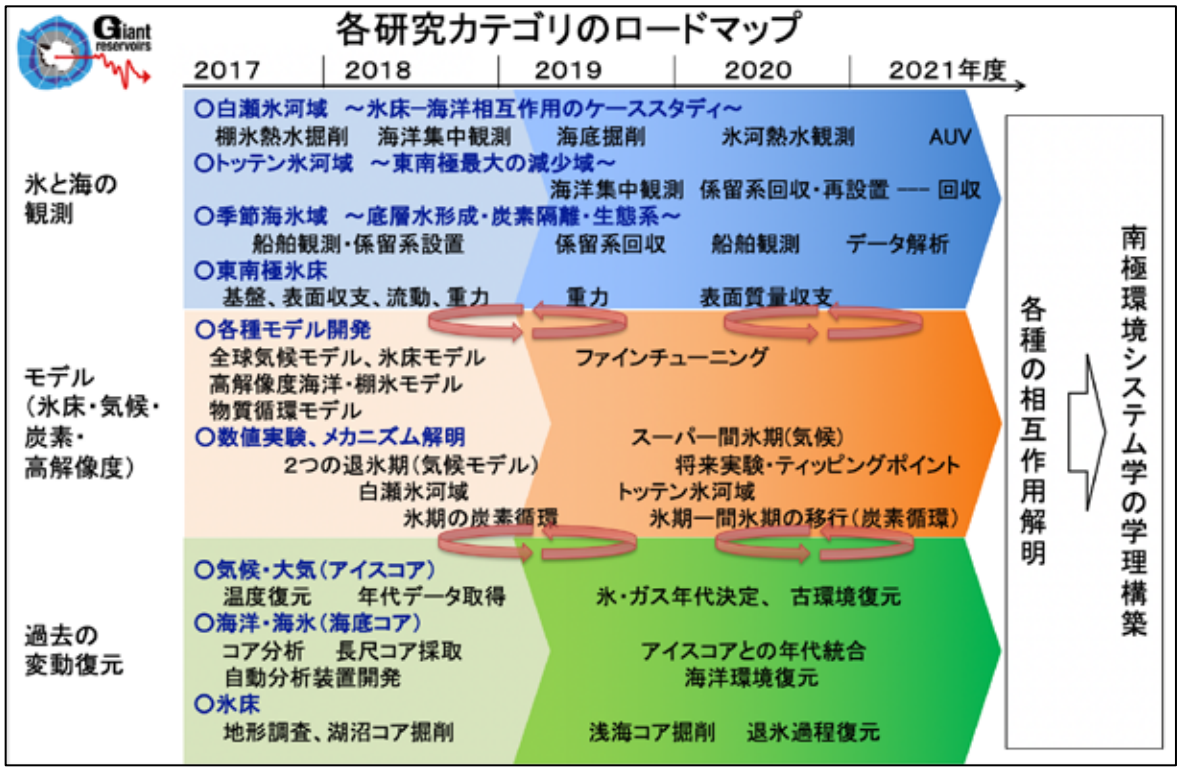
南大洋や南極氷床の変動に重要な、大気-海洋間や大気-氷床間の相互作用の解明を目指した。南極域における雲の物理と放射過程や、大気境界層プロセス、大気大循環と南極大気との関連など、大気科学を基本とした公募研究により計画研究を補い、領域気候モデルの南極への適用や全球気候モデル改良、各種のモデル班や氷床班、固体地球班との連携が進み、当初目的は十分達成された。

研究項目（公募）B02 各種の衛星観測

氷床・海氷・海洋の変動を南極全域で連続して捉えるため、人工衛星リモートセンシングの新展開を目指した。計画研究に含まれない衛星やセンサー、アルゴリズムを用いた研究が展開され、現場観測研究やモデル研究の計画研究との連携が進んだことから、当初目的は十分達成された。

研究項目（公募）B03 新しい観測・分析手法を用いた研究

南極環境システムの解明に資する新たな手法の開発と応用を目指した。現場観測で得られる各種試料の新手法による分析や、それによる環境代理指標の開発、新手法を用いた観測研究など、多くの計画研究班との連携による多様な研究が行われ、当初目的は十分達成された。



当該学問分野及び関連学問分野への貢献

本領域が目指した研究においては、分野をまたがった様々な相互作用の理解が本質的であるため、既存の学問分野の枠を超えた複合的なアプローチが不可欠である。そのため、応募時には「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択した。領域計画が開始し、当初挙げた通り、地質学、地形学、測地学、地球力学、気候力学、気象学、雪氷学、海洋物理学、海洋化学、生物学、計算科学、機械工学の各分野にまたがる融合研究を推進した。本領域により新たな分野融合・連携研究体制が構築され、南極氷床と南大洋を中心とする南極環境をシステムとして研究する「南極環境システム学」が創成された。その結果、以下に例示するように、地球科学や工学の広い分野にインパクトを与えたほか、海水準上昇や全球気候変動に関して社会的にも波及効果が生まれたことなどから、目標とした融合領域の創成および革新的・創造的な学術研究の発展への貢献は達成できたと言える。

（1）現場・衛星観測データと数値モデルの密な連携によるプロセス解明：地球科学へのインパクト

観測困難な東南極の氷床－海洋相互作用に関して、固体地球物理学・海洋物理学・地形学・雪氷学・計算科学の融合により、新たに構築した詳細海底地形図の高解像度海洋モデルの境界条件への使用や、氷河にあけた孔を利用した海洋観測を実施した結果、現場で観測された温度・塩分の３次元分布のモデルによる再現が可能になったほか、外洋からの暖水流入→棚氷融解→外洋への再流出という一連の過程の解明に成功した。また、現場観測データと衛星データ解析の連携から、暖水輸送メカニズムが海洋の定在渦であることを解明するなど、分野間の連携がもたらしたブレークスルーは、南極のみならず、中低緯度や北半球を含む地球表層を対象とする研究分野に広くインパクトを与えた。

（2）過去と現在の知見によるモデル信頼性の向上：気候科学へのインパクト

海水準の将来予測は、直接観測期間ではカバーできない氷床の長期変動メカニズムの理解とモデル化や、氷床モデルを駆動する全球気候モデルの正確性の確保が不可欠である。そのため、気候力学・気象学・雪氷学・古環境学・計算科学の融合により、多くの気候モデルが持つ南大洋の温暖バイアスを解決したほか、過去の気候や氷床の変動を様々な手法により復元し、全球気候モデルの長期的振る舞いの検証を経て、最終間氷期の南極氷床縮小に至った温暖化の原因を解明した。この温暖化が北半球の氷床や気候と強くリンクしていたことなど、グローバルからローカルまでの広範なスケールを対象とした気候科学にインパクトを与えた。

（3）物理・化学過程と物質循環・生態系のリンク：物質・炭素循環学へのインパクト

生態系班－モデル班連携ワーキンググループによる連携研究から、各国の全球生態系モデルが予測する海洋生産量に著しいバイアスが存在し、その原因が南大洋冬期データの不足であることを明らかにした。また、物理・化学・物質循環・生態系モデルを含む海洋モデリングと古気候・古海洋学の連携から、氷期の二酸化炭素濃度低下の再現に成功し、炭素循環に係る物理・化学・生物生産の複合的過程を解明した。これらの成果は、今後の生物生産性や炭素循環等の研究にインパクトを与える。

（4）新たな無人観測や AI 活用の技術開発：工学や環境学、産業界へのインパクト

南極の探査困難領域を対象にした無人観測技術や、AI を活用した微化石分取システムなどは、他分野や産業界への普及や応用が期待される。

（5）海水準上昇とティッピングポイントの理解がもたらす社会への波及効果

上述した棚氷融解過程の理解や、現在のプロセスを再現可能な南極氷床モデルによるシミュレーションから、氷床質量変化の気候変化に応答や、氷床のティッピングポイントの存在が明らかにされたことは、気候影響の緩和や対応などの検討や、人々の意識の変化につながり得るものであり、今後の連携研究による予測の高精度化を含め、大きな波及効果をもたらすことが期待される。

若手研究者の育成に関する取組

南極春の学校（スプリングスクール）（2017 年度、55 人参加）・若手向け学際的解説書

全国の学生に本領域を知ってもらい、関心を持った学生や若手研究者に本領域が目指す学際研究を伝えるべく、初年度に「南極　春の学校 2018～目指せ国際・学際研究者～」として 3 日間の合宿形式でのスクールを開催した。31 名の学部生と 24 名の大学院生が参加し、南極若手会に多くの学生が参加する契機になったとともに、本領域メンバーが所属する大学院に参加者の 11 名が進学するなど、領域の間口を広げた。このほか、日本地球惑星科学連合（JpGU）大会における展示ブースによる学生向けの発信を行い、訪問者が関連大学院を受験するといった効果が見られた。

また、未知なる南極の学際研究に魅力を感じてもらうための入門書として、分野外の研究者や若手研究者・学生を対象とし、20 編 284 ページからなる解説集「南大洋・南極氷床」(低温科学第 76 巻)を初年度に出版した。

南極若手会（8 回開催）

発足については、領域主要メンバーの 30 代の常勤研究者が中心となってキックオフ会合（9 月）に合わせた発足の支援を行った。その後はポスドクと学生が運営の主体となり、学際・国際研究者を目指すことを念頭におき、分野を超えた勉強会や研究ツールの演習、研究計画作成ワークショップなどの取り組みを行った。その結果、異分野の研究者との共著論文出版など、分野間連携に取り組む姿勢や実際の研究実績につながった。

若手海外派遣支援（26 件）

若手研究者の国際学会派遣支援や海外派遣支援（外国での研究滞在）を実施した。国際学会派遣支援は、若手研究者に国際学会での発表経験を積ませるだけに留まらず、学会の前後に関連の研究機関に短期訪問させる事により、より効果の高い派遣支援となった。若手研究者海外派遣支援は、海外の関連研究機関において精力的に研究面での技術習得に努めるに留まらず、将来のさらなる長期滞在・本格共同研究に発展するようなコネクション作りにつながる派遣となった。将来の共同研究や長期在外研究を視野に入れた滞在を行ったことが年次報告会で報告されるなど、周りの若手研究者への刺激にもなり、良い効果が生まれた。

学際的フィールド教育（若手 23 名が参加）

船舶観測に 6 班から学生やポスドクが乗船し、共同観測や船内セミナーを行うなど、若手の分野間交流を促進した。領域としてモデル分野の若手研究者のフィールドワーク参加の支援を行い、計画班の複数の代表が乗船するなどして、フィールド学際教育の実践を心がけた。

国際シンポジウム（2018 年度）

学際的な場で多様な分野の聴衆に伝わる研究発表や、異分野の研究者との質疑応答や議論の経験の機会を設けるため、国際シンポジウムを 2 年目に前倒しして開催し、32 名の若手が参加した。経験の浅い若手研究者に口頭発表の機会を積極的に与え、計画研究の全ての分野から海外研究者を招聘し、若手研究者のモチベーションと緊張感を高めることも考慮した。海外研究者や領域外の参加者から若手の発表のレベルの高さに賛辞が寄せられたほか、領域研究者と海外招聘者との打ち合わせも多数開かれるなど、若手が刺激と自信を得る機会となった。さらに、海外からの招聘研究者との研究打ち合わせがシンポジウムの期間中及び前後の期間に多数設定され、若手研究者が国際的・学際的センスを獲得する機会となった。

年次報告会

多分野の研究者が集まる年次報告会で、若手の発表を奨励するなど、若手育成を心がけた。実際に毎回多くの若手研究者の発表と議論が行われ、分野連携による議論や論文執筆につながった。

その他の取り組み

連携促進 CV シート（研究協力者を含む全員の専門分野や研究テーマ、スキルや売り、連絡先などの一覧表）を作成して共有し、領域の報告会や学会等で見聞きして後に興味が湧いた際や、分野外のスキルを要する困難に当たった際などに、若手研究者が連絡や連携を取りやすい仕組みを作った。また、各班の裁量により、分野外の若手研究者をポスドクとして雇用し（海洋物理で学位を取得した者を海洋化学の研究室で雇用）、学際性の高い研究者の育成に取り組んだ。

研究費の使用状況

総括班経費の領域連携研究等への活用状況

・海鷹丸を用いた連携海洋観測（傭船関連費用 17,135 千円）
　東京海洋大学の海鷹丸の延長航海費を総括班経費により支出し、海氷縁の海洋物理・化学・生物や底層水の混合・変質過程など、南大洋での連携観測を 2018 年 1 月、2019 年 1 月、2020 年 1 月に実施した。生態系班、古海洋班、底層水班、公募研究の連携研究が行われた。

・連携研究促進(3,524 千円)
　連携観測や堆積物サンプリング、研究集会への旅費、海洋観測データのデジタル化、春の学校で用いるテキストの印刷に使用した。

・若手育成（3,528 千円）・国際支援（14,370 千円）
　公募制の派遣支援制度を創設し、若手研究者が積極的に国際学会や野外観測、海外研究共同研究に参加できるよう支援した。

・領域全体会合（6,286 千円）
　キックオフミーティングや年次報告会・拡大総括班会議を開催し、研究発表や進捗報告のほか、領域内の有機的連携と融合研究に向けた議論や、学際的な場における若手研究者の発表・議論の機会として活用した。

・アウトリーチ活動（7,056 千円）
　学会におけるブース出展、ニュースレター、ホームページ、YouTube などにより、本領域の目標や研究成果を発信し、若手研究者の間口を広げた。

領域内で共有する設備・装置・試料などの活用状況(総括班以外の予算)

・無人探査機の活用（探査班が導入）
　南極での海氷および棚氷の下の海洋観測を目指し、探査班・底層水班・生態系班・氷床班・固体地球班が協力し、無人水中探査機(AUV)を開発した。確実に AUV を回収するため小型遠隔操縦ロボット(ROV)も開発した。また、固体地球班との連携で AUV 展開の難しい沿岸域の浅海観測用小型 ROV も開発した。探査班・固体地球班・氷床班と協力し、回転翼・固定翼・レーザ測量用回転翼の無人航空機(UAV)で、実際の南極で地形測量を実施し、UAV データによる表面地形の精度評価、高精細地形や積雪変動を導出して積雪による地殻変動や重力変化を評価した。

・白鳳丸による連携観測（古海洋班、底層水班、探査班）
　平成 30 年度の白鳳丸航海では、各班が旅費を支出して観測に乗りだし、本領域に関わる 15 名ほどの研究者と学生が参加し連携観測を行った。古海洋班、底層水班、探査班の各班の観測目的に対して相互にサポートしあう体制や人員配置を事前に構築したことで、限られた人員で最大限の効率のよい観測が達成された。さらに、分野(班)間でサポートしあうことを通じて互いの理解が深まり、船上での議論を経て、分野連携研究の萌芽的テーマも見出された。

・係留系観測（各班が測器を導入）
　ベースとなる流速・水温・塩分計(底層水班が導入)の他にセジメントトラップ(古海洋班が導入)や酸素計・自動採水器(底層水・生態班が導入)を各班が持ち寄り、効率的な系を設計・設置できた。回収後の解析も協力して行い、採集試料も共有することで連携研究を促進した。

・令和元年　白鳳丸による連携観測(底層水班、古海洋班、生態系班、探査班)
　海底峡谷に設置した 3 系の係留系の回収に成功した。12 本の海底コア採取とセジメントトラップ沈降粒子サンプルの回収成功などにより、連携研究のための研究試料やデータを確保した。

・しらせによる連携観測(底層水班、探査班)（令和元年）
　トッテン氷河域で、24 点の AXCTD 観測や、41 点の AXBT 観測、27 点の CTD 観測、広範囲海底地形調査といった連携観測を実施したほか、4 系の係留系を設置し、2 系の係留系の回収に成功した。

・海鷹丸による連携観測(底層水班、生態系班)（令和元年）
　ビンセネス湾沖で、3 系の係留系の回収に成功した。

・AI を活用した「自動選別・集積システム」（古海洋班が導入）
　古海洋班が開発し特許出願中の微化石自動分取技術が、固体地球班による氷床融解年代測定に応用された。粉砕した岩石から石英粒子を抽出する際、従来の化学的処理に代わり自動分取技術を用いることで、大幅な高速化とコストダウン、環境負荷の低減が可能となった。

・南極沿岸・南大洋での海底堆積物試料の採取と分析（古海洋班、固体地球班、氷床班）
　過去に採取された南極沿岸の海底堆積物試料について、氷床・棚氷・海氷変動を理解するために、古海洋班および固体地球班がそれぞれの試料を共有して解析を進めた。また、フランス船に古海洋班メンバーが乗船して採取した試料により、南大洋の古海洋変動と南極氷床変動の解析を共同で進めた。モデル班には推定した過去の海水温変動などを共有し、気候変動メカニズムに関する研究を進めた。過去の氷床末端の位置や暖水流入による棚氷の底面融解を探るべく、氷床班が棚氷の熱水掘削孔を通じて採取した棚氷下の海底堆積物の分析を固体地球班が進めた。

・雪尺等の観測データの解析結果の共有(氷床班、モデル班、公募研究)
　1990 年代から続く沿岸から内陸までの雪尺観測結果の誤差を評価した上でコンパイルし、涵養量のトレンド検出や数値モデル検証等に共有活用した。

計画研究の基本情報

X00 熱－水－物質の巨大リザーバ:全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床（総括班）

1. 研究組織

研究代表者	川村賢二	国立極地研究所
研究分担者	大島慶一郎	北海道大学・低温科学研究所
	池原実	高知大学・海洋コア総合研究センター
	茂木正人	東京海洋大学
	福田洋一	国立極地研究所
	野木義史	国立極地研究所
	阿部彩子	東京大学・大気海洋研究所
	菅沼悠介	国立極地研究所
	田村岳史	国立極地研究所
	末吉哲雄	海洋研究開発機構
	巻俊宏	東京大学・生産技術研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	19,600,000	5,880,000	25,480,000
H30 年度交付	23,780,000	8,370,000	32,150,000
R 元年度交付	23,170,000	8,100,000	31,270,000
R2 年度交付	19,520,000	10,650,000	30,170,000
R3 年度交付	45,930,000	6,600,000	52,530,000
合計	132,000,000	39,600,000	171,600,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

本領域研究は、南大洋及び南極氷床が種々の相互作用を通じて駆動する全球環境の変動を明らかにする事を目的とする。そのため、南大洋・南極氷床に関わる様々な分野で国際的に活躍している、海洋域の物理、化学、生物、地質、さらに南極特有の氷床、固体地球、海氷、および古環境を専門とする中堅・若手研究者を、新学術領域「南極環境システム学」創成のために集結した。総括班は、本領域の研究目的の達成と新たな学術領域の創成のため、人材を適材適所に配置するとともに、個々の専門分野を超えた広い視点から、研究者間や研究班間の有機的な連携を推進することを目的とする。また、各種の観測プラットフォームや共同利用・共同研究拠点との調整を行うことで、各計画研究の効率的な実施をサポートする。

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）

1. 研究組織

研究代表者	大島慶一郎	北海道大学・低温科学研究所
研究分担者	川合美千代	東京海洋大学
	北出裕二郎	東京海洋大学
	勝又勝郎	海洋研究開発機構
	中野善之	海洋研究開発機構
	水田元太	北海道大学・地球環境科学研究院
	田村岳史	国立極地研究所
研究協力者	青木茂	北海道大学・低温科学研究所
	渡辺豊	北海道大学・地球環境科学研究院
	佐々木建一	海洋研究開発機構

	津旨大輔	電力中央研究所
	平野大輔	国立極地研究所
	伊藤優人	国立極地研究所
	二橋創平	苫小牧工業高等専門学校
	大橋良彦	東京海洋大学
	柏瀬陽彦	苫小牧工業高等専門学校
	中山佳洋	北海道大学・低温科学研究所
	Mensah Vigan	北海道大学・低温科学研究所
	嶋田啓資	東京海洋大学
	中田和輝	宇宙航空研究開発機構
	小野数也	北海道大学・低温科学研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	45,900,000	13,770,000	59,670,000
H30 年度交付	15,600,000	4,680,000	20,280,000
R 元年度交付	28,130,000	9,060,000	37,190,000
R2 年度交付	18,070,000	4,800,000	22,870,000
R3 年度交付	15,600,000	4,680,000	20,280,000
合計	123,300,000	39,990,000	160,290,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

地球の全海水の30－40%を占める南極底層水は、巨大な負の熱とCO_2等の物質のリザーバであり、全球の気候システムや長期の気候変動の鍵を握る。近年の観測から底層水の減少が明らかになり、底層水が沈み込むことで駆動される熱塩（子午面）循環の弱化の可能性が指摘されている。日本を中心とした研究グループにより、南極第2 の海氷生産海域である東南極にあるケープダンレー沖が未知（第4）の底層水生成域であることが発見された。本研究は、東南極をターゲットに、底層水の形成域・生成量が、高海氷生産による重い水の生成とそれを抑制する氷床融解の兼ね合いでどう決まるかを明らかにし、底層水を起点とする熱塩・物質・栄養塩循環及びその変動に対し、全球的な視点も含めた深い理解をめざす。複数の化学トレーサの観測を取り入れて、底層水形成量・循環の時間スケール・氷床融解水の寄与率・それらの変動を定量化し、近年の氷床融解加速と底層水変質との関係解明をめざす。その基礎的理解のために、東南極をターゲットに海洋-海氷-氷床相互作用の素過程の実態に直接観測から迫る。さらに、地質・物理・化学の研究者が共同で東南極での底層水の未知なる変遷史を明らかにする。

A01-2 南大洋の古海洋変動ダイナミクス(古海洋班)

1. 研究組織

研究代表者	池原実	高知大学・海洋コア総合研究センター
研究分担者	関宰	北海道大学・低温科学研究所
	板木拓也	産業技術総合研究所
	佐藤暢	専修大学
	井尻暁	神戸大学
研究協力者	河潟俊吾	横浜国立大学
	山本正伸	北海道大学大学院・地球環境科学研究院
	大河内直彦	海洋研究開発機構
	岡崎裕典	九州大学大学院・理学研究院
	松井浩紀	秋田大学大学院・国際資源学研究科

	加藤悠爾	筑波大学・生命環境系地球科学域
	小坂由紀子	産業技術総合研究所
	西田尚央	東京学芸大学
	徳田悠希	公立鳥取環境大学

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	44,400,000	13,320,000	57,720,000
H30 年度交付	21,600,000	6,480,000	28,080,000
R 元年度交付	19,600,000	5,880,000	25,480,000
R2 年度交付	17,500,000	5,250,000	22,750,000
R3 年度交付	16,800,000	5,040,000	21,840,000
合計	119,900,000	35,970,000	155,870,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

南大洋は負の熱とCO_2をはじめとする物質の巨大リザーバであり、全球気候変動の鍵を握る。南大洋を特徴付ける南極周極流（ACC）や海氷、表層成層化などの変動は全球気候変動を駆動するキープロセスとされるが、それらの変動の実態は未解明である。そこで、ACCとウェッデルジャイアを海氷の移流や分布の支配要因であり、亜熱帯と南極圏を隔てる熱的障壁でもあると捉え、それらの変動史を異なる時間スケールで復元する。南大洋における古海洋変動を精度良く復元するための古環境指標（プロキシ）の開発と高精度化を行い、それらを海底コア解析に応用する。近未来の温暖化地球のアナロジーとなるスーパー温暖期を含む第四紀の氷期-間氷期サイクル、および、鮮新世温暖期から第四紀への全球寒冷化における南大洋の変動を復元し、ACC・ウェッデルジャイアと海氷移流の南北・東西シフトと全球気候変動との相互作用の実態を解明する。これにより、新学術領域研究の達成目標である「鮮新世/更新世の全球的寒冷化と氷期-間氷期サイクルにおける南大洋・南極氷床変動の復元と理解」に貢献する。

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用(生態系班)

1. 研究組織

研究代表者	茂木正人	東京海洋大学
研究分担者	綿貫豊	北海道大学大学院・水産科学研究院
	真壁竜介	国立極地研究所
	高尾信太郎	國立環境研究所・地球環境研究センター
	黒沢則夫	創価大学
研究協力者	高橋邦夫	国立極地研究所
	鈴木秀和	東京海洋大学
	溝端浩平	東京海洋大学
	立花愛子	東京海洋大学
	佐野雅美	東京大学・大気海洋研究所
	石野沙季	産業技術総合研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	38,130,000	12,210,000	50,340,000
H30 年度交付	16,970,000	4,320,000	21,290,000
R 元年度交付	15,900,000	4,470,000	20,370,000
R2 年度交付	14,400,000	4,320,000	18,720,000
R3 年度交付	11,000,000	3,300,000	14,300,000
合計	96,400,000	28,620,000	125,020,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

南大洋の環境変動が海洋生態系にもたらす影響を解明する上で、氷海域における大気—氷床・海氷—海洋結合システムと海洋生態系との関係がミッシング・リンクとなっている。本研究では、特に氷縁域と海氷下の生態系に着目し、海氷の消長と「生物群集の動態」および「それらが駆動する物質循環」との関係解明を目的とする。申請者らの研究により、東南極ではオキアミに依存する食物網だけでなく、海氷変動に影響されるハダカイワシ科魚類に依存する（非オキアミ依存）食物網の存在が示唆されている。本研究の精緻な観測から、海氷が介在する南大洋生態系の新描像を提案し、中・長期的な海氷変動を含む南極環境変動が生態系に及ぼす影響を評価する。

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用(氷床班)

1. 研究組織

研究代表者	川村賢二	国立極地研究所
研究分担者	植村立	名古屋大学
	本山秀明	国立極地研究所
	杉山慎	北海道大学・低温科学研究所
	澤柿教伸	法政大学
研究協力者	飯塚芳徳	北海道大学・低温科学研究所
	青木周司	東北大学大学院・理学研究科
	堀内一穂	弘前大学大学院・理工学研究科
	東久美子	国立極地研究所
	藤田秀二	国立極地研究所
	関宰	北海道大学・低温科学研究所
	中澤文男	国立極地研究所
	平林幹啓	国立極地研究所
	大藪幾美	国立極地研究所
	津滝俊	国立極地研究所
	箕輪昌紘	北海道大学・低温科学研究所
	北村享太郎	国立極地研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	27,800,000	8,340,000	36,140,000
H30 年度交付	23,580,000	7,170,000	30,750,000
R 元年度交付	24,790,000	10,020,000	34,810,000
R2 年度交付	33,620,000	7,620,000	41,240,000
R3 年度交付	24,210,000	7,050,000	31,260,000
合計	134,000,000	40,200,000	174,200,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

南極氷床は地球最大の淡水リザーバであり、気候変化に対する応答量と速度は重大な関心事である。また南大洋は全球エネルギー収支を左右する熱リザーバであり、最大の CO_2 リザーバでもある。本計画研究は、南極氷床と気候の状態や変動・相互作用を、直接観測や氷床コアの分析、衛星解析、過去に蓄積されたデータから解明する。特に、気温や降雪量、海氷、大気組成に関わる分析や新指標の確立、現在の氷床末端と海洋の相互作用解明を軸とした、以下の課題に取り組む。

① ドームふじ氷床コアや沿岸氷床コア、海底コアデータの解析から、南極及び全球の環境変動を復元する。特にモデルの入力・検証データとなる滝中 CO_2 や、温度復元のための水同位体や希ガス、放射強制力や物質循環に関わるエアロゾル、気候不安定性理解のためのメタン濃度を復元し、年代制度を高めてモデルや海底コアとの比較研究を行う。また、海氷由来の成分を氷床コア中に同定・測定し、海氷変動復元のためのプロセス研究を推進する。

② 氷床沿岸部や氷河・棚氷の内部と底面、棚氷下の海洋を総合的に観測し、氷床の質量収支や流動、底面融解を測定する。衛星データ解析や、過去の観測で蓄積された現地データと合わせて氷床の氷損失を定量化し、流動変化や接地線交代などの実態とメカニズムを理解する。

A02-2 固体地球と氷床の相互作用(固体地球班)

1. 研究組織

研究代表者	福田洋一	国立極地研究所
研究分担者	西島潤	九州大学大学院・工学研究院
	風間卓仁	京都大学大学院・理学研究科
	中村和樹	日本大学
	土井浩一郎	国立極地研究所
	菅沼悠介	国立極地研究所
	奥野淳一	国立極地研究所
研究協力者	新谷昌人	東京大学・地震研究所
	金田平太郎	中央大学理工学部
	青山雄一	国立極地研究所
	三浦英樹	青森公立大学
	石輪健樹	国立極地研究所
	金丸龍夫	日本大学文理学部地球科学科
	岡大輔	北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所
	羽田裕貴	産業技術総合研究所
	入江芳矢	国立極地研究所
	川又基人	土木研究所・寒地土木研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	43,200,000	12,960,000	56,160,000
H30 年度交付	14,400,000	4,320,000	18,720,000
R 元年度交付	30,780,000	9,390,000	40,170,000
R2 年度交付	20,670,000	6,060,000	26,730,000
R3 年度交付	20,250,000	6,060,000	26,310,000
合計	129,300,000	38,790,000	168,090,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

東南極氷床は，南極氷床の9 割以上を占めており，全球的な将来環境予測に不可欠な地球システムの構成要素であるにも関わらず，その変動メカニズムはほとんど解っていない。その理由の一つは氷床荷

重変動に対する固体地球の粘弾性応答（Glacial Isostatic Adjustment: GIA）の不確定性にある。本計画研究では，地殻変動や重力変化，氷床流動や海水準変動などの測地学的観測と，海岸線隆起，氷河地形などの地形学的観測から，東南極のGIAを観測的に明らかにし，衛星データなども加味することで，東南極のGIA モデルの精度を氷床量変動の定量的評価にも耐えうるよう向上させる。さらに，他計画研究との連携で，過去数100 万年前から現在に至る精密な氷床変動過程の復元を行い，温暖化に対する氷床変動メカニズムやその気候変動への影響を解明する基礎を与え，将来的な全球気候変動予測に貢献する。

A03 未探査領域への挑戦(探査班)

1. 研究組織

研究代表者	野木義史	国立極地研究所
研究分担者	青木茂	北海道大学・低温科学研究所
	吉田弘	海洋研究開発機構
	巻俊宏	東京大学・生産技術研究所
	沖野郷子	東京大学・大気海洋研究所
	青山雄一	国立極地研究所
	末吉哲雄	海洋研究開発機構
研究協力者	田村岳史	国立極地研究所
	中谷武志	海洋研究開発機構
	有馬正和	大阪府立大学・大学院工学研究科
	藤井昌和	国立極地研究所
	山縣広和	東京大学・生産技術研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	28,400,000	8,520,000	36,920,000
H30 年度交付	77,690,000	23,670,000	101,360,000
R 元年度交付	33,950,000	10,560,000	44,510,000
R2 年度交付	24,100,000	6,840,000	30,940,000
R3 年度交付	20,060,000	5,670,000	25,730,000
合計	184,200,000	55,260,000	239,460,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

南極氷床と南大洋は、互いに影響しつつ急速に変化し始めた可能性が指摘されている。その兆候は、氷河流動の加速や棚氷の崩壊、底層水生成量の変化など、南極氷床の周縁部と南大洋の沿岸域に顕著に現れる。それらの現象を把握し理解するためには、沿岸域での海洋と雪氷、地形の観測が不可欠だが、海氷と棚氷の下にある海中の観測や、無数のクレバスが存在する沿岸部の雪氷観測は困難を極めるため、ほとんど実施されていない。一方、低中緯度の海洋や山岳氷河等ではロボット技術を利用した無人観測技術が急速に発展しつつある。本課題では、こうしたロボット技術を未探査領域である南極沿岸の海氷域と沿岸域に適用することで、新たなデータ取得を目指す。南極で運用可能な無人探査機および無人観測装置を導入し、海氷域や沿岸域での探査・運用手法を確立する。これにより、海氷下の海洋物理化学や地質、生態系、氷河流動や地形などの統合データセットの取得と解析を目指す。

A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング(モデル班)

1. 研究組織

研究代表者	阿部彩子	東京大学・大気海洋研究所
研究分担者	岡顕	東京大学・大気海洋研究所
	Ralf GREVE	北海道大学・低温科学研究所
	吉森正和	東京大学・大気海洋研究所
	齋藤冬樹	海洋研究開発機構
	草原和弥	海洋研究開発機構
研究協力者	山本彬友	海洋研究開発機構
	渡部雅浩	東京大学・大気海洋研究所
	芳村圭	東京大学・大気海洋研究所
	小室芳樹	海洋研究開発機構
	鈴木健太郎	東京大学・大気海洋研究所
	奥野淳一	国立極地研究所
	松村義正	東京大学・大気海洋研究所
	津滝俊	国立極地研究所
	小林英貴	富山大学・理学部
	小長谷貴志	東京大学・大気海洋研究所
	シェリフ多田野サム	Leeds 大学
	陳永利	東京大学・大気海洋研究所

2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H29 年度交付	9,100,000	2,730,000	11,830,000
H30 年度交付	20,300,000	6,090,000	26,390,000
R 元年度交付	24,800,000	7,440,000	32,240,000
R2 年度交付	22,700,000	6,810,000	29,510,000
R3 年度交付	22,700,000	6,810,000	29,510,000
合計	99,600,000	29,880,000	129,480,000

3. 研究概要(領域開始時の記述)

南極氷床は巨大な淡水リザーバであり、気候変化に対する応答は極めて遅いとされてきた。ところが近年の観測やアイスコア、地質記録などから氷床が予想外に短期間に大きな変動をしていたことがわかってきた。また、海洋は巨大な炭素と熱のリザーバであり、長期的な CO_2 変動や気候変動は深層が支配し、南大洋がその鍵を握る。ところが、現状の気候モデルにおける南極と南大洋の再現は甚だ不十分であり、将来予測に重大な懸念を与えている。本研究では、これまで蓄積した各種のモデリング手法に、観測に基づく最新知見を取り入れ、南極氷床・南大洋・極域気候の過去や現在の状態や変動のしくみを明らかにし、将来予測に貢献することを目指す。特にモデルの海洋性氷床に関する物理プロセスを高度化し、氷床―海氷―大気―海洋の相互作用を考慮した気候―氷床モデルを構築する。数値実験により、近年および過去の変動が南極の異なる地域や時間スケールでどう異なるのかを調べる。過去数万年から数十万年のアイスコアや海底コア、地形調査データを気候モデルの有力や検証に用いつつ、南極氷床の形状変動や、海洋・海氷の変動、炭素循環の変動などのメカニズムを解析する。さらに、南極氷床と南大洋の過去数十万円から数百万年の長期的変動や将来長期見通しのモデリングを通じて、南極システムと全球気候変動とのかかわりを普遍的かつ統一的に理解することを目指す。

公募研究の基本情報

－第１期公募－

B01 南半球における中高緯度大気循環の不確実性の定量化

1. 研究代表者：猪上淳　国立極地研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H30 年度交付	1,500,000	450,000	1,950,000
R 元年度交付	1,500,000	450,000	1,950,000
合計	3,000,000	900,000	3,900,000

3. 研究目的

本研究課題は、不確実性の高い南極氷床上の雲・降水過程や南極大陸周辺海域における海面熱収支過程を理解する上で、必要不可欠な新しい知見を提示することを最終目標としている。具体的には、南極気象観測と予測可能性研究の両面から、南半球の高緯度及び中緯度で引き起こされる極端現象予測の不確実性の低減・定量化を行う。当研究課題の期間は、極域予測年(YOPP)による南極域での集中観測期間を含むため、他国の南極基地で強化される観測データも利用しながら、データ同化システムを活用した南半球の大気循環予測における「観測データの価値」を統合的に解析する。さらに、南極域と南半球中緯度の間で展開される双方向の大気遠隔応答について理解を深めるため、南極で引き起こされる大気現象を中緯度の海面水温前線の変動と関連付けた解析も行う。北極域で進行する温暖化増幅とそれに伴う極端現象との対比から、両極における相違点を探究する。

B01 南極氷床表面収支高精度推定手法の確立

1. 研究代表者：庭野匡思　気象庁気象研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H30 年度交付	1,000,000	0	1,000,000
R 元年度交付	1,000,000	0	1,000,000
合計	2,000,000	0	2,000,000

3. 研究目的

南極氷床（Antarctic ice sheet; AIS）では、1990 年代から質量損失が急速に進行している。このことは、観測されている全球規模の海面水位上昇に大きな影響を与えていると考えられている。現在、喫緊の問題となっている地球温暖化の進行が将来において更に加速すると、海水準変動に与えるAISの影響はより一層大きくなると考えられている。そのため、AISにおける質量変動がどのようなメカニズムによって引き起こされているのかを詳細に把握してモデル化し、将来気候下におけるAISの質量変動を正確に予測し、来るべき更なる海水準上昇に備えることが必要不可欠である。本研究では、申請者が独自開発してグリーンランド氷床でその有効性を確認した極域気候モデルNHM-SMAPをAISに適用し、AIS表面質量収支の高精度推定手法を確立・提示することにより、上記目標の達成に貢献する。

B01 地表面フラックス見積りスキームの改良とそれによる南極域氷床の表面質量収支評価改善

1. 研究代表者：西澤誠也　理化学研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H30 年度交付	490,000	300,000	790,000
R 元年度交付	1,510,000	300,000	1,810,000
合計	2,000,000	600,000	2,600,000

3. 研究目的

地表面と大気間の熱や物質の交換量（地表面フラックス）は大気運動にとって重要な役割をはたしている。また、氷床の増加・減少にとっても地表面フラックスは本質的な影響をもつ。南極域では、地表面温度が非常に低くなり、極めて静的安定な状態になることがあるが、強安定な場では地表面フラックスの見積が難しいことが知られている。応募者は、これまで準備研究として、既存の地表面フラックスの見積方法にいくつかの問題があることを見出した。そこで、本研究は、これらの問題を解決した新しい地表面フラックス見積スキームの開発を行い、従来手法での見積における誤差の程度を明らかにする。そして、南極域における領域気候シミュレーション実験を行い、従来手法による氷床増減の見積にどの程度の誤差が含まれているのか明らかにする。

B02 衛星高度計による南極海海氷域の海洋循環の解明と周極深層水の輸送経路の推定

1. 研究代表者：溝端浩平　東京海洋大学
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H30 年度交付	1,500,000	450,000	1,950,000
R 元年度交付	1,500,000	450,000	1,950,000
合計	3,000,000	900,000	3,900,000

3. 研究目的

南極海では氷床の底面融解と南極底層水の変質が注目を集めている。これら2つの現象のトリガーは、深度約300m以深に存在する暖かい周極深層水である。一方で、氷床融解・底層水変質は海氷に覆われる陸棚・陸棚斜面域で見られる。しかしながら船舶観測や通常の衛星観測では、当該海域の海洋循環に関する情報が時空間方向に極めて離散的、もしくはほぼ皆無となっている。つまり、上記の2つの現象を理解・予測するためには、周極深層水の挙動の把握が必要不可欠になる。そこで本研究では、地球環境観測衛星CryoSat-2に搭載されているSIRALレーダー高度計による観測値を用いて、海氷による欠損のない海面力学高度（ADT）データセットを作成する。作成したADT時系列から、これまで離散的な海洋データで描かれてきた海洋循環像を刷新し、循環場の変動要因を調査し、さらに周極深層水が陸棚域のどこにいつ、どの程度到達するかを推定する。

B02 高精度薄氷厚推定アルゴリズムの開発とその氷厚を用いた海氷生産量データセットの作成

1. 研究代表者　二橋創平　苫小牧工業高等専門学校
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H30 年度交付	1,000,000	300,000	1,300,000
R 元年度交付	1,000,000	300,000	1,300,000
合計	2,000,000	600,000	2,600,000

3. 研究目的

南極の沿岸ポリニヤ（薄氷）域における盛んな海氷生産に伴い形成される高密度水は、南極底層水の重要な起源水である。これまで申請者は、マイクロ波放射計による衛星観測データを用いてポリニヤ域を検出し、そこでの氷厚を見積もるアルゴリズムの開発を行ってきた。そしてこの薄氷厚を用いた熱収支計算から南極海全体で海氷生産量を見積もってきた。しかし、この薄氷厚は最大で10 cm 程度の誤差を含んでいる可能性があり、これは気象条件によっては海氷生産量の見積もりに数倍程度の違いを引き起こしうる。本研究では、薄氷の種類を考慮することにより、今までより格段に精度の良いアルゴリズムの開発を行い、数十年間の連続した高精度の海氷生産量データセットを作成すること目指す。本研究課題で開発されるアルゴリズムによる薄氷厚を用いることにより、海氷生産量の見積もりは、海域によっては最大で30-40%程度改善されることが期待できる。

B03 南極大気中の硫酸安定同位体組成の季節変動を再現する大気化学輸送モデルの構築

1. 研究代表者　服部祥平　東京工業大学
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
H30 年度交付	900,000	270,000	1,170,000
R 元年度交付	1,000,000	300,000	1,300,000
合計	1,900,000	570,000	2,470,000

3. 研究目的

硫酸エアロゾルは、温暖化を抑制する気候フィードバックに関与する物質として注目を集めている。しかし、実際に気候変動が起こった際に、どのようなフィードバック機構により変化によって硫酸エアロゾル動態が変化しているのかには不明点が多い。硫酸の安定同位体組成は、気候変動に対しての起源や生成過程がどのように変化・応答したかを反映する有効なプロキシの候補である。そこで本研究では、応募者がこれまで観測してきた南極大気エアロゾル中 硫酸多種同位体組成の季節変動を大気化学輸送モデルにおいて再現し、その支配要因を考慮したモデルを構築する。これにより、深層コア解析に適用可能な新しいプロキシの開発およびその解析手法の確立を行う。

－第 2 期公募－

A01 東南極トッテン棚氷域における氷床海洋相互作用の観測研究

1. 研究代表者　平野大輔　国立極地研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,100,000	630,000	2,730,000
R3 年度交付	2,300,000	690,000	2,990,000
合計	4,400,000	1,320,000	5,720,000

3. 研究概要

東南極で最も融解損失が加速しているトッテン棚氷のアイスフロントから大陸斜面における観測データの解析に基づき，トッテン棚氷の底面融解に寄与する沖合起源の暖水分布と循環場の特徴を把握する。アイスフロント域の係留時系列データの解析により，棚氷下への流入暖水特性の変動性を示すとともに，大陸棚東部のダルトンポリニヤでの海氷生産に伴う暖水変質との関連を明らかにする。最新の観測データを取り入れた数値モデル結果との相互比較を行い，現場観測ではカバーしきれない時間スケールの氷床海洋相互作用の素過程も把握することで，トッテン棚氷域における氷床海洋相互作用の包括的な理解を目指す。

A01 南大洋縁辺部における準リアルタイムな人為起源二酸化炭素の動態解明

1. 研究代表者　渡辺豊　北海道大学・地球環境科学研究院
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,300,000	690,000	2,990,000
合計	4,300,000	1,290,000	5,590,000

3. 研究概要

南極底層水は熱と物質の巨大貯留槽であり、この形成域である南大洋でのCO2取り込み量は全球の気候や生態系の変動を大きく支配する。しかし、南極底層水に取り込まれる人為起源CO2量は未だ分かっておらず、気候変動予測の大きなボトルネックとなっている。そこで、本申請では、南大洋縁辺部における炭酸系物質のパラメタリゼーションの開発を行い、同海域に展開されている自動海洋観測ロボット群および既存海洋水理データ群に適用することで、準リアルタイムな時空間高解像度な炭酸系物質データの獲得を行い、これを基盤に「南極底層水に人為起源CO2はどのくらい取り込まれているのか」という最大の問いに答えることを目指す。

A01 南大洋水塊形成海域における乱流鉛直混合と水塊変質・栄養物質供給

1. 研究代表者　安田一郎　東京大学・大気海洋研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,300,000	690,000	2,990,000
合計	4,300,000	1,290,000	5,590,000

3. 研究概要

南大洋は、様々な海域から深層水が海面近くまで湧昇し、大きな変質を受け、底層水や中層水となって北半球へ戻り、海洋物質循環を通じて生物生産を制御する、重要な海域である。底層水形成時の変質、深層水が湧昇する際に受ける変質や表層で形成された水塊が北半球へ輸送される際に受ける変質、及び、栄養物質の生物生産への供給量、を定量化するためには、乱流による鉛直混合を求めることが必要である。本研究では、申請者らが独自に開発した高速水温計をCTDに取り付けて乱流混合を定量化する手法を用いて観測を行い、乱流構造と水塊変質・栄養物質の乱流鉛直フラックスと生物生産の関係、を明らかにすることを目的とした研究を行う。

A01 南極大陸を取り巻く海産微小底生動物の分化過程と進化史の解明

1. 研究代表者　辻本惠　慶應義塾大学・環境情報学部
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

南極域における生物多様性の理解と保全は、南極域で観測を実施する各国の最重要課題の一つであると認識されている。一方で、南極大陸を取り囲む広域における底生微小動物の多様性、分化・進化に関する知見は限りなく不足している。本研究課題では、南極海の底生微小動物を対象とし、まずは南極大陸を取り巻く南極海の底生微小動物の種の分布と多様性を明らかにし、さらに形態・分子の多様性における生物地理学的傾向を明らかにすることで分化・進化機構を解明する。

A01 フェオダリアが南大洋インド洋区季節海氷域の生物ポンプに果たす役割の解明

1. 研究代表者　池上隆仁　海洋研究開発機構
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	1,900,000	570,000	2,470,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,100,000	1,230,000	5,330,000

3. 研究概要

近年、浮遊性原生動物であるフェオダリアが海洋中層において高いバイオマスを示すことが報告され、海洋生態系および物質循環における重要性が認識され始めている。しかし、フェオダリアの大型群集（>1 mm）についての定量的な研究は未だ乏しい。本研究では、南大洋インド洋区季節海氷域を中心にフェオダリアの生物ポンプに対する寄与を定量化するとともに、バイオマス鉛直分布と各種の生息深度を明らかにする。これらの結果から、海洋炭素循環においてこれまで見過ごされてきたフェオダリアについて、南大洋インド洋区生態系における役割および生物ポンプへの寄与を評価し、同海域の生態系全体の動態解明に貢献することを目的とする。

A01 窒素循環から解き明かす南極海生態系変動

1. 研究代表者　塩崎拓平　東京大学・大気海洋研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,300,000	690,000	2,990,000
合計	4,300,000	1,290,000	5,590,000

3. 研究概要

硝化はアンモニアが硝酸へと微生物を介して変換されるプロセスであり、海洋の無機窒素の存在比に影響を及ぼす。無機窒素はその形態によって植物プランクトンが利用する際のエネルギーが異なる。そのため、無機窒素の相対量の変化は低次生態系に直接的に影響を及ぼす。近年北極海で実施した研究によって、海氷融解で海中光量が増加することで、硝化が抑圧され、結果アンモニウム塩濃度が増加することを示した。同様の現象は氷床融解の進む南極海でも進行しているもしくは今後起こりうる可能性が高く、それによって生態系が激変する可能性がある。本研究では南極海における窒素循環の変動が低次生態系に及ぼす影響を評価することを目的とする。

A02 南極氷床上における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究

1. 研究代表者　新谷昌人　東京大学・地震研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	5,800,000	1,740,000	7,540,000
R3 年度交付	6,600,000	1,980,000	8,580,000
合計	12,400,000	3,720,000	16,120,000

3. 研究目的

本研究は、南極氷床上など極限的な野外環境における多点重力観測を実現するための小型絶対重力計の開発を目的とする。南極域における氷床の質量収支や氷河期からの変動を理解するためには質量分布や地盤の上下変動に感度を持つ重力観測が有効である。これまで困難であった南極域の氷

床上や露岩上での複数の絶対重力計による同時連続観測を実現するため、応募者が開発した計測技術をベースに小型絶対重力計の開発研究を行い、従来の重力観測で不十分であった観測領域を補完し、時間・空間分解能の向上を目指す。

A02 東南極，ラングホブデ氷河における接地線の同定

1. 研究代表者　奈良間千之　新潟大学・自然科学系
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	5,700,000	1,710,000	7,410,000
R3 年度交付	160,000	48,000	208,000
合計	5,860,000	1,758,000	7,618,000

3. 研究概要

本研究では、東南極のラングホブデ氷河において、棚氷と氷河の境界である接地線を衛星画像解析と現地調査によって明らかにする。ALOS-2/PALSAR-2のマイクロ波データで差分干渉 SAR 解析による 2 組の画像データを作成し、その差分から水平成分を除去する二重差分干渉 SAR 解析（DDInSAR）をおこなう。マイクロ波の位相差のうち、DDInSARで得られる潮汐変動の鉛直成分で得らえる接地線位置を検証するため、傾斜角測量、地中レーダー探査、GNSS測量、ドローン空撮の現地調査をおこなう。衛星画像解析による接地線の同定手法を確立し、ラングホブデ氷河周辺～昭和基地の接地線位置を明らかにする。

A02 東南極氷床における表面質量収支の観測誤差評価

1. 研究代表者　津滝俊　国立極地研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

本研究では、(1)東南極氷床ドローニングモードランド地域の昭和基地からドームふじ基地に至る輸送ルート上に設置している、雪尺網・雪尺列サイトで観測した雪面高さ変化のデータを用いた、雪尺法による表面質量収支観測の誤差の評価、(2)無人航空機を用いた、雪尺網・雪尺列サイトにおける高精度数値標高モデルの作成と雪面起伏の空間変動解析、(3)衛星高度計データを用いた雪面起伏の空間変動解析の3点を行う。(1)から(3)を統合して解析することで、雪尺法による表面質量収支観測の誤差の検証、及び衛星観測による氷床質量変動解析を検証するための雪面堆積環境情報を確立・提示する。

B01 南極暖湿化の原因とその影響の定量化

1. 研究代表者　佐藤和敏　北見工業大学・工学部
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

南極圏の気温・水蒸気量の変動を引き起こす局所的（海氷や雲など）・遠隔的（中・低緯度の海面水温や大気循環など）影響を定量化し、それらの変動が南極大陸の氷床質量へ与える影響を調べる。また、高緯度の局所的現象間の相互作用である大気・海洋・海氷相互作用を実証する。さらに、これらの解析で使用した観測データを数値予報モデルに組み込み、南半球の天気予報精度を向上させることができるか明らかにする。

B01 衛星観測とＬＥＳを用いた南大洋の下層雲の研究

1. 研究代表者　千喜良稔　東京大学・大気海洋研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	1,100,000	330,000	1,430,000
R3 年度交付	1,000,000	300,000	1,300,000
合計	2,100,000	630,000	2,730,000

3. 研究概要

南大洋は、南極の気候および全球の過去と将来の気候変動をを理解する上で重要な地域であるが、ほとんどの気候モデルはこの地域の下層雲の雲量を過小評価しており、この地域の気候の再現と予測を困難にしている。本研究は、衛星観測とラージ・エディ・シミュレーションを用いて、南大洋の下層雲の形成プロセスの素過程を明らかにする。本研究は、気候モデルにおける南大洋の下層雲の表現を改良するのに必要な基礎的な情報を提供する。

B01 過去４０年間の南極氷床表面質量収支高精度計算

1. 研究代表者　庭野匡思　気象庁気象研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	0	2,000,000
R3 年度交付	2,300,000	0	2,300,000
合計	4,300,000	0	4,300,000

3. 研究概要

南極氷床における雪氷質量変動を駆動するメカニズムを詳細に理解（モデル化）することは、将来気候下における南極氷床の質量変動、更にはそれに起因する全球海水準変化を正確に予測する上で必要不可欠である。本研究では、代表者自ら開発した世界最先端の極域気候モデルNHM-SMAP 12km版を用いて、南極全域を対象とした1978年から現在にかけての高解像度長期気候計算を行う。モデル計算結果は、気象・雪氷現地観測データを用いて多角的に検証する。更に、海外の同種のモデルとの相互比較も実施する。以上の研究結果を総合して、近年の南極氷床表面質量収支変動とその支配メカニズムの詳細を明らかにする。

B02 トッテン棚氷融解の引き金：海洋渦が介在する沖合から棚氷への熱輸送過程の解明

1. 研究代表者　溝端浩平　東京海洋大学
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	5,900,000	1,770,000	7,670,000
R3 年度交付	6,700,000	2,010,000	8,710,000
合計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

3. 研究概要

南極大陸の東経領域（東南極）の莫大な氷床は、融解すれば海面水位を50m上昇させる。氷床・棚氷の底面融解を促進させる要因は海洋からの暖水波及である。特に、東南極に位置するトッテン棚氷では著しい底面融解が報告されている。しかし、その一方で海洋の暖水が外洋から陸棚や棚氷にまで供給される過程については不明である。申請者の研究結果からトッテン棚氷の西側領域において、外洋から陸棚斜面への暖水波及に海洋渦が介在していることが示唆された。本研究では東南極の棚氷融解の爆心地「トッテン棚氷」の沖合から陸棚域において、渦の構造とその時空間変動要因、渦が介在する熱輸送過程について衛星観測と現場観測から明らかにする。

B02 海氷過程の定量的なデータセットから示す熱塩フラックス，物質輸送，そして生物生産

1. 研究代表者　二橋創平　苫小牧工業高等専門学校
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

本研究では、海氷過程の定量的なデータセットを作成する。これは海氷が、どこで、どれだけ、どのような種類で結氷し、どのような経路で移流し、そしてどこで、どれだけ融解する かを示すデータセットである。これを、主に衛星観測データを用いて南極海全域で作成する。そして現場観測との比較から、海氷による熱と塩，物質の再分配ならびに輸送と、これらに伴い引き起こされる生物生産の過程を明らかにする。南極海では、最近海氷面積が急激に減少している。作成するデータセットから、気候変動に伴う海氷域の急激な変化によって、熱と塩，物質の再分配ならびに輸送とそれに伴う生物生産が、どのように変化したかも明らかにすることを目指す。

B02 衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床の長期質量変動決定

1. 研究代表者　山本圭香　国立天文台
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

南極氷床の融解メカニズムの解明および気候モデル改良のための拘束条件として、南極の氷床質量変動の長期にわたる実測値は、重要な役割を果たす。本研究の概要は、複数の重力測定衛星（GRACE、GRACE-FO）および衛星高度計（ICESat、ICESat-2、Cryosat-2）のデータを用い、2002年から2021年までの南極氷床質量の時間変化の実測値を求め、その速度成分・加速度成分から、最近20年間の南極氷床融解の状況、グローバルな海面上昇への寄与、および全球規模の気候振動との関係を考察する研究である。

B03 宇宙線変動に基づくスーパー間氷期古気候記録の陸海同期

1. 研究代表者　堀内一穂　弘前大学・理工学研究科
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

本研究では、スーパー間氷期の気候変動研究に資する目的で、海洋酸素同位体ステージ（MIS）5eとMIS 11を対象に、宇宙線変動に基づいて陸海の古気候記録を同期させる。具体的には、ドームふじアイスコアと海底堆積物コアからそれぞれ宇宙線生成核種10Beの連続記録を得て、双方に共通する変動の特徴を対比することにより、陸海同期を実現させる。当該領域の複数の計画班にて、MIS 5e/MIS 11スーパー間氷期の研究が計画されている。本研究は、これらの班と連携し、陸海古気候記録の精密な同期を提供することで、領域研究の一層の推進や氷床・海洋・気候の統合的モデリングによる新たな研究の創造に貢献する。

B03 南極氷床コア中の硫酸・硝酸同位体組成から復元する過去のエアロゾルの起源と生成過程

1. 研究代表者　服部祥平　東京工業大学
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	1,900,000	570,000	2,470,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,100,000	1,230,000	5,330,000

3. 研究概要

南極の氷床コアには、過去数十万年分の気温変動や温室効果ガス濃度の増減の他、放射収支に負の影響を及ぼす大気中微粒子（エアロゾル）が保存されている。本研究では、南極大気エアロゾルの主要無機成分である硫酸や硝酸の酸素(O)、窒素(N)、硫黄(S)の安定同位体組成指標を、南極アイスコアに適用する。特に人為的な環境変化、氷期-間氷期変動、大規模火山噴火などの特徴的な環境変動に着目し、(i) 起源、(ii) エアロゾル生成に関わった大気酸化力がどのように変化し、エアロゾル動態や大気酸化環境が過去の地球環境変動にどのようなフィードバック機構を有していたかを考察する。

B03 東南極の年縞湖沼堆積物を利用した小氷期以降の氷床融解史の解明

1. 研究代表者　香月興太　島根大学・学術研究環境システム科学系
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	1,900,000	570,000	2,470,000
R3 年度交付	1,600,000	480,000	2,080,000
合計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

3. 研究概要

東南極沿岸部の露岩域（無氷地帯）に存在する氷河湖や低地湖沼から得られた湖底堆積物、それに含まれる縞状堆積物（氷縞やバイオマット）を用いて、小氷期以降、特に気温上昇が顕著になる過去200年の南極沿岸部の古環境・生態系変動を年スケールで明らかにする。東南極氷床末端から氷河湖に流出する土砂量の経年変化とそれに伴う低地湖沼への土砂流出や湖沼生態系の変動を通じて、南極の氷床変動の要因とその影響を解明する。

B0３ 無視されてきた微化石「黄金色藻シスト」を用いた古環境プロキシ開発

1. 研究代表者　加藤悠爾　筑波大学・生命環境系
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

南極大陸を覆う氷の塊である南極氷床は地球環境変動に大きな影響を与えるため、その変動史を知ることは地球科学における大きなテーマのひとつである。本研究では、今まで全く注目されてこなかった微化石である「黄金色藻シスト」に注目し、これを氷床の融解量の変遷を調べるための新たな古環境指標として確立させることを試みる。本研究期間中は、南極海で行われた研究航海で採取した海水試料・堆積物試料を様々な観点から分析し、黄金色藻シストの産出量が海域によってどれほど異なるのか、その要因は何か、などといったことを解明する。これらの結果を統合して、新たな古環境指標の確立を目指す。

B03 鉄・硫黄・リンの化学種別の存在量と同位体組成から探る南大洋の酸化還元状態の変動史

1. 研究代表者　山口耕生　東邦大学・理学部
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	1,800,000	540,000	2,340,000
R3 年度交付	1,500,000	450,000	1,950,000
合計	3,300,000	990,000	4,290,000

3. 研究概要

南大洋の約4万年前から現在までの海底堆積物の記録から、最終氷期から完新世に向けて還元的から酸化的な環境へと変化したことが知られている。これは氷期の大気CO2 濃度の低下と関係がある可能性が高いが、詳細は解明されていない。本研究では、海洋の酸化還元状態や栄養塩状態の変動を主に鉄と硫黄とリンの化学種別存在量と安定同位体組成および遷移金属元素の含有量から明らかにすることを、研究の目的とする。

そして、(A) 最終氷期最寒期での南極極前線帯や冬季海氷縁等の位置や変動様式を復元し、(B) 海洋のベンチレーションの程度（海氷の被覆海域の変化に影響）の変化を復元することを目標に定める。

B03 中央海嶺における海底マグマ活動が地球環境変動に与える影響に関する研究

1. 研究代表者　藤井昌和　国立極地研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

海底に広がる大山脈(中央海嶺)で起こる活発なマグマ活動は、地球内部から海洋への熱・物質供給を通して中長期的な気候変動に影響を与えるが、これまでの古気候復元や予測では考慮されてこな

かった。そこで本研究では、南半球の中央海嶺を対象に海上・深海地球物理観測を実施し、気候変動における海底マグマ活動の役割を明らかにする。研究船（白鳳丸、みらい、しらせ）の航海において地形・磁気データを新たに取得し、古地磁気強度変動記録との対比を通して、過去430万年間における海底地形の周期性の時間変動を明らかにする。得られた結果を古環境記録と対比し、海底マグマ活動と氷期-間氷期サイクルや海水準変動との関連を検証する。

B03 南極氷床コアのダストとブラックカーボンの高精度・高時間分解能分析による古環境復元

1. 研究代表者　東久美子　国立極地研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	5,730,000	1,770,000	7,500,000
R3 年度交付	6,870,000	2,010,000	8,880,000
合計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

3. 研究概要

本研究では、氷期･間氷期という大規模な気候変動が生じた際の、南極ドームふじコアにおけるダストとブラックカーボンの濃度、フラックス、粒径の変動を復元し、ダストとブラックカーボンの発生源や輸送･沈着過程の変動を解明する。また、南米大陸等、南半球の陸域で大規模な砂嵐や森林火災が発生した際にドームふじコアに出現するダスト及びBCの鋭い濃度ピークを抽出する。気候変動に伴い、これらのピークの原因となる砂嵐や森林火災の頻度と規模がどう変化したかを解明する。南極で掘削された他の氷床コアからも、同一の砂嵐や森林火災のイベントを抽出することで、ダストとBCを用いた複数の南極氷床コアの年代同期法を開発する。

B03 氷床変動の高精度予測のための地質年代測定手法の開発と適用

1. 研究代表者　田村亨　産業技術総合研究所
2. 交付額(単位　円)

	直接経費	間接経費	合計
R2 年度交付	2,000,000	600,000	2,600,000
R3 年度交付	2,200,000	660,000	2,860,000
合計	4,200,000	1,260,000	5,460,000

3. 研究概要

地球温暖化による南極氷床の融解は海面上昇に直結する。過去の気候変動に対する氷床の応答を地質・地形記録から理解できる可能性がある。しかし南極では、海面変動において氷床モデルの計算値と地質・地形記録との間に大きな食い違いがあり、それが年代測定の問題に起因すると考えられる。本課題では。南極の地質・地形に最適化した光ルミネッセンス年代測定法を開発・適用し。海面変動曲線を刷新することを目指す。

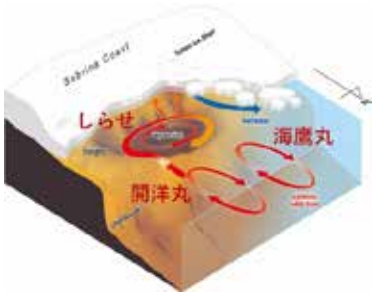
研究成果サマリー

研究項目 A01 熱-物質リザーバ南大洋とその変動

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（計画研究・底層水班・大島）

1. 氷床・海洋相互作用の解明（A03 探査班・A04 モデル班・A02-1 氷床班・A02-2 固体地球班・B02 公募連携）

白瀬氷河が流出するリュツォ・ホルム湾において、大規模な海洋観測と氷河観測を実施した。観測データの解析を軸に、数値モデルや測地・雪氷学との融合研究から「白瀬氷河の底面に、沖合起源の暖かい海水が流入することで顕著な融解が生じ、その強度は卓越風の季節変動に制御される」という一連のプロセスを解明した。同様の観測を、東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河の沖合で実施し、定在する巨大な海洋渦が沖合の暖水を効率的に氷河方向へ輸送していることを明らかにした。同時に取得した海底地形や係留系データから、トッテン氷河前面へ至る暖水の輸送過程や特性の一部も明らかになった。



トッテン氷河への暖水輸送過程

2. 底層水変動の解明

「開洋丸」観測から、南極底層水の 10 年規模の変動について、ここ 30 年ほどは塩分が低下していたが、2010 年代後半に塩分増加に転じたことを解明し、氷床融解の変動に起因する東方（ロス海）の底層水の塩分増加の影響であるとの仮説を提唱した。また、周極深層水を南極に輸送する渦の活発化も観測された。「海鷹丸」観測から、豪州南極海盆の下部子午面循環の浅化と南豪州海盆への南極底層水供給量の減少が示された。「白鳳丸」での係留系や化学トレーサー・栄養塩等の観測から、ケープダンレー底層水（CDBW）の循環時間スケールや底層水形成に伴う物質循環を解明した。特に、陸棚上で生成される高密度水が CDBW として北西方向へ輸送される際、有機物分解による炭素や栄養塩濃度の増加が見られないことや、CDBW による人為起源 CO_2 輸送量が南極底層水全体の 10%を占めることを突き止めた。

A01-2 南大洋の古海洋変動ダイナミクス(計画研究・古海洋班・池原)

1. AI 等を駆使した試料分取・処理の手法開発と海底コアへの応用

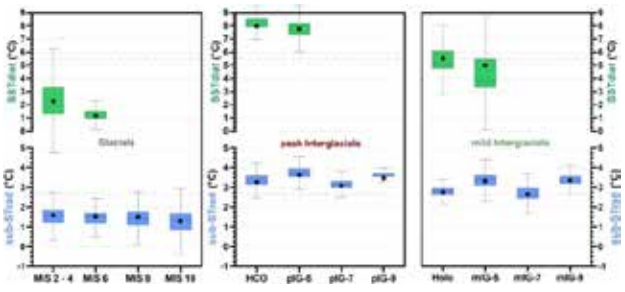
マイクロ・マニピュレーターと AI 深層学習プログラム（特願 2018-163981）から成る微細試料の自動分取システムを開発し、微化石群集組成の自動解析や微化石の高速自動摘出など、海底コアのみならず微細試料分析に広く応用可能な技術に発展した。また、セルソーターにより特定の形態の珪藻殻を大量に分離する手法を開発し、南大洋海底コアの古環境指標として期待される珪藻殻の酸素同位体比分析に適用した。

2. 海底コアと氷床コアの年代精密対比（A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班、B03 公募連携）

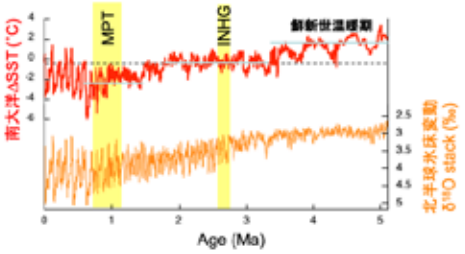
海底コアと南極氷床コアとの年代精密対比のために、南大洋の大西洋区や太平洋区の海底コアで利用されているダスト指標による対比の有効性をインド洋区の海底コアで示した。一定の精度を保った状態でダスト対比が可能であるとともに、ダスト変動の地域性や火山砕屑物の混入などによるバイアスを考慮する必要があることが初めて明らかとなった。

3. 海底コアによる古海洋変動の解明（A01-1 底層水班・A01-3 生態系班・A02-1 氷床班連携）

南大洋インド洋区の表層水温変動を復元し、過去 2000 年間の海氷分布がエルニーニョや南半球環状モードと連動して変化したことを解明した。また、珪藻や放散虫の解析から南大洋インド洋区の


過去の間氷期の温度復元結果

表層水温（SST）および亜表層水温を復元し、スーパー間氷期の水温は他の間氷期より高かったことや（右上図）、ケルゲレン海台付近で南極前線が南下したことを解明した。新規データを含む南大洋のデータを統合し、500 万年間の南大洋 SST を復元した（右下図）。過去 300 万年間における南極気温や CO_2 と調和した変動や、スーパー間氷期における約 1˚C の温暖化など、南北の氷床や炭素循環に南大洋が影響した可能性を示した。現場観測においても、海底コア採取と連携した沈降粒子採取や、水素・酸素同位体比データと海洋物理場との比較による古環境プロキシの高精度化など、多様な連携成果を得た。

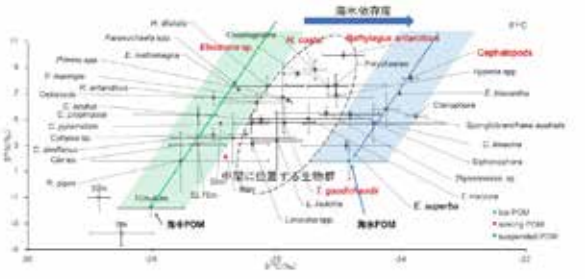


500 万年間の南大洋の表面温度

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用(計画研究・生態系班・茂木)

1. 海氷が海氷下の低次生産と生態系構造と物質循環に及ぼす影響の解明

珪藻類やカイアシ類の海氷中と周辺海水中の比較から、海氷中微小生物群集（SIB）の水柱生態系への寄与を明らかにした。また、炭素と窒素の安定同位体分析から、南大洋には海氷（アイスアルジー・粒状有機炭素）と、海水（植物プランクトン）を起点とする 2 種類のエネルギーフローがあることや、それらの間に位置（両方に依存）する生物種が大半であり、多くの種が海水中の炭素に依存する実態を解明した（右図）。また、海氷下における窒素固定の証拠が確認され、南大洋における窒素循環プロセスの理解が深まった。さらに、変質周極深層水に高次捕食者の餌となる中深層性生物の稚仔が高密度で分布することや、それらの食性を明らかにし、安定同位体と合わせて氷縁付近の食物網を解明した。季節海氷域における係留系の設置・回収にも成功し、沈降粒子の通年試料を得た。コロナ禍の影響により、最終盤で得た試料の分析とデータ解析は最終年度の繰越で進め、得られる情報は南大洋の生物ポンプによる炭素隔離の実態解明に寄与する。

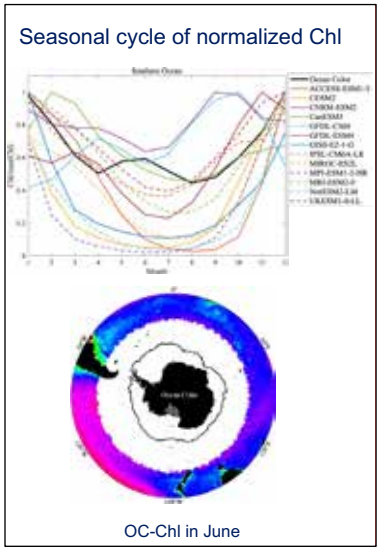

同位体データに現れた、海氷を起点とする南大洋生態系のエネルギーフロー

2. 季節海氷域の低次生産と高次生産との関係解明

高次捕食者であるハシボソミズナギドリの採餌海域や餌生物などの調査の結果、オーストラリア南東部での育雛の間に、南大洋でナンキョクオキアミやハダカイワシ科魚類を採餌することを明らかにした。南大洋生態系の低次生産の変動の影響が、高次捕食者による移動によって速やかに北半球にまで伝播することを示唆する結果を得た。

3. 南大洋生態系と海洋物理場・全球生態系との関係（A01-1 底層水班、A01 公募、A04 モデル班連携）

海洋物理場（中規模渦）による小型動物プランクトンの個体群構造や分布への影響を見出し、海氷や物理場の変動が生態系に影響を及ぼすことを示唆した。また、IPCC 等で使用されるモデル群による全球クロロフィル現存量に大きなバイアスが存在し、その原因が冬季の極域のデータ不足であることを明らかにした（右図）。さらに、メタゲノム解析を応用した新手法や、遺伝子解析や安定同位体分析に耐えうる生物試料の長期保存方法の確立など、今後の南大洋や全球の生態系研究の進展に資する成果を得た。



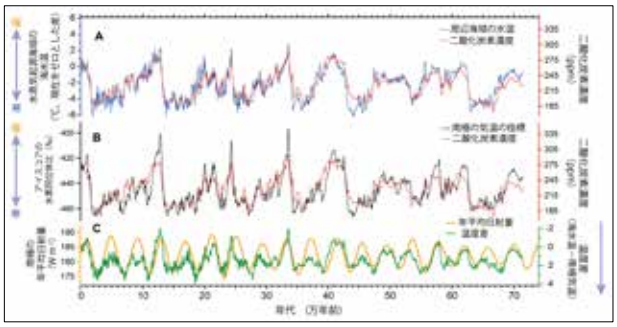
生態系モデルと衛星観測データの不整合（上）と冬季観測データの欠如（下）

研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用(計画研究・氷床班・川村)

1. アイスコアによる古気候研究（A04 モデル班、B03 公募連携）

   ドームふじアイスコアの酸素・水素同位体比の解析による 72 万年間にわたる南極の気温と南大洋中緯度の海面水温の復元や（右図）、両極間の大気と海洋を通じた気候リンクの解明、希ガス濃度による最終退氷期の全球平均海水温復元と南極の気温変動との調和性の解明、エアロゾルとダストの供給源や大気輸送の解明、最終氷期最寒期の地表気温と氷床高度の推定値の刷新と気候モデルの妥当性の証明など、多様な成果を得た。



72 万年間の南極の気温と南大洋の温度

2. アイスコア年代構築と海底コアとの年代統合（A01-2 古海洋班、B03 公募連携）

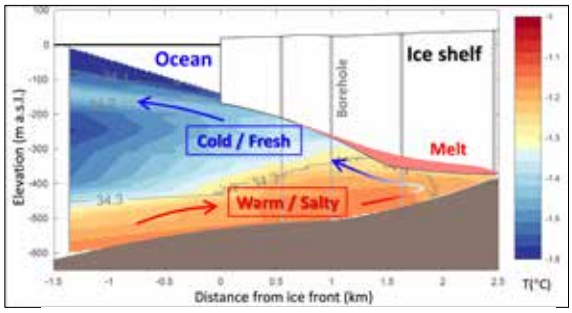
   酸素／窒素比とメタン濃度などの気体成分分析から、スーパー間氷期を含む 17 万年前間の年代精度を大幅に向上させた。また、メタン濃度とダストの連続データ取得（この時代の深層コアとして世界初）や、古海洋班との連携によるダストデータを用いた年代統合（上述）など、年代構築と対比に関する成果が得られた。

3. 広域の表面質量収支と氷床基盤地形（B01 公募、A04 モデル班、A02-2 固体地球班連携）

   東南極氷床の表面質量収支と表面形状、基盤地形の広域調査を実施し、過去に取得されたデータと合わせて解析した。今後長期にわたる氷床動態把握に必須であり、質量変動メカニズムに関する分野間連携研究に資する世界最長データとして整備した。その結果、東南極で質量が増加している地域においては、1990 年以降の表面質量収支が沿岸から内陸までの広域で、有意に増加傾向にあることを明らかにした

4. ラングホブデ氷河の熱水掘削による氷床－海洋相互作用の観測研究（A01-1 底層水班、A02-2 固体地球班、A01-3 生態系班連携）

   熱水掘削孔から棚氷内部や底面、氷下の海洋を観測し、海洋の暖水が棚氷の下に浸入して氷を大量に融解し、融解水と混合しながら表面に浮き上がって出ていく様相や、氷河流出速度との関係などを解明した（右図）。



ラングホブデ氷河下の暖水移流と融解過程

A02-2 固体地球と氷床の相互作用(計画研究・固体地球班・福田)

1. 絶対重力と GNSS の観測による GIA モデルの高精度制約（B02 公募連携）

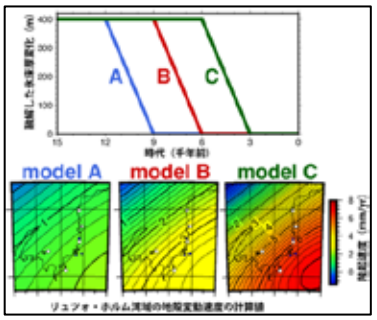
   昭和基地および周辺沿岸地域に加え、トロール（ノルウェー）、マイトリ（インド）、ジャンボゴ（韓国）、マリオズッケリ（イタリア）の各基地における絶対重力測定を実施し、現在の重力変化勾配とともに将来の観測の基準となる値を得た。また、リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS 観測データから、GIA による地殻変動速度の地域差を明らかにし、南極大陸全体での地殻変動速度の地域差についても明らかにした。これらは、現在の GIA の影響を見積もる上で高精度な拘束条件を与える成果となった。

2. 地質・地形学的調査と GIA モデルによる過去の氷床変動復元（B03 公募, A02-1 氷床班連携）

   リュツォ・ホルム湾沿岸やマイトリ基地周辺において、新開発の掘削システム（特許第 6824503 号）による湖底コアの採取・分析や、岩石試料の表面露出年代測定から、最終間氷期から完新世までの全球気候遷移に伴う南極氷床の変動を復元した。3 - 4 万年前の氷床荷重が従来の推定値の 2 倍に達することや、完新世の約 9000 - 6000 年前にかけて氷床高度が急激に低下したこと、その原因が周極深

層水の流入である可能性など、従来の常識を覆す新たな知見を得た。

3. 各種データと GIA モデルによる氷床変動と地殻変動の相互作用解明（B02 公募連携）
   複数の GIA モデルによる数値実験により、過去から現在の観測結果は、GIA モデルや関連パラメータを調整することで矛盾なく説明可能であることが示された（右図）。GIA モデルの改良は、衛星データ解析や他のモデル研究とも連携し、現在の南極氷床変動の解明や将来予測にも貢献するものと期待できる。



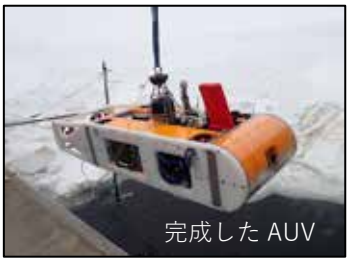
GIA モデルによる過去の氷床融解と現在の地殻隆起の統一的理解

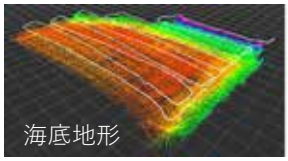
研究項目 A03 未探査領域への挑戦

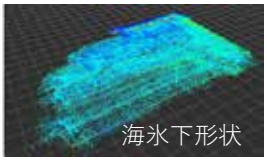
A03（計画研究・探査班・野木）

観測技術開発や、観測装置とノウハウの共有化、氷下の海洋や氷上の地形の観測を進めたほか、棚氷–海洋モデルに必要な海底地形データの解析等も進めた。

1. 無人海中探査機（AUV）（A02-2 固体地球班連携）
   各班の要望を反映した仕様決定から詳細設計、製作、氷海を含む国内試験と改良を経て、南極海での実運用が可能となった（右図）。また、AUV を確実に回収するための小型遠隔操縦ロボット（ROV）による回収機構や、氷上から開けた穴を用いて海中に展開可能な小型 ROV も開発した。新型コロナウイルス感染拡大の影響により南極航海は延期となったが、国内試験への切替などにより開発への影響はなく、令和 4 年度に南極海での AUV および ROV の実際の運用が実現する。


完成した AUV


海底地形


海氷下形状

2. プロファイリングブイ・システム（A01-1 底層水班、A01-3 生態系班、A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班連携）
   南極沿岸域で水温・塩分の鉛直分布を観測可能にするため、海氷衝突回避のためのソフトウェア等を実装した氷海係留プロファイリングブイを開発した。本システムをケープ・ダンレー沖に設置し、海洋鉛直構造の時間変化データの取得に成功した。

3. 無人航空機（UAV）（A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班連携）
   南極陸域の調査において、3 種類（固定翼、回転翼、レーザ測量用回転翼）の無人航空機(UAV)を導入し、地形測量を実施したほか、UAV データによる表面地形(Digital Surface Model; DSM)の精度評価を実施した。また、地殻変動や重力変化の精密な測定に不可欠な高精細地形や積雪分布変動を導出し、積雪による影響を評価した。

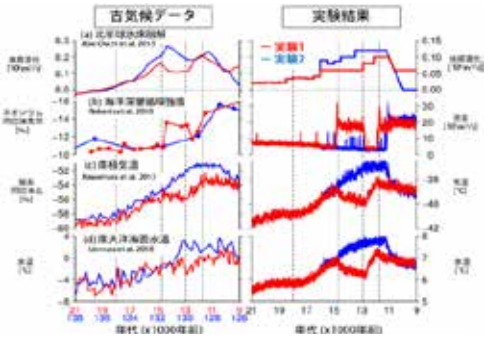
A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング(計画研究・モデル班・阿部)

1. 各種数値モデルの開発と適用（A01-1 底層水班、A01-2 古海洋班、A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班、A03 探査班、B01 公募連携）
   気候モデル（大気海洋海氷結合モデル MIROC）や、南極氷床モデル(SICOPOLIS)、海洋物質循環モデル・海洋領域モデル(COCO)などを高度化し、南極周辺のパフォーマンスを詳細に検証した。世界中の気候モデルに共通する南極周辺の温暖バイアスの解消や、海洋物質循環モデル改良による古環境の再現性向上と氷期 CO_2 低下要因の解明、異なる解像度の南極氷床モデル開発、海洋領域モデルによる暖水流入・棚氷融解過程解明など多くの成果が上がった。

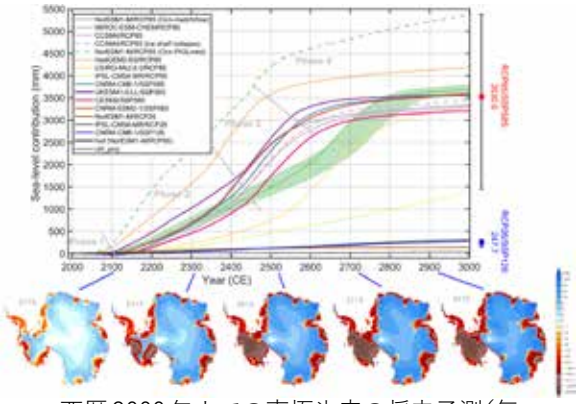
2. スーパー間氷期への遷移と、現在の南極氷床の存在要因（A01-2 古海洋班、A02-1 氷床班連携）
   完新世と最終間氷期（スーパー間氷期）への遷移における南極気候の違いの再現に成功し、その原因が北半球氷床の融解履歴にあることを突き止めた（右図）。特に、現在の南極氷床が最

終間氷期のように縮小しなかった理由が、退氷期に起こった南北逆位相の「寒の戻り」であることを解明した。また、過去 1000 年、2 万年、350 万年などの古気候計算により、氷床モデルを駆動する気候状態を詳細に再現した。

3. 南極氷床の将来とティッピングポイント
領域内連携で高度化された南極氷床モデルにより、100 年や 1000 年スケールでの長期予測や、過去の氷床縮小、ティッピングポイント解明のための定常計算を展開した。成果の一部は国際気候モデル比較・氷床モデル比較プロジェクトで中心的な役割を果たし、IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書及び第 6 次評価報告書の主要成果となった。将来 1000 年の CO_2 高排出シナリオの計算では、気候状態が 2100 年以降一定の仮定でさえ氷床は縮小し続け、2300 年以降に西南極氷床がティッピングポイントを迎え海水準が急激に上昇する結果（右図）など、温暖化に対する氷床の非線形応答や不可逆的変化の解明に資する成果を得た。



全球気候モデルによる最終間氷期の温暖化メカニズムの解明



西暦 3000 年までの南極氷床の将来予測（気候状態は 2100 年以降で一定）

公募研究

第 1 期は分野横断型として B01 大気科学、B02 衛星観測、B03 新たな手法の 3 テーマで募集し、第 2 期はそれらに加えて計画研究と直接連携する課題も募集した。合計 29 課題が採択され、計画研究(A01,A02)の補強的研究のほか、多分野を繋ぐ研究、周辺分野の研究が展開し、領域目標である南極環境システム学の創成に大きく寄与した。以下に研究項目 B から数例を挙げる。

研究項目 B01 大気の物理とモデリング（A04 モデル班、A02-1 氷床班連携）

従来の南極研究コミュニティの外部から、最新の大気モデルやデータ解析手法が加わり、南極域を対象にした領域気候モデルの開発と過去数十年間の計算や、氷床表面質量収支のトレンド解析、高層気象観測による気象予測向上、南極温暖化のテレコネクション解析、全球気候モデルの高精度化等に関して、計画班と連携した研究成果のほか、今後の多分野連携につながる多くの成果が得られた。

研究項目 B02 各種の衛星観測（A01、A02 の 5 班と連携）

南大洋及び南極氷床の変動や素過程に関する研究が展開された。氷床末端に暖水を運ぶ海洋渦構造の発見や、周極深層水・南極底層水・生物パラメータの同時観測との連携と共有データ作成、沿岸ポリニヤでの薄氷種類判別アルゴリズムの開発による海氷生産量推定値の一新、衛星搭載重力衛星及び高度計を用いた南極氷床の動態把握に関する成果が得られた。

研究項目 B03 新しい観測・分析手法を用いた研究（A01-2 古海洋班、A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班連携）

信頼性の高い古環境指標や年代決定・対比の確立に向けたアイスコアや海底コアの新たな手法による研究が展開した。過去数千年の火山噴火記録の復元や、宇宙線生成核種による年代精密同期、堆積物の微化石や同位体を用いた新たな環境指標や年代決定手法の開発等の成果が得られた。現場観測でも、海底マグマ活動と南極環境の関連といった、計画班との連携による周辺分野の研究が行われた。

東南極における氷床・海洋相互作用 1：リュツォ・ホルム湾―白瀬氷河

平野大輔[1,2]、草原和弥[3]、田村岳史[1,2]、青木茂[4]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]海洋研究開発機構、[4]北海道大学

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）
A01(公募）東南極トッテン棚氷域における氷床海洋相互作用の観測研究（代表：平野大輔）
A03 未探査領域への挑戦（探査班）（代表: 野木義史）
A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）（代表: 阿部彩子）

1．背景

地球上の約 9 割もの氷が存在する南極は、いわば地球最大の淡水（氷）の貯蔵庫である。近年南極氷床の質量損失の加速が指摘され始めたが、もし、南極氷床が全て融解すると全球の海水準は約 60m も上昇する。そして 50m 分に相当する大部分の氷は東南極に存在する（図 1 左）。今後の南極氷床の融解加速によって、全球の海水準は 2100 年までに 1m 以上、2500 年までに 15m 以上も上昇するという予測結果も示されている(DeConto & Pollard, 2016)。南極氷床の融解が人間社会に与える影響の予測や対応を行うためには海水準変動予測の精度向上が急務であるが、未だ大きな不確実性が指摘されている。これは、主に南極氷床の融解プロセスの理解の遅れに起因している。

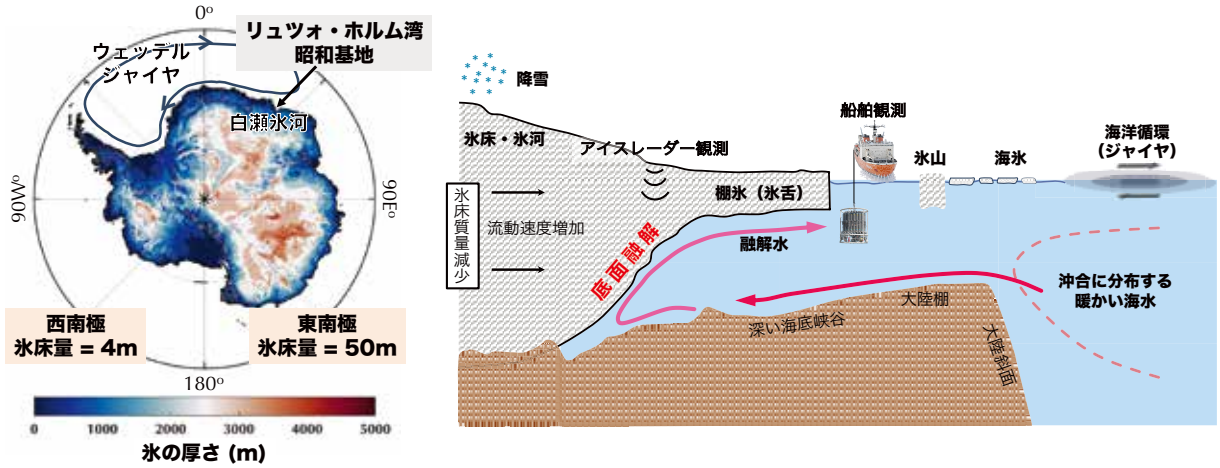


図 1 左：南極氷床の厚さ（Morlighem et al., 2020）。氷床量は海水準相当。
右：海洋による氷床末端部・棚氷（氷舌）の融解プロセスを示す模式図。

氷床・氷河は沿岸へ向かって流れており、その末端部は海に突き出して「棚氷（氷舌）」を形成し海に浮いている。棚氷は氷河の流れを抑制するという重要な役割を担っているが、棚氷の下へ暖かい海水が流れ込むと、棚氷は底面から融かされて薄く・脆弱になる。その結果、上流の氷の流動を抑制する力が弱化し、海洋への氷床流出（損失）が促進される（図 1 右）。つまり、南極大陸上の氷床の質量変動を正しく理解するためには、「周りの海」を知り、その海と氷床との関わり（相互作用）の理解が不可欠である。大陸上にあった氷（淡水）が海へ流出すれば、海水準の上昇に直結するのみならず、全球海洋を巡る大きな海洋循環の駆動力をも弱化させてしまう。このように、南極氷床の融解は全球規模の海水準変動や気候システムに対し、極めて大きなインパクトを与えると考えられている。

暖かい海水による棚氷の融解加速が相次いで報告されている西南極とは対照的に、東南極沿岸域は基本的に「冷たい海」という特徴を有する(Schmidtko et al., 2014)。それゆえ、東南極に分布する棚氷の融解強度は総じて低いが、衛星観測データ等から白瀬氷河域では局所的に高い融解強度（領域平均で 7m/year の融解率）が推定されていた(Rignot et al., 2013)。白瀬氷河が存在する東南極のリュツォ・ホルム湾（LH 湾）は年間を通して厚い海氷（定着氷）に閉ざされているため、世界屈指の砕氷能力を有する南極観測船「しらせ」でさえも航行に困難を伴う難所である（“LH 湾名物”の定着氷が、白瀬氷河の融解をさらに促進していることがのちに明らかとなる、後述）。そのため、白瀬氷河の「周りの海」

を知る上で欠かせない LH 湾内での船舶観測例は非常に乏しく、白瀬氷河域の融解プロセスに関する海洋学的な証拠は全くなかった。このような背景のもと、我々は主に南極地域観測の第IX期重点研究観測プロジェクト・サブテーマ 2（通称 ROBOTICA、課題代表者：北海道大学低温科学研究所・青木茂）の枠組みにおいて、LH 湾を含む東南極沿岸域における観測を推進してきた。

2．研究手法

わずかに存在する過去の越冬隊による海氷上からの海洋観測資料を唯一の手がかりとして、海洋による白瀬氷河域の融解プロセスの実態を解明する上で効果的な観測点の配置をデザインした。第 58 次南極地域観測隊（2016／17 シーズン）では、過去約６０年にもおよぶ日本の南極観測で初めて「しらせ」による LH 湾広域での大規模な海洋観測を実現させ、湾口から白瀬氷河の前面海域にいたる計 31 地点での水温・塩分・溶存酸素などの海洋観測データや海水サンプルの取得に成功した（図 2）。また、白瀬氷河氷舌の上には、氷の厚さの変化（底面融解率）を直接計測することができるアイスレーダー（ApRES）を設置し（図 1 右、図 2 右）、測地・雪氷学的に白瀬氷河氷舌の底面融解強度を推定した。取得した海洋観測データの解析結果を軸とし、数値モデルやアイスレーダー観測の結果と比較・統合することで白瀬氷河域での“海洋による”融解プロセスを多角的に調べた。

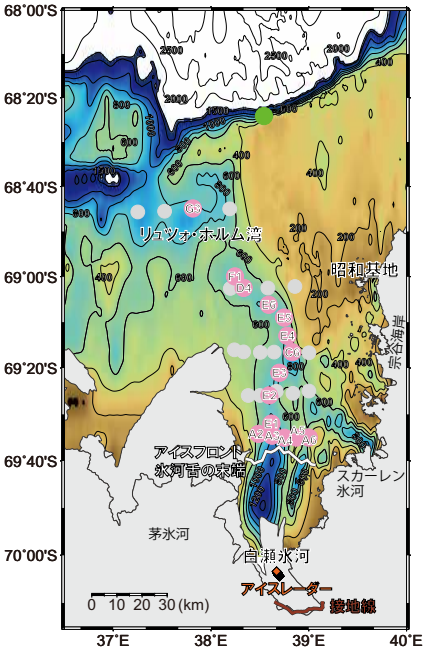


図 2 左：白瀬氷河の末端付近で観測中の南極観測船「しらせ」。
右：リュツォ・ホルム湾（昭和基地沖）の海底地形図（数字は水深を示す）と湾内で実施した海洋観測点の位置（ピンク及び灰色の丸印、計 31 点）。ピンクで示す観測点は図 3 の深い海底峡谷（トラフ）に沿った南北方向の水温分布で使用される測点。

3．研究成果

海洋観測、数値モデル、測地・雪氷学分野との融合研究により「白瀬氷河の下（底面）に、沖合起源の暖かい海水（周極深層水）が流入することで顕著な融解が生じていること、また、その融解強度は卓越風の季節変動によってコントロールされる」という一連のプロセスを提唱した（図 3 ～図 5）。このプロセスは大きく以下の 3 つに分けられる。

1) 沖合からリュツォ・ホルム湾内へ流れ込んだ暖水が、湾内の深い海底峡谷（トラフ）に沿って白瀬氷河氷舌の下へと輸送される（図 3）
2) 流入した暖水が白瀬氷河の氷舌を底面から融かし、融解水は表層から北へと流出する（図 5）
3) 融解強度の明瞭な季節変動（図 4）は、卓越風の変動が湾内に流入する暖水の厚さをコントロールすることで規定される。

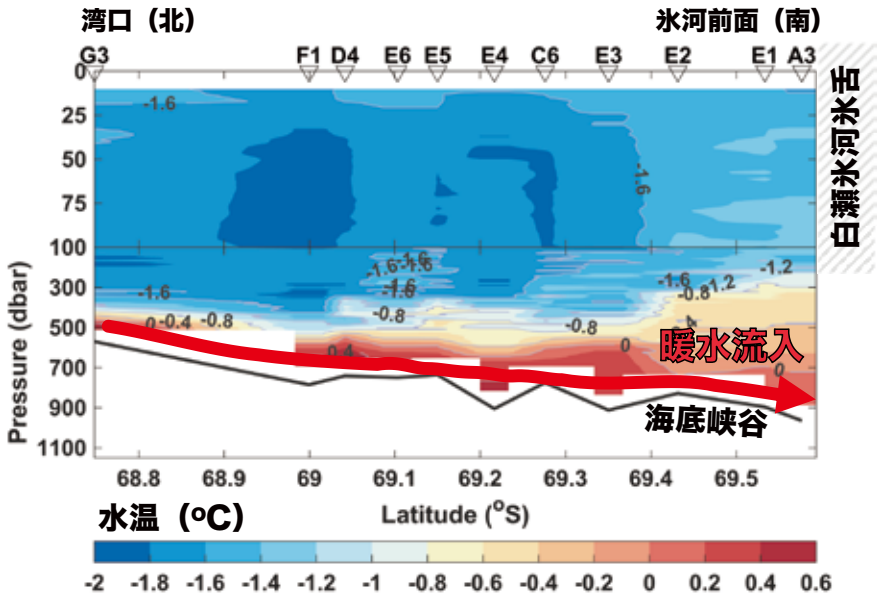


図 3：海洋観測により得られた深い海底峡谷（トラフ）沿いの南北水温断面図。湾口から流入した沖合の暖かい海水は海底峡谷に沿って南へ輸送され、白瀬氷河の下へと流れ込む様子が捉えられた。

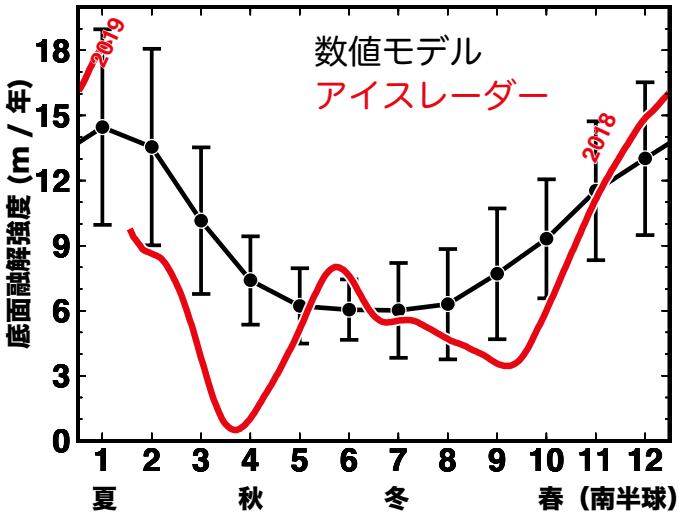


図 4：数値モデル（黒線）とアイスレーダー観測（赤線）の結果から推定された白瀬氷河舌における底面融解強度の季節変動。卓越風の変動に連動して、白瀬氷河域の融解強度は南半球の夏に強くなり、秋に弱くなる。

また、推定された融解強度（7—16m/year）は南極全体で見ても大きな値であり、まさに海洋による顕著な融解プロセスが生じていることを、海洋学の裏付けをもって証明することができた。LH 湾の沖合は、時計回りの大きな亜寒帯循環であるウェッデルジャイヤの東端付近に位置しており（図 1 左、図 5）、そこでは南向きの流れが生じている。こういった絶妙な位置関係が暖かい海を局所的に作り出す 1 つの背景要因であると考えられる。このようにして、厚い定着氷に閉ざされた「周りの海」の状況、そして白瀬氷河との相互作用が、現場観測と数値モデルの融合研究によって明らかになった。これは日本として初めて、南極氷床の融解プロセスを示した観測研究成果でもある（Hirano et al., 2020）。

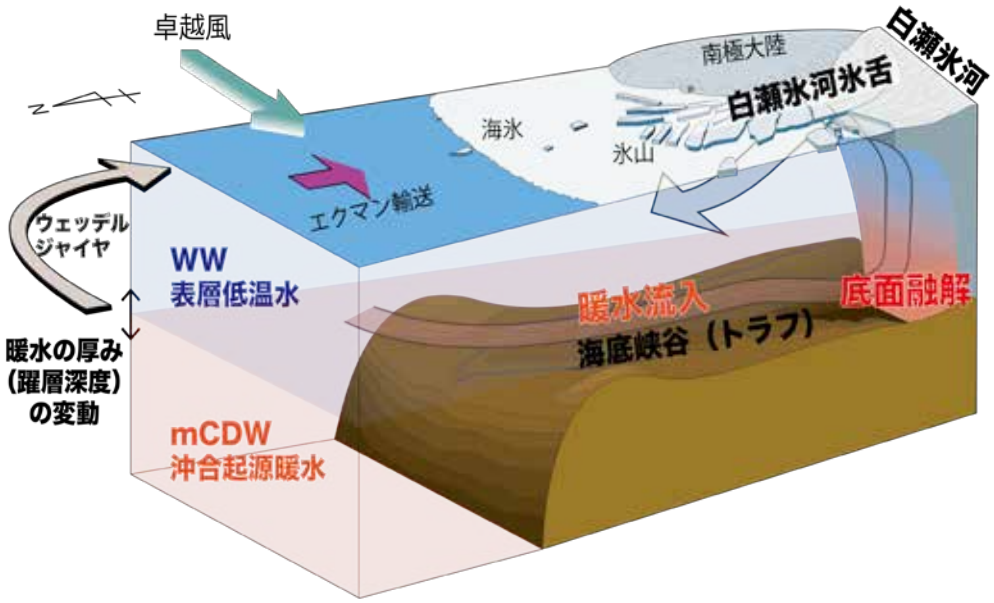


図 5：沖合からの暖水流入によって生じる白瀬氷河域の顕著な融解プロセス。

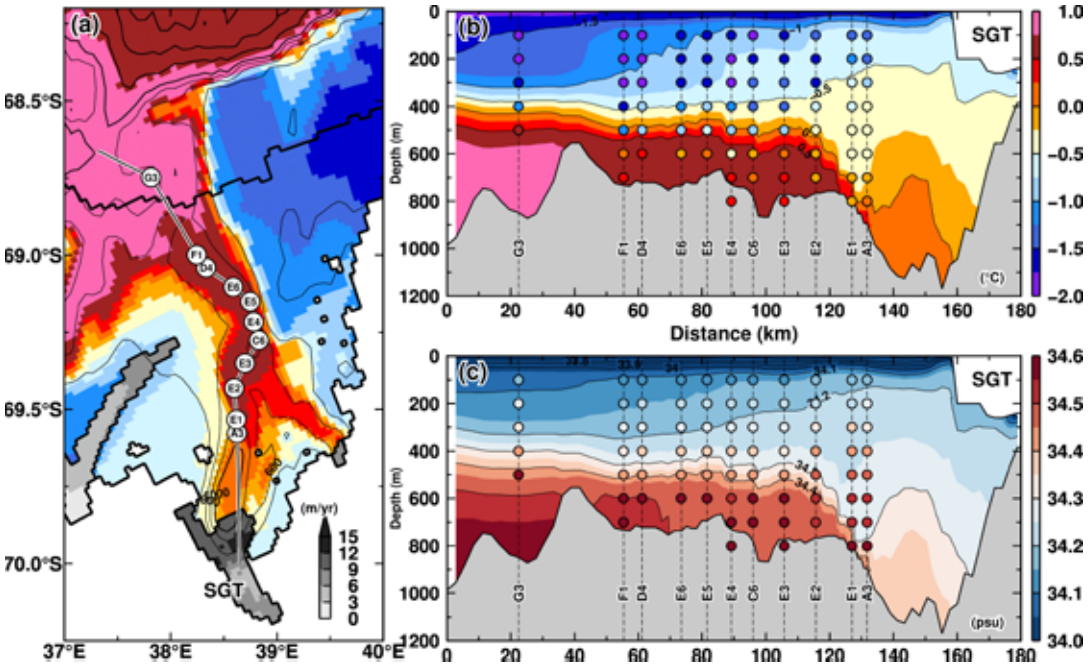


図 6：(a) 数値モデルで再現された 1 月の海底水温と棚氷底面融解率。(b-c) 観測側線沿いの水温と塩分の鉛直分布。〇は観測値を示す。

続いて、LH 湾内を水平解像度 2km 程度で覆う高解像度海洋モデルを現実地形・海面境界条件下で駆動し(領域モデルの詳細に関しては、本巻の草原を参照)、数値モデルが白瀬氷河域における氷床海洋相互作用の観測事実を再現しうることを確認した。図 6 は、リュツォ・ホルム湾内に大陸棚から流入する暖水の水平・鉛直断面を示したものである。数値モデル結果の詳細解析により、この海域の顕著な融解をもたらす背景要因として、暖水循環やその変動特性、さらには定着氷の影響に関する新たな知見が得られた(Kusahara et al., 2021)。一般的に、南大洋の大陸斜面域には西向きの Slope Current が形成され、沿岸―沖合間の海水交換（つまり暖水流入）を妨げている。一方、LH 湾の上部大陸斜面には夏季に東向きの undercurrent が形成され、この undercurrent が湾内への暖水流入の季節～経年変動をもたらす

1 つの要因として示された。また上述の通り、LH 湾内は“厚い”定着氷に覆われている状況が常であるが、この状況が白瀬氷河のさらなる融解を促進することが明らかとなった。これは、大気―海洋の境界域に分布する定着氷が効果的な断熱材として機能することで、ローカルな海氷生成量（＝大気へ奪われる熱）を減少させ、その結果、白瀬氷河の下へとより多くの海洋熱が輸送される（＝海洋による融解がより活発になる）ことに起因する。

以上のように、新学術の枠組みの下で現場観測と数値モデル研究との連携が深化することによって、西南極と比べて圧倒的に知見が乏しかった東南極の大気―海洋・海氷―氷河・氷床システムの理解向上に貢献する成果を得ることができた。今後も、観測研究による継続的な基礎的知見の積み上げとともに数値モデルとの融合研究を加速させ、さらなる数値モデルの検証・精緻化を図ることで、海水準や気候変動の将来予測研究の発展に貢献したい。

参考文献

DeConto, R. M., & D. Pollard (2016), Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise, *Nature*, 531(7596), 591-597, doi:10.1038/nature17145.

Hirano, D., et al. (2020), Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica, *Nat Commun*, 11(1), 4221, doi:10.1038/s41467-020-17527-4.

Kusahara, K., D. Hirano, M. Fujii, A. D. Fraser, & T. Tamura (2021), Modeling intensive ocean–cryosphere interactions in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *The Cryosphere*, 15(4), 1697-1717, doi:10.5194/tc-15-1697-2021.

Rignot, E., S. Jacobs, J. Mouginot, & B. Scheuchl (2013), Ice-shelf melting around Antarctica, *Science*, 341(6143), 266-270, doi:10.1126/science.1235798.

Schmidtko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson, & S. Aoki (2014), Multidecadal warming of Antarctic waters, *Science*, 346(6214), 1227-1231, doi:10.1126/science.1256117.

プレスリリース

「暖かい海水が白瀬氷河を底面から融かすプロセスを解明～海洋観測と数値モデル，測地・雪氷学分野との融合研究～」（2020 年 8 月 25 日、国立大学法人 北海道大学、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所、国立研究開発法人 海洋研究開発機構）

東南極における氷床・海洋相互作用 2：トッテン氷河沖

溝端浩平[1]、平野大輔[2,3]、草原和弥[4]、青木茂[5]
[1]東京海洋大学、[2]国立極地研究所、[3]総合研究大学院大学、[4]海洋研究開発機構、[5]北海道大学

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）
A01(公募）東南極トッテン棚氷域における氷床海洋相互作用の観測研究（代表：平野大輔）
B02(公募）衛星高度計による南極海海氷域の海洋循環の解明と周極深層水の輸送経路の推定（代表：溝端浩平）
B02(公募）トッテン棚氷融解の引き金：海洋渦が介在する沖合から棚氷への熱輸送過程の解明（代表：溝端浩平）
A03　未探査領域への挑戦（探査班）（代表: 野木義史）
A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（代表: 阿部彩子）

1．　背景と目的

地球温暖化による海水準上昇が最近の数十年で加速している。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は 2019 年に発行した海洋・雪氷圏に関する報告書で、この加速の理由として、南極やグリーンランドにおける氷床消失の速度増大を挙げている。南極氷床の消失に伴う海洋への淡水放出は、海洋貯熱量増加（熱膨張）や他の氷河・氷床の融解とならび、地球温暖化に伴う海面水位上昇の主要因の一つである。その一方で、地球温暖化に対する南極氷床の応答については不確定性が大きく、これが海面水位上昇の将来予測の不確かさに直結している。現在、南極氷床の質量消失過程についてはカービング（氷河氷床が海洋に氷山を分離する現象）と棚氷の底面融解が挙げられ、後者は特に Marine Ice Sheet Instability（海洋氷床の不安定性）として上述の報告書でも大きく取り上げられている。主に西南極において「沖合から流入した暖水による底面融解」と「融解に伴う氷床の海洋への流出」の連鎖が指摘されてきたが（e.g., Rignot et al., 2014）、近年では東南極のトッテン棚氷で海洋の暖水流入に端を発する底面融解が示唆されている（Li et al., 2016; Rintoul et al., 2016）。これらの底面融解をもたらす暖水は、もともとは南極沿岸から離れた沖合、しかも深度約 200～300m 以深に存在する「周極深層水（Circumpolar Deep Water）」が変質したもので、mCDW（modified CDW）と呼称される（図 1）。mCDW がトッテン棚氷に到達するためには、沖合から沿岸までの輸送プロセスを理解する必要がある。しかしながら、遠隔地かつ季節海氷域であるトッテン棚氷周辺を含む南大洋インド洋セクターでは、時空間方向に密な現場観測を実施し難いため、詳細な海洋循環像を見出せていなかった。

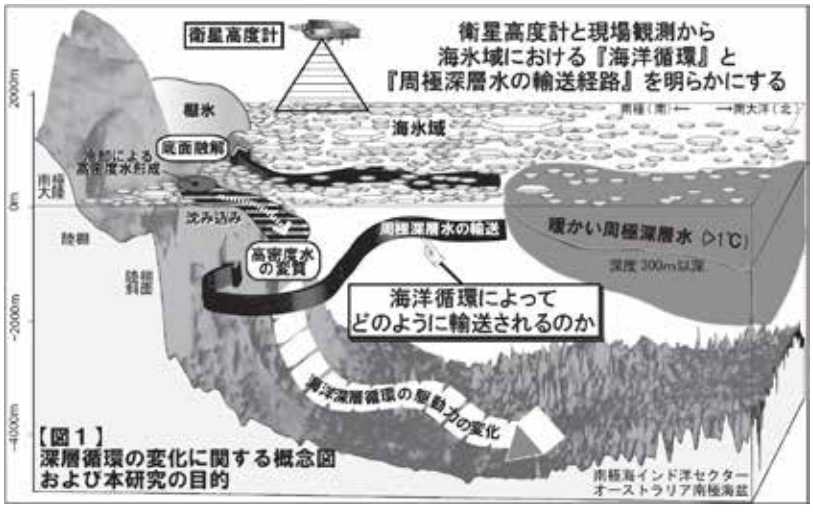


図 1：本研究が着目する沖合から沿岸、棚氷への周極深層水(mCDW)の輸送過程

本研究では、トッテン棚氷の融解をもたらす海洋の暖水 mCDW の輸送プロセスや、見出した海洋循環による海洋熱フラックスなど、海洋の役割を明らかにすることを目的とし、新規の衛星データ解析・狙いを定めた現場観測・改良した数値モデリングによる再現実験を展開した。

2．方法

2－1．現場観測

本研究では、砕氷艦「しらせ」によるトッテン棚氷周辺海域の水理観測および、練習船「海鷹丸」や漁業調査船「開洋丸」によるトッテン棚氷沖の海盆域の水理観測を実施した。各点において CTD（水温塩分圧力プロファイラー）を海面から海底直上 10m まで降下させ、水温・塩分を計測した。

2－2．衛星データ解析

現場観測が不足する海域において、海氷域・開放水面域に関係なく、地衡流を計算するためには海面高度情報が必須となる。ここでは、Mizobata et al. (2016)の手法を衛星海面高度計による観測値に適用することで、南大洋における海面高度を求めた。得られた海面高度データは空間方向に離散的になるため、Shimada et al. (2017)の Topographic Constraint Scheme を用いて空間補間を施した。

2－3．数値モデリング

本研究では、海洋研究開発機構(JAMSTEC)と東京大学大気海洋研究所で共同開発・運用されている海氷海洋結合モデル(COCO)に棚氷要素を導入したモデルを利用し、東南極トッテン棚氷周辺海域の海洋-海氷-棚氷数値モデリングを実施した。海洋モデルの特異点 2 つを東南極大陸上に配置することにより、モデル領域を南大洋全体としつつ、対象領域のトッテン棚氷周辺の水平解像度を局所的に高解像度化(<4 km)させた。このモデルを大気の再解析データ(ERA5、1951–2021 年)を用いて駆動し、そのモデル出力を解析した。

3．成果

3－1．海盆域の新たな海洋循環像

衛星データ解析から得た海面力学高度分布は、ビンセネス湾・ポインセット岬・トッテン棚氷の沖合海盆域に、直径 140～240km で時計回りの巨大な海洋渦が定在していることを示した(Mizobata et al., 2020)。一般的に海洋渦はロスビー波的に西へと伝播するが、明らかになった巨大海洋渦は一定の場所にとどまる。これらの渦の流速構造は、海面から少なくとも深度 1000m 程度までは一様であることが、海面力学高度分布と現場の水温塩分観測を用いて明らかになった。これらの観測事実は、「定在する各渦の東端において、常に暖かい mCDW を南極沿岸の方向へ輸送すること」、「宇宙から推定できる流速場は、mCDW が存在する深度の流速場とほぼ同じであること」を強く示唆している（Mizobata et al., 2020; Hirano et al., 2021）。なお、Mizobata et al. (2020)は各渦の循環強度と風応力カールとの間に有意な関係性を見出しておらず、これらの渦の形成要因や循環維持メカニズムの解明については今後の課題としている。

Hirano et al. (2021)ではポインセット渦と西サブリナ渦による極向きの熱輸送量を試算しており、それぞれ 11.7TW、2.6TW となった。トッテン棚氷の底面融解量は毎年 63.2 ギガトンとされており、これに必要な熱輸送量 0.7TW に対して、十分な熱量が新たに見いだされた定在海洋渦によって輸送されていることが観測から示されたことになる。

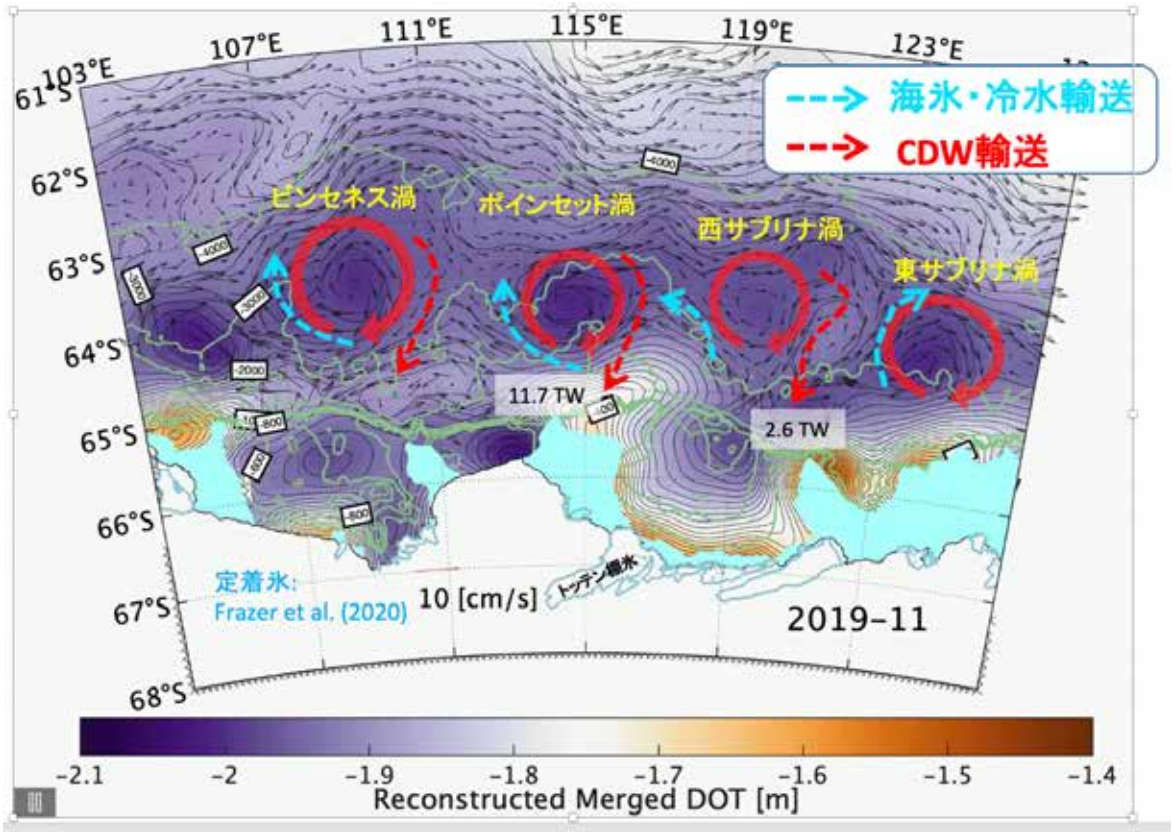


図 1：本研究が着目する沖合から沿岸、棚氷への周極深層水(mCDW)の輸送過程

３－２．沿岸域の新たな海洋循環像

上述のトッテン氷河沖合海域に定在する渦が「常に」暖水を氷河方向へと輸送しているという知見は、この地域における氷床海洋相互作用の気候学的な新しい視点を与えるものである。一方、オーストラリアの観測によりトッテン氷河の前面にまで沖合の暖水が運ばれていることは分かっていたものの（Rintoul et al., 2016）、これら定在渦のアシストで大陸棚上へと流入した暖水は、その後どのような経路を辿って氷河まで到達するのか？つまり、トッテン氷河融解プロセスの包括的理解に欠かせない「大陸棚の入口からトッテン氷河へ至る領域での暖水の分布・循環」に関しては不明であった。そこで、我々は南極地域観測の第IX期重点研究観測プロジェクト・サブテーマ２（通称 ROBOTICA、課題代表者：北海道大学低温科学研究所・青木茂）の枠組みにおいて、大規模観測キャンペーン（青木隊長率いる 61 次隊）を含む「しらせ」による複数回の海洋観測（59 次、61 次、63 次隊）をトッテン海域で実施した。また、特にトッテン氷河近傍海域は海洋循環を理解する上で不可欠な基本情報である海底地形データがほぼ存在していなかったが、これら観測行動中に「しらせ」の砕氷能力や「ヘリ」の機動力を駆使して未踏の地を次々と切り拓き、広範囲における詳細な海洋・海底地形データの取得に成功した（図 3）。

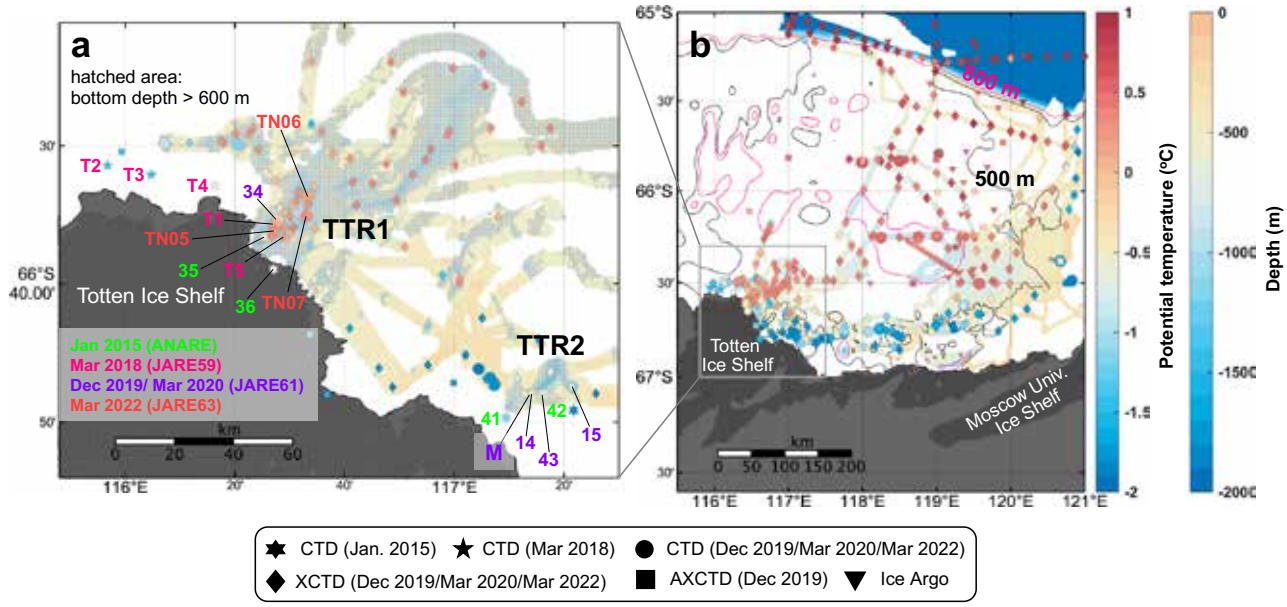


図 3：マルチビームソナーによる海底水深と 200dbar 以深における最大水温（θ_{max}、℃）のマップ（周極深層水が存在する場合は、底層における最大水温に対応）（Hirano et al., in revision）。(a) トッテン棚氷周辺の拡大図。ハッチは海底水深が 600m 以上の領域を示す。 (b) サブリナ海岸沖の拡大図。2015 年の観測はオーストラリアによるもの（Rintoul et al., 2016）。

さて、この広域現場観測データに素直に語らせてみると、沖合起源の暖水は大陸棚上へと広く流入した後、大陸棚上の深いお椀状地形（”Sabrina Depression“）に沿って時計回りに循環していること、そしてその一部が氷河前面の局所的（幅 10-20km）な深い 1000m 級トラフ（主に TTR1）に誘われる形で最終的にトッテン棚氷の下へと流れ込んでいる状況が明らかとなった（図 3）。また、これら観測結果と最新の海底地形を組み込んだ数値モデルによるシミュレーションを比較すると、大陸棚外縁からトッテン棚氷までの周極深層水(高温・高塩分)の海底沿いの流入、局所的なトラフへの暖水流入の状況、およびトッテン棚氷下での活発な底面融解をある程度現実的に再現することが確認された(図 5a)。観測・数値モデル双方の結果を統合することで、暖水はトラフ東半分の底層からトッテン棚氷下へと流入し、棚氷を下から融かし、その融解水は棚氷西半分の上層から流出する、といった一連の氷床海洋相互作用に関連した循環像を明瞭に捉えることができた。このように、沖合から氷河へと繋がる暖かいルート、そして棚氷と海洋との相互作用の実態が見えてきた（図 4）（Hirano et al. in revision）。今後は、係留系観測の多点展開や数値モデルとのさらなる連携強化を図ることで、海洋による熱輸送と棚氷底面融解強度の関連やその変動特性に関する理解を促進し、トッテン海域における氷床海洋相互作用の包括的な解明を目指す。

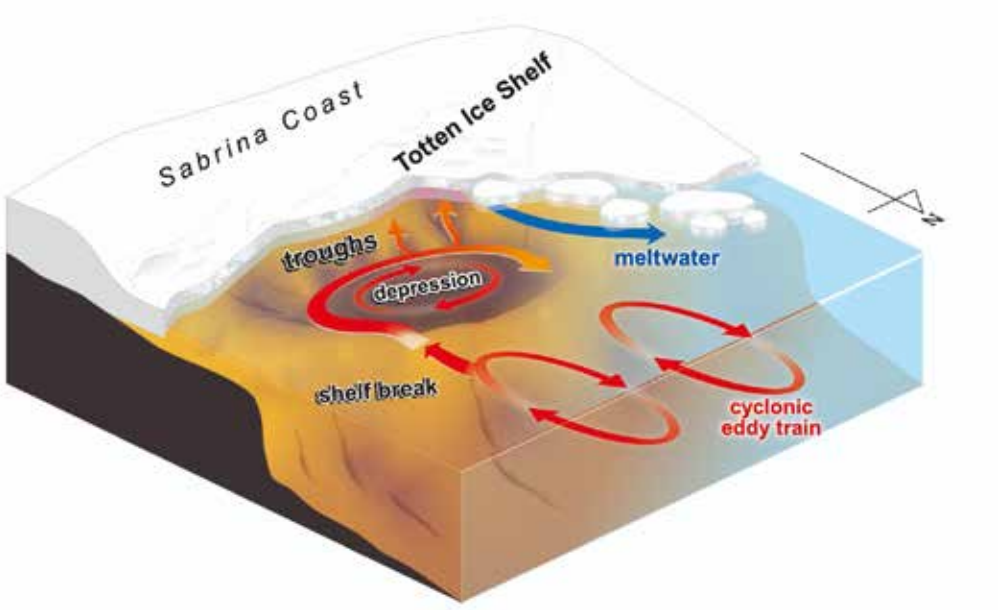


図 4: 沖合からトッテン棚氷への暖かいルートと棚氷―海洋の相互作用。定在渦と陸棚上の時計回り循環により氷河近傍まで運ばれた暖水は、最終的に局所的なトラフに誘われて棚氷下へと運ばれ、棚氷を下から融かす。結果生じる融解水は棚氷の下から海洋へ流出する(Hirano et al., in revision)。

３－３．再現実験

図 5b–c はトッテン棚氷(TIS)とモスクワ大学棚氷の西部(wMUIS)の底面融解の時系列である。トッテン棚氷の年間底面融解量は 40–50 Gt で、衛星観測結果とある程度整合的である。図 3d–e は二つの棚氷底面融解の時系列のウェーブレット・パワースペクトルである。図からトッテン棚氷底面融解は季節変動よりも 5–12 年周期の長周期変動が卓越することがわかる。それに対して、モスクワ大学棚氷では、長周期変動が弱く、季節変動が卓越している。隣接する二つの棚氷の底面融解の変動パターンが大きく異なるのは、モスクワ大学棚氷前面に毎冬現れる沿岸ポリニヤで形成される冷たい高密度陸棚水が流入するためである。トッテン棚氷下には、この冷たい水がほとんど流入しないために、季節変動が弱く、より長周期変動が顕著となることが分かった。長周期変動の駆動要因は現在解析中であるが、風や沖合渦によって規定される大陸棚外縁を横切る周極深層水の変動を反映したものだと考えられる。

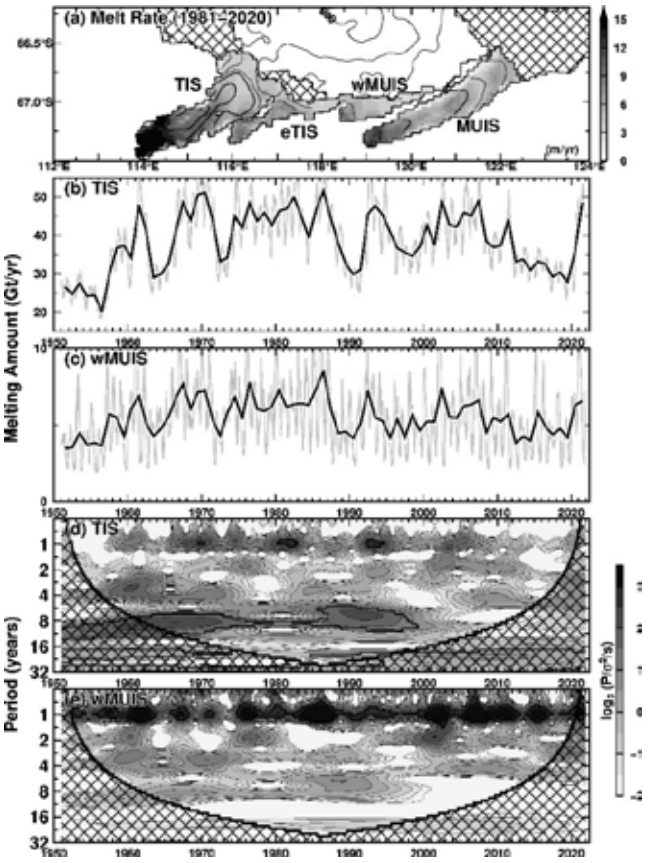


図 5a：棚氷底面融解率，（b–c）時系列，（d–e）ウェーブレットパワースペクトル

３－４．海面力学高度データの開発

地球環境観測衛星 CryoSat-2、Sentinel-3A、Jason-2、Jason-3 に搭載された海面高度計による観測値を用いて、新たな海面力学高度データを開発した。時間解像度は月平均であり、これは極軌道衛星 Cryosat-2 が南大洋全域をカバーするために要する日数（28 日間）に依存している。空間解像度は 0.2 度グリッドとした。

4. 今後の課題

前述したとおり、海盆域で mCDW を南極沿岸へと輸送する定在海洋渦については、その形成要因や循環維持メカニズムが不明である。また、海盆域から沿岸域へと mCDW が流入し、トッテン棚氷に到達するまでにその程度の熱量損失があるのかなども不明である。トッテン棚氷の底面融解を正しく理解し、将来予測につなげるにはいずれの知見も必要不可欠であろう。

参考文献

Hirano, D., Mizobata, K., Sasaki, H., Murase, H., Tamura T. & Aoki, S., Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica. *Communications Earth and Environment* 2, 153, https://doi.org/10.1038/s43247-021-00217-4, 2021.

Li, X., Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Ice flow dynamics and mass loss of Totten Glacier, East Antarctica, from 1989 to 2015, *Geophysical Research Letters* 43 (12), 6366-6373, 2016.

Mizobata, K., Watanabe, E. & Kimura, N., Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, doi:10.1002/2015JC011218, 2016.

Mizobata, K., Shimada, K., Aoki, S., & Kitade, Y., The cyclonic eddy train in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean as revealed by satellite radar altimeters and in situ measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015994, 2020.

Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem M., Seroussi, H., Scheuchl B., Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011, *Geophysical Research Letters*, 41 (10), 3502-3509, 2014.

Rintoul, S. R., Silvano, A., Pena-Molino, B., van Wijk, E., Rosenberg, M., Greenbaum, J. S., & Blankenship, D. D., Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf, *Science Advances*, 2(12), e1601610, doi:10.1126/sciadv.1601610, 2016.

Shimada, K., Aoki, S., & Ohshima, K. I., Creation of a gridded dataset for the southern ocean with a topographic constraint scheme. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(3), 511– 532. https://doi.org/10.1175/jtech-d-16-0075., 2017.

プレスリリース

「巨大な海洋渦が暖かい海水を南極大陸方向へ運ぶ東南極トッテン氷河を下から融かす主要な熱源」（2021 年 10 月 26 日、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所・国立大学法人東京海洋大学・国立研究開発法人水産研究・教育機構・国立大学法人北海道大学）

南極底層水を起点とした物質循環

大橋良彦[1,2]、川合美千代[1]
[1]東京海洋大学、[2]The University Centre in Svalbard

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

1．背景と目的

南極底層水（AABW：中立密度 γ^n ＞28.27 kg m^{-3}）は、海氷生産に伴い排出される重い水を主な起源とする高密度陸棚水（DSW）と高温な周極深層水（CDW）の混合によって形成される（Baines and Condie, 1998；Orsi et al., 1999）。この AABW の形成・広がりに伴って、海洋表層の栄養塩や炭素が全球深層に輸送されていく。従って、AABW を起点とした物質循環の解明が全球規模の栄養塩や炭素輸送の理解には必要不可欠である。しかしながら、南極沿岸域における観測データが不足していることから、AABW がどの程度の時間スケールで広がり、その間にどのような過程で栄養塩や炭素が輸送されていくか詳細には明らかとなっていない。そこで本研究では、近年 AABW の形成が発見された東南極ケープダンレー沖（Ohshima et al., 2013）を研究対象海域とし（図 1）、AABW の循環時間スケールの定量化および AABW の形成・輸送に伴う物質循環の解明を目的とした。

2．方法

2—1．海洋観測データ解析

2019 年および 2020 年 1–2 月の夏季 2 度にわたる白鳳丸航海で海洋観測を実施した（KH19-01；図 1 緑丸、KH20-01；図 1 赤丸）。これらの白鳳丸航海で取得したデータに加え、GLODAP（Global Ocean Data Analysis Project；Olsen et al., 2016）や CCHDO（CLIVAR and Carbon Hydrographic Data Office；https://cchdo.ucsd.edu/）のデータも解析した。使用したパラメータは水温、塩分、圧力、クロロフルオロカーボン（CFC-12）、六フッ化硫黄（SF_6）、溶存無機炭素（DIC）、栄養塩である。CFC-12 と SF_6 は海水年齢（形成されてからの経過時間）の指標となることから、その比（SF_6/CFC-12）を用い、AABW の年齢を推定した（3–1 参照）。

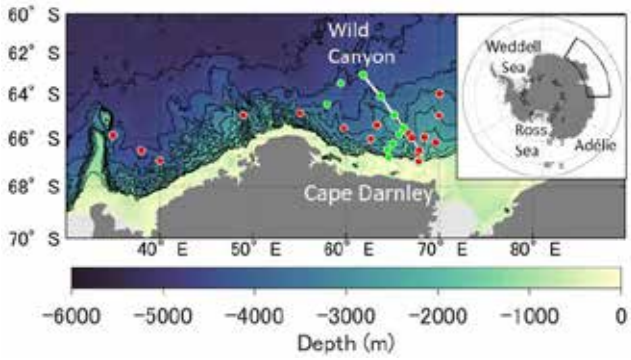


図 1：研究対象海域。右上の図では、研究対象海域を黒枠で示す。白鳳丸航海 KH19-01、KH20-01 の観測点をそれぞれ緑丸、赤丸で示す。図 3 で使用した Wild Canyon 沿いの観測ラインを白線で示す。海底地形は Rtopo-2 データセットに基づいている（Schaffer et al., 2016）。Ohashi et al.（2022）の図を一部改変。

2—2．数値モデル実験

観測を実施した年だけでなくその他の年においても一様に AABW の年齢推定法が適用可能かどうかを調べるために（3–1 参照）、数値モデル実験を実施した。実験には海洋-海氷-棚氷結合モデル（海面強制を除き Kusahara, 2020 と同じ設定）を使用し、さらに大気分圧を年々変動させた CFC-12 と SF_6 を

Orr et al.（2017）に基づき導入した（図 2；詳細は Ohashi et al., 2022 を参照）。

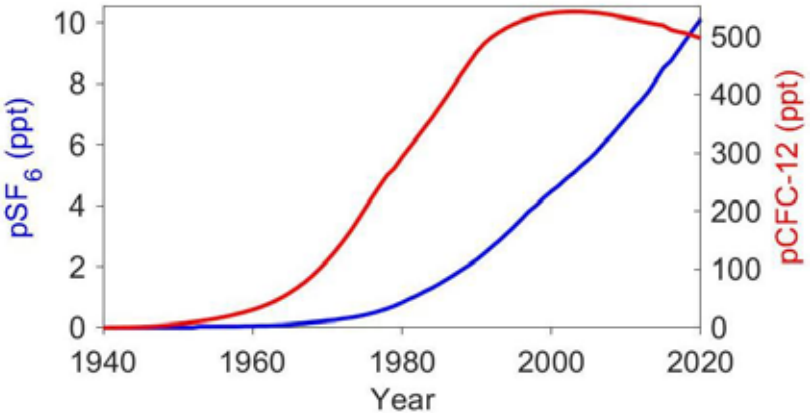


図 2：CFC-12（赤線）と SF_6（青線）の大気分圧の年々変動（2015 年以前は Bullister, 2015、2016 年以降は National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory からデータを取得）。

3. 成果

3—1. AABW の循環時間スケール

まず、Wild Canyon における CFC-12 と SF_6 の鉛直分布を調べたところ、Lower CDW（LCDW：28.15 kg $m^{-3} < \gamma^n \leq 28.27$ kg m^{-3}；Williams et al., 2015）においてその値が最も低かった（図 3）。また、66°S 付近を除く底層の AABW において CFC-12 と SF_6 が比較的高い値を示した（CFC-12 分圧：pCFC-12 > 120 ppt；図 3a、SF_6 分圧：pSF_6 > 1.5 ppt；図 3b）。これは、峡谷の底層に沿って高 CFC-12・SF_6 の新しい AABW が流出していることを示している。

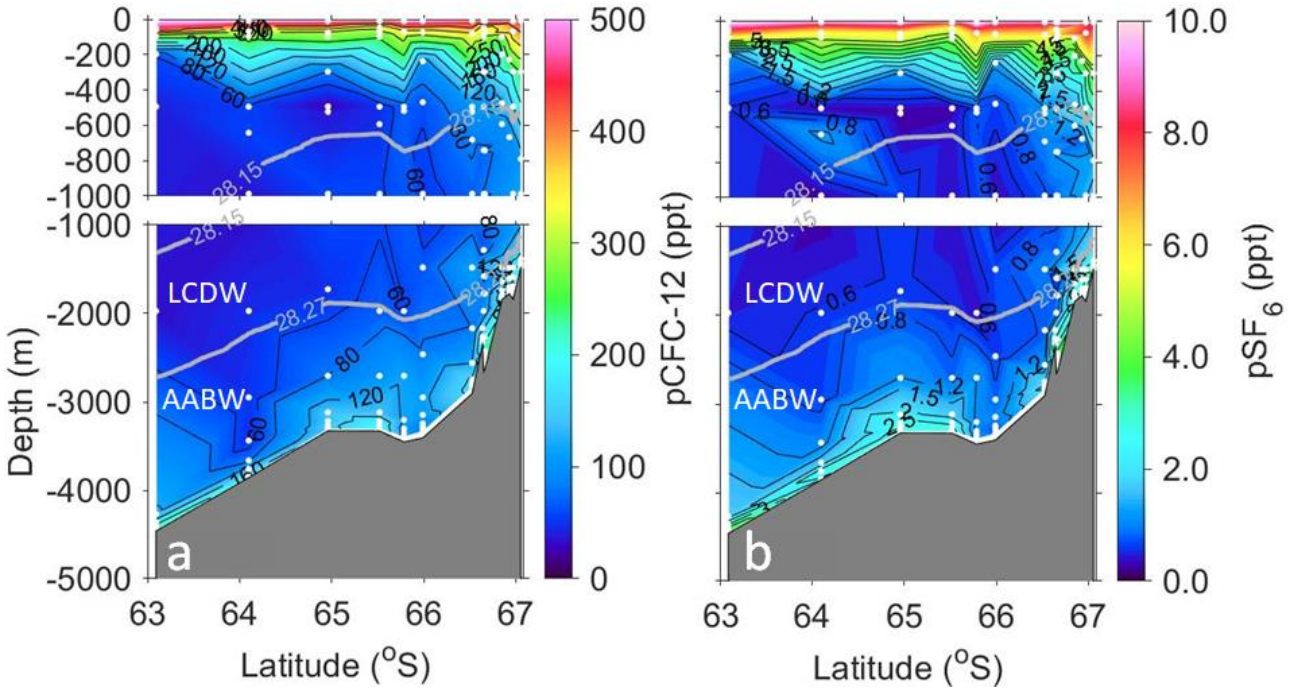


図 3：Wild Canyon 沿い（図 1 の白線）の（a）CFC-12 分圧（pCFC-12）と（b）SF_6 分圧（pSF_6）の鉛直断面図。灰線は中立密度 γ^n = 28.15 kg m^{-3} と γ^n = 28.27 kg m^{-3} の等値線を示す。これらの中立密度の等値線は LCDW と AABW の境界である。Ohashi et al.（2022）の図を一部改変。

次に、観測された AABW の CFC-12 と SF_6 の関係を調べたところ、高 CFC-12・SF_6 と低 CFC-12・SF_6 を結ぶ線形関係を示した。数値モデル実験においても、観測同様に AABW の CFC-12・SF_6 間に線形関係が得られた（R > 0.99、p < 0.01；図 4）。さらに、その直線の傾きは大気分圧の SF_6/CFC-12 比の年々

変動と概ね一致していた。これらの結果から、AABW の CFC-12・SF_6 値は AABW が形成された年の DSW（大気分圧の変動と対応）と LCDW（CFC-12・SF_6 値がほとんどゼロ）の二成分混合により説明できることを示唆している。さらに、観測と数値モデル実験の結果から、AABW の CFC-12 と SF_6 の関係がこの二成分混合を反映していると仮定し SF_6/CFC-12 比に基づいた年齢推定法に独自の改良を加え、AABW に適した手法として提案した。この手法により AABW の年齢を推定したところ、ケープダンレー沖で形成された AABW（Cape Darnley Bottom Water：CDBW）が北西方向へ数年程度で輸送されることが示された（図 5）。また、ケープダンレーの東側にはロス海やアデリーランド沖を起源とする比較的古い AABW（最大~8 years、図 5 赤丸）、西側の沖合の一部にはウェッデル海を起源とする最も古い AABW（最大 ＞20 years、図 5 緑丸）が見られた。

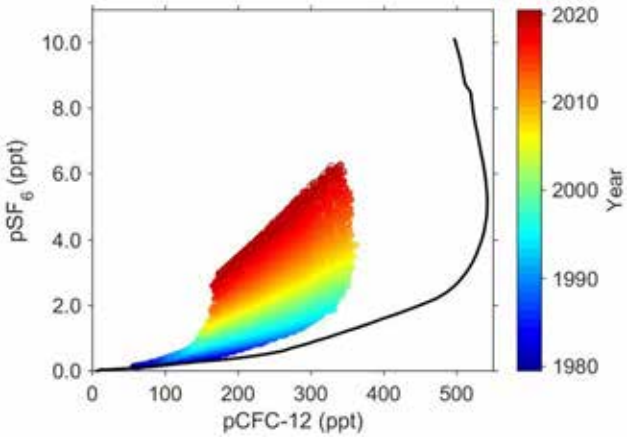


図 4：数値モデル実験における AABW の CFC-12 分圧（pCFC-12）と SF_6 分圧（pSF_6）の関係の年々変動。黒線は大気分圧の年々変動を示す。Ohashi et al.（2022）の図を一部改変。

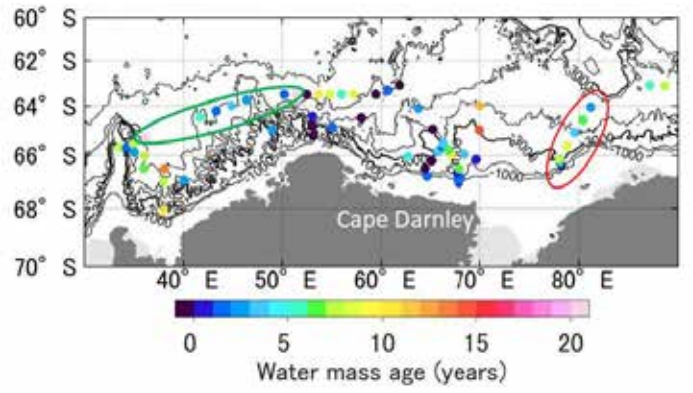


図 5：底層の AABW の年齢分布（海底から 100 m 以内の平均値）。Ohashi et al.（2022）の図を一部改変。

3—2. 人為起源二酸化炭素の輸送と貯蔵

3–1 の方法で見積もった水塊年齢から人為起源二酸化炭素（C_{ant}）濃度を推定したところ、図 6 の海域の AABW に含まれる C_{ant} 濃度は 16 ± 4 μmol kg^{-1}、C_{ant} 貯蔵量は 38 ± 19 mol m^{-2} であった。同様の手法を他海域にも適用して比較したところ、ケープダンレー沖では他の東南極域に比べて C_{ant} 濃度・貯蔵量が高いことが分かった。これは、水塊年齢の新しい AABW すなわち CDBW の存在に起因していると考えられる。水塊年齢の新しい AABW は、より多くの C_{ant} を含む最近の大気と接していたことから多量の C_{ant} を輸送する。以上の C_{ant} の見積もりから、ケープダンレー沖は東南極の AABW の C_{ant} の輸送と貯蔵に重要な役割を果たしている可能性が示された。

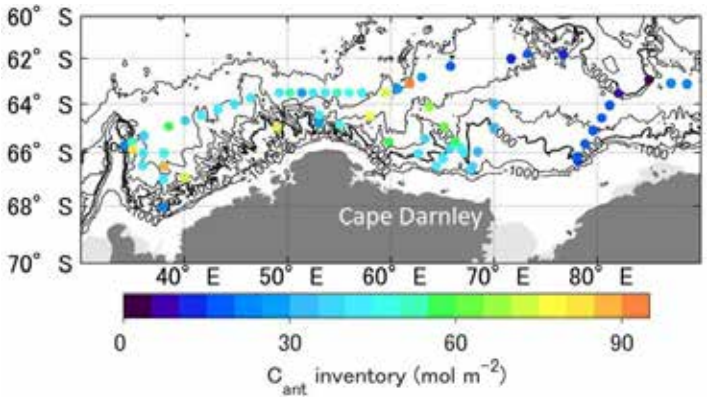


図 6：AABW における人為起源二酸化炭素（C_{ant}）貯蔵量分布。

3—3. 大陸棚から海盆までの炭素輸送

ケープダンレー沖の大陸棚斜面から海盆域にかけての海水中 DIC 濃度の変化から、modified-CDW（mCDW）が大陸棚で DSW へと変質し、LCDW と混合したのち、CDBW として海盆を広がる間の炭素

変化量を明らかにした（表 1；田村，2021）。まず、新たに形成された CDBW と LCDW の平均濃度を調べ、これらから観測データがほとんど存在しない DSW の DIC 濃度を推定した。この推定値から、大陸棚上で年間 1.0–2.1×10^{11} mol の炭素が除去されていると見積もられた。先行研究で指摘されたように（Murakami et al., 2020）、大陸棚域での高い生物生産によるものと考えられる。大陸棚上で除去される炭素は主に海盆から mCDW によって運ばれたものであり、古い CDW に蓄えられた炭素を大陸棚で大気に放出せずに再び有機物に変えて除去しているという様子が明らかとなった。一方、大陸棚から流出した DSW が CDBW となって海盆を広がる間には、有機物分解による炭素の有意な増加は見られず、この間の DIC 濃度の変化は DIC 濃度の高い古い AABW との混合で説明できることが分かった（図 7）。

表 1：ケープダンレー沖海域における水塊の変質・混合にともなう炭素と栄養塩濃度の変化。
DSW の栄養塩は実測値、DIC は推定値（単位はいずれも μmol kg^{-1}；田村，2021 から一部改変）。

	mCDW		DSW		LCDW		CDBW
DIC	2253±6	→	2242±5	＋	2256±5	→	2244±4
N	31.6±1.0	→	28.9±2	＋	32.2±0.7	→	31.6±1.2
P	2.2±0.1	→	2.1±0.1	＋	2.3±0.1	→	2.2±0.2
Si	87.1±6	→	64.6±6	＋	120±6	→	99±9

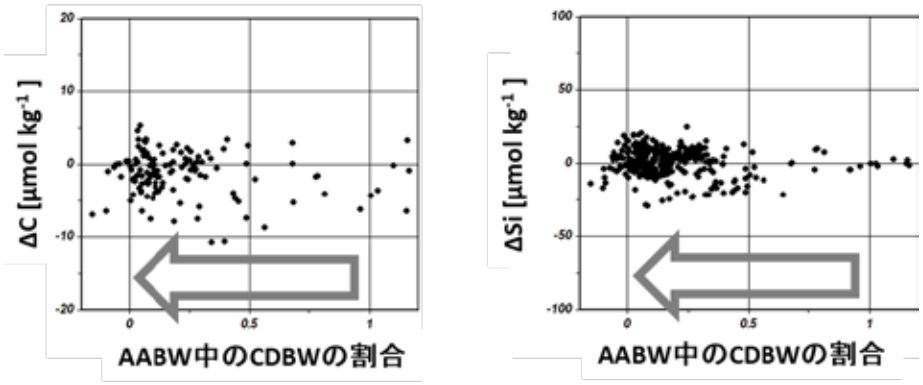


図 7：ケープダンレー沖海盆域における CDBW と他の AABW との混合比と、混合以外の要因（有機物分解等）による炭素、ケイ素濃度の変化量。

3—4．大陸棚から海盆までの栄養塩輸送

栄養塩については、ケープダンレー沖のポリニヤ域と大陸棚斜面での時系列採水器のデータも加えて解析を行った。大陸棚では、海盆から流入する CDW が栄養塩を供給し、夏季には生物生産によって栄養塩濃度が低下するが、冬季の間の再生により、リンと窒素栄養塩濃度はほぼ元の濃度に回復していた。一方、ケイ素は元の値には戻らなかった。つまり、大陸棚上で CDW が DSW に変質する過程において、ケイ素が優先的に除去されていることが分かった（表 1、図 8）。大陸棚でのケイ素除去のプロセスとしては生物による取り込みとその後の堆積物への堆積が主であると考えられるが、調査の結果、ケイ素の一部は粒状生物ケイ酸として海氷や DSW によって海盆域へ輸送されていることも示された（野白, 2022）。DSW が CDBW となった後は、DIC と同様、有機物や粒状ケイ酸の分解・溶解による栄養塩濃度の有意な増加はみられず、古い AABW との混合によ

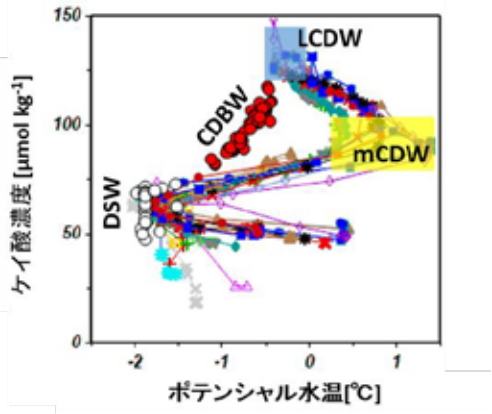


図 8：ケープダンレー沖海域における水温とケイ酸濃度の関係図。

って濃度が増加していることが示された（図 7）。このことは、3–1 で明らかとなった CDBW の素早い輸送とも整合的であった。

4. 領域内連携

4—1. モデル班との連携

数値モデル実験（2–2 参照）は、モデル班との連携によって実施した。この連携によって、AABW の年齢推定法が沿岸域の観測データが存在する 2019・2020 年だけでなく、それ以前の年に形成された AABW に関しても一様に適用できる可能性が示された。このように、数値モデル実験の実施により、観測データの時間的な制限を補うことができた（図 4）。

4—2. 生態系班との連携

生物を介した物質輸送について明らかにするため、生態系班との連携により、海水・海氷中の生物ケイ酸濃度、粒状窒素の濃度と同位体比、粒状炭素の濃度と同位体比の測定を行った。その結果、南大洋では海水中でも海氷中でも粒状物中のケイ素／窒素比とケイ素／炭素比が高く、ケイ素を優先的に粒子として除去していることが示された（野白, 2022）。また、東南極の多数の海域における観測結果から、海氷中粒子と海水中粒子の元素比や同位体比の違いをまとめた（更科, 2022）。これらの結果は、海氷由来有機物の海洋生態系への寄与を理解する上での重要な基礎情報となる。

4—3. 生態系班・探査班・公募研究者等との連携

日本海洋学会による研究の将来構想の取り組みにおいて、「極域」海洋における今後の研究についての議論と取りまとめを行った。南大洋における氷床海洋相互作用、海氷を介した生態系、沿岸域の物質循環を重要課題として取り上げたほか、数値モデルの改良や海底観測基地などの基盤に関する提案を行った（川合ら，2021）。

5. 今後の課題

本研究では、AABW の循環時間スケールや物質循環過程に関して定量的な知見を得ることができた。しかしながら、本研究の結果は、ある一時期を捉えたスナップショットか、あるいは定常状態を仮定した推定である。本研究の対象であるケープダンレー沖では、1970 年代から 2010 年代にかけて AABW の昇温や低塩化が観測されている（Aoki et al., 2020）。このような AABW の特性の時間的な変化に付随して、AABW の循環時間スケールや物質循環過程も変化していることが予想される。しかしながら、これらの変化は、海水の基本的な特性である水温・塩分の変化と比べて、理解がほとんど進んでいない。以上のことから、CFC・SF_6、DIC、栄養塩を対象とした海洋化学観測を継続的に実施し過去の蓄積されたデータと比較することで、AABW の循環時間スケールや物質循環過程の変化を定量的に理解していくことが今後の課題である。

参考文献

Aoki, S., K. Katsumata, M. Hamaguchi, A. Noda, Y. Kitade, K. Shimada, D. Hirano, D. Simizu, et al., Freshening of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, *J. Geophys. Res.: Oceans*, **125**, e2020JC016374,

https://doi.org/10.1029/2020JC016374, 2020.

Baines, P. G. and S. Condie, Observations and modeling of Antarctic downslope flows: A review, *Ocean, Ice and Atmosphere: Interactions at Antarctic Continental Margin, Antarctic Research Series* (eds Jacobs, S. S. and R. Weiss), **75**, 29–49, (AGU, 1998).

Bullister, J. L. Atmospheric Histories (1765–2015) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl_4, SF_6 and N_2O (Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, 2015).

川合美千代、田村岳史、渡邉英嗣、西岡純、野村大樹、真壁竜介、溝端浩平、安中さやか、海洋学の 10 年展望 2021：極域、*海の研究*、**30** (5)、159–178、2021.

Kusahara, K., Interannual-to-multidecadal responses of Antarctic ice shelf-ocean interaction and coastal water masses during the twentieth century and the early twenty-first century to dynamic and thermodynamic forcing, *J. Clim.*, **33**, 4941–4973, 2020.

Murakami, K., D. Nomura, G. Hashida, S. Nakaoka, Y. Kitade, D. Hirano, T. Hirawake, and K. I. Ohshima, Strong biological carbon uptake and carbonate chemistry associated with dense shelf water outflows in the Cape Darnley polynya, East Antarctica, *Mar. Chem.*, **225**, 103842, https://doi.org/10.1016/j.marchem.2020.103842, 2020.

野白夏海、南極沿岸域における生物ケイ酸の分布とその変動要因、東京海洋大学海洋科学技術研究科、修士学位論文、2022.

Ohashi, Y., M. Yamamoto-Kawai, K. Kusahara, K. Sasaki, and K. I. Ohshima, Age distribution of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, estimated using chlorofluorocarbon and sulfur hexafluoride, *Sci. Rep.*, **12**, 8462, https://doi.org/10.1038/s41598-022-12109-4, 2022.

Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, et al., Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya, *Nat. Geosci.*, **6**, 235–240, 2013.

Olsen, A., R. M. Key, S. van Heuven, S. K. Lauvset, A. Velo, X. Lin, C. Schirnick, A. Kozyr, et al., The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2) – an internally consistent data product for the world ocean, *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 297–323, 2016.

Orr, J. C., R. G. Najjar, O. Aumont, L. Bopp, J. L. Bullister, G. Danabasoglu, S. C. Doney, J. P. Dunne, et al., Biogeochemical protocols and diagnostics for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geosci. Model Dev.*, **10**, 2169–2199, 2017.

Orsi, A. H., G. C. Johnson, and J. L. Bullister, Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water, *Prog. Oceanogr.*, **43**, 55–109, 1999.

更科宏紀、粒子状物質の同位体比から見た南大洋における炭素・窒素循環、東京海洋大学海洋資源環境学部、卒業論文、2022.

Schaffer, J., R. Timmermann, J. E. Arndt, S. S. Kristensen, C. Mayer, M. Morlighem, and D. Steinhage, A global, high-resolution data set of ice sheet topography, cavity geometry, and ocean bathymetry, *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 543–557, 2016.

田村尚之、ケープダンレー底層水の形成と輸送に関する炭素循環、東京海洋大学海洋科学技術研究科、修士学位論文、2021.

Williams, N. L., R. A. Feely, C. L. Sabine, A. G. Dickson, J. H. Swift, L. D. Talley, and J. L. Russell, Quantifying anthropogenic carbon inventory changes in the Pacific sector of the Southern Ocean, *Mar. Chem.*, **174**, 147–160, 2015.

観測航海から明らかになった底層水の変動
－塩分と南北循環の変動－

勝又 勝郎[1]、青木 茂[2]
[1]海洋研究開発機構、[2]北海道大学低温科学研究所

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

1．背景

1－1．はじめに

本領域のターゲットの一つは南極底層水である。南極底層水は、北は大西洋・インド洋・太平洋の三大洋の底層に流入し、南は南極大陸に接し沿岸のポリニヤや棚氷に繋がる。大まかな輸送の向きは北向きであり南極大陸やその周囲の変動を全海洋に伝え得る。本領域は「しらせ」「海鷹丸」「開洋丸」「みらい」「白鳳丸」の五船による観測で、東南極（経度 30 から 150 度）で南極底層水のいわば「初期条件」を決める南部の観測を集中的に行った。それによって明らかになった南極底層水の 10 年程度の時間スケールの変動を詳述する。

1－2．「南極の海と氷床」以前

温度・塩分の高精度観測が南大洋で大規模に行われるようになったのはせいぜい 1980 年代からである。それ以前の数少ない船舶観測の記録と 1980 年代以後の記録を突き合わせることにより、南大洋の東南極セクターでは塩分が低下していること（たとえば Rintoul, 2007）・南極底層水の量が減少していること（Purkey and Johnson, 2012）が明らかにされていた。南極底層水はポリニヤや大陸棚で形成した塩分が濃く温度が低い高密度水が大陸斜面を流れながら周囲の海水と混合して生じるので、これらの変化はポリニヤや大陸棚で生じた変動か、高密度水が大陸斜面を流れる経路や混合の強さが変化したことを反映している。2000 年代に観測された底層水の塩分低下は東南極のロス海やさらにその東方にある西南極の高密度水の塩分が低下したことの影響と考えられている。

2．分かったこと

2－1．塩分低下から塩分上昇へ

2018 年 12 月から 2019 年 2 月に行われた「開洋丸」観測によって、東南極（東経 80 度から 170 度）の底層の塩分が上昇していることが明らかになった（図 1）。すなわち 1990 年代から続いていた塩分低下が逆転した。データを時系列で並べてみると、逆転は 2010 年代前半に生じている。また塩分の上昇は東ほど強く、この塩分上昇の原因は観測海域の東側にあると考えられる。実際ロス海の陸棚上やさらに東方のアムンゼン海で 2009 年以降に塩分が増加しているという報告がある。このように底層水の塩分が 10 年程度で変動することは、少なくとも 10 年に一度以上は観測をしなければ底層水の変動はモニターできないということを意味する。（プレスリリース 2020/9/16 北海道大学・海洋研究開発機構・東京海洋大学 https://www.hokudai.ac.jp/news/2020/09/post-724.html）

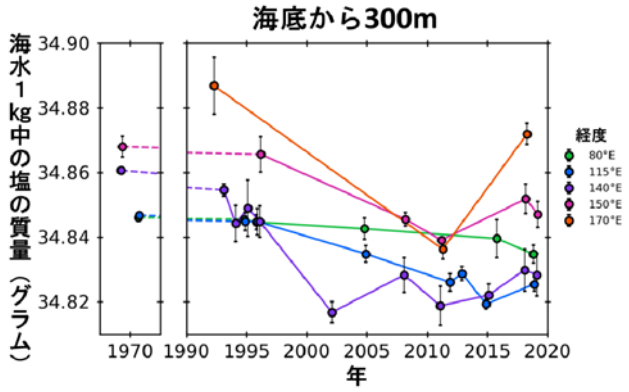


図 1：海底から 300 m までを平均した塩分の変化。色は経度を表す。

２－２．南極環海流の南限の南下

「開洋丸」航海の観測点は 1996 年に同海域を観測した BROKE 計画（Bindoff et al., 2000）とできるだけ近くなるように設定した。両者の結果を比較することにより、南極環海流の南限がこの 23 年間で南下したことが分かった。南極環海流内に存在する強流帯（ジェット）は地衡流バランスによって海面高度の傾きが強くなるので人工衛星搭載の海面高度を観測することによってその動きを追跡できるが、南極環海流の南限は強流帯をともなわず、実際に海洋内部を観測しないとその位置を知ることができない。そのため今回の温度塩分プロファイラによる観測で初めてその位置が南下していることが分かった。南大洋上層は東向きに流れる環海流と西向きに流れる沿岸流に加えて、風の効果で中層から表層に引き上げられた（湧昇流）海水が南に流れている。太平洋やインド洋の深層を流れている海水はバクテリアや細菌の働きにより溶存酸素が非常に少ない。この酸素が少ない深層水（上部環状深層水 Upper Circumpolar Deep Water）は南に流れながら周囲の溶存酸素が多い海水と混合して酸素極小という特徴を失う。この極小の南限を環海流の南限と定義する。溶存酸素データより数が多い水温データを用いるために、溶存酸素と水温の関係を調べると酸素極小は水温 1.5 度によく対応していることが分かる。1996 年と 2019 年の水温・溶存酸素のデータを比較すると、南限が 50 ～ 120 km 南下していることが分かった。南限は深さ 300 m から 600 m にある酸素極小（あるいは水温 1.5 度の暖水）で定義したからこれは (A) 上層の水塊だけが南下して下層はあまり変動していない (B) 上から下まで一様に南下した、という二つの可能性がある。両者は物理が異なって、(A) ははっきりとした上下構造を持つ（傾圧な）渦による輸送、(B) は風などの変動に応答した（順圧な）海流の移動と解釈できる。(B) は海面高度や海水の厚み dynamic height を追跡することで観測できる。低気圧などによる数日程度の変動は等密度面を上下に変動させるから、この効果を取り除くために等密度面の上で水温を調べた。上部環状深層水の密度帯（1028.1 ～ 1028.2 kg/m^3） で５つの南北観測線上の平均で 0.31 ℃ほど温度が上昇していてそのうち海面高度から分かる海流の移動 (B) が 0.21 ℃程度、残りの 0.10 ℃程度が渦による上層の南向き輸送の効果 (A) と分かった。この南限の移動は 1996 年と 2019 年の二度の航海以外の水温データにも見つかっていて、一時的な現象ではないことも確認されている。また数値シミュレーションの結果にも確認されていて、数値モデルによる実験から海上を吹く風の効果が南下の一つの原因であることが示唆されている。偏西風の強化で渦による上層の南向きの輸送が強まったと解釈される。

（プレスリリース 2021/6/14 北海道大学・海洋研究開発機構 https://www.hokudai.ac.jp/news/2021/06/post-856.html）

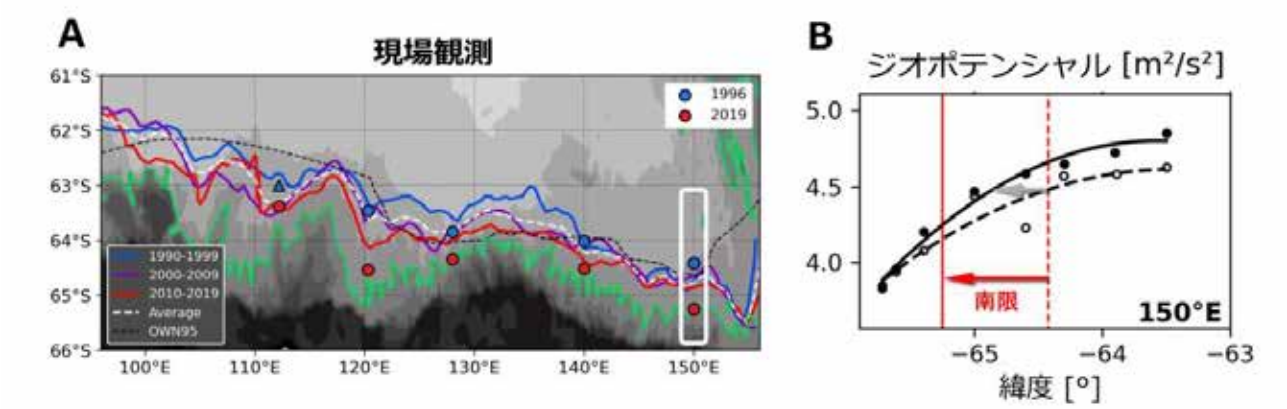


図２：南極環海流の南限の変動。A: 青点が 1996 年、赤点が 2019 年の位置。青線・紫線・赤線がそれぞれ 1990 年代・2000 年代・2010 年代の位置。黒破線が 1990 年代の位置。背景は海底地形で緑線が 3000 m 深のコンター。B: 東経 150 度での 1996 年（点線）と 2019 年（実線）の海水の厚さ dynamic height。厚さが同じ点の移動（灰色矢印）は海洋内部で観測された南限の移動（赤矢印）より小さい。

２－２．豪州南極海盆に沈み込む高密度水の浅化

東京海洋大学の「海鷹丸」による南大洋東経 110 度観測は 2011 年からほぼ毎年行われている。そのデータを 1990 年代から行われている船舶観測のデータと比較することで、豪州南極海盆における子午面循環の変動の特徴が明らかになった（図３）。南極底層水は低温・低塩・高酸素のポリニヤに由来する高密度な水と高温・高塩・低酸素の北方の大洋に由来する低密度な海水の混合で生じることが知られている。観測された変化はポリニヤ由来の高密度水が底層で減少していると解釈できる。また中深層では塩分を除いて逆の変化が見られ、高密度水の密度が軽くなって 1990 年代は底層に流入していた高密度水が中層に流入していると解釈できる。これらの変化は海流の南下による効果を取り除いても見られた。（プレスリリース 2022/5/24 東京海洋大学・北海道大学・国立極地研究所・上海海洋大学 https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/img/62dc420a616a430fb548e585d6c946ff.pdf）

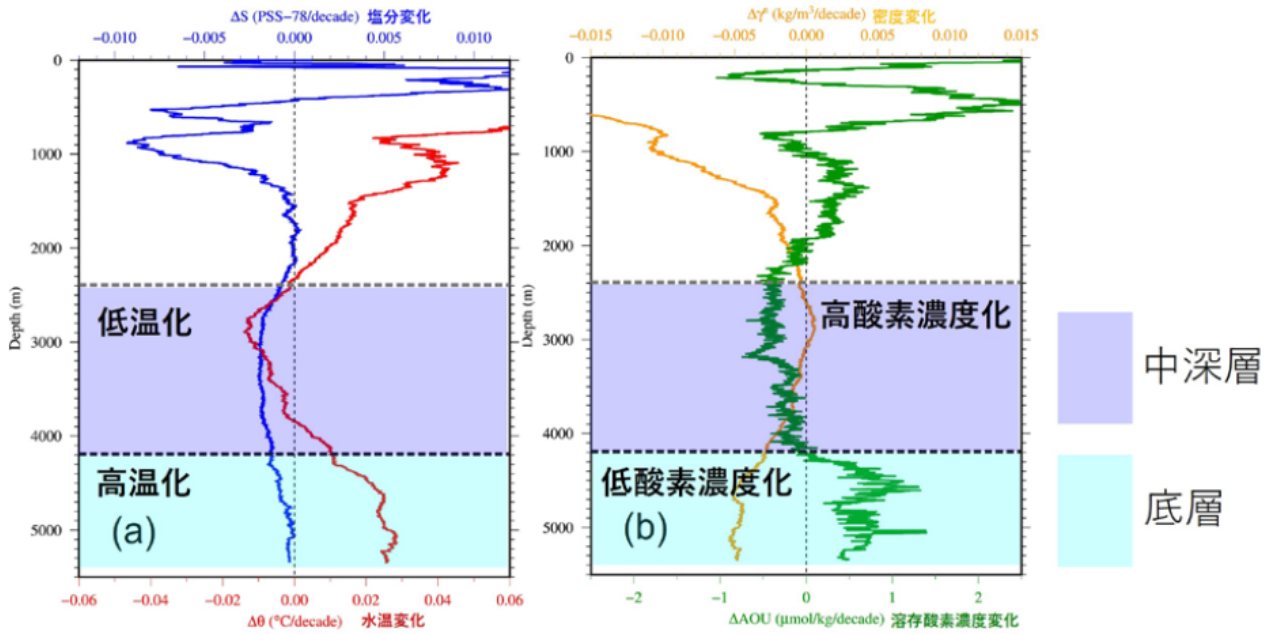


図３：底層の高温化と中層の低温化（左）。底層の酸素濃度低下と中層の酸素濃度上昇（右）。水温（赤）塩分（青）見かけの酸素消費（緑）密度（オレンジ）の１０年あたりの変化を縦軸を深度にして表示した。見かけの酸素消費は正だと酸素が減少したことを意味する。

４．領域内連携

船舶によるデータ取得は深層水班に加え古海洋班・生態系班・探査班の計画も遂行された。

５．今後の課題

南極底層水の変化傾向が海域や深度によって異なることに加え、年代によっても違うことが明らかになった。ロス海やアムンゼン海の棚氷が融けたり海氷が作られたりする効率が 10 年スケールで変化する特徴には、熱帯太平洋に端を発する大気循環の変動がかかわっていう仮説がある。全球におよぶ南極底層水の変動傾向を長期にわたって正しく理解するためには、今後の定期的な観測とともに、広域の大気変動との関係に対する理解を深めることが重要な課題となっている。

参考文献

Aoki S., Yamazaki K., Hirano D., Katsumata K., Shimada K., Kitade Y., Sasaki H., Murase H., Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin during 2010s, Scientific Reports, 10, 2020. doi: 10.1126/sciadv.abf8755

Bindoff, Nathaniel L., Mark A. Rosenberg, and Mark J. Warner. "On the circulation and water masses over the Antarctic continental slope and rise between 80 and 150 E." Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 47.12-13, 2299-2326. 2000. doi: 10.1016/S0967-0645(00)00038-2

Purkey, S. G., & Johnson, G. C., Global Contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s, Journal of Climate, 25(17), 5830-5844. 2012. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00612.1

Rintoul, S. R., Rapid freshening of Antarctic Bottom Water formed in the Indian and Pacific oceans, Geophys. Res. Lett., 34, L06606, 2007. doi:10.1029/2006GL028550.

Shimada K., Kitade Y., Aoki S., Mizobata K., Cheng, L., Takahashi T. K., Makabe, R., Kanda J., Odate T., Shoaling of abyssal ventilation in the Eastern Indian Sector of the Southern Ocean, Communications Earth & Environment, 3, 2022. doi:10.1038/s43247-022-00445-2

Yamazaki K., Aoki S., Katsumata K., Hirano D., Nakayama Y., Multidecadal poleward shift of the southern boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica, Science Advances, 7(24), eabf8755, 2021. doi:10.1126/sciadv.abf8755

ケープダンレー沖底層水の係留系観測
－2019-2020 年の結果－

水田元太[1]、大島慶一郎[2]
[1]北海道大学地球環境科学研究院、[2]北海道大学低温科学研究所

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

1. 背景と目的

南極底層水（Antarctic Bottom Water; AABW）は全球海洋の深層を占める水塊で、気候の形成に重要な役割を果たす。AABW は海氷生成の際に排出されるブラインから形成され、歴史的にはウェッデル海、ロス海、アデリーランド沖で形成されるとされて来た。近年になりケープダンレー沖（図 1）が新たに AABW 形成域であることが示された（Ohshima et al. 2013）。ケープダンレー沖ポリニヤ（図 1 薄い影の領域）では盛んに海氷が生成され、それによって形成された高密度水（Cape Darnley Bottom Water; CDBW）がワイルドキャニオンに沿って広がることが現場観測により分かって来た。しかしこれまでの観測では、ワイルドキャニオンでは 1 点にしか係留系は設置されておらず、しかも CDBW の層のうち海底から 200 m 上の部分までしか測られていなかったため、CDBW の水平鉛直構造は不明であった。そのためブラインから CDBW が形成されるまでの水塊変質過程も十分議論できなかった（Mizuta et al. 2021）。本研究では新たにワイルドキャニオン中の 3 点に係留系を設置することによって、これらの過去の研究では未解明であった点を明らかにすることを目的とする。

2. データ

ワイルドキャニオン中の海底渓谷を横切る W1-W3 の 3 点で、2019 年 2/1 から 2020 年 2/2 のほぼ 1 年間にわたり係留系観測を行った（図 1 ）。係留系は海底から最大 600 m 上まで立ち上げられ、流速計、超音波ドップラー式流速プロファイラー（Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP）、水温塩分センサー、燐光式溶存酸素センサーの合計 22 台の測器が取り付けられた。加えて、中央の W2 点係留系にはセジメントトラップと海水を自動採取する Remote Access Sampler (RAS)が取り付けられた。係留系の設置回収は研究船白鳳丸 KH-19-1, KH-20-1 次航海で行われ、航海中 CTD による水温塩分観測が行われた。ワイルドキャニオン中の詳しい海底地形は明らかでないので、探索班（A03; 代表：野木義史、研究協力者：藤井昌和）による地形探査結果を使用させて頂いた。この他、ポリニヤから陸棚・斜面域にかけて輸送されて来る水塊との比較を行うためミナミゾウアザラシ（Mirounga leonia）を使って得られた水温塩分データ（http://meop.net）を使用した。

3. 結果と議論

図 1（右）は係留期間中の平均流速を表す。海底付近の流れは等深線にほとんど平行で海底峡谷の東側斜面では南東、西側斜面で北西方向を向いている。西側斜面では流速の大きさは海底に近づくほど増加して海底付近では 10 cm/s 以上に達しており、等深線に沿った流れは海底から 500 m 程度の厚さを持っていることが分かる。図は示さないが、この様な等深線に沿った流れは海氷が生成される南半球の冬期に強まる傾向が見られた。冬期には海底峡谷の西側斜面に沿って水温-0.8 度以下で中立密度 28.34 以上の低温高密度の水が分布しており（図 2）、このことから海底付近の水が峡谷内を東から西に等深線に沿って通過してゆく途中で、その冬に新たに形成された CDBW が合流していることが分かる。すなわち、この峡谷が CDBW の輸送経路になっている。図 2 の深さ 1800 m 付近にある破線は中立密度 28.27 の等値線を表しており、AABW（または CDBW）の上端に相当する。CDBW はごく低温なものが海底付近に集中して存在しているというよりは、むしろ水温が緩やかで連続的に変化しながら 500 m 程度の厚さにわたって広がった構造を持っており、同じことは塩分についても確認された。

上に述べた CDBW の水温塩分特性が決まるしくみを明らかにするために、ミナミゾウアザラシによって得られた水温塩分データとの比較を行った。詳細な議論は割愛するが、CDBW はブライン排出によ

って作られた結氷温度の陸棚水（Shelf Water; SW）と、深層から陸棚に進入してくる高温高塩分な周極深層水（Circumpolar Deep Water; CDW)、冬期の冷却によってローカルに作られる冬季水（Winter Water; WW）の 3 つの水塊が幾つかの段階を経て混合することによって形成されることが示された（図 3）。すなわち、まず CDW と WW（それぞれ図 3 の X と三角印）が陸棚付近で混合することにより modified Circumpolar Deep Water （mCDW）が形成され、次にそれが陸棚斜面上部の浅い所で SW（図 3〇印）と上下に接して混合し modified Shelf Water（mSW）が形成される（図 3 黒い+印）。この mSW がほぼ等しい密度を持った CDW（または AABW）の下に沈み込む所でさらに混合が起き、水温塩分が連続的に変化する CDBW の特性が作られる。ただし陸棚近くでは CDBW の層は比較的薄く、それが峡谷内で何故厚くなるかは今後の課題で、傾圧不安定の影響など詳しく検討する必要がある。以上の様な混合過程はウェッデル海やロス海とも似ているが、この海域では CDW と同じ密度を持つ比較的高密度な WW がプリッツ湾からケープダンレー沖（図 1）にかけて形成され、CDW と等密度面に沿って容易に混合し得ることが示された。

さらに Ohshima et al. (2013)による 2008-2009 年と今回の係留系、CTD 観測の結果を比較することで 2008, 2018, 2019 年冬に形成された CDBW の年々変動を調べた。その結果、2008 年に比べ、2018、2019 年の CDBW は塩分が 0.04 psu 水温が 0.2 度程度低いことが分かった。同時に CDW（または mCDW）も 2018、2019 年の方が低塩分であった。また CDBW の塩分とケープダンレー沖ポリニヤでの海氷生産量の間には明瞭な関係は見られなかった。上記の水塊混合過程を考えると、2018、2019 年は WW がより多く混合することによって mCDW が低塩分化し、そのため CDBW も低塩分化した可能性が示唆される。今後は WW の混合割合が増える原因、他の海盆から流入する AABW の影響などを詳しく検討する必要がある。最後に CDBW の流量に関しては、図 2 に示された断面を通過する CDBW の流量は年平均で約 0.3×10^6 m^3/s であった。ただし図 2 で CDBW の層は西側のシルを超えて西方にも広がっており、そちらにも海底渓谷が存在することから CDBW 全体の流量はより多くなると考えられる。

4. まとめ

ケープダンレー沖での CDBW の形成・輸送過程については、これまで他の海域に比べて理解されていない点があったが、今回の観測によって基本的な性質が明らかになって来た。CDBW の時間変動や AABW 全体に与える影響についてはこれまでも幾つかの研究がなされて来ており、今回の観測結果は、そのような問題についてさらに精度の高い議論を行ってゆくための基礎として貢献すると期待される。

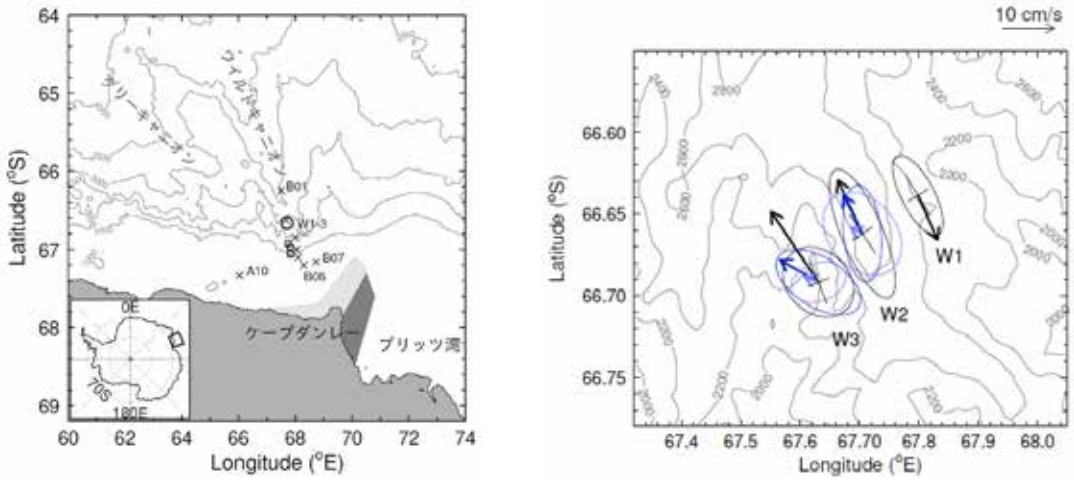


図 1 係留点位置（左）と各係留点での平均流速（右）。右図でベクトルは平均流速、楕円は流速の変動楕円、黒、青、水色はそれぞれ海底から約 80, 250, 500 m 上の流速をそれぞれ表す。

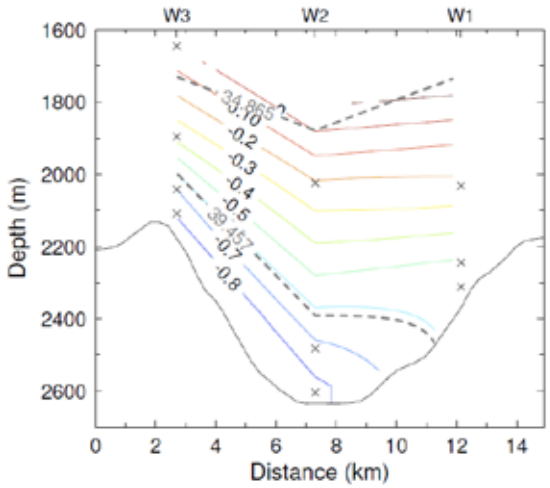


図 2　2019 年冬の平均ポテンシャル水温の断面図。破線は σ_{1500}=34.865，σ_{2500}=39.457 の等密度線（中立密度 28.27, 28.34 に対応）。

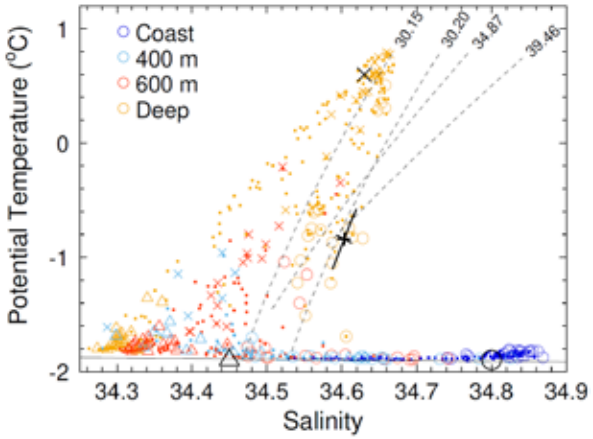


図 3 ケープダンレー沖の水塊の T-S 分布。x、三角、丸印はそれぞれ CDW（温度極大層）、WW、SW の水温塩分を表す。+は W2 係留点の水温塩分。

5. 領域内連携

W2 点係留系には、セジメントトラップが 2 層に取り付けられており、底層流と堆積物の関係など、古海洋班（A01-2）との連携が行われている。同じ W2 点係留系には、RAS も取り付けられ、物質循環とその生物過程へ影響など、生態系班（A01-3）や物質循環グループ(本成果集 1-3 節)との連携が行われている。係留系データの解釈に必要な高精度の海底地形データは探査班（A03）より提供されている。

謝辞

ワイルドキャニオンの海底地形データは藤井昌和さん（A03 班）より頂いた。ミナミゾウアザラシのデータは Mensah Vigan さん（A01-1 班）に整理して頂いたものを使用した。

参考文献

Mizuta, G., Y. Fukamachi, D. Simizu, Y. Matsumura, Y. Kitade, D. Hirano, M. Fujii, Y. Nogi, K. I. Ohshima, Seasonal evolution of Cape Darnley Bottom Water revealed by mooring measurements. *Frontiers in Marine Science,* 8:657119, doi:10.3389/fmars.2021.657119. 2021.

Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki and M. Wakatsuchi, Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya. *Nature Geoscience*, **6**, 235-240, doi:10.1038/ngeo1738, 2013.

南極底層水を導く大量のフラジルアイス生成過程
－ケープダンレーポリニヤでの係留観測の成果－

大島慶一郎[1,2]、深町　康[2]、伊藤優人[3]、中田和輝[4]、田村岳史[3,5]
[1]北海道大学低温科学研究所、[2]北海道大学北極域研究センター、[3]国立極地研究所、[4]宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター、[5]総合研究大学院大学

A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

１．背景と目的

世界の最も大きな海洋循環は、極域の海で重い水が沈み込み全海洋の深層に拡がりながら徐々に湧き上がることで作られる循環（海洋深層循環）である。世界で一番重い海水は南極海で作られ、南極底層水として全世界の底層に拡がっており、南極底層水起源の水は地球の全海水の 30～40%をも占める(Johnson, 2008)。重い水の沈み込みが弱くなったり沈み込む場所が変わると、海洋深層循環が変わり、海の持っている熱容量は非常に大きいので、地球上の気候が大きく変化することになる。過去の地球ではそのような事態が起こっていたことも示唆されている。

南極底層水は南極海のどこでもできるわけではない。ロス海・ウェッデル海・アデリーランド沖が底層水の 3 大生成海域として知られていた(Orsi et al. 2008)。当研究グループは 10 年ほど前に、昭和基地の東方 1,200km のケープダンレー沖が未知（第 4）の南極底層水生成域であることを、底層水の通り道である峡谷での実測から明らかにした（Ohshima et al.2013）。底層水の起源水となる重い水は峡谷の上流にある沿岸ポリニヤ (海氷域内に出現する開水面もしくは薄氷域)での大量の海氷生成によることが示唆されていたが(Tamura et al. 2008)、このポリニヤ（ケープダンレーポリニヤ）内での実測がないため、どのくらい、どのようにして、海氷生成が生じ、それがどのように底層水形成に繋がっていくのかはわかっていなかった。この課題に対して、過去にポリニヤ内で取得された係留系データをベースに、新たに開発した、音響測器から海中の散乱物質を検知する手法と、衛星から海氷状況を高精度に推定するアルゴリズムを組み合わせることで発見的な研究成果を得ることができた。（プレスリリース 2022/10/21 北海道大学・国立極地研究所 https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/221021_pr.pdf）

２．方法

本研究で用いた主とする研究手法は、係留系観測と人工衛星観測である。係留系観測とは、浮きと重りで海中に立ち上げたロープに測器を取り付けて観測する手法で、ケープダンレーポリニヤ内に 2 つの係留系を設置し、2010 年 2 月から 1 年間、海水と海氷の長期連続データを取得した。南極沿岸域の係留観測は、アクセスが難しく氷山の存在もあり、リスクが非常に高い観測であるが、係留中に 2 回の氷山のアタックの形跡があったものの、第 51 次及び 52 次南極地域観測隊により、無事に係留系は回収された。この係留系には、流速を計るための Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP)が付いているが、この ADCP により海中の後方散乱強度が計測できる。当研究グループは、この散乱強度データから海中内部の海氷(フラジルアイス)を捉える手法を開発してきた (Ito et al. 2019)。フラジルアイスとは、乱流強度が強い時に、過冷却下の海中で生成される海氷のことである。本研究では、この手法を適用することで、南極沿岸ポリニヤでは初めて長期連続の海中フラジルアイスデータの取得に成功した。研究グループでは同時に、衛星マイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) データにより、乱流状態で海氷が生成されるフラジルアイス域を検知するアルゴリズムも開発してきた(Nakata et al. 2019; 2021)。このアルゴリズムから、毎日全南極でフラジルアイス域や海氷生産量の推定をすることが可能となり、本研究では係留観測と組み合わせて解析を行った。

３．成果

係留系観測での最も大きな発見は、この沿岸ポリニヤでは、海中で生成されるフラジルアイスが、

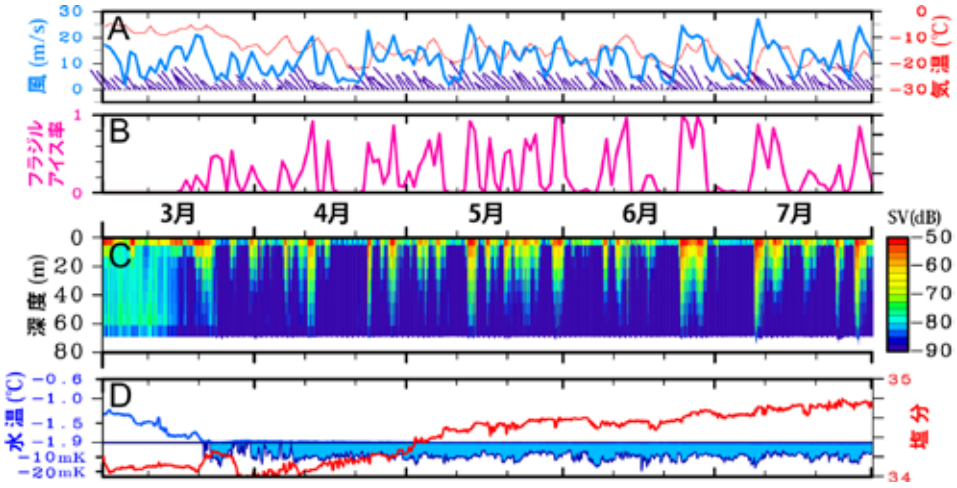


図 1. ケープダンレーポリニヤでの気象(A)・衛星(B)・係留系(C, D)データの時系列。(A) 風速(青)、風ベクトル(紫)、気温(赤)、(B)衛星によるフラジルアイス出現率、(C)音響測器による、海中の後方散乱強度、強いシグナルがフラジルアイス、(D) 水温(青)、塩分(赤)、水色シェードは過冷却を表す。

海中深く少なくとも測器がある水深 80m 付近まで達するようなイベントが頻繁に起こるとわかったことである（図 1C）。これまで観測された北極海やオホーツク海のポリニヤでは、フラジルアイスが観測されるのは水深 30m 程度までであった。このようなフラジルアイスイベントは強風イベントに非常によく対応し（図 1A）、フラジルアイスが達する深さも風の強さとよく対応する。フラジルアイスの生成は海水の過冷却により生じるのであるが、フラジルアイスが生成される冬季は、海水が過冷却になっていたことも観測されている（図 1D 水色シェード）。

海中でフラジルアイスが生成されると、海洋表面が、断熱材となる海氷に覆われないので、海水が直接寒気にさらされ続けて極めて効率的に海氷が生成される。このためにフラジルアイスイベントでは大量の海氷生成が生ずる。海氷が生成されると、塩分の大半が氷からはき出されるので低温・高塩の重い水ができる。そのためポリニヤ内の塩分は冬季にどんどん上昇する（図 1D 赤線）。こうしてポリニヤ内の沿岸側では重い水が生成され、それが下層に潜り込み、陸棚斜面を下りながら周りの水と混合し南極底層水が形成される、という一連のプロセスが観測から明らかになった（図 2）。

このようなフラジルアイスイベントは、研究グループが開発した衛星アルゴリズムからも見事に捉えられている（図 1B）。この係留観測によってフラジルアイス域の検知アルゴリズムが初めて現場観測から検証することができた。フラジルアイスの海中での生成が維持されると、効率的な海氷生産が行われるが、開発した AMSR 薄氷厚アルゴリズムでは、この状況をフラジルアイス域の熱的氷厚が非常に小さいという形で表現している。この薄氷厚アルゴリズムと熱収支計算を組み合わせて見積もった海氷生産量は、係留系で観測された塩分上昇(図 1D 赤線)を、移流効果も考慮すると、よく説明できることもわかった。すなわち、衛星薄氷厚アルゴリズムから海氷生産量を見積もること(Nakata et al. 2021)を現場観測から実証したものと言える。

また、この衛星アルゴリズムと風データから、深いフラジルアイスイベントが南極海のどこで生じやすいかをマッピングすることもできる（図 3）。マッピングから、このイベントは、他のポリニヤでも生じることが示唆されるとともに、ケープダンレーポリニヤが一番生じやすいことが示される。このことが、このポリニヤ域を南極底層水の形成域たらしめており、それは沖向きの卓越風が非常に強く（図 1A）、上流に氷山舌があること（図 2）が原因と考えられる。

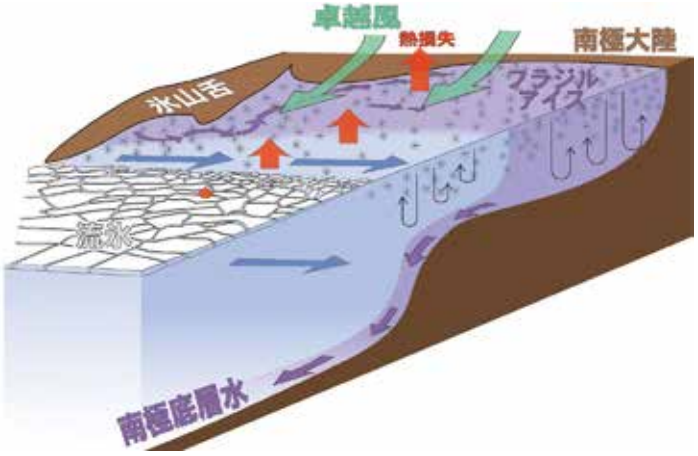


図 2. ケープダンレー沖でのフラジルアイス形成と南極底層水形成の模式図。

4. 今後の課題

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)から、南極底層水の生成量が有意に減少しているということが報告されている。底層水の減少は海

洋深層循環の沈み込みの力の弱化を引き起こし、地球規模の海洋大循環や気候システムに影響を及ぼす可能性がある。これらの将来予測にはモデルが用いられるが、本研究で明らかにされた底層水の形成過程を今後組み込んでいく必要がある。

生物生産が大きい季節海氷域では、フラジルアイスが生成される際に鉄等を含む堆積物を取り込み、海氷が融解するときに放出することで植物プランクトンの大増殖を誘起する、という仮説が提唱されている。今回明らかになったフラジルアイスの生成域が海中深くまで達するという事実は、その可能性を高めるもので、海氷を介する物質循環や生物生産の理解にも繋がる研究と言える

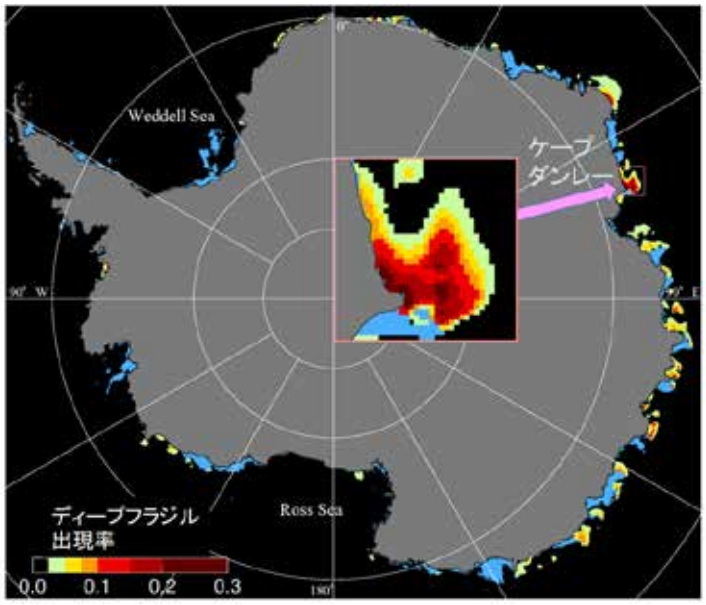


図 3. 衛星マイクロ波放射計と風データから推定された、深いフラジルアイスイベントの出現率マップ。ケープダンレーポリニヤが抜きんでて高い出現率を持つことが分かる。

5. 関連する領域内の研究

ケープダンレー底層水に関しては、本領域により多くのことが明らかになっている。この底層水がどのような空間・時間スケールで西方へ広がっていくかは、白鳳丸による化学トレーサ観測から大橋・川合 (本成果集 1-3 節)により、底層水の量的評価や水塊変質過程に関しては、白鳳丸の係留観測から水田・大島(本成果集 1-5 節)により、底層水の経年変動に関しては、しらせ、海鷹丸、開洋丸、みらい、白鳳丸の五船による観測から勝又・青木(本成果集 1-4 節)により、一気にその理解が深まった。また、衛星アルゴリズム開発と応用に関しては、公募研究 B02 と連携して行った。フラジルアイスを介する物質循環と生物生産に関しては、生態系班(例えば、本成果集 3-1 節)と密接に関係する研究である。

参考文献

Ito, M., K. I. Ohshima, Y. Fukamachi, D. Hirano, A. R. Mahoney, J. Jones, T. Takatsuka, H. Eicken, Favorable conditions for suspension freezing in an Arctic coastal polynya. *J. Geophys. Res.* **124**, 8701-8719, 2019.

Johnson, G. C., Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes. *J. Geophys. Res.* **113**, C05027, 2008.

Nakata, K., K. I. Ohshima, S. Nihashi, Estimation of thin ice thickness and discrimination of ice type from AMSR-E passive microwave data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **57**, 263-276, 2019.

Nakata, K., K. I. Ohshima, S. Nihashi, Mapping of active frazil for Antarctic coastal polynyas, with an estimation of sea-ice production. *Geophys. Res. Lett.* **48**, e2020GL091353, 2021.

Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, et al., Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.* **6,** 235-240, 2013.

Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, M. Ito, K. Nakata, D. Simizu, K. Ono, D. Nomura, G. Hashida, T. Tamura, Dominant frazil ice production in the Cape Darnley polynya leading to Antarctic Bottom Water formation. Science Advances, 8, eadc9174, doi:10.1126/sciadv.adc9174, 2022.

Orsi, A. H., G. C. Johnson, J. L. Bullister, Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. *Prog. Oceanogr.* **43**, 55-109, 1999.

Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nihashi, Mapping of sea-ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.* **35**, L07606, 2008.

人工知能を用いた微化石自動分類・ピッキングシステム（miCRAD）の開発

板木拓也[1]
[1]産業技術総合研究所

A01-2 南大洋の古海洋変動ダイナミクス（古海洋班）（代表：池原　実）

1．　背景と目的

微化石は、その骨格の微量元素や同位体比、群集組成の特徴に過去の海洋環境の状態を記録しており、古海洋プロキシとして重要な役割を果たす。特に南大洋の堆積物では、珪藻や放散虫などの珪酸塩（SiO_2+n$H_2$0）の骨格を持つ微化石が多産する。しかし、それらの種の鑑定には知識と経験を有する専門家が必要であり、群集解析や分析のための骨格の集積には膨大な時間と労力を要してきた。特に小型の放散虫にいたっては重さが軽過ぎるため、人の手で単種の微化石を同位体比や微量元素を分析できるだけ集積することは困難であった。

一方、Ijiri et al. (2014)は、極めて微量の珪酸塩でも安全に酸素同位体比が測れるシステムを開発し、それによって小型の放散虫でも種毎に分析できる可能性が出てきた。それでも 1 試料当たり単種を 1,000 個体以上集積する必要があり、労力が大きいことには変わりがない。同じ頃、世界では第 3 次人工知能（AI）ブームが始まり、AI 学習法のひとつである深層学習（ディープラーニング）により画像の識別精度が飛躍的に高まった。更に、国内メーカーの(株)マイクロサポートにより画像解析で識別した鉱物粒子を摘出するマイクロマニピュレータ技術が実用化されていた。筆者は、この 2 つの技術が組み合わされば、複雑な形態の微化石でも自動で分類し、更にピッキングまで行えると考え、微化石自動分類・摘出システムの開発に着手した。その結果、2018 年にプロトタイプが完成し、特許出願に合わせてプレス発表、2020 年には国際誌に 2 編の論文が発表された（Itaki et al., 2020a; 2020b）。

開発したシステムは、miCRAD（microfossil Classification Rapid Accumulation Device）システムと名付けられ（俗称は、いたきイラズ：iRADs）、現在、産総研では 2 台が運用されている。本稿では、既に発表している 2 編の論文（Itaki et al., 2020a; 2020b）の内容に加え、未発表データなどについても紹介する。2 章では、miCRAD システムの構成、3 章でシステムによる自動分類とピッキングのテスト結果、そして 4 章で今後の展望について解説する。

2．　システムの構成

miCRAD システムは、粒子の画像を取得し、それらを分類し、その分類結果を基に任意の種類の粒子だけを摘出・集積する機能を有する。この一連のフローを自動で行うため、システムは 3 つの主要なユニットで構成される（図 1）。

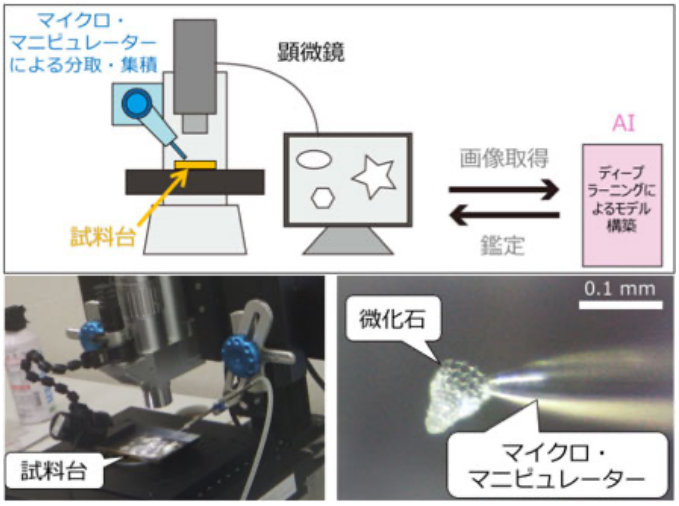


図 1：miCRAD システムの概念図。

2－1．画像取得ユニット

コンピュータ制御の顕微鏡と画像解析ソフトが連携したユニットで、(株)マイクロサポートから「Collection Pro」として製品化されているものを本研究の目的に合わせてカスタマイズしている。以下、スキャン機能と画像切出し機能にそれぞれ解説する。

① スキャン機能

試料を散布したトレイまたはスライドガラスを電動 X-Y ステージ上に載せ、指定したエリア全体をスキャンして CCD カメラ（500 万画素）で画像を取得する。デジタル倍率 4 倍で 1 回に撮影するエリア（タイル）の範囲は約 0.8×1 mm で、画素数は 2,048×2,448 ピクセルである。24mm×36 mm のカバーガラス全体をスキャンした場合は約 1,000 タイルを撮影することになり、その撮影時間は約 20 分である（後述する焦点合成をしない場合）。1 つの粒子が隣接するタイルの境界で画像が分割された場合、画像処理で互いを連結した 1 つの画像とすることができる。

照明は、対象物がトレイに散布されている場合は落斜光モード、スライドガラスの場合は透過光モードを用いる。落斜光モードの照明は、リングライトを用いて光量や照射方向を安定させることが出来る。

対物レンズは、5 倍と 10 倍があり、対象とする粒子のサイズにより使い分ける。倍率が高い方が、撮影するタイルの数が多くなるため時間も多く要する。

一般に、顕微鏡画像は倍率が高くなると焦点深度が小さくなるために、ある場所で焦点を合わせても他の部分ではぼやけてしまう。この時、粒子の全体に焦点が合うように、複数の異なる焦点で取得した画像（焦点スライス画像）を合成する機能がある（焦点合成画像）。ただし、この焦点合成は、焦点スライスの数が多いと画像取得時間も多くかかるため、画像の明瞭度と時間との案配でスライス数を調整するのが良い。

② 画像切出し機能

スキャンした全体画像から粒子の部分だけを切り出す作業も自動で行うことが出来る。色調などで画像設定を調整し、画像を二値化して背後と分離された部分だけが個別の粒子として画像が切り出される。その際、それぞれの粒子の形状（サイズ、紐状、円経度など）や色（RGB）のデータが取得されるのと同時に、それらのトレイ上の位置（座標）が記録される。

しかし、複数の粒子が接していたり、重なっていたりすると、二値化だけでは互いを切り離すことが難しい。ウォーターシェッドという画像処理方法で分けることも出来るが、全ての形状に有効である訳ではないようである。そこで、そもそも粒子同士が均等に分散しやすくなるトレイを製作した。「たこ焼き器」のホットプレートには、丸い穴が沢山開いていて、ひとつの穴にはひとつのたこ焼きが入るようになっている。このような穴が多数配列している構造はディンプル構造と呼ばれている。この構造を大きさが 10cm×5cm のアルミ製トレイの表面に直径 100 μm と 150 μm の穴を計 6 万個配列し、黒色アルマイト塗装した。このトレイに粒子を散布して揺らすと、ひとつの粒子がひとつの穴に入り、互いに接することがないという発想である。

２－２．分類ユニット

画像取得ユニットで取得された切出し画像は、分類ユニットに送られて自動分類される。

コンピューターを用いて微化石の写真の画像解析や形態の統計科学的解析により種を自動分類する試みは、1980 年代から行われている。このような機械（コンピューター）による自動分類の技術は機械学習（machine learning）と呼ばれ、微化石研究の分野でもその有用性が期待されていた。しかし、当初の機械学習では、人が任意で複雑な形態の化石の特徴量を抽出していたため、作業が困難な上に精度も十分ではなかった。一方、ディープラーニングは、多数の教師画像（学習データ）から機械が自動で特徴量を抽出するため、人が特徴量を抽出する労力が少なく、識別の正答率が飛躍的に高くなる。そのため、地層中から多産して教師画像を集めやすい微化石の分類については、ディープラーニングによる十分に高い精度を得ることが出来る。

ディープラーニングの画像解析で一般的に用いられているアルゴリズムは、畳み込みニューラルネットワーク（CNN： Convolutional Neural Network）である。CNN の詳細に関しては、ネット記事や専門の教科書などに非常にわかりやすく紹介されているので参照されたい。

CNN の構造（アーキテクチャ）には、現在では様々なものが提案されている。miCRAD システ

ムには、NEC の「RAPID 機械学習」という商業用ソフトが使われている。これには 2012 年の大規模画像認識コンペ ILSVRC で優勝した AlexNet（Krizhevsky et al., 2017）に類似したアーキテクチャが実装されており、また GUI（Graphical Unit Interface）上での操作が容易である。最近では、様々なアーキテクチャを柔軟に使えるように、産総研で作成したプログラムも実装している。

２－３．ピッキングユニット

微化石のピッキングは、「Collection Pro」に設置されているマイクロマニピュレータで行われる。分類ユニットによる分類結果をもとに拾い出しする任意の種を選択し、画像取得ユニットで得られた各粒子の座標にマイクロマニピュレータがアプローチ、ピッキングし、所定のエリアに集積する。なお、100%単一種のみを集積するため、誤判定した個体を拾い出さないように、画像を確認して事前にこれらを拾い出しリストから削除する必要がある。

マイクロマニピュレータは、ガラス製ノズルによるバキューム式のものを採用している。電動ポンプによる吸引でノズル先端に化石を吸着するため、繊細で複雑な形状の微化石でも破損せずに拾い出すことが出来る。先端のノズル径は摘出対象の大きさによって変更し、放散虫の場合は 40 µm を用いている。

拾い出した微化石は、事前に設定した集積エリアまで移動し、吸引が停止することで化石がノズル先端からリリースされる（図２）。しかし、多くの場合、化石が静電気などでノズルに貼り付いたままになってしまうため、粘着性のあるシート等の上に接地させる必要がある。シート上に集めた微化石は、アルコールで洗い流すなどして管瓶に集める。

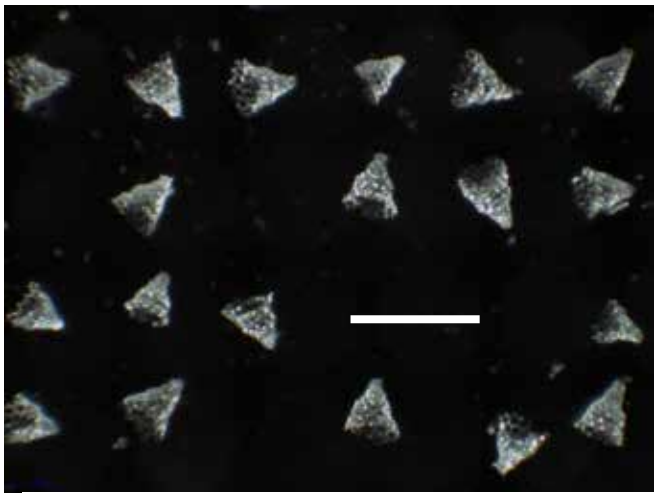


図２：摘出された放散虫 *Cycladophora davisiana*。スケールは 200 µm。

３．自動分類とピッキングの精度

３－１　分類モデル構築と識別正答率

初期に分類ユニットに実装されていたディープラーニングのソフトウェア「RAPID 機械学習バージョン 2.1」は、その後、転移学習機能などが付加されたバージョン 2.3 にアップデートされて正答率が飛躍的に向上している（次節で解説）。以下には Itaki et al. (2020a)で示したバージョン 2.1 による実験結果を紹介する。

サンプルトレイ上の粒子のデジタル画像は、画像収集ユニットの落射照明モードで解像度 280×280 pixel で取得された。これらの画像を、ディープラーニングによる分類モデル構築のための学習データとして使用した。一般に、学習データは、ピッキング対象種やその他の種類の粒子など、各カテゴリーで 1,000 枚以上の画像で構成する必要がある。通常、このような学習データセットを人が収集するには多くの労力と時間が必要だが、本システムではこのステップを自動化することが可能である。また、希少種のカテゴリーで十分な数の画像が収集できない場合は、1 枚の画像を回転・反転などを行い学習データの増幅を図ることができる。このようにして収集した学習データを基に分類モデルを構築する。

Itaki et al. (2020a)では、*Cycladophora davisiana* と *Actinmma boreale* という 2 種の放散虫を対象種として分類モデル「AI-PIC_20181024」を構築した。そのために整備した約 2 万画像から次の 8 つのカテゴリーに分類した：*Cycladophora davisiana*【1884 画像】、*Cycladophora bicornis*【1088 画像】、*Actinmma boreale*【1796 画像】、*Antarctissa* spp【2129 画像】、*Larcopyle pylomaticus*【1134

画像】、その他の放散虫【7919 画像】、砕屑粒子【1745 画像】、殻片【564 画像】、照明の反射【2514 画像】。*C. bicornis* は対象種ではないが、形態が似ているため、*C. davisiana* と区別するために別途分類している。また，*Antarctissa* spp.や *L. pylomaticus* も本モデルで別カテゴリーとしたが，学習データの画像が十分に信頼できないため識別が困難であり，本研究ではこれらのカテゴリーについての結果は評価していない．なお、「RAPID 機械学習 2.1」で設定した CNN 学習の繰り返し数は 30 エポックである。

作成した分類モデルの精度は、モデル構築の際に学習データとして用いなかった画像（テストデータ）を使って検証を行う。これらのテストデータは、分類モデルで事前に学習した 8 カテゴリーのいずれかに当てはめられ、それぞれのテスト画像の各カテゴリに対する信頼度を推定し、その値が最も高いカテゴリが分類結果として示される。

モデル AI-PIC_20181024 に基づく試験を、日本海（IODP サイト U1422C 1H-1, 68-70cm）および南大洋のデルカノ海堆から採取されたコア（45.7° S, 44.4° E, 水深 2445 m, DCR-1PC, #39）の試料を用いてで実施した。これらの試料でスキャンされた全ての画像を本実験に用いている。*C. davisiana* と *A. boreale* の正しい分類の確実性を意味する信頼度（0.00-1.00）の閾値（閾値に達しない画像は分類結果から除外）、分類された画像の総数、正答率（正しい分類数／分類された画像数）、除外された未分類画像の数（パーセント）を表 1 に示す。

表 1 ：モデル AI-PIC_20181024 による分類実験の結果。

Item	U1422C 1H-1, 68-70cm	DCR-1PC, #39	
(a) Confidence level	0.6	0.8	0.9
(b) Total number of images	2472	11416	9815
(c) *Actinomma boreale*	45/48 (94%)	59/59 (100%)	41/41 (100%)
(d) *Cycladophora davisiana*	165/176 (94%)	103/149 (70%)	54/59 (92%)
(e) Uncategorized image	267 (11%)	4335 (38%)	5768 (59%)

今回のテストでは、信頼度を U1422 では 0.60、DCR-1PC では 0.80 と 0.90 に設定し、それ以上のものを分類対象とした。信頼度 0.60 の場合、2,472 枚の画像のうち未分類の画像は 11%であり、0.90 の場合は全粒子画像の約 60%が未分類の画像とみなされ、分類から除外された。信頼度が高くなるにつれて、未分類画像の数が多くなる傾向がある。

同じ DCR-1PC サンプルに対する *C. davisiana* の正答率は、信頼度 0.80 と 0.90 でそれぞれ 70%と 92%であった。このように、正答率は信頼度によって上昇するが、分類に至る画像の数は低下してしまう。一方、サンプル U1422C の *C. davisiana* と *A. boreale* の正答率は、信頼度 0.60 で双方とも 94%であった。信頼度 0.60 という比較的低い値にもかかわらず、両種とも高い正答率を示したのは、この試料では放散虫群集の多様性が低いため、誤判別が減少したことによると思われる。

このように、信頼度を高く設定することで分類正答率が向上する一方で、信頼度以下の画像が多く除外されることになる。理想的なモデルは、信頼度 0.60 のサンプル U1422C で示されるように、高い精度と未分類画像の減少の両方を実現するモデルである。

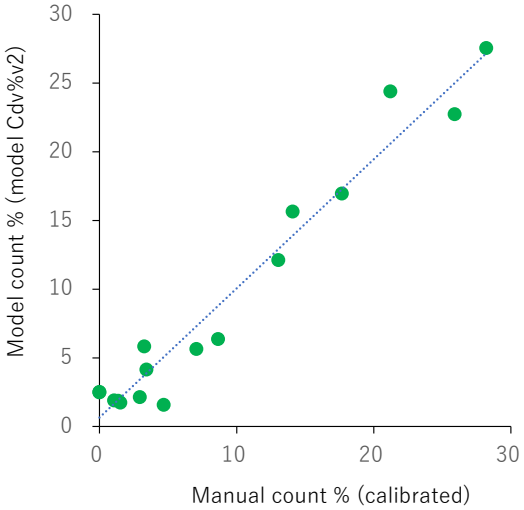


図 3 ：分類モデルと人によるカウントによる *C. davisiana* %の関係。

更に Itaki et al. (2020b)では、このシステムを用いて南大洋から採取された海底コア DCR-1PC を用いて全放散虫に対する *C. davisiana* の相対頻度（%）カーブを求める実験を行った。*C. davisiana*% カーブは、更新世堆積物の層序対比ツールとして広く用いられており、その自動化を目指したものである。観察モードとしては、Itaki et al. (2020a)の落斜光モードではなく、スライドガラスを用いた透過光モードで行われた。

信頼度 0.95 で分類した 8 つのテストサンプルの結果、カテゴリー「*C. davisiana*」と「その他の放散虫」の正答率は、それぞれ平均 92%と 89%（モデル Cdv%v2）であった（表 1）。それぞれの試料について *C. davisiana*%を算出して、人によるマニュアル計数データと比較したところ、両者の相関は r^2=0.98（モデル Cdv%v2）であった。実際には、両者の正答率の違いから生じる系統的な差異があり、補正式を用いることで本システムによる群集解析の自動化に道筋を示した（図 3）。

3－2　「転移学習」による多数カテゴリー分類

以上が 2020 年までに公表した「RAPID 機械学習バージョン 2.1」を用いた自動分類の実験結果である。少数のカテゴリー分類ではある程度の成果が認められたが、より多くの種の計数データを使った群集解析を行うためには多数カテゴリー分類が必要である。また、現状では学習データを増やしても正答率の向上に繋がらない状況が続いたため、2022 年に「RAPID 機械学習」を転移学習が実装されたバージョン 2.3 にアップデートした。転移学習は、既に構築されている分類モデルを再利用することで、少ない学習データでも高い精度の分類モデルを構築することができる手法である。RAPID 2.3 の試験運用は現在も継続中であるが、以下に多数カテゴリー分類に関する実験結果の一部を紹介する。なお、以下の結果は、上述の実験のような確信度の閾値を設定せず、全ての画像に対する分類結果を評価している。

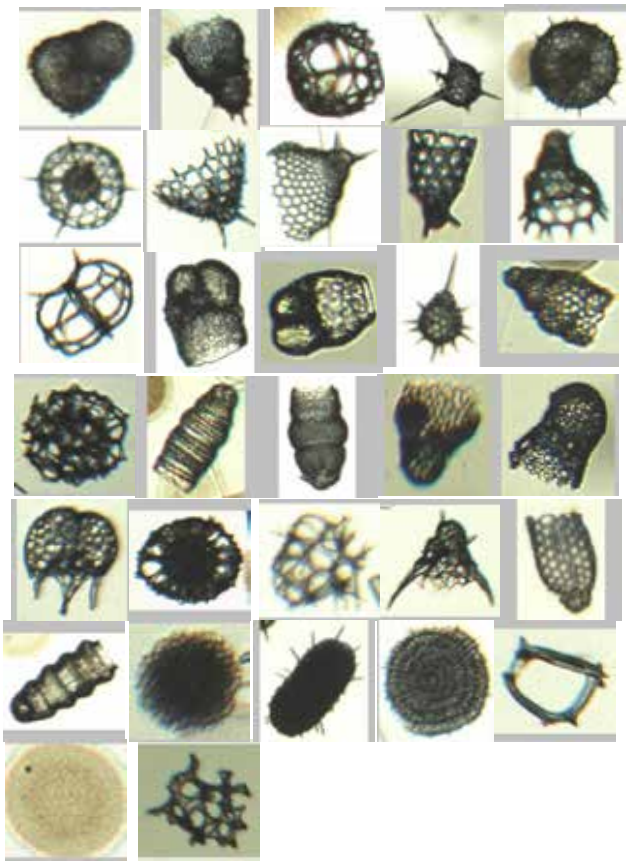


図 4 ：32 カテゴリーの画像例。

表 2 ：分類カテゴリー、コード、及び学習データ数。

Class	Code	Training data
Antarctissa denticulata-cyrindrica	And42	211
Antarctissa longa-strelkovi	Ast48	242
*Antarctissa*_juvenile	Ant114	575
Ceratocyrtis historicosus	Chs10	52
Cycladophora bicornis	Cbc51	256
Cycladophora cornutoides	Cct36	183
Cycladophora davisiana	Cdv164	8235
Sethoconus tablatus	Stb5	27
Eucyrtidium spp	Euc6	34
Lithocampe furcaspiculata	Lfu26	130
Lithocampe platycephala	Lpl15	75
Siphocampe arachnea group	Sar6	30
Lithomelissa setosa-borealis	Lst57	289
Lophophana spp	Lop41	207
Botryocampe antarctica	Ban40	204
Botryocampe inflatum-conithorax	Bin8	43
Phormospyris stabilis antarctica	Psa26	135
Plectacantha oikiskos	Poi26	132
Pseudodictyophimus gracilipes	Pgr28	142
Acanthodesmia micropora	Amp12	62
Zygocircus spp	Zyg33	168
Other Nassellaria	OthN32	162
Actinomma leptoderma-boreale	Alb14	70
Druppatractus irregularis-bensoni	Dir52	264
Phortycium clevei-pylonium	Ppy39	198
*Larcoids*_inner	Lar34	171
Spongurus pylomaticus	Spy17	90
Spongodiscus spp	Spo188	944
Sylodictya spp	Sty69	347
Other Spumellaria	OthS15	75
Diatoms	Dtm185	9263
Fragments	Frg306	21433

南大洋コア DCR-1PC の学習データ（約 44,000 画像）を 32 カテゴリー（放散虫以外の粒子として珪藻と破片のカテゴリーを含む）に区分して（図 4）、分類モデルを学習回数 30 エポックの転移学習で構築した。各カテゴリーの学習データは、27～21,433 画像とバラツキがある（表 2）。各カテゴリーのテストデータの画像数は、学習データ数の 2 割程度としている。表 3 には、テストデータの分類結果を評価する混同行列（confusion matrix）を示す。適合率（Precision）とは、A と予測したデータのうち，実際に A であるものの割合。再現率（Recall）は、実際に A であるもののうち，A であると予測されたものの割合。両者は互いにトレードオフの関係があるので、それらの調和平均（F 値）を評価指標として用いることが出来る。

F 値= (2×Precision×Recall) / (Precision + Recall)

例として、表 3 の 1 行目にある *Antarctissa denticulata-cyrindrica* [And42]を見てみる。And42 として分類された 44 画像の内、40 画像が実際に And42 であったので、適合率は 91%。実際に And42 である 42 画像の内、And42 として分類されたのが 40 画像だったので、再現率は 95%。両者の調和平均 F 値は、93 となる。

全カテゴリの平均は、適合率 78%、再現率 78%、F 値 77 である。同じデータを 100 エポックの転移学習なしで分類したときの適合率 63%、再現率 64%、F 値 67 であったのに比べると精度が向上していると言える。各カテゴリーの結果を見ると、学習データの画像数が少ないといずれの数値も低くなるが、300 画像を超えると概ね良い結果が得られており（図 5）、少ない種類については今後の学習データの増幅が精度向上の鍵になるかと思われる。このことは、先行研究で問題となっていた閾値の設定を設けることなく、効率的な群集データの取得に向けて期待できるところである。

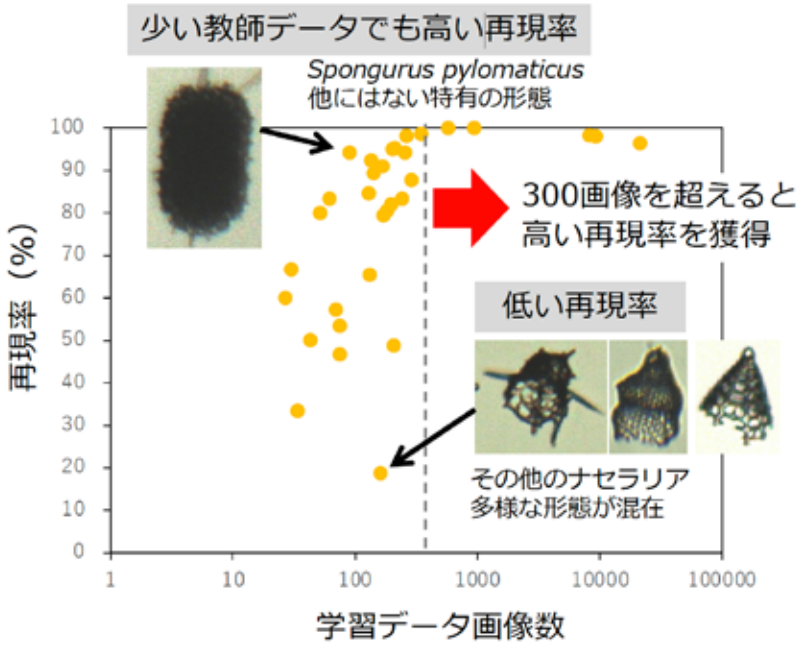


図 5：再現率と学習データの比較。

表3：多数カテゴリー分類実験の混同行列。行が正解ラベルの数、列が予測ラベルの数を示す。

Predicted label

True label	And42	Ast48	Ant114	Chs10	Cbc51	Cct36	Cdv1646	Stb5	Euc6	Lfu26	Lpl15	Sar6	Lst57	Lop41	Ban40	Bin8	Psa25	Pol26	Pgr28	Amp12	Zyg33	OthN32	Alb14	Dir52	Ppy39	Lar34	Spy17	Spo188	Sty69	OthS15	Dtm1852	Frg4283	Recall	Precision	F
And42	40												1		1																		95.2	93.5	94.3
Ast48		40			2	1							1	3	1																		83.3	54.2	65.7
Ant114			114																														100.0	87.1	93.1
Chs10		2		8																													80.0	94.1	86.5
Cbc51					48		2																									1	94.1	57.6	71.5
Cct36						29	7																										80.6	89.8	84.9
Cdv1646					2	12	1617						3	2																	1	9	98.2	73.1	83.8
Stb5								3					2																				60.0	95.0	73.6
Euc6		1			2				2													1											33.3	100.0	50.0
Lfu26										22	3											1											84.6	66.2	74.3
Lpl15										6	8		1																				53.3	64.0	58.2
Sar6					1						1	4																					66.7	100.0	80.0
Lst57	2	1		1	1		1				1		50																				87.7	57.7	69.6
Lop41		12					2						4	20	1				1													1	48.8	79.3	60.4
Ban40															38	1						1											95.0	62.5	75.4
Bin8															4	4																	50.0	85.1	63.0
Psa26																	24	1				1											92.3	93.3	92.8
Pol26			3															17								6							65.4	72.7	68.9
Pgr28					1														25					1								1	89.3	91.1	90.2
Amp12																				10	1											1	83.3	93.1	87.9
Zyg33																				2	30											1	90.9	91.6	91.3
OthN32	1		1	1	3	2	1	1		1			1	2		2			2			6				1						7	18.8	41.0	25.7
Alb14																							8	2		3			1				57.1	74.1	64.5
Dir52																								51			1						98.1	84.6	90.8
Ppy39		1					1																		32			2		2		1	82.1	99.9	90.1
Lar34																		7								27							79.4	59.3	67.9
Spy17																											16	1					94.1	91.6	92.9
Spo188																												188					100.0	79.3	88.5
Sty69																												1	68				98.6	99.9	99.2
OthS15																	1						3			1	1	2		7			46.7	79.1	58.7
Dtm1852																													1		1815	36	98.0	98.4	98.2
Frg4283	1	1	4	4	9	2	20			3			4	8		1		3		6		5		1	2	6		10		2	64	4129	94.4	67.6	79.5

３－３．ピッキングの成功率

上述の分類モデル「AI-PIC_20181024」で分類した結果を基に約 500 個体の *C. davisiana* を連続ピッキングした実験について以下に解説する。

今回の実験では、識別した *C. davisiana* のピッキングの成功率は 8 割程度であった。残り 2 割程度は、（1）ノズル先端で個体を弾いてしまう、（2）ノズル先端が個体に届かない、（3）目的の個体以外のものも一緒に吸引してしまう、（4）そもそも登録座標に個体が存在しない等のために正常にピッキングが出来なかったものである。最後の「（4）そもそも登録座標に個体が存在しない」は、プログラム上の問題を洗い出して、既に修正が施されている。（1）～（３）については、粒子を捕集する前に、マイクロマニピュレーターの吸引ノズル先端の位置情報、粒子へのアプローチ方向、ピックアップした粒子の捕集エリアなどを正確に設定する必要がある。この設定の精度が、ピックアップの失敗を減らすための重要なプロセスとなる。現在は、ノズルの形状、ポンプの吸引力、粒子のランダム分散方法などを工夫して、ピッキング成功率の向上を図っている。また、AI が最適な条件を選んでピッキングを行える強化学習の適用も検討しているところである。

今回の実験では、対象種が十分な数含まれている試料を用いた場合、ピッキング速度は 1 時間あたり約 120 個であった。対象種が十分に含まれる試料であれば、1 回の試料採取で目標数に達することもあるが、摘出数が十分でない場合は、さらに試料を追加して繰り返し行う必要がある。

４．今後の展望

本システムは、2016 年に着想を得て、2017 年に新学術研究「南極の海と氷床」の採択により開発が実現するに至った。その後、2018 年にプロトタイプが完成して、「微化石の自動鑑定・分取技術」として関連する特許 2 件が登録するなど、世界に先駆けて実用化した技術である。このような革新的な技術発展のスピードは速く、常に新しい技術を導入していくことは、競争力を確保する上でも重要である。miCRAD システムは、現在も様々なアップデートを施しながら発展を続けており、微小な放散虫の分類からピッキングまで行えるのは世界でもこのシステムだけである。2019 年には、JpGU の「南極の海と氷床」ブースでデモ展示を行い、多くの方の関心を引くことが出来た。現在では放散虫だけではなく、様々な微化石群や鉱物粒子、マイクロプラスチックなど、本システムの適用範囲を広げているところである。

課題も残されている。分類精度やピッキング成功率は、上記の通りに各種技術開発で段階的に向上しているが、一方では miCRAD システムで摘出した全ての粒子を分析等に供するために 1 カ所に集積する手法がまだ確立していない。現在は、ステージ上の粘着シートに集積した粒子をアルコールなどで洗い流して 1 カ所に集めているが、この手法では折角拾った個体を損失してしまうことが多い。拾い出した放散虫を効率的に分析機器に導入するためには、このフローの検討が必要である。

また最近、新たにバーチャルスライドスキャナー（以降、スライドスキャナ）が産総研に導入された。スライドスキャナーは、スライドガラス標本の光学顕微鏡画像をデジタルデータ（バーチャルスライド）として取得・管理する、特に医療分野における遠隔診断や研究、教育などで広がりつつある技術である。一度に 300 枚以上のスライドを同時に装填出来るものもあるが、今回導入した機種で装填できるスライドは 1 枚のみである。それは、将来的に調査船等で運用することを想定し、可搬性の高い小型の機種として選定したためである。スキャン速度も他の機種より遅いが、それでも 15×15 mm の範囲を約 150 秒（対物レンズ 20 倍）という十分に高いスループットを実現している。これがハイエンドモデルになると、スキャン速度が 5 倍、装填スライド数は 360 枚となり、今後、AI と連携することで miCRAD システムを圧倒的に凌駕する世界でも最速クラスの自動鑑定技術となるかもしれない。

参考文献

Ijiri, A., Yamane, M., Ikehara, M., Yokoyama, Y., Okazaki, Y., Online oxygen isotope analysis of sub-milligram quantities of biogenic opal using the inductive high temperature carbon reduction method coupled with continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. *J Quaternary Sci* **29**, 455–462, 2014.

Itaki, T., Taira, Y., Kuwamori, N., Maebayashi, T., Takeshima, S., Toya, K., Automated collection of single species of microfossils using a deep learning–micromanipulator system, *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**,19, 2020a.

Itaki, T., Taira, Y., Kuwamori, N., Saito, H., Ikehara, M., Hoshino, T., Innovative microfossil (radiolarian) analysis using a system for automated image collection and AI-based classification of species. *Scientific Reports* **10,** 1–9, 2020b.

Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G., ImageNet classification with deep convolutional neural networks, *Communications of the ACM*, **60**, 84–90, 2017.

特許

解析装置、解析方法、およびプログラム（特許第 6842624 号、2021 年 2 月 25 日登録）

分類装置、分類方法、およびプログラム（特許第 7132553 号、2022 年 8 月 30 日登録）

プレスリリース

AI（人工知能）を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確立（2018 年 12 月 3 日、産総研ほか）

海底コアと氷床コアの年代精密対比

松井浩紀[1]、池原実[2]、菅沼悠介[3,4]、関宰[5]、大藪幾美[3]、川村賢二[3,4]
[1]秋田大学、[2]高知大学、[3]国立極地研究所、[4]総合研究大学院大学、[5]北海道大学

A01-1 南大洋の古海洋変動ダイナミクス（古海洋班）（代表：池原実）
A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）
A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体地球班）（代表：福田洋一）

1．背景と目的

第四紀の古気候変動を理解する上で，海底コアと氷床コアから得られる情報は重要な役割を果たしてきた．例えば海底コアから得られる底生有孔虫酸素同位体比（氷床量と深層水温の指標）と氷床コアから得られる大気二酸化炭素濃度はいずれも明瞭な氷期間氷期変動を示し，氷床・海洋・大気の密接な関係を示している．しかしながら，海底コアと氷床コアから得られる情報について，厳密にはそのまま比較することはできない．前者の年代モデル構築手法（放射性炭素年代や酸素同位体比層序など）と後者の年代モデル構築手法（氷床の流動モデルや火山シグナルなど）が異なるためである．同一の年代軸で海底コアと氷床コアの古気候記録を比較するには，両者に共通するシグナルを対比し，一方の年代モデルを他方に適用する必要がある．こうした考えを年代統合または年代同期と呼ぶ．また，南大洋の海底コアは一般に有孔虫化石を含む炭酸塩堆積物に乏しく，放射性炭素年代や酸素同位体比層序などの適用が難しいという課題がある．炭酸塩堆積物に依存した従来の年代モデル構築手法の代替としても，年代統合の実現が期待されている．

年代統合の具体的な手法として，海底コアのダスト指標（帯磁率や鉄成分など）と氷床コアの風成塵（ダスト）を対比する方法（ダスト対比：本研究）や，海底コアと氷床コアの宇宙線変動を対比する方法（公募研究 B03）が挙げられる．ここでダスト対比とは，海底コアのダスト指標と氷床コアのダストが同期して変動することを仮定しており，いずれも間氷期に比べて氷期に増加する傾向を示す（Pugh et al., 2009 など）．約 2 万年前の最終氷期最盛期について氷床コアのダストの起源は南米大陸の主にパタゴニア由来であり（図 1: Ohgaito et al., 2018; Oyabu et al., 2020 など），そのダスト変動が大規模な大気海洋循環を通じて南大洋の海底コアに記録されると考えられている（Weber et al., 2012; Lamy et al., 2014）．

ダスト対比の研究はダスト起源域である南米大陸に近い南大洋大西洋区スコシア海の海底コアで先行し，過去 30 万年間について年代モデルの相互比較によりダスト対比の有効性が検証されてきた（Xiao et al., 2016 など）．しかし，南大洋インド洋区や太平洋区の海底コアにおける検証や，過去 30 万年間以前の検証は十分に進んでいなかった．本研究では南大洋インド洋区の海底コアを対象として，過去約 41 万年間に及ぶダスト対比の検証を試み，南大洋広域のダスト指標記録の比較を併せて行うことで，海底コアと氷床コアの古気候記録の比較に資することを目的とした（Matsui et al., 2022）．

2．試料と方法

研究試料として白鳳丸 KH-10-7 次航海で採取された南大洋インド洋区 DCR-1PC コア（南緯 46°01’，東経 44°15’，水深 2632 m，全長約 10.2 m）を用いた．試料の岩相は石灰質軟泥と珪質軟泥の互層であり，南大洋における海洋前線の変動を記録している可能性がある．試料から連続的に産出する底生有孔虫化石 *Melonis barleeanus* を一定数抽出し，炭素酸素安定同位体比を測定した．また，非破壊分析として帯磁率測定と蛍光 X 線分析を実施した．さらに，岩石磁気記録として非履歴性残留磁化（ARM）と等温残留磁化（IRM）を測定した．底生有孔虫の酸素同位体比，帯磁率，酸化鉄（Fe_2O_3），ARM，IRM いずれも明瞭な氷期間氷期変動を示した．

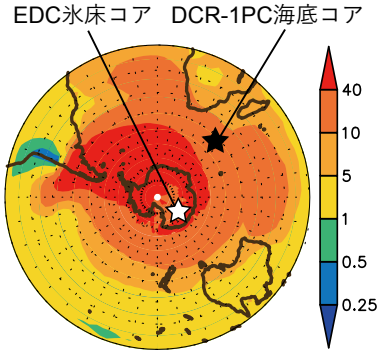


図 1 ：気候モデルによる氷期のダスト沈着量（現在比）（Ohgaito et al., 2018）と海底コア地点および氷床コア地点．

3．年代モデル構築と相互比較

3－1．酸素同位体比層序に基づく年代モデル

DCR-1PC コアの底生有孔虫酸素同位体比記録について，同じく底生有孔虫酸素同位体比のスタックカーブである LR04（Lisiecki and Raymo, 2005）と対比を行った（図 2a）．過去 5 万年間は DCR-1PC コアの放射性炭素年代（Crosta et al., 2020）を利用し，それより古い年代は酸素同位体比の絶対値を基に 9 つの対比点を定めた．その結果，コアの最下部は約 41 万年前と推定され，連続的な堆積が示唆された．DCR-1PC コアの底生有孔虫酸素同位体比と LR04 の相関係数は 0.85 であった．

3－2．ダスト対比に基づく年代モデル

続いて，DCR-1PC コアのダスト指標（ここでは ARM を用いる）について，上述の酸素同位体比年代モデルの下，EDC 氷床コアのダスト記録（Lambert et al., 2012）と波形対比を行った（図 2b）．最適な対比を実現するため，2 つの対比点を定めるとともに，LR04 にも用いられている Match プログラム（Lisiecki and Lisiecki, 2002）を利用した．その結果，波形対比を行う前よりも DCR-1PC コアのダスト指標と EDC 氷床コアのダスト記録の相関係数が高くなった（対比前：0.59，対比後：0.64）．

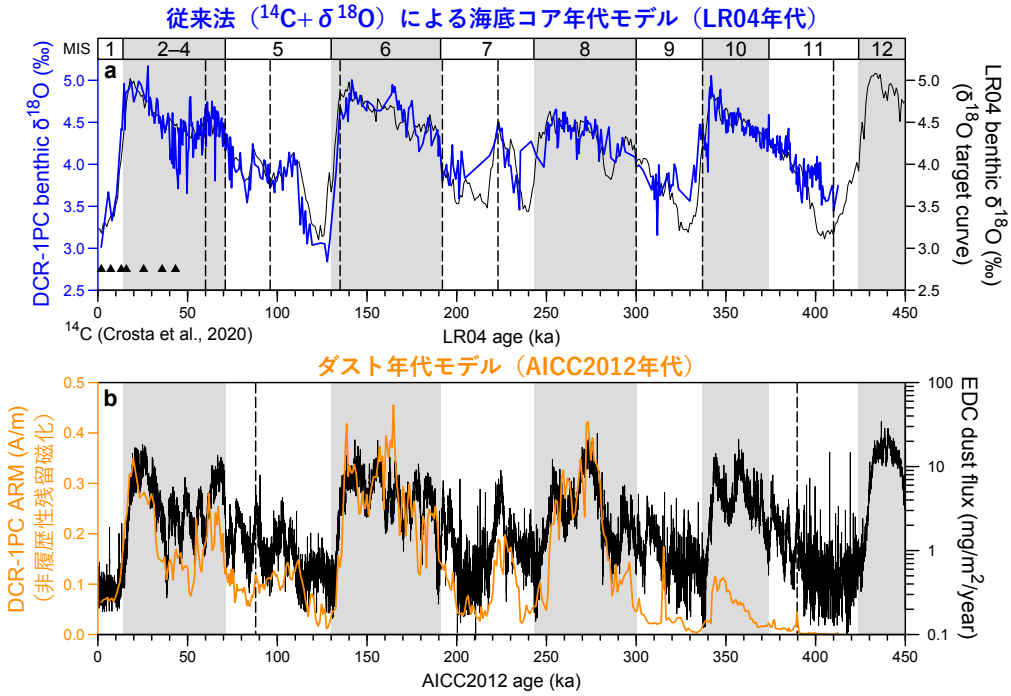


図 2 ：（a）DCR-1PC コア底生有孔虫酸素同位体比と LR04 スタックカーブの対比．
（b）DCR-1PC コア ARM と EDC 氷床コアダストフラックスの対比．

3－3．年代モデルの相互比較

構築した酸素同位体比年代モデルとダスト年代モデルについて，相互比較を行った（図 3）．その際，前者の年代モデルの誤差（LR04 年代：±4000 年）と後者の年代モデルの誤差（AICC2012 年代：±800–4800 年）を考慮した．酸素同位体比年代モデルとダスト年代モデルは誤差の範囲内で整合的であり，氷期間氷期スケールの年代統合手法としてダスト年代モデルが有用であることが示された．すなわち，南大洋インド洋区の海底コアにおいて酸素同位体比記録が得られない場合でも，明瞭なダスト指標の変動が記録されていれば，年代モデルの構築が可能であることを意味している．

しかしながら，より細かなスケールでは，ダスト年代モデルと放射性炭素年代の間に有意なずれが存在することが明らかになった（同一深度でダスト年代が古い年代値を示す）．また，酸素同位体比年代モデルに対しても，多くの深度区間でダスト年代が約 3 千年古い年代値を示した．年代値がずれる原因は現時点で明らかでないが，海底コアに対する生物じょう乱の影響を考慮することが必要ではないかと考えている．

4. 南大洋広域におけるダスト指標の比較

4－1．インド洋区内の比較

氷期間氷期スケールの年代統合手法としてダスト年代モデルが有用であることに基づき，南大洋インド洋区における海底コアのダスト指標記録（帯磁率や鉄成分）をコンパイルした．その際，3－2と同様の手法でダスト年代モデルを構築した．

全体として，南大洋インド洋区のダスト指標記録はEDCダストと類似した挙動を示す（図4）．このことは，氷期における南米大陸由来のダスト分布がインド洋区まで及ぶことと整合的である（図1）．一方，各地点のダスト指標記録の変動には差異も認められる．特に，DCR-1PCコアとMR03K04-PC5コア（Yamazaki and Ikehara, 2012）のダスト指標記録を比較すると，各氷期におけるピークのタイミングが異なっているように見える．その原因として，南大洋の海洋前線に対する海底コアの相対位置が異なることを考えている．一般に，海洋前線である南極前線の北では石灰質軟泥が，南では珪質軟泥が堆積する．石灰質軟泥と珪質軟泥の互層を示すDCR-1PCコアに対して，MR03K04-PC5コアは主に石灰質軟泥の岩相を示す．すなわち，氷期に海洋前線が北上すると，DCR-1PCコア（南緯46°01’，東経44°15’）は南極前線よりも南に位置して珪質軟泥が堆積し，MR03K04-PC5コア（南緯41°33’，東経90°24’）は南極前線よりも北に位置して石灰質軟泥が堆積したと考えられる．氷期には南極前線よりも

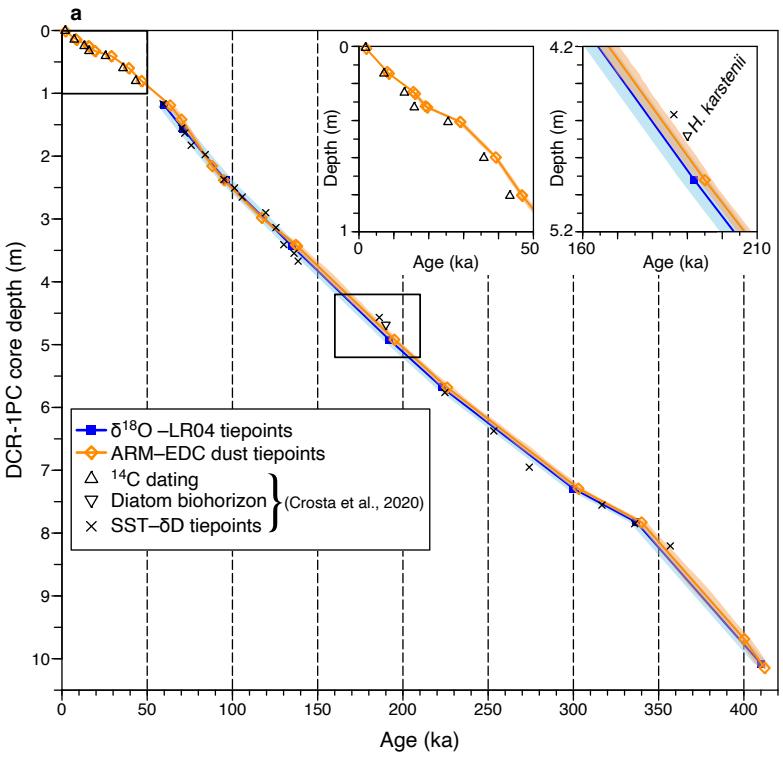


図3：DCR-1PCコアの深度年代モデルの相互比較．

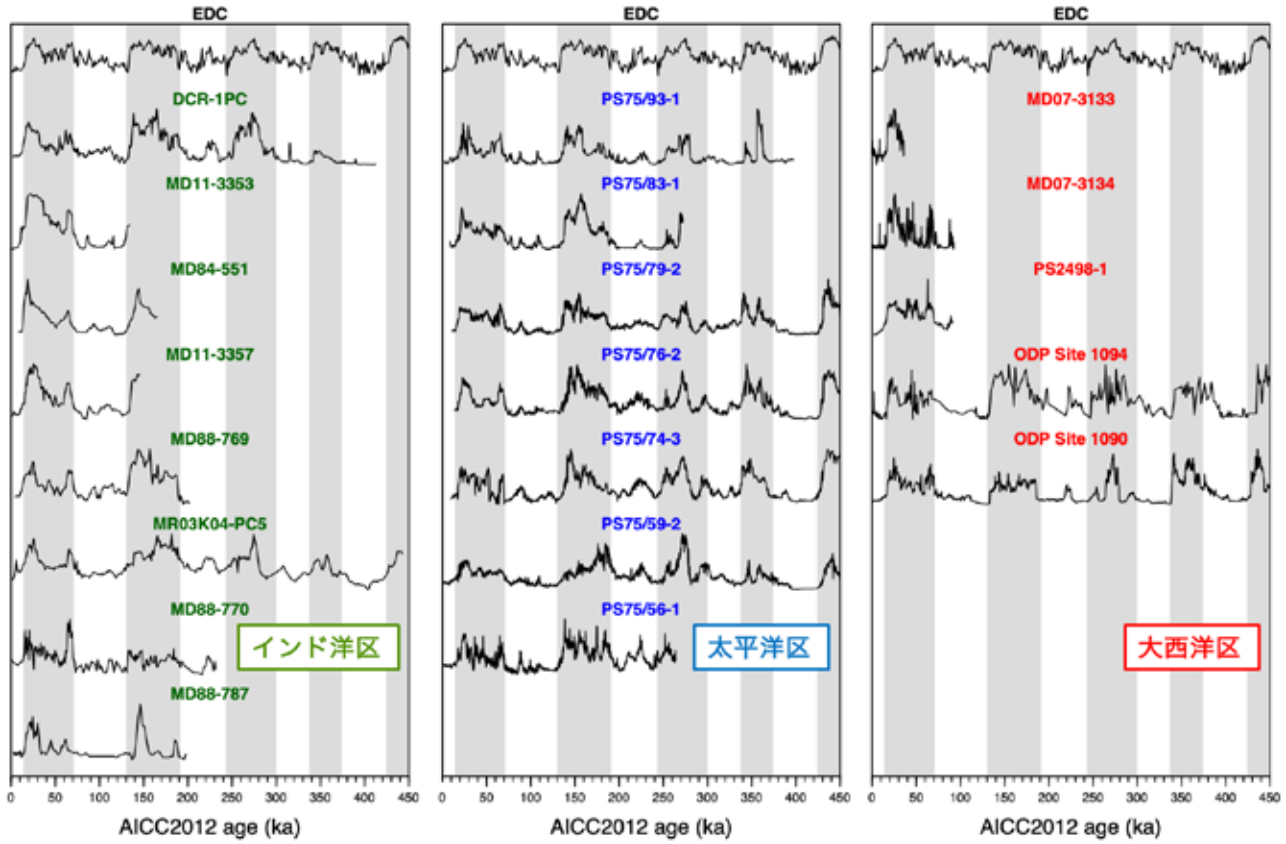


図4：過去45万年間における南大洋広域のダスト指標記録．

北の海域で海洋表層の生物生産が増加し，その結果として生物起源磁鉄鉱が増加しダスト指標記録が変動する（Yamazaki and Ikehara, 2012）．こうした過程により，DCR-1PC コアと MR03K04-PC5 コアのダスト指標記録の差異が生じていると考えられる．

4－2．太平洋区や大西洋区との比較

さらに，南大洋太平洋区と大西洋区における海底コアのダスト指標記録をコンパイルした（図 4）．各地点のダスト指標記録について EDC 氷床コアダストフラックスとの線形相関係数（1000 年ごとのリサンプリング）を求め，海域ごと（インド洋区，太平洋区，大西洋区）にまとめて違いが見られるかを検討した．その結果，相関係数は大西洋区で最も高く（$0.70 < r < 0.90$），インド洋区（$0.51 < r < 0.81$）と太平洋区（$0.62 < r < 0.78$）でやや低い値を示した．ダスト指標記録の時間解像度の違いを考慮する必要はあるものの，氷床コアダストの主な起源域である南米大陸のパタゴニアに対して大西洋区が最も近いことが，高い相関係数の要因であると考えられる．

続いて，各地点のダスト指標記録について EDC 氷床コアダストフラックスとの移動相関係数（1000 年ごとのリサンプリング，10000 年の区間）を算出し，全地点の平均と海域ごとの平均を求めた（図 5）．その結果，全地点の移動相関係数の平均について，EDC 氷床コアダスト量が多い時期に値が高くなる傾向が認められた（図 5a）．ダスト起源域から氷床コアに運搬されるダスト量が多くなるとき，海底コアのダスト指標記録の値も増加することを示している．また，海域ごとの平均に着目すると，一部の例外を除いて海域間の差が小さいことが明らかになった（図 5b–d）．大規模な大気海洋循環によって氷床コアダストと海底コアダスト指標記録が同調するという指摘（Weber et al., 2012; Lamy et al., 2014）がインド洋区にも当てはまることを示している．

一方，過去 15 万年間に注目してみると，インド洋区の移動相関係数が太平洋区や大西洋区よりも低い区間が認められる（例えば 9.5–8.3 万年前や 5.1–4.3 万年前）．原因として，インド洋区の海底コアダスト指標記録がアフリカ大陸由来のダストや火山島（クロゼ諸島やケルゲレン諸島）に由来する火山砕屑物の影響を受けている可能性がある．したがって，インド洋区の海底コアを対象としたダスト対比においては，ダスト指標記録の起源に十分注意する必要がある．また，インド洋区における時間解像度の高い（1000 年以下）ダスト指標記録の蓄積が，太平洋区や大西洋区とのダスト指標記録の比較を可能にし，年代統合に向けたダスト対比の適用範囲の拡大や信頼性の向上に結びつくと考えられる．

5．領域内連携

本研究を進めるに当たり，海底コアの研究者（松井，池原，菅沼，関）と氷床コアの研究者（大藪，川村）で多数の打合せを実施した．具体的には，ダスト対比に用いるべき最適なダスト指標記録の選定，ダスト対比の手法の妥当性（対比点や波形対比），各年代モデルの誤差などについてお互いの知見を共有し，議論した．また，年次報告会や JpGU など領域メンバーが集まる機会を通じて，モデル班をはじめとする領域全体の研究者と様々に議論した．多分野の研究者が集う新学術領域研究でなければ，本研究成果をまとめることはできなかった．領域期間を通じて議論いただいた方々にお礼申し上げる．年代統合という重要かつ困難な課題への取り組みは，新たな研究課題にも発展した（公募研究 B03，宇宙線変動に基づくスーパー間氷期古気候記録の陸海同期，代表：堀内一穂）．

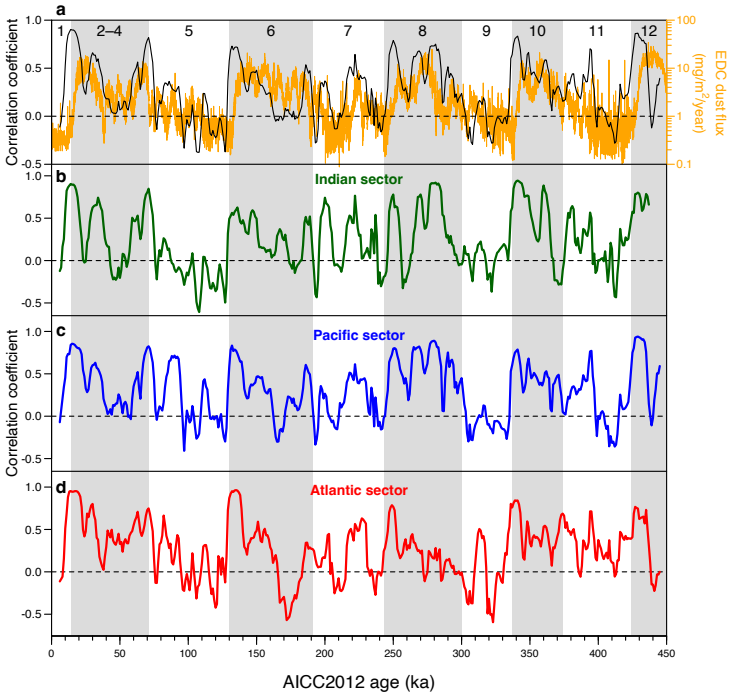


図 5：海底コアのダスト指標記録と EDC 氷床コアのダストフラックスの海域ごと移動相関係数の変動．

6．今後の課題

本研究は南大洋インド洋区の海底コアを対象として，過去 41 万年間のダスト対比を検証し，氷期間氷期スケールの年代統合手法としてダスト対比が有用であることを示した．しかし，海底コアと氷床コアの古気候記録を直接比較するには，より精密な年代対比（数千年以内のスケール）が求められる．放射性炭素年代や酸素同位体比層序に比べダスト年代モデルが数千年ずれるという課題に対して，宇宙線変動という観点からの検証（公募研究 B03）や海底コアにおける生物じょう乱シミュレーションなどによって今後の解決を目指していく．また，今回検討した DCR-1PC コア（平均堆積速度：1000 年当たり約 2.5 cm）よりも堆積速度が速い海底コア（例えば 1000 年当たり 10 cm 以上）を用いて年代モデル間のずれを検証することも求められる．精密な年代対比が実現すれば，例えば氷床コアから推定された南大洋の平均海水温（Uemura et al., 2018）と，海底コアから復元される特定地点の海水温を比較し，その前後関係を議論することも可能となる．気候モデルとの連携も見据え，今後も領域メンバーとの議論を継続していく．

精密な年代対比と並行して，より過去に遡った年代統合も意義が大きいと考えている．本研究で対象とした過去約 45 万年間のダスト指標記録に対して，南大洋大西洋区の海底コアから最長 400 万年間に及ぶダスト指標記録が報告されている（Martinez-Garcia et al., 2011）．また，EDC 氷床コアダスト記録は過去約 80 万年間に及ぶ（Lambert et al., 2012）．約 45 万年前より古い年代のダスト対比の検証を進めることで，従来法による海底コア年代モデルとダスト年代モデルの普遍的な関係を探ることが期待できる．また，近年の深海掘削航海により南大洋大西洋区や太平洋区の過去 150 万年間に及ぶ海底コアの研究が進んでおり（例えば Weber et al., 2022），南大洋広域の議論を深める上でインド洋区の海底コア研究の意義は高まっている．領域期間中に参画したフランス船マリオン・デュフレーヌ号 MD218 航海において，インド洋区から新たに採取した海底コアの分析を今後進めることにより，過去 150 万年間に及ぶダスト年代モデルの検証や古海洋の復元を目指す．一方，世界各国で計画されている最古級の氷床コア掘削により，やはり過去 150 万年間に及ぶ古気候記録の復元が目指されている．最古級の氷床コアの迅速な年代モデル構築手法としても，海底コアとのダスト対比は有望視されている（Wolff et al., 2022）．同一の年代軸による第四紀の古気候変動の統合的な理解に向けて，重要性を増す精密年代対比への取り組みを進めていく．

参考文献

Crosta, X., Shukla, S.K., Ther, O., Ikehara, M., Yamane, M. and Yokoyama, Y., Last Abundant Appearance Datum of *Hemidiscus karstenii* driven by climate change. *Marine Micropaleontology*, **157**, 101861, 2020. https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101861

Lambert, F., Bigler, M., Steffensen, J.P., Hutterli, M. and Fischer, H., Centennial mineral dust variability in high-resolution ice core data from Dome C, Antarctica. *Clim. Past*, **8**, 609–623, 2012. https://doi.org/10.5194/cp-8-609-2012

Lamy, F., Gersonde, R., Winckler, G., Esper, O., Jaeschke, A., Kuhn, G., Ullermann, J., Martinez-Garcia, A., Lambert, F. and Kilian, R., Increased Dust Deposition in the Pacific Southern Ocean During Glacial Periods. *Science*, **343**, 403–407, 2014. https://doi.org/10.1126/science.1245424

Lisiecki, L.E. and Lisiecki, P.A., Application of dynamic programming to the correlation of paleoclimate records. *Paleoceanography*, **17**, 1049, 2002. https://doi.org/10.1029/2001PA000733

Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E., A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003, 2005. https://doi.org/10.1029/2004PA001071

Martinez-Garcia, A., Rosell-Melé, A., Jaccard, S.L., Geibert, W., Sigman, D.M. and Haug, G.H., Southern Ocean dust–climate coupling over the past four million years. *Nature*, **476**, 312–315, 2011. https://doi.org/10.1038/nature10310

Matsui, H., Ikehara, M., Suganuma, Y., Seki, O., Oyabu, I. and Kawamura, K., Dust correlation and oxygen isotope stratigraphy in the Southern Ocean over the last 450 kyrs: An Indian sector perspective. *Quaternary Science Reviews*,

286, 107508, 2022. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107508

Ohgaito, R., Abe-Ouchi, A., O'ishi, R., Takemura, T., Ito, A., Hajima, T., Watanabe, S. and Kawamiya, M., Effect of high dust amount on surface temperature during the Last Glacial Maximum: a modelling study using MIROC-ESM. *Clim. Past*, **14**, 1565–1581, 2018. https://doi.org/10.5194/cp-14-1565-2018

Oyabu, I., Iizuka, Y., Kawamura, K., Wolff, E., Severi, M., Ohgaito, R., Abe-Ouchi, A. and Hansson, M., Compositions of Dust and Sea Salts in the Dome C and Dome Fuji Ice Cores From Last Glacial Maximum to Early Holocene Based on Ice-Sublimation and Single-Particle Measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, 2020. https://doi.org/10.1029/2019JD032208

Pugh, R.S., McCave, I.N., Hillenbrand, C.-D. and Kuhn, G., Circum-Antarctic age modelling of Quaternary marine cores under the Antarctic Circumpolar Current: Ice-core dust–magnetic correlation. *Earth and Planetary Science Letters*, **284**, 113–123, 2009. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.016

Uemura, R., Motoyama, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J., Kawamura, K., Goto-Azuma, K., Fujita, S., Kuramoto, T., Hirabayashi, M., Miyake, T., Ohno, H., Fujita, K., Abe-Ouchi, A., Iizuka, Y., Horikawa, S., Igarashi, M., Suzuki, K., Suzuki, T. and Fujii, Y., Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications*, **9**, 2018. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03328-3

Weber, M.E., Bailey, I., Hemming, S.R., Martos, Y.M., Reilly, B.T., Ronge, T.A., Brachfeld, S., Williams, T., Raymo, M., Belt, S.T., Smik, L., Vogel, H., Peck, V.L., Armbrecht, L., Cage, A., Cardillo, F.G., Du, Z., Fauth, G., Fogwill, C.J., Garcia, M., Garnsworthy, M., Glüder, A., Guitard, M., Gutjahr, M., Hernández-Almeida, I., Hoem, F.S., Hwang, J.-H., Iizuka, M., Kato, Y., Kenlee, B., OConnell, S., Pérez, L.F., Seki, O., Stevens, L., Tauxe, L., Tripathi, S., Warnock, J. and Zheng, X., Antiphased dust deposition and productivity in the Antarctic Zone over 1.5 million years. *Nat Commun*, **13**, 2044, 2022. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29642-5

Weber, M.E., Kuhn, G., Sprenk, D., Rolf, C., Ohlwein, C. and Ricken, W., Dust transport from Patagonia to Antarctica – A new stratigraphic approach from the Scotia Sea and its implications for the last glacial cycle. *Quaternary Science Reviews*, **36**, 177–188, 2012. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.01.016

Wolff, E.W., Fischer, H., van Ommen, T. and Hodell, D.A., Stratigraphic templates for ice core records of the past 1.5 Myr. *Clim. Past*, **18**, 1563–1577, 2022. https://doi.org/10.5194/cp-18-1563-2022

Xiao, W., Frederichs, T., Gersonde, R., Kuhn, G., Esper, O. and Zhang, X., Constraining the dating of late Quaternary marine sediment records from the Scotia Sea (Southern Ocean). *Quaternary Geochronology*, **31**, 97–118, 2016. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.11.003

Yamazaki, T., and Ikehara, M. Origin of magnetic mineral concentration variation in the Southern Ocean. *Paleoceanography*, **27**, PA2206, 2012. https://doi.org/10.1029/2011PA002271

南大洋の古海洋変動ダイナミクス
－古環境プロキシの高精度化と海底コアによる古海洋変動復元－

池原実[1]、井尻暁[2]、関宰[3]、板木拓也[4]、Matthieu Civel-Mazens[1]、竹原景子[1]
[1]高知大学、[2]神戸大学、[3]北海道大学[3]、産業技術総合研究所

A01-2 南大洋の古海洋変動ダイナミクス（古海洋班）（代表：池原実）
A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

１．研究背景と目的

南大洋は負の熱と CO_2 等の物質の巨大なリザーバであり、全球気候変動の鍵を握る。南大洋を特徴付ける南極周極流（Antarctic Circumpolar Current: ACC）（図１）は水深 3000m 程度の厚みを持つ世界最大級の表層循環流であり、ドレーク海峡での流量は黒潮流量の 4 倍以上の最大 135 Sv（10^6 m^3/s）に達する。ACC や海氷分布、表層水温、塩分などの変動は、南大洋の海洋循環（それに伴う深層から大気への CO_2 放出の強さ）と南極氷床に作用し、炭素循環や海水準変動を介して全球気候変動を駆動していると考えられている（Sigman et al., 2004 等）。過去から現在に至る南大洋の古海洋変動の実態を復元し全球気候変動との関係を理解するためには、南大洋の海底コアの解析が必要であり、特に、過去数十万年における南大洋表層の変動を復元するためには、極前線（Polar Front: PF）や亜南極前線（Subantarctic Front: SAF）などの海洋前線の位置、および、海氷移流変動の実態や冬季海氷縁の位置を海底コア解析から捉えることが有効である。

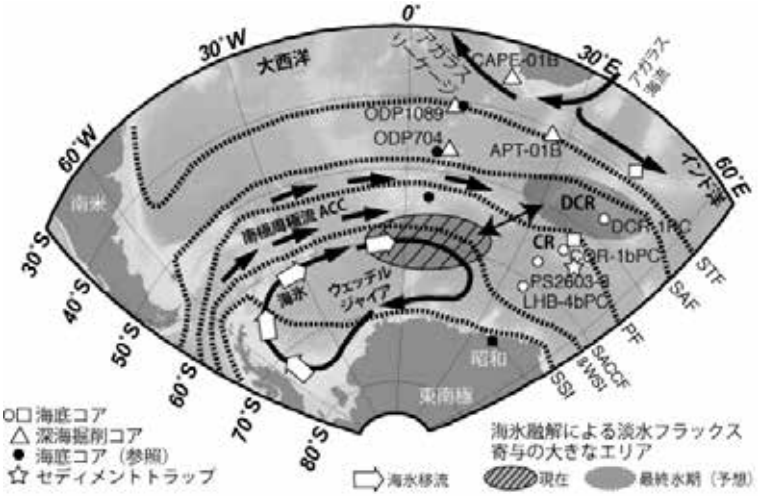


図１．本研究のターゲット海域の海底地形図と表層循環．
海底地形の略；**DCR**: Del Caño Rise, **CR**: Conrad Rise, 海洋フロントの略；**STF**: Subtropical Front, **SAF**: Subantarctic Front, **PF**: Polar Front, SACCF: Southern ACC Front, **WSI**: Winter sea ice, **SSI**: Summer sea ice.

そこで、南大洋インド洋区のコンラッドライズとデルカノライズ（図１の CR、DCR の海域）、および、周辺海域から採取された既存の海底コアの解析を行うとともに、複数の調査航海を実施して海水やプランクトン試料、沈降粒子、表層堆積物、海底コアを採取して共同研究を展開した。特に、南大洋における基礎データ不足による古環境指標（プロキシ）の脆弱性を克服するための基礎研究を行うことで、古環境プロキシの高精度化を目指した。また、微化石や地球化学的手法を駆使して海底コア解析を推進し、氷期・間氷期スケール、および、より短周期の古海洋変動を復元する研究を行った。ここではそれら成果の一部を紹介する。

２．白鳳丸およびマリオンデフレンヌによる南大洋の観測と試料採取

学術研究船白鳳丸を用いた 3 つの航海（KH-19-1、KH-19-6 Leg4、KH-20-1）とフランス船マリオンデフレンヌによる MD218（CROTALE）航海を実施し、南大洋インド洋区および大西洋区から各種試料の採取を行った（図 2）。採取した試料を活用した研究成果については、加藤悠爾（公募研究）、山口耕生ほか（公募研究）、池上隆仁ほか（公募研究）なども参照されたい。

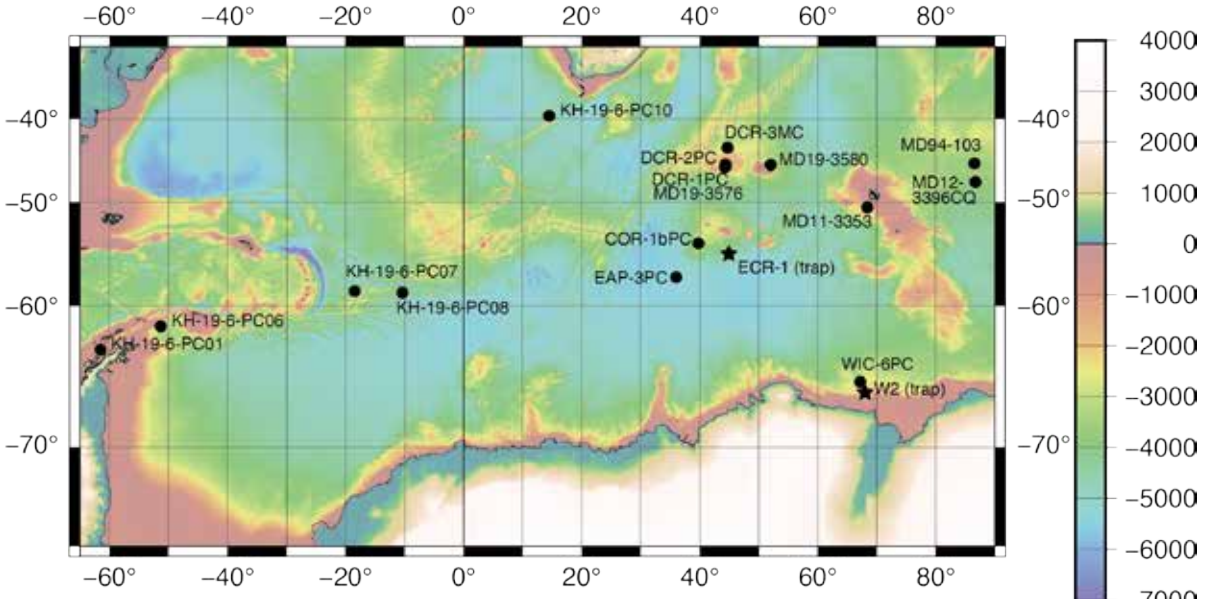


図2　白鳳丸およびマリオンデフレンヌによる航海で採取された海底コアおよびセジメントトラップの位置を示す海底地形図（先行研究による参照サイトも含む）。●海底コア、★セジメントトラップ

3. 珪藻$\delta^{18}O$ 分析のための試料前処理法の開発と海底コアへの応用

南大洋では保存されにくい炭酸塩微化石（有孔虫）に代わる実用的な古環境プロキシとして期待される珪藻殻の酸素同位体比（$\delta^{18}O$）を微少量で迅速に測定するための試料前処理法として、セルソーターを活用した独自の手法を開発し、堆積物から特定の形態の珪藻殻を大量に分離することに成功し、海底コアの珪藻殻 $\delta^{18}O$ 分析に世界で初めて適用した（Ijiri et al., 2021）（プレスリリース、2021 年 9 月 13 日、神戸大学、高知大学、海洋研究開発機構、株式会社マリン・ワーク・ジャパン）。この手法をさらに発展させることによって、珪藻のタクサごとの分離濃集が可能となり、海底コアや現生プランクトン試料への応用展開により、生態学的特徴を考慮した珪藻殻$\delta^{18}O$ 分析への期待が高まった。

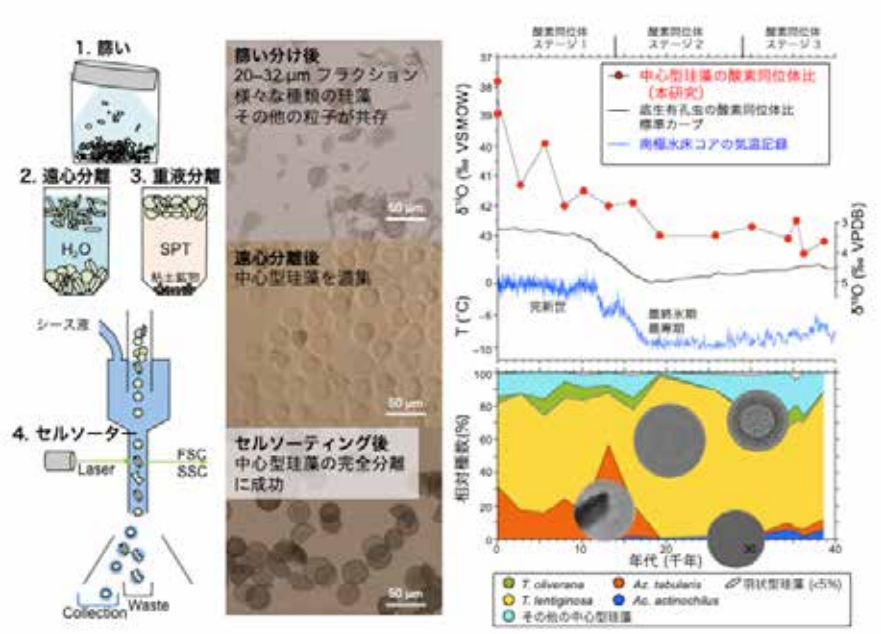


図 3　中心型珪藻分離手法の概念図とその酸素同位体比分析結果（Ijiri et al., 2021）

上述の堆積物の処理法に加えて、現生プランクトン試料から羽状型と中心型の珪藻を分離・精製する方法を検討し、濃縮したそれぞれの珪藻殻の$\delta^{18}O$ を測定した。南大洋インド洋区から採取した表層海水の$\delta^{18}O$ と塩分を測定し、珪藻殻$\delta^{18}O$ と比較したところ、それぞれの珪藻殻$\delta^{18}O$ が異なる傾きを持ちながら温度依存性をもつことを実証した。

その他、古環境プロキシの高精度化としては、人工知能 AI を用いた微化石自動分類・ピッキングシステムの開発と海底コア DCR-1PC への応用（Itaki et al., 2020ab）、X 線 CT スキャナ迅速処理プロトコルの開発による海底コアの漂流岩屑半定量化（加藤広大, 2022 修論）などによる成果があった。

4. 完新世の表層水温変動と過去 2000 年のテレコネクションの解明

南大洋インド洋区の海底コア COR-1GC（図 2 の COR-1bPC と同じ地点）の珪藻群集解析から、最終融氷期の 14,200 年前以降の表層水温変動を詳細に復元したところ、200 年～260 年の周期で表層水温が変動していたことが明らかとなった。また、COR-1GC の過去 2000 年間の古水温記録に焦点を絞り、南極大陸近傍のアデリー海盆で掘削された U1357B における珪藻群集とバイオマーカーから復元された海氷被覆の状態を比較したところ、南極海の海氷分布が熱帯域のエルニーニョ/南方振動（ENSO）や南半球における十年規模変動である南半球環状モード（SAM）と連動して周期的に変化していることが明らかとなった（Crosta et al., 2021）（プレスリリース、2021 年 2 月 23 日、高知大学）。

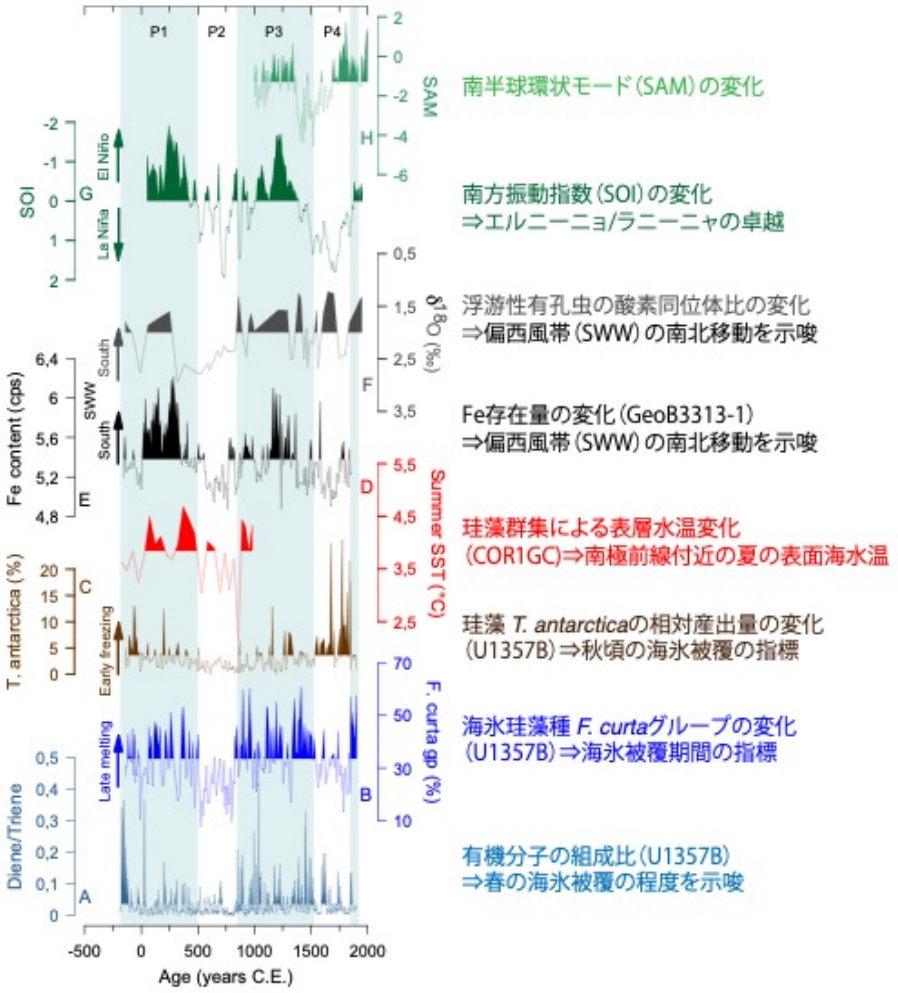


図 3　過去 2000 年間の南極海における環境変動を示すグラフ（Crosta et al., 2021）．南半球環状モード（SAM）と熱帯太平洋におけるエルニーニョ/南方振動（ENSO）の変化と、南半球の偏西風帯の移動、南極海における表面海水温や海氷被覆期間の変化の対応が見られる．

5. スーパー間氷期の表層水温と極前線の変動復元

南大洋インド洋区の海底コア（MD11-3353）を用いて、珪藻や放散虫の群集解析データに基づいて過去 36 万年間の表層水温および亜表層水温を復元した。4 回の氷期（酸素同位体ステージ MIS 2、6、8、10）および 4 回の間氷期（Holocene、MIS 5、7、9）を前半の温暖期ピークと中期に分けた上で、珪藻群集に基づく表層水温（SSTdiat）と放散虫群

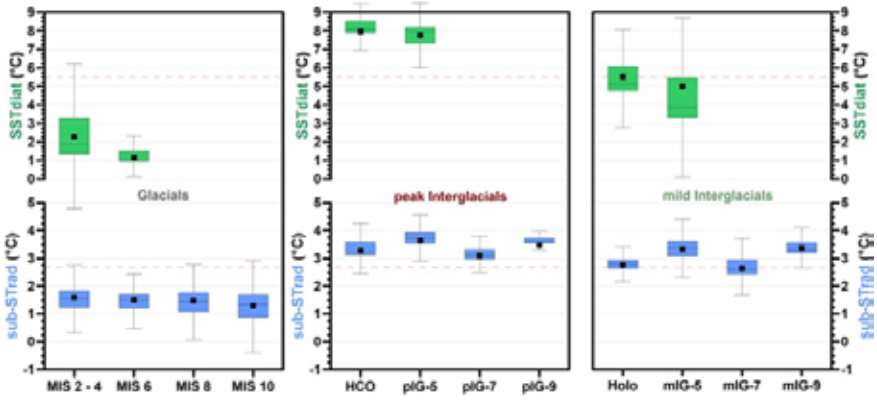


図 4　MD11-3353 コアにおける氷期と間氷期における古水温の比較（Civel-Mazens et al., 2021b）．氷期（ MIS 2–4; MIS 6; MIS 8; MIS 10 ）、間氷期のピーク（HCO; pIG-5; pIG-7; pIG-9）、間氷期中期（Holocene; mIG-5; mIG-7; mIG-9）における珪藻群集による表層水温（SSTdiat）と放散虫群集による亜表層水温（sub-STrad）．

集に基づく亜表層水温（sub-STrad）を比較したところ、MIS 5e と MIS 9 のスーパー間氷期では Holocene や MIS 7 に比べて有意に水温が高いことが明らかとなった（図 4）（Civel-Mazens et al., 2021b）。同様の結果はデルカノライズのコア DCR-1PC などでも明らかとなった（Crosta et al., 2020, Shukla et al., 2021）。また、周辺海域の既存データを含めて広域的な古水温変動を比較することでケルゲレン海台付近の海洋フロントの位置を復元したところ（図 5）、氷期の南極前線はケルゲレン海台の北側に北上していたことが明らかとなるとともに、スーパー間氷期には南極前線が 5 度程度南下していたと推測された（図 6）（Civel-Mazens et al., 2021b）。

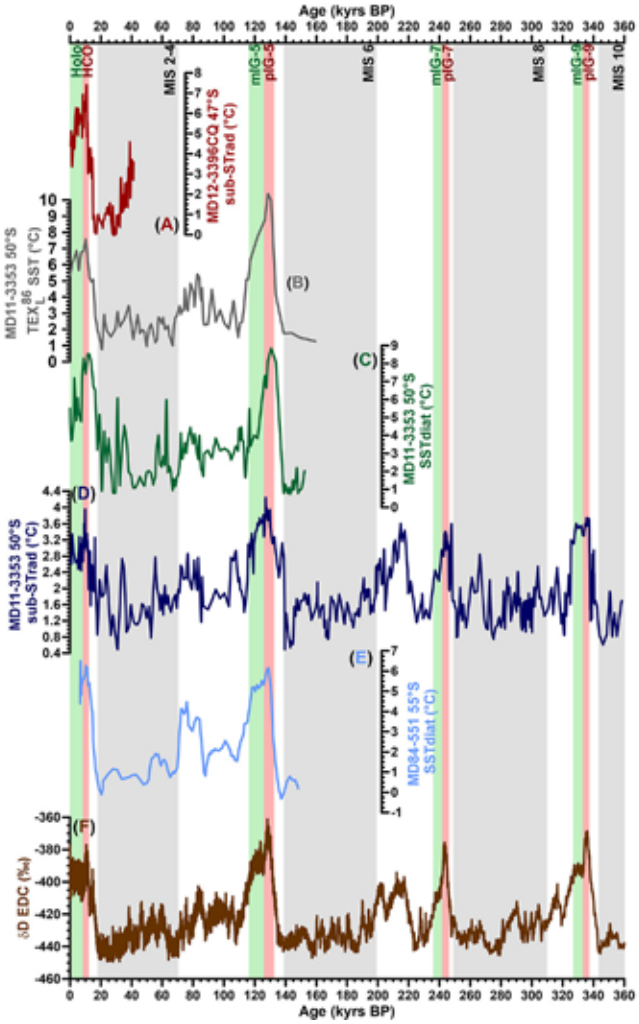


図 5　ケルゲレン海台周辺の海底コアから得られた古水温変動の比較（Civel-Mazens et al., 2021b）.

6. ケープダンレー底層水変動史の復元に向けた共同観測と海底コアおよび沈降粒子の解析（領域内連携）

A01-1 底層水班との密接な連携により白鳳丸 KH-19-1 および KH-20-1 航海を実施し、東南極ケープダンレー沖のワイルドキャニオンにおける観測と試料採取を行った。W2 地点（図 2）から回収した係留系に取り付けたセジメントトラップにより、ケープダンレー底層水が流下する領域から 1 年間の沈降粒子試料を回収することに成功した。沈降粒子の組成

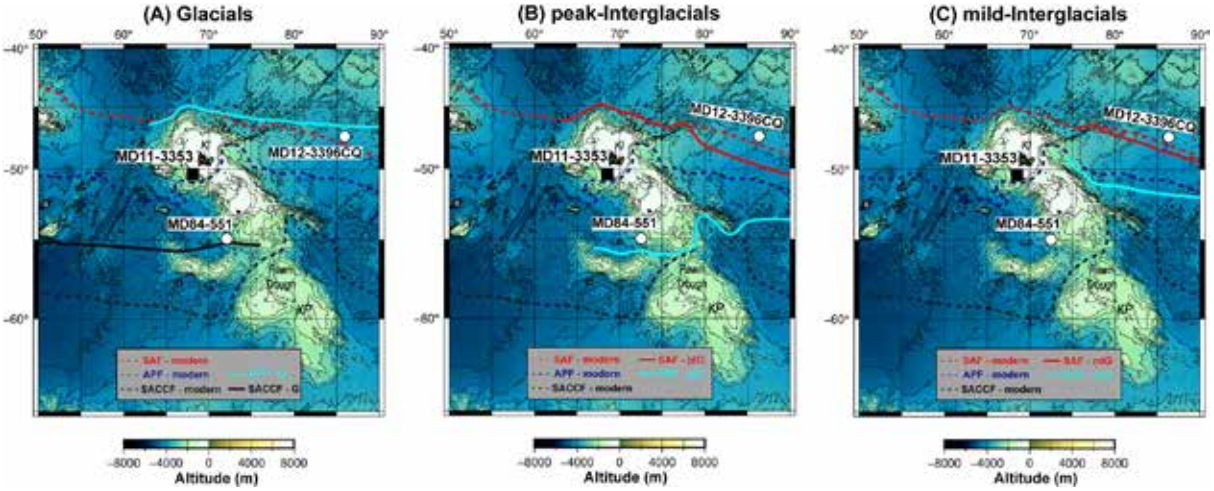


図 6　ケルゲレン海台周辺における氷期（A）、間氷期ピーク（B）、間氷期中期（C）での海洋フロントの位置の復元図（Civel-Mazens et al., 2021b）.

は珪藻を主体とするプランクトン由来の粒子で占められていたが、底層水が形成された直後頃のサンプルにのみ砕屑粒子（石英、長石など）や保存の良い浮遊性有孔虫殻が産出した。また、ワイルドキャニオンのチャネル底での深海カメラ観測では、底層での流れの証拠となる微地形であるリップルが海底面に認められた。ワイルドキャニオンおよびその周辺海域の表層堆積物の堆積学的検討からは、ケープダ

ンレー底層水の流下にともなう砕屑粒子の輸送と沈積の様子がわかってきており（Tekahara et al., in prep.）、それらの特徴を海底コア WIC-6PC（図 2）に応用することで氷期・間氷期スケールでのケープダンレー底層水の変動の復元研究が進められている。

7. 完新世における南極半島氷床変動

南極半島は地球上で最も温暖化が進んでいる地域の一つであり、過去 50 年間に南極氷床の融解が促進されている。しかし、このような衛星センサーなどからの記録は過去半世紀に限られており、地質学的な時間スケールでの気候変動や氷床融解の様子は解明されていない。南極半島北西の西ブランスフィールド海盆から採取された海底コア KH-19-6-PC01（図 2）の各種解析から、過去 5000 年間の南極半島氷床の変動を復元した。約 5000 年前から 3200 年前のいわゆる完新世中期温暖期には、漂流岩屑（Iceberg rafted debris: IBRD）と黄金色藻シスト化石が多産する複数のイベントが検出され、脂肪酸バイオマーカー水素同位体比もこの地域における氷床融解水の流入量の増加を示した。これらの結果は、完新世中期に南極半島氷床が著しく融解したことを示唆している。また、有機炭素や Br 含有量、珪藻の現存量から、この時期に海洋表層での生物生産が増加していたことが示された。完新世中期温暖期に相当する時代には、熱帯域ではラニーニャモードが発達していたことが報告されている。同時にアムンゼン海低気圧の強化と南極環状モード（SAM）の正偏差が示されることから、テレコネクションによって低緯度から南極半島周辺への暖気移流が促進されたことによって、南極半島氷床の融解が増加していた可能性がある。一方、約 3200 年前以降には IBRD が減少し、生物生産も減少したことから、エルニーニョモードの発達に伴い氷床融解が減少したことが示唆された（加藤広大, 2021 修士論文）。

参考文献

Civel-Mazens M., Crosta X., Cortese G., Michel E., Mazaud A., Ther, O., Ikehara M., Itaki T., Impact of the Agulhas Return Current on the oceanography of the Kerguelen Plateau region, Southern Ocean, over the last 40 kyrs, *Quaternary Science Reviews*, **251**, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106711 2020.

Civel-Mazens, M., Crosta, X., Cortese, G., Michel, E., Mazaud, A., Ther, O., Ikehara, M., Itaki, T., Antarctic Polar Front migrations in the Kerguelen Plateau region, Southern Ocean, over the past 360 kyrs, *Global and Planetary Change*, **202**, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103526, 2021a.

Crosta X., Etourneau J., Orme L., Dalaiden Q., Campagne P., Swingedouw D., Goosse H., Massé G., Miettinen A., McKay R., Dunbar R., Escutia C., Ikehara M., Climate modes drove Antarctic sea-ice multi-decadal heterogeneity over the last 2000 years, *Nature Geoscience*, https://doi.org/10.1038/s41561-021-00697-1, 2021b.

Crosta, X., Shukla, S., Ther, O., Ikehara M., Yamane, M., Yokoyama, Y., Last Abundant Appearance Datum of Hemidiscus karstenii driven by climate change, *Marine Micropaleontology*, **157**, https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101861, 2020.

Ijiri, A., Izumi, T., Morono, Y., Kato, Y., Terada, T., Ikehara, M., Purification of disc-shaped diatoms from the Southern Ocean sediment by a cell sorter to obtain an accurate oxygen isotope record, *ACS Earth and Space Chemistry*, DOI:10.1021/acsearthspacechem.1c00201, 2021.

Itaki, T., Taira, Y., Kuwamori, N., Maebayashi, T., Takeshima, S., Toya, K. Automated collection of single species of microfossils using a deep learning–micromanipulator system. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 19, https://doi.org/10.1186/s40645-020-00332-4, 2020a.

Itaki,T., Taira, Y., Kuwamori, N., Saito, H., Ikehara, M., Hoshino, T., Innovative microfossil (radiolarian) analysis using a system for automated image collection and AI-based classification of species, *Scientific Reports*, **10**, DOI:10.1038/s41598-020-77812-6, 2020b.

加藤広大, 南極半島北西域の海底堆積物を用いた過去 5000 年間の環境変遷に伴う氷床融解史の復元, 高知大学大学院総合人間自然科学研究科修士論文, 2022.

Orme, L. C., Crosta, X., Miettinen, A., Divine, D. V., Husum, K., Isaksson, E., Wacker, L., Mohan, R., Ther, O., and Ikehara, M., Sea surface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean over the Late Glacial and Holocene, *Climate of the Past*, **16**, 1451-1467, https://doi.org/10.5194/cp-16-1451-2020, 2020.

Shukla, S.K., Crosta, X., Ikehara, M., Sea Surface Temperatures in the Indian Sub-Antarctic Southern Ocean for the Last Four Interglacial Periods. *Geophysical Research Letters* **48**, e2020GL090994. https://doi.org/10.1029/2020GL090994, 2021.

プレスリリース

セルソーターによる円盤型珪藻の完全分離手法を確立～極域の海洋環境変動の高精度復元に道筋～，井尻暁、池原実、加藤悠爾、2021 年 9 月 13 日.

南極海での近年の海氷拡大が自然変動である可能性～南極海における過去 2000 年間の海氷分布がエルニーニョや南半球環状モードと連動して変化していたことを解明～，池原実、2021 年 2 月 23 日.

鮮新世から更新世にかけての南大洋の古海洋変動
－過去の温暖期の南大洋の気候状態－

関宰[1]、下野智大[1]、池原実[2]
[1]北海道大学、[2]高知大学

A01-1 南大洋の古海洋変動ダイナミクス（古海洋班）（代表：池原実）

1．背景と目的

南大洋は地球の気候に対し重要な役割を担っているとされ、海洋大循環や炭素循環などを駆動することで、全球気候変動に大きな影響を与えていると考えられている。また、南大洋は南極氷床の消長に対しても極めて重要な役割を担っている。特に南極氷床域の 40%を占める海洋性の氷床域が海洋変動に対して敏感であり、相対的に温暖な周極深層水（mCDW：南大洋の中深層を占める暖水塊）の棚氷下への流入による底面融解よって氷床の融解が引き起こされることがわかってきた（Favier et al., 2014）。これはしばしば「海洋性氷床の不安定性」と呼ばれ、氷床の縮小を引き起こす氷床末端部のキープロセスとして注目を集めている。

この氷床末端部のキープロセスを大局的に支配しているのが南大洋の大気―海洋循環変動と考えられている。ここ数十年の傾向として、AMOC の減少・海洋ジャイアのスピンアップ・偏西風と周極流の南下/増強が認められており（Qu et al., 2019; Yang et al., 2020; Shi et al., 2021）、それらが温暖な mCDW の棚氷下への貫入や南極大気の温暖化を引き起こしている可能性が指摘されている（Xia & Zhaomin, 2018）。従って、南大洋の海洋ジャイアや南極周極流・偏西風の変化など低中緯度における大気海洋循環の変化が、南極氷床周辺の大気と海洋の循環に作用し、氷床末端部のキープロセスを駆動している可能性がある。しかし、観測記録の期間が短いため、こうした現象が長期的で大規模な変化の傾向の始まりであるかどうかは不明であり、大気と海洋循環のどのような相互作用が氷床末端部のキープロセスを導き大規模な氷床縮小へと至るのかについてはよくわかっていない部分が多い。

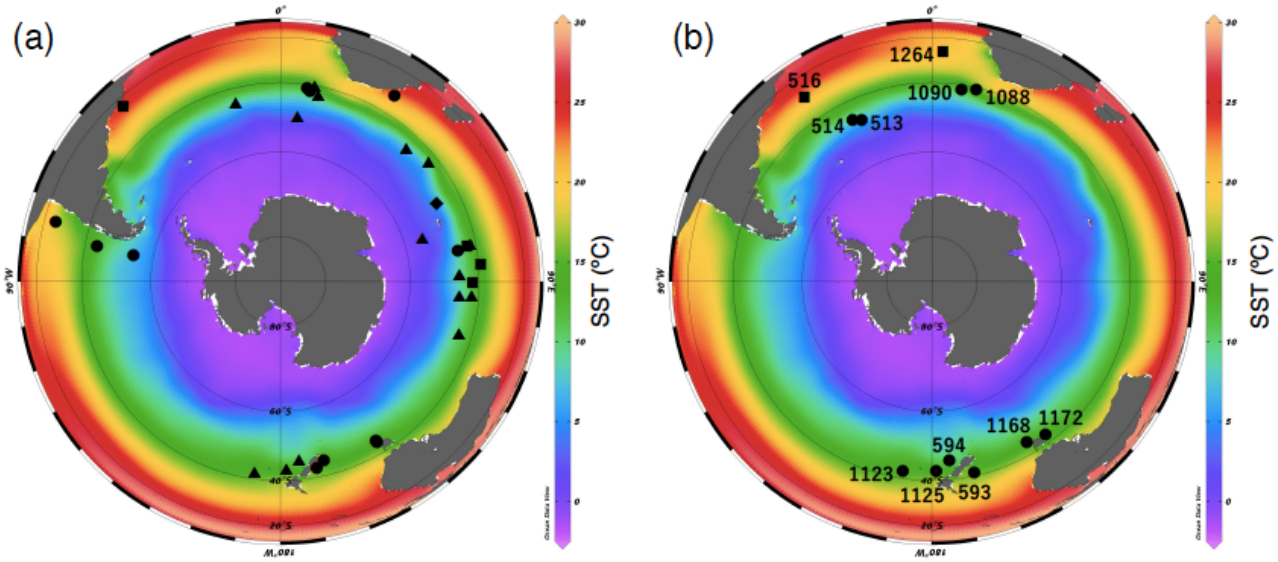


図 1　本研究で用いた堆積物コア試料の位置と、表面海水温度の分布。(a)スーパー間氷期（過去 45 万年間のデータ。（b）鮮新世から更新世のデータ。●：アルケノン、■：有孔虫 Mg/Ca、▲：郡集組成、◆：GDGT。

気候が長期的に大きく変化した場合に何が起こり得るかに関する知見を得るには、過去に起こった大きな気候変動の研究が有益である。特に、現在よりも温暖であった過去の時代の研究は将来予測という観点において重要である。地球の気候は過去数百万年間（鮮新世（約 533-258 万年前）から更新世（258

-1.2 万年前））にかけてダイナミックに変動してきたことが知られており、この期間では現在よりもより温暖で両半球の氷床も縮小していた“温室時代（鮮新世やスーパー間氷期）”が存在する（Dutton e al., 2015）。これらの温暖期における南大洋の海洋状態を明らかにすることで、氷床縮小を導く海洋－氷床の相互作用のメカニズムに関する有益な知見が得られることが期待できる。そこで本研究では、鮮新世およびスーパー間氷期の南大洋の海洋状態の実態を明らかにすることを目的として、南大洋中緯度の各地で採取された長尺の海底堆積物コアから鮮新世と更新世の表面海水温度（SST）を復元・解析した。

2．方法

2－1．試料

更新世後期（過去 45 万年間）におけるスーパー間氷期（MIS5e、MIS9 および MIS11）の水温復元データの解析に関しては、これまでに公表されている水温復元データを用いた。図 1 に使用した水温復元データの位置を、表 1 にそれらの詳細情報（復元期間、水温復元手法など）を示す。水温復元手法にはアルケノン、有孔虫 Mg/Ca、プランクトンの群集組成、GDGT が用いられている。データの分布に関しては南太平洋、南大西洋、インド洋全ての大洋においてデータが得られているが、南太平洋に関してはやや地域的に偏っている。

表 1　本研究でスーパー間氷期の水温復元に用いるデータの情報

サイト名	緯度(S)	経度(+E/-W)	期間(千年前)	水温復元手法	文献
ODP1090	42°54	8°54	0-3642	アルケノン	Martinez-Garcia et al. (2010)
TN0571-21/1089	41°08	7°49	6-160	アルケノン	Sachs & Anderson (2003); Pahnke & Sachs (2006)
RC11-120	43°31	79°52	3-293	Mg/Ca	Mashiotta et al. (1999)
E48-22	39°54	85°25	5-20	Mg/Ca	Rickaby & Elderfield (1999)
E49-19	43°53	90°06	4-283	Mg/Ca	Rickaby & Elderfield (1999)
PS2082-1	43°13	11°44	1-338	郡集組成	Brathauer & Abelmann (1999)
RC11-120	43°31	79°52	1-294	郡集組成	Martinson et al. (1987)
ODP1093	50°10	5°07	1-570	郡集組成	Schneider-Moret et al. (2008)
MD07-3076	44°09	-14°13	2-30	郡集組成	Vázquez Riveiros et al. (2010)
MD07-3077	44°09	-14°13	364-444	郡集組成	Vázquez Riveiros et al. (2010)
ODP 1089	40°57	9°53	2-436	郡集組成	Cortese et al. (2007)
MD84-551	55°06	73°10	1-164	郡集組成	Pichon et al. (1992)
MD84-527	43°29	51°11	1-143	郡集組成	Pichon et al. (1992)
MD962077	33°10	31°15	6-796	アルケノン	Bard et al. (2009)
E49-21	42°11	94°53	6-464	郡集組成	Howard and Prell (1992)
E45-29	44°53	106°31	2-450	郡集組成	Howard and Prell (1992)
MD02-2488	46°29	88°01	50-144	郡集組成	Govin et al. (2009)
MD97-2120	45°53	174°93	2-340	Mg/Ca	Pahnke et al. (2003)
ODP1123	41°47	171°29	0-998	郡集組成	Crundwell et al. (2008)
ODP1125	42°32	-178°9	0-1058	郡集組成	Schaefer et al. (2005)
DSDP594	45°31	174°56	4-800	郡集組成	Schaefer et al. (2005)
MD06-2986/2989	43°45	167°9	0-856	郡集組成	
FR1/94-GC3	44°26	150°00	6-454	アルケノン	Pelejero et al. (2006)
SO136-GC3	42°18	169°53	4-286	アルケノン	Pelejero et al. (2006)
PS75/034-2	54°22	-80°05	6-688	アルケノン	Ho et al. (2012)
GeoB3327-5	43°14	-79°59	6-512	アルケノン	Ho et al. (2012)
GeoB3388-1	25°13	-75°31	10-690	アルケノン	Ho et al. (2012)
E49-018	46°	90°00	12-532	郡集組成	Howard and Prell (1992)
MD12-3394	48°38	64°58	2-154	GDGT	Ai et al. (2021)
GL1090	24°92	-42°51	6-182	Mg/Ca	Santos et al. (2017)
DCR-PC1	46°01	44°15	2-356	郡集組成	Shukla et al. (2021)

鮮新世から更新世にかけての長期的な水温復元に関しては、公表されている水温復元データに加え複数のサイトで新たに水温の復元を行った（図１、表２）。国際深海掘削計画で採取された海底堆積物コア DSDP513/514, ODP1123, 1168, 1172 において、アルケノン古水温法を用いて鮮新世からの復元を行った。鮮新世の水温復元データのサイト数は、更新世のそれに比べて少なく、またインド洋のデータが欠落しており、地域的な偏りが大きい。

均質化した乾燥堆積物試料から高速溶媒抽出装置（ASE200）にて可溶性の脂質化合物を抽出し、その後、シリカゲルカラムクロマトグラフィーにてアルケノン成分を他の成分から分離した。アルケノンはガスクロマトグラフにて測定した。アルケノン不飽和比から水温への換算は、Prahl et al. (1987)の換算式を用いた。

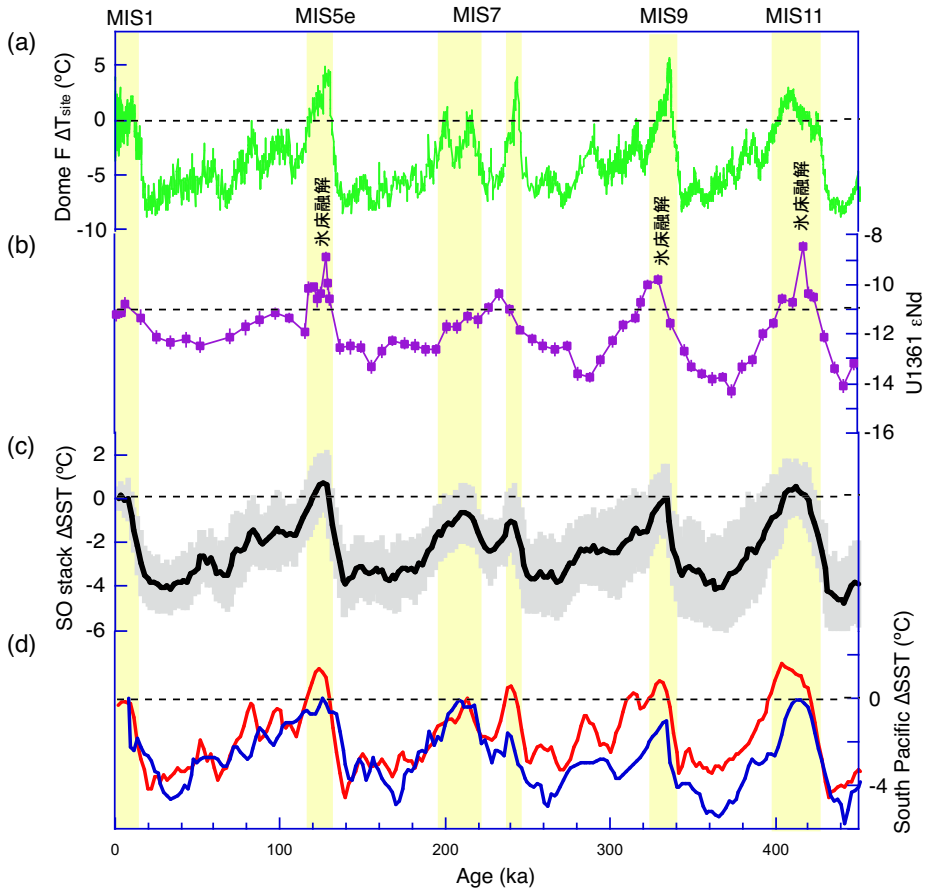


図２　過去 45 万年間の(a)ドームふじアイスコア気温（ΔT_{site}）(Uemura et al., 2018)、(b) U1361 のεNd（氷床融解の指標）(Wilson et al., 2018)、(c)南大洋中緯度のスタックΔSST（SO ΔSST）、（d）南太平洋亜熱帯循環東西のΔSST の時系列変化。図（a）の MIS5e, MIS9, MIS11 はスーパ間氷期を示す。図（d）の赤線：西岸境界流側を示し、青線東岸境界流側を示す。

表２　本研究で鮮新世の水温復元に用いるデータの情報

サイト名	緯度(S)	経度(+E/-W)	期間（千年前）	水温復元手法	文献
DSDP513	47°34	-24°38	2410-3718	アルケノン	This study
DSDP514	46°02	-26°51	2410-3718	アルケノン	This study
DSDP516	30°17	-35°17	2786-4500	Mg/Ca	Karas et al. (2017)
DSDP593	40°30	167°40	0-3410	アルケノン	McClymont et al. (2016)
DSDP594	45°31	174°56	2622-4500	アルケノン	Caballero-Gill et al. (2019)
ODP1088	41°08	13°34	0-4500	アルケノン	Herbert et al. (2016); This study
ODP1090	42°54	8°54	0-3642	アルケノン	Martinez-Garcia et al. (2010)
ODP1123	41°47	171°29	0-4500	アルケノン	This study
ODP1125	42°32	-178°9	0-4500	アルケノン	Caballero-Gill et al. (2019)
ODP1168	42°36	144°24	2944-4342	アルケノン	This study
ODP1172	43°57	149°55	2588-4038	アルケノン	This study
ODP1264	28°31	2°50	0-4500	Mg/Ca	Wojcieszek & Dekens (2010)

２－２．スタックΔSST データの構築

南大洋中緯度におけるスタックデータを算出するために、まず、各水温データを 2000 年間隔でリサンプリングし、完新世後期（過去約 2000 年間程度）の平均値からの偏差（ΔSST）に変換したものを用

いた。

3．成果

3－1．後期更新世（過去 45 万年間）の南大洋の水温変動

図 2 c に過去 45 万年間の南大洋のスタックΔSST を示す。この期間には 5 つの氷期―間氷期サイクルが存在するが、ΔSST 変動はサイトによって著しく異なる結果を示した。その要因として（1）水温復元手法の違い、（2）氷期―間氷期サイクルに伴う水温変動の地域性を反映している可能性が考えられる。しかし、同じ復元手法でも大きな地域差が認められることから、後者を主に反映したものと考えられる。南大洋中緯度のスタックΔSST は過去 45 万年間において-4℃から+2℃の範囲で変動した。水温変動パターンは南極アイスコアから得られた南極の気温（Uemura et al., 2018）と概ねよく一致しており、氷期―間氷期変動のスケールにおいて南大洋中緯度全体と南極の気温は概ね同調していることが示唆される。また、スーパー間氷期（MIS 5e, 9, 11）の水温は完新世の水温よりも～1 ℃高い値を示した。

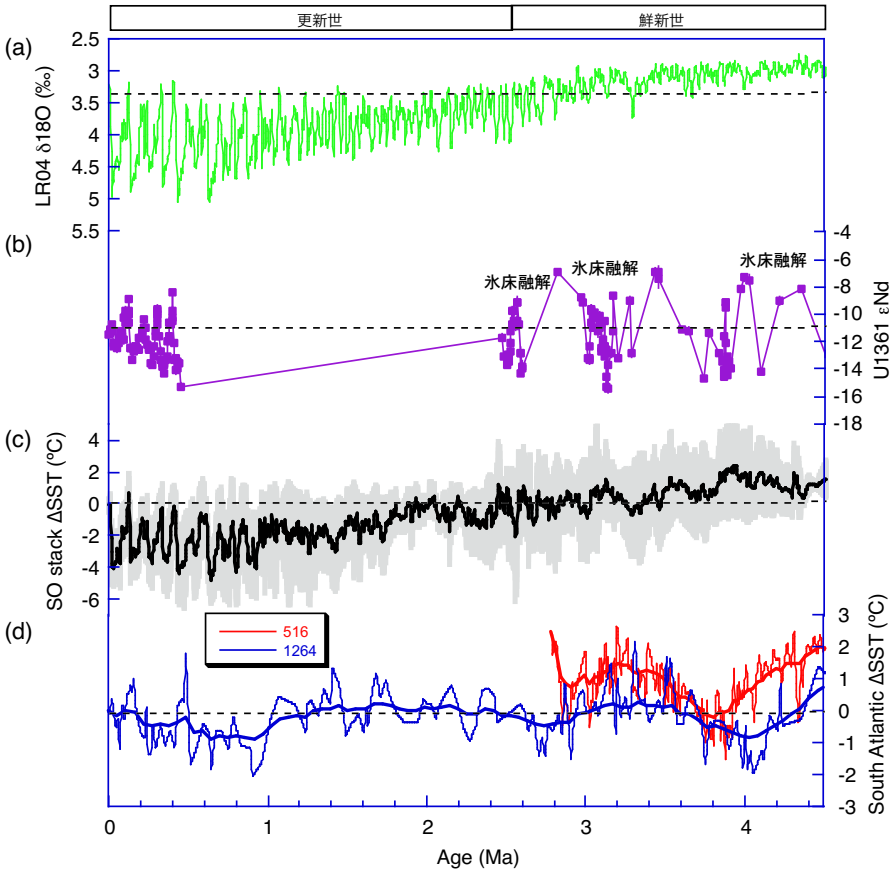


図 3　過去 450 万年間の(a)有孔虫δ^{18}O（氷床量の指標）（Liseicki and Raymo, 2005）、（b）U1361 のεNd（Wilson et al., 2018; Cook et al., 2013; Bertram et al., 2018）、(c)南大洋中緯度のスタックΔSST（SO ΔSST）、（d）南大西洋亜熱帯循環東西のΔSST の時系列変化。図（d）の赤線：西岸境界流側を示し、青線東岸境界流側を示す。

3－2．後期更新世（過去 45 万年間）の海洋循環の変動

地域により異なるΔSST 変動を示す要因として、亜熱帯循環などの海洋循環強度が変動していたことが考えられる。現在、南半球の亜熱帯循環は年々スピンアップしており、暖流サイドでより高温に、寒流サイドでより低温下する傾向が認められている。この亜熱帯循環のスピンアップは全球的な温暖化によって引き起こされた可能性が指摘されているが、それらの因果関係ははっきりとはわかっていない。もしそうであれば、より温暖化していた鮮新世で亜熱帯循環強度は増大していた可能性がある。そこで、南太平洋亜熱帯循環の西側と東側の水温変動を比較したところ、スーパー間氷期において暖流サイド（西側）の水温は寒流サイド（東側）に比べて、高い値を示すことが明らかになった。この結果は、スーパー間氷期では現在よりもそれぞれの海流において循環強度がより増大していたことを示唆する。

3－3．鮮新世から更新世にかけての南大洋の水温変動

図 3 に過去 450 万年間の各サイトの南大洋のΔSST とそれらのスタックΔSST を示す。鮮新世から更新世にかけてのΔSST 変動はサイトによって大きくことなる結果を示した。鮮新世から更新世にかけての記録の水温復元手法の大部分はアルケノン古水温法を用いており、手法による違い可能性は排除できるため、この期間の南大洋中緯度の水温は地域により異なる進化を遂げてきたと考えられる。南大洋中

緯度のスタックΔSST は過去 450 万年間において-4.5℃から+2℃の間で変動し、長期的な寒冷化（約-0.85℃/100 万年）の傾向を示した。鮮新世と更新世における短周期の水温変動を比べると更新世で変動幅がより大きい。これは、更新世において氷期―間氷期サイクルがより増幅することと調和的であるが、鮮新世のスタックΔSST のダイナミックレンジが比較的小さい要因として、鮮新世の年代モデルの制約が十分でないことも要因として挙げられるため、鮮新世スタックデータの場合、短い時間スケールの変動の解釈については注意が必要である。

３－４．鮮新世から更新世にかけての海洋循環の変動

鮮新世における亜熱帯循環の状態が現在と比べて異なっていたのかどうかを調べるために、データが最も充実している南大西洋亜熱帯循環の地域に着目し、南大西洋亜熱帯循環の西側（DSDP516）と東側（ODP1264）の有孔虫 Mg/Ca 水温変動を比較した。その結果、鮮新世において暖流サイド（西側）の水温は寒流サイド（東側）に比べて高い値を示すことが明らかとなった。これにより、現在よりも温暖な鮮新世おいて南大西洋の亜熱帯循環強度がより増していたことが示唆された。

３－５．過去の温暖期の南大洋の気候状態

３つのスーパー間氷期（MIS5e、MIS9、MIS11）と鮮新世における南大洋中緯度の水温復元データの解析により、過去の温暖期の南大洋に気候状態に関して次の特徴があることが示唆された。すなわち全ての温暖期において、南大洋中緯度は現在に比べて～２℃程度温暖化しており、おそらく亜熱帯循環もよりスピンアップしていた。近年、南大洋全体の温暖化や亜熱帯ジャイアの循環強度の増大が観測されているが、本研究の結果は長期的に全球的な温暖化が進行すると南大洋の温暖化や亜熱帯循環などの南大洋の表層海洋循環強度が増大する可能性を示唆する。また、スーパー間氷期や鮮新世では西南極や東南極の氷床の一部が現在よりも縮小していたことが地質学的記録から示されている（図２b、図３b）（Cook et al., 2013; Patterson et al., 2014; Wilson et al., 2018; Turney et al., 2020）。我々の結果は、南大洋の状態と南極氷床の縮小との間に密接な関連があることを強く示唆する。海洋ジャイアのスピンアップは南極周極流や偏西風の南進と増強を促すため、温暖期の南極氷床縮小は中緯度における大気海洋循環の再編成による棚氷下への mCDW 貫入の増大によって引き起こされた可能性がある。

４．今後の課題

過去の温暖期における南大洋全体の気候状態をより詳細に解明するには、水温復元データの拡充が不可欠である。現時点では、スーパー間氷期の水温復元データでさえ十分な時空間解像度を得ているとは言い難く、鮮新世に関しては圧倒的に不足しているだけでなく、地域的にも偏りがある。データが不足している地域における新たな堆積物コアの採取と古海洋データの創出を引き続き行っていく必要がある。また、海洋と南極氷床との相互作用における核心部分である高緯度海域の水温復元の連続的なデータはほとんど報告されていない。これは高緯度で適用可能な水温プロキシが極めて限定されているためである。従って、高緯度における水温プロキシの開発と高精度化と復元も今後の大きな課題と考えられる。

参考文献

Ai, X. E. et al. Southern Ocean upwelling, Earth's obliquity, and glacial-interglacial atmospheric CO_2 change. *Science* **370**, 1348-1352 (2020).

Bard, E. & Rickaby, R. E. M. Migration of the subtropical front as a modulator of glacial climate. *Nature* **460**, 380–383 (2009).

Bertram, R. A. Pliocene deglacial event timelines and the biogeochemical response offshore Wilkes Subglacial Basin, East Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* **494**, 109-116 (2018).

Brathauer, U. & Abelmann, A. Late Quaternary variations in sea surface temperatures and their relationship to orbital

forcing recorded in the Southern Ocean (Atlantic sector). *Paleoceanography* **14**, 135–148 (1999).

Caballero-Gill, R. P., Herbert, T. D. & Dowsett, H. J. 100-kyr Paced Climate Change in the Pliocene Warm Period, Southwest Pacific. *Paleoceanography and Paleoclimatology* **34**, 524-545, https://doi.org/10.1029/2018PA003496 (2019).

Cook, C. et al. Dynamic behaviour of the East Antarctic ice sheet during Pliocene warmth. *Nature Geoscience* **6**, 765–769, https://doi.org/10.1038/ngeo1889 (2013).

Cortese, G., Abelmann, A. & Gersonde, R. The last five glacial-interglacial transitions: a high-resolution 450,000-year record from the subantarctic Atlantic. *Paleoceanography* **22**, PA4203 (2007).

Crundwell, M., Scott, G., Naish, T. & Carter, L. Glacial–interglacial ocean climate variability from planktonic foraminifera during the Mid-Pleistocene transition in the temperate Southwest Pacific, ODP Site 1123. *Palaeoceanography Palaeoclimatology Palaeoecology* **260**, 202-229 (2008).

Dutton, A. et al. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science* **349**, doi: 10.1126/science.aaa4019 (2015).

Favier, L. et al. Retreat of Pine Island Glacier controlled by marine ice-sheet instability. *Nature Climate Change* **4**, https://doi.org/10.1038/nclimate2094 (2014).

Govin, A. et al. Evidence for northward expansion of Antarctic Bottom Water mass in the Southern Ocean during the last glacial inception. *Paleoceanography* **24**, PA1202 (2009).

Herbert, T. et al. Late Miocene global cooling and the rise of modern ecosystems. *Nature Geoscience* **9**, 843–847, https://doi.org/10.1038/ngeo2813 (2016).

Ho, S. L. et al. Sea surface temperature variability in the Pacific sector of the Southern Ocean over the past 700 kyr. *Paleoceanography* **27**, PA4202, https://doi.org/10.1029/2012PA002317 (2012).

Howard, W. R. & Prell, W. L. Late quaternary surface circulation of the Southern Indian ocean and its relationship to orbital variations. *Paleoceanography* **7**, 79–117 (1992).

Karas, C. et al. Pliocene oceanic seaways and global climate. *Scientific Reports* **7**, 3984. https://doi.org/10.1038/srep39842 (2017).

Lisiecki, L. E. & Raymo, M. E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography and Paleoclimatology* **20**, https://doi.org/10.1029/2004PA001071 (2005).

McClymont, E.L., Elmore, A.C., Kender, S., Leng, M.J., Greaves, M. & Elderfield, H. Pliocene-Pleistocene evolution of sea surface and intermediate water temperatures from the Southwest Pacific. *Paleoceanography* **31**, 895–913 (2016).

Martinez-Garcia, A., Rosell-Mele, A., McClymont, E. L., Gersonde, R. & Haug, G. H. Subpolar link to the emergence of the modern equatorial Pacific Cold Tongue. *Science* **328**, 1550–1553 (2010).

Martinson, D. G. et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research* **27**, 1–29 (1987).

Mashiotta, T. A., Lea, D. W. & Spero, H. J. Glacial-interglacial changes in Subantarctic sea surface temperature and $\delta^{18}O$-water using foraminiferal Mg. *Earth and Planetary Science Letters* **170**, 417–432 (1999).

Pahnke, K. et al. 340,000-Year Centennial-Scale Marine Record of Southern Hemisphere. *Science* **301**, 948-952 (2003).

Pahnke, K. & Sachs, J. P. Sea surface temperatures of southern midlatitudes 0-160 kyr BP. *Paleoceanography* **21**, PA2003 (2006).

Patterson, M. et al. Orbital forcing of the East Antarctic ice sheet during the Pliocene and Early Pleistocene. *Nature Geoscience* **7**, 841–847, https://doi.org/10.1038/ngeo2273 (2014).

Pelejero, C., Calvo, E., Barrows, T. T., Logan, G. A. & De Deckker, P. South Tasman Sea alkenone palaeothermometry

over the last four glacial/interglacial cycles. *Marine Geology* **230**, 73-86 (2006).

Pichon, J.-J. et al. Surface water temperature changes in the high latitudes of the southern hemisphere over the last glacial-interglacial cycle. *Paleoceanography* **7**, 289–318 (1992).

Prahl, F. G. & Wakeham, S. G. Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for paleotemperature assessment. *Nature* **330**, 367-369, doi.org/10.1038/330367a0 (1987).

Qu, T., Fukumori, I. & Fine, R. A. Spin-up of the Southern Hemisphere super gyre. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **124**, 154–170. https://doi.org/10.1029/2018JC014391 (2019).

Rickaby, R. E. M. & Elderfield, H. Planktonic foraminiferal Cd/Ca: paleonutrients or paleotemperature?. *Paleoceanography* **14**, 293–303 (1999).

Sachs, J. P., & R. F. Anderson. Fidelity of alkenone paleotemperatures in southern Cape Basin sediment drifts. *Paleoceanography* **18**, 1082, doi:10.1029/2002PA000862 (2003).

Santos, T. P. et al. Prolonged warming of the Brazil Current precedes deglaciations. *Earth and Planetary Science Letters* **463**, 1-12 (2017).

Schaefer, G., Rodger, J. S., Hayward, B. W., Kennett, J. P., Sabaa, A. T., & Scott, G. H. Planktic foraminiferal and sea surface temperature record during the last 1 Myr across the subtropical front, southwest Pacific. *Marine Micropaleontology* **54**, 191−212. https:// doi.org/10.1016/j.marmicro.2004.12.001 (2005).

Schneider-Mor, A. et al. Nutrient regime at the siliceous belt of the Atlantic sector of the Southern Ocean during the past 660 ka. *Paleoceanography* **23**, PA3217 (2008).

Shi, J. R. et al. Ocean warming and accelerating Southern Ocean zonal flow. *Nature Climate Change* **11**, 1090–1097, https://doi.org/10.1038/s41558-021-01212-5 (2021).

Shukla, S. K., Crosta, X. & Ikehara, M. Sea Surface Temperatures in the Indian Sub-Antarctic Southern Ocean for the Last Four Interglacial Periods. *Geophysical Research Letters* **48**, e2020GL090994. https://doi.

org/10.1029/2020GL090994 (2021).

Turney, C. S. M., Fogwill, C. J., Golledge, N. R. & Cooper, A. Early Last Interglacial ocean warming drove substantial ice mass loss from Antarctica. *The Proceedings of the National Academy of Sciences* **117**, 3996-4006 (2020).

Uemura, R. et al. Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications* **9**, 961, https://doi.org/10.1038/s41467-018-03328-3 (2018).

Vazquez Riveiros, N. et al Response of South Atlantic deep waters to deglacial warming during terminations V and I. *Earth and Planetary Science Letters* **298**, 323–333 (2010).

Wojcieszek, D. & Dekens, P.S. Climate history in the south Atlantic subtropical gyre over the last 4 Ma. Abstract PP13D-1554 presented at AGU 2010 Fall Meeting (2010).

Wilson, D. J. et al. Ice loss from the East Antarctic Ice Sheet during late Pleistocene interglacials. *Nature* **561**, 383–386 (2018).

Xia, L. & Zhaomin, W. Simulated impact of Southern Hemisphere westerlies on Antarctic Shelf Bottom Water temperature. *Advances in Polar Science* **29**, 3-19 (2018).

Yang, H. Poleward shift of the major ocean gyres detected in a warming climate. *Geophysical Research Letters* **47**, e2019GL085868, https://doi.org/10.1029/2019GL085868 (2020).

海氷と生態系・物質循環

真壁竜介[1,2,3]、高橋啓伍[2]、佐野雅美[1,4]、松田亮[5]、伊藤優人[1]、高尾信太郎[6]、立花愛子[3]、柏瀬陽彦[7]、
川合美千代[3]、黒沢則夫[5]、野村大樹[8]、茂木正人[1,3]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]東京海洋大学、[4]東京大学、[5]創価大学、[6]国立環境研究所、
[7]苫小牧高専、[8]北海道大学

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用（生態系班）（代表：茂木正人）
A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

1．背景と目的

南大洋生態系の特徴として、広大な季節海氷域とその季節消長と密接に関係する多種の生物活動が挙げられる。海氷面積は冬季に平均 18.5×10^6 km^2 まで拡大し、夏までにその面積の 80%が融解する (Parkinson and Cavalieri, 2012)。海氷融解時には淡水供給による成層化により光環境が好転するとともに、鉄をはじめとする栄養塩やタネとなるアイスアルジーが水柱に放出され、氷縁ブルームが発生する (El-Sayed and Taguchi, 1981; Garrison and Buck, 1985)。氷縁ブルームは最大 3 週間ほどで終焉するが、この短い期間の生産は南緯 50 度以南の基礎生産の 10%にも達する。ナンキョクオキアミやカイアシ類といった優占する消費者群集はそれぞれが生活史の中で氷縁ブルームを効率的に利用する戦略を有しており、この 2 次生産が魚類、鳥類、海産哺乳類といった高次捕食者を支えている (Conover and Huntley, 1991)。

氷縁ブルーム形成は空間的に極めて不均一であり、氷縁域の環境要因のみでは説明がつかないことから (Fitch and Moore, 2007)、海氷から放出されるアイスアルジーやその他の物質の質や量を理解することが重要であるとされつつある (Takahashi et al., 2022)。しかし、これまでの海氷観測は氷盤からの海氷コア採集に基づくものがほとんどであり、氷縁域で融解しつつある比較的小さな海氷（1 m^3 以下）に関する理解は非常に乏しい。また、海氷融解期の表層環境変動と生物生産、エクスポートフラックスの理解が不足しているが、これは氷山の存在により、表層までの係留観測に多大なリスクを伴うという観測手法の制限が原因であり、新たな観測手法を導入して当該期間における表層の時系列観測が求められる。

このような問題点を改善し、氷縁域における海氷と生物生産、食物網、エクスポートフラックスの関係を把握するため、本課題では底層水班の海氷物理学者らと連携して現場と人工衛星を用いた観測を実施してきた。本章では、多くの取り組みのうち、以下のポイントに絞ってその成果を記述する。

1. 氷縁域における海氷からの生物放出と水柱におけるそれらの変化
2. 海氷融解のタイミングと動物プランクトン群集の発育
3. 元素分析、安定同位体比測定および DNA 分析を可能とする固定液の選定
4. 耐氷型 GPS ブイを用いた海氷融解期の時系列観測
5. 季節海氷域に生息する動物プランクトン群集の海氷由来有機物への依存
6. インド洋区における浮氷が含有する生物・有機物量とその含蓄

2. 成果

2.1. 氷縁域における海氷からの生物放出と水柱におけるそれらの変化

Makabe, R., Hasegawa, T., Sano, M., Kashiwase, H., Moteki, M. (2022) Copepod assemblages in the water column and drifting sea-ice floes in the ice-edge region in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the austral summer. Polar Biol, 45: 749-762.

Takahashi, K.D., Makabe, R., Takao, S., Kashiwase, H., Moteki, M. (2022) Phytoplankton and ice-algal communities in the seasonal ice zone during January (Southern Ocean, Indian sector). J. Oceanogr, 78: 409–424.

夏季の氷縁域に存在する比較的小さな海氷および周辺海水を取得し、藻類群集およびカイアシ類群集の

定量的な解析から海氷から融解に伴って放出される両群集の水柱への影響や放出後の変化について調べた。対象海域は東経 110 度トランセクト上の氷縁域および先立って海氷が融解している北側の観測点とした。試料の採集はカイアシ類については 2016 年から 2018 年の 1 月、藻類群集については 2018 年から 2020 年の 1 月に東京海洋大学練習船海鷹丸の南極観測航海中に実施した。

藻類群集：水柱中の分類群組成は氷縁域および近傍の観測点において海氷中のそれと高い類似度を示し、北に向かって減少する傾向が見られた。この高い類似度は海氷融解後（海氷密接度が 10%を切った後）約 3 週間で大幅に減少し、海氷中でも優占した珪藻 *Fragilariopsis cylindrus* が優占する群集から *F. kergerensis* が優占する群集に変化していた。そのため、海氷から放出された藻類群集は氷縁域近傍の生物生産に重要であると考えられる。また、この傾向は氷縁ブルームの発生・非発生に関わらず 3 年間で共通して見られた。

カイアシ類群集：これまでに沿岸域で認められてきた海氷中カイアシ類 3 種 (*Pararhabidcera antarctica*, *Stephos longipes*, harpacticoids) のうち、*S. longipes*, harpacticoids の 2 種が沖合で採集した本研究の海氷中に多量に存在していることを確認した。このことは海氷の流動が沿岸から沖へとこれらの群集を輸送していることを意味する。一方、水中に放出された個体は時間（水温の上昇）とともに速やかに減少し (図 1)、特に遊泳力の無い harpacticoids のノープリウス幼生で減少が顕著であった。このことから海氷により沿岸から沖へ輸送された海氷性カイアシ類は、海氷融解後比較的速やかに捕食を受けることで外洋の食物網に寄与していることが推察された。

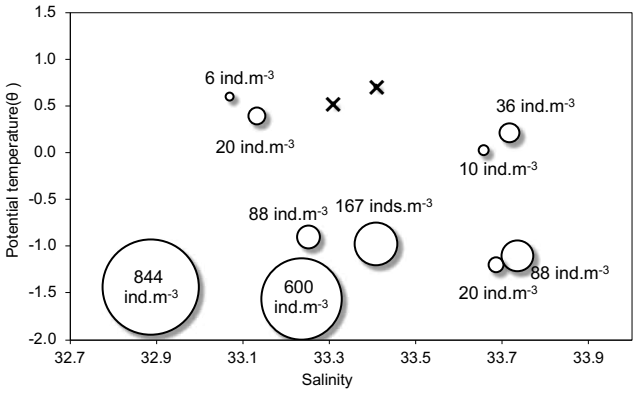


図 1.　表層水柱における海氷性カイアシ類ノープリウス幼生の現存量と水温・塩分との関係.

2.2. 海氷融解のタイミングと動物プランクトン群集の発育

季節海氷域に生息する動物プランクトンの多くは海氷融解に伴って生じる氷縁ブルームを有効に利用する生活史戦略を有しているため、海氷融解のタイミングは彼らの再生産や初期発育に大きな影響を及ぼす。例えば昭和基地沖の海域ではローカルに形成される時計回りの渦により、海氷融解のタイミングは西で遅く、その結果、同緯度であっても動物プランクトンの発育の進行は渦の西側で数週間の遅れが発生していた (Makabe et al., 2017). 我々が対象としてきたウィルクスランド沖においてはビンセネス湾沖に同様の渦構造（ビンセネス渦）が見られる他、その東西にも複数の定在渦が存在しており (Mizobata et al., 2020)、昭和基地沖と同様に海氷融解の東西差に伴って動物プランクトン発育の進行において東西差が生じると予想される。

2017 年 1 月にビンセネス渦の東西および南北を横切る観測ラインを設定し、動物プランクトン群集の定量採集を実施した。数的に優占する小型カイアシ類（*Ctenocalanus citer*）の発育段階組成を見ると、渦の北側および東側では再生産後に若いコペポダイト幼生が成長し、同種の群集中で優占していた (図 2)。一方、海氷融解が遅い南側および西側では後期コペポダイト、とりわけ成体が優占しており、若いコペポダイト期の加入が認められなかったことから、再生産進行中であったことが推察された。このような定在渦の存在に伴う東西の環境傾斜とそれに対する動物プランクトンの応答はインド洋セ

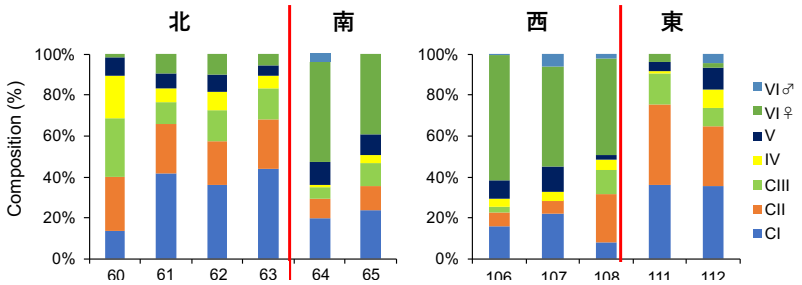


図 2.　2017 年 1 月の 110°E および 63.5°S ライン上の観測点におけるカイアシ類 *Ctenocalanus citer* の発育段階組成.

クターに広く生じていることが予想される。低在渦の存在は、その東側を南下する流れにより、沿岸域に暖水を輸送する観点から注目を集めているが、渦の西側で生じる海氷および低温の沿岸水の北上は季節海氷域沖側の生物活動に大きな影響を与えているはずである。このようなローカルな環境傾斜に留意した生態学的研究が今後の課題として重要である。

2.3. 元素分析、安定同位体比測定および DNA 分析を可能とする固定液の選定

（プレスリリース：海洋生物試料の固定・保存におけるルゴール液の汎用性を確認～遺伝子解析・安定同位体比分析・形態観察に有効～, 国立極地研究所, 創価大学, 東京海洋大学, 2020 年 12 月 24 日）

Sano, M., Makabe, R., Kurosawa, N., Moteki, M., Odate, T. (2020) Effects of Lugol's iodine on long-term preservation of marine plankton samples for molecular and stable carbon and nitrogen isotope analyses. Limnol. Oceanogr.: Methods, doi: 10.1002/lom3.10390

フィールド採集を行う生物学、とりわけ現場での分析が困難な南大洋では、試料を凍結保存や試薬による固定・保存が必要である。特にプランクトン試料には脆弱なものが多く、採集した後に現場で速やかに保存のための処理を行うことが必須となる。最適な固定・保存方法はその後に行う分析の手法よって異なり、例えば海洋生態系研究の分野では、形態観察であればホルマリンやグルタルアルデヒドなど、遺伝子解析であればエタノールや凍結保存など、安定同位体比分析などの化学分析であれば凍結保存などの固定・保存方法が用いられてきた。しかし、それぞれの方法に利点と欠点があるため、現場で試料を分割して各目的のための保存を行う必要があり、さらにそれができない場合には、分析の一部を断念せざるを得ない状況であった。我々は多様な分析に対応可能な固定液として顕微鏡による形態観察で実績があるルゴール液の DNA および炭素・窒素安定同位体比分析への影響を検討した。

試料には房総沖で採取された動物プランクトンサンプルを使用し、経時的にサブサンプルを取得してそれぞれの分析に供した。凍結保存試料と 10%ルゴール液で保存した試料の間で大きな差が見られないことが分かる。ほかの 2 種のプランクトンにおいても、凍結保存試料と 10%ルゴール液試料の値に有意差はなかった (図 2)。また、保存期間 18 ヶ月後の試料について抽出した DNA を元に 18S rRNA 遺伝子 V1 V2 領域を対象に PCR した結果 10%ルゴール液では凍結試料と同様に良好な増幅が認められた。

以上から、10%中性ルゴール液は生物試料の形態学的分析のみでなく、炭素・窒素安定同位体比、および DNA 分析に有用な固定液であることが分かった。

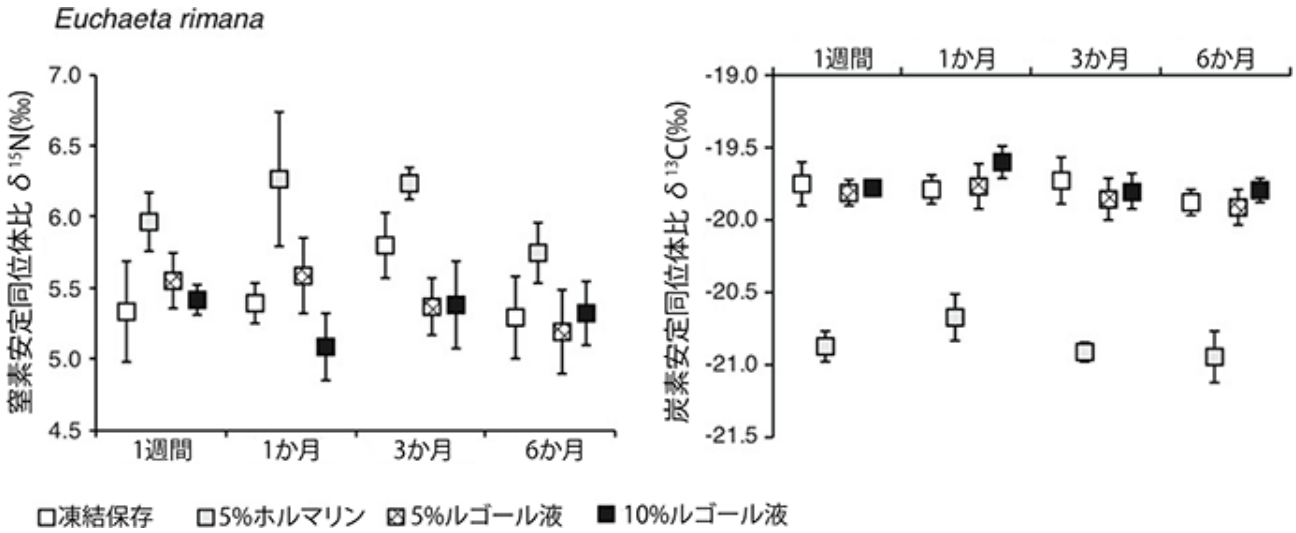


図 2.　動物プランクトン *Euchaeta rimana* の窒素・炭素安定同位体比の変化（平均値±標準偏差）．左側が窒素安定同位体比，右側が炭素安定同位体比の値．縦軸は安定同位体比，横軸は各保存期間を示す．

2.4. 耐氷型 GPS ブイを用いた海氷融解期の時系列観測

背景に記したように、南大洋季節海氷域における表層生態系の時系列観測は氷山の存在により係留系を

表層まで立ち上げることや、砕氷船を長期間同一海域に留めることが困難であることからほとんど実施されて来なかった。我々は耐氷型 GPS ブイを開発し、これを用いた漂流系観測を実施することで、季節海氷域、特に海氷融解初期からの時系列観測を達成した。2017 年 12 月にしらせから投入したプロトタイプは海氷に挟まれたことで、GPS ブイフレームが損傷し、吊下していた測器を失う結果になったが、この経験を生かして再設計を図った。2019 年には改良した GPS ブイを用いた新たな漂流系 (図 3) を 12 月に海氷密接度がほぼ 100%の環境に投入し、翌 2 月に全ての測器を無傷で回収することが出来た。系には深度 1, 10, 20, 30, 40 m に表層環境およびクロロフィルの相対変化を調べるためのセンサー群を設置した他、60 m, 150 m に沈降粒子を採集するための時系列セジメントトラップを、70 m には表層の流速と動物プラクトンの鉛直分布を捉えるための ADCP を設置した。

計 5 層に設置した深度センサーのデータは観測期間中に系が安定していたことを示しており、良好な観測データが得られていたことを意味している。海氷融解に伴う淡水供給は塩分の変動から読み取れるが、急速に海氷密接度が減少した期間の前にも複数回の塩分低下イベントが確認されており、海氷底面からの融解が生じていたと考えられた。クロロフィル蛍光は海氷密接の低下とともに深度 20 m にピークが見られた後に 30 m へと推移したが、ピークが見られた深度は有光層より深く、その深度での生産よりは躍層への植物細胞の蓄積による可能性が高い。動物プランクトンの鉛直分布は海氷融解後 10 日程度までは明瞭な日周鉛直移動を示さず、クロロフィル蛍光のピークの推移とともに分布層が深くなる蛍光が認められた。沈降粒子中の原生生物の分類群組成は海氷密接度が減少する期間に最も海氷中群集組成と類似しており、海氷から放出された群集が表層での生産を介してエクスポートフラックに寄与していることが推察された。

図 3. しらせから海氷域に投入された漂流系.

以上のように多項目に渡って詳細な時系列データ取得可能になったことは、海氷融解を起点に変動する表層環境と生物ポンプの動態解明への大きな前進と言える。今後は時系列採水器を導入し、表層水柱の生物・化学的データ取得をすることで、海氷―水柱―下層への輸送の量的な関係を推定可能とすることが求められる。

2.5. 季節海氷域に生息する動物プランクトン群集の海氷由来有機物への依存

南大洋ではナンキョクオキアミを鍵種とするシンプルな食物網が良く知られている。しかし、ナンキョクオキアミの分布は周極的に一様ではなく、ナンキョクオキアミ現存量の比較的大きな南極半島周辺海域でさえ、ナンキョクオキアミに依存しない食物網の存在が報告されている (Murphy et al., 2007)。日本の南極観測が対象とするインド洋区ではナンキョクオキアミの分布域が季節海氷域の南側に限られており、その沖側の海域ではナンキョクオキアミ以外が生産者と高次捕食者を繋ぐ役割を果たしていると考えられている (Moteki et al., 2017)。そこで我々は東経 110 度ラインを中心とした観測点において様々なネットを用いて採集した動物プランクトンの炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$)の分析を行い、当該海域の食物網構造の把握に取り組んだ。食物網の起点となる生産者の安定同位体比は通常植物プランクトンを主体とした懸濁粒子 (POM) の値を用いることが多いが、季節海氷域では海氷中の POM および沈降粒子中の POM も一次消費者の餌となりうるという観点から、これら 3 つの安定同位体比も測定することで、餌起源を検討しつつ、海氷中 POM への依存度を評価した。

食物網のベースラインとして重要な表層懸濁物中の $\delta^{13}C$ は植物プランクトンが利用する CO_2 の同位体比に影響を受ける。また、表層水中に溶存する CO_2 の安定同位体比は大気とのガス交換の際に生じる同位体分別が温度の影響を受けることから、水温の低下とともに低くなることが知られている。本研

究で得られた表層懸濁粒子の $\delta^{13}C$ と水温をプロットすると、約 2°C まではこのような直線関係が得られたが、それ以下の温度では $\delta^{13}C$ が高い方にバラついていた (図 4 左)。これは海氷中でアイスアルジーによって生産された有機物の $\delta^{13}C$ が高く、それが海氷融解とともに水中に放出されていることを意味している。我々が動物プランクトン等の採集を実施した観測点の表層水温は 0–2°C の範囲にあったことから、ここでの動物プランクトン等の炭素・窒素安定同位体比は海氷起源有機物の影響を受けていることが想定される。実際にその一例として餌粒子と動物プランクトンの炭素・窒素安定同位体比をプロットすると、多くの動物は 10–40 m の懸濁粒子および海氷を起点とした 2 つの直線の間に位置することが確認された。また、懸濁粒子食のカイアシ類の多くは懸濁粒子側に位置していたが、より大型の動物プランクトンは海氷よりに位置する傾向があった。この観測点では海氷融解から約 1 ヶ月が経過しており、そのために小型の動物ほど同位体比のターンオーバーが短いことがこの傾向を生み出していたと推察される。

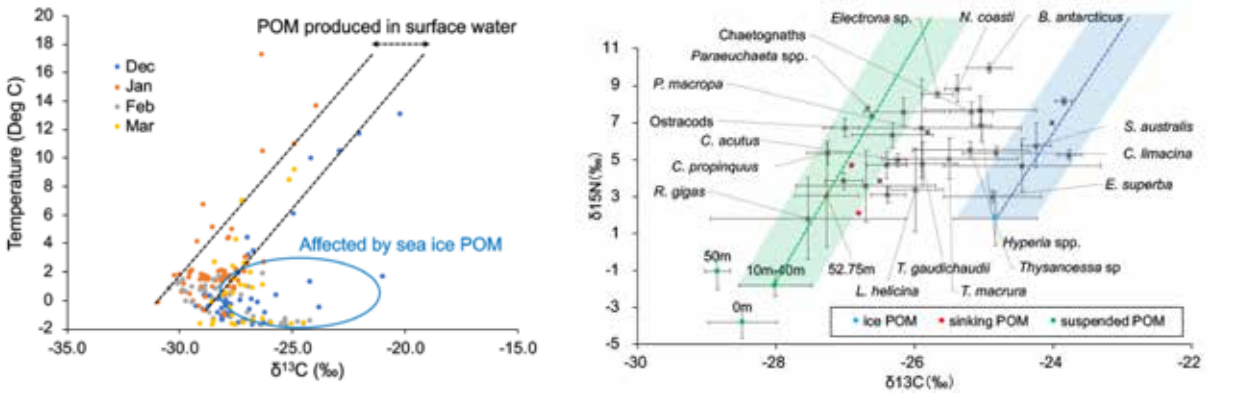


図 4.　インド洋区表層における水温と懸濁粒子の炭素安定同位体比(左), および 2017 年 1 月に 63.5°S, 110°E で採集された動物プランクトン, 仔稚魚期魚類および餌起源有機物の炭素・窒素安定同位体比 (右). 海氷は同海域の氷縁 (65°S 近傍) で採取した.

2.6. インド洋区における浮氷が含有する生物・有機物量とその含蓄

海氷はアイスアルジーのみならず、様々な生物や物質を含有している (例えば Dumont et al., 2009; Arrigo et al., 2014)。海氷融解時にはこれらが水柱に放出されることで、氷縁ブルームの発生をもたらす。また、藻類以外の生物や非生物有機物が多量に含まれており、これらは長く厳しい冬を越した消費者群集の餌として機能することは想像に難くない。一方でこれまでに報告されてきた海氷のほとんどは、しっかりとした氷盤のコアを採取したものであり、氷縁域に存在する融解直前の比較的小さな海氷については著しく報告が少ない。

我々は 2016 年 1 月から南大洋インド洋区の様々なエリアにおいて、主に融解期に存在する比較的小さな海氷を採取し、その粒状有機炭素 (POC)、および窒素 (PON) の分析を実施した。海氷中のクロロフィル *a* 濃度は<0.1–298.9 mg m^{-3} の範囲であり、その標準偏差は平均値 (17.1 mg m^{-3})の 242%と大きな変動を示した (図 5 左)。これに対して POC は 246.1–6365.3 mg C m^{-3} の範囲であり、標準偏差は平均値 (1368.0 mg C m^{-3}) の 74%とクロロフィル *a* と比べて変動は小さかった (図 5 左)。最小値もクロロフィル *a* では検出限界以下の海氷が確認された一方、POC では比較的大きな値であった。クロロフィル *a* と POC をプロットしてみると、クロロフィル *a* では 4 桁ほどの変動が見られたが、クロロフィル *a* が低い場合にも POC は安定して高いことが明らかである (図 5 右)。これらのことから海氷中の粒状有機炭素はアイスアルジーを主体とする場合（C/Chl 比が 50 近いもの）も存在するが、その多くはアイスアルジーが主体ではないと考えられる。C/N 比は甲殻類などの動物で 4, 珪藻で 6–8 となることが一般的であり、海氷中で見られた平均値 (14.1±5.8) がこれらと比べて高かったため、POC はある程度分解が進んだ有機デトリタスの貢献が大きいと考えられる。このような有機デトリタスは海氷生成時に取り込まれた再懸濁粒子、または海氷中で増殖した後に死亡したアイスアルジーの蓄積が考えられる。今後

は生物学的な分析による知見の蓄積を進めることで高い POC の起源を推定する必要がある。また、海氷融解期に水柱へ放出された後に、これらがどのような行方をたどるかを調べることが季節海氷域における物質循環像を把握する上で重要な課題となるだろう。

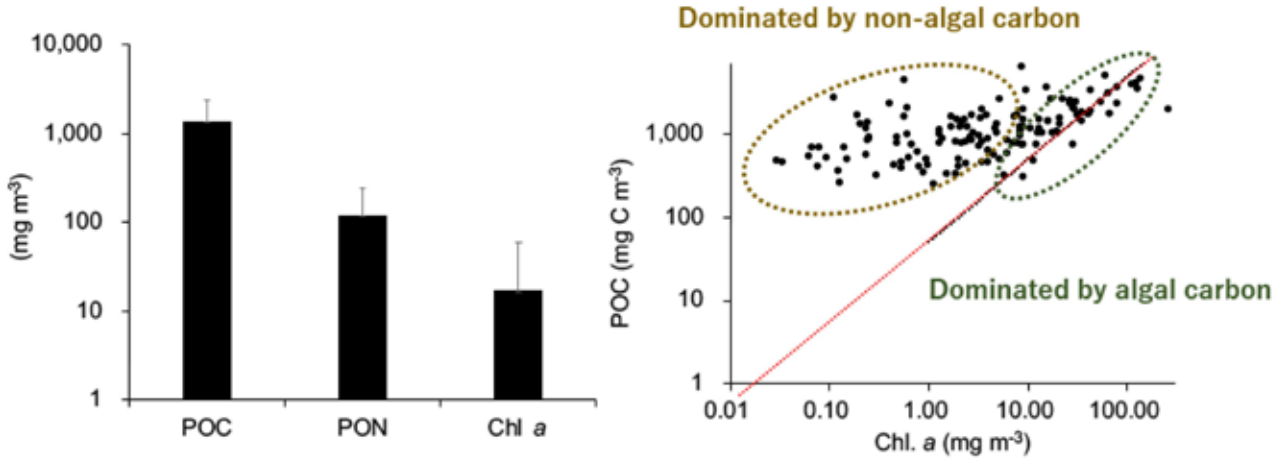


図 5.　南大洋インド洋区で採集された海氷中の懸濁態有機炭素 (POC)・窒素 (PON), クロロフィル a (Chl. *a*) 濃度 の平均値 (左), および海氷中 Chl. *a* と POC の関係 (右). エラーバーは標準偏差を, 赤の点線は C/Chl 比 =50 を、示す.

3. 引用文献

Arrigo, KR, Brown, ZW, Mills, MM (2014) Sea ice algal biomass and physiology in the Amundsen Sea, Antarctica. Elem Sci Anth. 2014; 2: 000028

Dumont I, Schoemann, V, Lannuzel, D, Chou, L, Tison, J-L, Becquevort, S (2009) Distribution and characterization of dissolved and particulate organic matter in Antarctic pack ice. Polar Biol, 32:733-750

El-Sayed, SZ, Taguchi, S (1981) Primary production and standing crop of phytoplankton along the ice-edge in the Weddell Sea. Deep Sea Res A 28(9):1017–1032

Fitch, DT, Moore, JK (2007) Wind speed influence on phytoplankton bloom dynamics in the Southern Ocean Marginal Ice Zone. J Geophys Res: Oceans 112 C08006

Garrison, DL, Buck, KR (1985) Sea-ice algal communities in the Weddell Sea: species composition in ice and plankton assemblages. In Christiansen ME (ed.) Marine Biology of Polar Regions and Effects of Stress on Marine Organisms. John Wiley, New York, pp 103–122Conover and Huntley, 1991

Makabe, R., Hasegawa, T., Sano, M., Kashiwase, H., Moteki, M. (2022) Copepod assemblages in the water column and drifting sea-ice floes in the ice-edge region in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the austral summer. Polar Biol, 45: 749-762.

Mizobata, K., Shimada, K., Aoki, S., & Kitade, Y. (2020). The cyclonic eddy train in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean as revealed by satellite radar altimeters and in situ measurements. J Geophys Res: Oceans, 125, e2019JC015994

Moteki M, Fujii K, Amakasu K, Shimada K, Tanimura A, Odate T (2017) Distributions of larval and juvenile/adult stages of the Antarctic myctophid fish, Electrona antarctica, off Wilkes Land in East Antarctica. Polar Sci 12:99–108

Murphy, E. J., Watkins, J. L., Trathan, P. N., Reid, K., Meredith, M. P., Thorpe, S. E., et al. (2007). Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web. Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. 362, 113–148. doi: 10.1098/rstb.2006.1957

Parkinson, CL, Cavalieri, DJ (2012) Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. Cryosphere 6:871–880

Takahashi, K.D., Makabe, R., Takao, S., Kashiwase, H., Moteki, M. (2022) Phytoplankton and ice-algal communities in the seasonal ice zone during January (Southern Ocean, Indian sector). J. Oceanogr, 78: 409–424.

海氷下の食物網構造

茂木正人 [1,2]
[1]東京海洋大学，[2]国立極地研究所

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用（生態系班）（代表：茂木正人）

１．研究の背景

南大洋では，ナンキョクオキアミ *Euphausia superba* が単一種で4億トン程度の生物量を持つとされ，鯨類，鰭脚類，ペンギン類，飛翔性海鳥類など多くの大型動物の餌として重要である．一方で，季節的あるいは地理的に *E. superba* の少ない条件においては，カイアシ類や単脚類，ハダカイワシ類が２次あるいは３次生産者として食物網の主要な構成要素となっている．*E. superba* の全生物量の約 70%がスコシア海や南極半島を含む 0˚から 90˚E の南大洋の 25%の海域に集中していることから，インド洋セクターでは，相対的にハダカイワシ類が高次捕食者の餌生物として重要であると考えられる（茂木他，2018）．生態系班では，高次捕食者としてハシボソミズナギドリに着目し，彼らが *E. superba* とともにハダカイワシ類を捕食していることを示唆する結果を得ている（本成果集の綿貫他を参照）．

南大洋の生態系を特徴づける要素として Ice algae があげられる．Ice algae は海氷下面に付着・繁茂したり海氷内部に分布する珪藻類を主とする微小植物群である．この Ice algae は，海洋生態系における基礎生産を担う植物プランクトンとは別に，春季から夏季にわたって海氷融解とともに水柱に供給される．この海氷からの Ice algae の放出は，季節的な海氷の消長を考慮すれば，その規模は莫大であるばかりでなく，Ice edge bloom の供給元となる可能性も示唆されている．この Ice algae の生態系に及ぼす影響については特に沿岸域で研究されてきたが，氷縁付近の Marginal Ice Zone（MIZ）においてはあまり検討されてこなかった．海氷中には，植物ばかりでなく微小動物も生息しており，植物と合わせて Sea Ice Biota (SIB)とよばれる．これら微小動物についても研究対象海域の偏りは植物と同様である．そこで生態系班では，MIZ における SIB の組成や動態について明らかにすることを目的のひとつとし，各地から採取した海氷中の生物組成を調査し，海氷中の植物組成が季節と共に変化することや動物組成が海氷の履歴によって異なる可能性などが示唆された（Ojima et al. 2017; Takahashi et al. 2022）．また，海氷中のカイアシ類組成と海氷の周辺の水柱から得られたサンプルの比較から，ノープリウスが海氷融解にともなって水柱に放出されたあと，速やかに水柱の表層から消失していることが分かった．このことから彼らが水柱で捕食されるか，コペポダイト期にすぐに発育した可能性を示している（Makabe et al. 2022）．

本稿では，水柱の POM（基礎生産）と海氷中の POM で炭素安定同位体が異なることを利用して，1) 様々な生物群がどの程度海氷中の POM に依存しているかについて行われた研究，2) ハダカイワシ仔魚の食性について，光学・電子顕微鏡で観察した研究，3) 単脚類の食性について光学顕微鏡で観察した研究，4) DNA メタバーコーディングを用いて中深層性魚類・頭足類の胃内容物分析を行った研究について紹介する．

２．成果

２－１．インド洋セクターにおける食段階構造―安定同位体分析から―

研究は，山本あゆによる修士論文（2020 年 3 月）「南大洋インド洋区における食物網ベースラインの特徴と食段階構造」として行われた．各種の粒状有機物および動物プランクトン・仔魚は 2016 年 12 月 31 日から 2017 年 1 月 27 日に行われた第 20 次海鷹丸南極観測航海、2019 年 1 月 2 日から 2019 年 1 月 28 日に第 22 次同航海、第 58 次日本南極観測のしらせ航海で得た。各種サンプルは、－60 度以下で凍結保存して持ち帰り、適宜処理を行った後に、炭素と窒素の安定同位体比を測定した。

本研究で得られた海氷中 POM の δ^{13}C、δ^{15} N は同緯度の海水中 POM と比べ高い δ^{13}C、δ^{15} N

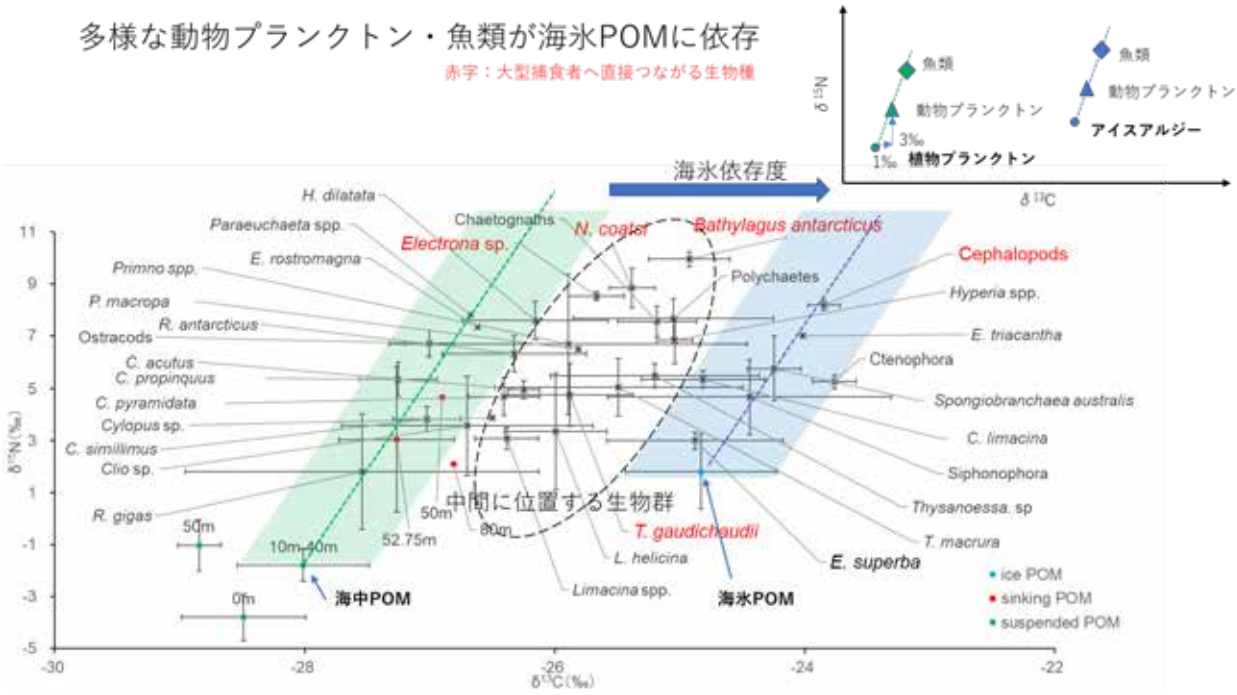


図１．様々な動物プランクトン，魚類，頭足類の窒素・炭素安定同位体比のプロット．緑線が海中の POM を起点とするエネルギーの流れ，青線は海氷中の POM を起点とするエネルギーの流れを示す．その間に位置する生物群は依存度は様々だが，海氷 POM を起点とするエネルギーフローに依存することを示す．

を示した。海氷由来の粒状有機物、つまり Ice algae の $\delta^{13}C$ の値は水柱中のそれと比べて高い値をとることが報告されている。これらベースラインとなる POM と各種の動物プランクトン，魚類・頭足類の炭素・窒素の同位体比をマッピングしたところ，各生物は海中の POM を起点とする食物網と海氷中の POM を起点とする食物網のそれぞれを構成する生物群，そしてその中間に位置する生物群に分けられた（図１）．海中の POM を起点とする食物網を構成する生物群には主要なカイアシ類などが含まれ，海氷起源の POM に依存する生物群にはナンキョクオキアミ *Euphausia superba* の他，*E. triacantha*, *Clione limacina*（翼足類），頭足類などが含まれた．中間に位置する生物群を含めると，季節海氷域に生息する非常に多くの分類群が，種ごとに差はあるものの海氷中で生産される有機物（Ice algae）に依存していることが示された．

２－２．*Electrona antarctica*（ハダカイワシ科魚類）仔魚の食性

ハダカイワシ科魚類はナンキョクオキアミとともに，南大洋の食物網を構成する重要な種のひとつである，中でも *Electrona antarctica* は最も個体数が多い種と考えられている．本研究は本種の仔魚について食性を明らかにすることにより，初期生活史の一端を明らかにすることを目的とした（Nirazuka et al. 2021）．本研究には 2017 年 1 月に Wilkes Land 沖で採集された仔魚（体長 5.0-11.9 mm）を用いた．胃内容物の観察には光学顕微鏡と電子顕微鏡を用いた．

仔魚は，主に珪藻の殻や珪藻の断片から構成される凝集体を摂食していた．これらの凝集体の 29% に尾虫類のハウスが含まれていた．これらのことから，*E. antarctica* の仔魚が植物プランクトンの凝集体や沈降粒子などを摂餌し，仔魚期には動物プランクトンをほとんど摂餌していないことが分かった（図２）．

２－３．南大洋ビンセネス湾沖（インド洋セクター）における端脚類 *Themisto gaudichaudii* の食性

本研究は，松下隼士による修士論文（2020 年 3 月）として行われた．浮遊性端脚類 *Themisto gaudichaudii* は、南大洋の高緯度海域から亜南極域にかけて広く分布するマクロ動物プランクトンである。本種は多様な動物プランクトンを摂餌する肉食者である一方、高次捕食者から捕食されるため、

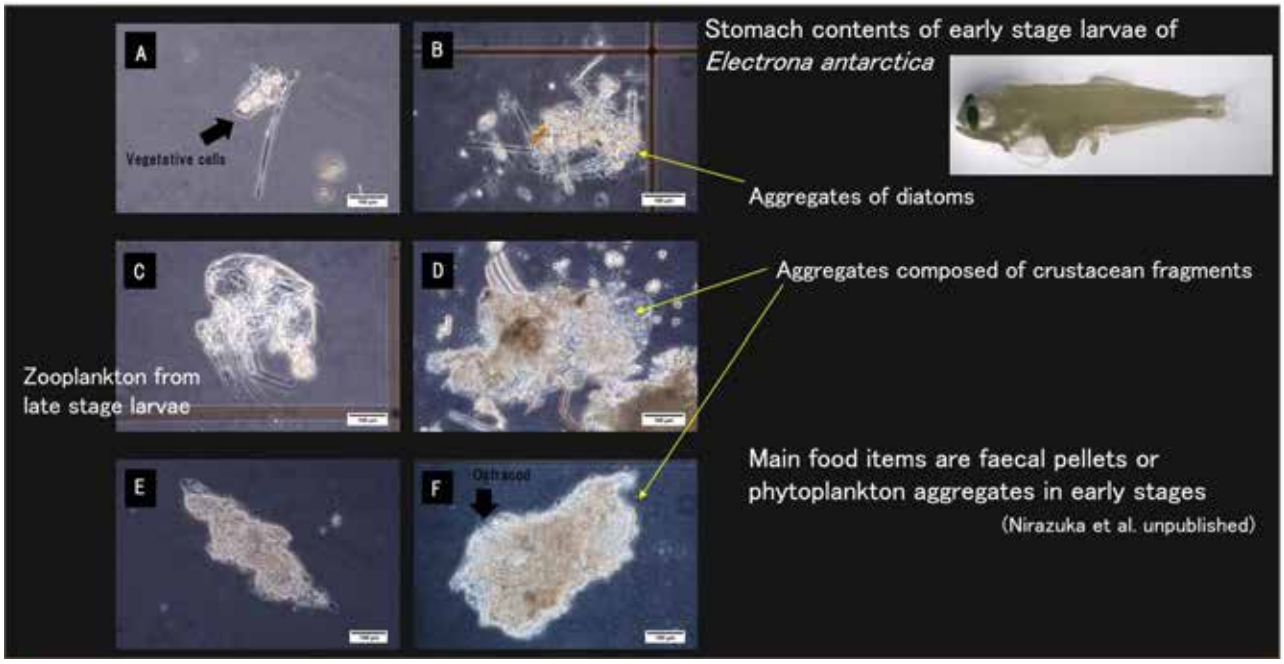


図２． *Electrona antarctica* 仔魚の胃内容物の顕微鏡写真．発育の進んだ仔魚からは動物プランクトンが見られるが（c），発育初期には糞粒様あるいは凝集体が主要な内容物で，動物プランクトン断片や珪藻類が主要な構成要素となっていた(A, B, D-F).

食物網をつなぐ役割を持つ。しかし、本種の摂餌生態に関する研究は、西南極やケルゲレン諸島周辺海域に集中しており、インド洋セクター（東南極）における知見は不足している。本研究では、南大洋インド洋セクターにおいて採集された *T. gaudichaudii* の消化管内容物および飼育により採取された糞粒を解析し、夏季の食性を明らかにすることを目的とした。

研究試料は第 22 次海鷹丸南極海航海（2019 年 1 月）において、南大洋ビンセネス湾沖西経 110 度ラインに沿った 2 観測点において採集され、消化管および糞粒の内容物を分析した。消化管内容物と糞粒内容物から動物プランクトンや珪藻類、不定形組織が観察された。両観測点での消化管内容物中の餌生物は出現頻度が異なった。珪藻類は破損のない外観を保った細胞が観察され、全細胞数のうち破損していた細胞の割合は 2%未満であった。

T. gaudichaudii は、口器の形態から珪藻類を含む懸濁粒子を直接摂餌することができないと考えられている。したがって、消化管内容物中の珪藻類は、懸濁物摂食者を摂餌したことにより二次的に取り込まれたか、懸濁物摂食者の糞粒や珪藻類を含んだ凝集体を摂餌した可能性が考えられた。また、珪藻類の細胞の破損率が低いことから、*T. gaudichaudii* に捕食された懸濁物摂食者は珪藻殻を破砕しない動物プランクトンと推定された。

本研究により、南大洋インド洋セクターにおいて *T. gaudichaudii* が、夏季に動物プランクトンを摂餌する肉食性であることが明らかになった。また、*T. gaudichaudii* が珪藻類を破砕しない濾過摂餌者や、その糞粒もしくは凝集体を摂餌する可能性を示した（図３）。

２－４．南大洋における中深層性魚類・イカ類の発育初期の食性－DNA メタバーコーディングを用いた解析から

南大洋生態系の高次捕食者である中深層性の魚類・イカ類は，夏季に仔魚・稚仔が 400 m 以浅に出現するが，稚魚・幼体への変態に伴い分布を中深層に移行させる個体発生的鉛直移動を行う．しかし，この大きな形態変化を伴う時期の食性については知見が乏しい．本研究では，南大洋季節海氷域における優占種である *Notolepis coatsi*（ハダカエソ科），*Bathylagus antarcticus*（ソコイワシ科）と *Galiteuthis glacialis*（サメハダホウズキイカ科）の発育初期における摂餌生態を明らかにすることを目的として，胃内容物を DNA メタバーコーディングによって解析した．

試料は，2020 年 1 月に 110ºE の 3 点（61º – 65ºS）から，MOHT とリングネットを用いて採集した．

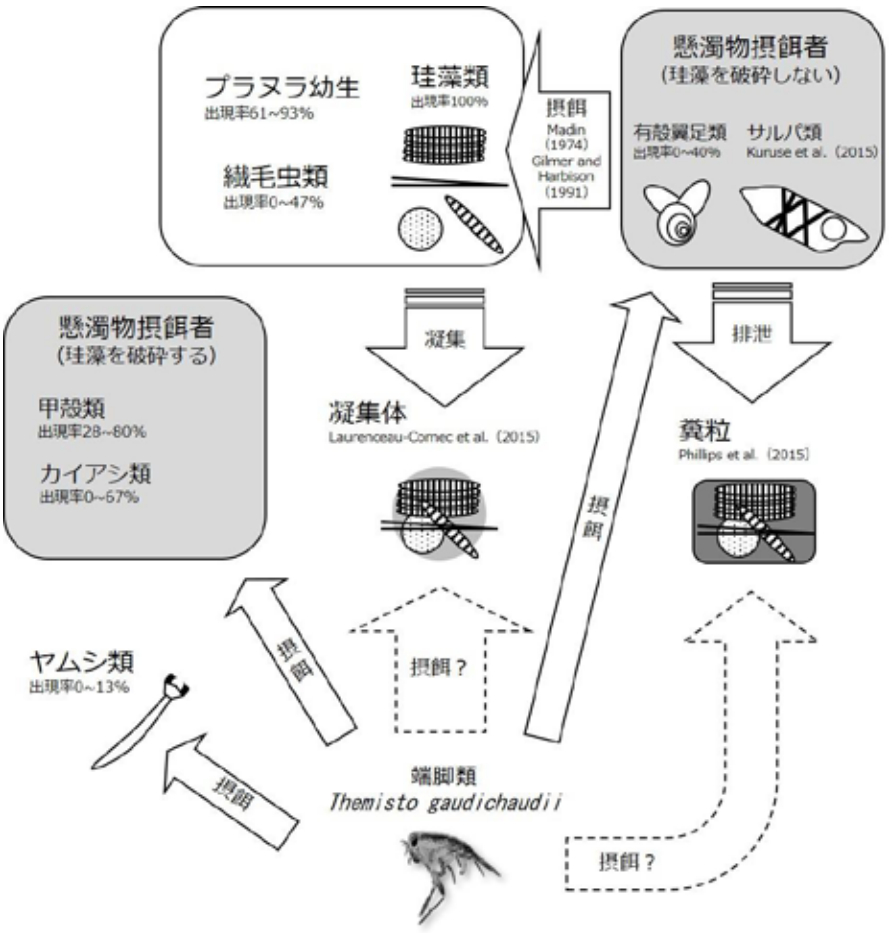


図３．*Themisto gaudichaudii* の食性の概念図．本研究の結果と既往の知見に基づき構成した．実線矢印は、本研究および既往の研究に基づく生物学的事象（摂餌、凝集、排泄）を、点線矢印は本研究の結果から推定された摂餌圧の方向を示す．

胃内容物は顕微鏡観察後，DNA を抽出し，*N. coasti* (*n* = 20, 27.9 – 76.0 mm BL, body length)ではミトコンドリア COI 領域，*B. antarcticus* (*n* = 33, 14.1 – 154.7 mm BL)と *G. glacialis* (*n* = 31, 5.5 – 64.2 mm in mantle length)では 18S v9 領域において解析を行った．3 種とも仔魚・稚仔期にはカイアシ類を主要な餌としていたが，それぞれ目レベルで異なる種を主要な餌としていた（図４）．これは，3 種の分布深度のずれや行動様式など生態の違いを反映していると考えられた．また，*G. glacialis* ではクラゲ類や珪藻の出現頻度も高く，沈降粒子なども捕食していることが示唆された．一方で，変態後の稚魚・幼体期では，カイアシ類に加えてオキアミ類・ヤムシ類・クラゲ類などの出現頻度が増加し，胃内容物は多様な分類群で構成されていた．魚類やイカ類の発育初期にはみかけの空胃率が高いことが多いが，本研究では胃内の DNA の痕跡から食性が推定できることが分かった．

２－5．推定された食物網

魚類・頭足類稚仔の胃内容物の観察や動物各種の安定同位体比から南大洋インド洋セクターの季節海氷域における食物網を推定した（図 5）．アイスアルジーのみならず，植物プランクトンによる基礎生産も海氷の影響を受け，それは氷縁ブルームというイベントに現れる．そして，種によってその依存度は異なるが，多かれ少なかれアイスアルジーを起点とするエネルギーの流れに関与している．このことは，海氷の変動が食物網を通して，あるいは沈降粒子の量の変動を通して，表層から深度 500 m くらいまで生息する中深層性の魚類や頭足類の稚仔にまで初期生残に影響を及ぼすことを意味している．この食物網において，沈降粒子が一定の役割をもつことが分かってきた．沈降粒子は珪藻類などが凝集したものの他，クラゲ類や尾虫類のハウスなどが沈降粒子を形成するうえで重要な役目を担っていることが示唆された．表層に生息する中深層性の魚類や頭足類の稚仔は，１～２年後には成長に伴って生息深度を中深層に変えることから，表層での初期生残の変動は，中深層の生態系に及ぶこととなる．さらに南大洋で魚類やイカ類を捕食した大型動物の多くは，鳥類や鯨類，鰭脚類といった内温動物で，彼らはいずれも長距離を比較的短期間で移動する．

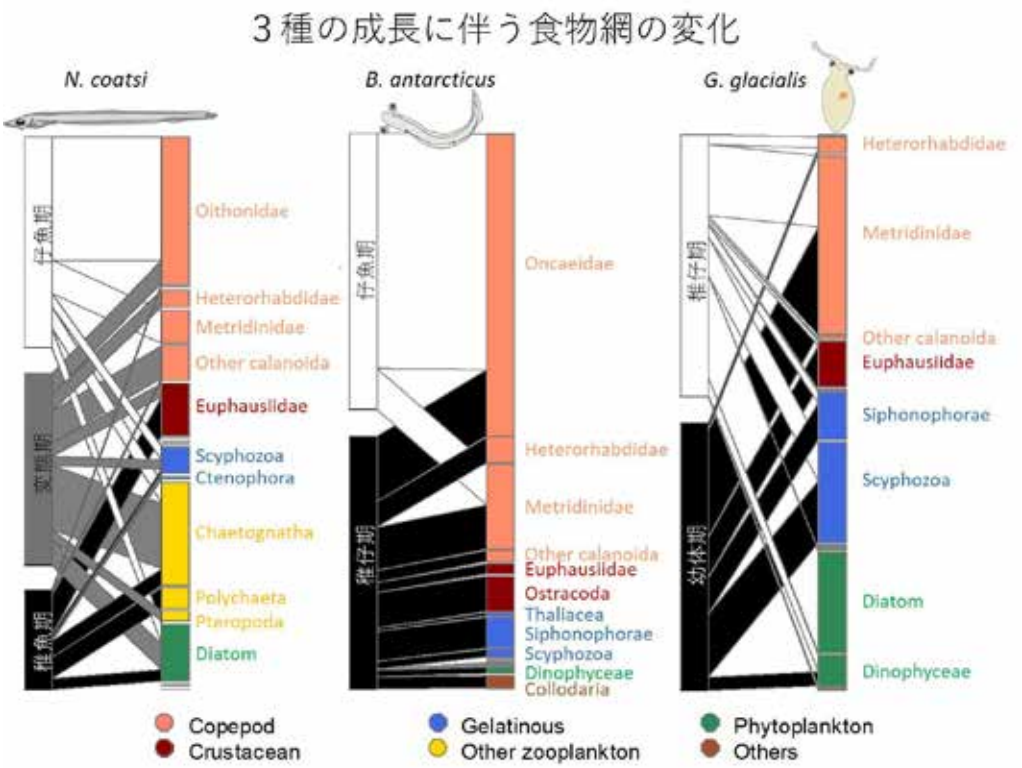


図4. 中深層性魚類（*Notolepis coatsi*, *Bathylagus antarcticus*）と中深層性頭足類（*Galiteuthis glacialis*）の食性．仔魚期（稚仔期）から稚魚（幼体期）に発育する過程で餌生物の組成が変化する．

南半球の夏期に我々の観測海域に見られるミナミザトウクジラの個体群は，餌をナンキョクオキアミに高度に依存している．そして，秋にはオーストラリア西方の海域に移動し，春季にかけて摂餌をせずに出産と子育てをする．また，ハシボソミズナギドリは，世界で最も個体数の多い海鳥類のひとつであるが，南大洋でナンキョクオキアミやハダカイワシ類を採食し，それをタスマニアなどに形成される営巣地で雛を育てる．若鳥は 5 月頃には北半球に向けて旅立ち，日本列島を経由して北極海にまでたどり着き，9月頃には再びタスマニアに向け旅立つという，大規模な移動を行う．ミズナギドリ類の中ではこのような渡りをする種は他にもハイイロミズナギドリなどがいることから，このような移動を行う鳥類の全体の生物量としては莫大と言ってよいだろう．このことは南大洋で起こっている気候変動や海氷変動は，早ければ2年程度で北半球にまで波及する可能性を示唆する．

南極海ではナンキョクオキアミの現存量が小さくなる傾向が認められており，ナンキョクオキアミに餌を依存するミナミザトウクジラの餌も変化することが想定されるが，実際にはまだその兆候は見られない．これは一定程度生態系の復元性の機能を示すものと思われるが，繁殖成功率や肥満度，成熟年齢などの変化についてもモニタリングが必要であろう．

3．その他

海洋生態系の研究がカバーする領域は広く，物質循環，植物・動物プランクトン，魚類・頭足類から海鳥類や鯨類まで研究対象に含まれる．さらに極域では海氷もその対象となる．生態系班では，上にあげたすべての分野をカバーするメンバーで構成され，顕微鏡を用いた古典的な観察から，安定同位体分析，DNA 分析，バイオロギングといった比較的新しく，かつ実績もある手法を用い，大型プロジェクトならではの包括的な成果が得られた．また，漂流系観測は「しらせ」と海鷹丸の連携も実現した．他班との連携の発展は，プロジェクト後半でさらに進んだが，これは生態系班内での研究の進展に伴って理解や課題が深まることによって，海洋物理や化学の領域との連携の必要性が認識され明確になってきたためと考えられる．また，プロジェクトの後半で海外との共同研究に発展した部分もあり，この連携は今後も発展すると思われる（Woods et al. 2022; Groß et al. 投稿中）．

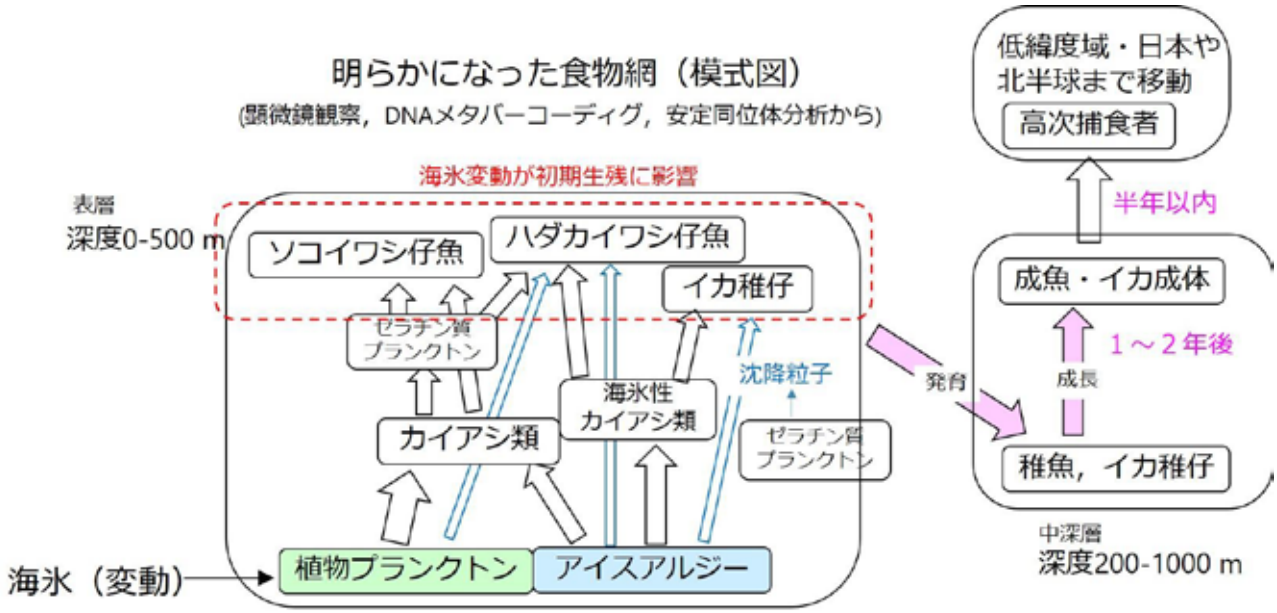


図 5. 本研究で推定された南大洋インド洋セクター海氷域の食物網の概念図.

新学術領域研究の大きな目的の一つは若手の育成であった．この点について，領域の枠組みの中での海外派遣プログラムや若手研究会が運営され，一定の成果を上げたと思われる．生態系班でも国内外での研究発表に力を注ぎ，大学院生らに貴重な経験を積ませることができた．若手育成は科学の継続性を担保するうえで重要な意味を持つことは言うまでもなく，大型プロジェクトを遂行する上でもっと重要視されてよいであろう．ここでいう若手育成は若手研究者育成とほぼ同義語になっていなかっただろうか．しかし，学部教育から関与する大学ではほとんどの学生が将来研究者を志望していない現実がある．研究領域のすそ野を広げるためには学部からの教育は必須と思われる． 学部のカリキュラムでは，南大洋生態学や南極海洋学といった特化した講義は適切ではない．しかし，南大洋が地球システム全体の重要な歯車のひとつと位置づけることによって，学部教育に組み込むことができるだろう．一方で，生態学は比較的身近な学問として，一般に受け入れられやすいと思われ，一般から小学生まで講演やワークショップ開催の要望が多く寄せられた．分野横断的な本プロジェクトは，生態系や生物の視点のみならず地球レベルでの課題について我々の中での整理・理解に役立ったはずである．

プロジェクトの終盤にコロナ禍に入ってしまったのは大きな痛手だった．2020 年度と 2021 年度は観測航海が実施されず，2022 年度に予算を繰り越したものの，2022 年度もシップタイムが大幅に削減されることになった．この間，過去のデータやサンプルの分析を進めたものの，一時的には外部の研究施設が使えないばかりか，研究室へのアクセスさえも制限された．言うまでもないが，研究の継続性を担保することは大学院生の教育面でも重要だが，それがいったん途絶えてしまった．フィールドサイエンスにおいて，フィールドを見たことが無い学生を出してしまったことは痛恨である．東京海洋大学海鷹丸では，これまで安定的に南大洋航海が行われてきたが，国による予算の削減や燃油の高騰，円安などの航海の継続を阻む要素は改善される兆しが今のところ見当たらない．本プロジェクトで得られた成果や構築された体制を発展・継続させていくためには，外国も含めて他の船を利用するか海洋観測の頻度を減らすなどの抜本的な改革を行う時期に来ているのかもしれない．

これまで多数の大学院生に南大洋の研究に携わっていただいたことは，修士論文として残されています．なかなか力が及ばずまだ多くが世に出されていません．これから少しずつにはなりますが，出版の努力をしていく所存です．研究室の学生諸氏に感謝いたします．

引用文献

Makabe R, Hasegawa T, Sano M, Kashiwase H, Moteki M (2022) Copepod assemblages in the water column and drifting sea-ice foes in the ice-edge region in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the austral summer. Polar Biol., 45, 749–762

茂木正人，真壁竜介，高尾信太郎 (2018) 南極海洋生態系研究の原状と課題―炭素循環と低次生産の視点から. 低温科学, 76, 71-93

Nirazuka S, Makabe R, Swadling KM, Moteki M (2021) Phyto-detritus feeding by early-stage larvae of *Electrona antarctica* (Myctophidae) off Wilkes Land in the Southern Ocean, austral summer 2017. Polar Biol., 44, 1415-1425

Ojima M, Takahashi KT, Iida T, Moteki M, Miyazaki N, Tanimura A, Odate T (2017) Variability of the fauna within drifting sea ice floes in the seasonal ice zone of the Southern Ocean during the austral summer. Polar Sci., 12, 19-24

Takahashi KD, Makabe R, Takao S, Kashiwase H, Moteki M (2022) Phytoplankton and ice-algal communities in the seasonal ice zone during January (Southern Ocean, Indian sector). J Oceanogr. 78, 409-424

Woods B, Trebilco R, Walters A, Hindell M, Duhamel G, Flores H, Moteki M, Pruvost P, Reiss C, Saunders R, Sutton C, Gan Y-M, Van de Putte A (2022). Myctobase, a circumpolar database of mesopelagic fishes for new insights into deep pelagic prey fields. Sci Data, 9, 404

南大洋における低次生態系変動

高尾信太郎[1]、真壁竜介[2,3]、溝端浩平[3]、山本彬友[4]、岡顕[5]、平譯享[2]

[1]国立環境研究所、[2]国立極地研究所、[3]東京海洋大学、[4]海洋研究開発機構、[5]東京大学大気海洋研究所

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用 (生態系班)（代表：茂木正人）

1. 植物プランクトン現存量の長期変動に関する研究

南大洋 (35 度以南) は二酸化炭素 (CO_2) の主要な吸収源の一つであり、地球規模の炭素循環を考える上でも重要な海域である (例えば、Landschützer et al., 2015; Lenton et al., 2013)。植物プランクトンは光合成により海洋表層の CO_2 分圧を低下させるため、植物プランクトン現存量の変化は大気から海洋への CO_2 吸収の効率にも影響を与えると考えられる。また、低次生態系の起点となる植物プランクトンは温暖化を始めとする気候変動の影響を受けやすいと考えられており、気候変動が低次生態系へ与える影響を評価する上で植物プランクトン現存量の長期モニタリングデータは有益である。南極半島周辺海域では過去 25 年間 (1993–2017 年) に混合深度の浅化、植物プランクトン現存量指標であるクロロフィル *a* (chl-*a*) 濃度の増加、大気から海洋への CO_2 吸収の増加が報告されているが (Brown et al., 2019)、南大洋低次生態系への気候変動の影響を検出するには少なくとも 34 年以上の連続した時系列データが必要であることがモデル研究等で示唆されている (Henson et al., 2010; Del Castillo et al., 2019)。

日本南極地域観測隊 (JARE) による chl-*a* 濃度の観測は、1965/1966 の夏季に開始され、南大洋インド洋区で 50 年以上続いている。本研究では JARE で取得された chl-*a* 濃度の長期データセットを基に、植物プランクトン現存量の長期的な変動傾向を抽出し、その要因について考察した。

本研究では南極観測船 (宗谷、ふじ、しらせ) によって取得された 1965 年から 2019 年までの夏季 (12 月) の chl-*a* 濃度データを使用した。吸光光度法で測定された chl-*a* 濃度は Fukuchi and Tamura (1982) の関係式を用いて蛍光法による測定値へ変換した (Hirawake et al., 2005)。南半球環状モード（SAM）指数は南緯 40°から 65°に分布する観測基地の気象データを用いた Marshall SAM 指数 (Marshall, 2003, https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html) を、風速の東西成分は JRA-55 (https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html)および NCEP/NCAR (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html)の再解析データを使用した。

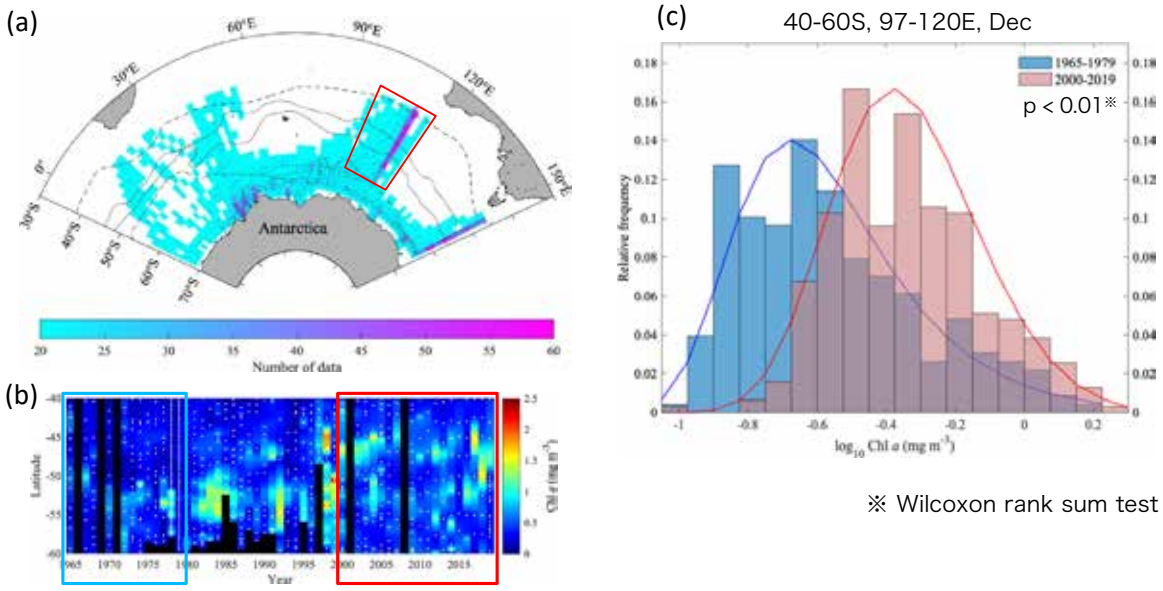


図 1. 海面 chl-*a* 濃度の観測点数 (a)、南緯 40°から 60°、東経 110 度観測ラインにおける 12 月の海面 chl-*a* 濃度の時系列変化 (b)。同海域における 12 月の海面 chl-*a* 濃度の相対出現頻度の比較 (c)。青が 1980 年以前、赤が 2000 年以降を示す。

観測頻度が最も高い東経 110°、南緯 40°から 60°の海域 (図 1a 赤枠) では、1980 年代以前に比べて 2000 年代以降に夏季 (12 月) の海表面 chl-*a* 濃度が有意に増加していた (図 1b, c)。また、同海域における 12 月の海域平均 chl-*a* 濃度の 10 年移動平均は過去 50 年間にわたって上昇傾向であり、この増加傾向と SAM 指数の間に正の相関が見られた (図 2). また風速の東西成分との間にも同様の関係が見られたことから(図 3)、偏西風の強化とそれに伴う湧昇 (下層から表層への鉄の多い海水供給プロセス) が本海域の chl-*a* 濃度の増加傾向に寄与していた可能性が考えられる (例えば、Lovenduski and Gruber, 2005)。

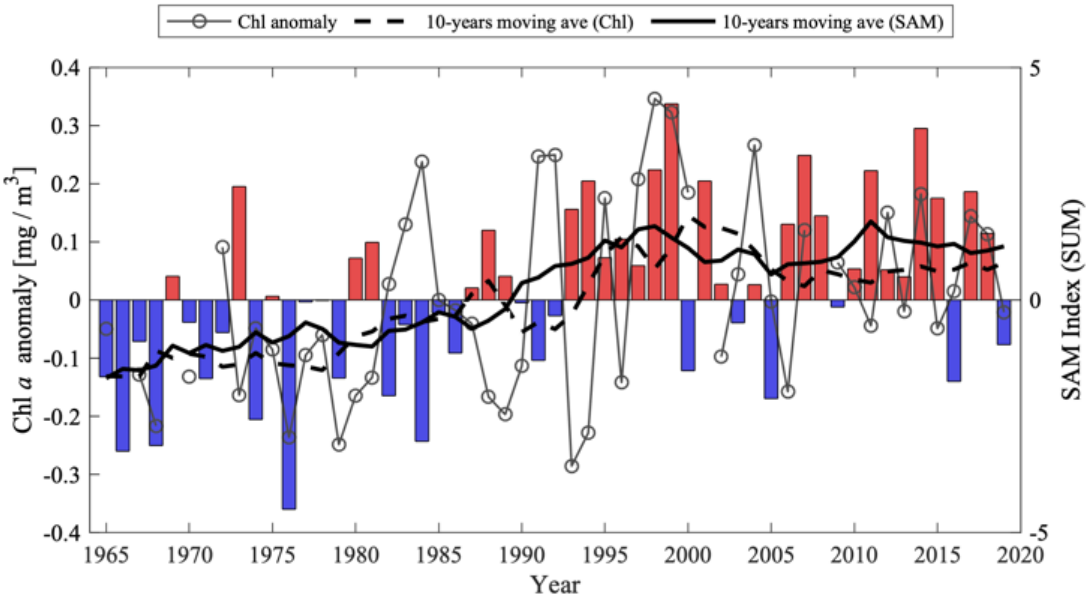


図 2. 対象海域 (東経 110°、南緯 40°から 60°) における 12 月の海表面 chl-*a* 濃度偏差と夏季 SAM の時系列変化

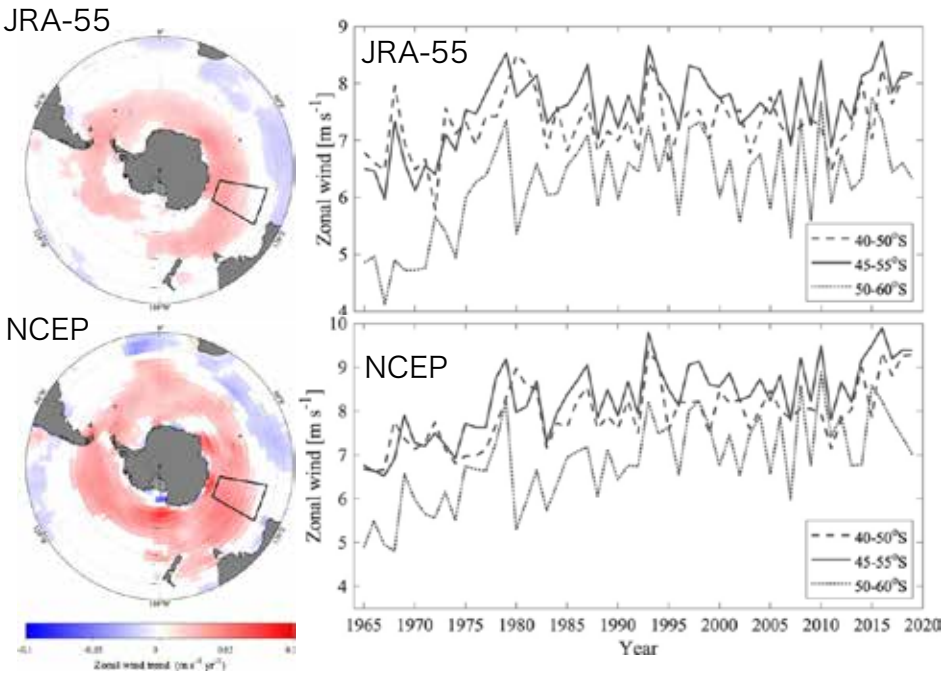


図 3. 対象海域における風速の東西成分の変化傾向と緯度ごとの時系列変化。左図中の着色部分は Mann-Kendall 検定による 5%有意水準で有意な増加または減少傾向が得られた海域を示す。

2. 南大洋における生態系モデルの新たな評価方法の提案

地球システムモデルによる将来予測研究は気候変動が生態系に与える影響を理解する上でも重要である (例えば、Bopp et al., 2013)。南大洋では IPCC 第 6 次評価報告書 (IPCC AR6) のために実施された第 6 次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)の地球システムモデルにおいても、モデル間の低次生態系変数 (例えば、chl-*a* 濃度) の不確実性が非常に大きいことが知られており(Séférian et al., 2020)、当該海域における気候変動による生態系への影響を理解する上でのボトルネックとなっている。そのため、生態系班とモデル班を中心に『生態系-モデル連携タスクチーム』を結成することで、現状のモデルの問題点と、観測・衛星データからモデルを検証する際に重要なパラメータについての議論を行い、南大洋における生態系モデルの新たな評価方法を提案した。

本研究では、全球スケールの生態系モデルの再現性評価研究 (Séférian et al., 2020) で用いられた 13 の CMIP6 モデル (表 1) による過去再現実験の出力結果のうち、1998 年から 2014 年までの月平均 chl-*a* 濃度データを使用した。再現性の検証には GlobColour プロジェクトで提供されている同期間の月平均衛星 chl-*a* 濃度データを使用した (https://www.globcolour.info)。

表 1. 本研究で使用した CMIP6 モデル

	Models	Country	biogeochemical model	Ocean Sea-ice model
1	ACCESS-ESM1-5	Australia	WOMBAT	MOM5-CICE4.1
2	CESM2	USA	MARBL-BEC	POP2-CICE5
3	CNRM-ESM2-1	France	PISCESv2-gas	NEMO3.6-GELATO6
4	CanESM5	Canada	CMOC	NEMO3.4.1-LIM2
5	GFDL-CM4	USA	BLINGv2	MOM6-SIS2
6	GFDL-ESM4	USA	COBALTv2	MOM6-SIS2
7	GISS-E2-1-G-CC	USA	NOBMext	GISS-E2-R
8	IPSL-CM6A-LR	France	PISCESv2	NEMO3.6-LIM3
9	MIROC-ES2L	Japan	OECO2	COCO
10	MPI-ESM1-2-HR	Germany	HAMOCC6	MPI-OM
11	MRI-ESM2-0	Japan	NPZD	MRICOM4
12	NorESM2-LM	Norway	iHAMOCC	BLOM-CICE5
13	UKESM1-0-LL	UK	MEDUSA-2.0	NEMO3.6-CICE

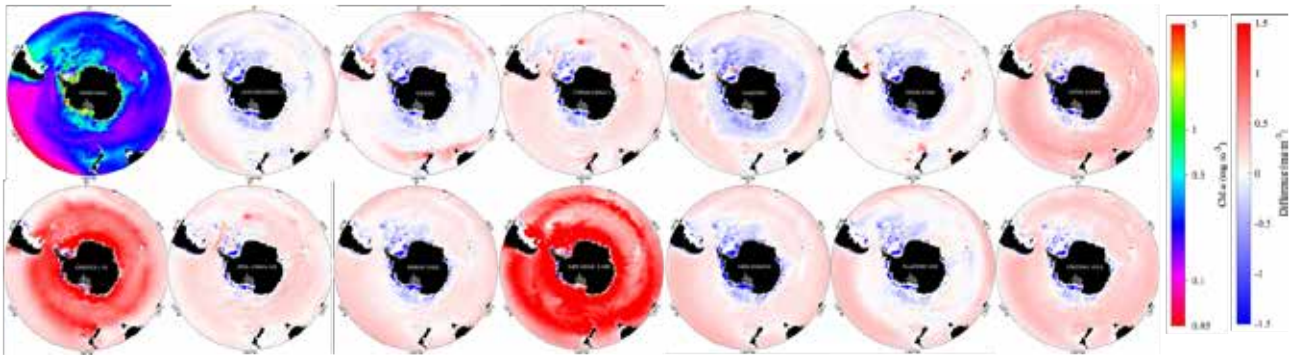


図 4. 生態系モデルが組み込まれた CMIP6 モデルによる年平均の海面 chl-*a* 濃度の空間分布。左上の図は GlobColour プロジェクトで提供されている 1998 年から 2014 年までの年平均海面 chl-*a* 濃度の気候値 (衛星データ)。それ以外の図は同期間の CMIP6 モデルによる過去再現実験の出力結果 (年平均海面 chl-*a* 濃度の気候値) と衛星データとの差。赤い海域はモデルの出力結果が衛星データよりも高い値を示す場所、青い海域は低い値を示す場所である。

生態系モデルが組み込まれた CMIP モデル等によって出力された変数の再現性を評価する場合、従来研究では年平均値を基準として衛星データと比較することが一般的であった。このような方法で生態

系モデルの年平均 chl-*a* 濃度の再現性を評価した結果、複数の CMIP6 モデルにおいて高緯度域ではモデルの出力結果が衛星データよりも低い値を示す傾向にあり、中緯度域では逆の傾向が見られた (図 4)。『生態系-モデル連携タスクチーム』では従来の評価方法である年平均値に加えて、CMIP6 モデルにおける季節変動の再現性について評価を行うことで、高緯度域においては衛星データの季節的なデータ欠損を考慮することが生態系モデルの年平均 chl-*a* 濃度の再現性評価において重要であることを示した (図 5, 6)。

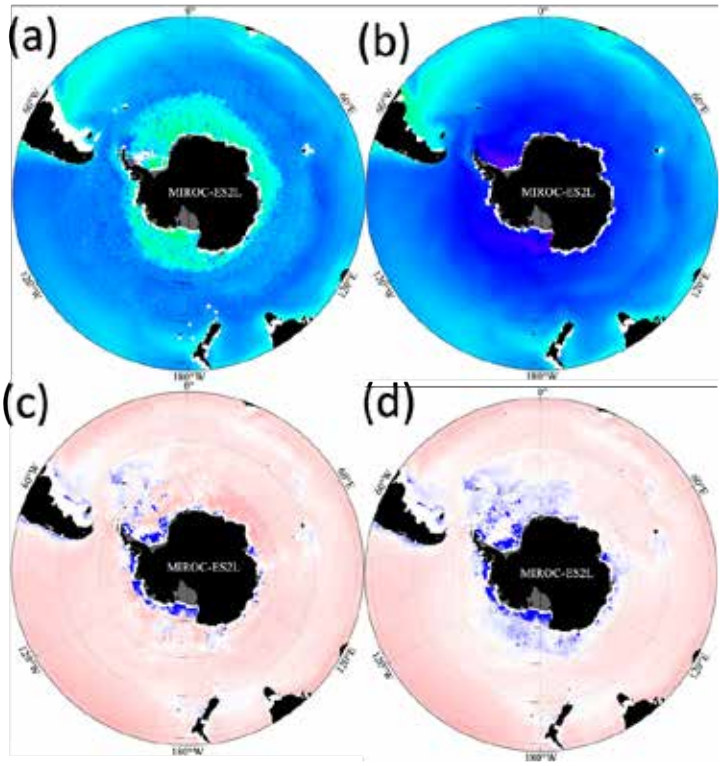


図 5. MIROC-ES2L による年平均の海面 chl-*a* 濃度の空間分布 (1998 年から 2014 年の気候値) のうち、(a)衛星データの季節的なデータ欠損を考慮した場合と(b)考慮しなかった場合 (従来方法)。下段の図は同期間における MIROC-ES2L による出力結果と衛星データとの差。

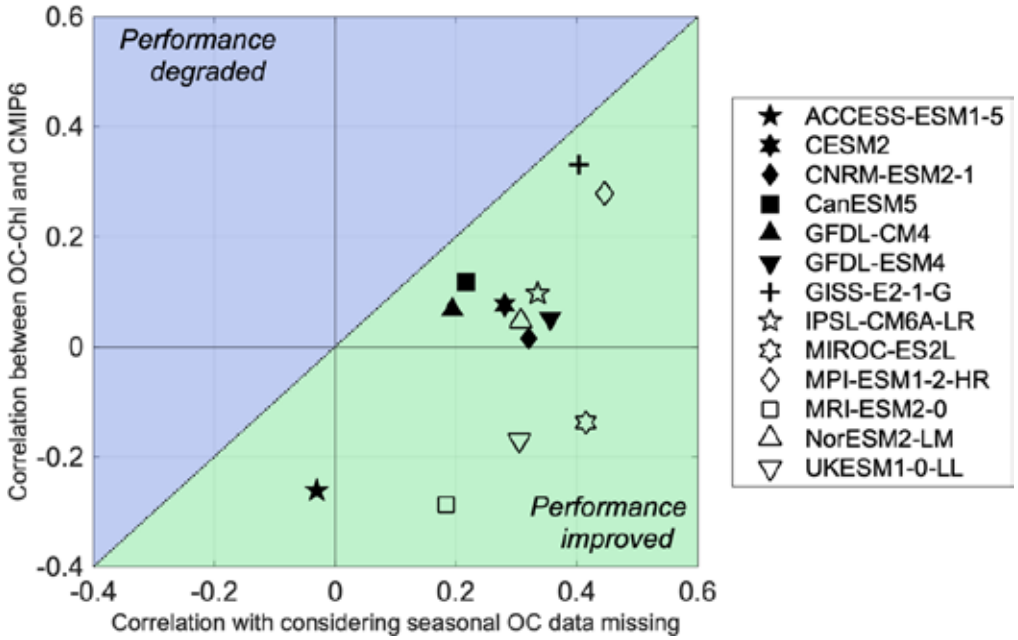


図 6.　衛星データの季節的なデータ欠損を考慮した場合と考慮しなかった場合における各 CMIP6 モデル出力結果 (年平均海面 chl-*a* 濃度の気候値)と衛星データとの空間相関係数の比較。緑の領域は従来の評価方法 (季節的なデータ欠損を考慮しない手法) よりもモデルで出力された chl-*a* 濃度の空間分布の再現性が向上したことを示す。

引用文献

Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Doney, S. C., Dunne, J. P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Séférian, R., Tjiputra, J., Vichi, M.: Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models, Biogeosciences, 10, 6225–6245, https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013, 2013.

Brown, M.S., Munro, D.R., Feehan, C.J. Sweeney C., Ducklow, H.W., Schofield, O.M. Enhanced oceanic CO2 uptake along the rapidly changing West Antarctic Peninsula. *Nat. Clim. Chang.* 9, 678–683, doi:10.1038/s41558-019-0552-3, 2019.

Del Castillo, C. E., Signorini, S. R., Karaköylü, E. M., Rivero-Calle, S. Is the Southern Ocean getting greener? *Geophys. Res. Lett.*, 46, 6034–6040. https://doi.org/10.1029/ 2019GL083163, 2019

Fukuchi, M., Tamura, S. Chlorophyll a distribution in the Indian sector of the Antarctic Ocean in 1978 – 1979, *Antarct. Rec.*, 74, 143 – 162, 1982.

Henson, S. A., Sarmiento, J. L., Dunne, J. P., Bopp, L., Lima, I., Doney, S. C., John, J., and Beaulieu, C.: Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity, *Biogeosciences*, 7, 621–640, https://doi.org/10.5194/bg-7-621-2010, 2010.

Hirawake, T., Odate, T., Fukuchi M. Long-term variation of surface phytoplankton chlorophyll *a* in the Southern Ocean during 1965–2002, Geophys. Res. Lett., 32, L05606, doi:10.1029/2004GL021394, 2005.

Landschützer, P., Gruber, N., Haumann, F.A., Rödenbeck, C., Bakker, D.C.E., van Heuven, S., Hoppema, M., Metzl, N., Sweeney, C., Takahashi, T., Tilbrook, B., Wanninkhof, R. The reinvigoration of the Southern Ocean carbon sink. *Science*, 349, 1221–1224, 2015.

Lenton, A., Tilbrook, B., Law, R.M., Bakker, D., Doney, S.C., Gruber, N., Ishii, M., Hoppema, M., Lovenduski, N.S., Matear, R.J., McNeil, B.I., Metzl, N., Mikaloff Fletcher, S.E., Monteiro, P.M.S., Rödenbeck, C., Sweeney, C., Takahashi, T. Sea–air CO2 fluxes in the Southern Ocean for the period 1990–2009. *Biogeosciences* 10, 4037–4054, 2013.

Lovenduski, N.S., Gruber, N. Impact of the Southern Annular Mode on Southern Ocean circulation and biology. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L11603, doi:10.1029/2005GL022727, 2005.

Séférian, R., Berthet, S., Yool, A. et al. Tracking Improvement in Simulated Marine Biogeochemistry Between CMIP5 and CMIP6. Curr Clim Change Rep 6, 95–119. https://doi.org/10.1007/s40641-020-00160-0, 2020.

DNA メタバーコーディングからみえる南大洋季節海氷域の生態系

立花愛子[1]、真壁竜介[1,2,3]、茂木正人[1,2]
[1]東京海洋大学、[2]国立極地研究所、[3]総合研究大学院大学

A01-3　海氷下の生態系と物質循環の相互作用（生態系班）（代表：茂木正人）

1．背景と目的

1－1．環境 DNA

生物の群集構造および多様性のモニタリングは、気候変動に対する海洋生態系変動への影響を理解するために不可欠である。従来のバイオモニタリング手法は、対象生物に応じた様々なサンプリング法と形態学に基づく同定を基に行われており、時間やコストだけでなく高度な専門知識を要してきた。今後、急速に変化する気候変動に対し、南大洋生態系へ及ぼす影響を明らかにするためには、生物群集の時空間的変動を迅速に理解するための効率的かつ効果的なツールが必要であると考えられる。環境 DNA - 生物によって土、堆積物、水などの環境サンプルに落とされた代謝排出物や死骸などの細胞や組織から抽出されたゲノム物質 - は海洋の生物多様性と群集組成を迅速に評価することが可能なツールとして近年注目されている。南大洋生態系の新たなモニタリングツールとして環境 DNA によるメタバーコーディングを導入し、より高度な解像度での生物多様性と群集構造の把握を目指した。

2－2．高次捕食者の胃内容物解析

南大洋生態系の高次捕食者である中深層性の魚類・イカ類は，夏季に仔魚・稚仔が 400 m 以浅に出現するが，稚魚・幼体への変態に伴い分布を中深層に移行させる個体発生的鉛直移動を行う。しかし，この大きな形態変化を伴う時期の食性については知見が乏しい。本研究では，南大洋季節海氷域における優占種である魚類 2 種 *Notolepis coatsi*（ハダカエソ科），*Bathylagus antarcticus*（ソコイワシ科）とイカ類 1 種 *Galiteuthis glacialis*（サメハダホウズキイカ科）の発育初期における摂餌生態を明らかにすることを目的として，消化管内容物を DNA メタバーコーディングによって解析した。

2．方法

2－1．環境 DNA

環境 DNA 試料の採水は、2019 年 1 月および 2020 年 1 月の東京海洋大学の練習船「海鷹丸」による南大洋航海（UM-18-08, UM1-9-08）において、東南極ウィルクスランド沖の 110° E、40° S から氷縁までの各観測点にて行った（Fig. 1）。試料は、表層から底層までの任意の各層においてバケツおよびニスキンによって 1～10 L 採水し、目合い 20 µm メッシュにてプレフィルターしたのち、ステリベクスフィルター（0.45 µm）でろ過捕集し－80 ℃で保存した。加えて、UM-19-08 および JARE61 では表層域の生態系連続モニタリングとして、昼と夜の一日 2 回、試料を採集した。室内に設置してある研究用海水を利用し、約 1 時間ろ過捕集し－80 ℃で保存した。海鷹丸で水深約 5

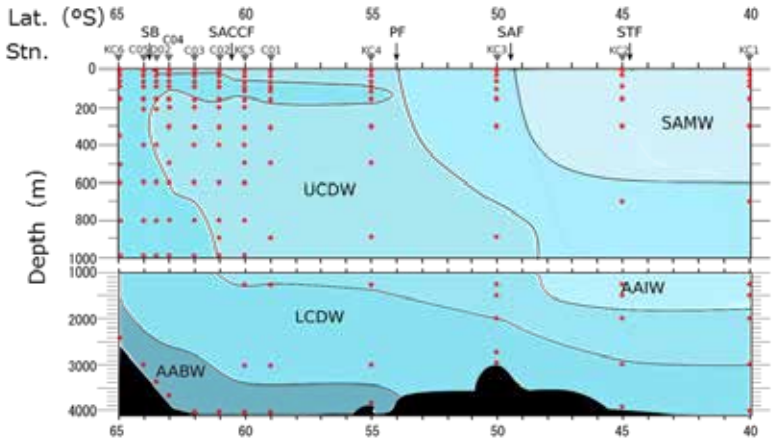


Figure 1. A schematic view of sampling stations and layers of environmental DNA (cycle) in January 2019 along the 110° E transect. The contour shows location of water mass, and the arrow shows location of identifying fronts.

m、しらせは水深約 8m の位置に設置してあるポンプで汲み上げた研究用海水を使用した。PAR センサー値が 100 μ mols-1m-2 以下となる時間帯を夜間とした。抽出した DNA は、真核生物を網羅的に解析できる核 DNA の 18SrDNA 領域と後生動物を検出できるミトコンドリア DNA の COI 領域を対象とし、PCR にて増幅したのち Miseq にてシーケンシングした。得られたデータはクオリティチェック、アダプタートリミング等の前処理をした後、OTUs にクラスタリングし、メタバーコーディング解析を行った。環境 DNA の抽出は、UM-18-08, UM-19-08 の試料に関しては全て、JARE61 の試料は一部のみ終えている。以下の成果については、メタバーコーディング解析が済んでいる UM-18-08 季節海氷域の試料を中心に示す。

２－２．高次捕食者の胃内容物

試料は，2020 年 1 月に東京海洋大学「海鷹丸」で行われた南極観測航海において，東経 110 度の 3 点（南緯 61, 63.5, 65 度）から，MOHT およびリングネットを用いて採集した．胃内容物は顕微鏡観察したのち，DNA を抽出し，*N. coasti* (n=20, 27.9 – 76.0 mm BL, body length)ではミトコンドリア COI 領域，*B. antarcticus* (n=33, 14.1 – 154.7 mm BL)と *G. glacialis* (n=31, 5.5 – 64.2 mm in mantle length)では 18S v9 領域においてメタバーコーディング解析を行った．

３．成果

３－１．環境 DNA からみえる南大洋季節海氷域の種組成と分布

全 92 サンプルから、18S では 1204 OTUs（うち後生動物は 145 OTUs）、COI では 191 OTUs（1% 以上出現 156 OTU s ）が検出された。18S では植物プランクトンや原生動物などの低次生産者から魚類等の高次捕食者まで多様な分類群が検出できたが、OTU 数、リード数のいずれにおいても植物プランクトンが 70%以上と高い割合を占めた。これは、生体由来 DNA、すなわち 20 μm 以下のナノピコサイズのプランクトンが海水試料に含まれることに起因している。リード数組成をもとにした分布をみると、表層 0-75 m には珪藻（主に *Fragilariopsis* spp.）とカイアシ類が高い割合を占め、64° S 以南では珪藻が優占した。カイアシ類が 64° S を境に減少する傾向は COI においても同様であった。水深 100 m 以深では、植物プランクトンの優占種が珪藻から渦鞭毛藻に変化するとともに、真核生物全体の優占種が植物プランクトンからリザリア類にシフトしており、この傾向は観測点を通して一致していた。また、動物プランクトンを含む後生動物の検出感度は、一部の分類群（主に尾索動物類）を除いて 18S よりも COI において高い傾向にあった。COI 分析により得られた種は、従来の直接採集による過去の知見と概ね一致していた（Fig. 2）。分布では、64° S より北側の表層 0-200 m ではカイアシ類が、それ以外では刺胞動物が概ね優占していた。カイアシ類に着目すると、オイトナ科、クラウソカラヌス科、メトリディア科、カラヌス科に属する種の環境 DNA 濃度の分布と直接採集による結果とは傾向が一致していた。一方で、南大洋生態系の主要分類群であるオキアミ類や端脚類や出現頻度の高い大型のカイアシ類（例えばユウキータ科）などの比較的大型な動物プランクトンやハダカイワシ科魚類などのマイクロネクトンの検出割合は、18S、COI の何れにおいても低かった。また、サルパ類、尾虫類、

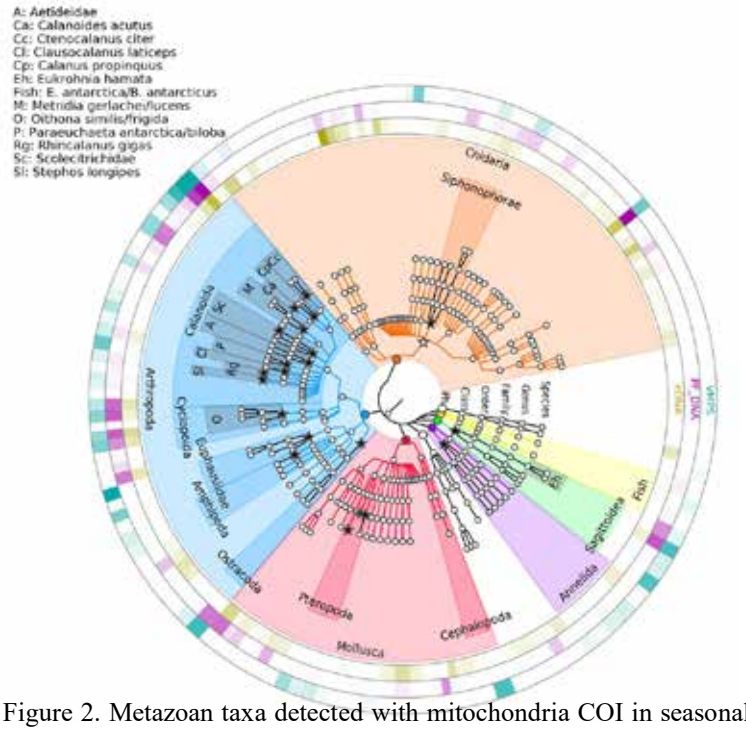


Figure 2. Metazoan taxa detected with mitochondria COI in seasonal ice zone. Heatmap showing the metazoan taxa corrected by each method (yellow: eDNA, pink: prefilter DNA, blue: plankton net).

Themisto、カイアシ類の一部は検出できない種もみられた。

３－２．環境 DNA からみえる南大洋ビンセネス湾沖の生態系像

DNA メタバーコーディングにより検出できた OTUs のうち３%以上出現した OTUs を用いて群集解析を行った。クラスター解析の結果、群集は層別に４つのグループに分かれた（0-60, 60-100, 100-150, 150-200 m）（Fig. 3B）。各グループから Indval 法により指標種（Indicator species）となる OTUs を抽出した。それぞれのクラスターグループの指標種には、独立栄養、混合栄養、および従属栄養などの複数の栄養レベルが含まれており、複数の栄養段階からなる群集構造が垂直的にシフトしていることが示された。指標種と環境データ（水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル *a*、栄養塩類）を相関分析により比較した結果、いくつかの指標種で環境変数と強い相関がみられた（Fig. 3C）。表層のクラスターグループは、高い硝酸塩濃度とクロロフィル-a（Chl a_10 μm）の大型画分と関連していた。 一方、100 m 以深の群集は、リン酸およびクロロフィル a の小サイズ画分（Chl a_2 μm および Chl a_GF/F）が高い水準で関連していることがわかった。 この結果は、表層生物群集の鉛直変化は、空間的な環境変数と連動しており、南極海生態系における食物連鎖にも影響を与えていることを示唆している。 本研究は、eDNA 解析が環境変化と結びついた複雑な生物学的相互作用について、詳細かつ微細な情報を提供することを示した。

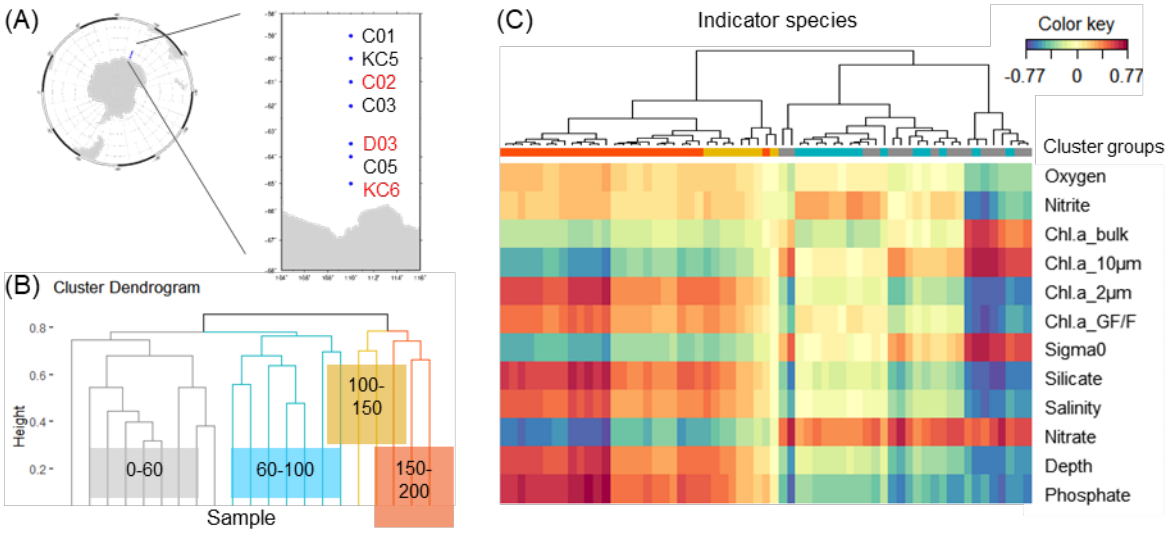


Figure 3. ***A:*** Map showing sampling stations off Vincennes Bay, East Antarctica. Samples used for the analyses presented in panels *B* and *C* were collected at stations C02, D03 and KC6 (red labels). ***B:*** Dendrogram based on clustering using the eDNA (normalised read abundance) index of each epipelagic sample (0–200 m) from stations C02, D03 and KC6. Colours indicate clustered groups. ***C:*** Heatmap showing the correlations of indicator species (columns), clustered based on epipelagic samples, with environmental variables (rows). Clustering of each indicator species is shown at the top of the heatmap using the same colours as panel *B*. The heatmap is coloured based on the value of the correlation coefficient.

３－３．南大洋における中深層性魚類・イカ類の発育初期の食性－DNA メタバーコーディングを用いた解析から

３種とも仔魚・稚仔期にはカイアシ類を主要な餌としていたが，それぞれ目レベルで異なる種を主要な餌としていた．これは，３種の分布深度のずれや行動様式など生態の違いを反映していると考えられた．また，*G. glacialis* ではクラゲ類や珪藻の出現頻度も高く，沈降粒子なども捕食していることが示唆された．一方で，変態後の稚魚・幼体期では，カイアシ類に加えてオキアミ類・ヤムシ類・クラゲ類などの出現頻度が増加し，消化管内容物は多様な分類群で構成されていた．このことから，成長に伴う遊泳・摂餌能力の向上により，餌生物をより大型化・多様化させていると考えられた．魚類やイカ類の発育初期にはみかけの空胃率が高いことが多いが，本研究では胃内の DNA の痕跡から食性が推定できることが分かった．

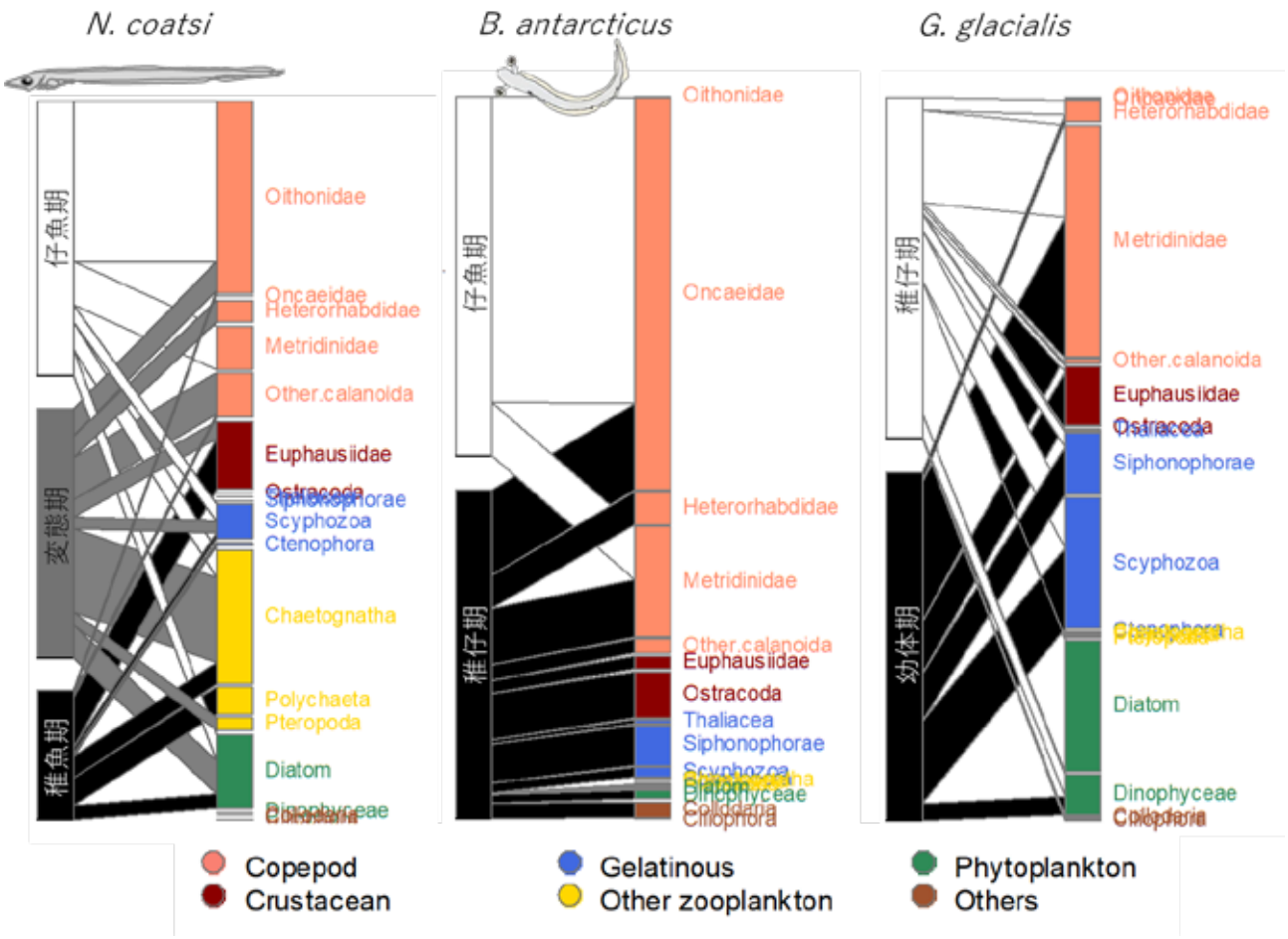


Figure 5. Changes in food items of three species with development.

参考文献

Aiko Tachibana, Ryosuke Makabe and Masato Moteki, The application of environmental DNA for the monitoring of Antarctic marine ecosystem, JpGU2019, poster, 2019

Aiko Tachibana, Ryosuke Makabe and Masato Moteki, A new tool for monitoring the Antarctic marine ecosystem using environmental DNA, The 10th Symposium on Polar Science, poster, 2019

立花 愛子, 真壁 竜介, 茂木 正人, 環境 DNA からみえる南大洋季節海氷域の種組成と分布, 2020 年度日本海洋学会秋季大会, poster, 2020

Aiko Tachibana, Ryosuke Makabe and Masato Moteki, Effect of marker choice on metazoan using environmental DNA metabarcoding in the polar region, 第 3 回環境 DNA 学会仙台大会, poster, 2020

Aiko Tachibana, Ryosuke Makabe and Masato Moteki, Environmental DNA as a tool for biomonitoring the Antarctic marine ecosystem, The 11th Symposium on Polar Science, poster, 2020

Aiko Tachibana, Ryosuke Makabe and Masato Moteki, Environmental DNA reveals spatial distributions and trophic linkages of an Antarctic marine community, The 12th Symposium on Polar science, oral, 2021

立花愛子, 茂木正人, 南大洋における中深層性魚類・イカ類の発育初期の食性－DNA メタバーコーディングを用いた解析から, 2022 年度日本魚類学会年会, poster, 2022

ハシボソミズナギドリからみた南極海生態系

綿貫豊[1]・安積紗羅々[1]・J-B Thiebot[1]・高橋晃周[2]・ 國分亙彦[2]・安藤靖浩[1]・新妻靖章[3]・
Fernando Arce[4]・Mary-Anne Lea[4]・Mark Hindell[4]・茂木正人[5]
[1]北海道大学、[2]国立極地研究所、[3]名城大学、[4]タスマニア大学、[5]東京海洋大学

A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用 （生態系班）（代表：茂木正人）

1. 背景

南極海の表層生態系では、大型捕食性魚類、イカ類、海生哺乳類や海鳥類など高次捕食者の餌として、ナンキョクオキアミとハダカイワシ類が重要である。ナンキョクオキアミは南極周極流より南の南極大陸陸棚から斜面域に分布し、ハダカイワシ類は南極周極流の北の海盆域に分布する（Ainley et al. 1986, Nicol et al. 2000, Collins et al. 2012）。陸棚—陸棚斜面域では海氷に関連した大型植物プランクトン→ナンキョクアキアミ→高次捕食者といった食物連鎖が、海盆域では小型植物プランクトン→動物プランクトン（カイアシ類、表層性ヨコエビ類）→ハダカイワシ類→高次捕食者といった食物連鎖がみられる（Murphy et al 2007，図1）。

海氷面積の海域や年による変化がナンキョクオキアミの再生産に影響し、西南極では温暖化による海氷の減少ともにナンキョクオキアミがへり(Atkinson et al. 2004）、その競争者であるサルパが増えることが報告されている（Loeb et al. 1997）。一方、中深層性のハ

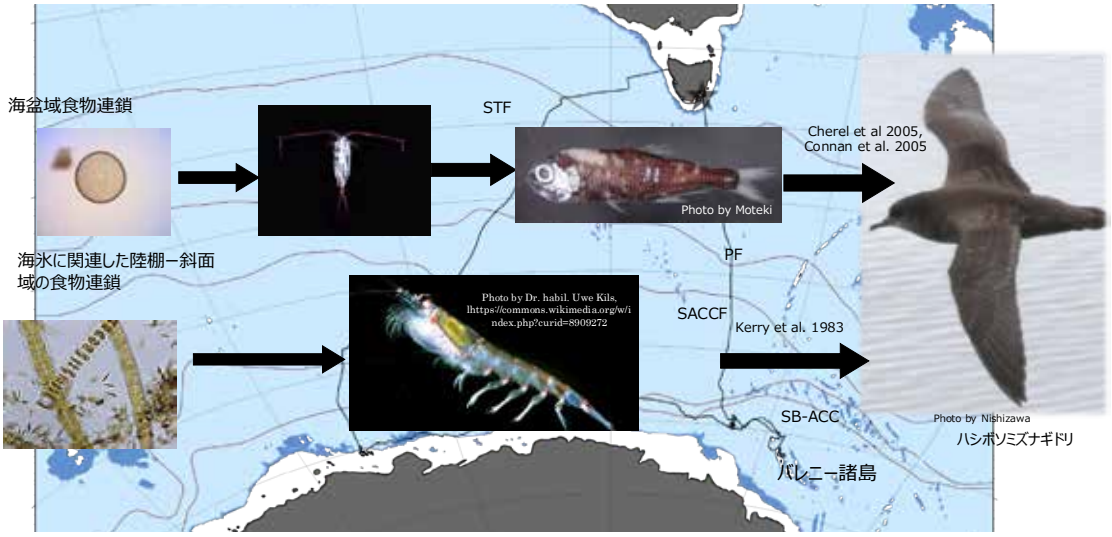


図1タスマニアで繁殖するハシボソミズナギドリがロングトリップで利用するだろうナンキョクオキアミとハダカイワシ類が分布する南極海のハビタットと想定される食物連鎖。ナンキョクオキアミは南極周極流(ACC)より南の南極大陸陸棚から斜面域にかけて海氷と関連して表層に分布し、ハダカイワシは南極周極流の北の海盆域に分布する. 主な海洋前線の位置を示している。灰色は大陸、青は水深1,000mより深い海盆域。

ダカイワシはその調査は容易ではないため、南極海においても資源量と分布の時空間変化とそれらに影響する要因についてはまだよくわかっていない。南極海の重要な高次捕食者である海鳥類は肺呼吸生物であり潜水深度はそう深くはないため、顕著な日周鉛直移動を示さないナンキョクオキアミは終日利用できるが、日中は中深層に分布し夜間は浮上するハダカイワシ類は夜間にのみ利用できると予想される。海鳥はナンキョクオキアミとハダカイワシ類の特徴的な分布と日周性にあわせて採食場所や行動を変えていると考えらる。

ハシボソミズナギドリ(*Ardenna tenuirostris*)はタスマニアなどで繁殖し、世界で数が最も多い海鳥の１種であり、その数は 2300 万ペアを超える（Brooke 2004)。１月から４月の育雛期には、繁殖地周辺のタスマン海までの１－2 日での採食トリップ（ショートトリップ）と、南極海の広範囲での９日以上の採食トリップ（ロングトリップ）をする。最大潜水深度は 70ｍに達するが、表面採食が主であり、表層に分布する餌生物を主に食べる。船からの目視調査によると、Antarctic Polar Front (APF)や Antarctic Divergence (AD)周辺に多く分布するとみられていたが(Woehler et al. 2006)、その後のバイオロギングを使ったトラッキング研究によると、ロングトリップの際は南極大陸陸棚域の海氷縁で採食することがわかってきた(Klomp & Schultz 2000, Einoder et al. 2011)。

繁殖地に戻った育雛中の親鳥の胃内容物分析により、ハシボソミズナギドリはオーストラリア周辺海域や亜南極海域のオキアミ類、ヨコエビ類にくわえハダカイワシ類、イカ類もたべる(Weimerskirch, Cherel 1998)ことがわかっていたが、その後、ロングトリップで南極海の南部に出かけたとき食べて消化した餌を反映するだろう血清の安定同位体比や雛のために持ち帰った胃油（胃に残された餌生物由来の消化されづらい油脂成分）の脂肪酸成分から、ハダカイワシ類が主たる餌生物であることがわかった（Cherel et al 2005, Connan et al. 2005)。こうした繁殖地で採取された胃内容物の分析からは、ナンキョクアキアミは餌として重要ではないと結論づけられている。一方で、夏期間に南緯 60 度以南で船に衝突死した個体の胃内容物、すなわちその近くで食べた直後の餌は主にナンキョクアキアミだったという報告もある（Kerry et al. 1983)。したがって、ハシボソミズナギドリは、ナンキョクオキアミとハダカイワシ類の両方を利用していると想定され、その分布と行動は、これら南極海外洋海洋生態系の２つのカギ種の水平・鉛直分布による影響を強く受けていると予想される（図１)。

2. 目的

この研究では、１）南極海氷縁域で船に衝突した個体の吐き戻しや胃内容を調べて、この海域での餌に関するより直接的な情報をさらに収集すること、２）南極海南部海域まででかけた９日以上のロングトリップにおける移動経路と採食行動を詳細に分析するととも

に、その胃油を採取し、脂肪酸組成から各トリップで食べた餌生物を知ることで、陸棚―陸棚斜面域と海盆域のふたつのハビタットをどのように利用しているか明らかにすること、の２つを目的とした（図１）。

本研究は科学研究費補助金（代表高橋）による研究として開始され、その後、発展的に本研究課題として、タスマニア大学海洋南極研究所との共同研究として実施された。

3. 南極海氷縁域での餌

インド洋区の陸棚―斜面域における餌に関する直接的な情報をさらに加えるため、南緯 63 度を航行中のアストラーベに 2015 年 2 月 21 日に降りて飛べなくなった 11 個体の吐き戻しを目視で確認するとともに、南緯 63 度の海氷縁域を航行中のしらせに 2019 年 3 月 7ー8 日に衝突死した 4 個体の胃内容物を目視で、肝臓の安定同位体比を質量分析器でしらべた。アストラーベにおりた個体のうち少なくとも 5 個体の吐き戻しからは体長およそ 5 ㎝の消化が進んでいないナンキョクオキアミが出現し、しらせに衝突死した個体のうち 1 個体の胃からも消化が進んでいないナンキョクオキアミが出現した（図２）。これは、これらの個体が直前に海氷縁海域でナンキョクオキアミを食べていたことを示す。一方、衝突死した 4 個体の肝臓の窒素炭素安定同位体比と南極海インド洋区の潜在的な餌生物の値から、ナンキョクオキアミとハダカイワシ類の両方を食べていることが推定された（図 2）。

この結果はこれまでの、ロングトリップでの主たる餌はハダカイワシ類であるとする胃油分析結果とやや矛盾しているように見える。インド洋区においても、東経 140 度（Amakasu et al. 2011）、東経 60－85 度（Bestley et al. 2018）および 東経 80－150 度（Nicol et al. 2000）付近の陸棚斜面域はナンキョクオキアミが、東経 110－140 度付近では南緯 65.5 度にある陸棚斜面より北の海盆域ではハダカイワシ類が分布し、陸棚斜面域にはナンキョクアキアミ、南の陸棚域ではコオリオキアミとノトセニア類（Moteki et al. 2011, 2017, Amakasu et al. 2011）が豊富である。したがって、インド洋区でも、陸棚―斜面域ではナンキョクオキアミ、海盆域で

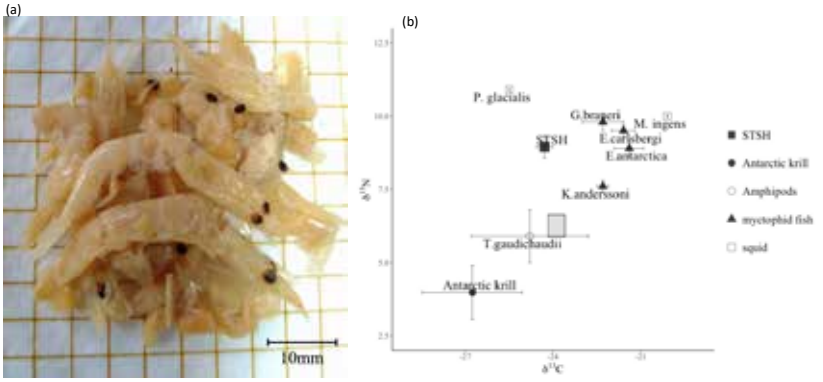


図2 （a）しらせに衝突死したハシボソミズナギドリ1個体の胃から出現したナンキョクオキアミと（b）5個体のハシボソミズナギドリ(STSH)の肝臓（本研究）とさまざまな文献（による潜在的餌生物の炭素安定同位体比（横軸）と窒素安定同位体比（縦軸）（平均と標準偏差）

はハダカイワシ類、それぞれをカギ種とする食物連鎖が発達していると考えてよいようである。ただし、バレニー諸島（南緯 66 度, 東経 162 度）周辺海域はナンキョクオキアミが分布する（Atkinson et al. 2004）が、東経 170〜180 度では南緯 68 度付近までハダカイワシ類が分布しており（O'Driscoll et al. 2011）、このバレニー諸島海域ではハダカイワシ類が利用できる可能性もある。

では、胃油の結果と海氷縁で採取された個体の胃内容が矛盾するのはどうしてだろうか？まず、海氷縁で採取された個体非繁殖個体である可能性があり、繁殖個体とは異なる餌、すなわちナンキョクオキアミ、を食べていた、というものである。Kerry et al. 1983 のサンプルのかなりは抱卵斑が発達していない非繁殖個体だったが、何個体かは繁殖個体と考えられており、われわれのサンプルにも繁殖個体が混じっていた可能性が高く、繁殖個体はロングトリップにおいてハダカイワシ類だけを食べるとは考えずらい。次に、胃油は雛への持ち帰りであり、9 日に及ぶロングトリップの前半に食べて吸収した親自身の餌はあまり反映していない可能性がある。これは以下に述べるハシボソミズナギドリのロングトリップ中のハビタットの利用順番と矛盾しない。

4. 採食場所と採食行動

南極海まででかけるロングトリップにおける移動経路、採食行動を詳細に分析するため、タスマニアのフィッシャー島とウェッジ島で、雛を育てている親鳥が夜間巣にもどったところを手で捕獲し、20g 以下の GPS データロガーあるいは GPS・加速度・深度データロガーを、背中の羽根にテッサテープで装着し、数日後に回収しデータを吸い上げるか、地上に設置したアンテナを使って自動ダウンロードすることで、データを回収した。また再捕獲の際、胃油を採取し、胃油の脂肪酸組成の分析からその個体の餌を推定した。

その結果、どの年もまず、巣を離れるとまっすぐ南下してバレニー諸島周辺の海盆および海氷縁ハビタットで採食するとともにその北の海盆域でも採食し、シーズン後半には、バレニー諸島海域から西に移動して陸棚斜面＝海氷縁ハビタットで長時間採食し、その後、北上しつつ海盆域で採食してから繁殖地に戻る傾向があった（図 3）。一方、陸棚斜面をよくつかった個体とあまり利用しない個体がおり、個体変異も認められた。

本研究はハシボソミズナギドリにとってバレニー諸島周辺の海盆ハビタットが重要であることを初めて示した。これまでの船によるミズナギドリ調査ではこの海域の利用は見過ごされており、また、ジオロケーターを使った多数個体の追跡調査ではその位置推定精度が悪いせいでこの海域の利用がとらえられなかった。本海域は、島周辺の湧昇による餌生物の表層への輸送と集群、および一次生産の上昇によるボトムアップ効果により、餌である南極オキアミが豊富であり、ザトウクジラがよくいる高次捕食者の特異的ホットスポッ

トである。(Harrison et al. 2020)。また、タスマニアの繁殖地から最も近い南極海の高生産海域であり、ここで採食することは効率がいいのかもしれない。

胃油の分析の結果、大陸棚—斜面域と海盆域の利用度の個体差にかかわらず、どの個体も繁殖地に持ち帰った胃油の脂肪酸組成はハダカイワシのそれに近似していた(図４)。これは、従来の結果（Connan et al. 2005）と一致している。どの個体も程度の差はあれ、繁殖地に戻る前には海盆域で採食をしており、そこでハダカイワシを食べることを示しているのかもしれない。餌生物が胃の中で胃油になる時間は正確には測定されていない。海鳥においては、オキアミ類や魚類は数時間以内に消化されることがわかっており（Jackson

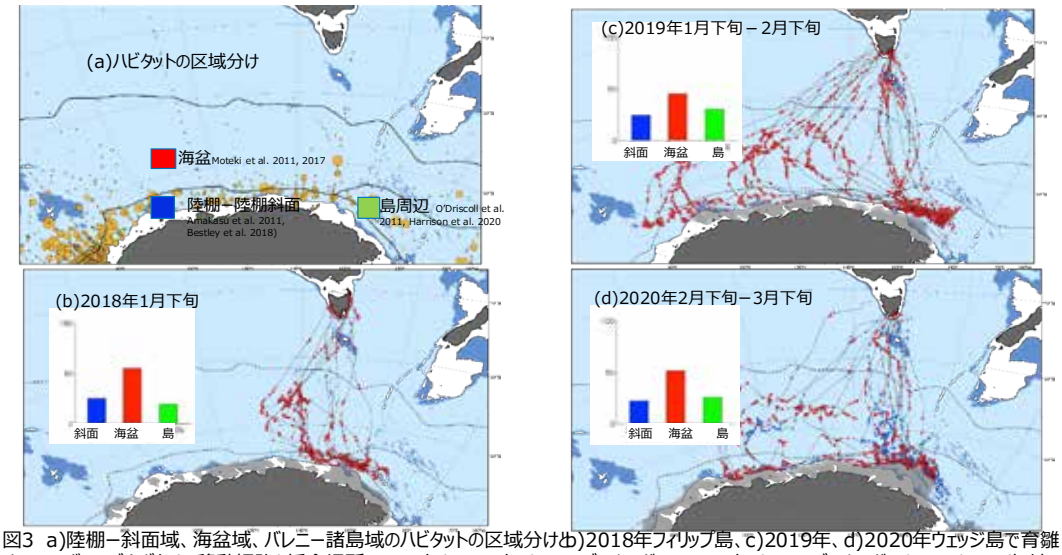


図3 a)陸棚−斜面域、海盆域、バレニー諸島域のハビタットの区域分けb)2018年フィリップ島、c)2019年、d)2020年ウェッジ島で育雛するハシボソミズナギドリの移動経路と採食場所。2018年と2019年はGPS データロガー、2020年はGPS データロガーあるいはGPS/加速度/深度データロガーで行動を記録した。赤丸は移動速度から着水と判定した場所、青丸は潜水行動が行われていた場所b)-d)ではうすい灰色はその年の夏の海氷分布を示す。それぞれの生態系の記載文献を示す。総裁職時間に対するそれぞれのハビタットの利用時間割合も示す。a)にはナンキョクオキアミの相対密度(krill base、Atkinson et al. 2017)も黄色円で示す。

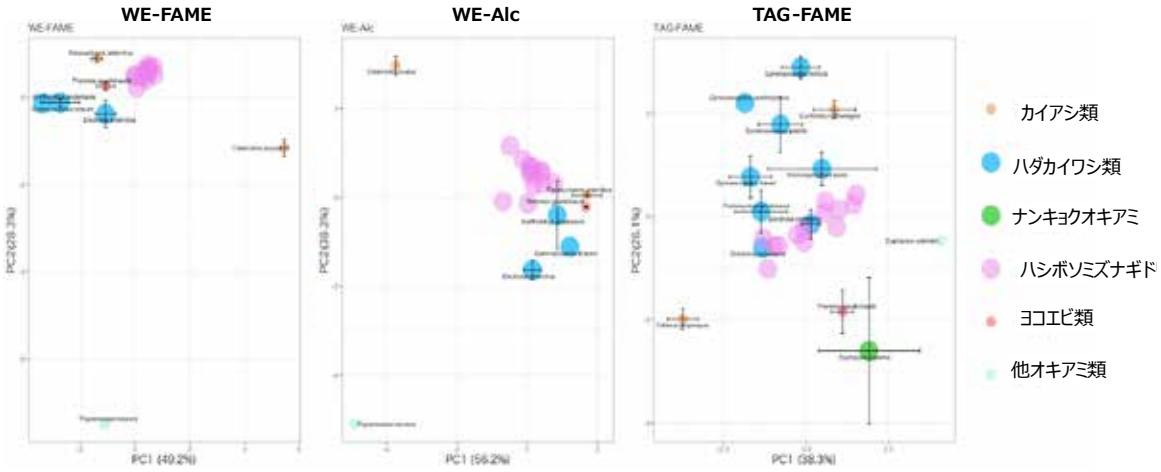


図4：ハシボソミズナギドリの胃油及び様々な文献による餌候補種の脂肪酸組成の主成分分析結果　油成分はまずWE-FAME（ワックスエステル脂肪酸成分の組成），WE-Alc（ワックスエステルアルコール成分の組成），TAG-FAME(トリアシグリセロール)にわけ、それぞれで脂肪酸組成を分析している。ハシボソミズナギドリ（ピンク）胃油は個体ごとのパターンを示し，餌候補種は複数の文献値の平均±SDを示す.

and Ryan 1986)、胃油は数日程度前に食べた餌を反映するだろうと推定されている（Warham 1977)。したがって、この結果は、衝突死した個体の、１か月程度に食べて消化吸収した餌を反映する肝臓の安定同位体比がナンキョクオキアミとハダカイワシ類を食べていたことを示していることも併せて考えると、コロニーに戻る数日より以前に利用した海氷縁域である陸棚斜面でナンキョクオキアミをたべているという説と矛盾するわけではない。

潜水頻度・深度の日周性を調べてみると、海盆域では夜には 10m 以下と浅く昼に 10－20m と深く、朝夕に多く潜水したが、陸棚斜面では 10m 以下と浅く、明瞭な日周性はなかった（図 5)。潜水頻度と深度のこうした場所間の日周性の違いは、そこで想定される餌生物の日周鉛直移動を反映していると思われる。ナンキョクオキアミの日周深度分布については南極半島やスコシア海で研究されており、確かに、昼は 100m 前後から 20m くらいまでなのが、夜には 60m から 10m までと浮上する（Miller and Hampton 1989, Godleaska and Klusek 1987）が、その規模は小さく、当該海域での調査では明瞭な日周移動は報告されていない(Amakasu et al. 2011)。一方、南極海におけるハダカイワシ類の日周鉛直移動については、東経 110－140 度の海盆域の中・深層性魚類（主にハダカイワシ類）は明確な日周鉛直移動ははっきりしなかったという報告(Moteki et al. 2011)もあるが、スコシア海での研究では表層でハダカイワシ類が採取されないのはネットアボイダンスの可能性が指摘されており(Collins et al. 2012)、その後の当該海域（東経 110－140 度の南緯 64 度

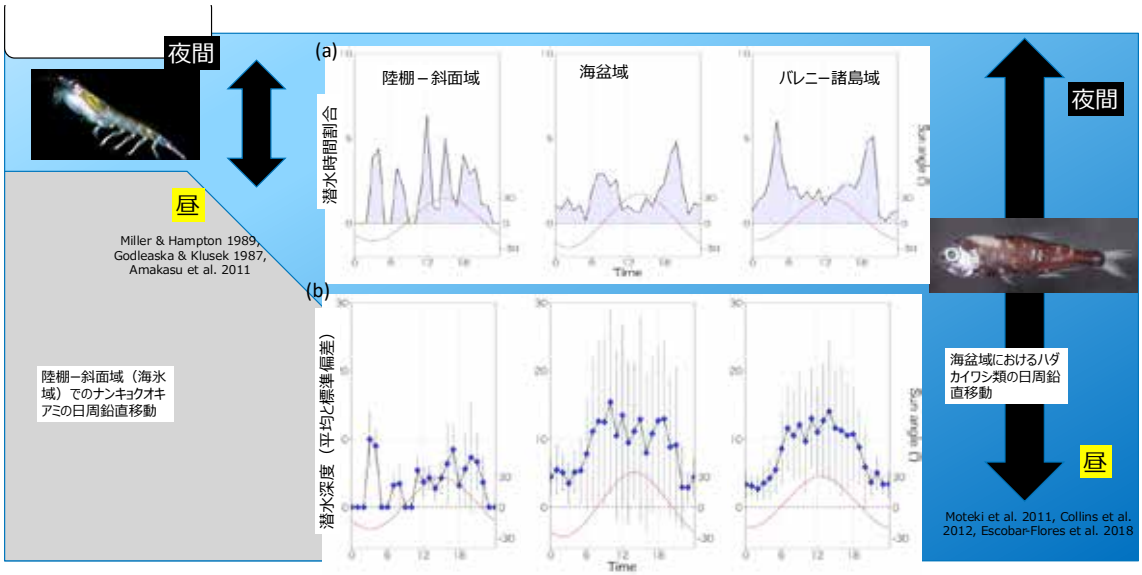


図５　陸棚－斜面域、海盆域、バレニー諸島域における(a)1時間ごとの潜水時間割合と(b)潜水深度の日周性。赤は太陽高度の時刻変化。陸棚－斜面域と海盆域で想定される餌生物であるナンキョクオキアミ、ハダカイワシのおよその日周鉛直移動を文献に従って示す。

(Moteki et al. 2017)および東経 170－180 度のおよそ南緯 60 度(Escobar-Flores et al.

2018）でのネットサンプリングと音響調査ではハダカイワシ類のスケールの大きな鉛直移動が観察されている。

5. まとめと今後の課題

本研究のハシボソミズナギドリの胃油の分析結果より、海盆域ではハダカイワシ類を主に食べていることが再確認され、先行研究に加え、海氷域で採取された個体の吐き戻しと胃内容からそのハビタットでの主たる餌はナンキョクオキアミであることが推定された。また、ハシボソミズナギドリはロングトリップ中、バレニー諸島周辺海域、陸棚―斜面域、海盆域の順番に採食におとずれること、各ハビタットでの採食行動の日周性はそこで食べる餌生物の鉛直日周移動を反映しているらしいことがわかった。

結論として、本研究は、南極海の二つの食物連鎖が、タスマニアで繁殖する莫大な数のハシボソミズナギドリの生活を支えおり、ハシボソミズナギドリはこれらをうまく利用していることを示している。一方、これらの結果は、タスマニアで繁殖するハシボソミズナギドリをつかって南極海海洋生態系のふたつの食物連鎖の時空間変化に関するなんらかの情報を得ることができるかもしれないことを示す。移動性の高い高次捕食者を使って、南極海海盆域や海氷縁域の外洋域での生態系の変化を、簡便にとらえられることは大きな利点だろう。

7. 引用文献

Ainley DG, Fraser WR, Sulivan CW, Torres JJ, Hopkins TL, Smith WO (1986) Antarctic mesopelagic micronekton: evidence from seabirds that pack ice affects community structure. Science 232 847-849

Amakasu K, Ono A, Hirano D, Moteki M, Ishimaru T (2011) Distribution and density of Antarctic krill (Euphausia superba) and ice krill (E. crystallorophias) off Adelie Land in austral summer 2008 estimated by acoustical methods. Polar Science 5:187-194

Atkinson A, Siegel V, Parkhomov E, Rothery P (2004) Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. Nature 432:100-103

Bestley S, Raymond B, Gales NJ, Harcourt RG, Hindell MA, Jonsen ID, Nicol S, Péron C, Sumner MD, Weimerskirch H, Wotherspoon SJ, Cox MJ (2018) Predicting krill swarm characteristics important for marine predators foraging off East Antarctica. Ecography 41:996-1012 doi: 10.1111/ecog.03080

Brooke M de L (2004) *Albatrosses and Petrels across the World*, Oxford University Press, New York, p499.

Cherel Y, Hobson KA, Weimerskirch H (2005) Using stable isotopes to study resource acquisition and allocation in procellariiform seabirds. Oecologia 145: 533–540

Collins MA, Stowasser G, Fielding S, Shreeve R, Xavier J, Venables HJ, Enderlein P, Cherel Y, Van de Putte A (2012) Latitudinal and bathymetric patterns in the distribution and abundance of mesopelagic fish in the Scotia Sea. Deep-Sea Res II 59-69:189-198

Connan M, Mayzaud P, Boutoute M, Weimerskirch H, Cherel Y (2005) Lipid composition of stomach oil in a procellariiform seabird *Puffinus tenuirostris*: implications for food web studies. Mar Ecol Prog Ser 290: 277–290

Einoder LD, Page B, Goldsworthy SD, De Little SC, Bradshow CJA (2011) Exploitation of distant Antarctic waters and close neritic waters by short-tailed shearwaters breeding in South Australia Austral Ecology 36, 461–475

Escobar-Flores PC, O'Driscoll RL, Montgomery JC (2018) Spatial and temporal distribution patterns of acoustic backscatter in the New Zealand sector of the Southern Ocean. Mar Ecol Prog Ser 592: 19–35
Godleaska M and Klusek Z (1987) Vertical distribution and diurnal migrations of krill-*Euphausia superba* Dana- from hydro-acoustical observations, SIBEX, December 1983/January 1984. Polar Biology 8:17-22.
Harrison L-MK, Goetz K, Cox MJ,Harcourt RA (2020) Ocean archipelago enhances feeding opportunities for a krill predator. Mar Sci 36:260–275
Jackson S, Ryan PG (1986) Differential digestion rates of prey by White-chinned Petrels (*Procellaria aequinoctialis*). Auk 103: 617-619.
Kerry KR, Horne RSC, Dorward DF (1983) Records of the Short-tailed Shearwater *Puffinus tenuirostris* in Antarctic waters. Emu 83:1, 35-37
Klomp NI, Schultz MA (2000) Short-tailed shearwaters breeding in Australia forage in Antarctic waters. Mar Ecol Prog Ser 194: 307-310
Loeb V, Siegel V, Holm-Hansen O, Hewitt R, Fraserk W, Trivelpiecek W, Trivelpiecek S (1997) Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. Nature 387: 897-900
Miller DGM, Hampton I (1989) Biology and ecology of the Antarctic Krill (Euphausia superba Dana): A review. In Biological Investigations of Marine Antarctic Systems and Stocks (BIOMASS) Vol 9: 1-166. SCAR and SCOR Scott Polar Research Institute, Cambridge, England.
Moteki M, Koubbi P, Pruvost P, Tavernier E, Hulley P-A 2011 Spatial distribution of pelagic fish off Adelie and George V Land, East Antarctica in the austral summer 2008. Polar Science 5:211-224.
Moteki M, Fujii K, Amakasu K, Shimada K, Tanimura A, Odate T (2017) Distribution of larval and juvenile/adult stages of the Antarctic myctophid fish Electrona antarctica, off Wilks Land in East Antarctica. Polar Science 12: 99-108 http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2017.02.004
Nicol S, Pauly T, Bindoff NL, Wright S, Thiele D, Hosie GW, Strutton PG, Woehler E (2000) Ocean circulation off east Antarctica affects ecosystem structure and sea-ice extent. Nature 406:504-507
O'Driscoll RL, Macaulay GJ, Gauthier S, Pinkerton M, Hanchet S (2011) Distribution, abundance and acoustic properties of Antarctic silverfish (Pleurogramma antarcticum) in the Ross Sea. Deep-Sea Res II 58:181-195
Warham J 1977 Incidence, functions and ecological significance of petrel stomach oils. Proc N Z Ecol Soc 24:84-93
Weimerskirch H, Cherel Y (1998) Feeding ecology of short-tailed shearwaters: breeding in Tasmania and foraging in the Antarctic? Mar Ecol Prog Ser 167:261-274
Woehler EJ, Raymond B, Watts DJ (2006) Convergence or divergence: where do short-tailed shearwaters forage in the Southern Ocean? Mar Ecol Prog Ser 324: 261–270

ドームふじアイスコアによる古気候研究の成果－エアロゾルと気温復元－

植村　立[1]
[1]名古屋大学　大学院　環境学研究科、

A02-1　南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）
A04　　南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）（代表：阿部彩子）

1．概要

本稿では、氷床班で実施したアイスコア研究のうち、気温及びエアロゾル変動の復元についての成果について説明する。「大学院生・周辺分野の研究者」を想定読者として、各研究成果のプレスリリース文と図をベースにして、より研究者向けにアレンジして作成した。用語解説も含めたより平易な説明については、末尾のプレスリリース一覧のリンク先を参照して頂きたい。

2．ドームふじアイスコアの水の酸素・水素同位体比を用いた気温復元

過去 72 万年の間には、約 10 万年周期で大きな気温変動があったことが知られている。これは、氷期・間氷期サイクルと呼ばれ、このサイクルでは、南極の気温変動は二酸化炭素濃度と似た変動パターンを示すことが知られていた。しかし、大気中の二酸化炭素濃度を変動させる直接的なメカニズムとしては南極の気温よりも、南極周辺の海洋環境の変動が重要な役割を果たしていると予想されている。そこで、我々の研究(Uemura et al., 2018)では同じ時間軸の上で過去 72 万年間にわたる南極と周辺海域の温度変動を正確に復元することを試みた。

手法としては、南極ドームふじアイスコアから酸素と水素の 2 種類の同位体比($^{18}O/^{16}O$ と $^{2}H/^{1}H$)を測定し、両者を組み合わせた指標（d-excess）を用いて解析をした。これによって、雪として凝結した南極の気温に加えて、降雪をもたらした水分子が蒸発した海域の温度も推定した。周辺海域の水温も復元したデータとしては、これまでの最長であった 42 万年間のデータを大きく延長したことになる(「周辺海域」というのは、「雪をもたらした水分子が蒸発した海域」のこと）。アイスコアから復元した水温（ΔT_{source}）は、海底コアから復元した水温変動の平均値とよく位置しており、本復元データの妥当性を示している（図 1）。なお、Vostok や Dome C コアで行われた同様の手法による復元では ΔT_{source} は海底コアの海水温変動とは有意な不一致（特に退氷期に大きい位相のズレ）があった(例えば Stennni et al., 2010; Vimeux et al., 2008)。本研究で用いた計算はコア掘削地点での表面雪データを用いてモデルチューニング(Uemura et al., 2012)を採用したことで、この問題を解決している。（一方で、著者の率直な感想としては、かなりの簡略化を行った同位体モデルに基づく復元手法であり、図 1 に示したような海底コアの海水温変動との定量的な（温度幅も含めた）一致を見たことは、大きな驚きであった）。

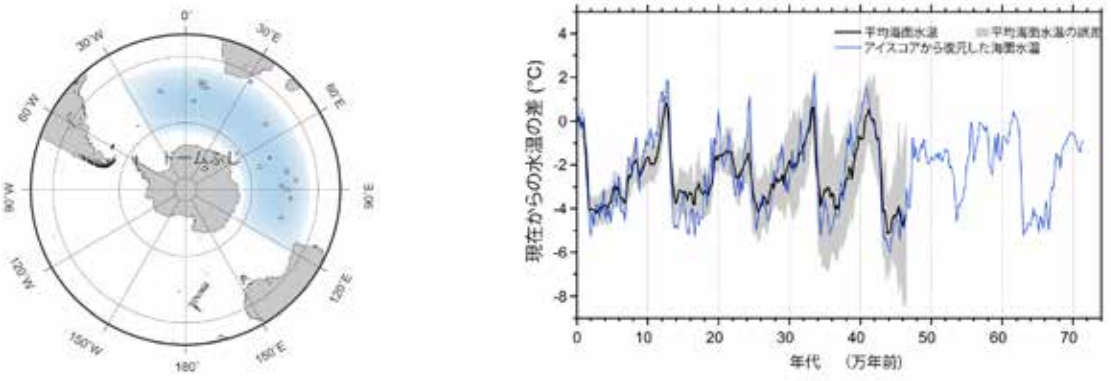


図 1　左：南極ドームふじコアとその水蒸気起源海域。丸い点は海底コアの掘削地点。右：アイスコアから復元した水温と海底コアから復元した水温変動の比較

復元した周辺海域の海水温は、大気中の二酸化炭素濃度の変動と非常に高い相関を示した（図２A）。この結果は、南極周辺の海洋が二酸化炭素濃度の変動を支配しているという仮説を支持する。南極の気温も、二酸化炭素濃度と似た変動を示しているが、周期的にずれている時代がある（図２B）。これは、約４万年周期で地球の自転軸傾斜角（地軸の傾き）が変動することで引き起こされる年平均日射量の変動が原因であると考えられる。自転軸傾斜角が変動することによる年平均日射量の変動は緯度によって異なり、極域と赤道で最も大きく変動し、中緯度ではほとんど変動しない。このことは、傾斜角が０度になった場合には極域には日射がほぼゼロになるいうことからも直感的に理解できる（実際には、自転軸傾斜角は約４万年周期で±1 度程度変動する）。つまり、南極の気温変動は極域特有の年平均日射量の影響を強く受けているために、強い４万年周期をもっていると考えらえる。このことが二酸化炭素濃度と南極の気温変動の不一致の原因の一つであると考えられる。さらに、本研究で復元した緯度の低い水蒸気起源海域の海水温変動は同じアイスコア年代のデータなので、海水温と南極気温の差を年代誤差なく計算することが可能である。この海水温と南極気温の差は、強い４万年周期を示した（図２C）。これは、上記の自転軸傾斜角が及ぼす影響（高緯度で大きく、中緯度で小さい）に関する考察と整合的である。

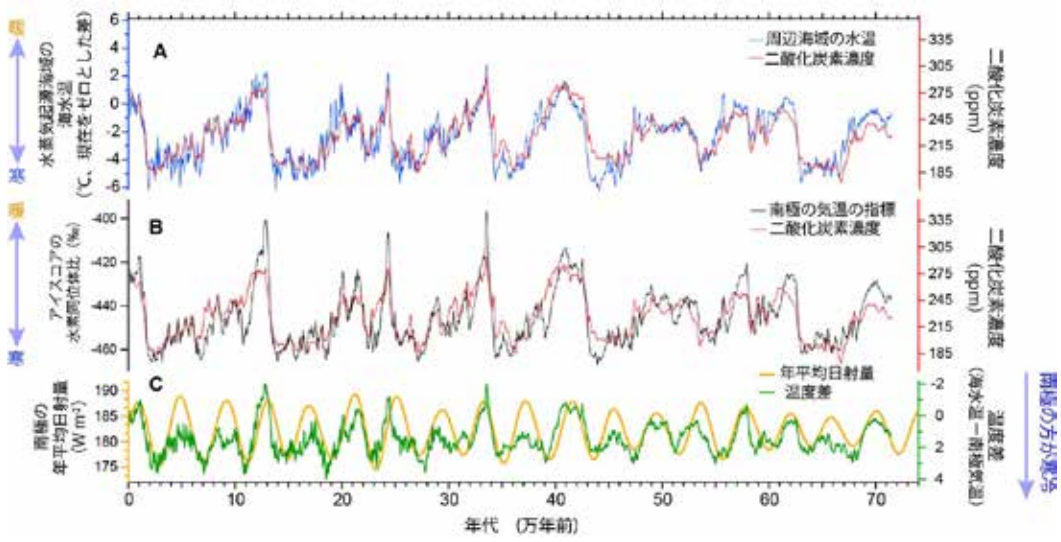


図２　温度と二酸化炭素濃度の比較：A）南極周辺海域の水温（青線、本研究）と大気中の二酸化炭素濃度（赤線、複数のアイスコアのデータ） B）南極の気温（黒線、本研究）と二酸化炭素濃度（赤線）、C）周辺海域と南極の温度差（緑線、本研究）と南極の年平均日射量（黄線）

南極の気温が 4 万年周期の自転軸傾斜角の影響を受けていることと CO_2 変動との関係については、我々のアイスコア論文と前後して、2 つの説が発表された。それぞれ固体地球との相互作用と降雪量の季節変動という全く異なる時間空間スケールから同じトピックが議論されている。1 つは、海水準の変動によって中央海嶺の火山活動が活発化することで CO_2 濃度が変動するとする説（Hasenclever et al., 2017）、もう 1 つは南極の気温復元が降雪の季節変動のバイアスを受けている（Erb et al., 2018）という説である。これらの研究例を見ても、本研究のトピックは本質的に他圏相互作用、分野融合的な性質があることを示してる。

３．エアロゾル変動に関する研究

以下に、エアロゾル変動に関する研究成果を 3 つの論文（Goto-Azuma et al., 2019；Oyabu et al., 2020; Uemura et al., 2022）を中心に解説する。

３－１．氷期の低い海洋生物活動：イオン濃度変動に関する研究成果（Goto-Azuma et al., 2019）

硫酸塩エアロゾルはそれ自体が日射を遮る働きをするほか、雲ができるときの凝結核となりうるため、気候に大きな影響を及ぼす。EPICA ドーム C アイスコアの分析からは、硫酸塩エアロゾルのフラックスが過去 80 万年を通じてほぼ一定であることが分かっている。この結果から、南極海の植物プランクトン由来の硫酸塩エアロゾルの生成量は氷期・間氷期サイクルを通じてほとんど変化せず、気候変動に依存しないと解釈されてきた。

我々は、第二期南極ドームふじアイスコアの硫酸塩エアロゾルの研究を行った（Goto-Azuma et al., 2019）。これは、イオンクロマトグラフィーによって分析された水溶性成分の濃度データ（雪氷学では、イオンデータ呼ばれるもの）を用いた研究である。その結果、過去 72 万間のドームふじでは非海塩性硫酸イオンのフラックスと気温指標（氷の酸素同位体比）の間に弱い関係性があることが分かった。非海塩性硫酸イオンのフラックスは気温変動の指標である酸素同位体比が低い（寒冷）ときは気温の低下に伴って増加し、酸素同位体比が高い（温暖）時は気温の増加に伴って増加する傾向があった（図３a）。さらに、寒冷期に注目すると、非海塩性硫酸イオンと非海塩性カルシウムイオンのフラックスの間に相関関係があることが分かった（図３b）。この結果から、寒冷期の非海塩性硫酸イオンの起源として、従来考えられていた海洋生物起源よりも、南米から鉱物ダストとして飛来する石膏（$CaSO_4$）が大きな割合を占めることが示唆された。これは、第一期ドームふじアイスコアの電子顕微鏡解析で示された氷期に $CaSO_4$ 粒子が多い、という結果とも整合的である（Iizuka et al., 2012）。

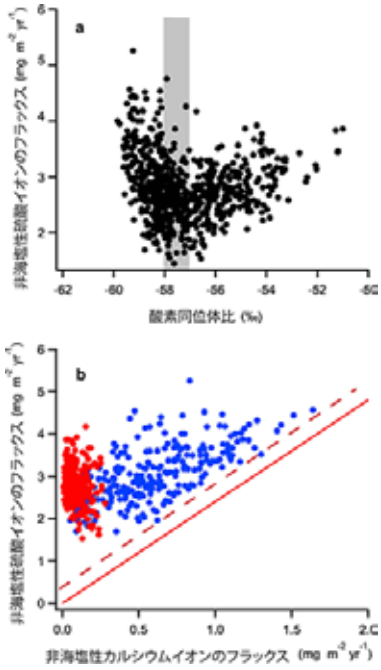


図３　ドームふじ第二期コアの硫酸イオンデータ。　a）非海塩性硫酸イオンと気温指標の関係　b）非海塩性硫酸イオンとカルシウムイオンフラックスの相関

さらに、非海塩性硫酸イオンのフラックスから陸域由来のものを差し引くことで、硫化ジメチル（DMS）由来の非海塩性硫酸イオンのフラックスを見積もった（図４）。その結果、海洋生物起源の硫酸イオンのフラックスは間氷期に高く、氷期に低い値を示した。同じ計算方法でドーム C アイスコアのイオンデータから計算してみると、ドームふじと同様の結果であった。つまり、先行研究（ドーム C）では、非海塩性硫酸イオンのフラックスが氷期・間氷期サイクルを通じて一定に見えたのは、氷期の海洋（DMS）起源の硫酸イオンの減少を陸起源の硫酸イオンの増加が打ち消しあった結果であると考えられる。

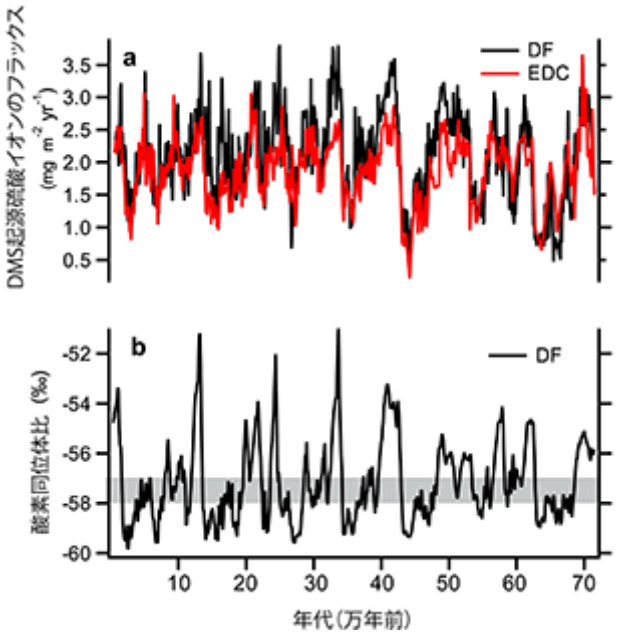


図４　ドームふじ第二期コアの海洋起源硫酸イオンフラックスデータ

３－２．異なる南極アイスコア間の地域差に関する研究成果（Oyabu et al., 2020）

Oyabu et al. (2020)では、南極内陸のドームふじとドームＣアイスコアに含まれる微粒子のサイズや形状、化学組成を電子顕微鏡によって測定し、イオン濃度と組み合わせて解析した結果、最終氷期（約２万年前）にドームふじに降下したダスト（陸域を起源とする微粒子）がドームＣよりも約３倍も多かったことを明らかにした。また、同時期にドーム Ｃ に飛来したダストの方が小さく扁平であることから、より遠くから運ばれてきたこともわかった。これらの結果は大気大循環モデルによるシミュレーション（Ohgaito et al., 2018）とも整合的であり（図５）、その原因は、氷期のダストの主な起源である南米南部のパタゴニアからの輸送距離の違いであると考えられる。つまり、南極の周りでは時計回りの大気循環があるため、パタゴニアからのダストの飛来量がドームＣよりもドームふじの方が多かったことが考えられる。また、ダストに占める硫酸カルシウム（$CaSO_4$粒子）の割合は、過去２万年間にわたってドームふじの方がドームＣより高かったこともわかった。

これらの結果は、Goto-Azuma et al., (2019）で示されている最寒期における非海塩性硫酸イオンのフラックス増加の説明としても整合性がある（図３）。ドームＣにおいては、このような最寒期においても非海塩性硫酸イオンフラックスには明らかな増加は見られないからである。

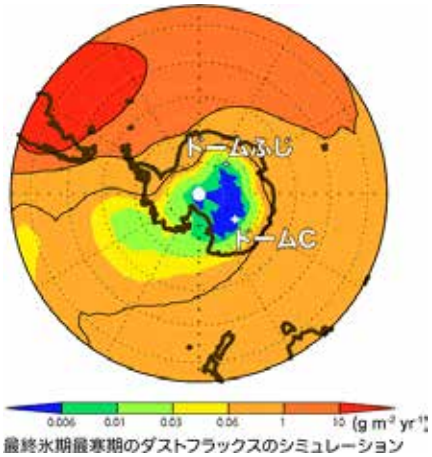


図５　最終氷期のダストフラックスシミュレーション

３－３．硫酸のアタカマ砂漠起源仮説：硫黄安定同位体比の研究成果（Uemura et al., 2022）

3-1 で述べた、Goto-Azuma et al. (2019) では、氷期には陸域の硫酸カルシウム（石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）や無水石膏（$CaSO_4$））が硫酸エアロゾルの起源であった可能性が提唱された。一方で、地球表層全体を見ると平均的には陸域の硫酸カルシウム存在量は非常に低く、「氷期に陸域からの硫酸エアロゾルの供給が多いとすれば、その供給源はどこなのか？」は未解明であった。

そこで、Uemura et al. (2022) では、南極ドームふじアイスコアの硫酸エアロゾルに含まれる硫黄の安定同位体比（$\delta^{34}S$）を分析した。硫黄同位体比は起源によって異なる値を取るため、起源の推定に活用できる。

測定の結果、硫黄同位体比は、現在の温暖な気候では海洋生物起源の DMS の値と一致するのに対し、寒冷な氷期に向かうにつれて低い値を持つことを発見した（図６）。この結果は、氷期には $\delta^{34}S$ が低い特徴を持つ陸域起源の硫酸エアロゾルの供給量が増加したことを示している。逆に、温暖期には $\delta^{34}S$ が高い海洋生物活動起源の硫酸エアロゾルの供給量が多くなっており、その $\delta^{34}S$ 値は海洋生物活動起源(DMS)と近い値をとっている(Uemura et al., 2016)。したがって、南極の硫酸エアロゾルの沈着量が、氷期・間氷期サイクルにおいて比較的安定している原因は、陸域起源の増加と海洋生物起源の減少のバランスがもたらした結果であると説明と整合的なデータといえる。

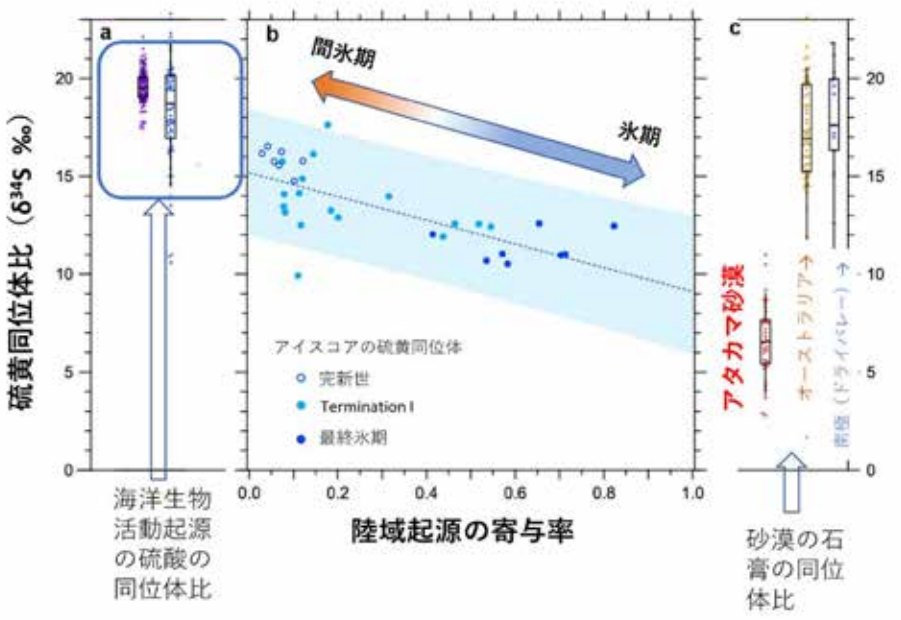


図６　ドームふじコアの硫黄安定同位体比の分析結果。温暖な完新世において $\delta^{34}S$ は海洋生物活動起源(DMS)と近い値を示す。寒冷に（かつ Ca^{2+}が増える）なるにつれ、$\delta^{34}S$ は低い値を示す。寒冷期の陸域起源のエンドメンバーとしてはアタカマ砂漠のデータが最も近い値を示している。

さらにこの図６は、「氷期に増加した陸域起源の硫酸エアロゾルはどこから飛来したのか？」について重要な示唆を与えている。今回のデータから、硫酸イオン/カルシウムイオン比が地表の平均値よりも異常に高いことが分かった。このことは、石膏などの硫酸カルシウムが豊富にある地域が起源であることを示唆している。降水がある地域では、地表の石膏は降水によって、地下水などに少しずつ溶出する。しかし、降水量が少ない砂漠のような乾燥した地域では、石膏は溶出せずに地表に偏在している。そこで、南半球の様々な乾燥地域の石膏を比較・検証したところ、南米のアタカマ砂漠の高地に存在する石膏が、硫黄同位体比、氷期の南極ドームふじアイスコアの化学的特徴と一致することが分かった（図６の $\delta^{34}S$ 寒冷期の値を外挿し、陸域起源寄与率が１の $\delta^{34}S$ 値を見ると、アタカマ砂

漠のデータが最も近い値を示す）。つまり、従来ダスト起源として最重要な起源地域と考えられていたパタゴニアではなく、より低緯度かつ高標高のアタカマ砂漠地域が水溶性エアロゾルの起源地域としては重要な可能性を示している。

この「アタカマ砂漠起源仮説」は、現状のデータからは他の地域からの寄与を完全に否定することはできないものの、氷期には遠く離れた砂漠表面に存在する水溶性の物質（水溶性塩）が南極氷床に飛来していたことを示唆している。したがって、南極アイスコアのイオンデータを解釈する際には、これまで軽視されてきた遠方の砂漠起源の寄与を考慮する必要があることを示した点で画期的であるといえる。

さて、これらのアイスコアのエアロゾル研究で、良くある質問について追加で説明をしておきたい。混乱の 1 つの原因は「不溶性ダスト」と「水溶性エアロゾル」との区別である。前者は、主として鉱物微粒子であり、同じく融解試料中の微粒子をレーザーやコールターカウンター等で分析したものである。多くの研究で「ダスト」と称される場合は前者であり、図 5 のような GCM で計算されるダストもここでいう「不溶性ダスト」である。後者は、コアを溶かした時に溶液に溶けているイオン種の濃度に基づいている（アイスコア研究では伝統的に融解試料のイオン濃度をイオンクロマトグラフィーで分析する）。南極での不溶性ダストの沈着量は、氷期サイクルで 10〜25 倍も変動している。図 3 では硫酸エアロゾルと気温に関係性がある、と述べたが、硫酸エアロゾルフラックスの変動量自体は 2 倍程度で大きくはない。そもそも、「水溶性エアロゾル」が濃度情報として保存されている古気候アーカイブは、おそらく氷床コアだけである。海や湖では大気中の水溶性成分は、巨大な水のリザーバーで緩衝されるので変動記録は残らないからである。当然、「不溶性ダスト」と「水溶性エアロゾル」は起源地域が同一である必然性は無い。

3−3 の Uemura et al. (2022)で議論している「アタカマ砂漠起源仮説」は、「水溶性の硫酸エアロゾル」に注目している。従来の研究では、陸域起源の硫酸（つまり、$CaSO_4$）を無視していた。これは、陸域起源 SO_4 の割合(m=[陸域 SO_4^{2-}] / [非海塩 Ca^{2+}]が地球平均では極めて低く、Ca 濃度から推算した陸域 SO_4 の割合が無視できると考えられていたからである。降水が一定量あれば表層からは水溶性成分は流出するので、ある意味当然ともいえる。しかし、実際には陸域起源 SO_4 の割合は空間的に極めて不均一であり、砂漠などの乾燥地域には高い割合で偏在している（図 7）。図 6 は、このような乾燥地域の $CaSO_4$ の水溶性エアロゾルの起源の中でも、アタカマ砂漠の $\delta^{34}S$ がドームふじアイスコアの $\delta^{34}S$ データと整合的であるということを示している。

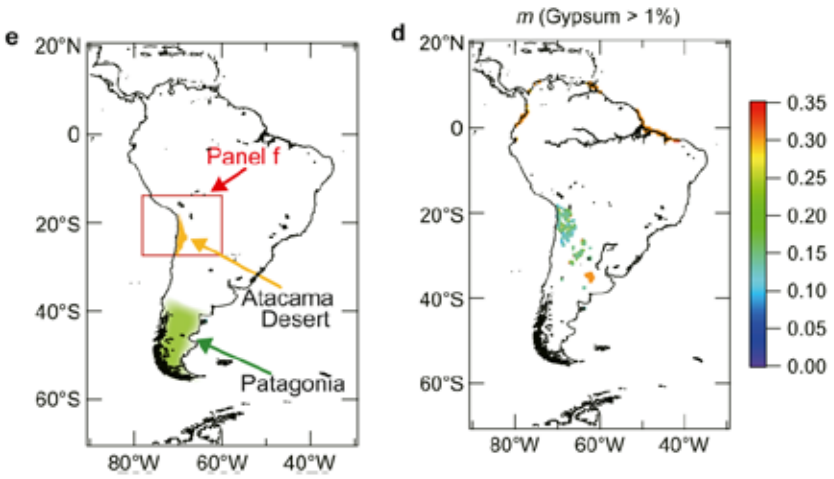


図 7　左図：アタカマ砂漠とパタゴニア地域の位置。右図：陸域起源 SO_4 の割合(m=[ter-SO_4^{2-}] / [nss-Ca^{2+}] の分布)。（両図とも Uemura et al. 2022）。

4．今後の課題

南極アイスコアのデータは 1990 年代がから飛躍的に高品質なものが多数出版されてきた。新しいアイスコア試料としては、100 万年を超える最古の氷の採取を目指すドームふじ第三期コアの掘削が始まった。2 で紹介した気温復元に関しては、南大洋と深層水循環，炭素循環の相関関係はいつ頃から始まったのか？4 万年周期が卓越していた時代にも同じような関係性は維持されるのか？等、新しい謎の解明が期待される。エアロゾルの研究については、定量的な解釈とメカニズムの解明について多くの余地を残している。例えば、上記のようにヨーロッパの研究グループと日本の研究グループでは、解釈が一致していない点がその実例である。不溶性ダストと異なり、水溶性エアロゾルについては、起源や反応を考慮すると大気化学的な取り扱いが必要である。例えば、Oyabu et al. (2020)では、SO_4 と海塩などの大気中輸送過程での反応を議論している。一方で、Goto-Azuma et al. (2019)及び Uemura et al. (2022)では $CaSO_4$ は輸送過程での反応では無く、起源地域からの輸送であると解釈している。鉱物種を考慮し、さらに大気化学反応も含めた GCM によってメカニズムの研究が進むことも期待される。

謝辞：本稿の作成に協力をしていただいた国立極地研の東久美子教授、大藪幾美研究員に感謝いたします。

参考文献

Erb et al. (2018), *Nature Communications,* 9:1361, DOI: 10.1038/s41467-018-03800-0

Goto-Azuma, K., Hirabayashi M., Motoyama H., Miyake T., Kuramoto T., Uemura R., Igarashi M., Iizuka Y., Sakurai T., Horikawa S., Suzuki K., Suzuki T., Fujita K., Kondo Y., Hattori S., Fujii Y. (2019) Reduced marine phytoplankton sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials, *Nature Communications*, DOI：10.1038/s41467-019-11128-6

Hasenclever et al. (2017), *Nature Communications,* 8:15867, DOI: 10.1038/ncomms15867

Iizuka, Y., R. Uemura, H. Motoyama, T. Suzuki, T. Miyake, M. Hirabayashi, and T. Hondoh (2012), Sulphate-climate coupling over the past 300,000 years in inland Antarctica, Nature, 490, 7418, pp 81-84, DOI： 10.1038/nature11359

Ohgaito, R., Abe-Ouchi, A., O'ishi, R., Takemura, T., Ito, A., Hajima, T., Watanabe, S., Kawamiya, M. (2018), Effect of high dust amount on surface temperature during the Last Glacial Maximum: a modelling study using MIROC-ESM. Climate of the Past, 14(1), 1565–1581. http://doi.org/10.5194/cp-14-1565-2018

Oyabu,Y. Iizuka,K. Kawamura,E. Wolff,M. Severi,R. Ohgaito,A. Abe-Ouchi,M. Hansson (2020), Compositions of Dust and Sea Salts in the Dome C and Dome Fuji Ice Cores From Last Glacial Maximum to Early Holocene Based on Ice-Sublimation and Single-Particle Measurements, Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 125, 4, e2019JD032208, doi: 10.1029/2019JD032208

Stenni, B., Masson-Delmotte, V., Selmo, E., Oerter, H., Meyer, H., Röthlisberger, R., Jouzel, J., Cattani, O., Falourd, S., and Fischer, H. (2010): The deuterium excess records of EPICA Dome C and Dronning Maud Land ice cores (East Antarctica), Quaternary Science Reviews, 29, 146-159, 10.1016/j.quascirev.2009.10.009

Uemura, R., V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, A. Landais, H. Motoyama, and B. Stenni (2012), Ranges of moisture-source temperature estimated from Antarctic ice cores stable isotope records over glacial–interglacial cycles, Clim. Past, 8, 1109–1125, 2012, https://doi.org/10.5194/cp-8-1109-2012

Uemura, R., K. Masaka, K. Fukui, Y. Iizuka, M. Hirabayashi, H. Motoyama (2016), Sulfur isotopic composition of surface snow along a latitudinal transect in East Antarctica, Geophys. Res. Lett., 43, 11, 5878, DOI：10.1002/2016gl069482

Uemura, R., H. Motoyama, V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, K. Kawamura, K. Goto-Azuma, Shuji Fujita, Takayuki Kuramoto, M. Hirabayashi, T. Miyake, H. Ohno, K. Fujita, A. Abe-Ouchi, Y. Iizuka, S. Horikawa, M. Igarashi, K. Suzuki, T. Suzuki & Y. Fujii (2018), Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years, *Nature Communications*, 9, DOI：10.1038/s41467-018-03328-3

Uemura, R., K. Masaka, Y. Iizuka, M. Hirabayashi, H. Matsui, R. Matsumoto, M. Uemura, K. Fujita, H. Motoyama, (2022), Soluble salts in deserts as a source of sulfate aerosols in an Antarctic ice core during the last glacial period, *Earth and Planetary Science Letters*, 578, 117299, DOI：10.1016/j.epsl.2021.117299

Vimeux, F., Cuffey, K. M., and Jouzel, J.（2002）: New insights into Southern Hemisphere temperature changes from Vostok ice cores using deuterium excess correction, Earth and Planetary Science Letters, 203

解説

植村　立 (2019), 南極アイスコアの安定同位体比解析による周辺海域の温度復元, Isotope News, 762, pp18-21, https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201904_TRACER_UEMURA.pdf

植村　立, 「アイスコアから復元した海水温と CO_2 濃度の変動」新学術『熱−水−物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床』ニュースレター　vol.2: http://grantarctic.jp/products/archives/NewsLetter02_compressed.pdf

プレスリリースのリンク

Goto-Azuma et al. (2019)の解説：https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20190826-2.html

Oyabu et al. (2020)の解説：https://www.hokudai.ac.jp/news/200310_pr.pdf

Uemura et al.（2018）の解説：https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20180307.html

Uemura et al.（2022）の解説：https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/upload/20211213_env.pdf

アイスコアの年代構築と応用

大藪幾美[1]、川村賢二[1,2,3]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]海洋研究開発機構

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）

1．はじめに

アイスコアや海底堆積物、石筍、樹木、サンゴなど、様々な試料から地球の気候変動の変遷を復元することができるが、復元された気候変動イベントの時間（変化のタイミングや継続時間などを含む）がわからなければあまり意味がない。そのため、古気候復元においてまず重要となるのは、試料に対して正確な年代を付与することである。例えば、ドームふじコアから復元した南極の温度と、南大洋の海底堆積物から復元した表面海水温度を比較する場合、両者の年代を絶対的に正しくするか、どちらかの年代モデルに統一する必要がある（本冊子の「海底コアと氷床コアの年代精密対比」（松井ら）を参照）。もちろん両者の年代モデルが絶対的に正確であることが望ましいが、実際問題としては難しいケースが多いため、年代統合を試みる場合が多い(Matsui et al., 2022)。一方、地球の軌道要素（計算で正確に年代が求まる）との関係性を調べたり、気候モデルへの入力データとする場合には、年代の絶対値が正しいことが重要である。

我々は、本領域研究の氷床班において、アイスコアの気体分析手法を確立しドームふじ（DF）氷床コアから高精度の気体データを取得した（Oyabu et al., 2020, 2021）。それを、近年開発されてきた数値モデルと組み合わせて年代軸を構築する新たな手法を開発し、従来のドームふじ氷床コアの年代軸を高精度化することに成功した（Oyabu et al., 2022）。「年代軸」という古気候復元の重要課題を達成したほか、取得したデータにより過去の温度や大気組成、氷床に関する研究成果も得られた。

2．これまでのドームふじ氷床コア年代（DFO-2006）と問題点

アイスコアの年代には「氷年代」と「空気年代」がある（図 1）。氷床上部のフィルン（雪層）には通気性があるため、空気は氷床表面ではなく数十〜百 m も下で気泡として封じ込められる。一方で、気泡が形成される深度の氷は、堆積してから数十〜数千年の時間が経過しているため、氷と空気には年代差が生じる。この、同一深度における空気と氷の年代差のことを Δage（デルタ・エイジ）という。基本的には、氷年代は涵養量と Thinning（氷床流動による厚さの減少を表す）から求まり、空気年代は氷年代と Δage から求まる。Δage は過去のフィルンの厚さと涵養量の組合せ、または氷年代と Δdepth（同年代の空気と氷の深度差）の組合せより求まる。

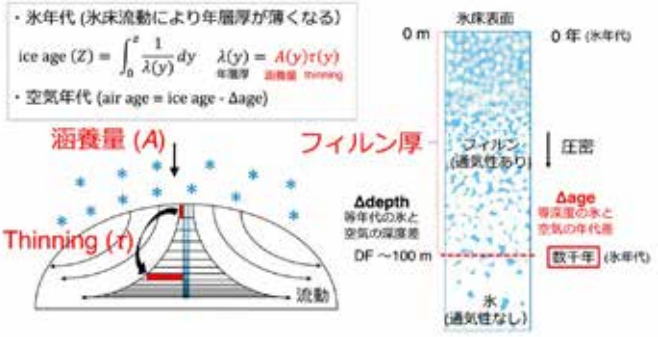


図 1：アイスコアの氷年代と空気年代。

第 1 期ドームふじ氷床コアの氷年代（DFO-2006, Kawamura et al., 2007, *Nature*)は、1 次元氷床流動モデルと涵養モデルを年代マーカーによって制約することにより求められ、空気年代は、フィルンの圧密モデルにより Δage を計算し、氷年代から差し引くことで求められた。他の深層コアと比べた長所としては、8〜34 万年前について、ドームふじコアの $\delta O_2/N_2$ と掘削点の夏期日射量との高相関を利用した年代マーカーが用いられていることである。AICC2012（欧州が掘削した南極の 4 本のコアとグリーンランド NGRIP コアの年代を同時に解くことによる共通年代：Bazin et al., 2013, *Clim. Past*; Veres et al., 2013, *Clim. Past*) と比べて、約 8 万年前以前の DFO-2006 年代の誤差は小さく見積もられた（AICC2012 の 1/2~1/4 程度、±2 千年）。一方で、以下のような問題や改良が望ましい点もあった。（1）過去 8 万年間については年代マーカーが非常に少なく（約 12000 年前の完新世初期と約 41000 年前のラシャ

ンプ地磁気イベントのみ）、グリーンランド氷床コアや南極 WAIS Divide コアの年層カウント年代との不整合が大きい。（2）Δage の推定に用いられたフィルンの圧密モデルで予測した氷期のフィルンの厚さが、コアの窒素同位体比（$\delta^{15}N$）データから推定する値と整合しない。（3）石筍のウラン・トリウム年代との不一致がある（約 9.2 万年前、Fujita et al., 2015, *Clim. Past*）。特に、EDC コアやボストークコアの結果も合わせた考察からは、$\delta O_2/N_2$ と掘削点の夏期日射量の変動の間に位相差（平均またはバラツキ）があり誤差が大きいのではないかといった議論もあり（Bazin et al., 2016, *Clim. Past*）、未解決の問題となっていた。従来の議論における大きな問題点は、$\delta O_2/N_2$ データが氷床コア掘削後の気体の抜けによる分別（下記に詳述）を受けていたため、そもそも氷床内の値を測定できていなかったことにあると我々は考えた。唯一-50℃で保管されてきたドームふじコアの分析により問題を克服できる可能性があったが、そのためには分析手法の革新が必要であった。

3．成果

3－1．高精度気体データの取得

我々は、一つの少量のアイスコア試料から同時に 8 成分を世界最高水準の精度で分析可能な手法を確立し、通常は 2 カ所以上の研究機関で取得される空気成分の同位体比（$\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$, $\delta O_2/N_2$, $\delta Ar/N_2$）と、温室効果ガス濃度（CH_4, N_2O, CO_2）、空気含有量を同時に取得することが可能となった（Oyabu et al., 2020）。本領域期間中に、図 2 に示すデータを取得し、複数の論文を出版した（Oyabu et al., 2021, 2022; Buizert et al., 2021 など）。

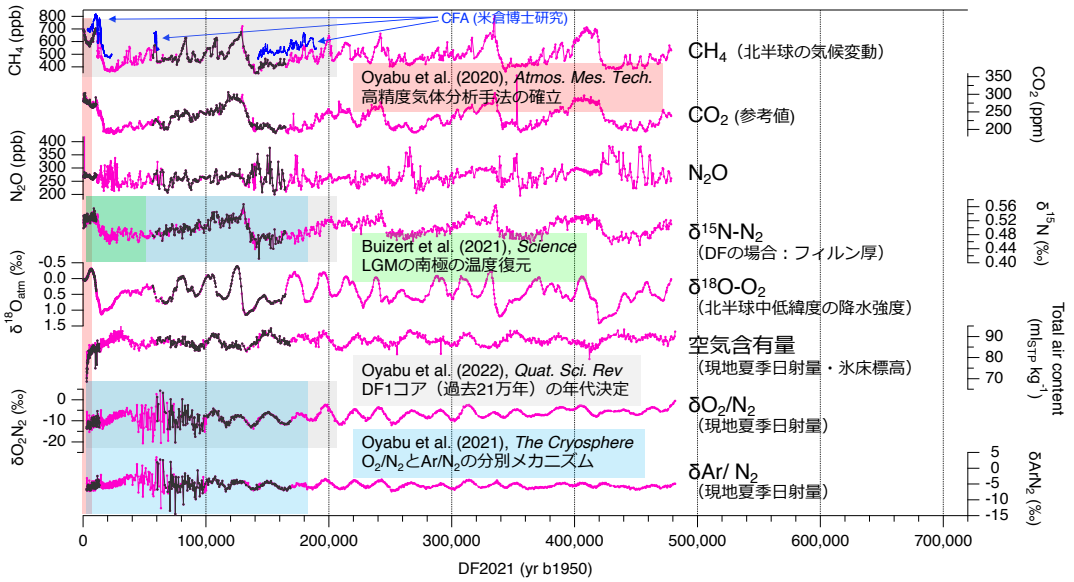


図 2：国立極地研究所で取得したドームふじコアの気体データ（CH_4, N_2O, CO_2 濃度, $\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$, 空気含有量, $\delta O_2/N_2$, $\delta Ar/N_2$）。黒：本領域研究開始前のデータ、ピンク：本領域研究終了時のデータ。

特に、$\delta O_2/N_2$ については、上述した氷床内の値の測定に成功し、年代制約データとしての信頼性が著しく向上した。アイスコアの含有空気の圧力は高いため、コアの保管中に、周囲の大気との圧力差を駆動力として、氷中の分子拡散によって徐々に抜けていく（ガスロス）。その際、O_2 の氷中の透過係数が N_2 より大きいため、O_2 が優先的に抜けることにより、$\delta O_2/N_2$ が低下する。DFO-2006 年代の構築に使用された氷試料は、約-25℃で最大 3 年ほど保管され（当時はガスロスに関する知見がなかった）、ガスロスの影響が大きかったため、保存期間に応じて大きく補正されていた（図 3a）。我々は、分析手法の改良により以前の 1/3 以下の試料量での分析を可能にし、コア試料の外周と内側を切り分ける実験や、外周の切除をミリ単位で調整する実験を繰り返した。その結果、-50℃で約 20 年間保管されたコアで、ガスロスの範囲がコア試料の外側から 8 mm であることや、それより内部には氷床内の $\delta O_2/N_2$ が現在でも保存されていることを突き止めた。こうして、世界で初めて、ガスロスの影響を受けていない $\delta O_2/N_2$ データが得られ、万年スケールの変動が支配的あることや（図 3a，従来のデータに見られた不規則な変化はガスロスによるもので、新たなデータには短周期の変化は小さい）、その変動が掘削点の

夏至日射量のパターンと酷似していることを示した（図 3b, Oyabu et al., 2021, 2022）。さらに、Oyabu et al. (2021)では、$\delta O_2/N_2$ と $\delta Ar/N_2$ の氷床内部での空気取り込みやクラスレート生成における分別を明らかにし、拡散モデルを用いて氷床内の気体の透過係数を制約することにも成功した。

年代構築の観点からは、$\delta O_2/N_2$ による絶対年代の制約に加え、窒素ガスの同位体比（$\delta^{15}N$）によるフィルンの厚さの制約、メタン濃度を用いた精密な Δage の制約などが特筆され、多種の気体データ（図 2）を取得したことで、従来にない多様な制約条件を駆使した年代構築が可能となった。

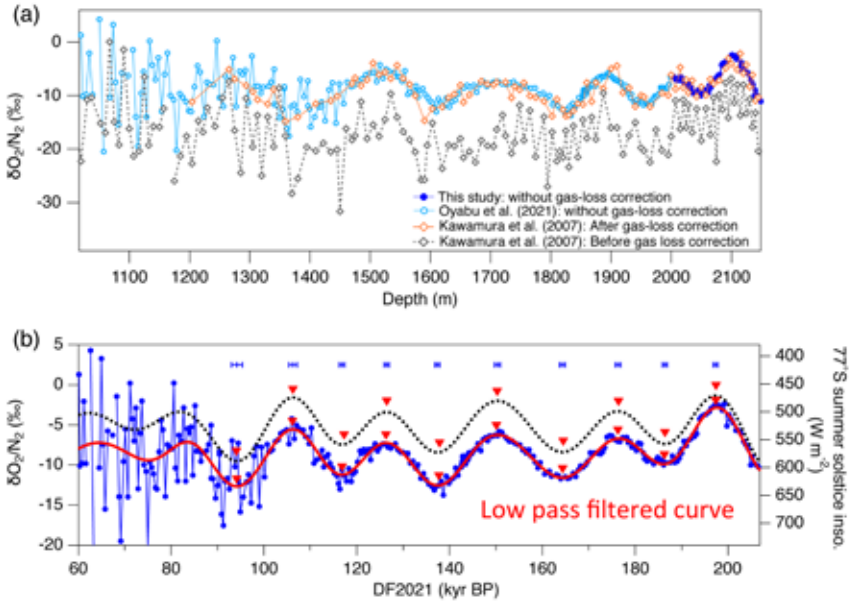


図 3：ドームふじコアの $\delta O_2/N_2$ データ。(a) DFO-2006 で使用されたデータと DF2021 で使用したデータの比較。(b) DF2021 使用データと掘削点の夏至日射量曲線。DF2021 年代モデルでは、フィルタをかけた $\delta O_2/N_2$ 曲線の極大極小値を日射量年代と同期させた。

3－2．DF2021 年代モデルの構築

本研究では、年代マーカーを向上したのみならず、年代の計算手法も新たに構築した。土台となったのは、欧州の AICC2012 年代で初めて用いられたベイズ統計学手法に基づく年代計算モデルであり、本研究ではその発展形「Paleochrono（パレオクロノ）」（Parrenin et al., 2021）を用いた。このモデルでは、事前確率（prior）として涵養量、Thinning、フィルンの厚さ（図 1）、の各深度プロファイルを与え、様々な制約条件を満たす事後確率（posterior, 上記の 3 種の深度プロファイル）を得ることにより、氷年代と空気年代が同時に求まる。制約条件の種類は、深度に対する氷年代や空気年代（age horizon）、2 深度の間の年代区間（age interval）、Δdepth であり、ドームふじコアとグリーンランドコアや南極 WAIS Divide コアとの年代マッチング（火山シグナルやメタン濃度）や、過去の日射量の指標としての $\delta O_2/N_2$、フィルン厚の指標としての $\delta^{15}N$ から与えられる。6.5 万年前以前の Δdepth の制約にはバイポーラー・シーソーの仮定も用いられた（大西洋子午面循環の急変によるメタン濃度と南極の気温（水同位体比）の変化の同時性の仮定）。

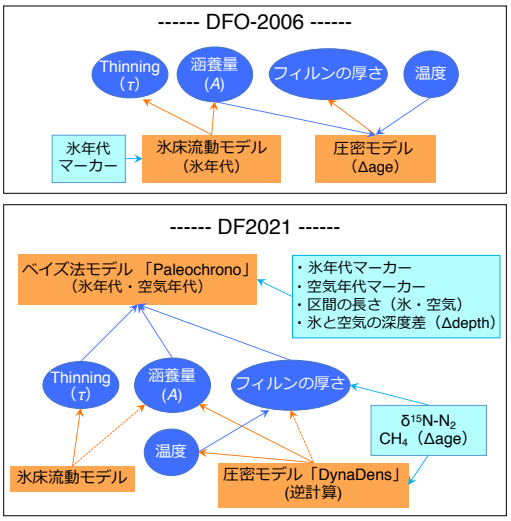


図 4：DFO-2006（上）と DF2021（下）の構築手法（計算方法）の概念図。

多種多様な制約情報を統合して最適年代を推定する Paleochrono は大変強力なツールだが、それ自体は物理モデル（氷床モデルやフィルン圧密モデルなど）を含まないため、事前確率とその推定誤差が妥当であることが重要である。そのため、本研究では複数の物理モデルと Paleochrono を併用し（図 4）、イタレーションを行うことにした（結果的に Paleochrono は 2 回走らせた）。1 回目の Paleochrono の事前確率としては、涵養量と Thinning は 1 次元氷床流動モデル（Parrenin et al., 2007, *Clim. Past*）に

よる順計算で求め、フィルン厚は $\delta^{15}N$ の重力分離成分（温度分離成分は先行研究のフィルン圧密・温度拡散モデルの結果により補正, Buizert et al., 2021）から静水圧平衡を仮定して求めた。

次に、1 回目の Paleochrono の結果をもとに、フィルンの圧密プロセスと整合的な涵養量および $\delta^{15}N$ の温度分離成分のヒストリーを求めた。そのために、Paleochrono の制約に用いた Δdepth と 1 回目の事後確率（氷年代）から Δage を計算し、$\delta^{15}N$ データとともにフィルン圧密モデル（DynaDens model, Buizert et al., 2021）に与えることで、逆計算により過去の涵養量とフィルンの温度プロファイルを求めた。これらの結果を、2 回目の Paleochrono の事前確率の作成に利用することで、雪氷物理学的に整合的な空気年代と氷年代を同時に求めることができた。このような、ベイズ法年代モデルとフィルン圧密モデルを組み合わせた年代決定は、本研究が初めてである。

年代制約の情報を表 1 にまとめた。DFO-2006 では 13 点の年代制約が使用されたが、DF2021 では 274 点もの年代制約を使用した。0〜6 万年前までは WAIS Divide 年代とほぼ同期しており、6〜20.7 万年前は他の氷床コアや他の年代決定（石筍のウラン・トリウム年代等）から独立した年代である。$\delta O_2/N_2$ をはじめとした年代制約と計算手法の飛躍的向上により、6 万年前以前の氷床コア年代では最高精度だと考えられる。DF2021 を信頼のおける石筍のウラン・トリウム年代と比較したところ、0〜6 万年前は 240 年以内、6〜20.7 万年前は 1000 年以内で一致した（図 5）。ウラン・トリウム年代の精度は約 15 万年前までは DF2021 より高いとみられることから、ドームふじコアの $\delta O_2/N_2$ と日射量との位相差をゼロとする仮定が有効であることが示された。また、ウラン・トリウム年代（半減期約 8 万年を利用）は最終間氷期より過去に遡ると精度が落ち、試料間の年代値が合わないなどの問題も現れるが、$\delta O_2/N_2$ による年代制約の精度は試料の年代に依存しないことから、より古い時代では全ての古気候指標の中で最高精度の年代を提供できる可能性が高い。

表 1：DF2021 年代に使用した各種の制約

制約の種類	アイスコアのデータ	制約方法	区間
絶対年代	^{10}Be	^{14}C 年輪年代への同期	完新世
絶対年代	$\delta O_2/N_2$	日射量年代への同期	9〜21 万年前
年代区間（氷）	火山噴火シグナル（DEP）	WAIS Divide コアとの同期	3.1 万年前まで
年代区間（空気）	CH_4	GICC05 年代モデルとの同期	3〜6 万年前
氷と空気の等年代の深度差（Δdepth）	水同位体比と CH_4	6 万年前までは WAIS Divide と同期、それ以前はバイポーラー・シーソーを仮定	全体
フィルンの厚さ	$\delta^{15}N$	重力分離成分を静水圧平衡により換算（温度分離はフィルン圧密モデルで補正）	全体

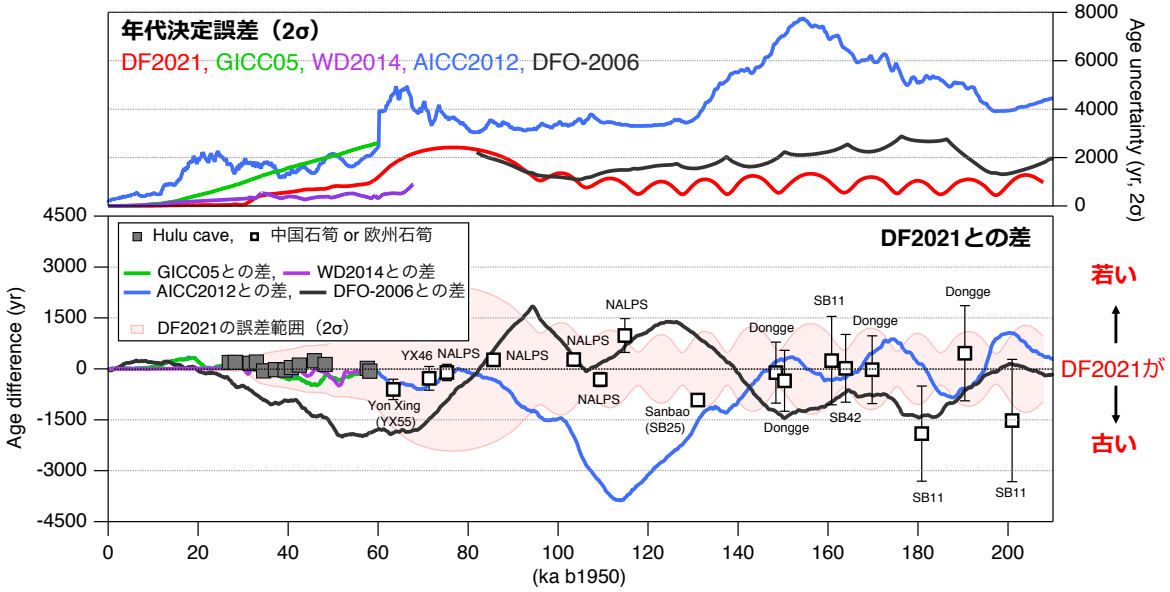


図 5：DF2021 年代の誤差および他の年代との比較。(a) 各年代の誤差（2σ）の比較。(b) DF2021 と他の年代との差。

4．今後の展開

ドームふじコアの全体にわたる年代構築と、同時に得られる多種のデータを用いた古環境復元をさらに進め、ローカルからグローバルまでの気候変動と相互作用の研究を推進していきたい。具体的な課題の例を以下に挙げる。

- ドームふじ氷床コア年代の拡張（最深部、約 72 万年前まで）

  気体分析を最深部（約 3028m）まで進め、DF2021 年代で確立した計算手法を適用。

- 2 つ前の退氷期の氷床崩壊のタイミング

  13.9 万年前に $\delta^{18}O_{atm}$ と CH_4 の急激な変化を見出した。これらは北半球氷床崩壊のシグナルである可能性があり、退氷期の開始のタイミングを制約できる可能性がある。

- 最終間氷期のドームふじの表面温度

  Δage と $\delta^{15}N$ を入力としたフィルンの圧密モデルの逆計算により推定。現在より 0.7～2˚C 程度高いという初期結果を得た。（先行研究より低い）

- 最終氷期最盛期のドームふじにおける氷厚

  Thinning と Δdepth から、現在よりも 150m 程度薄かった可能性を得た。

- ドームふじにおける涵養量（過去 6 万年）
- 希ガスを用いた過去のフィルンにおける気体の混合過程の復元
- 希ガスを用いた過去の全球海水温度の復元
- 酸素濃度変動の復元
- 過去 1 万年の両極半球のメタン濃度の南北勾配の復元
- CO_2 分析手法の確立

主な参考文献

Buizert, C., Fudge, T. J., Roberts, W. H. G., Steig, E. J., Sherriff-Tadano, S., Ritz, C., Lefebvre, E., Edwards, J., Kawamura, K., Oyabu, I., Motoyama, H., Kahle, E. C., Jones, T. R., Abe-Ouchi, A., Obase, T., Martin, C., Corr, H., Severinghaus, J. P., Beaudette, R., Epifanio, J. A., Brook, E. J., Martin, K., Chappellaz, J., Aoki, S., Nakazawa, T., Sowers, T., Alley, R., Ahn, J., Sigl, M., Severi, M., Dunbar, N. W., Svensson, A., Fegyveresi, J., He, C., Liu, Z., Zhu, J., Otto-Bliesner, B., Lipenkov, V., Kageyama, M., and Schwander, J.: Antarctic-wide surface temperature and elevation during the Last Glacial Maximum, Science, **372**, 1097-1101, https://doi.org/10.1126/science.abd2897, 2021.

Kawamura, K., Parrenin, F., Lisiecki, L., Uemura, R., Vimeux, F., Severinghaus, J. P., Hutterli, M. A., Nakazawa, T., Aoki, S., Jouzel, J., Raymo, M. E., Matsumoto, K., Nakata, H., Motoyama, H., Fujita, S., Goto-Azuma, K., Fujii, Y., and Watanabe, O.: Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000years, Nature, **448**, 912-916, https://doi.org/10.1038/nature06015, 2007.

Matsui, H., Ikehara, M., Suganuma, Y., Seki, O., Oyabu, I., and Kawamura, K.: Dust correlation and oxygen isotope stratigraphy in the Southern Ocean over the last 450 kyrs: An Indian sector perspective, Quat. Sci. Rev., **286**, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107508, 2022.

Oyabu, I., Kawamura, K., Kitamura, K., Dallmayr, R., Kitamura, A., Sawada, C., Severinghaus, J. P., Beaudette, R., Orsi, A., Sugawara, S., Ishidoya, S., Dahl-Jensen, D., Goto-Azuma, K., Aoki, S., and Nakazawa, T.: New technique for high-precision, simultaneous measurements of CH_4, N_2O and CO_2 concentrations, isotopic and elemental ratios of N_2, O_2 and Ar, and total air content in ice cores by wet extraction, Atmos. Meas. Tech., **13**, 6703-6731, https://doi.org/10.5194/amt-13-6703-2020, 2020.

Oyabu, I., Kawamura, K., Uchida, T., Fujita, S., Kitamura, K., Hirabayashi, M., Aoki, S., Morimoto, S., Nakazawa, T., Severinghaus, J. P., and Morgan, J.: Fractionation of O_2/N_2 and Ar/N_2 in the Antarctic ice sheet during bubble formation and bubble–clathrate hydrate transition from precise gas measurements of the Dome Fuji ice core, The Cryosphere, **15**, 5529-5555, https://doi.org/10.5194/tc-15-5529-2021, 2021.

Oyabu, I., Kawamura, K., Buizert, C., Parrenin, F., Orsi, A., Kitamura, K., Aoki, S., and Nakazawa, T., The Dome Fuji ice core DF2021 chronology (0 – 207 kyr BP), Quat. Sci. Rev., **294**(15), https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107754, 2022.

Parrenin, F., Bazin, L., Buizert, C., Capron, E., Beeman, J. C., Corrick, E. C., Drysdale, R. N., Kawamura, K., Landais, A., Mulvaney, R., Oyabu, I., and Rasmussen, S. O.: The Paleochrono probabilistic model to derive a consistent chronology for several paleoclimatic sites, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-822, 2021.

南極氷床内陸における広域の表面質量収支とドームふじ周辺の基盤地形

津滝俊[1,2]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）
A02(公募）東南極氷床における表面質量収支の観測誤差評価（代表：津滝俊）

１．雪尺観測による表面質量収支の時空間変動と観測誤差評価

１－１．研究の背景と方法

南極氷床は、降り積もった雪や霜が自重により氷化することによって形成されます。氷床の大きさ（質量）は、主に内陸での雪や霜の堆積（涵養）と、沿岸部棚氷の融解や氷山流出（消耗）のバランスで決まります。涵養量は表面質量収支として、現地観測によって明らかにされます。近年では領域気候モデルの発展により、氷床全域にわたる表面質量収支の時空間変動が明らかになってきました（Mottram et al., 2021）。南極の表面質量収支を高精度で明らかにすることは、南極氷床の質量変化、海水準変動の現状把握や将来予測に不可欠です。領域気候モデルの発展には、表面質量収支の現地観測データを用いた検証が不可欠です（Agosta et al., 2019）。しかしながら、極低温環境での現地観測は非常に困難で、継続的な観測は比較的アクセスが容易な地点に限られています（Wang et al., 2021）。

南極地域観測隊（JARE）では、昭和基地からドームふじ基地に至る約 1000 km の内陸ルートに沿って（図 1a, 1b）、2 km ごとに雪面に埋設した竹竿（雪尺と呼ぶ）を用いて 1991 年から表面質量収支をほぼ毎年継続して観測しています（図 1a）。雪面から雪尺の上端までの長さから求めた雪面高さ変化と表層積雪密度から、表面質量収支を計算します。その結果、表面質量収支は氷床表面地形、及び氷床下の基盤地形と相関関係があることが指摘されています（e.g., Furukawa et al., 1996）。本研究では JARE の内陸ルート上で取得された雪尺データをまとめ、1991 年以降の表面質量収支の時空間変動を明らかにしました。さらに、同ルート上に設置されている雪尺網・雪尺列サイトで 1991 年以降に観測された雪尺データを解析し、雪尺観測による表面質量収支の観測誤差を評価しました。

１－２．結果：表面質量収支の時空間変動

内陸ルート上における表面質量収支は、沿岸部で涵養量が大きく、内陸に向かって減少する傾向を示しました（図 1c）。より小さな空間スケールでは表面質量収支が場所によって増減しています。この結果から、風による積雪の再堆積が表面質量収支の時空間変動を大きくしていることが示唆されました。表面質量収支と氷床の表面傾斜角を比較した結果、表面傾斜角が大きい（急傾斜の）場所では表面質量収支（涵養量）は小さく、傾斜角が小さい（平坦な）場所では表面質量収支が大きい関係が見られました。低温で高密度の空気が高高度（内陸）から低高度（沿岸）へ向かって移動する斜面下降風（カタバ風）は氷床表面地形に沿った重力流であるため、内陸から沿岸へ向かって表面傾斜が急になる地点では流れが加速し、急傾斜から平坦に転じる場所では減速します。そのため、カタバ風が強く吹く急傾斜地の上流側では積雪の削剥が強く、傾斜から平坦に転じる場所では吹き溜まりによる再堆積が起こりやすくなります。実際に、急傾斜地、平坦地では雪面の状態も違っていて、急傾斜地では風によって磨かれたような光沢雪面が、平坦地では積雪の吹き溜まりが確認されました。

次に、雪尺観測による表面質量収支の時系列変化（1991–2018 年）を解析しました。観測期間における表面質量収支の時系列変動を見てみると、全区域において涵養量は微増傾向ではありましたが、年々変動が大きいため有意な関係は見られませんでした（図 2）。観測期間の中で、2009 年、2011 年に顕著な多涵養が観測されました。これは 2009 年 5 月、2011 年 6 月に発生した計 5 回の多量の降雪イベントに起因することが明らかになっています。この多量の降雪は、”大気の川”（Atmospheric River）と呼ばれる、低気圧性の大気循環場に伴う低緯度地域から氷床内陸への湿潤空気の流入が原因であると報告されています（Gorodetskaya et al., 2014）。

1－3．表面質量収支の観測誤差

内陸ルート上にある雪尺網・雪尺列サイトにおいて、1991–2018 年の表面質量収支の時空間変動を明らかにしました。比較的密集して埋設された雪尺サイトにおいても、雪の積もり方に空間的な傾向は見られず、また風向との明確な関係もありませんでした。例えば年間の涵養量が約 27 mm のドームふじ基地では、36 本の雪尺間で常に最大約 30 mm 程度の涵養量の差が観測されました。各サイトにおいて表面質量収支の平均値と雪尺間のばらつきを解析し、表面質量収支の観測誤差を定量的に評価するための知見を得ました。

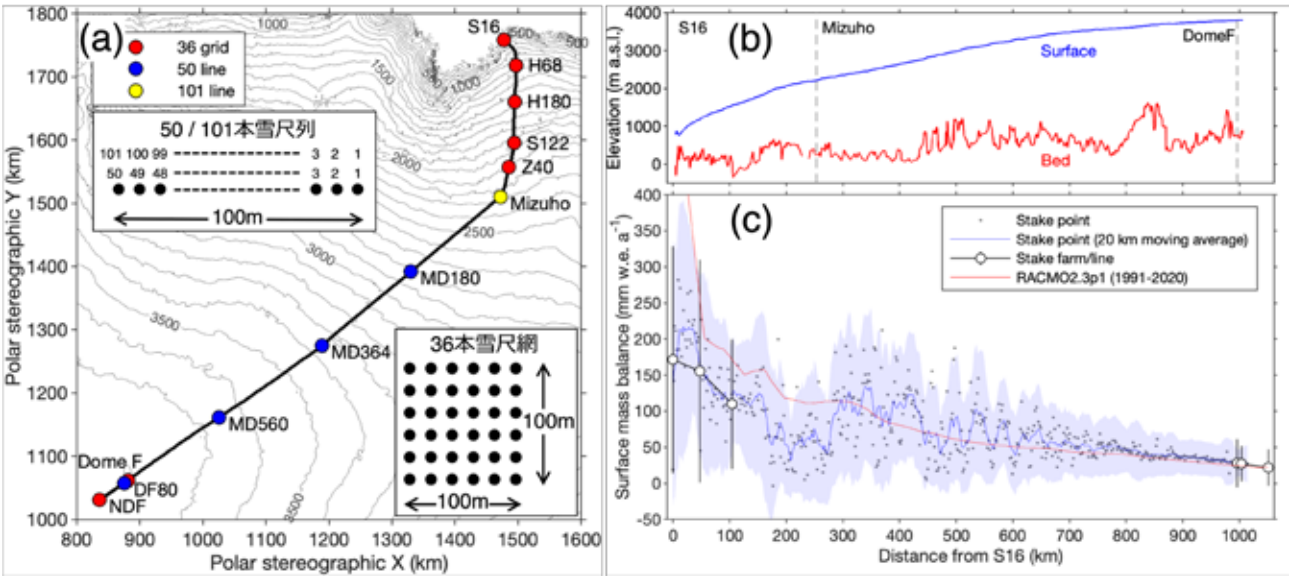


図 1：(a) S16～ドームふじ地域を結ぶ内陸ルート。雪尺網・雪尺列サイトの位置と雪尺配置概要図を示す。(b) 内陸ルート沿いの氷床表面地形と基盤地形。(c) 各ルート上雪尺における 1991–2018 年の表面質量収支の平均値（灰色点）、20 km 移動平均値（青線）、移動平均の標準偏差（青色ハッチ）、及び雪尺網･雪尺列サイトの表面質量収支の平均値と標準偏差（○と縦バー）。赤線は領域気候モデル（RACMO）による同ルート上の表面質量収支。

2．過去 30 年以上の地上氷床レーダ探査によるドームふじ周辺の高解像基盤地形

2－1．研究の背景

南極氷床内陸にあるドームふじ（図 3a）では過去に 2 度の深層アイスコア掘削が行われ、その解析によって過去 72 万年におよぶ地球環境変動史が解き明かされてきました（Kawamura et al., 2017）。氷床内部や底面での氷の状態は、アイスコアが掘削された場所以外では直接確認することができません。氷床内部の層構造や大陸地形を広域に探索する方法としては、レーダ技術が有効です。氷床のレーダ探査では、雪上車や航空機に搭載したアンテナから鉛直下方に向かって電磁波を照射し、氷床の内部層や底面からの反射波を解析して、厚さ 3 km を超える氷床内部の構造を明らかにします。国立極地研究所では、1980 年代から雪上車に搭載する氷床探査レーダを開発･利用し、沿岸から内陸までの氷床内部構造や、

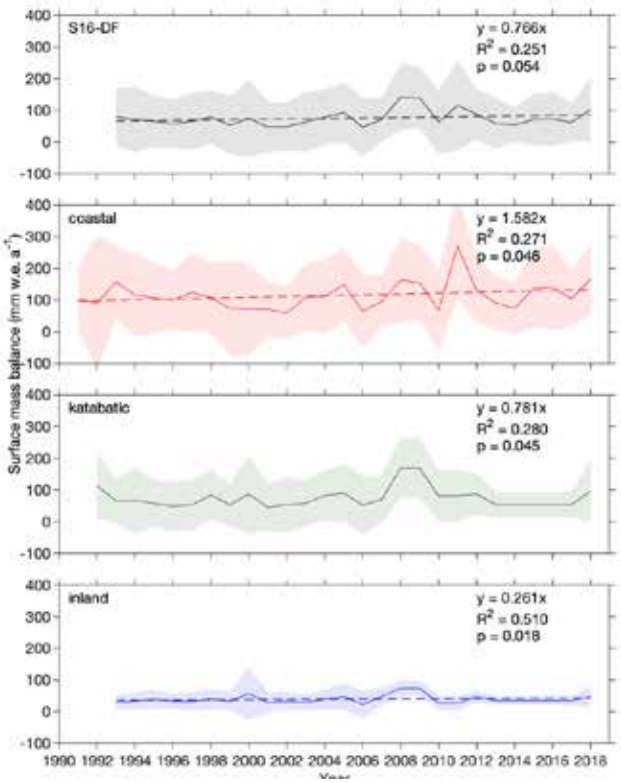
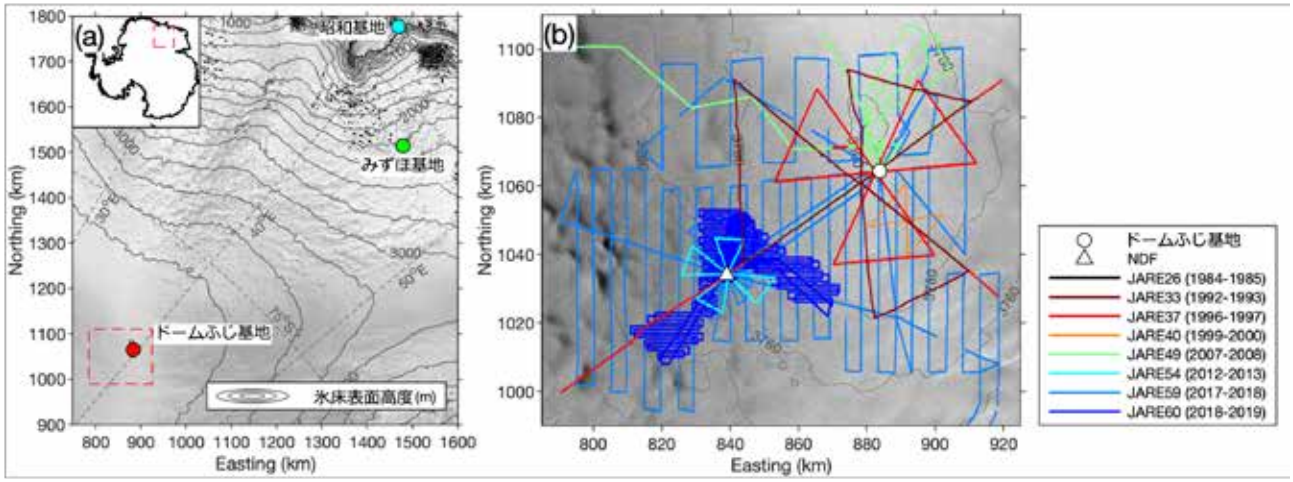


図 2：1991–2018 年の表面質量収支の年々変動。上からルート全域、沿岸部、中腹部、内陸部。



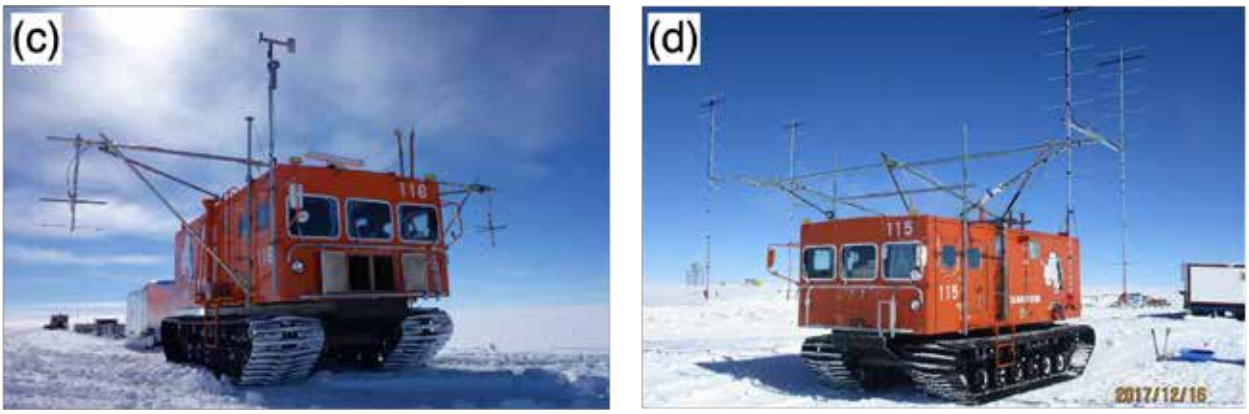


図 3：（a）東南極の昭和基地とドームふじ地域を示す地図。赤枠は（b）で示す領域。等高線は氷床表面高度を 200 メートル間隔で示す。（b）ドームふじ近傍において、第 26〜60 次南極地域観測隊（JARE26〜60）で実施した氷床レーダ探査の測線。等高線は 20 メートル間隔で示す。背景は RADARSAT-1 L1 画像（©CSA, 1997）。（下段写真）氷床レーダアンテナを搭載した雪上車。藤田秀二氏（極地研）撮影。（c）JARE54 で使用した改良前のアンテナ、（d）JARE59 で使用した高い利得を持つ改良後のアンテナ。

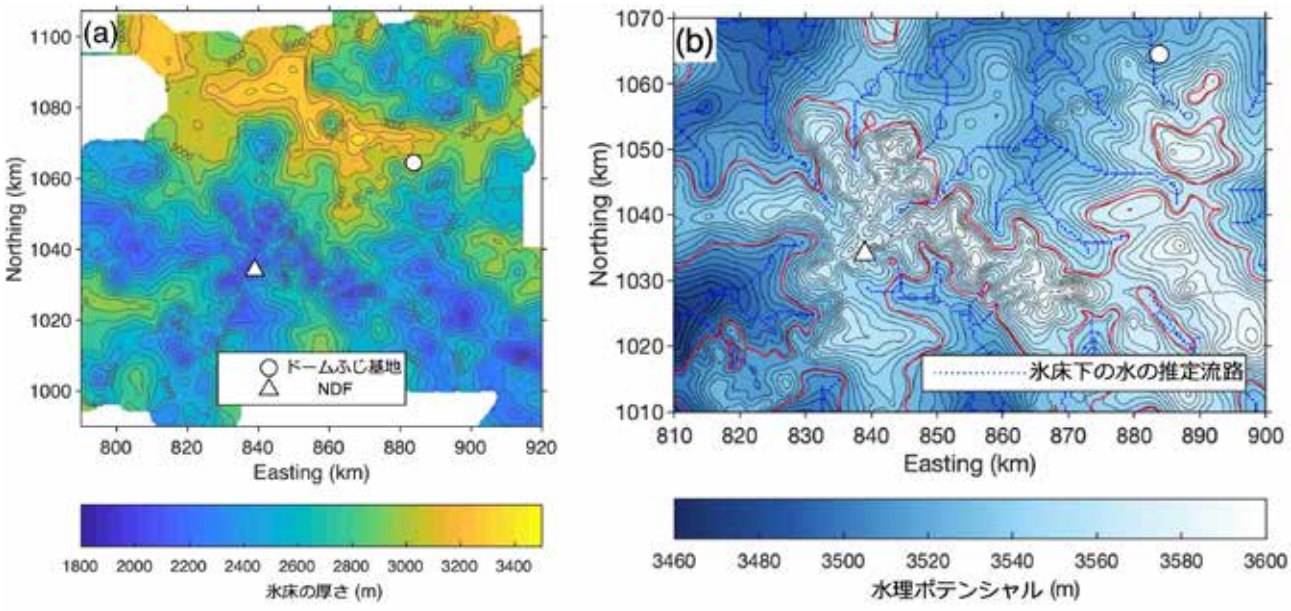


図 4：(a) JARE26〜60 で取得した氷床レーダデータをもとに作成した氷床の厚さの分布。等高線は 100 m 間隔で示す。(b) 氷床の厚さや基盤地形高度をもとに計算した水理ポテンシャル。青点線は、水理ポテンシャル分布から推定された、氷床底面での水の流路。赤線は氷厚 2500 m の分布を示す。

氷床下の基盤地形を明らかにしてきました（e.g., Fujita et al., 1999）。

2022 年から 2029 年にかけて、ドームふじ地域において 3 度目となる深層アイスコア掘削が計画されています。この第 3 期深層掘削計画では、これまでに掘削された氷試料よりも古い、過去 100 万年を超えるアイスコアの掘削を目標としています。そのような古いアイスコアを取得するには、氷床底面での氷の融解や、氷床流動による層構造の乱れがなく、氷が良い状態で保存されている場所で掘削することが前提となります。ところが、氷床の下に広がる南極大陸には広大な平野もあれば山脈もあるため、氷床の厚さや内部層構造は、水平方向にほんの数キロメートル離れただけでも大きく変化します。

本研究では、氷床深部の内部構造や基盤地形を詳細に明らかにするため、氷床レーダアンテナの利得が増えるように改良を行い、高解像度での探査を実施しました。さらに、1990 年代以降に取得されてきた複数の氷床レーダデータ（図 3b）と合わせて解析することにより、ドームふじ地域における詳細な基盤地形図の作成を目指しました。

２－２．研究の方法と結果

本研究では、国立極地研究所が保有する複数の氷床探査レーダを使用しました。雪上車搭載型のレーダアンテナを、高い利得をもつように改良しました（図 3c、3d）。その結果、アンテナから照射される電磁波が、氷床内部のより狭い範囲に集中し、氷床と基盤地形境界の判別の精度が大きく向上しました。この新しいアンテナを用いて、JARE59（2017 年度）では総走行距離 2990 km（総面積約 10000 km^2）、翌年の JARE60 では 2780 km（同 1500 km^2）に及ぶ氷床レーダ探査を実施し（図 3b）、ドームふじ近傍の広い範囲において、氷床内部の層構造や基盤地形を詳細に明らかにしました。

さらに、1990 年代以降に国立極地研究所の氷床レーダがドームふじ近傍で取得してきた全ての氷床の厚さ（基盤地形の標高）に関するデータを再解析して統合することで、高い空間分解能（500 m）を持つ新しい基盤地形図を作成しました（図 4a）。その結果、この地域における氷床の厚さは 1800〜3500 m の範囲で変化していて、航空機レーダ観測を軸とする先行研究の結果と比べて、実際の基盤地形はより急峻であることが明らかになりました。特にドームふじ基地の南方域には、尾根や谷が樹枝状に連なる、複雑な山岳形が広がっていることが分かりました。本研究ではさらに、新しい基盤地形図をもとに、氷床底面に液体の水が存在した場合に、どのように流れるのかをシミュレーションしました（図 4b）。その結果、ドームふじ南方域にある山脈の周辺には、複数の河川状のネットワークと、未発見の新たな氷床底湖や水たまりの存在を示唆する重要な知見を得ました。

２－３．今後の展望とプレスリリース情報

本研究では、基盤地形の判別精度を大幅に向上することで、氷床下に広がる大陸地形を高い空間分解能で明らかにし、ドームふじ基地の南方域には、複雑な形の山脈が広がっていることを明らかにしました。さらに、ドームふじ近傍に未発見の氷床底湖の存在を示唆する知見を得ました。今後の第 3 期ドームふじ氷床深層掘削に向けて、ドームふじ近傍で過去 100 万年を超える古い氷が安定して存在する場所を推定することが不可欠です。本研究で明らかにした詳細な基盤地形は、古い氷が存在する可能性の高い場所を制約する上で、重要な手がかりとなります。JARE63（2021 年度）では、本研究の結果をもとに絞り込んだ掘削候補地域において、さらに詳細なレーダ観測を実施しました。今後はそれらのデータを統合して、最終版となる基盤地形図を完成させ、第 3 期ドームふじ深層アイスコア掘削地点の選定を進める予定です。

本研究の内容は雪氷分野における国際学術誌で出版し（Tsutaki et al., 2022）、国立極地研究所よりプレスリリースを公開しました。「過去 30 年にわたる観測データから南極ドームふじ地域の詳細な基盤地形を解明 〜100 万年超のアイスコア掘削に向けて〜（2022 年 10 月 20 日）」

3. 領域内連携

雪尺観測による表面質量収支研究では、モデル班、固体地球班、及び公募班（課題代表：庭野匡思氏、猪上淳氏、佐藤和敏氏、山本圭香氏、服部祥平氏）と、不定期開催の研究打合せや表面質量収支データ

の提供を通じ、連携体制を構築して研究を進めてきました。固体地球班とはGNSS観測データの解析において連携体制を作り、氷床表面高度に関するデータ論文を出版しました（Tsutaki et al., 2021）。

ドームふじ近傍の基盤地形研究では、第3期ドームふじ深層掘削地点の選定作業においてモデル班との強い連携体制を構築して、氷床レーダデータの解析、基盤地形データの提供、不定期開催の打合せ等によって研究を推進し、主要な成果となる論文（Tsutaki et al., 2022）を出版しました。

参考文献

Agosta, C., Amory, C., Kittel, C., Orsi, A., Favier, V., Gallée, H., van den Broeke, M. R., Lenaerts, J. T. M., van Wessem, J. M., van de Berg, W. J., and Fettweis, X., Estimation of the Antarctic surface mass balance using the regional climate model MAR (1979–2015) and identification of dominant processes, *The Cryosphere*, **13**, 281–296, https://doi.org/10.5194/tc-13-281-2019, 2019.

Fujita, S., Maeno, H., Uratsuka, S., Furukawa, T., Mae, S., Fujii, Y., and Watanabe, O., Nature of radio-echo layering in the Antarctic ice sheet detected by a two-frequency experiment, *J. Geophys. Res.*, **104**, 13013–13024, https://doi.org/10.1029/1999JB900034, 1999.

Furukawa, T., Kamiyama, K., and Maeno, H., Snow surface features along the traverse route from the coast to Dome Fuji Station, Queen Maud Land, Antarctica, *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **10**, 13–24, 1996.

Gorodetskaya, I. V., Tsukernik, M., Claes, K., Ralph, M. F., Neff, W. D., and Van Lipzig, N. P., The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6199–6206, 2014.

Kawamura, K., Abe-Ouchi, A., Motoyama, H., Ageta, Y., Aoki, S., Azuma, N., Fujii, Y., Fujita, K., Fujita, S., Fukui, K., Furukawa, T., Furusaki, A., Goto-Azuma, K., Greve, R., Hirabayashi, M., Hondoh, T., Hori, A., Horikawa, S., Horiuchi, K., Igarashi, M., Iizuka, Y., Kameda, T., Kanda, H., Kohno, M., Kuramoto, T., Matsushi, Y., Miyahara, M., Miyake, T., Miyamoto, A., Nagashima, Y., Nakayama, Y., Nakazawa, T., Nakazawa, F., Nishio, F., Obinata, I., Ohgaito, R., Oka, A., Okuno, J., Okuyama, J., Oyabu, I., Parrenin, F., Pattyn, F., Saito, F., Saito, T., Saito, T., Sakurai, T., Sasa, K., Seddik, H., Shibata, Y., Shinbori, K., Suzuki, K., Suzuki, T., Takahashi, A., Takahashi, K., Takahashi, S., Takata, M., Tanaka, Y., Uemura, R., Watanabe, G., Watanabe, O., Yamasaki, T., Yokoyama, K., Yoshimori, M., and Yoshimoto, T., State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Sci. Adv.*, **3**, 1–13, https://doi.org/10.1126/sciadv.1600446, 2017.

Mottram, R., Hansen, N., Kittel, C., van Wessem, J. M., Agosta, C., Amory, C., Boberg, F., van de Berg, W. J., Fettweis, X., Gossart, A., van Lipzig, N. P. M., van Meijgaard, E., Orr, A., Phillips, T., Webster, S., Simonsen, S. B., and Souverijns, N., What is the surface mass balance of Antarctica? An intercomparison of regional climate model estimates, *The Cryosphere*, **15**, 3751–3784, https://doi.org/10.5194/tc-15-3751-2021, 2021.

Tsutaki, S., Fukui, K., Motoyama, H., Hattori, A., Okuno, J., Fujita, S., Kawamura, K., Surface heights over a traverse route from S16 to Dome Fuji, East Antarctica as measured by kinematic GNSS surveys in 2012–2013 and 2018–2019, *Polar Data Journal*, 5, 144–156, https://doi.org/10.20575/00000033, 2021.

Tsutaki, S., Fujita, S., Kawamura, K., Abe-Ouchi, A., Fukui, K., Motoyama, H., Hoshina, Y., Nakazawa, F., Obase, T., Ohno, H., Oyabu, I., Saito, F., Sugiura, K., and Suzuki, T., High-resolution subglacial topography around Dome Fuji, Antarctica, based on ground-based radar surveys over 30 years, *The Cryosphere*, **16**, 2967–2983, https://doi.org/10.5194/tc-16-2967-2022, 2022.

Wang, Y., Ding, M., Reijmer, C. H., Smeets, P. C. J. P., Hou, S., and Xiao, C., The AntSMB dataset: a comprehensive compilation of surface mass balance field observations over the Antarctic Ice Sheet, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 3057–3074, https://doi.org/10.5194/essd-13-3057-2021, 2021.

リュツォ・ホルム湾における氷河変動と海洋との相互作用
－ラングホブデ氷河での熱水掘削と人工衛星データによる解析－

杉山慎[1]、箕輪昌紘[1]、近藤研[1,2]
[1]北海道大学低温科学研究所、[2]北海道大学環境科学院

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）

１．研究の背景と目的

１－１．研究の背景

南極氷床は地球最大の氷塊であり、その全てが融解すれば海水準が約 58 m 上昇する。最近になるまで、この氷床は比較的安定した状態にあると考えられており、温暖化で降水量が増えて質量が増加する可能性が指摘されていた（e.g. IPCC, 2001）。しかしながら、21 世紀に入って人工衛星による精緻な観測が実現した結果、氷床質量が減少傾向にあることが判明した（Prichard et al., 2009; Rignot et al., 2008; Velicogna and Wahr, 2006）。現在の質量損失速度は、山岳氷河やグリーンランド氷床よりも小さいが（e.g. Edwards et al., 2021）、もし急激な変化が起きれば海水準のみならず、海洋循環や極域生態系に与える影響が懸念される。したがって、南極氷床の変動が地球環境の将来にとって大きな不確定要素のひとつと認識されるようになった（IPCC, 2021）。

南極氷床が近年氷を失っている原因は、表面質量収支（降雪や融解による氷床表面における雪氷の出入り）ではなく、氷床沿岸で生じる棚氷の底面融解とカービング（氷山分離）の増加である（Rignot et al., 2019）。気候変動に伴う海洋環境の変化によって棚氷の底面に海洋から供給される熱が増加し、これまでよりも氷の融解が増えていると考えられている（Pritchard et al., 2012）。棚氷が薄くなれば接地線（接地氷床と棚氷の境界）が後退し（e.g. Rignot et al., 2014）、内陸から流出する氷を押しとどめる力が弱くなる（Gudmundsson et al., 2019）。その結果として溢流氷河（氷床沿岸に見られる比較的流れの速い領域）が加速してより多くの氷を海洋へ流出するため（e.g. Mouginot et al., 2014）、棚氷のみならず内陸にわたって氷の減少が観測されている（Smith et al., 2020）。すでに海に浮いている棚氷が融解しても海水量は変化しないので、海水準の上昇を考える上では、流動加速に伴う氷の流出増加はより深刻な問題といえる。

１－２．研究分野の状況

氷床沿岸で生じる棚氷と溢流氷河の変動は、海洋の影響を受けて起きる。また融解水や氷山が海洋環境に与える影響も重要であるため、氷床・海洋相互作用が南極における重要課題として注目されるようになった。南極の主要な氷河や棚氷の近辺で海洋観測が進められた結果、近年の氷床変化との関係性が明らかになってきた（e.g. Holland et al., 2020）。またいくつかの棚氷ではその下の海水層で観測が実施され、棚氷下の海水特性やその循環、底面融解について直接的なデータが得られている（e.g. Jenkins et al., 2010; Hattermann et al., 2012; Stanton et al., 2013）。しかしながら、これらの研究は大きな変化が報告されている西南極で先行しており、より大きな氷を抱える東南極沿岸では氷河と海洋の相互作用に関する研究は比較的少ない。また氷河の末端部における現地観測は非常に限られているため、氷河の変動や流動をコントロールする各プロセスの理解は進んでいない。例えば、接地線の正確な位置、氷河底面流動、氷底水理水文環境など、氷床底面のプロセスは人工衛星から観測できない。これらは氷床数値モデルの境界条件を決定する重要な要素にも関わらず、その理解は不十分である。

１－３．研究の目的

以上に述べた背景に基づいて氷床班・本課題では、東南極のリュツォ・ホルム湾に流入する溢流氷河の変動とそのメカニズムの解明を目指して研究を実施した。具体的には、2017/18 年と 2021/22 年にラングホブデ氷河において現地観測を実施した他、5 つの溢流氷河の変動を人工衛星データによって解析した。熱水掘削と氷河上での観測によって明らかになった氷河変動メカニズム、衛星解析によって示された過去 30 年間の氷河変動について以下に報告する。

2．研究対象地

2－1．リュツォ・ホルム湾の溢流氷河

リュツォ・ホルム湾は、南極沿岸部の東経 38～40° 付近に位置する。湾内は定着氷に覆われていることが多く、夏期においても海氷が消失することは稀である。しかしながらこの定着氷がほぼ周期的に流出することが知られており（Ushio, 2006）、最近では 2016 年にそのようなイベントが観測された（Aoki, 2017）。本研究で人工衛星データを使った解析の対象としたのは、この湾の東側に流入する 5 つの溢流氷河（白瀬、スカーレン、テーレン、ホノール、ラングホブデ）である（図 1）。近年この地域の氷河に関しては、白瀬氷河の流動と変動（e.g. Nakamura et al., 2022a; 2002b; Aoyama et al., 2016）、氷河と海洋の相互作用（Hirano et al., 2020; Kusahara et al., 2021）、比較的長期的な氷河氷床変動に関する研究 Kawamata et al., 2020; Hattori et al., 2021）などが報告されている。本研究では特に定着氷から受ける影響に着目して、氷河の末端変動、流動速度、表面標高を測定した。

2－2．ラングホブデ氷河

ラングホブデ氷河はリュツォ・ホルム湾の東岸、昭和基地の南方約 20 km に位置する。氷河末端部は数 km にわたって棚氷を形成しており、末端における氷河幅は約 3 km、流動速度は約 120 m a^{-1} である（Fukuda et al., 2014）。氷河の表面標高は 21 世紀に入ってほとんど変化してないが、2007 年以降に末端の前進と流動加速が観測されており、海氷の安定性と氷河変動・流動との関係性が指摘されている（Fukuda et al., 2014）。2010/11 年には第 53 次南極地域観測隊において、接地線付近で熱水を使った棚氷の全層掘削が行われた。その結果、接地域の棚氷下に活発な海洋循環があり、生物が生息することが明らかになっている（Sugiyama et al., 2014）。本研究では、棚氷のより広い範囲、および接地線よりも上流側で熱水掘削を行い、氷河底面環境を明らかにすることを目指した。また氷河変動とそのメカニズムの理解を目的に、氷河上で各種の測定を実施した。

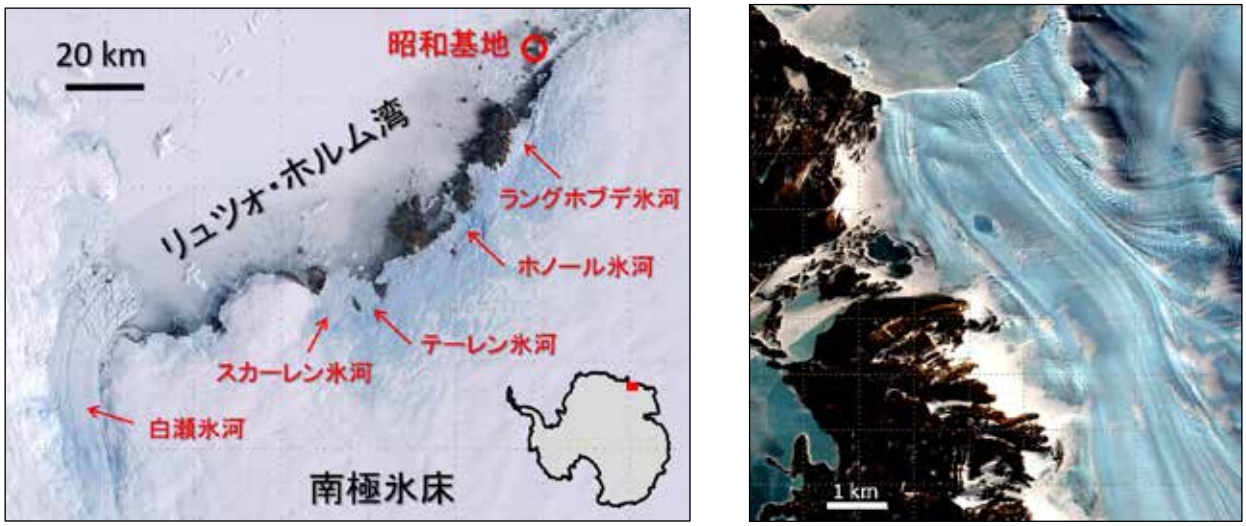


図 1：研究対象地（Landsat LIMA 画像）およびラングホブデ氷河（2017 年 10 月 20 日 Sentinel 画像）。

3．成果

3－1．ラングホブデ氷河における熱水掘削と氷河観測（JARE59、2017/2018 年）

2017 年 12 月から 2018 年 2 月にかけて第 59 次南極地域観測隊に参加して、ラングホブデ氷河における野外調査を実施した。棚氷の 4 か所で全層掘削を行い、厚さ 234～412 m の棚氷下海水層と氷内部で各種の観測を実施した（図 2）（杉山ら，2018）。掘削孔から温度・圧力・塩分センサーと流速計を降ろして測定を行った結果、棚氷下の海洋環境とその循環が明らかとなった（図 3）。海底から棚氷底面に向かって水温と塩分が低下する傾向があり、海底近くでは氷河向き、棚氷の直下では海向きの流れが卓越している。すなわち、塩分が高い暖水が海底に沿って外洋から棚氷下に流れ込み、接地線付近で棚

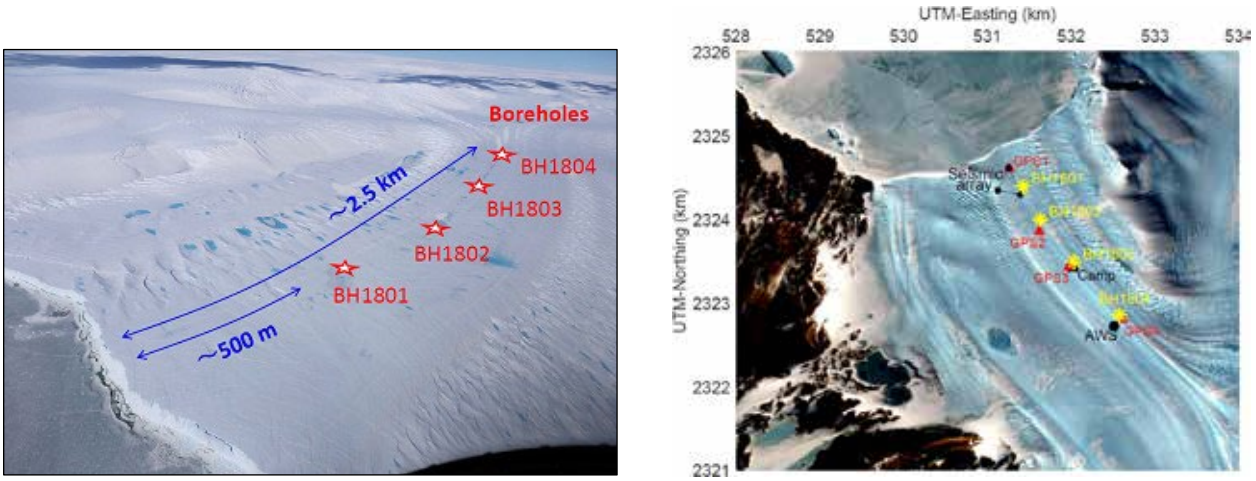


図 2：（左）2017/18 年におけるラングホブデ氷河での掘削地点と、（右）氷河上でのキャンプ地、掘削孔、GPS、自動気象測器、地震計の位置。

氷に接触して底面融解を駆動している。融解水によって塩分が下がった海水は比重が小さいため、棚氷の底面に沿って浮上して海洋へと流出する（図 3）（Minowa et al., 2021）。棚氷下におけるこのような海洋循環はこれまでにも提案されていたが、棚氷全域での観測によってその全貌が明らかになるのは初めてのことである。ビデオカメラを使った海水中と海底の観察では、多種多様な生物が広い範囲で生息していることが示された（山根ら，2018; 山根，2019）。また、掘削孔からサンプラーを挿入して、海底堆積物のサンプリングに成功した。このサンプルを使ってベリリウム同位体測定や遺伝子分析が行い、長期的な氷河変動や棚氷下の生物群集構造について新しい知見が得られつつある。また掘削孔内には複数のサーミスターを設置し、氷の温分布を測定した。これまでに他地点で得られた氷温と合わせて、氷河と棚氷の熱・動力学的を理解する上で重要なデータである。さらに氷河上では GPS を使った流動測定と、地震計による氷震測定を行った。その結果、氷震の頻度と流動速度が海洋潮汐にコントロールされていることが明らかとなった（Minowa et al.， 2019）。この成果は、氷河の流動やカービングのメカニズム解明につながる知見である。

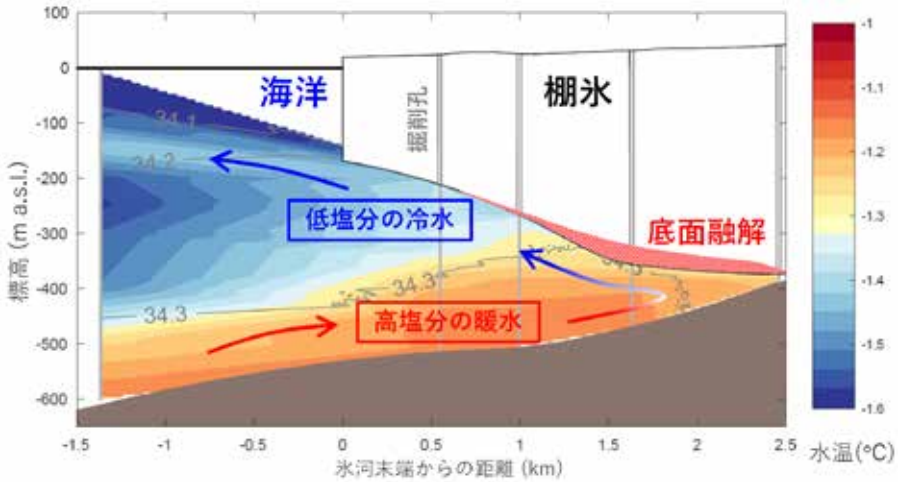


図 3：ラングホブデ氷河の縦断面図と棚氷下の海水特性（カラースケール：水温、等値線：塩分濃度）。

3－2．ラングホブデ氷河における熱水掘削と氷河観測（JARE63、2021/2022 年）

第 63 次南極地域観測隊では、2021 年 12 月から 2022 年 2 月にかけてラングホブデ氷河にて観測活動を行った。この観測ではこれまでよりも上流側に焦点をあて、ラングホブデ氷河では初めて接地線よりも上流側で深さ 515 m の全層掘削に成功した（図 4、Site 1）（杉山ら，2022）。南極の溢流氷河における接地域での底面観測は例が少なく，接地線のごく近傍では観測例がない。この掘削孔を使って、氷河底面における水圧変動の測定を行った。また氷河底面に対する氷の滑りと微振動を測定するために、加速度計を内蔵した底面すべり測定装置を開発して使用した。この装置は氷河底面に突き刺した円筒状の筐体が、氷の流動によって受ける傾きと振動を、100 Hz のサンプリング周波数で測定するものである（図 5）（近藤ら，2022）。熱水掘削と掘削孔を使った観測によって以下の発見があった。

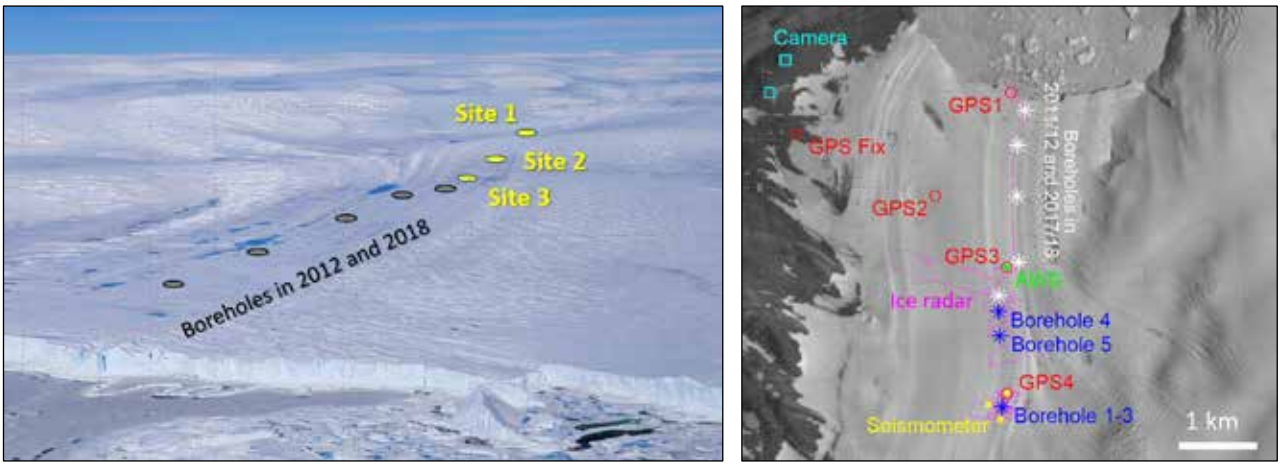


図 4：（左）2021/22 年におけるラングホブデ氷河での掘削地点（黄色）と、（右）氷河上の掘削孔、GPS、自動気象測器、地震計、インターバルカメラの位置。

・氷河底面から約 50 m の深さを掘削中に孔が底面と接続して水が排水した。
・掘削孔が排水した深さに融け水に満たされたクラックが確認された。
・氷河底面の水圧は氷河前の海水による圧力よりもやや高い。
・氷河表面から底面に融解水が流入して底面水圧が上昇するイベントが確認された。
・この底面水圧の上昇に伴って氷河が加速した。
・氷河底面は海洋と水理的に接続しており潮汐に同期した水圧変動を示す。

これらの観測は、氷河表面の融解水が氷河内水路を通じて底面へ流入し、流動加速が生じることを示している（図 6）。そのようなプロセスは山岳氷河で明らかになっており、グリーンランド氷床でも確認されつつあるが、南極氷床においては初めて観測されたものである。加速度計のデータは、流動加速の際に測器の傾きと振動が激しいことを示しており、活発な底面すべりが起きていたことが確認された。さらにこの掘削地点から下流側の 2 か所で掘削したところ（図 4、Site 2 と 3）、棚氷域の接地線近傍であることが判明した。特に第 2 掘削地点（Site 2）では厚さ 475 m の氷の下にわずか 2 m の海水層が確認され、接地線に非常に近い地域で棚氷下環境へのアクセスが実現した。ビデオカメラによる観察を行ったところ、この狭い海水層に様々な生物が確認された。棚氷下、特に接地線付近の生態系は新しい研究分野として注目を集めており（Griffiths et al., 2021）、未知の生態系を理解する上での重要な発見である。この他に掘削孔を使った観測として、氷河内部に地震計を設置して長期のモニタリングを開始し、氷温度測定用のサーミスターを埋設した。また氷河上では、GPS による流動観測、地震計測定、気象観測、氷レーダー測定、インターバルカメラ観測、生態系環境調査を目的とした水サンプリングなどを実施した（図 6）。2023 年 1 月には第 64 次隊によるデータ回収と測定装置のメンテナンスを行う。

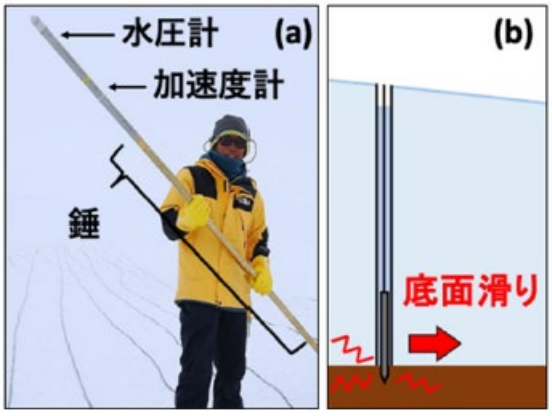


図 5：開発した底面すべり測定装置。

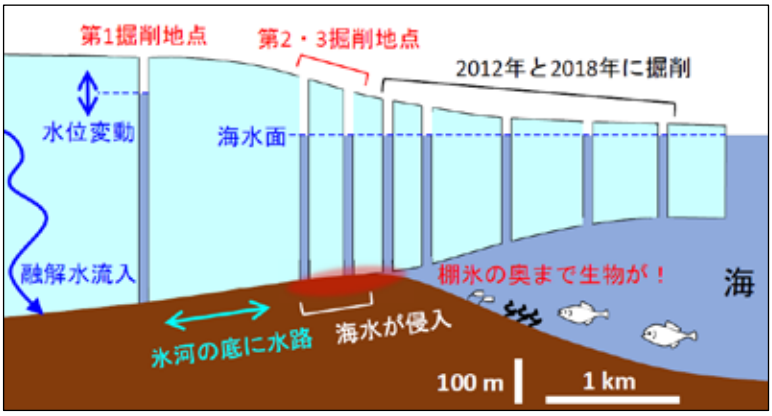


図 6：2021/22 年の掘削によって明らかになった、ラングホブデ氷河内部と底面の水理水文環境を示す模式図。

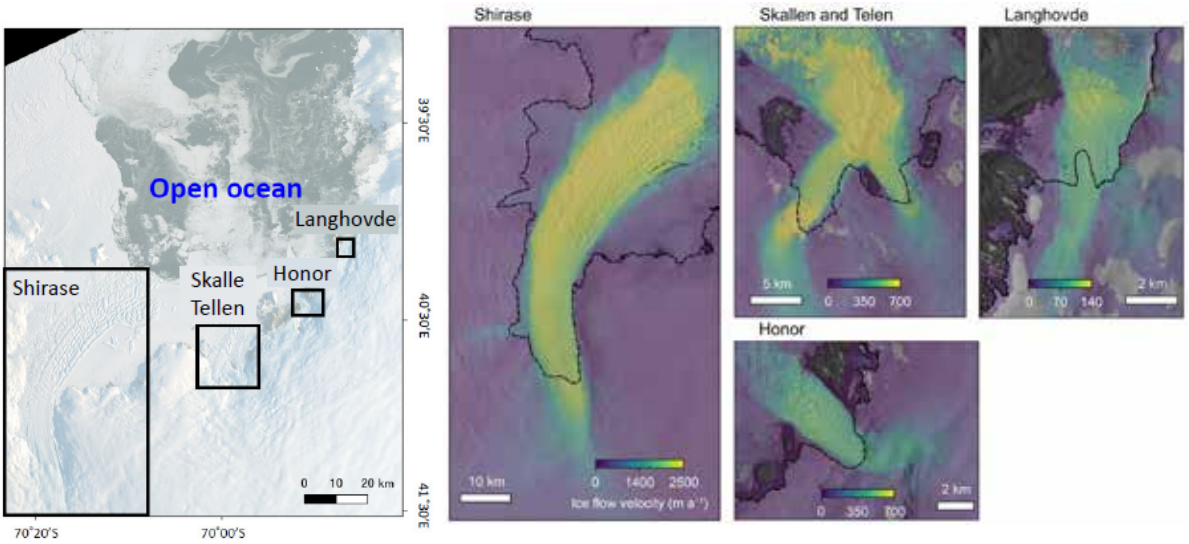


図 7：人工衛星データ解析を行った 5 つの溢流氷河。カラースケールは流動速度を示す

3－3．人工衛星データ解析によるリュツォ・ホルム湾の氷河変動

リュツォ・ホルム湾に流入する 5 つの溢流氷河について、1980 年代に遡る各種の人工衛星データを解析した（図 7）。その結果、湾の定着氷が流出した 2016 年から 2018 年にかけて、全ての氷河において顕著な末端後退が確認された（図 8a と b）。それに先立つ期間は、カービングが少なく氷河は前進傾向にある。この結果から、発達した定着氷にはカービングを抑制する役割があり、海氷流出がカービングと氷河の後退を促すことが示された。さらに、海氷の変動は氷河の流動と氷厚にも影響を与えることが判明した。2016 年の定着氷流出イベントの前後で比較すると、海氷消失によって各氷河の流動速度が増加している（図 8c と d）。またこの海氷流出、末端後退、流動加速に伴って、接地線付近での氷厚減少が測定された（図 8e）。これらの結果は、定着氷がカービングを抑制するだけでなく、氷河の流動に拮抗する応力を発生していることを示唆する。すなわち、海氷の流出によって氷河に作用する応力が変化し、その結果生じる流動変化が氷河の厚さに影響を与えていると考えられる。海氷が氷河の流動や末端変動に与える影響は、白瀬氷河における過去の研究でも指摘されている（Ushio, 2006; Nakamura et al., 2022a）。ここで紹介した本研究の成果は、複数の氷河においてこのメカニズムを確かめるものであり、氷河表面標高も含めた詳細な解析によって、その影響が接地線よりも上流側まで及ぶことを示すものである。

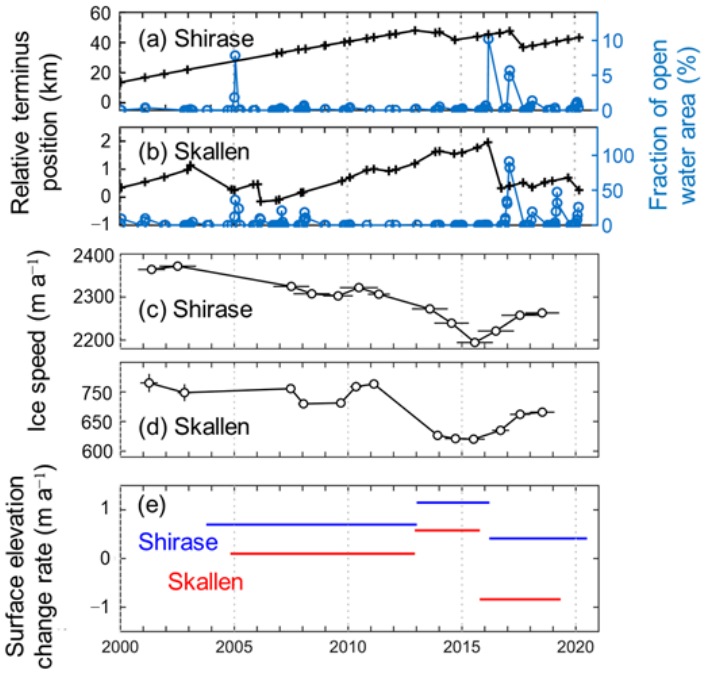


図 8：しらせ氷河、スカーレン氷河の末端位置、氷河前海洋の海水面の割合、および接地線付近での表面高度変化。

4．領域内連携

- 氷河と海洋の相互作用に関する底層水班との連携
- 棚氷下の海底堆積物に関する生態系班、固体地球班との連携
- ラングホブデ氷河棚氷下の探査に関する探査班との連携
- 公募研究「東南極，ラングホブデ氷河における接地線の同定（奈良間千之）」との連携

５．今後の課題

本研究取り組みによって、ラングホブデ氷河の棚氷下海洋環境と接地域の氷河内部・底面水理水文環境に関して新しい知見が得られた。また、リュツォ・ホルム湾における数 10 年スケールでの氷河変動についてその定量化とメカニズム解明に成功した。今後は第 X 期重点観測計画のもとで同地域の氷河観測を進めると共に、人工衛星データの解析、数値モデリング等の取り組みを進める。以下に今後の研究上の課題を示す。

・ラングホブデ氷河に設置した装置のデータ回収と長期運用（掘削孔内、氷河上）
・ラングホブデ氷河のより広い範囲での掘削と観測（より上流側での掘削、棚氷下長期測定）
・掘削孔を使った新しい測定装置・手法の開発（底面流動に関する新しい測定）
・氷河底面湖をターゲットとした熱水掘削（大深度・クリーン掘削技術の開発）
・棚氷下の生態系に焦点をあてた研究観測（生物研究者との協働）
・白瀬氷河やリュッツォ・ホルム湾以外の氷河も含む新しい氷河掘削計画（より大きな氷河）
・航空機やヘリコプターを使った広域での氷河観測（JARE65 次での航空機計画）
・進化する人工衛星データを駆使した高い時空間分解能での氷河変動解析
・得られた現地データを用いた氷河流動・変動モデリング（氷温・流動・氷厚・地形データの利用）

参考文献

Aoki, S., Breakup of land-fast sea ice in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, and its teleconnection to tropical Pacific sea surface temperatures, Geophys. Res. Lett., 44, 3219– 3227, 2017.

Aoyama, Y, T-H, Kim, K. Doi, H. Hayakawa, T. Higashi, S. Ohsono and K. Shibuya, Observations of vertical tidal motions of a floating iceberg in front of Shirase Glacier, East Antarctica, using a geodetic-mode GPS buoy. Polar Sci., 10(2), 132–139, 2016.

Edwards, T.L., S. Nowicki, B. Marzeion et al., Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. Nature, 593, 74–82, 2021.

Fukuda, T., S. Sugiyama, T. Sawagaki and K. Nakamura, Recent variations in the terminus position, ice velocity and surface elevation of Langhovde Glacier, East Antarctica. Antarctic Science, 326(6), 636–645, 2014.

Griffiths, H. J., P. Anker, K. Linse, J. Maxwell, A. L. Post, C. Stevens, S. Tulaczyk and J. A. Smith, Breaking all the rules: The first recorded hard substrate sessile benthic community far beneath an Antarctic ice shelf. Frontiers in Marine Science, 8:642040, 2021.

Gudmundsson, G. H., F. S. Paolo, S. Adusumilli and H. A. Fricker, Instantaneous Antarctic ice-sheet mass loss driven by thinning ice shelves, Geophys. Res. Lett., 46, 13903–13909, 2019.

Hattermann, T., O. A. Nøst, J. M. Lilly and L. H. Smedsrud, Two years of oceanic observations below the Fimbul Ice Shelf, Antarctica, Geophys. Res. Lett., 39, L12605, 2012.

Holland D. M., K. W. Nicholls and A. Basinski, The southern ocean and its interaction with the Antarctic ice sheet, Science, 367,1326–1330, 2020.

IPCC. Climate Change 2001: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the 3rd Assessment Report of IPCC, 2001.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the 6th Assessment Report of IPCC, 2021.

Hattori, A., Y. Aoyama, J. Okuno, J. and K. Doi, GNSS observations of GIA-induced crustal deformation in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. Geophys. Res. Lett., 48, e2021GL093479, 2021.

Hirano, D., T. Tamura, K. Kusahara et al., Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. Nat. Commun., 11, 4221, 2020.

Jenkins, A., P. Dutrieux, S. Jacobs et al., Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat, Nat. Geosci. 3, 468–472, 2010.

Kawamata, M., Y. Suganuma, K. Doi, K. Misawa, M. Hirabayashi, A. Hattori and T. Sawagaki, Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating, Quat. Sci. Rev., 247, 106540, 2020.

Kusahara, K., D. Hirano, M. Fujii, A. D. Fraser and T. Tamura, Modeling intensive ocean–cryosphere interactions in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, The Cryosphere, 15, 1697–1717, 2021.

Minowa, M., E. A. Podolskiy and S. Sugiyama, Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica. Annals of Glaciology, 60(79), 57–67, 2019.

Minowa, M., S. Sugiyama, M. Ito, S. Yamane and S. Aoki, Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica. Nature Communications, 12, 3929, 2021.

Mouginot, J., E. Rignot and B. Scheuchl, Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013, Geophys. Res. Lett., 41, 1576–1584, 2014.

Nakamura, N., S. Aoki, T. Yamanokuchi and T. Tamura, Interactive movements of outlet glacier tongue and landfast sea ice in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, detected by ALOS-2/PALSAR-2 imagery, Science of Remote Sensing, 6, 100064, 2022a.

Nakamura, N., S. Aoki, T. Yamanokuchi, T. Tamura and K. Doi, Validation for Ice Flow Velocity Variations of Shirase Glacier Derived From PALSAR-2 Offset Tracking, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 3269–3281, 2022b.

Pritchard, H. D., R. J. Arthern, D. G. Vaughan and L. A. Edwards, Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. Nature, 461, 971–975, 2009.

Pritchard, H. D., S. Ligtenberg, H. Fricker et al., Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. Nature 484, 502–505, 2012.

Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. van de Berg and E. van Meijgarrd, Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. Nat. Geosci. 1, 106–110, 2008.

Rignot, E., J. Mouginot, M. Morlighem, H. Seroussi and B. Scheuchl, Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011, Geophys. Res. Lett., 41 , 3502–3509, 2014.

Rignot E, J. Mouginot, B. Scheuchl, M. van den Broeke, M. J. van Wessem, M. Morlighem, Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979-2017. PNAS. 116(4):1095-1103, 2019.

Smith, B., H. A. Fricker, A. S. Gardner et al., Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes, Science, 368, 1239–1242, 2020.

Stanton, T. P., W. J. Shaw, M. Truffer, H. F. J. Corr, L. E. Peters, K. L. Riverman, R. Bindschadler, D. M. Holland, S. Anandakrishnan, Channelized ice melting in the ocean boundary layer beneath Pine Island Glacier, Antarctica. Science, 341, 1236–1239, 2013.

Suganuma, Y. et al., Abrupt Holocene ice-sheet retreat in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, JpGU2021, JpGU Meeting 2021, Chiba, Japan, Online, June 2021

Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda and S. Aoki, Active water exchange and life near the grounding line of an Antarctic outlet glacier. Earth and Planetary Science Letters, 399C, 52–60, 2014.

Ushio, S., Factors affecting fast-ice break-up frequency in Lützow-Holm Bay, Antarctica, Ann. Glaciol., 44, 177–182, 2006.

Velicogna, I. and J. Wahr, Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica, Science, 311, 1754–1756, 2006.

近藤研、杉山慎、箕輪昌紘、東南極ラングホブデ氷河における底面滑りの直接観測、北海道の雪氷、41、35–38、2022.
杉山慎、箕輪昌紘、伊藤優人、山根志織、南極ラングホブデ氷河における熱水掘削、北海道の雪氷、47、7–10、2018.
杉山慎，近藤研，箕輪昌紘，2022：南極ラングホブデ氷河における 2021/22 年の熱水掘削，北海道の雪氷，41，31–34.
山根志織、東南極 Langhovde 氷河の末端変動と棚氷下海洋環境、北海道大学環境科学院，修士論文、2019.
山根志織、杉山慎、箕輪昌紘、伊藤優人、南極ラングホブデ氷河における氷河下の海洋環境、北海道の雪氷、47、75–78、2018.

研究成果に関わる受賞・プレスリリース

箕輪昌紘、社団法人日本雪氷学会・平田賞、カービング氷河の末端プロセスと変動メカニズムの研究、2020 年 11 月
近藤研、社団法人日本雪氷学会・雪氷研究大会学生優秀発表賞、東南極ラングホブデ氷河における底面滑りの直接観測、2022 年 10 月
近藤研、社団法人日本雪氷学会・雪氷研究大会学生優秀発表賞、東南極リュッツォホルム湾における溢流氷河変動に定着氷が与える影響、2021 年 9 月
杉山慎、講談社・科学出版賞、南極の氷に何が起きているか・気候変動と氷床の科学（中央公論新社刊／中公新書）、2022 年 9 月
杉山慎、社団法人日本雪氷学会北海道支部・北海道雪氷賞・北の六華賞、南極ラングホブデ氷河における熱水掘削、2019 年 5 月
南極の氷河の下で海と氷を直接観測 ～熱水掘削によって氷床融解のメカニズムを解明、北海道大学プレスリリース、2021 年 7 月

南極での絶対重力測定
－GIA 解明に向けた絶対重力測定の概要ならびにその成果－

土井浩一郎[1,2]、福田洋一[1]、青山雄一[1,2]、奥野淳一[1,2]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学

A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体班）（代表：福田洋一）
A02（公募）南極氷床上における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究（代表：新谷昌人）
B02（公募）衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床の長期質量変動決定（代表：山本圭香）

１．背景と目的

GIA による固体地球の変形は GNSS 観測などによる地殻の上下変動として観測することができるが、絶対重力測定を繰り返し実施することで、重力の経年変化としても検出可能である。地上での重力測定により検出される重力変化には、地球の変形に伴って生じる地殻の上下変動に伴う重力変化と地球内部での質量移動による重力変化の両方の影響が含まれる。このため、地殻の上下変動とともに重力変化を観測することで、GIA モデルに対しより強い制約を与えることが可能である。

昭和基地では絶対重力計 FG-5 による絶対重力測定が過去複数回実施されている。2018 年までに行われた FG-5 による重力測定の結果から、当地域における地表面での重力変化勾配は-0.22 μGal/yr (正の符号は重力の増加を表す)と推定され、GNSS 観測の結果が隆起傾向にあることと整合的である。南極全体での絶対重力測定の実施状況については Mäkinen et al. (2007, 2013) にまとめられており、昭和基地以外にもいくつかの測定点で複数回の絶対重力測定が実施されているが、その多くは２～３回の測定に留まる。そこで、本研究課題ではより高い精度で重力変化勾配を得ることを目指し、昭和基地および南極外国基地 4 カ所（マイトリ基地、トロール基地、ジャンボゴ基地、マリオズッケリ基地）において絶対重力測定を実施した。また、昭和基地での結果については、GNSS 観測での結果と同様に、検出された GIA による重力変動と GIA にモデルとの比較を行った。

本研究課題では、また、東南極の 7 つの雪氷に覆われていない露岩域においても野外用絶対重力計 A10 を用いた絶対重力測定を実施しており、将来の測定によって重力変化を検出するための基準データを取得することができた。野外での絶対重力測定については、第 63 次日本南極地域観測隊（JARE63、以下同様に略す）では、我が国で開発された TEG-1 重力計や、原子干渉を利用した全く新しい原理に基づく絶対重力計（Absolute Quantum Gravimeter: AQG）を用いた測定も実施されており、今後、野外での絶対重力測定データが蓄積されると、GNSS と同様、GIA の地域的な変化の特徴を捉える研究にも利用されるものと期待される。

以下では、本研究で実施した絶対重力測定の概要ならびに成果について報告する。

２．絶対重力測定の概要

２－１．測定方法

重力測定には測定場所に応じて 2 種類の絶対重力計を使用した。昭和基地や外国基地では屋内での測定に適した FG-5 を使用し、野外測定では屋外測定用の A10 を用いた。FG-5 の公称測定精度は 2 μGal（1 μGal＝10^{-8}m/s^2）であり、公称測定精度 10 μGal の A10 よりも高精度で測定可能である。測定時間は通常、FG-5 は数時間から十数時間、A10 は 1 時間程度である。FG-5 による測定の場合、測定時間が比較的長いため、なるべく室温変化が小さく人工的な振動の少ない夜間に実施した。一方、野外測定では風の影響を大きく受けるため、なるべく風の弱い日や時間帯を狙ってピラミッドテントの中で測定を実施した。

絶対重力測定以外に関連した観測として重力勾配測定、GNSS 測定、ドローン空撮を実施した。絶対重力測定によって決定される重力値は A10 の場合、地上から数十 cm の高さでの値となるので、地上での値を求めるために、その場所の高さ方向の重力勾配を測定し、重力勾配と重力値の決定された高さを用いて補正する。重力勾配は相対重力計を用いて、異なる高さで重力値を求め、重力差と高度差の比として求める。GNSS 測定は重力測定点の位置決定のために実施し、ドローン空撮は空撮写真から測定点付近の表面地形モデルを作成し、積雪分布や積雪深を求めた後、積雪変化の測定への影響を見積もるために実施する。

２－２．昭和基地における測定

JARE59 の夏期期間（2018 年 12 月～2019 年 1 月）および JARE63 の夏期期間（2021 年 12 月～2022 年 1 月） に昭和基地の重力計室内にある国際絶対重力基準点網（IAGBN） に登録された基台において絶対重力計 FG-5（＃210）による測定が実施された。また、同じ基台で絶対重力計 A10（＃017）による測定も実施された。

２－３．外国基地における測定

昭和基地以外でもすでに絶対重力測定の実施されている南極基地はいくつかある（Mäkinen et al., 2007, 2013)。その中からアクセスのしやすさ、これまでの測定回数などを考慮して、本研究課題で絶対重力測定を実施する観測基地として、マリオズッケリ基地（イタリア）、ジャンボゴ基地（韓国）、マイトリ基地（インド）、トロール基地（ノルウェー）の 4 基地を選んだ。図 1 に各基地の位置を示す。

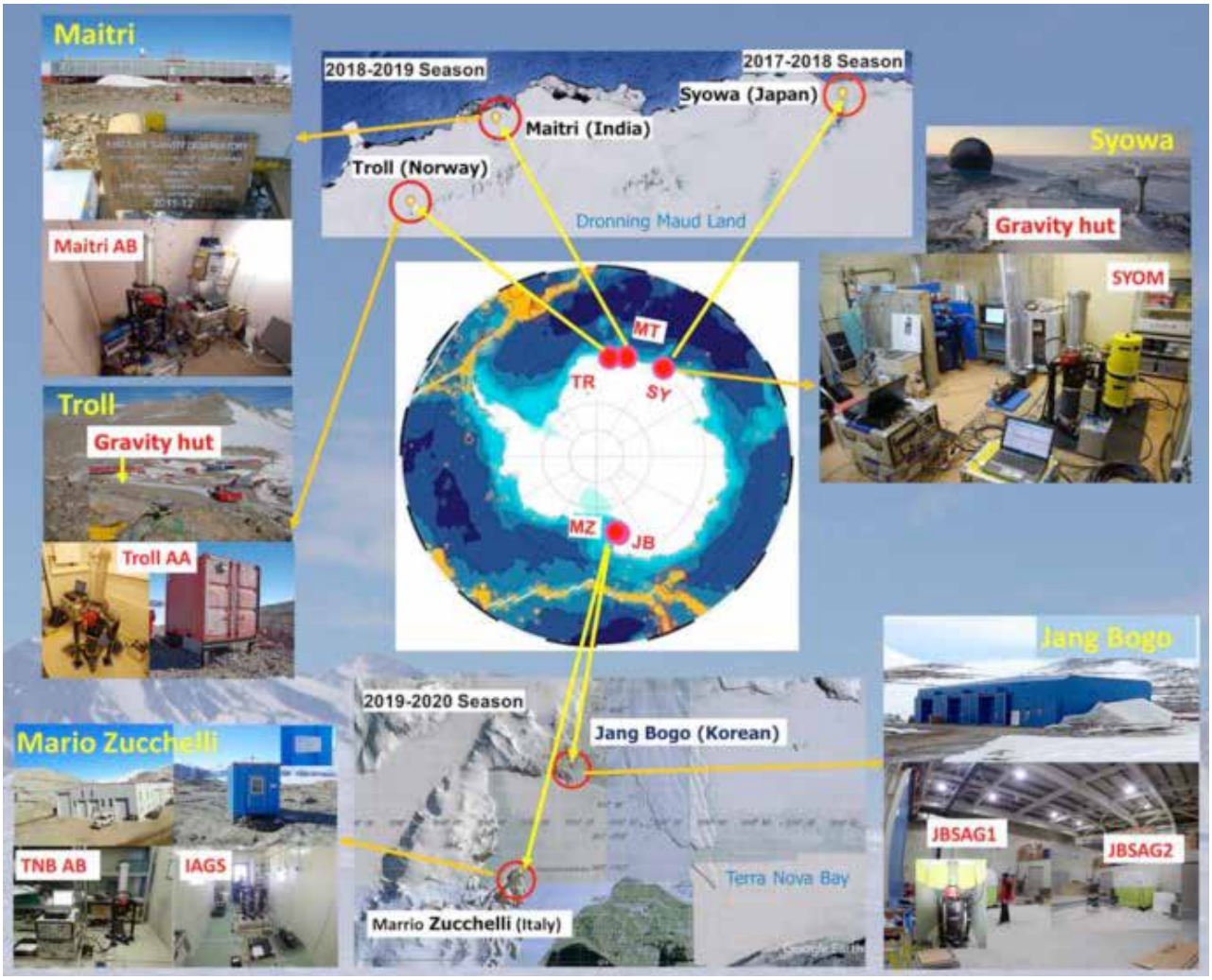


図 1　絶対重力測定を実施した外国基地の位置（Fukuda et al., 2021c より）

マイトリ基地、トロール基地での測定は 2018 年 11 月から 12 月にかけて行われ、基地へのアクセスおよび基地間の移動はすべてドロンニングモードランド南極航空網を利用した。両基地における測定は既存の測定小屋内の測定点標の上で FG-5(#210)を用いて行われた。重力勾配については、すでに決められている値を用いた。

翌 2019 年 11 月から 12 月にかけてマリオズッケリ基地、ジャンボゴ基地で測定が行われた。基地へのアクセスは、往きはニュージーランドとマリオズッケリ基地、ジャンボゴ基地間の航空網、帰りは韓国の砕氷船アラオンを利用した。また、基地間の移動は両基地が近くにあることから、ジャンボゴ基地の車両ならびにヘリを利用した。マリオズッケリ基地での測定は既存の 2 カ所の測定標の上で FG-5(#210)を用いて実施された。ジャンボゴ基地ではこれまで A10 による測定はあるものの、FG-5 による測定は実施されていない。このため、車両整備小屋内の A10 による既存の測定点に加え、小屋内に新たに測定点を設置し、FG-5(#210)による測定を実施した。重力勾配については、ジャンボゴ基地では相対重力計（LaCoste 重力計 D-58）を用いて新たに測定し、マリオズッケリ基地では、既存の測定値を用いた。

２－４．野外測定

昭和基地周辺の 6 カ所とエンダビーランドの 1 カ所の露岩域において、A10（＃017）を用いた絶対重力測定が実施された。そのうち、リーセル・ラルセン山、明るい岬、ラングホブデ、スカーレン、ルンドボークスヘッタ、ボツンヌーテンの 6 カ所については JARE59 の夏期期間（2017 年 12 月～2018 年 2 月）に実施され、JARE63 の夏期期間（2021 年 12 月～2022 年 1 月）に新たにスカルブスネスで実施された。ラングホブデについてはすでに JARE53 の夏期期間（2011 年 12 月～2012 年 2 月）で測定を実施しており、JARE59 では同じ点で測定を実施した。その他の各露岩域では測定点を新たに設置し、状況に合わせて 1～2 時間の測定を実施した。また、絶対重力測定に加えて、GNSS 観測、重力勾配観測、ドローンを用いた空撮も実施した。JARE63 では、スカルブスネスの新設点のほかに、ラングホブデとルンドボークスヘッタの既設点において、測定が実施された。図 2 に野外測定点の位置を示す。

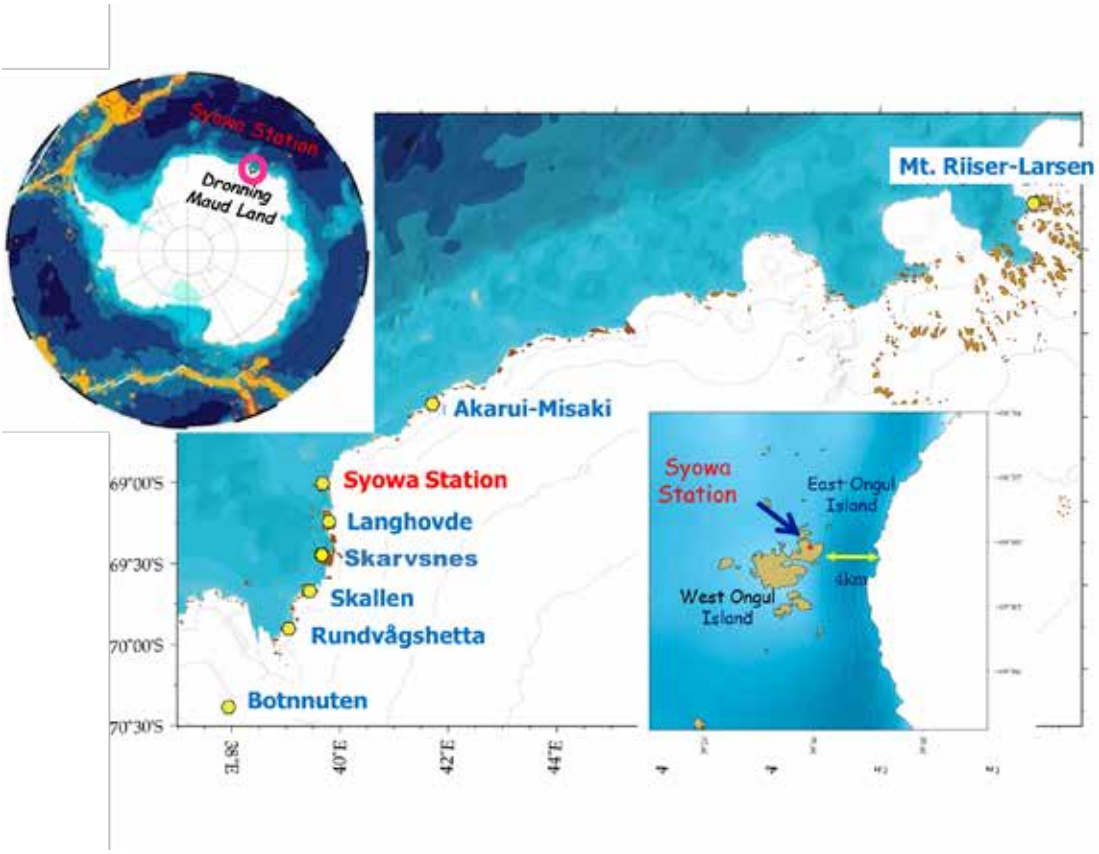


図 2　絶対重力測定を実施した野外観測サイトの位置（Fukuda et al., 2018 に加筆）

３．成果

３－１．昭和基地における重力変化

昭和基地では絶対重力計 FG-5 による絶対重力測定が過去複数回実施されている。2018 年までに行われた FG-5 による重力測定の結果から、当地域における地表面での重力変動が-0.22 μGal/yr (重力の増加する方向を正の方向)と推定され、GNSS 観測の結果が隆起傾向にあることと整合的な結果が得られた。重力観測における現在の南極氷床変動による重力擾乱の影響は、荷重による弾性変形と変形に伴うポテンシャルの変化だけを考えた場合には、その影響は 0.1 - 0.5 μGal/yr の重力増加の影響となる。しかし、質量の存在自体による引力効果を含めると、観測点近傍の質量分布変化に大きな影響を受けるため正確な補正が難しい。そこで本研究では、昭和基地内で連続観測が実施されている超伝導重力計による重力観測と、無人航空機を用いた空撮調査を行うことで、昭和基地内の積雪分布変化によって超伝導重力計で観測された重力変化の一部を説明できることを明らかにした。これは、昭和基地で実施される重力測定には、2 μGal 程度の近傍の積雪の増減に伴う引力効果が含まれている可能性を示すものであり、今後、観測された重力変化の信頼性を高めるためには、近傍の積雪の増減に伴う引力効果についても見積もる必要がある。表 1 に衛星重力観測（GRACE）と高度計データ（Schröder et al., 2019）から得られた氷床変動による重力に対する影響量と補正後に得られた GIA による重力変化を示す。

表 1　南極大陸氷床の変動による重力変化と GIA による重力変化（単位は μGal/yr）

	高度計（firn の密度）	高度計（氷の密度）	GRACE
氷床変動による影響量	0.13	0.31	0.46
GIA による重力変化	-0.35	-0.53	-0.68

観測データから推定される GIA が引き起こした重力変化は、測定誤差や積雪分布の時間変化による影響を考慮しても、既存の GIA モデルよりも絶対値として大きい変動であることが明らかになった(図 3 参照)。これは、現在提唱されている Lützow-Holm 湾の氷床融解史では十分に再現できていない過去の氷床融解過程が存在する可能性を示唆している（本報告書、土井他）。

３－２．外国基地における測定結果

ジャンボゴ基地における絶対重力測定およびその測定データを使ったジャンボゴ基地の超伝導重力計観測データのスケールファクターの決定について Fukuda et al. (2021a)に示されている。また、Fukuda et al. (2021b)では、ジャンボゴ基地とマリオズッケリ基地における測定で決定された重力値を示した。トロール基地とマイトリ基地の正式な結果については、今後、データジャーナル等で公開する予定である。

３－３．野外観測点における測定結果

JARE59 および JARE63 では合計 7 カ所の露岩域の 10 点において絶対重力値が得られている。今後再解析を進めて、正式な結果についてはデータジャーナル等で公開する予定である。

３－４．昭和基地で得られた重力変化と GIA モデルの比較

昭和基地および周辺の露岩域で実施された GNSS 観測結果と同様に、昭和基地で繰り返し実施された絶対重力測定の結果を既存の GIA モデルから予測される重力変化と比較したところ、地球内部構造パラメータを現実的な範囲で変化させてみても観測から得られた重力変化を説明できないということが明らかになった。そこで、Kawamata et al. (2020) が提唱する約 9 千年前から 6 千年前までに生じた Skarvsnes での急激な氷床融解を考慮した氷床融解史モデルの再構築を行った。その結果、GIA モデル

から予測される現在の GIA の変動の大きさは、既存の氷床融解史モデルを使用した場合よりも大きな値を示し、絶対重力測定から推定された GIA 変動を説明可能であることを明らかにした（服部, 2022）。図 3 に観測された重力変化と従来の氷床融解史を使って得られた予測値との比較および再構築された氷床融解史を使って得られた予測値との比較を示す。

本研究で得られた結果を踏まえて過去の氷床融解史モデルを再構築することで、より詳細な LGM 以降の南極氷床融解過程が明らかになることが実証された。また、より正確な GIA による重力変動が明らかにされることで、GIA のモデルエラーが軽減されることが見込まれ、現在の南極氷床変動の理解が進むことが期待される。

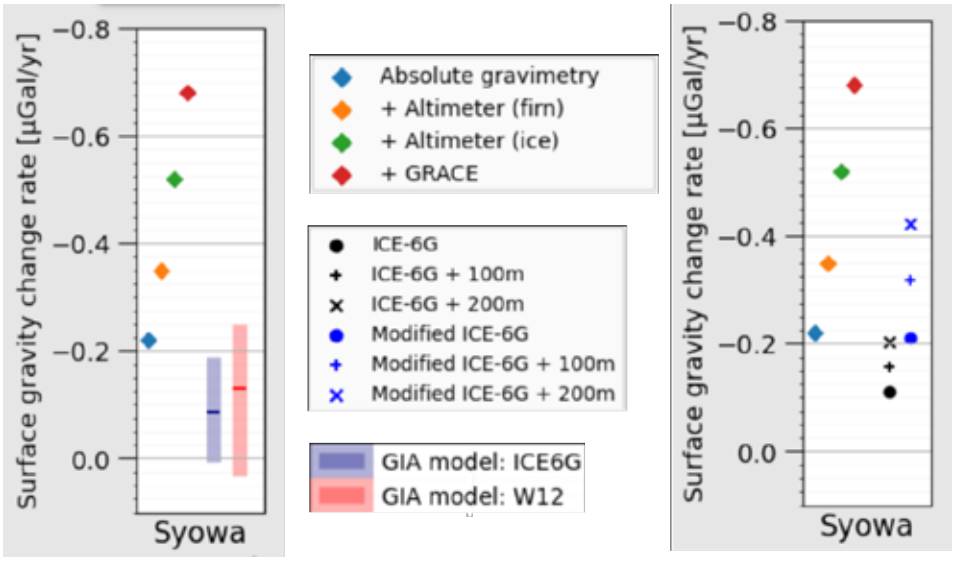


図 3　昭和基地の絶対重力測定から得られた GIA による重力変化と GIA モデルから予測される重力変化の比較。（左）従来の氷床融解史を使用して予測した場合、（右）再構築した氷床融解史を使用して予測した場合。服部 (2022) より

4．今後の課題

複数回測定結果の得られている重力測定点についても昭和基地と同様に GIA 変動を求め、モデルとの比較を進めていく。また、その整合性に応じて、地球内部構造パラメータとの関係や氷床融解史モデルの妥当性について議論していく。

成果に関しては、正式な測定結果の公表されていない測定点について順次データジャーナルなどで公表していく。

本研究課題では、外国基地 4 カ所において屋内測定を実施し、昭和基地周辺の露岩域においても JARE の 2 隊次で野外測定を実施した。さらに精度よく重力変化速度を決定するためには、今後とも同様の絶対重力測定を継続して実施することが必要である。また、今回実施した測定以外にも、オーストラリア基地での絶対重力測定の実施を計画していたが、COVID-19 の影響で残念ながら実施することができなかった。他の基地での測定も含め、今後の実施が望まれる。

GIA 変動を求めるには測定された重力変化に対し、氷床質量変動によって引き起こされる弾性変形や引力変化の影響を補正する必要があり、氷床質量変動の推定も含めた計算を自動的に行えるシステムの構築も望まれる。

5．謝辞

本研究課題においては南極の外国基地や昭和基地とその周辺において測定を実施した。その実施にあたっては、JARE59, 63 の隊員やしらせ乗組員、トロール基地、マイトリ基地、ジャンボゴ基地、マリオズッケリ基地のスタッフなど多くの方々にご支援、ご協力を賜った。特に、九州大学・西島潤氏、高エネルギー加速器研究機構・池田博氏、日本海洋事業株式会社・木村亮氏、京都大学・風間卓仁氏、東

京大学地震研究所・新谷昌人氏、北海道総合技術研究機構・岡大輔氏には南極での測定に携わっていただいた。ここに記して、あらためてお礼申し上げる。

参考文献

土井浩一郎、服部晃久、奥野淳一、青山雄一 (2023), 測地観測データを用いた GIA 変動の研究－Lützow-Holm 湾周辺での観測による GIA モデルの拘束－、本報告書。

Fukuda, Y., Y. Aoyama, J. Nishijima, H. Ikeda, A. Hattori, K. Doi, J. Okuno and T. Kazama (2018), Absolute Gravity Measurements During 2017-2018 Austral Summer Season in and around Japanese Antarctic Station, Syowa, AGU Fall meeting, Washington DC.

Fukuda, Y., J. Okuno, K. Doi and C. K. Lee (2021a), Gravity observations at Jang Bogo Station, Antarctica, and scale factor calibrations of different relative gravimeters, Polar Science, https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100702

Fukuda, Y., J. Okuno, K. Doi, C. K. Lee and A. Capra (2021b), Absolute Gravity Measurements at Jang Bogo Station and Mario Zucchelli Station, Antarctica, in 2019, Polar Data Journal, Vol. 5, 125–143, https://doi.org/10.20575/00000032

Fukuda Y., Aoyama Y., Okuno J., Hattori A., Doi K., Nishijima J., Kazama T. (2021c), Summary of the Absolute Gravity Measurements using FG5-210 at Antarctic Research Stations in Antarctica during 2017 – 2020 Austral Summer, IAG2021, Beijing.

服部晃久（2022）, 地上測地観測およびリモートセンシング観測を 7 用いた南極氷床質量変動と GIA 変動の研究, 令和 4 年度 総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻 博士学位論文.

Kawamata, M., Y. Suganuma, K. Doi, K. Misawa, M. Hirabayashi, A. Hattori, and T. Sawagaki (2020), Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating. Quaternary Science Reviews, 247, 106540. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106540

Mäkinen, J., M. Amalvict, K. Shibuya, and Y. Fukuda (2007), Absolute gravimetry in Antarctica: Status and prospects. Journal of Geodynamics, 43(3), 339–357. https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.08.002

Mäkinen, J., R. Ravindra, U. Chand, V. M. Tiwari, V. V. Lukin, M. Anisimov, and Y. Melv (2013), Absolute-gravity stations in Western Dronning Maud Land, Antarctica. 2.

Schröder, L., M. Horwath, R, Dietrich, V. Helm, M. R. van den Broeke, and S.R.M. Ligtenberg (2019), Four decades of Antarctic surface elevation changes from multi-mission satellite altimetry. *The Cryosphere*, *13*(2), 427–449. https://doi.org/10.5194/tc-13-427-2019

測地観測データを用いた GIA 変動の研究
－Lützow-Holm 湾周辺での観測による GIA モデルの拘束－

土井浩一郎[1,2]、服部晃久[3]、奥野淳一[1,2]、青山雄一[1,2]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]国土地理院

A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体班）（代表：福田洋一）
A02（公募）南極氷床上における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究（代表：新谷昌人）
B02（公募）衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床の長期質量変動決定（代表：山本圭香）

1．背景と目的

近年の衛星重力ミッション GRACE などによる観測から南極氷床の質量減少が明らかになってきており、グローバルな海面上昇への懸念から南極氷床の質量変動の監視は社会的に重要なミッションとなってきている。しかし、GRACE によって観測される質量変動には地球表面の質量変動だけでなく、地球内部の質量変動も含まれており、南極域では氷床の質量変動とともに、地殻変動に伴う質量変動も同時に観測される。南極域での質量変動を伴う主要な地殻変動は Glacial Isostatic Adjustment (GIA:氷河性地殻均衡)であるが、南極域での変動を精度良く近似する GIA モデルはまだ確立されていないのが現状である（Whitehouse et al., 2019）。このため、より正確な南極氷床質量変動の推定には GIA モデルの精度向上が重要な課題となっている。

本研究では、日本南極地域観測隊が昭和基地に近い Lützow-Holm 湾周辺で実施してきた GNSS や絶対重力測定などの測地観測で得られたデータの解析を行い、GIA による地殻変動の検出と既存の GIA モデルとの比較を通じて、当地域の GIA の特徴を明らかにすることを試みた。

2．方法

南極・昭和基地及びリュツォ・ホルム湾沿岸の露岩域で実施された GNSS 観測で得られた変動に対し、GRACE や衛星高度計などのリモートセンシングデータを利用して、現在の雪氷変動に起因する地殻変動を補正し、GIA に伴う地殻変動を取り出した。

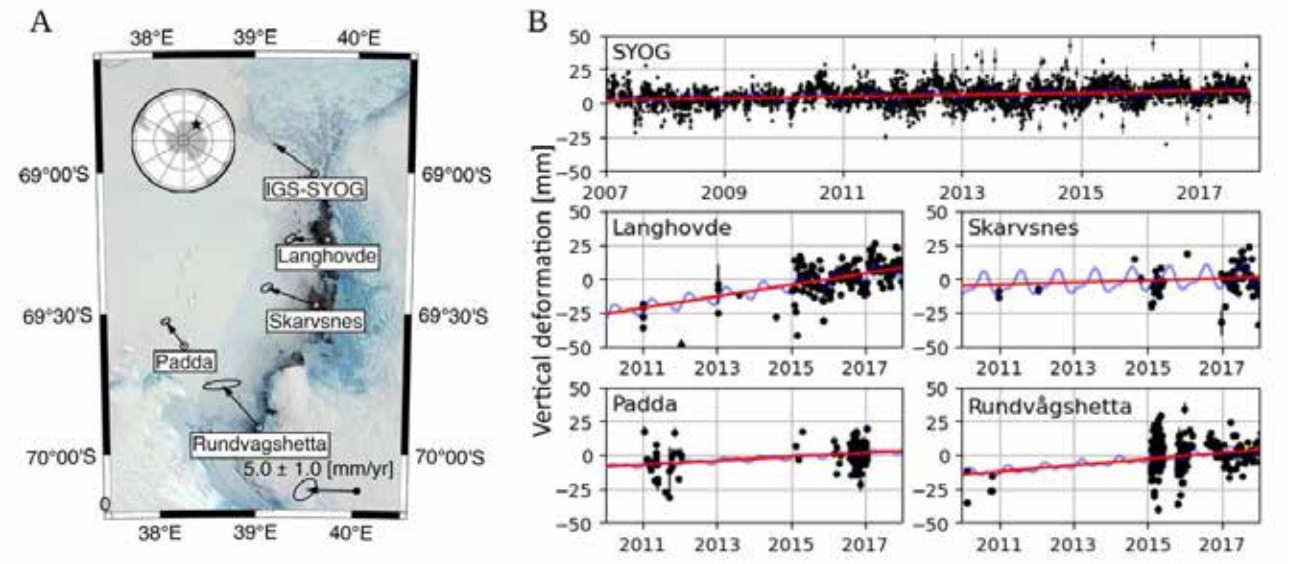


図 1　Lützow-Holm における GNSS 観測点での（A）水平変位と（B）鉛直変位の時系列

昭和基地および Lützow-Holm 湾沿岸に位置する露岩観測点（Langhovde、Skarvsnes、Padda、Rundvågshetta）で実施された GNSS 観測から、2010 年以降の当地域における地殻変動を求めた。本

研究が対象とする GNSS 観測データは、精密単独測位（Precise Point Positioning）手法を適用して測位を行うことで、各 GNSS 観測点において少なくとも数 cm 程度の精度で地球上での位置を決定することができる。さらに、連続的に取得されたこの GNSS 観測データを精密軌道暦や適切な大気及び電離層遅延モデルを用いて処理することで、観測点の変位速度を 1 ㎜/yr より良い精度で推定することが可能である。図 1A に GNSS 観測点と各点の水平変位速度、図 1B に各点の鉛直方向の変位の時系列を示す。

本研究では、南極における GNSS 観測から推定される鉛直方向の変位速度を GIA による地殻変動と現在の南極氷床変動による弾性変形の合算であると考え、各観測点における鉛直方向の変位速度を用いて GIA の議論を行った。

次に、近年の雪氷質量変動に対する弾性変形を求めた。そのために荷重変化として、GRACE による衛星重力観測(Watkins et al., 2015; Wiese et al., 2018)、および複数の人工衛星で実施されてきた衛星高度計観測データ（Schröder et al., 2019）から得られた氷床質量変動を用いた。これらのデータは、現在の南極氷床での特徴的な変動として、西南極側での急激な融解と東南極の Dronning Maud Land における降雪増加による表面質量の増加を示す。本研究では、これらの衛星観測で得られた現在の南極氷床荷重変動と標準的な地球の弾性構造を仮定し、弾性応答を計算した。その結果、Lützow-Holm 湾では 2010 年から 2017 年の間、おおよそ 1 mm/yr で沈降する結果が得られた。図 2 に見積もられた南極氷床質量変動に伴う弾性応答を示す。

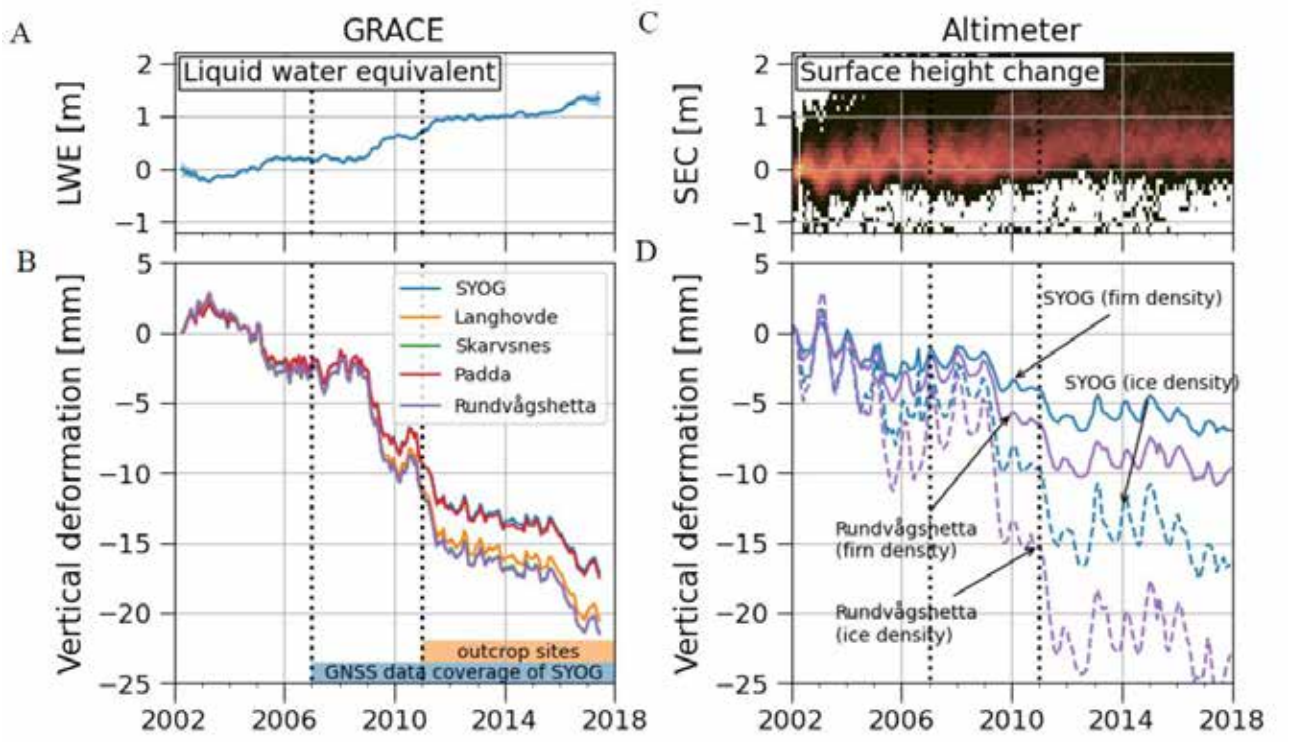


図 2　Lützow-Holm 湾周辺での、（A）GRACE マスコン解での表面質量変動、（B）（A）に対応する GNSS 観測点での弾性変形、（C）衛星高度計による表面高度変化、（C）に対応する GNSS 観測点での弾性変形。

3．成果

3－1．GIA 変動の検出

GIA による地殻変動を推定するため、GNSS 観測から推定された変位の時系列に対し、上記の方法で計算した弾性変形を補正した。その結果、いずれの GNSS 観測点においても微小ながら隆起の傾向が検出され、当地域における GIA が、弾性変形による沈降を打ち消すほど大きい隆起を生じさせていることが明らかになった。表 1 に得られた GIA に伴う上下変動を示す。なお、表 1 には GRACE による氷床質量変動データと高度計による氷床質量変動データ(フィルンと氷の密度を仮定した場合)を使って弾性

変形補正をした計 3 種類の結果を示している。例えば、昭和基地内の International GNSS Service (IGS)観測網の一点である IGS 点 SYOG では GNSS 観測から 0.85±0.75 mm/yr の隆起傾向が検出されているが、これに現在の弾性変形による影響を補正すると、昭和基地における GIA に伴う地殻変動は約 2 mm/yr

表 1　荷重変形の補正を施した GNSS 観測から推定される鉛直変位速度(mm/yr)。

観測点	弾性変形補正無し	高度計（firnの密度）	高度計（氷の密度）	GRACE
SYOG	0.85±0.75	1.36±0.74	2.25±0.74	2.36±0.74
Langhovde	4.23±0.55	4.67±0.54	5.30±0.54	5.87±0.54
Skarvsnes	0.82±0.78	1.24±0.78	1.90±0.79	2.30±0.78
Padda	1.48±0.44	1.73±0.44	2.10±0.44	2.46±0.44
Rundvågshetta	2.31±0.45	3.00±0.45	3.99±0.45	4.05±0.45

ほどの隆起となり、現在に至るまで地殻の隆起が継続していることを示唆する。これは現在一般的に用いられている GIA モデルから求められる予測値よりも大きな値であるため、現在提唱されている LGM 以降の氷床融解史に疑問を投げかける結果である。また、露岩観測点での結果ではどの観測点においても約 1~4 mm/yr の GIA による隆起傾向が検出された。特に、より南側の観測点である Rundvågshetta では SYOG よりも大幅に速い 2.31±0.45 mm/yr の隆起速度が推定された。このような地域性は過去の氷床分布を反映しているものと考えられ、Lützow-Holm 湾沿岸での南北方向に見られた地殻変動の特徴は、GIA モデルからも十分予測されるものであった(Hattori et al., 2021)。

4．議論

4－1．GIA モデルとの比較

図 3 に ICE6G と W12 の 2 つの GIA モデルから予想される鉛直変位速度と観測から得られた鉛直変位速度の比較を示す。

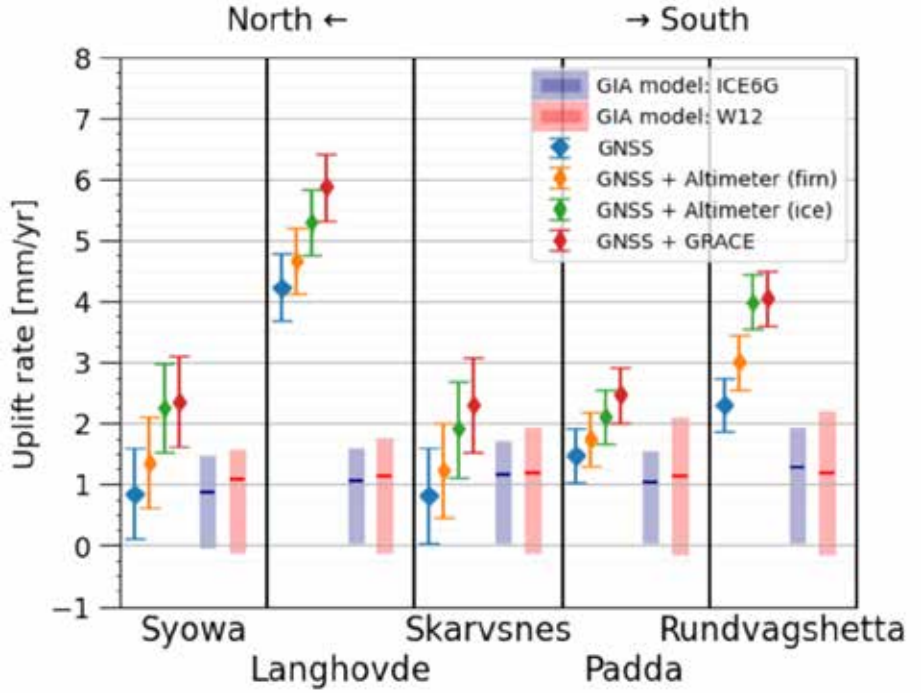


図 3　GNSS 観測および弾性変形補正から推定された鉛直変位速度と GIA モデルによる鉛直変位速度の比較。

図３では、GIA モデルの粘弾性構造として ICE-6G では VM5a を、W12 では Whitehouse et al. (2012) で最適化された粘弾性構造を用いて計算した結果を横バーとして示しており、それに対して、妥当と考えらえる範囲で粘性構造を変化させた場合の最大値と最小値の範囲をボックスとして示してある。

図３より、GNSS 観測による鉛直変動は、観測誤差を考慮しても、図の横バーで示した既存の GIA モデルよりも絶対値として大きい変動を示すことが明らかになった。また、図のボックスで示すように、マントル粘性やリソスフェアの厚さといった地球内部構造パラメータを現実的な範囲内で変化させ、地球内部構造パラメータを調整しても観測された変化を説明できなかった。

４－２．氷床融解史を改定した GIA モデルの再計算

4－1 で示したように、地球内部構造パラメータを調整しても、観測された鉛直変位速度を説明できなかったことから、現在提唱されている Lützow-Holm 湾の氷床融解史を改定する必要があることが示唆された。そこで、本研究では Kawamata et al. (2020) が提唱する約 9 千年前から 6 千年前までに生じた Skarvsnes での急激な氷床融解を考慮して氷床融解史モデルの再構築を行った。その結果、GIA モデルから予測される現在の GIA の変動の大きさは、既存の氷床融解史モデルを使用した場合よりも大きな値を示し、測地観測から推定された GIA 変動を説明可能であることが明らかになった（詳細については、服部，2022；本報告書、奥野他）。

４－３．昭和基地での絶対重力測定結果との比較

昭和基地の重力基準点（IAGBN-A）では、1995 年以降、絶対重力測定繰り返し実施されており（例えば、東ほか、2013)、これまでの結果から、-0.22 μ Gal/year での重力の時間変化勾配が得られている（本報告書、土井他)。このデータに対しても GNSS と同様に現在の荷重変化の影響を補正し、GIA モデルとの比較を行った。その結果、従来の GIA モデルでは観測値を十分に説明することができないのに対し、氷床融解史を改定したモデルでは、GNSS 観測と同様により整合する結果が得られることが判明した（服部、2022)。

重力の時間変化は質量変化と観測点の高さ変化の両方の情報を反映するため、GNSS 観測とは独立な情報が得られる。南極での絶対重力測定はまだ大変限られているが、Lützow-Holm 湾周辺の露岩での絶対重力測定や、外国基地での絶対重力測定も実施しており、GIA モデルの研究に向け、今後、より多くの点で信頼できる重力時間変化勾配が得られるようになるものと期待される。

５．まとめと今後の展望

測地観測から推定された GIA 変動を、地球内部構造パラメータを変化させるだけでなく、従来の氷床融解史を変更することで、GIA モデルから説明可能であることを明らかにした。この結果を踏まえると、測地観測データと GIA モデルの比較を基に，その違いを埋めるように過去の氷床融解史モデルを再構築することで、より詳細な LGM 以降の南極氷床融解過程を明らかにできることが示唆された。また、より正確な GIA による変動が明らかにされることで、GIA のモデルエラーが軽減されることが見込まれ、現在の南極氷床変動の理解が進むことが期待される。

参考文献

土井浩一郎，福田洋一，青山雄一，奥野淳一 (2023), 南極での絶対重力測定－GIA 解明に向けた絶対重力測定の概要ならびにその成果－，本報告書.

服部晃久（2022），地上測地観測およびリモートセンシング観測を 7 用いた南極氷床質量変動と GIA 変動の研究，令和 4 年度 総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻 博士学位論文.

Hattori, A., Y. Aoyama, J. Okuno, J. and K. Doi (2021), GNSS Observations of GIA-Induced Crustal Deformation in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. Geophysical Research Letters, 48(13). https://doi.org/10.1029/2021GL093479

Kawamata, M., Y. Suganuma, K. Doi, K. Misawa, M. Hirabayashi, A. Hattori, and T. Sawagaki(2020), Abrupt

Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating. Quaternary Science Reviews, 247, 106540. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106540

奥野淳一，入江芳矢，服部晃久，石輪健樹（2023），南極氷床変動と固体地球のレスポンス–GIA モデリングと測地学的観測データの比較より推定する地球内部構造と氷床融解史–，本報告書.

Schröder, L., M. Horwath, R. Dietrich, V. Helm, M. R. van den Broeke, and S. R. M. Ligtenberg (2019), Four decades of Antarctic surface elevation changes from multi-mission satellite altimetry. The Cryosphere, 13(2), 427–449. https://doi.org/10.5194/tc-13-427-2019

Watkins, M. M., D. N. Wiese, D.-N. Yuan, C. Boening, and F. W. Landerer (2015), Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons: Improved Gravity Observations from GRACE. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(4), 2648–2671. https://doi.org/10.1002/2014JB011547

Whitehouse, P. L., M. J. Bentley, G. A. Milne, M. A. King, M. and I. D. Thomas (2012), A new glacial isostatic adjustment model for Antarctica: Calibrated and tested using observations of relative sea level change and present-day uplift rates: A new GIA model for Antarctica. Geophysical Journal International, 190(3), 1464–1482. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05557.x

Whitehouse, P. L., N. Gomez, M. A. King, and D. A. Wiens (2019), Solid Earth change and the evolution of the Antarctic Ice Sheet. Nature Communications, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41467-018-08068-y

Wiese, D. N., D., -N. Yuan, C. Boening, F. W. Landerer, and M. M. Watkins (2018), JPL GRACE Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height JPL Release 06 Version 1. Ver. 1. PO.DAAC. https://doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ06.

衛星データによる南極氷床変動の研究
－衛星重力データの ICA 解析および SAR データによる氷河流動速度解析－

福田洋一[1]，土井浩一郎[1,2]
[1]国立極地研究所，[2]総合研究大学院大学

A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体地球班）（代表：福田洋一）

１．背景と目的

１－１．衛星による南極氷床変動研究の現状

南極氷床変動は，海水準上昇や海洋循環を通して全球的環境変動と密接に関係しており，将来環境予測にも不可欠な要因である．このため，雪氷学的な研究のみならず，地形学的・地質学的調査，測地観測や衛星データを利用した研究が進められている．

このような研究で，広大な面積を占める南極大陸では衛星データの役割が大きく，実際，南極氷床全体での変動が議論できるようになったのは，1990 年代に様々な衛星観測データが利用できるようになって以降のことである（例えば，福田，2018）．特に，2002 年に打ち上げられた GRACE（Gravity Recovery And Climate Experiment）やその後続ミッションである GRACE-FO(Follow On)での衛星重力観測では，さまざまな原因による地球上での質量移動を重力の変化として直接観測することが可能となり，これまでほとんど不可能であった南極氷床全体の消長を氷床質量の変化として量的に議論することが可能となった．

衛星重力観測による南極氷床変動については，これまでも多くの成果が挙げられており（例えば，The IMBIE team, 2018），これらを総合すると，西南極や南極半島での氷床が大きく減少しているのに対し，東南極では大きな変化はなく，南極全体としては減少ということが一つの共通認識となっている．しかしながら，衛星重力観測による南極氷床変動の研究では，LGM（Last Glacial Maximum）後の氷床融解に伴う GIA（Glacial Isostatic Adjustment）の見積もりが大きな誤差要因となっており，その影響をいかに取り除くかが喫緊の課題となっている．

南極氷床変動の研究においては，氷床変動量の把握とともに，氷床変動のメカニズムを知ることも不可欠である．このような視点では，大陸縁辺から流出する氷河の流速やその変動の把握が一つの重要な課題である．これらについても，1990 年代以降の衛星観測，とりわけ，合成開口レーダ（SAR: Synthetic Aperture Radar）観測が大きな役割を果たしており，特に，GNSS(Global Navigation Satellite System)などの地上観測との連携も期待できる昭和基地周辺では，詳細な氷河流動やそのメカニズムを解明する上でも重要である．

１－２．本研究の目的

以上を踏まえ，本研究では，衛星重力データによる氷床変動の研究における新しい試みとして，ブラインド信号源分離手法（BSS: Blind Source Separation）の一つである ICA（Independent Component Analysis: 独立成分分析）を用いることで，GIA（Glacial Isostatic Adjustment）による固体質量変動と氷床質量変動を独立な信号として分離することを試みた．ICA の解析結果について，高度計など他の衛星観測データや現場観測データ，また，各種の気候変動指数との関連を調べることで，今後の研究にとって重要な南極氷床変動の時空間的特徴の解明に迫ることができると期待される．

一方，SAR データ解析においては，地上観測データの比較が可能な昭和基地周辺の白瀬氷河を主なターゲットとし，質量収支法による流域ごとのより高精度な氷床変動解析のため，氷河流動速度の決定や氷河流動速度の時間的変化，またそのメカニズム解明も視野に入れた研究を実施した．

１－３．本研究の位置付け

A02-2 固体地球班では，現場データが不足している南極，特に東南極での地上観測の実施を主要な柱として研究を実施してきたが，その一つの重要な目的は，現在の南極氷床変動の研究に欠かせなくなっ

ている衛星観測の地上検証や衛星データの解釈に必要な情報を与えることである．また，逆に，衛星観測データが地上観測データの補正処理に利用されるなど，両者は相補的な関係にある．さらに様々なモデル研究は，両者をつなぐ重要な役目を果たすものであり，例えば GIA モデルや氷床流動モデルは本研究と密接に関連するものである．これらの関係は，固体地球班内に限らず，直接的には氷床班の研究と密接に関連しており，また，探査班，モデル班の研究とも連携するものである．

2．ICA による解析

2－1．手法

本研究で用いた ICA は BSS と呼ばれる統計的情報に基づく信号分離手法の一種で，BSS では，一般に観測信号ベクトルがある変換行列による未知の信号源ベクトルの線形結合として与えられると仮定し，適当な逆変換行列を求めることで元の信号源を分離する．BSS の例としてよく知られているのが，主成分分析法（PCA: Principal Component Analysis）で，PCA では観測データのガウス性を仮定し，互いに無相関な信号を得るように逆変換行列を求める．これに対して ICA では，観測データのガウス性は仮定せず，信号の独立性だけを条件に逆変換行列を探すため，固有値問題の解として逆変換行列が求まる PCA とは異なり，ユニークな解が存在する訳ではない．この為，実際の計算手法としても様々な方法が考案されている．ICA は，混合音声の信号分離問題など，主に工学的な応用分野を中心に，1980 年代から研究されているが，近年，固体地球物理学の分野でも，地殻変動データの解析などに利用されるようになっている．GRACE のデータ解析においても，比較的早い時期から，主に陸水変動信号の抽出などに応用されており，研究対象により PCA より良好な結果が得られることが知られている（例えば，Forootan and Kusche, 2012; Awange *et al.,* 2016）．しかし，ICA を南極氷床変動の研究に応用し，GIA と氷床変動の直接的な分離をめざした研究はこれまでになく，我々の研究が最初のものである．

BSS は，データの統計的性質の違いだけを利用した信号分離手法であり，得られた結果についての物理的な妥当性・解釈は，別途，考察する必要がある．すなわち BSS による解析の目的は，そのような物理的な解釈を考える際のヒントを得ることである．GIA と氷床質量変動については，空間的には南極での氷床・基盤地形，地球内部構造などが影響すると考えられており，また，氷床変動における降雪などの気候要因はテレコネクションと呼ばれる遠方の気候変動の影響なども受けていると言われている．従って，ICA による分離信号の解釈として，これらの時空間的な関連性を解明することは，氷床変動のメカニズムを解明する上でも大変重要である．このため本研究では，衛星高度計や SMB(Surface Mass Balance)モデルも用い，さらに，各種の気候変動指数と比較することで，衛星重力データが GIA のみならずどのような要因と関連しているのかの検討も試みた．

2－2．GRACE/GRACE FO の解析

本研究で用いたデータは，GRACE/GRACE FO で取得された 2002 年から 2020 年までの地球重力場の球面調和関数係数データ（level-2 データ）で，GRACE の 3 つの公式データセンターである Jet Propulsion Laboratory(JPL)，Center for Space Research (CSR)，German Research Center for Geosciences (GFZ)から配布されているものである．これらのデータについて，各種の補正やフィルター処理など標準的な処理を施し，ICA の解析には，3 データセンターの平均値を格子点上での時間的な変動データに変換し使用した．データ処理，以下の解釈の詳細については，Shi *et al.* (2022)を参照されたい．

Fig. 1 は，このようにして得られたデータから求めた，2002～2020 の南極での質量変化の線形勾配を示したものである．ここで注意すべきは，Fig.1 には GIA など氷床変

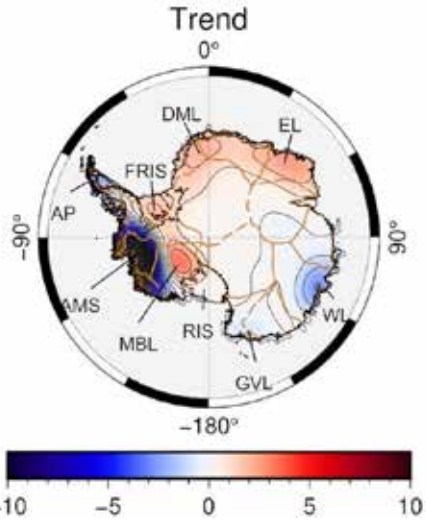


Fig. 1. GRACE/GRACE FO による 2002-2020 の質量変化勾配. Shi *et al.* (2022) を簡略化．数値は水当量換算 (cm/yr).

動以外の原因による質量変化も含まれることである．先に述べたように ICA では，信号のどのような独立性に着目して逆変換行列を求めるかにより，複数の異なるアプローチが考えられる．南極氷床変動において，氷床変動と GIA の信号の分離を考える際には，Fig.1 にみられるような空間変動パターンに着目することが有用と考えられ，まず，空間変動に着目した spatial ICA (sICA)を適用した解析をおこなった．

Fig. 2 には，このようにして sICA で得られた 6 つのモードの空間分布を，また，Fig. 3 にはそれぞれに対応した時間変化成分を示す（Shi *et al.,* 2002）．

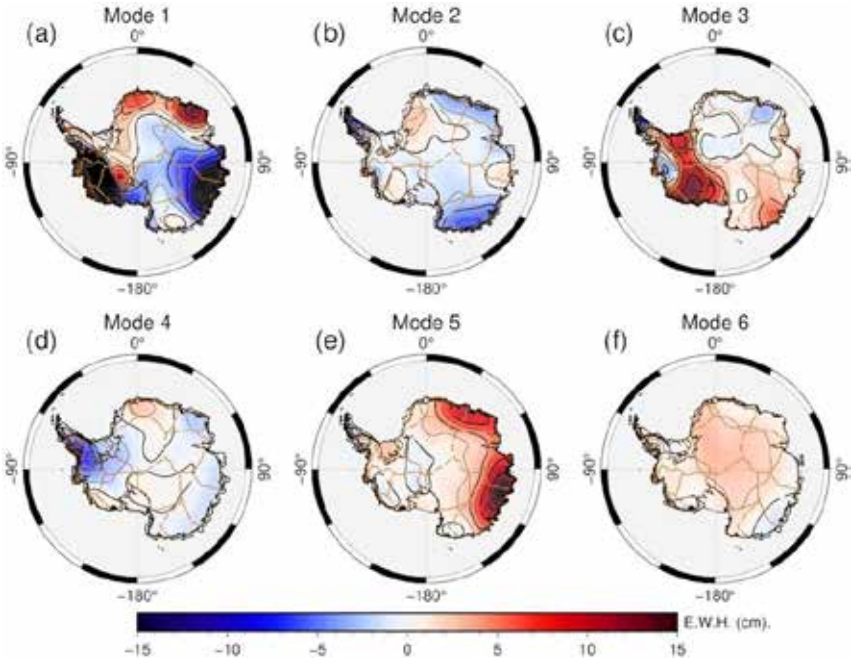


Fig. 2.　sICA で得られた 6 つの空間変換モード（Shi *et al.*, 2022 の Fig.2).

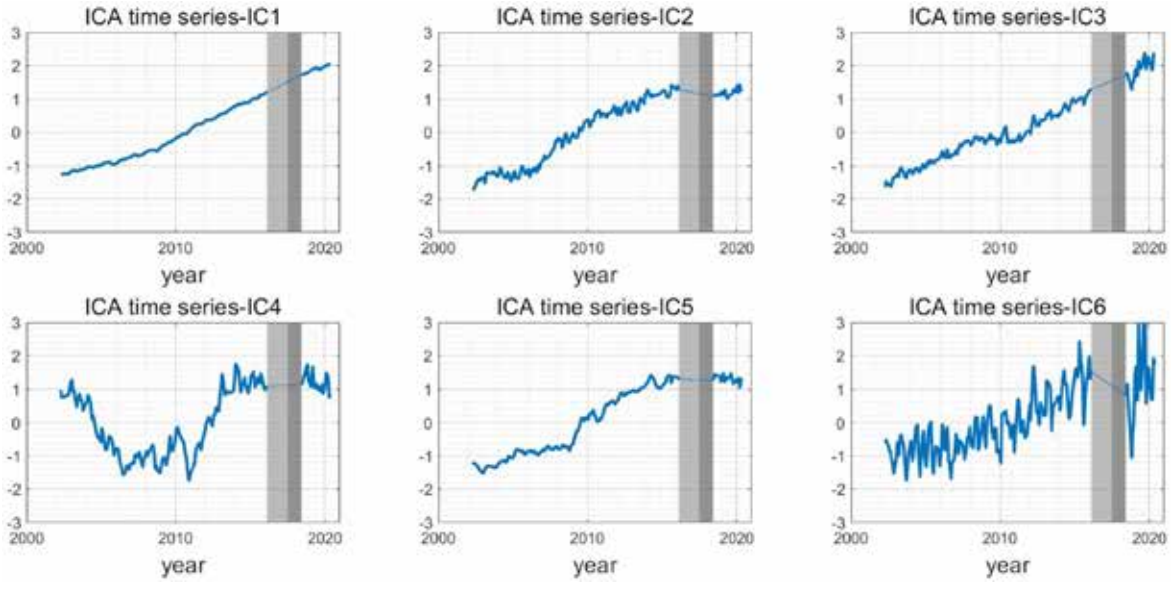


Fig. 3. Fig.2 の 6 つのモードに対応した時間変化成分（Shi *et al.*, 2022 の Fig.3).

Fig.3 に示す 6 つのモードの時間変化成分に着目すると，IC1～IC3 が線形的な変化を，IC 4 ～IC6 がより複雑な時間変化を示しているように見受けられる．このことに着目し，Fig. 2 の IC1～IC3 の空間変動パターンと，線形勾配を示す Fig.1 の空間パターンとを比較すると，IC1 が氷床質量変動，IC3 が GIA に関連するモードであるように思われる．そこで，IC3 が GIA の信号を検出したものかを確認するため，その空間パターンについて，幾つかの代表的な GIA モデルの空間パターンとの相関を調べたところ，0.6～0.7 の高い相関係数が得られた．GIA モデル間の相関係数も同程度であることから，IC3 が GIA の信号をよく検出しているといえる．なお，IC2 については，それほど明瞭ではないが，Fig 1 の南極半島での質量変化と関連しているように推測される．

IC4～IC6 について，IC5 は 2010 年ころを境としたステップ状の時間変化を示しており，空間パターンとしては東南極のドローニングモードランド(DML)やエンダービーランド(EL)での増加が顕著なことから, 同地域で観測されている 2009 年, 2011 年の大量の降雪イベントに対応したものと考えられる．この他，IC4 は数年周期，IC6 は年周的な時間変動パターンを示しているように見受けられるが，対応した空間変動パターンの解釈については必ずしも明確ではなく，さらに検討が必要である．

sICA が空間変動パターンの独立性に着目しているのに対し，temporal ICA (tICA)は時間変動パターンの独立性に着目した解析手法で, 時間変動における物理的な意味のある成分を抽出するのに有用である．このような視点で，GRACE/GRACE-FO の同様のデータに tICA 解析を実施したところ，その一つのモードとして，Fig. 4 の IC6 に示す変動パターンが得られた．Fig.4 には，気象指数の一つである南方振動指数（Southern Oscillation Index: SOI）も示しているが，IC6 とよい相関があるように見受けられる．SOI は貿易風の強さの目安であり，エルニーニョ現象と関係が深いが，このような気象要素が南極での降雪パターンなどとも関連している可能性があり，GRACE/GRACE-FO データにそのような信号が検出されたことは興味深い結果である．

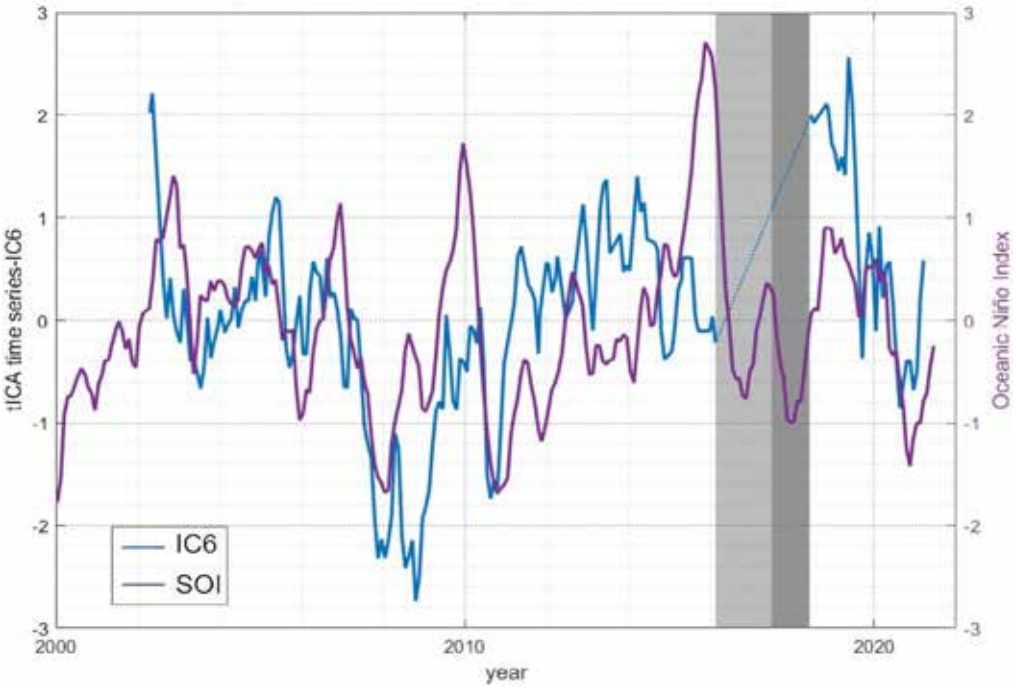


Fig. 4. tICA で得られた IC6 と南方振動指数（SOI）（Shi *et al.*, 2022 の Fig. B3).

２－３．衛星高度計データの解析

衛星データを利用した南極氷床変動の解析では，衛星重力とともに衛星高度計の利用も有用であり，比較的古くからその利用研究が進められている（例えば，Remy and Frezzotti, 2006）．高度計データの特徴の一つは，氷床の高さ変化から氷床変動量を推定するため，GIA による基盤の変動の影響はほぼ無視できることである．このため，衛星重力と衛星高度計データを組み合わせることにより，原理的には GIA の信号を検出することも可能で，それを目指した研究もおこなわれている（例えば，Yamamoto *et al.,* 2011）．このようなことから，高度計データについても sICA による解析を実施し GRACE の結果と比較を試みた．使用したデータは，Schröder *et al.* (2019)による高度計データをコンパイルしたもののうち，GRACE の観測期間に対応する 2002 年以降のデータについて，空間分解能を揃えるため空間フィルターを施しリサンプリングしたものである．

得られた結果について，基本的には衛星重力と同様のモードが検出されており，特に IC1 の氷床質量変動に関連するものや IC5 の顕著な降雪イベントに関連すると考えられるモードについては，明瞭な信号が得られている．一方，衛星重力で GIA の信号が顕著な IC3 の空間パターンは，衛星高度計のデータでは全く検出されなかった．このことは，逆に，衛星重力による IC3 が GIA の信号を検出している可能性の高く，他の情報を一切使用せず，衛星重力データのみから GIA の検出ができたことを示している．

３．SAR データの解析

３－１．SAR データおよび流動速度の推定方法

波長 1 cm から 1 m のマイクロ波を利用した SAR 観測は天候に左右されないため，急激な気象変化がしばしば起きる極域においても安定的に観測を実施することができる．SAR を用いた観測では地表面の状況を詳細に把握できるだけではなく，複数回同じ場所を観測することで，地表面の変位も検出することができる．

南極大陸の大半は氷床に覆われており，氷床は常に下流に向けて流動している．大陸の縁辺まで達した氷床はやがて氷山となって海に流出するが，その流出量の計測は南極氷床の質量変動を推定する上で不可欠なものである．流出量を推定する際に必要なる要素のひとつが氷床の流動速度であるが，SAR による観測はその重要な手法のひとつとなっている．

現在，SAR を搭載した多数の衛星が運用されており，それらの観測したデータは農業や防災など多くの分野で利用されている．そのうち，本研究で用いられた主な SAR 観測データとしては，日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）が運用している ALOS-2 に搭載されている波長 23.6 cm の PALSAR-2 と欧州宇宙機構（ESA）の衛星 Sentinel-1（A,B）に搭載されている波長 5.6 cm の C-SAR による観測データが用いられた．

異なる時期の SAR データを使った表面変位の測定手法としてオフセット・トラッキングと干渉 SAR の 2 つの手法がある．オフセット・トラッキング法は画像相関法とも呼ばれ，2 つの後方散乱強度画像の位置合わせを行い，対応する画素(ピクセル)間の移動量からその間の変位を求める方法である．一方，干渉 SAR 法は，やはり 2 つの画像の位置合わせを精密に行った後，対応する画素間の散乱波位相の差から，衛星からの距離の変化(地表の変位)を求める方法である．オフセット・トラッキング法に比べて干渉 SAR 法のほうが変位の測定精度は高いものの，時間の経過とともに 2 つの画像間の干渉性が悪くなるほか，測定可能な変位量に制限があり，変位量の大きい氷床の流動の測定にはオフセット・トラッキング法のほうが有利な場合が多い．以下に紹介する ALOS-2/PALSAR2，Sentinel-1/C-SAR の観測データを使った白瀬氷河の流動に関する研究では，いずれも解析方法としてはオフセット・トラッキング法が用いられている．

３－２．白瀬氷河流動速度の季節変動と末端域における急激な速度低下

SAR による観測頻度が増してくるとこれまで観測することができなかった短周期の変動も見つかるようになってきた．Sentinel-1 は A および B の同じスペックを持つ 2 機の衛星が同一軌道上を半周期ずつずれて飛行しており，1 機の回帰周期は 12 日であることから，最短 6 日周期での観測が可能である．南極域においてはほぼ 12 日間隔で観測が行われており，流動速度の季節変動も検出可能である．大川ほか（2022a）は，2018 年から 2022 年にかけて Sentinel-1A で取得された白瀬氷河周辺の SAR 画像を用いて，白瀬氷河の接地線（Grounding Line: GL）から氷河末端にかけての東，西，中央の 3 測線（流線）に沿った流動速度の時系列を求めた．その結果，GL から 30 km 下流付近から夏期（11 月～2 月）に増速し，冬期（5 月～8 月）に減速するという季節変化のようなパターンが見られ，末端に行くほど変動の振幅が大きくなる傾向にあることがわかった．海氷による堰き止め効果との関係を調べるために，ICESat-2 のレーザー高度計データから得られる海水の表面高度を用いて氷河末端周辺の海水厚を求め，比較したところ，流動速度と海氷厚の間に負の相関関係が見られた．Fig. 5 に比較結果を示す．この結果から海氷厚の変化が白瀬氷河下流の流動速度に影響を与えていることが示唆された．

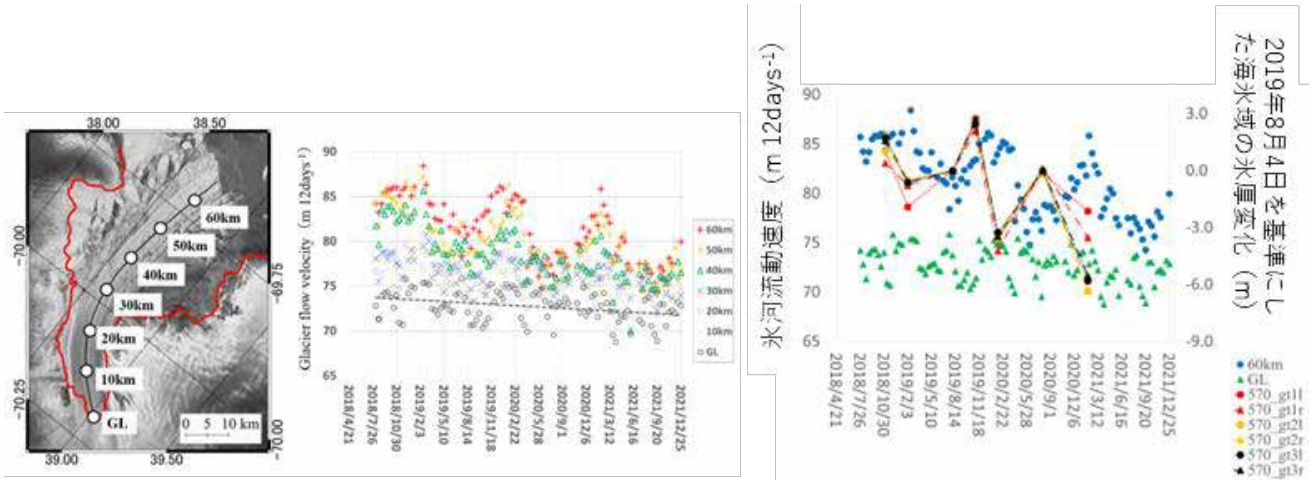


Fig. 5.　白瀬氷河中央流線の流動速度変化と海氷厚変化の比較．（左）中央流線位置，（中）流動速度時系列，（右）流動速度変化と海氷厚変化の比較（大川ほか，2022a より）．

また，東側の測線（流線）では流動速度の季節変動とは別に，GL から 30～40 km 下流付近と 30 km～氷河末端部で 2020 年と 2021 年にそれぞれ急激な速度低下が見られた．その付近の強度画像の時系列には氷山群（浮氷舌）の一部が急に停止する様子が見られ，それらの動きが何らかの原因で妨げられたことを示していた．Fig. 6 に東側の測線とその測線上の速度変化の時系列を示す．

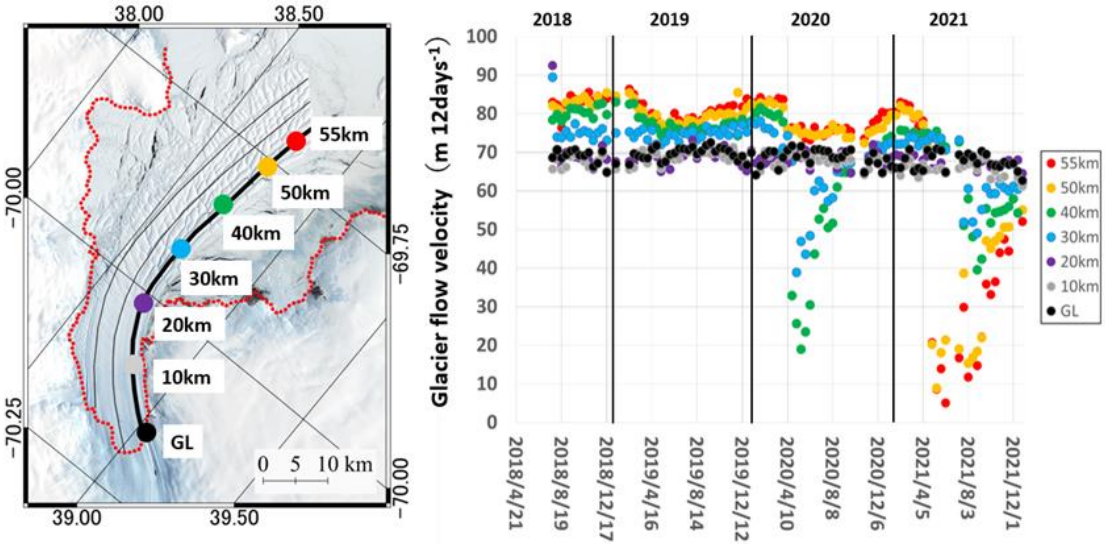


Fig. 6.　白瀬氷河東側測線（左）とその流動速度時系列（右）．2020 年と 2021 年に流動速度の急減速イベントが見られる（大川ほか，2022b より）．

過去に日本南極地域観測隊によって実施された海氷上からの音響測深調査から作成された海底地形図 (Moriwaki and Yoshida, 1983)を基に求められた急減速した 2 カ所の氷山付近の水深と，海氷厚と同様にして求めた氷山群の海面下の氷厚を比較したところ，ほぼ等しいか海面下の氷厚のほうが大きいという結果が得られた．このことは水深の浅くなっている場所で氷山群の一部が着底した可能性があることを示している（大川ほか，2022 b）．Fig. 7 に氷河末端部で生じた 2021 年のイベントの発生場所とその付近の氷山の表面高度および音響測深調査から得られてた水深を示す．

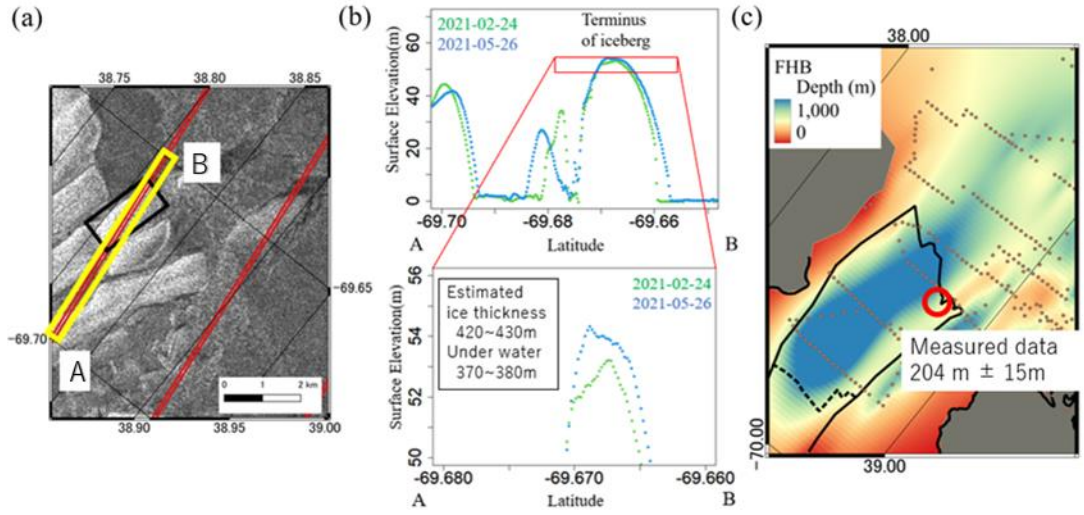


Fig. 7.　2021 年流動速度急減速イベント発生場所付近の表面高度と水深．(a)イベント発生場所と高度計測線, (b)高度計で測定された氷山の表面高度, (c)イベント発生場所付近の水深(大川ほか, 2022b より)．

３－３．白瀬氷河流動速度変化の検証

2018 年 7 月から 2019 年 9 月にかけての ALOS-2/PALSAR-2 データ 21 シーン（20 ペア）にオフセット・トラッキング手法を適用して，白瀬氷河の流動速度変動を調べた．年間流動速度については，JERS-1/SAR で観測された 1996～1998 年の速度(Nakamura *et al.*, 2007)，ALOS/PALSAR で 2007～2010 年に観測された速度(Nakamura *et al.*, 2010, 2017)，ALOS-2/PALSAR2 で 2014～2017 年に観測された速度(Nakamura *et al.*, 2017)を今回得られた速度と比較したが，それらにあまり変化はなく，1996 年から 2019 年にかけての 24 年間の平均速度は 2.30 km/yr であった(Nakamura *et al.*, 2022)．また，GL より上流部（GL の 5～30 km 上流）と下流部（GL の 5～35 km 下流）において，夏期（12 月から 2 月）と冬期（5 月から 8 月）の流動速度を比較すると，夏期には速度が速くなり，冬期には遅くなる傾向が見られた．

波長の長い PALSAR-2 は電離層擾乱の影響を受けやすく，電離層総電子数変化に伴いマイクロ波の

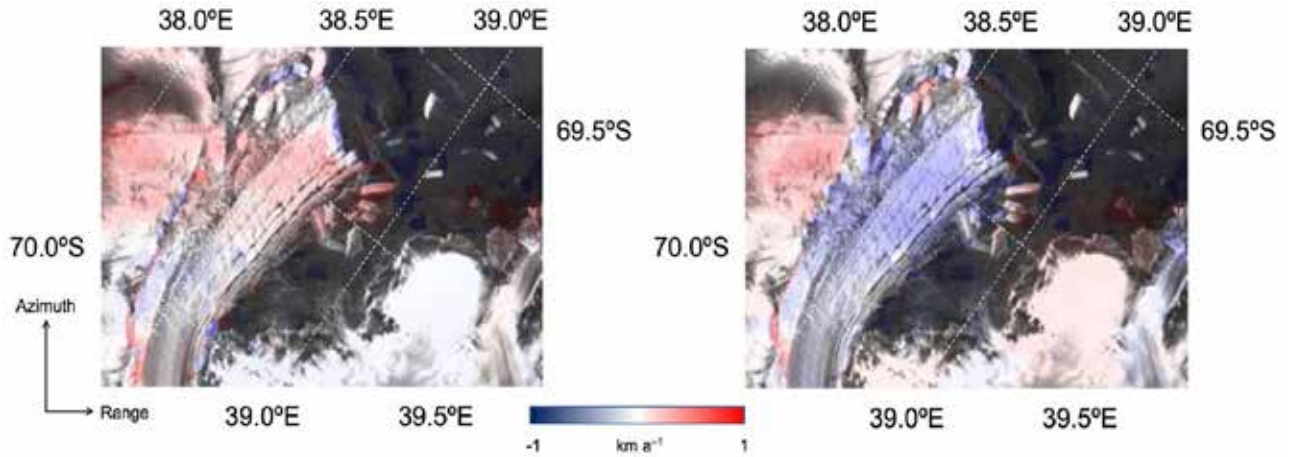


Fig. 8.　電離層擾乱に伴う影響が現れた 2 ペア（左：2019 年 6 月 30 日－7 月 14 日，右：2019 年 7 月 14 日－7 月 28 日）(Nakamura *et al.*, 2022 より)．

伝搬遅延が生じ，変位量推定にも誤差が生じる．2018 年 7 月から 2019 年 9 月にかけての 20 ペアの中で電離層誤差の有無を調べたところ，2019 年 6 月 30 日～7 月 14 日と 2019 年 7 月 14 日～7 月 28 日の 2 ペアにおいて影響が見られた．Fig. 8 に上記 2 ペアについて，全ペアの平均速度からの差を示すが，白瀬氷河の下流付近の氷床上や氷河上に観測された電離層の影響（赤い部分と青い部分）が現れているのがわかる．これらの差の大きさは流動速度の標準偏差(SD)を超えており，今後，PALSAR-2 のデータを使って流動速度を推定する際に注意が必要であることを示している．

氷河上に設置されたアイスレーダー（ApRES）に搭載されている GNSS の流動速度と PALSAR-2 による同時期に測定された流動速度との比較も行った．Fig. 9 に両者の比較結果を示す．両者の相関係数は 0.78 で，RMSE は 0.049 km/yr となっており，互いによく一致していた (Nakamura *et al.*, 2022)．

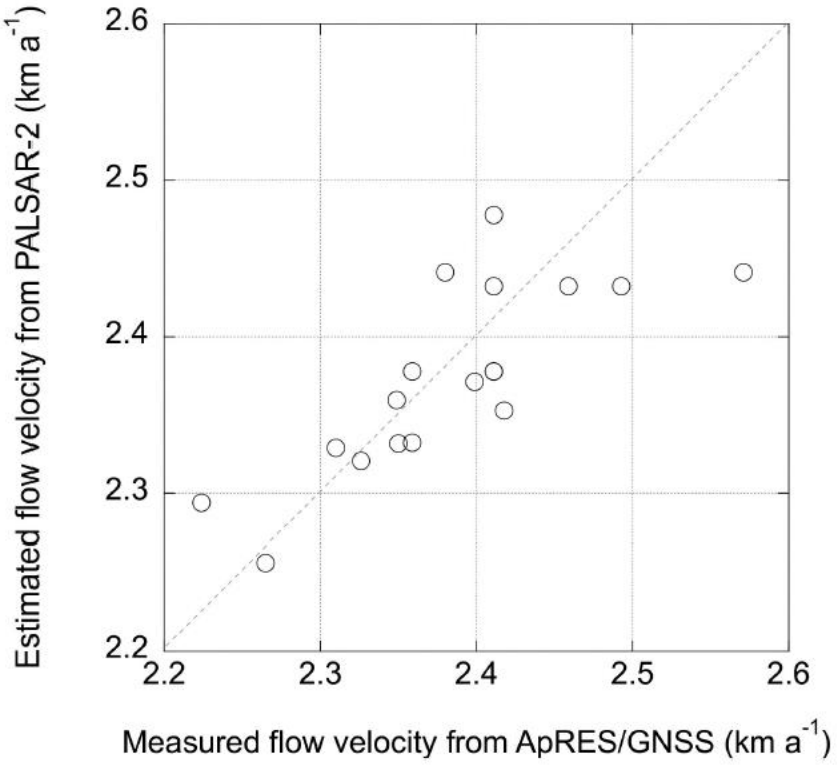


Fig. 9.　PALSAR-2 と GNSS による流動速度の比較（Nakamura *et al.*, 2022 より）．

4. まとめ

本研究では，GRACE/GRACE-FO データの ICA 解析により，他の情報を用いることなく GIA の信号抽出に成功した．このことは，ICA の有用性を示す重要な成果である．一方，ICA では，信号を独立な成分に分解するだけであり，その物理的な意味については別途検討が必要である．その際には，様々な関連データの解析や比較が必要であり，本研究ではその第一歩として高度計データの解析や，GIA モデル，気象因子との比較を紹介した．今後，検出された情報の物理的な意味を探る上で，SMB モデルデータの ICA 解析やその結果比較なども有用と思われる．

衛星重力データは，その性格上，空間分解能が限られることから，微視的な物理過程の研究には必ずしも向いていない．一方，SAR では，現場データに匹敵する高分解能のデータが，広範囲にわたり均質に得られることから，特に，大陸縁辺や氷河末端での氷床変動やその物理過程の研究に有用と考えられる．本研究での，白瀬氷河末端部での氷河流動速度の時間的変化の検出などはその例である．

このような微視的なデータと衛星重力のマクロのデータを結合するのが氷床流動モデルなどのモデル研究であり，すでに SMB データの利用などでの連携を進めているが，今後，氷床班やモデル班などとのさらなる連携が肝要である．

５．謝辞

本稿は，固体地球班で実施した衛星データに関連した研究をまとめたもので，特に，衛星重力データ解析については総研大学生の施天焰氏，SAR 解析については日本大学の中村和樹氏，総研大学生の大川翔太郎氏の研究に負うところが大きい．また，奥野淳一氏，青山雄一氏，入江芳矢氏，服部晃久氏，山本圭香氏ほか，日常的に議論に加わり有用なアドバイスをいただいた固体地球班の皆さん，また，本研究領域の関連の皆さんに謝意を表する．

参考文献

Awange, J.L., E. Forootan, M. Kuhn, J. Kusche, and B. Heck. Water storage changes and climate variability within the Nile Basin between 2002 and 2011. Advances in Water Resources, 73:1–15, doi: 10.1016/j.advwatres.2014, 2014.

Yamamoto, K., Y. Fukuda and K. Doi, Interpretation of GIA and ice-sheet mass trends over Antarctica using GRACE and ICESat data as a constraint to GIA models, Tectonophysics, 511, 69-78, doi:10.1016/j.tecto.2010.11.010, 2011.

Forootan, E., and J. Kusche, Separation of global time-variable gravity signals into maximally independent components. Journal of Geodesy, 86(7), 477–497, 1432-1394. doi: 10.1007/s00190-011-0532-5, 2012.

福田洋一，衛星観測による南極氷床質量収支，低温科学，76，187-204, doi:10.14943/lowtemsci.76.187, 2018.

Moriwaki, K. and Y. Yoshida, “Submarine topography of Lützow-Holm Bay, Antarctica,1983, Memoirs Nat. Inst. Polar Res. Special Issue, vol. 28, pp. 247–258.

Nakamura, K., K. Doi, and K. Shibuya, 2007, Estimation of seasonal changes in the flow of Shirase Glacier using JERS-1/SAR image correlation, Polar Sci., vol. 1, no. 2–4, pp. 73–83.

Nakamura, K., K. Doi, and K. Shibuya, 2010, Fluctuations in the flow velocity of the Antarctic Shirase Glacier over 11-years period, Polar Sci., vol. 4, no. 3, pp. 443–455.

Nakamura, K., T. Yamanokuchi, S. Aoki, K. Doi, and K. Shibuya, 2017, Temporal variations in the flow velocity for Shirase Glacier in Antarctica over a 20-year period,” Seppyo, vol. 79, no. 1, pp. 3–15.

Nakamura, K., S. Aoki, T. Yamanokuchi, T. Tamura and K. Doi, Validation for ice flow velocity variations of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 offset tracking, 2022, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3165581.

大川翔太郎，土井浩一郎，中村和樹，青山雄一，永井裕人，白瀬氷河流動速度の季節変動に及ぼす周辺定着氷の厚さの影響について，2202a，雪氷研究大会（札幌），2022 年 10 月．

大川翔太郎，土井浩一郎，青山雄一，東南極白瀬氷河で 2020 年および 2021 年 に発生した流動減速イベント，2022b，日本測地学会第 138 回講演会（鹿児島），2022 年 10 月．

Remy, F. and M. Frezzotti, Antarctica Ice Sheet Mass Balance. *C. R. Geoscience*, **338**, 1084–1097, doi:10.1016/j.crte.2006.05.009, 2006.

Schröder, L., M. Horwath, R. Dietrich, V. Helm, M. R. van den Broeke, and S. R. M. Ligtenberg, Four decades of Antarctic surface elevation changes from multi-mission satellite altimetry. The Cryosphere, 13(2):427–449, doi: 10.5194/tc-13-427-2019. 4.1.2, 4.2, 2019.

Shi, T., Y. Fukuda, K. Doi, and J. Okuno, Extraction of GRACE/GRACE-FO observed mass change patterns across Antarctica via independent component analysis (ICA), Geophysical Journal International, 229(3), 1914–1926, doi: 10.1093/gji/ggac033, 2022.

The IMBIE team. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. Nature, 558(7709):219–222, doi: 10.1038/s41586-018-0179-y, 2018.

東南極氷床変動の復元と大規模氷床融解メカニズムの解明

-地形・地質調査および固体地球モデリングによる長期的氷床変動の復元と解析-

菅沼悠介[1,2], 石輪健樹[1,2], 川又基人[1,3], 奥野淳一[1,2,4]
[1]国立極地研究所, [2]総合研究大学院大学, [3]寒冷地土木研究所, [4]情報・システム研究機構

A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体班）（代表：福田洋一）

1 背景と目的

1-1 研究背景

近年，南極氷床融解の加速が相次いで報告され，地球温暖化に伴う近未来の急激な海水準上昇が社会的にも強く懸念されている．一方，このような氷床の融解傾向は，過去数十年の観測から得られたもので，短周期の揺らぎである可能性もあり，長期的に継続し，やがて地球環境の激変につながるような現象であるかについては，まだ不明な点も残されている．また，南極氷床融解の予測には精密な大気ー海洋および氷床モデルシミュレーションが不可欠であるが，現状として氷床融解メカニズムの充分な理解に至っているとはいえず，いまだ海水準上昇の将来予測には不確実性が大きい．この問題を解決する方法の一つとして，現地の直接的な地質データから長期的な南極氷床の変動を精密に復元し，氷床融解のメカニズムを解明するとともに，その結果を各モデルシミュレーションの再現性確認やモデル較正に繋げていくことが有効である．

約2万年前の最終氷期最盛期では大陸氷床が拡大し，全球的な海水準も約130 m 低下したと考えられている（Ishiwa et al., 2019）．氷床拡大の削剥により最終氷期最盛期以前の海水準・氷床変動の地質記録は残りにくいとされているが，東南極の露岩域では最終氷期最盛期以前の海洋酸素酸素同位体ステージ3の海水準記録が報告されている（例えば，Miura et al., 1998）．しかし，これらの海水準データと従来の氷床融解史による Glacial isostatic adjustment（GIA）モデルの計算結果に乖離があり，氷期の南極氷床変動史を精緻化する必要がある．また，最終氷期最盛期以降の南極氷床のどこが，いつ，どれくらい融解したか，についても地質記録の時空間分布が十分でないため，氷床融解史に顕著な違いがあるのが現状である．

1-2 研究目的

過去十数万年間における長期的な東南極氷床変動の復元と，さらには最後の氷期から現在の間氷期への移行期におきた急激かつ大規模な氷床融解のメカニズム解明を目的として，露岩域での氷河調査地形調査に加えて，砕氷船「しらせ」による初めての本格的な海底堆積物掘削や，新開発の地層掘削システムを用いた凍結湖沼上からの湖底堆積物掘削，さらには露岩域での陸上ボーリングなどを実施した．既存や新規取得した地質データから氷床融解モデルの改善も行った．本新学術領域研究の各プロジェクトの中でも特に長い時間スケールを対象としたテーマであるが，「南極海・南極氷床の気候システム」を理解する上で，現在の観測だけでは得られない大きな時空間スケールでの南極氷床変動メカニズムの解明を進めることができる．

1-3 国際連携

本研究では，インド極地海洋研究所（NCPOR）の協力を得て，東南極シューマッハオアシスでの現地調査を第61次日本南極地域観測隊で実施した．また，ノルウェー極地研究所（NPI）の協力を得て実施した中央ドロンイングモードランドでの第57次日本南極地域観測隊の結果については，イギリス，米国，ノルウェ，スウェーデン等の研究者による大型国際研究プロジェクト「MAGIC-DML（https://www.magicdml.net/）」の協力を得て各種の解析を進め，論文を執筆した．

2 方法

2-1 研究対象エリア

本研究の対象地域は，東南極の露岩域および沿岸域である（図1）．第59次日本南極地域観測隊での調査では，リュツォ・ホルム湾の宗谷海岸露岩域で地形・地質調査を実施した．第61次日本南極地域観測では，トッテン氷河沖，ケープダンレー沖，リュツォ・ホルム湾で砕氷船「しらせ」による海底堆積物掘削，ラングホブデにおいて浅海・湖沼・陸上の地形調査，およびオングル島において陸上の地形調査と，インド隊との共同調査によるシューマッハオアシスで湖沼・陸上の地形・地質調査を実施した．

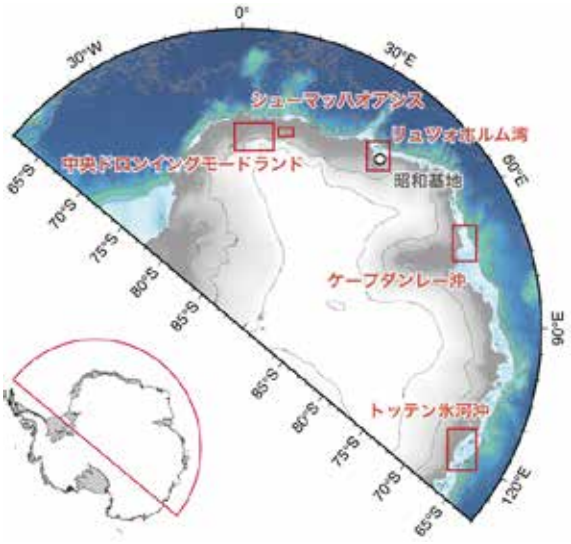


図1：東南極における本研究研究の主な対象地域．

2-2 過去の氷床変動・融解の復元

南極大陸やその周辺海域の地形・地質学的な記録からは，断片的ではあるとはいえ，過去の南極氷床変動を復元するうえで，他の地球科学的手法では得ることができない独特のデータを得ることができる（三浦，2018）．海底地形解析や海浜・海底堆積物分析からは過去の氷床の拡大域や後退・融解の年代やそのプロセスを推定が，露岩域の基盤や迷子石試料の表面露出年代測定からは過去の氷床高度低下イベントの年代と規模を復元することも可能となる．ただし，これらの手法は，現地での詳細な地形・地質学的記載と合わせることで初めて信頼できる氷床変動・融解復元データとなる点で注意が必要である．

2-3 海水準の復元

地球上に存在する氷床量の変動は，海水を増減させるため海水準の変動として観測される．全球的海水準とは，氷床量変動を汎世界的な海水準変動に換算した量であり（氷床量相当海水準変動とも呼ばれる），実際の海水準変動は，観測する地域によって大きく異なる．これは，巨大な氷床の消長や氷床量の変化に連動する海水量の変動などによる地域的な荷重変動に対して，地球表層および内部の質量再分配がおきるためである．この関係を利用すると，世界各地で観測される海水準変動（これを相対的海水準変動と呼ぶ）と，地球表層および内部の質量再分配のモデル計算から，過去の氷床量・分布の変動の推定が可能となる（奥野，2018）．つまり，南極沿岸で湖沼や浅海の堆積物から相対的海水準変動を復元することができれば，過去の南極氷床の変動を定量的に求めることが可能となり，さらには氷床融解のタイミングや規模を推定することも可能となる（詳しくは菅沼ほか，2020を参照）．

3 成果

3-1 リュツォ・ホルム湾における最終氷期以降の急激な氷床高度の低下

第57次および第59次日本南極地域観測隊の現地調査による氷河地形調査と，採取した岩石試料の表面露出年代測定に基づき，リュツォ・ホルム湾宗谷海岸南部における最終氷期以降の南極氷床の融解過程を復元進めた（川又ほか，2020; 2021）．その結果，少なくとも宗谷海岸南部は，最終氷期に東南極氷床に完全に覆われており，その後約9,000–5,000年前にかけて露出（融解）したことが明らかになった（図2）（Kawamata et al., 2020）．この大規模な氷床融解は，とくにリュツォ・ホルム湾内の海底谷沿いで顕著に起きていることから，湾外から侵入した周極深層水による影響によって引き起こされた可能性がある（図3）．

リュツォ・ホルム湾での現地調査では，岩石の表面露出年代測定に加えて，新開発の可搬型パーカッションピストンコアラー（菅沼ほか，2019；特許6824503 土砂採取装置）を用いて，基盤岩まで到達する湖沼堆積物掘削に初めて成功した．湖沼堆積物の最下部の放射性炭素年代測定からも上記の表面露出年代にも届く氷床変動復元と整合的なデータが得られており，現在発表準備中である（Kawamata et al., in prep; Katsuki et al., in prep）．さらに既存の日本南極地域観測のレガシー試料，および第61次日本南極地域観測隊での現地調査によ

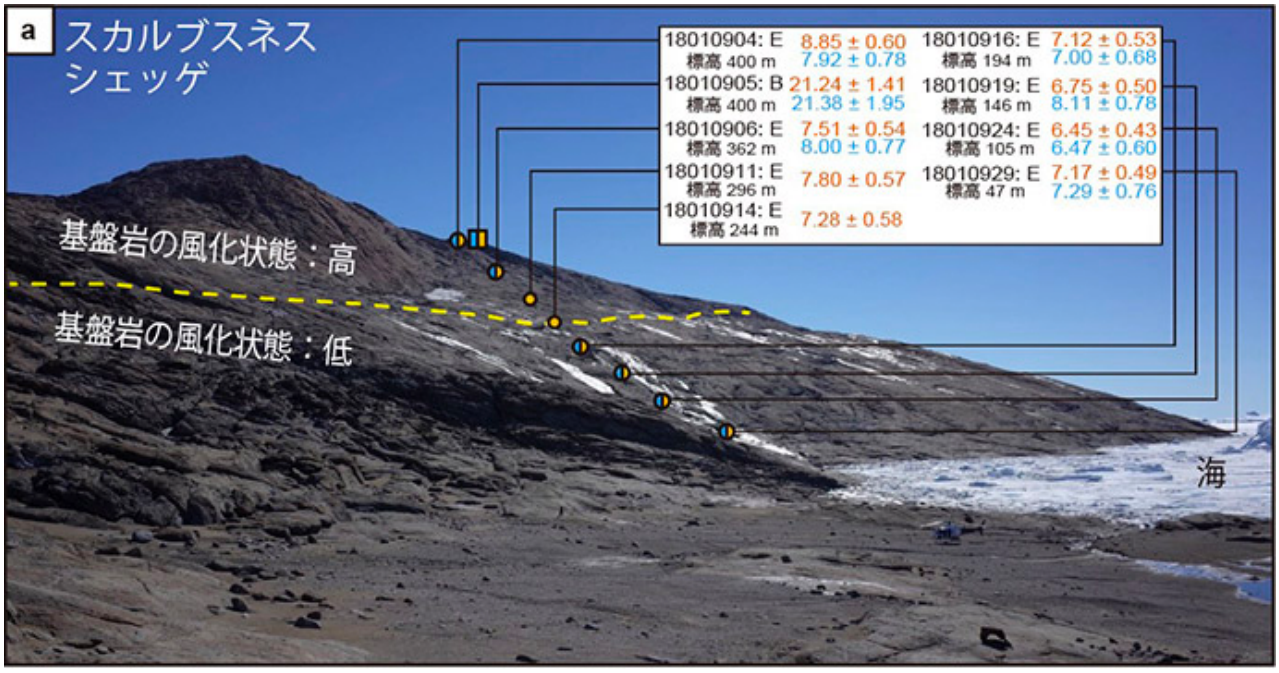


図2: 宗谷海岸南部，スカルブスネスのシェッゲで採取した岩石試料の表面露出年代測定結果．試料名（1801～），種類（E 迷子石，B 基盤岩），標高および表面露出年代を示す．赤字で示した数値はベリリウム-10（10Be）を基にした表面露出年代，青字で示した数値はアルミニウム-26（26Al）を基に計算した表面露出年代を表す（単位は1000 年）．

って採取した貝形虫化石の解析から，当該領域の海水準復元について新たなデータが得られつつある（Sasaki et al., 2022; 2023）．

3-2 最終退氷期の海水準変動記録取得に向けた浅海域地形調査

最終退氷期の南極氷床厚変化の時空間分布に各氷床融解モデル間で差異が生じる要因として，海水準・氷床変動を示す地質データが最終退氷期では不足している点が上げられる．南極沿岸域の最終氷期最盛期の海水準は約100 m 低下したと考えられるため，水深100 m 以浅の堆積物試料が最終退氷期の海水準・氷床変動の復元に有用である．しかし，浅海域は砕氷船「しらせ」などの船舶が入りにくいため，掘削地点の選定に不可欠な海底地形の取得が困難であった．第61次日本南極地域観測隊の地形調査では，魚探による測深を実施した（石輪ほか，2020）．その結果，ラングホブデの浅海域において，過去に湖だった可能性がある地形が見つかった（図4，Ishiwa et al., 2021）．今後の掘削で堆積物を採取し，分析することで最終退氷期の南極氷床変動史の復元に繋がると期待される．

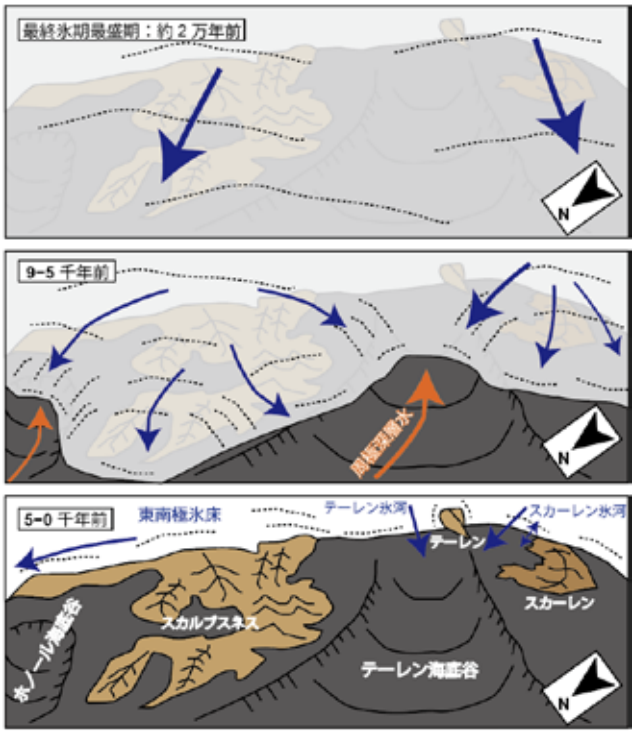


図3: 宗谷海岸南部の氷床融解過程の概念図．青矢印は地形調査結果から推定される当時の氷床流動方向を示す．宗谷海岸南部地域は最終氷期に厚さ 400 m 以上の氷床で覆われていた．その後，約9,000–5,000年前にかけて暖かい海水（周極深層水）が海底谷に流入したことで氷床が急激に融解した可能性がある．Kawamata et al. (2020) から引用．

3-3 ドロンイングモードランドにおける最終氷期以降の急激な氷床融解とそのメカニズム

東南極中央ドロンイングモードランドを対象として，氷河地形調査と採取試料の表面露出年代から，最終氷期以降の氷床融解過程の復元を試みた．その結果，当該地域における東南極氷床が約9000–5000年前にかけて急激に高度を減じたことが明らかになった（図5）．また，この氷床量減少の規模とタイミングは，前述のリュツォ・ホルム湾における氷床高度低下データ（Kawamata et al., 2020）ともおおよそ一致した．この結果に対して，高解像度領域氷床モデリングと，大陸スケールの氷床モデル（モデル班と連携）を実施し，この氷床高度低下イベントがローカルな現象ではなく，ドロンイングモードランドにおける普遍的な傾向であることを確認した．さらに，この急激な氷床質量損失の原因を解析するため，アイスコアによる古気温プロキシ，海洋モデルによる周極深層水に対応した水深の古海水温（モデル班と連携），および GIA モデルに基づくこの地域の相対的海水準変動推定データ，との比較を行った．とくに相対的海水準変動の推定においては，従来の氷床変動史（ICE-6G）と，今回得られた氷床高度低下のタイミングで補正した改良版の氷床変動史を利用した．その結果，この改良版の氷床変動史において，約9000–8000年前にかけて相対的海水準に顕著なピークが存在すること

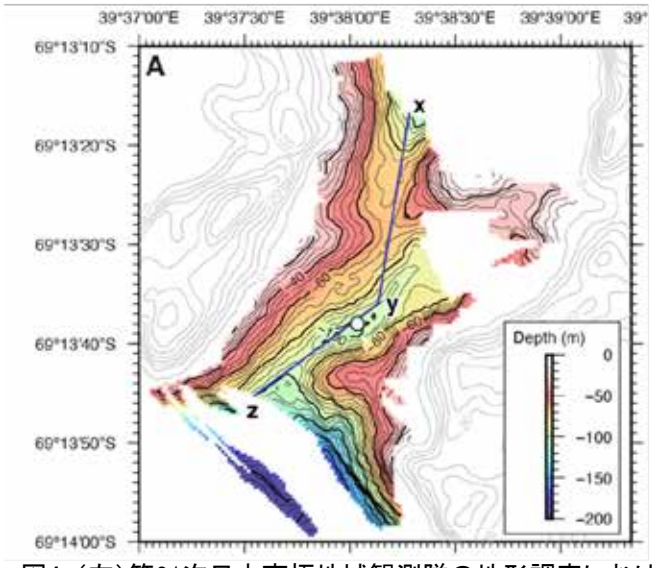


図4:（左）第61次日本南極地域観測隊の地形調査における浅海域測深結果．Ishiwa et al. (2021)より引用．（右）写真中央の入り江が研究対象域．

が明らかになった（図5）．これらの結果を総合して，約9000−5000年前におきたドロンイングモードランドの大規模な氷床質量損失は，周極深層水の流入に加えて，相対的海水準のピークが引き金になったとする新たな氷床融解メカニズムを提唱した（図6）（Suganuma et al., 2022）．

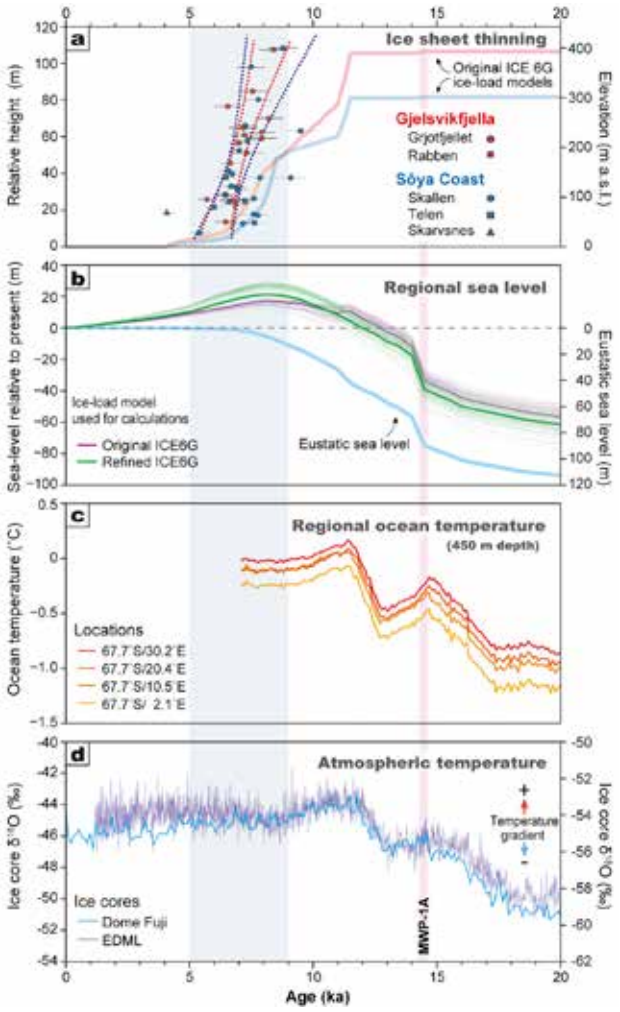


図 5: ドロンイングモードランドにおける最終氷期以降の氷床融解と様々な古気候記録との比較．(a) 中央ドロンイングモードランドとリュツォ・ホルム湾宗谷海岸南部における氷床高度の低下と既存の氷床荷重モデル（ICE6G）．(b) 従来の氷床荷重モデル（紫）と，本研究で改良したモデル（緑）による相対的海水準変動．(c) Obase et al. (2021) から求めた中央ドロンイングモードランド沖における水深 450 m の海水温．(d) 南極アイスコア（EDML とドームふじ）の古気温プロキシ（$\delta^{18}O$）記録．

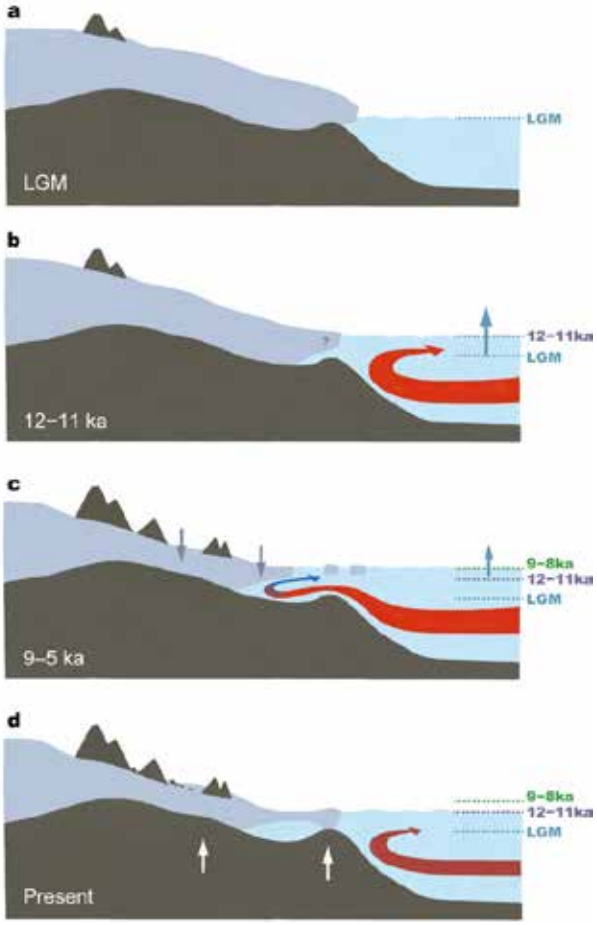


図6: ドロンイングモードランドにおける東南極氷床融解メカニズムの模式図．(a) 最終氷期には海水準低下により東南極氷床が拡大．(b) 周極深層水の温暖化によって棚氷の後退が始まったと考えられるが，東南極氷床には変化は認められない．(c) 9000年前頃，地域的な海水準がピークを迎えたタイミングで温暖な周極深層水の流入により棚氷の融解・崩壊が進み，内陸に伝播し，東南極氷床が大きく減少した．この傾向は約5000年前まで続いた．(d) 氷床荷重開放による南極大陸の隆起により，相対的海水準が低下した．その結果，ドロンイングモードランド域の棚氷やアイスライズ等が安定化し，東南極氷床が若干再拡大した可能性がある．

また，MAGIC-DML との国際共同研究によって，西ドロンイングモードランドにおいてもさらに長期的な氷床変動復元や氷床モデルによる変動メカニズムの解析が進みつつある（Andersen et al., 2020; Newall et al., 2020）．さらに，東部ドロンイングモードランドのセール・ロンダーネ山地では，極低温・乾燥環境下における岩石風化メカニズムに対して新たな知見が得られた（Kanamaru et al., 2018）．この結果を応用すれば，衛星データ解析から露岩域の風化度評価が実現する可能性がある．

3-4 最終間氷期以降の氷床変動

東南極のリュツォ・ホルム湾とプリッツ湾で採取された貝化石や堆積物の年代測定から得られた過去の海水準データ（これまでに南極地域観測隊で取得されたデータも含む）は，5万年前から3万年前の間と過去1万年間に高海面期が存在したことを示す．特に5万年前から3万年前の高海面データは南極においては限られた地域でしか得られていないが，これまでの GIA モデルによる海水準の推定と矛盾が生じていた．

数百通り以上の GIA モデル上のパラメータを変更して検討を重ねたところ，約9万年前から約4万年前の東

南極氷床の沿岸域に最終氷期最盛期よりもさらに多い氷床量を仮定することで，5万年前から3万年前の高海面データと GIA モデルによる計算結果が矛盾しないことが示された．つまり，最終氷期最盛期以前に，東南極の一部で氷床が拡大していた可能性が示された（図7）．これは，従来考えられていた「南極氷床は最終氷期最盛期に最大量に達した」という説とは異なる結果である．約10万年前から約6万年前に起きた氷床の成長は，南極海の古環境変動とも密接に関連していると考えられる．

4 領域内連携

ドロンイングモードランドにおける最終氷期以降の急激な氷床融解とそのメカニズムに関して，モデル班と氷床変動復元と氷床融解メカニズムの解析において氷床・海洋モデルについて協同で議論・論文執筆を進めた．また，氷床班とは過去の気候状態の解析のためのアイスコアデータを提供いただいた．底層水班とは周極深層水の流入についての知見を提供いただいた．

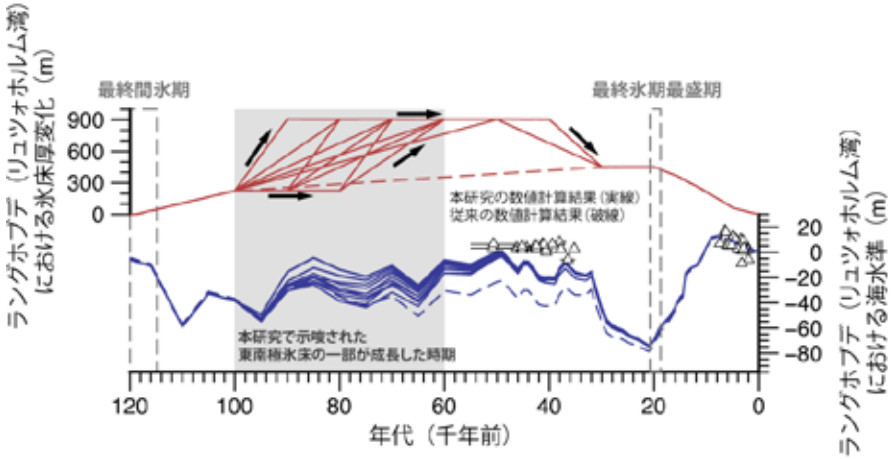


図7：実線は本研究の複数の数値計算結果を，破線は従来の数値計算結果を示す．△は地質学的試料から示される過去の海水準（m）．本研究では全球的に氷床が拡大した最終氷期最盛期よりも前のタイミングで東南極の一部が拡大した可能性が示唆された．（極地研プレスリリースより引用）．

5 まとめと今後の課題

南極大陸やその周辺海域は，過去の南極氷床変動を復元する極めて重要なデータを提供するが，その調査の困難さのため，これまであまり研究は進展していなかった．しかし近年，南極地域観測事業重点プロジェクトによって，東南極ドロンイングモードランド地域の多方面において海陸両面からの現地調査が可能となった．さらに本新学術領域研究に加えて，個別の科研費の取得によって，高精度の表面露出年代測定や可搬型パーカッションピストンコアラーなど開発が進み，また固体地球応答モデリングも高精度・高速度化するなど，研究の基盤が急速に整ってきた．このような状況下において，とくに若手研究者の活躍によって，過去十数万年間の東南極氷床変動の復元が進み，また大規模な融解メカニズムについても，その一端が明らかになりつつある．

このように本新学術領域研究期間中に大きく進展した長期的南極氷床変動の研究であるが，今後は充分な研究基盤，広がったコミュニティー，他分野および国際的研究グループとの連携などを活かし，さらなる発展が見込まれる．とくに最終間氷期以降の氷床変動メカニズムや，急激かつ大規模氷床融解メカニズムの解明については，今後海域から露岩域までの領域においてシームレスな横断的調査計画を実施することで，重点的に研究を推進し，成果を国際的に発表していくことが期待される．このような海陸両面からのアプローチは国際的にも未だ殆ど実施例がなく，本課題で取得するデータは大気-海洋および氷床モデルシミュレーションの再現性確認やモデル較正だけでなく，近未来の海水準上昇の予測精度の向上への突破口となることが期待される．

6 まとめと謝辞

本研究は，新学術領域研究「熱ー水ー物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床（代表：川村賢二）」のなかで様々な分野の方々と議論を重ねるなかで，新たに着想を得て立案したものである．とくに，国立極地研究所（現青森公立大学）の三浦英樹博士には，南極における地形・地質学的な研究史についてご教示いただいた．また，これまでリュツォ・ホルム湾や南大洋の環境変動研究の知見については法政大学の前杢英明博士および澤柿教伸博士，復建調査設計株式会社の五十嵐厚夫博士，高知大学の池原実博士に，気候・氷床モデルシミュレーションについては東京大学大気海洋研究所の阿部彩子博士および小長谷貴史博士と，海洋研究開発機構の齋藤冬樹博士に，操作型海中ロボットについては東京大学生産技術研究所の巻俊宏博士および山縣広和博士と国立極地研究所の野木義史博士に，周極深層水の流入や棚氷底面融解については国立極地研究所の田村岳史博士および海洋研究開発機構の草原和弥博士に，海底地形については国立極地研究所の藤井昌和博士に，ゴムボートを用いた音響測深について京都大学防災研究所の山崎新太郎博士に，そして深海・浅海湖沼における生物地球化学的研究全般については須藤斎博士および田邊優貴子博士に，ご指導いただいた．

本研究は，新学術領域研究17H06321（代表：福田洋一），基盤研究（B）16H05739（代表：菅沼悠介），基盤研究（A）19H00728（代表：菅沼悠介），国際共同研究加速基金（A）21KK0246（代表：菅沼悠介），基盤研究（B）

21H01173（代表：石輪健樹），若手研究18K13621（代表：石輪健樹），MAGIC-DML (grants from Stockholm University, the Norwegian Polar Institute, US National Science Foundation, the Swedish Research Council and the German Research Foundation)，東レ科学技術研究助成（代表：菅沼悠介），笹川科学研究助成（代表：川又基人），および研究プロジェクト KP306（代表：野木義史）の一部を使用した．また，一部の図の作成には，ノルウェー極地研のソフトウェア（Quantarctica）および The Generic Mapping Tools を使用した．高解像度領域氷床モデル実験はスウェーデン国立計算機基盤（SNIC）（課題番号2018-05973）で，大規模氷床モデル実験と大気海洋大循環結合モデル実験は海洋研究開発機構（JAMSTEC）の地球シミュレータで実施された．現地調査については，南極地域観測隊および南極観測センター，およびインド海洋極域研究所（NCPOR）の支援により行われた．国立極地研究所での試料処理は，久保真紀氏，大田江利子氏，石井雪乃氏，伊勢村宣代氏に尽力頂いた．

参考文献

Andersen, J.L., Newall, J.C., Blomdin, R., Sams, S.E., Fabel, D.G., Koester, A.J., Stuart, F.M., Lifton, N.A., Fredin, O., Caffee, M.W., Glasser, N.F., Rogozhina, I., Suganuma, Y., Harbor, J.M., Stroeven, A.P., Ice surface changes along Jutulstraumen Ice Stream in western Dronning Maud Land, East Antarctica, during recent glacial cycles, Quaternary Science Reviews, 249, 106636 2020.

Ishiwa, T., Okuno, J., Suganuma, Y., Excess ice loads in the Indian Ocean sector of East Antarctica during the last glacial period, Geology, 2021.

Ishiwa, T., Tokuda, Y., Itaki, T., Sasaki, S., Suganuma, Y., Yamasaki, S., Bathymetry data and water column profiles in the shallow waters of Langhovde in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, Polar Science, 28, 2021.

石輪健樹, 徳田悠希, 板木拓也, 佐々木聡史. 第61次日本南極地域観測隊における宗谷海岸域の地形調査の報告. 南極資料 64, 330–350. 2020.

Kanamaru, T., Suganuma, Y., Oiwane, H., Miura, H., Miura, M., Okuno, J., Hayakawa, H., The weathering of granitic rocks in a hyper-arid and hypothermal environment: a case study from the Sør-Rondane Mountains, East Antarctica. Geomorphology, 307, 62-74, 2018.

川又基人，土井浩一郎，澤柿教伸，菅沼悠介，日本南極地域観測隊アーカイブ空中写真を用いた数値表層モデル作成とその有用性，地理学評論, 94, 1-16, 2021.

川又基人，菅沼悠介，土井浩一郎，澤柿教伸，服部晃久，氷河地形調査と表面露出年代測定に基づく東南極宗谷海岸南部 Skarvsnes における氷床後退過程の復元，地学雑誌, 129, 315-336, 2020.

Kawamata, M., Suganuma, Y., Doi, K., Misawa, K., Hirabayashi, M., Hattori, A., Sawagaki, T., Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating, Quaternary Science Reviews, 247, 106540, 2020.

Newall, J.C.H., Dymova, T., Serra, E., Biomdin, R., Fredin, O., Glasser, N.F., Lundberg, C., Suganuma, Y., Harbor, J.M., Stroeven, A.P., Glacial geomorphology of western Dronning Maud Land, Antarctica, Journal of Maps, 16, 468-478, 2020.

Sasaki, S., Irizuki, T., Itaki, T., Tokuda, Y., Ishiwa, T., Suganuma, Y., Relationship between modern deep-sea ostracods and water mass structure in East Antarctica, Paleontological Research, 27, 211-230, 2023.

Sasaki, S, Irizuki, T, Seto, K, Suganuma, Y., Ostracoda and paleoenvironment of Holocene-raised beach sediment in Skarvsnes, East Antarctica, Paleontological Research, Paleontological Research , 26, 440-454, 2022.

Suganuma, Y., Kaneda, H., Mas e Braga, M., Ishiwa, T., Koyama, T., Newall, J.C., Okuno, J., Obase, T., Saito, F., Rogozhina, I., Andersen, J.L., Kawamata, M., Hirabayashi, M., Lifton, N.A., Fredin, O., Harbor, J.M. Stroeven, A.P., Abe-Ouchi, A., Regional sea-level highstand triggered Holocene ice sheet thinning across coastal Dronning Maud Land, East Antarctica, Communications Earth & Environment, 3:273, doi:10.1038/s43247-022-00599-z, 2022.

菅沼悠介，石輪健樹，川又基人，奥野淳一，香月興太，板木拓也，関宰，金田平太郎，松井浩紀，羽田裕貴，藤井昌和，平野大輔，東南極における海域-陸域シームレス堆積物掘削研究の展望（総説），地学雑誌, 129, 591-610, 2020.

菅沼悠介，香月興太，金田平太郎，川又基人，田邊優貴子，柴田大輔，可搬型パーカッションピストンコアラーの開発，地質学雑誌, 125, 323-326, 2019.

特許

菅沼悠介，香月興太，田邊優貴子，特許6824503 土砂採取装置.

プレスリリース

極地研プレスリリース「東南極氷床の拡大は従来説よりも早かった　～最終氷期の氷床変動メカニズムの解明へ～」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210819.html

極地研プレスリリース「南極現地調査で明らかになった過去の急激な南極氷床の融解とそのメカニズム」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20200918.html

極地研プレスリリース「地域的な海水準上昇が氷床融解を促進していた可能性を提唱 －9～5千年前に発生した東南極氷床大規模融解に新メカニズム―」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20221129.html

南極氷床変動と固体地球のレスポンス

ーGIA モデリングと測地学的観測データの比較より推定する地球内部構造と氷床融解史ー

奥野淳一[1,2,3], 入江芳矢[2], 服部晃久[3,4], 石輪健樹[2,3], 土井浩一郎[2,3], 福田洋一[2]
[1]情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設, [2]国立極地研究所, [3]総合研究大学院大学, [4]国土地理院

A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体班）（代表：福田洋一）

1 背景と目的

1-1 研究背景

南極氷床は，近年の地球温暖化により融解が加速していることが，2002年に打ち上げられた重力観測衛星GRACE（2018年以降は GRACE-FO）によって明らかにされている．南極など，氷床に覆われている地域における重力場変動は，氷床質量変化による成分のみならず，最終氷期最盛期以降の全球的な氷床融解（約2万年前から7千年前）に伴う固体地球の粘弾性応答による成分も含まれている．このような固体地球の変形は，氷河性地殻均衡調整（Glacial Isostatic Adjustment: GIA）と呼ばれている．

南極大陸沿岸域や各国の南極基地で展開されている測地学的観測（GNSS や絶対重力など）は，固体地球表層から内部までの変動をモニターしていると考えられるが，測地学的観測により，地球内部の粘性構造や過去・現在の氷床変動を正確に求めるためには，GIA の成分をいかに正確に評価できるかがが重要である．実際に，GRACE の観測結果から南極氷床質量変動を推定するためには，GIA モデリングによる補正（これ以降，GIA correction と呼ぶ）が必要となり，この GIA correction を決定づけるパラメータが，地球内部粘性構造と最終氷期以降の氷床融解史となる．

一方で，南極大陸沿岸域で得られている地殻変動データには，過去からの氷床変動が引き起こす GIA の成分のみならず，現在の氷床変動による地殻変動（これ以降，弾性変形と呼ぶ）の影響も無視できない．さらに現状の南極域の GIA モデリング計算結果は，選択する氷床融解史や地球内部粘性構造ごとに予測される変動が大きく異なり，未だ統一的な理解は得られていない（たとえば Whitehouse et al., 2019 など）．衛星・現地双方の測地観測は，現在の変動成分を明らかにするとともに，その結果を GIA モデリングから予測される変動と比較することで，モデリング計算の入力値となる地球内部粘性構造・氷床融解史を評価・制約する重要な役割をもつ．本稿では，新学術領域研究「南極の海と氷床」固体地球班で得られた衛星・現地測地観測と GIA モデリングとの比較研究から得られた成果概要をまとめ，今後進めるべき課題について述べる．

1-2 研究目的

本稿では，GIA モデリングを用いた次の2つの課題について取り上げる．（1）GRACE データに影響しうる GIA 成分をモデリングより明らかにするために，地球内部粘性構造や最終氷期最盛期（Last Glacial Maximum: LGM, 約2万年前）以降の氷床融解史に対する依存性を精査する．（2）リュツォ・ホルム湾沿岸域で展開している GNSS 観測から GIA 成分を抽出し，モデリング結果との比較により，氷床融解史の拘束の可能性を精査する．

（1）においては，GRACE から南極氷床質量変化を推定する上で重要な GIA correction について，GIA モデリングにおける入力値依存性を明らかにする．南極大陸下では，その東西で地震波速度構造の不均質が確認されている（Pan et al., 2021など）．西南極下では，地震波速度が比較的遅いことが確認されており，上部マントルに低粘性の領域が存在すると考えられている．一方，東南極下では，地震波速度が比較的速いことが確認されており、西南極と比較して厚いリソスフェアが示唆されている．本研究では，このような南極域において異なる地球内部構造をもつことを考慮して，GIA correction の粘弾性構造依存性を調べた．

（2）においては，日本の南極地域観測隊（JARE）によって，昭和基地を中心にリュツォ・ホルム湾沿岸で GNSS 観測および絶対重力測定が実施されている．約20年にわたる昭和基地およびリュツォ・ホルム湾沿岸で実施された GNSS 観測，絶対重力測定から得られた GIA に伴う変動について，これまでさまざまな GIA モデリング研究で広く使用されている氷床融解史に加えて，新たに報告された観測地域周辺における完新世中期に生じたとされる急激な氷床融解（Kawamata et al., 2020）の影響を考慮した融解史を仮定し，近年の地殻変動に与える影響などについて定量的に評価した（Hattori et al., 2021; 服部, 2022）．

2 モデリング

2-1 GIA モデリング

過去約10万年間の氷期サイクルが引き起こす地球の粘弾性的応答を数値的に求めるモデリング手法は，1980年代後半より活発に進められてきた（Nakada & Lambeck, 1987など ）．その後，海水量の増加や GIA による地殻変動によって引き起こされる海岸線の移動（Okuno & Nakada, 2001），氷・海水の質量交換や地球の変形による密度分布が変化することによる地球回転変動の効果（Mitrovica & Wahr, 2011）などといったさまざまな影

響が数値的に考慮されるようになってきた．本研究では，Okuno & Nakada (2001)に基づき，これに Mitrovica & Wahr (2011) による地球回転変動の影響を考慮したモデルを用いて一連の解析を行った．

2-2　地球内部粘性構造

地球内部粘性構造については，概ね，平均的なモデルとして，弾性的に振る舞う層（リソスフェア），リソスフェア直下～深度約670 km までを上部マントル，深度 670 km ～コアーマントル境界（深度約2700 km）までを下部マントルとする3層構造を仮定した（図1）．一般的な GIA モデリング研究では，全球的な粘性構造として，リソスフェアの厚さ100−150 km 程度，上部マントルの粘性率 5×10^{20} Pas，下部マントルの粘性率 10^{22} Pas が採用されている（奥野，2018など）．しかしながら，マントルの粘性率は地球内部の温度構造に強く依存するため，水平方向に不均質の存在が指摘されている．特に南極大陸においては，東西南極下に顕著な地震波速度構造の不均質が存在している．その結果から類推されることとして，マントルの粘性率，特に上部マントルに強い不均質が存在することが示唆されている（Pan et al., 2021など）．しかしながら，その不均質が南極大陸全体での荷重変化とそれに伴う地殻変動にどのような影響を与えるかについては，数値モデリングの複雑性から，現時点では決定的な結論は得られていない．そこで研究目的の（1）に関しては，図1のような鉛直方向にのみ粘性率の変化があるシンプルなモデルを用いて，粘性構造と氷床融解史に対する依存性を精査した．また，研究目的の（2）に関しては，リュツォ・ホルム湾沿岸のみに焦点をあてることで，基本的に対象領域での粘性率の水平不均質の効果は無視できるほど小さいと考えて数値実験を実施した．

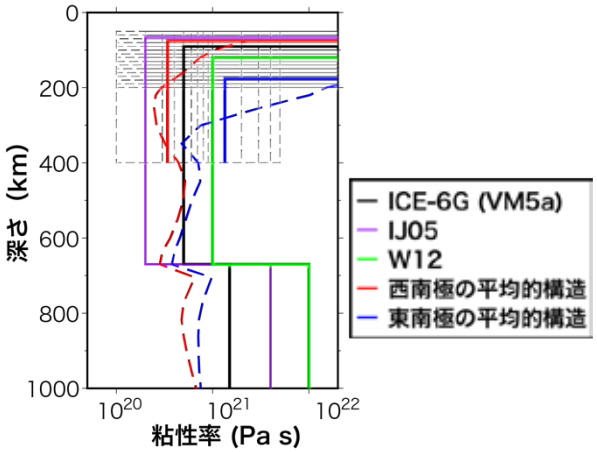


図1：本研究で想定した地球内部粘性構造．グレーのラインは依存性評価のための数値実験を実施した構造の範囲を示す．

2-3　氷床融解史

LGM から現在にかけて，南極氷床は海水準上昇に換算して10 m から 20 m 程度の氷床量が融解したと考えられている（奥野，2018など）．特に，2000年以降の研究においては，LGM 以降の融解量として，10 m を下回るようなモデルが多く提案されている（Whitehouse et al., 2012; Ivins et al., 2013など，図2）．しかしながら，地球回転変動の研究などでは，約 20 m 程度の融解量を仮定したモデル計算結果が，近年の J_2 項（地球の力学的形状係数で，地球の形状に近いとされる回転楕円体の南北のつぶれ具合を示す量）の変動をより整合的に説明可能であるとされ（奥野，2018など），また一方で，南極氷床融解量が少なく見積もられることで生じる全球氷床量の問題（Missing ice problem）などとも強く関連し，近年においても活発な議論がなされている問題である（Gowan et al., 2021など）．

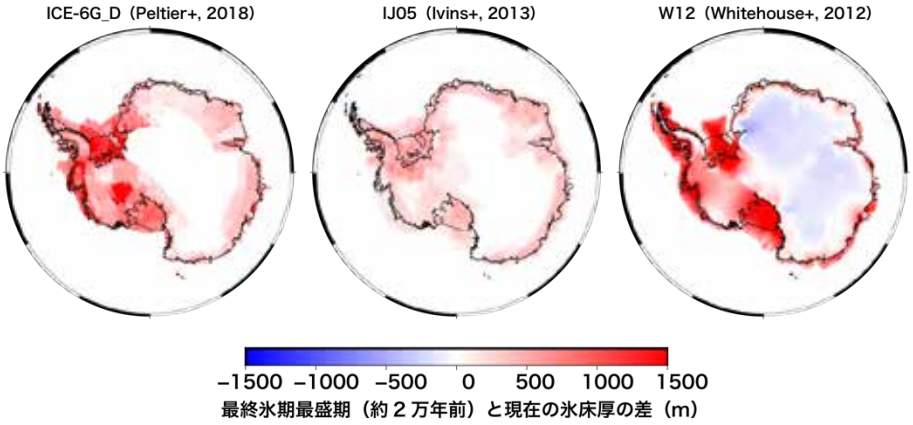


図2：本研究で用いた氷床融解史．

3　計算結果と観測値との比較と考察

3-1　GRACE との比較

3-1-1　概要

南極大陸における質量変化は，重力観測衛星 GRACE の登場により，劇的にその詳細が明らかになってきた．GRACE は双子衛星として打ち上げられ，双子衛星の正確な位置や距離を計測することにより，重力値（質量）の変化から，『地球中心部から大気上層までの積算した質量の変化』が求められている．大気を除くとその季節変化のほとんどが水量変化であることから，氷床変動や水循環研究へ活発に利用されている．GRACE によって明らかにされた南極大陸における質量変化は，氷床質量変化による成分に加えて，LGM 以降の氷床融解に伴う固体地球の粘弾性応答（GIA）による成分を含んでいるため，双方の成分をできるだけ分離して評価する必要がある．

南極大陸における GIA 成分の数値的評価には，特に東西南極での地球内部構造不均質について留意す

る必要がある. Pan et al. (2021) などによると, 西南極下では, 地震波速度が比較的遅いことが確認されており, 上部マントルに比較的低粘性の領域が存在すると考えられている. 一方, 東南極下では, 地震波速度が比較的速いことが確認されており, 相対的に厚いリソスフェアが示唆されている. しかし, 地震波速度構造と粘性率の関係については, 未だ決定的な結論は得られていない. そこで, 本研究では, 図1に示すように鉛直方向にのみ変化する粘性構造(1D モデル)を用い, 東西南極下の平均的な地球粘弾性構造をそれぞれ仮定して(図1), GIA に伴う重力場の時空間変動に関して採用した構造による違いを定量的に評価した.

本研究では, GIA モデリングによる南極域における重力場変化を, 水等量換算(Equivalent Water Height: EWH)として数値的に評価する. 任意の位置, 時間における EWH は以下の式で求められる.

$$\Delta h(\theta,\phi,t) = \frac{a\rho_{ave}}{3} = \sum_{n=2}^{90} \frac{2n+1}{1+k'_n} \sum_{m=0}^{n} [\Delta C_{nm}(t)\cos m\phi + \Delta S_{nm}(t)\sin m\phi] P_{nm}(\cos\theta).$$

ここでC_{nm}, S_{nm}はストークス係数, aは地球の平均半径, ρ_{ave}は地球の平均密度, k'_nは荷重ラブ数である. GIA に伴うストークス係数の変化は, 氷床・海水荷重の変化と荷重ラブ数を用いて求められる. 氷床荷重変化について, LGM 以降の氷床融解史として ICE-6G_D (Peltier et al., 2018), IJ05 (Ivins et al., 2013), W12 (Whitehouse et al., 2012) の3つの融解史(図2)を採用し, 海水荷重は氷床融解に伴う海水準変動の計算(Okuno & Nakada, 2001など)より求めた. 荷重ラブ数は地球粘弾性構造を与えることで求めた. GIA correction は, 上記の式より求められた EWH を南極大陸全体に渡って空間積分することで計算し, 最終的に, GIA correction の入力モデル(氷床融解史, 地球内部粘性構造)依存性として, 数値的な評価を行った.

3-1-2 GIA モデリングによる重力場変動と GIA correction

南極域の重力場変動は, 主に上部マントルの粘性構造とリソスフェアの厚さに依存する. 図3にさまざまな粘性構造を仮定した場合の GIA による重力場変動の計算結果を示す. リソスフェア直下に低粘性層が存在する構造を採用した場合, 短波長の重力場変動が減衰し, 長波長が卓越した空間分布を示す(図3a,b,c). また, 厚いリソスフェアのモデルを採用した場合も同様の傾向を示すことから(図3a,d,g), GIA による重力場変動には, 低粘性層の粘性率とリソスフェアの厚さの設定に関してトレードオフが存在することがわかる.

さまざまな測地学的手法をとりまとめて南極の質量変動を考察した先行研究によると(The IMBIE team, 2018), GRACE データより求められた南極全体での氷床質量収支推定は, 2002年から2018年の期間で約−150 Gt/yr とされ, その中で GIA correction は約 50 Gt/yr とされている. ここで採用されている GIA correction の値は, この研究で用いている GIA モデリングと同様に, 地球の粘性構造について, 深度のみに依存するモデル(1D モデル)が採用されている. The IMBIE team (2018)で用いられている GIA correction には, それぞれ ICE-6G_D, IJ05, W12(図2)の氷床融解史が仮定された GIA モデリング結果が反映されており, それぞれの氷床融解史による GIA correction は, (ICE-6G_D, IJ05, W12) = (62, 55, 56) Gt/yr となっている. ここで, 氷床融解史や地球内部粘性構造の組み合わせがそれぞれ異なるにもかかわらず, 概ね GIA correction が近い値となるのは, The IMBIE team (2018)によると, 地球内部粘性構造不均質を考慮していないモデルを用いたことによると述べられている.

一般的に地震波速度異常が示す地球内部構造として, 地震波速度の速い場所は『温度が低く固い』, また遅い場所は『温度が高く軟らかい』と一義的に考えると, 南極大陸下の粘性構造は, 西南極下はリソスフェアが薄く, かつマントル粘性率が小さく, 一方, 東南極下はリソスフェアが厚く, かつマントル粘性率が大きいと概ね予想される. また, 重要な点として, 一般的に深さ400 km 程度(上部マントルに相当)までの領域で, 東西南極下において不均質が比較的大きいということが, 地震波の研究結果より示唆されている(Pan et al., 2021など).

そこで, GIA correction に対するリ

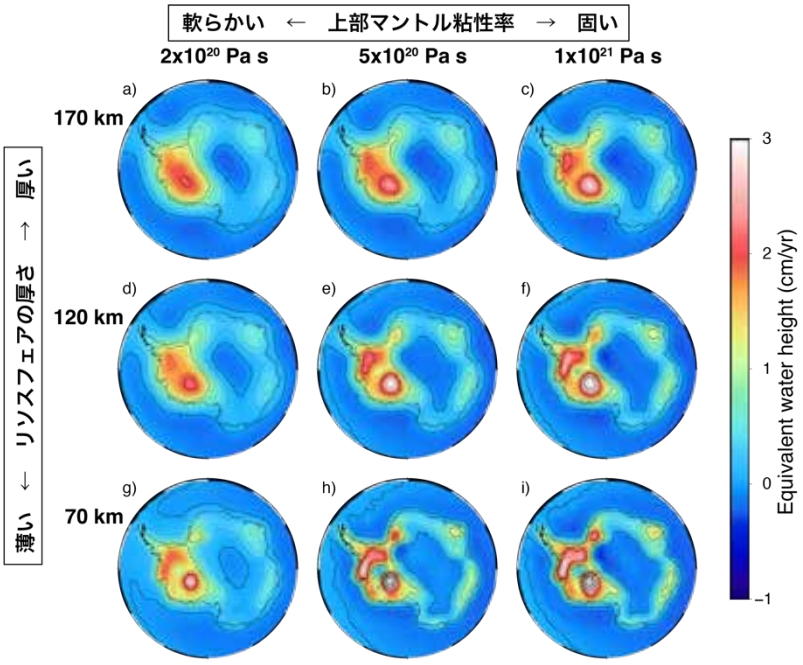


図3:さまざまな地球内部構造を用いた GIA による重力場変動(EWH)の空間分布(ICE-6G_D の場合).

ソスフェアの厚さとマントル粘性率(400 km 以浅)の依存性を調べた. その際, 特に, 西南極と東南極の平均的な粘弾性構造の違い(図1の赤線と青線)が, GIA correction にどのような違いを生むのかに注目した. 図4にその結果を示す. この結果によると, まず, 設定した粘弾性構造依存性そのものは, 3つの氷床融解史に共通した傾向を示し, 粘性率がより高い構造になると, GIA correction の値が高くなる傾向となる. これは, 南極大陸全体において, より固い粘性構造であれば, LGM 以降の氷床融解による地球変形がより長期間残ることによる. 一方, 比較的軟らかい構造を採用すると, 地球変形の粘弾性緩和がより進むことで, GIA correction の値が小さくなる. ただし, 本研究において用いた東西南極の平均的な粘弾性構造による計算結果によると(図4の赤青◇のシンボル, 色は図1のそれぞれのプロファイルに相当), 南極全体での GIA correction はどの氷床融解史を採用しても大変近い値を示し, それぞれの氷床融解史で提唱されている粘性構造との組み合わせで計算した結果(図4の★)との違いは概ね10%以内におさまる. つまり, 粘性構造については, リソスフェアの厚さと上部マントルの粘性率の設定にトレードオフが存在するが, 一般に GIA correction として採用されている入力モデルの組み合わせでは, 概ね同じような値になることが明らかになった.

このような知見は, 1D モデルを駆使し, 詳細なパラメータ設定による数値実験を実施することで初めて理解される性質であり, より複雑性の高いマントルの水平方向不均質を考慮したモデルを用いた数値実験を展開する際の基礎データとなるだけでなく, 固体地球変形に対する粘性構造の水平不均質そのものの影響を定量的に考察する上でも重要な結果である.

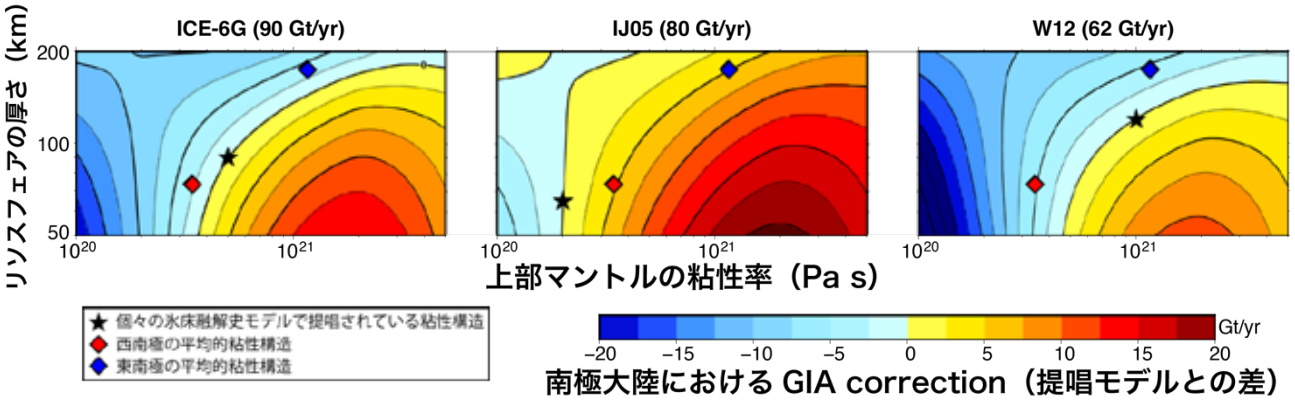


図4: GIA correction の地球内部構造依存性. それぞれの氷床融解史モデルで提唱されている粘性構造と東・西南極大陸下の平均的粘性構造を用いた場合をそれぞれ各シンボルで表している.

3-2 リュツォ・ホルム湾沿岸露岩観測点における GNSS 観測との比較

3-2-1 GNSS 観測

日本南極地域観測隊は, 昭和基地内のみならず, リュツォ・ホルム湾沿岸の露岩において GNSS 観測, 重力観測を実施してきた. 本研究では、2007年以降のリュツォ・ホルム湾沿岸の露岩における GNSS 観測点(昭和基地内の IGS 点 SYOG, Langhovde, Skarvsnes, Padda, Rundvågshetta, 図5)での GNSS 観測データ用いて, 以下の流れで解析を行った.

(1)宇宙測地データ統合解析ソフトウェア『c5\++』を用いた日々の座標値決定.
(2)『Hector』, および最小二乗法を用いた変位の線形トレンド推定.
(3)GRACE・衛星高度計のデータより過去約20年の荷重変化を求め, それによる弾性変形の決定.
(4)観測値(2)と弾性変形(3)の差から GIA 成分の抽出.
(5)GIA モデリングを用いた粘性構造, 氷床融解史に対する依存性の定量的評価.

GNSS 観測データの解析における日々の座標値決定には, 宇宙測地データ統合解析ソフトウェア『c5\++』(Hattori & Otsubo, 2019など)を用いた. 変位方向ごとの線形トレンドの推定には, SYOG では『Hector』(Bos et al., 2013)を, 他の露岩観測点では最小二乗法を用いた.

観測データより GIA による変動を求めるためには, 近年の氷床に伴う弾性変形を評価する必要がある. 本研究では, 人工衛星観測(GRACE, 衛星高度計)によって観測された近年の南極氷床変動から, 荷重変化を計算し, それに伴う弾性変形を評価した. そして GIA による地殻変動は, GNSS 観測値から弾性変形分を差し引いたものとして考え, GIA モデリング結果との比較を行った.

GNSS データ解析の結果(解析結果の詳細は, 本冊子の土井他), すべての観測点において隆起傾向が得られ, どの点においても顕著な年周変動が観測されている. この要因については、気候再解析モデル(庭野ほか, 2021など)との比較を将来的に検討している.

3-2-2 弾性変形

GNSS 観測で観測される地殻変動は，近年の南極氷床変動による弾性変形成分を含む．弾性変形成分を評価するために，近年の荷重変化を衛星重力観測，衛星高度計観測から推定し，それに伴う弾性変形を計算することで観測データを補正した．

弾性変形の計算結果に関する概要として，GRACE のマスコン解が示すリュツォ・ホルム湾周辺の地域における2002 年から 2017 年まで表面質量は，単調増加となっており，それに伴って当地域は全体的に約 1-2 mm/yr の弾性変形による沈降が生じる結果となった．同様に，衛星高度計からは，仮定する氷床表面の密度に依存するが，同様に沈降の傾向を示した．どの荷重を仮定した場合でも当地域では沈降のトレンドが同様に得られ、1 mm/yr の範囲で整合的な結果が得られた（詳細は，本冊子の土井他）．

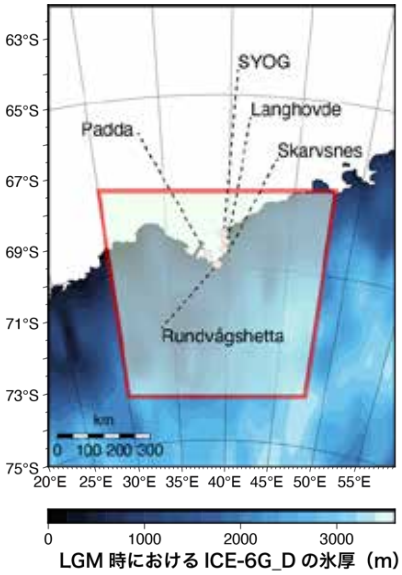


図5：GNSS の観測地点および，ICE-6G_D の LGM 時の氷厚と修正した領域（赤枠内）．

3-2-3 GIA による地殻変動と完新世中期の氷床融解史

本研究では，GNSS から推定される鉛直変位の時系列に弾性変形を差し引くことで，LGM からの氷床融解が引き起こす GIA による地殻変動と考える．従来の氷床融解史（図2）を用いた GIA モデリングによる地殻変動の計算結果は，本研究で得られたリュツォ・ホルム湾での GNSS 観測による地殻変動（GIA 成分）を説明できない（図7）．これは当地域における氷床融解過程を，従来の氷床融解史が十分に反映していないことによる影響が大きいと考えられる．

たとえば，Kawamata et al. (2020) では，リュツォ・ホルム湾沿岸の複数の露岩において，氷河地形学的観測と表面照射年代測定に基づいて，当地域の氷床後退過程を詳らかにした．特に Skarvsnes では，9000年前から6000年前の3000年間で氷厚400 m を超える融解が起こった証拠を提示した．これは，本研究で使用した既存の氷床融解史（ICE-6G_D，図6上）とは異なる時期に異なる量の氷床融解が生じたことを示唆する．

そこで本研究では，Kawamata et al. (2020) で示された氷床融解のタイミング，および融解量に基づいた氷床融解史を作成し，現在予測されるリュツォ・ホルム湾域での GIA 変動の計算を行った．ICE-6G_D を初期モデルとし，リュツォ・ホルム湾域を含む東経30度から48度，南緯73.5度から67.5度の領域における融解史を修正した（図5）．修正した領域内（図5の赤枠内）の各グリッドでは，ICE-6G_D で提唱される LGM での氷床厚を LGM から9000年前まで変化させず，9000年―6000年前において現在の氷床厚になるような変化とした（図6下）．また，ICE-6G_D では Skarvsnes において LGM 以降氷厚300 m の融解となっているが（図6上），Kawamata et al. (2020) では最低でも400 m の融解があったとしている．これを反映させるため，最終氷期最盛期での氷床量を領域全体で 100―200 m 厚くした場合（図6下）を仮定して計算を行った．

地球内部の粘弾性構造を Peltier et al. (2018) の VM5a と仮定し，図6に示す修正 ICE-6G_D も含めた GIA モデリング結果を図7に示す．オリジナルの ICE-6G_D を仮定したモデル計算結果は，観測値から大きく乖離していたが，修正 ICE-6G_D を用いると観測値をよく説明する結果が得られた（図7）．

Kawamata et al. (2020) が提示した氷床融解のタイミング，融解した氷床厚を考慮した氷床融解史による GIA 変動は，リュツォ・ホルム湾周辺における隆起速度の予測値を大きくする方向に影響し，GNSS 観測とより整合的な結果となる．これは，Kawamata et al. (2020) が提示した氷床融解を強く支持することを示唆し，本地域の GNSS 観測が完新世中期の急激な氷床融解の影響を捉えていると考えることができる．また，重力観測からも同様に過去の急激な氷床融解を支持する結果が得られている（服部，2022）．

以上の結果から，リュツォ・ホルム湾域の測地観測は，従来の GIA 研究に基づく氷床融解史では考慮されていない急激な氷床融解の存在を強く支持する．

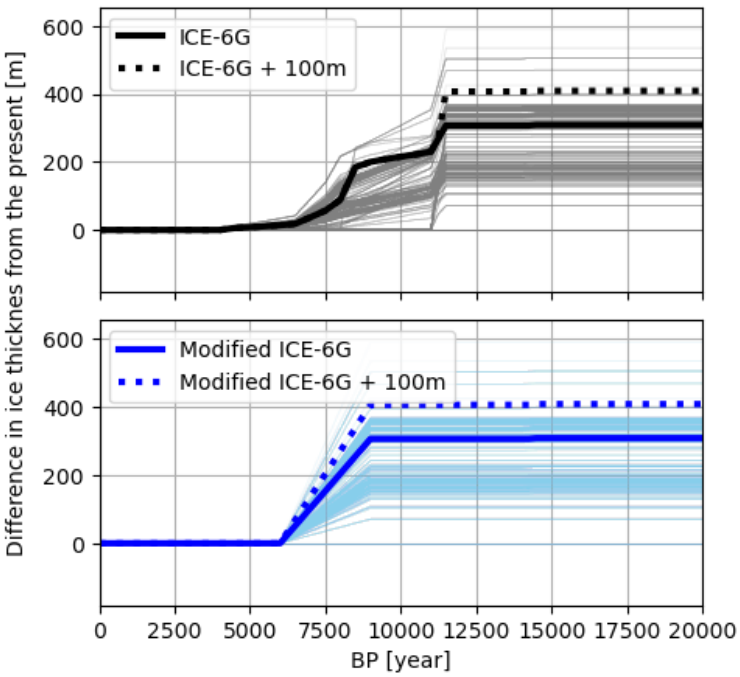


図6：ICE-6G_D におけるリュツォ・ホルム湾沿岸周辺の氷床厚の時間変化（上）と Kawamata et al. (2020)の結果に基づいて修正した氷床厚の時間変化（下）．

4 領域内連携

本研究で確立した GRACE データ，および衛星高度計データの処理方法や，GIA モデリング結果については，複数の公募研究（代表者：津滝俊，代表者：山本圭香）へ提供し利活用されている．

5 まとめと今後の課題

本研究では，衛星・現場観測による測地学的データと GIA モデリングに基づいて，地球内部粘性構造，および氷床融解史についての考察を行った．GRACE データより南極氷床質量変動を求める際には，GIA correction が大変重要であるが，どのような値が適切であるかを評価するためには，固体地球の粘弾性変形についての理論的な理解が必要不可欠である．しかしながら，南極大陸下の地球内部粘性構造について，現状として1D モデルを用いた数値的な理解は未だ十分とは言えず，さらに東西の不均質による影響も十分に理解されているとは言いがたい．本研究結果が示すように，粘弾性構造としてのリソスフェアの厚さや上部マントルの粘性率には一定のトレードオフが存在することで，東西の南極大陸下の平均的な構造を仮定しても， GIA correction が現在採用されている値と概ね同様の値となるように思われた．この結果の必然性については，現時点でその理論的背景についての十分な理解を得ることはできなかった．しかしながら，今後の課題として，地球内部粘性構造の水平方向不均質を導入したモデルの構築とそれに基づく数値実験を展開していくことを大きな目標としつつも，一方で，現状の1D モデルで理解できる理論的背景を精査することも並行して進めていくことが大変重要であると考えられる．

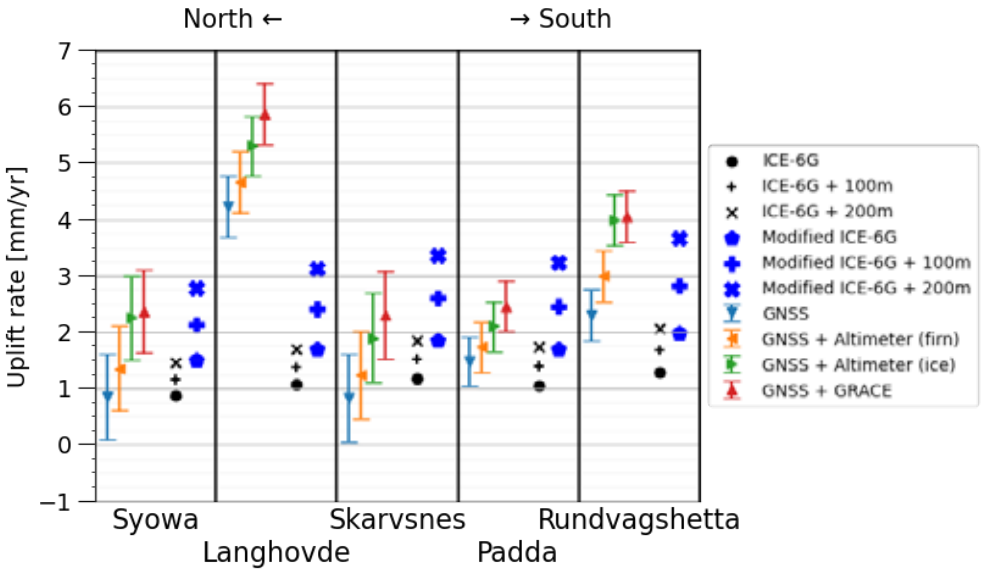


図7：GNSS 観測によって推定された鉛直変位速度と修正を加えた ICE-6G_D モデルから予測される現在の上下変位速度．

また，昭和基地およびリュツォ・ホルム湾沿岸露岩観測点で実施された GNSS 観測，および昭和基地内での重力観測から，当地域の地殻・重力変動に含まれる GIA 変動の抽出を行った．その際に，東南極ドロンイングモードランド一帯の広域な領域で，近年の降雪増加による表面質量荷重変形（弾性変形）を評価し，観測値の補正を行った． この補正を行った上で求めた GIA 変動は，2-4 mm/yr の隆起となったが，従来の氷床融解史やどのような粘性構造を仮定しても GIA モデリングによる再現はできなかった．これは，現在提唱されている氷床融解史では，リュツォ・ホルム湾沿岸の過去の氷床融解過程の再現が不十分であり，現状で考えられている氷床融解以外の影響が存在する可能性を示唆している．そこで，Kawamata et al. (2020)より提示されたリュツォ・ホルム湾周辺の急激な氷床融解を導入することで過去の氷床融解史モデルを修正し，GIA モデリングとの比較を行った．その結果，観測された隆起速度と整合的な予測値を得ることに成功した．これは，当地域の測地観測は，過去の氷床融解過程を十分に検出し，制約が可能なことを示しており，今後のさらなる観測の継続，観測点網の拡充により，LGM 以降の氷床融解過程の拘束への貢献が期待される．また，より正確な GIA による重力場変動が明らかにされることで，GRACE データなどに含まれる GIA のモデルエラーが軽減され，現在の南極氷床変動の理解が進むことも期待される．

6 謝辞

本研究は，新学術領域研究「熱-水-物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床（代表：川村賢二）」のなかで様々な分野の方々と議論を重ねるなかで，進めてきたものである．とくに，国立極地研究所の青山雄一博士，菅沼悠介博士，寒冷地土木研究所の川又基人博士には，南極における測地学および地形・地質学的な研究や表面露出年代の詳細についてご教示いただいた．また，GRACE や衛星高度計のデータ処理については，国立天文台の山本圭香博士などと議論をさせていただいた．

本研究は，新学術領域研究・固体地球班17H06321（代表：福田洋一），基盤研究（C）16K01229，21K03685（代表：奥野淳一），基盤研究（A）19H00728（代表：菅沼悠介），基盤研究（B）21H01173（代表：石輪健樹），若手研究18K13621（代表：石輪健樹），若手研究21K14016（代表：入江芳矢），研究活動スタート支援20K22372

(代表:入江芳矢), 東レ科学技術研究助成(代表:菅沼悠介), および研究プロジェクト KP306(代表:野木義史)の一部を使用した. 本稿でとりあげた GNSS 観測については, 日本南極地域観測隊および南極観測センターの支援により行われた.

参考文献

Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., Bastos, L., Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data, *Journal of Geodesy*, 87, 4, 351–360, 2013.

Gowan, E. J., Zhang, X., Khosravi, S., Rovere, A, Stocchi, P., Hughes, A. L. C., Gyllencreutz, R., Mangerud, J., Svendsen, J. -I., Lohmann, G., A New Global Ice Sheet Reconstruction for the Past 80 000 Years, *Nature Communications*, 12, 1, 1199, 2021.

Hattori, A., Otsubo, T., Time-Varying Solar Radiation Pressure on Ajisai in Comparison with LAGEOS Satellites, *Advances in Space Research,* 63, 1, 63–72, 2019.

Hattori, A., Aoyama, Y., Okuno, J., Doi, K., GNSS Observations of GIA‐Induced Crustal Deformation in Lützow‐Holm Bay, East Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 48, 13, 2021.

服部晃久, 地上測地観測およびリモートセンシング観測を用いた南極氷床質量変動と GIA 変動の研究, 博士論文, 総合研究大学院大学, 1-93, 2022.

The IMBIE Team, Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017, *Nature,* 558, 219-222, 2018.

Ivins, E. R., James, T. S., Wahr, J., Schrama, E. O. J., Landerer, F. W., Simon, K. M., Antarctic Contribution to Sea Level Rise Observed by GRACE with Improved GIA Correction, *Journal of Geophysical Research,* 118, 6, 3126–41, 2013.

Kawamata, M., Suganuma, Y., Doi, K., Misawa, K., Hirabayashi, M., Hattori, A., Sawagaki, T., Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating, *Quaternary Science Reviews*, 247, 106540, 2020.

Mitrovica, J. X., Wahr, J., Ice Age Earth Rotation, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 1, 577–616, 2011.

Nakada, M., Lambeck, K., Glacial Rebound and Relative Sea-Level Variations: A New Appraisal, *Geophysical Journal International*, 90, 1, 171–224, 1987.

庭野匡思, 青木輝夫,橋本明弘,大島長,梶野瑞王,大沼友貴彦,藤田耕史,山口悟,島田利元,竹内望,津滝俊,本山秀明, 石井正好,杉山慎,平沢尚彦,阿部彩子,氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み: 2020 年夏最新版, *雪氷*, 83, 1, 27‐50, 2021.

Okuno, J., Nakada, M., Effects of Water Load on Geophysical Signals due to Glacial Rebound and Implications for Mantle Viscosity, *Earth, Planets and Space*, 53,12, 1121–35, 2001.

奥野淳一, 南極氷床変動と氷河性地殻均衡, *低温科学*, 76, 205-226, 2018.

Pan, L., Powell, E. M., Latychev, K. L., Mitrovica, J. X., Creveling, J. R., Gomez, N., Hoggard, M. J., Clark, P. U., Rapid Postglacial Rebound Amplifies Global Sea Level Rise Following West Antarctic Ice Sheet Collapse, *Science Advances*, 7, 18, 10.1126/sciadv.abf7787, 2021.

Peltier, W. R., Argus, D. F., Drummond, R., Comment on 'An Assessment of the ICE-6G_C (VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model' by Purcell et al., *Journal of Geophysical Research,* 123, 2, 2019–2028, 2018.

Whitehouse, P. L., Bentley, M. J., Le Brocq, A. M., A Deglacial Model for Antarctica: Geological Constraints and Glaciological Modelling as a Basis for a New Model of Antarctic Glacial Isostatic Adjustment, *Quaternary Science Reviews*, 32, 1-24, 2012.

Whitehouse, P. L., Gomez, N., King, M. A., Wiens, D. A., Solid Earth Change and the Evolution of the Antarctic Ice Sheet, *Nature Communications*, 10, 1, 503, 2019.

プレスリリース

総研大プレスリリース「東南極リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS 観測と地殻変動の検出」, 2021年9月9日. https://www.soken.ac.jp/news/7113/

海氷・棚氷下を探査する自律型海中ロボット（AUV）の開発

巻俊宏[1]、山縣広和[1]、吉田弘[2]、野木義史[3]
[1]東京大学生産技術研究所、[2]海洋研究開発機構、[3]国立極地研究所

A03 未探査領域への挑戦（探査班）（代表：野木義史）

1．背景と目的

極域の海は氷に覆われているため，船によるアクセスが難しい。薄い海氷であれば不可能ではないが，砕氷船と呼ばれる特別な能力を持つ船が必要であるほか，速度も落ちる。ましてや厚さ数メートルを超える海氷や，数 100 メートルにもなる棚氷となると船の進入は不可能であり，その下の観測を行うことは大変難しかった。氷を掘削してセンサを吊り下げる方法があるが，コストの問題があるため面的な観測は難しい。自律型海中ロボット（AUV: Autonomous Underwater Vehicle）はケーブル無しで全自動で行動することの可能な無人探査機であり，氷の下を効率的かつ広域に渡って観測するための新たなプラットフォームとして注目されている。

そこで我々のグループでは，南極の海氷や棚氷の下部を探査可能な AUV MONACA，および MONACA を砕氷船「しらせ」へ回収するための遠隔操縦式の水中ロボット ANCO の開発に取り組んだ。

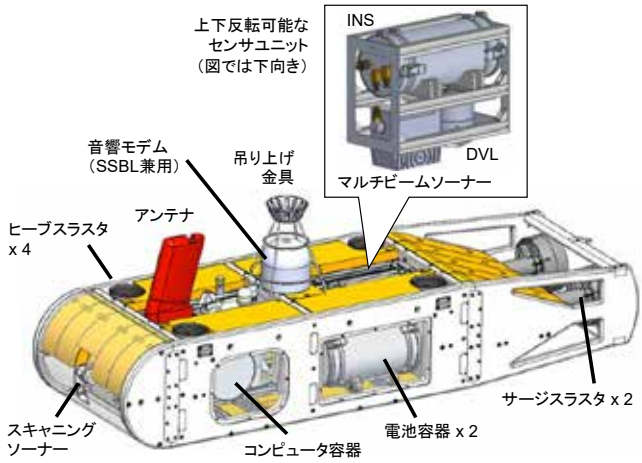
2．AUV MONACA

MONACA は Mobility Oriented Nadir AntarctiC Adventurer の略である。全長 2.1 m，空中重量 235 kg，最大潜航深度 1,500 m であり，動作時間は 8 時間，氷の裏側へ最大 10 km 潜入できるように設計されている（図 1）。氷の奥深くへ潜入して形状計測を行い，その後投入地点まで安全に帰って来られるよう，マルチビームソーナー（複数の超音波ビームにより氷や海底の形状を計測するセンサ）とドップラー式対地速度計（超音波により対地速度を計測するセンサ DVL: Doppler Velocity Log），慣性航法装置（高精度な加速度・角速度計測により自己位置を推定するセンサ INS: Inertial Navigation System）を備えたセンサユニット，およびこれらのセンサによる氷に対する相対ナビゲーションアルゴリズムを備えている。このセンサユニットは氷を計測する際は上向きとするが，上下反転可能とすることで，氷の下の海底の計測にも対応する。また，複雑な氷の形状に沿って航行できるよう，スキャニングソーナーによる障害物回避手法やホバリング（その場停止）のできる高い運動能力を備えている。この他，水質を計測するための CTD センサを備えている。

MONACA は 2019 年度前半までにハードウェアの製作を完了し，それ以降は水槽および実海域（下田沖，紋別港，しらせ，海鷹丸等）での運用試験を重ねながら，AUV としての運用能力を高めてきた。本稿では　2021 年 2 月に北海道紋別港で実施した潜航試験の様子を紹介する（図 2，3，4）。完全に結氷していたため，岸壁最奥部の氷を砕いて，MONACA をぎりぎり投入できる大きさの開口部を設けた。気温は時としてマイナス 5℃を下回る過酷な環境であったが，MONACA は全 27 回，のべ 8 時間 17 分，8.9 km に及ぶ海氷下での全自動潜航に成功した。一連の潜航により，のべ 47,143 ㎡の海氷裏面および 5,875 ㎡の海底面の形状データが得られた。これまでに国内で報告されている事例は，氷の無い海域（オープンウォーター）にて AUV を投入し，氷の下へ真っすぐ潜入させたのち，U ターンして戻ってこさせる方式であった。今回は AUV の展開，回収ともに狭い開口部から行い，また AUV 自身が氷に対して相対的に測位しながら芝刈り機のように繰り返し往復することにより，図 5，6 のように面的に広い範囲を計測し，自律的に開口部へ帰還することに成功した。これは発表者らの知る限り日本初であり，完全結氷域の探査の実現に大きく貢献する。また，そのうち 1 回（10 分間，走行距離 80 m）では安全索をつけない完全無索での潜航であった。海中での無線通信は困難であるため，完全無索で運用するためには，外部支援に一切頼らずに開口部へ戻ってこられる高い自律性と安定性，高精度なナビゲーション能力が必要である。MONACA にはそれらが備わっていることが改めて証明された。

感染症拡大の影響により遅れたものの，第 64 次南極地域観測（JARE64）において MONACA による

氷下観測が予定されている。本原稿を執筆している 2022 年 11 月現在，MONACA は南極での初運用のため，砕氷船「しらせ」にて航行中である。

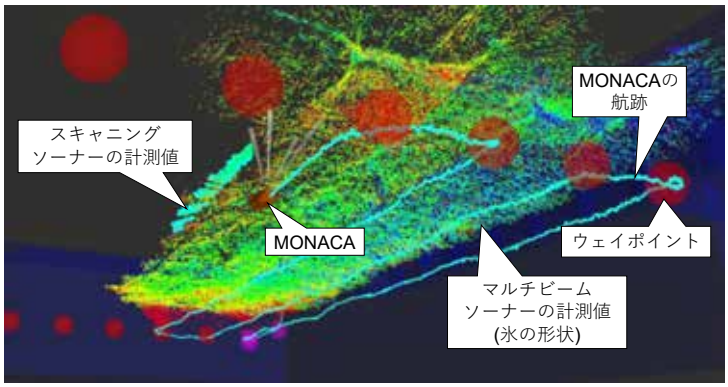


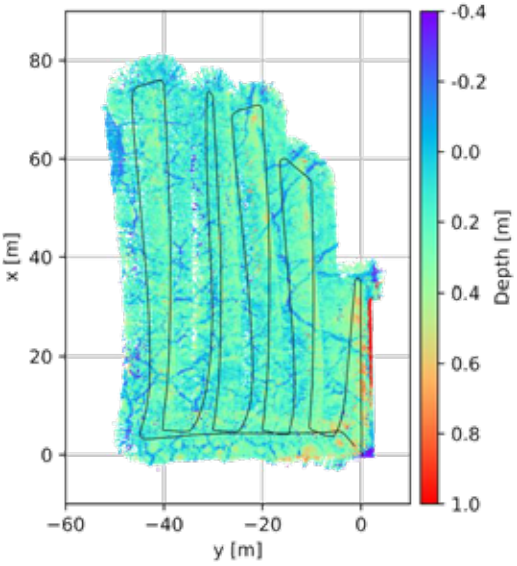
左：図 1　AUV MONACA の機器配置。左が前方。スラスタ（推進機）はヒーブ（上下）およびロール・ピッチ（縦揺れ，横揺れ）方向の制御用に 4 台，サージ（前後）およびヨー（方位）の制御用に 2 台搭載している。中央部に，上下反転可能なセンサユニットを搭載している。エネルギー源はリチウムイオン電池であり，動体中央左右に各 1 セット搭載している。メインコンピュータおよび各種インタフェース，電源回路等は前方の圧力容器に収納されている。

右：図 2　実験フィールド全景（北海道紋別港）。完全に氷で覆覆われている。水深約 10 m，広さはサッカー場程度。MONACA の投入地点を図中に示す。

左：図 3　実験の様子。観測を終え，クレーンで吊り上げたところ。背後に写っているフレームは音響モデム（水中の MONACA と超音波で通信および位置計測するための機器）設置用のもの。

右：図 4　潜航開始直後の様子。MONACA はその場で所定の深度まで潜り，その後氷の裏側への潜入を開始する。MONACA の上部，水面近くに見えているのは SSBL 船上局（超音波で MONACA の位置や状態を知るための装置）。





左：図 5　観測中の様子。センサデータを可視化したもの。スキャニングソーナーにより前方を監視しながら氷に沿ってウェイポイントを順番に辿りつつ，上向きのマルチビームソーナーにより氷裏面の形状を計測する。

右：図 6　取得した氷の形状データ。深度によって色分けされており，氷の割れ目を確認することができる。MONACA の航跡を黒線で示す。投入・回収地点はグラフの原点付近である。

3．AUV 回収ロボット ANCO

これまで述べてきたように MONACA は砕氷船「しらせ」で運用する。この母船は舷高が高く海中ロボットのオペレーションには不向きな構造をしている。とくに，砕氷して航行した場合には，ロボットの展開点は氷に囲まれ，海面が見えている部分（開口）は非常に狭いことが予想される。ロボットの発進は狭い開口でも運用可能である。しかし，調査を終えて自律的に帰投したロボットが，狭い開口部に浮上して滞在し続けることは，天候や海象により困難な場合が起こりえる。この問題を解決するために，母船から展開した遠隔制御型探査機（ROV: Remotely Operated Vehicle）を用いて，海中にいる MONACA を捕獲して揚収する手法を開発した。本節では，ANCO(Antarctic AUV Catching Option)と命名した回収ロボットについて報告する。

3－1．デザインコンセプト

ANCO は母船近く（半径 100 m 程度，深度 50 m 以内）で揚収待機状態にある MONACA を母船に揚収する手法の一助となるための遠隔操作型の海中ロボットである（図 7）。ANCO のミッションは，MONACA を海中で捕獲し，母船上まで揚収することである。ANCO は 1 ステップで MONACA を捕獲できるように，MONACA の吊上げ金具の嵌合部分に直接ドッキングする構造とした。浮遊中のロボットは，少しでも機械的接触があると反発力で逃げてしまう。ANCO の MONACA への接近方向を上側からとすることで， MONACA の水中抗力が増大し，逃げにくくするように設計した。また ANCO の質量を低減し，衝突時の慣性力が少なくなるように設計した。嵌合後の ANCO はそれ自体が揚収装置の一部になり，ANCO が MONACA に連結した状態で揚収される。海面まで引き上げられた MONACA-ANCO は，テザーを利用して主索を従えた嵌合金物（オス）をおろし，ANCO 上部の嵌合金物（メス）とドッキングさせ，主索の巻き上げによって揚収する（図 8）。

ANCO は SSBL とカメラによって，MONACA の位置を確認し，MONACA の上方 10m程度に近づいた後，水平・垂直スラスタによって MONACA に近づいていく。カメラで嵌合金物が目視できる数mの距離まで接近したら，嵌合金物にむけて下降し，ANCO 下方中央にある，嵌合金物（オス）で下降推力によりドッキングする。

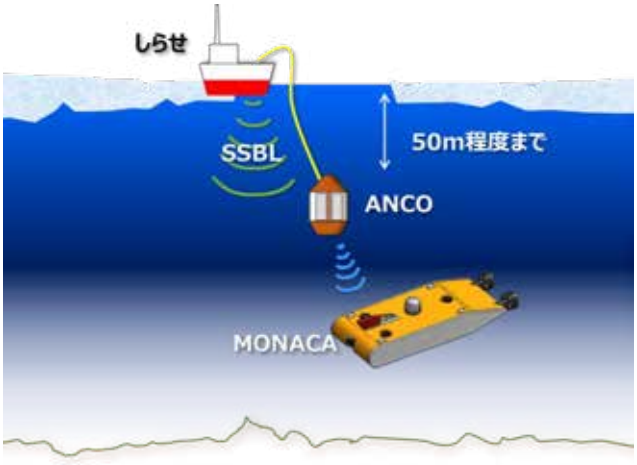


図 7　海中 AUV 回収のイメージ

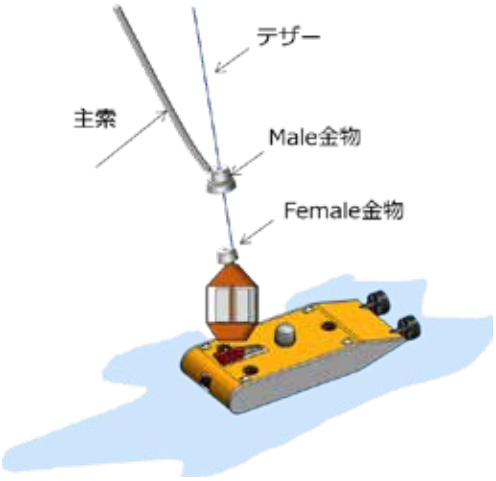


図 8　海面での主索嵌合のイメージ

3－2．デザイン

ANCO の設計要求は

- 小型軽量であること
- 音響装置により MONACA に接近できること
- 垂直方向に応答性良く移動できること
- 左右方向と方位方向に移動・回転できること
- 自身が MONACA とドッキングできること
- 自身が主索の嵌合金物を受けられること
- MONACA を海中曳航できる強度の索を有すること
- MONACA の重量を気中で支えられること

である。これらの要求から，ANCO の形状は垂直方向に流体抵抗が少なく，垂直方向の荷重を受けられる構造が必要であるということになり，縦長構造とした。ドッキング用の垂直カメラと航行用水平カメラを装備している。方位と姿勢，位置を計測するために，姿勢角センサ（磁気方位計付き MEMS 慣性計測装置），深度計と音響測位装置（SSBL: Super Short Base Line）用のトランスポンダーを装備する。基本機能は Blue Robotics 社の Blue ROV2 をベースとして，フレーム，電源，追加機器とその信号伝送部のみ新規に製作することでコストを抑えている。表 1 に仕様を示す。

表 1　ANCO の仕様

項目	仕様	単位	備考
サイズ	Φ500 x 800	mm	突起物含まず
重量	24	kg	
潜航深度	50	m	
ケーブル長	200	m	Φ10 mm
電源	14.8	V	リチウムイオン電池
速力	1	knot	
スラスタ	200 x 6	W	
航海計器	MEMS ジャイロ，深度計		
捕獲ツール	ROV トラッカ，カメラ		

３－３．実海域オペレーション

ANCO の ROV としての単体性能，および，MONACA の捕獲・揚収性能を確認するために，水槽，岸壁，実海域（下田，紋別）で試験を行った。水槽でのマニュアル制御による嵌合は，全くの素人で 1 分程度，オペレータでは数秒で行える。また，うねりや潮のある実海域では，熟練オペレータにより，数分で嵌合可能であることが確認されている。また，劣悪条件として MONACA が斜め 45° に傾いていても，熟練オペレータであれが 5 分程度で嵌合が可能である。図 9 に，氷海域試験ならびに「しらせ」に搭載した ANCO の写真を示す。

図 9　ANCO の外観．左）紋別で試験中の ANCO，右）「しらせ」甲板の ANCO

４．領域内連携

・低層水班と連携して MONACA へ水質センサ（濁度，pH）を搭載した。JARE64 において氷下でのデータ取得を行う予定である。

プレスリリース

2021/3/18　東京大学生産技術研究所、海中ロボットによる海氷裏面の全自動計測に成功～ 南極海での調査に向けて大きな一歩 ～

https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3513/

参考文献

査読付き論文

Yamagata H., Kochii S., Yoshida H., Nogi Y., Maki T., Development of AUV MONACA - A hover capable platform for detailed observation under ice -, Journal of Robotics and Mechatronics, 33(6), 1223-1233 (2021)

学会発表

小知井秀馬，山縣広和，巻俊宏，AUV による極域探査のための複雑地形の追従手法 -シミュレーションによる性能評価-，令和 3 年度 日本船舶海洋工学会 秋季講演会，(2021)

小知井秀馬，山縣広和，吉田弘，野木義史，巻俊宏，南極探査用 AUV「MONACA」による北海道紋別港の海氷裏面マッピング，海洋調査技術学会 第 33 回研究成果発表会，(2021)

Kochii S., Terrain Tracking and Obstacle Avoidance Method for Polar Exploration Using an AUV, The 8th KAIST-SJTU-UTokyo Joint Academic Symposium, Online (2021)

Yamagata H., Maki T., Case Study of Underwater Robot Contest for Young Students Under an Outbreak of Infection Diseases, OCEANS 2021 San Diego - Porto Online, (2021)

山縣広和, 小知井秀馬, 吉田弘, 野木義史, 巻俊宏, 極域探査 AUV“MONACA”の開発―氷下環境での自律航行試験―, JpGU 2021, MIS05-04, Online (2021)

山縣広和, 小知井秀馬, 吉田弘, 野木義史, 巻俊宏, 南極探査 AUV“MONACA”の開発　―浅海域における自律航行試験―, ロボティクス・メカトロニクス講演会’21, 1P1-B01, オンライン, (2021) poster

H. Yamagata, T. Maki, H. Yoshida, Y. Nogi, Shallow Sea Trial of the Under Ice AUV “MONACA”, JpGU 2020, Online, (2020)

山縣広和, 巻俊宏, 吉田弘, 野木義史, 南極海探査を目的とした AUV“MONACA”の設計と運用計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会’19, 2A1-H07, 広島, (2019) poster

H. Yamagata, T. Maki, H. Yoshida, Y. Nogi, Operation plan and design of the Antarctic exploration AUV "MONACA", JpGU 2019, Chiba, (2019)

H. Yamagata, T. Maki, H. Yoshida, Y. Nogi, Hardware Design of Variable and Compact AUV “MONACA” for Under-Ice Survey of Antarctica, IEEE OES Underwater Technology 2019, Kaohsiung, (2019)

H. Yamagata, T. Maki, H. Yoshida, Y. Ohta, Y. Nogi, Design of the Variable and Compact AUV “MONACA” for Antarctic Survey, The 1st GRAntarctic International Symposium and the 9th Symposium on Polar Science, Tokyo, (2018)

T. Maki, H. Yoshida, Y. Ota, Y. Noguchi, Y. Nogi, Toward under ice exploration using a high-mobility lightweight AUV, JpGU 2018, Chiba, (2018)

南極海沿岸プロファイラブイの開発

青木茂[1]、小野数也[1]
[1]北海道大学低温科学研究所

A03 未探査領域への挑戦（探査班）（代表：野木義史）

1．背景と目的

1－1．海洋プロファイル伝送観測システムの必要性

海洋の内部構造は時間的に変化する。船から直接観測するだけでは、目的とする現象を捉えられるわけではない。特に南極底層水のもととなるような冷たく重い水が生まれる冬の南極沿岸などは、船での接近が困難な最たる例である。海洋を時系列的に観測するには、係留系が有効なプラットフォームである。下端に錘をくくりつけたロープを浮きで吊り、立ち上がったロープの任意の位置に水温計や流速計といったセンサーを装着することで連続的なデータを記録する。通常の係留手法では、鉛直的な構造を詳しく知りたい場合、それだけ多くのセンサーが必要となってくる。

海洋係留観測の困難はデータ取得過程にある。気象観測であればデータを電波で伝送することができるため、データの入手は容易である。ところが海中で電波を利用することは非常に難しいため有効なデータの伝送システムはまだ実現しておらず、船舶で係留系に再度現場に赴いてデータロガー付きのセンサーをまるごと回収するのが通例である。このために係留系の下端には音響切り離し装置がつけてある。近年では切り離し装置の信頼性も向上したものの、特に長期にわたる係留系の場合には正常に動作しないリスクも未だ小さくない。

現在海洋観測の主力ともなっている漂流型のプロファイラシステムに加え、係留型のプロファイラプラットフォームが実現すれば、こうした難点が一挙に解決できる。プロファイリングにより一つのセンサーで詳細な鉛直構造のオイラー的な時間発展を容易にかつリアルタイムで把握できる。なにより、プロファイリング中に海面に浮上できれば、取得データを伝送できるため、船舶で回収する必要がなく、データ亡失のリスクが大幅に低減できる。こうした背景から、本課題の中で我々は係留型プロファイラの実用化に挑戦した。

1－2．プロファイリング制御機構

プロファイラの昇降運動に対する制御機構には何通りかの可能性があり、海面浮上の方式にもまだデファクトスタンダードはない。本課題に先立つ機器開発においては、まずアルゴフロートで採用されている浮力制御方式を採用した（図 1）。普段は海中で待機し、定期的に上下を繰り返す。浮力制御は制御方式としては簡便で故障も少ないが、流れの抵抗の影響を強く受けるため流速が強い場合の浮上能力に問題がある。そこで、本課題ではウィンチによりロープ長を直接制御し昇降する方式を採用した。こ

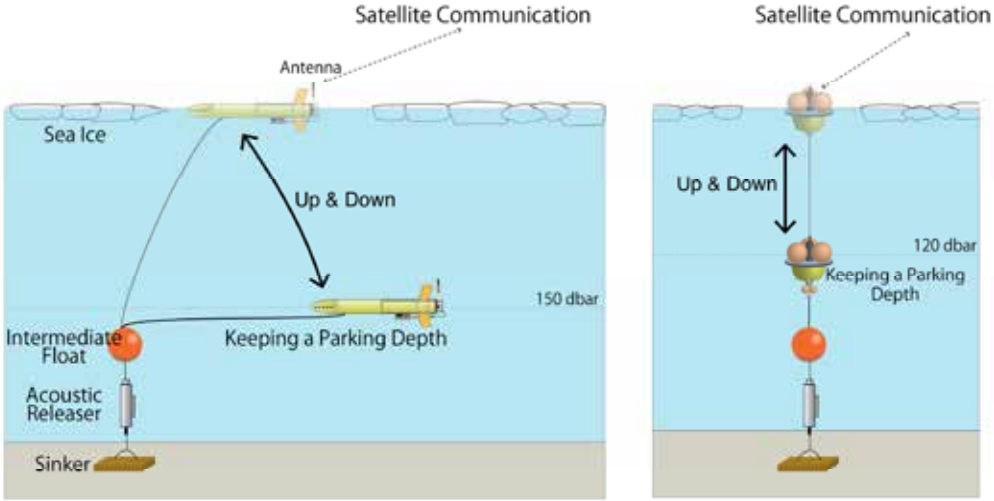


図 1　プロファイリングシステムの制御方式の比較

れに衛星データ伝送機能を実装し、自動でのデータ取得を目標とした。衛星通信は、イリジウムのショートバーストモードでデータを送る方法を採用している。

南極沿岸域に特有の大きな問題として、海氷・氷山の存在がある。喫水の深い氷山に衝突されればどんな系でもひとたまりもないが、ほぼ必ず遭遇することが予想される喫水の浅い海氷に激突して破損することは避けるべきである。今回は、表面近くの水温プロファイルから結氷の有無を判断することで、上昇を中止して海氷を回避する機能を実装した。

図 2　プロファイラブイの回収風景

2．経緯と成果

2－1．観測の実施

JARE60/61 において、ケープダンレー沖でウィンチ式ブイプラットフォームを実装した係留系 1 系によるプロファイル観測を実施した（図 2）。系投入後の 2019 年 3 月から約 1 か月分、5 回にわたり、120m 分の水温塩分プロファイルが取得できた（図 3）。これにより、2019 年の秋季には、2017 年に比べてポリニヤが急速に冷えていく様子が鉛直プロファイルとして確認できた。この観測では約 1 年程度のデータ取得を計画していたが、残念ながらバッテリーの早期枯渇により、以降の観測と観測プロファイルの伝送は行われなかった（回収後にこの不具合の原因はセンサーデータ取得と衛星データ伝送間のタイミング設定の不具合により、想定以上の電流を消費したことにあることを特定し、改修した）。

このプラットフォームの運用は海洋観測の難しさを教えてくれた。1 年後の 2020 年 2 月、係留系が装備していた音響切り離し装置により通常通り回収しようとした。音響装置には正常な反応があったため切り離しコマンドを送ったものの、切り離し装置の位置に変化はなく浮上する様子がなかった。しかたなく係留現場を離れて翌日他の観測を実施しようとしていたところ、衛星通信経由で緊急浮上の信号をキャッチした。急遽現場に急行して無事に回収することに成功した。切り離し部分をみると藻がびっしりと覆っており、これが切り離し動作を遅延させたものと考えられる。衛星通信装置には悩まされたものの、最後は衛星通信装置に救われた格好となった。

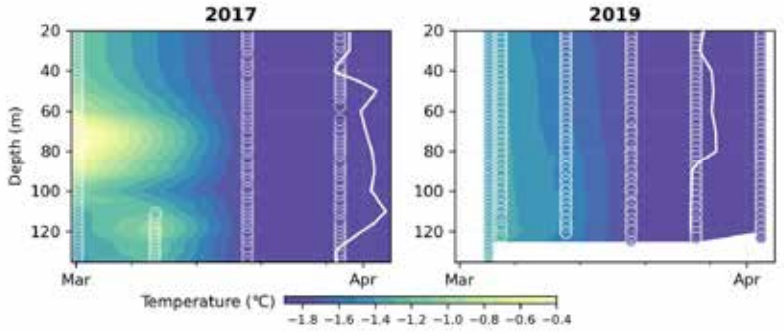


図 3　プロファイラによる水温の観測結果。本課題で開発したプロファイラの結果 (右) と 2017 年の観測(左)との比較

2－2．まとめと今後

少ない浮上回数ではあったがウィンチ方式プロファイラの挙動が流れに影響された形跡はなく、

強流時でも安定した動作が期待できる。一方で、今回実現したプロファイラは浮力や材質、投入手順の面で簡便さを求めて耐圧限界を 300m 深までとしたため、利用できる海域には制約が大きい。耐圧性を増すためにはより堅牢な材質に変更する必要があり、構成が大掛かりになってしまう難点があるが、プロファイル観測の魅力はそれを上回るものがある。なにより、衛星データ通信機能は、データ回収からプラットフォームの状態監視まで、やはり強力かつ有益あることを実証した。日本発のこうした技術が、今後さらに磨かれ安定的に実用に供されることを望みたい。

４．領域内連携

・底層水班と連携
・高密度水、底層水形成研究へのデータ提供

参考文献

Aoki. S., T. Takahashi, K. Yamazaki, D. Hirano, K. Ono, K. Kusahara, T. Tamura, and G. D. Williams, Warm surface waters increase Antarctic ice shelf melt and delay bottom water formation, *Communications Earth & Environment,* **3**, doi:10.1038/s43247-022-00456-z, 2022.

積雪環境調査に向けた UAV による表面地形測量

青山雄一[1,2]、服部晃久[3]、土井浩一郎[1,2]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]国土地理院

A03 未探査領域への挑戦（探査班）（代表：野木義史）

1．背景と目的

最近 10 年間、東南極ドロンイングモードランド（DML; Dronning Maud Land）地域の表面質量増加が、衛星重力ミッション GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment）により示されている。これはこの地域で降雪が増えたことによる、表面質量増加に起因すると考えられている。DML に存在する南極昭和基地でも、2009 年頃から積雪量が増加しており、超伝導重力計の連続観測データにも雪質量の引力効果による重力変化（季節変化と経年増加）が観測されている。昭和基地ならびに周辺露岩域での GNSS 連続ならびに繰返し測定データからも、ここ 10 年間では積雪増加による荷重変形が見られる（Hattori et al., 2021）。昭和基地ならびにその周辺での測地観測データに見られる、このような積雪増加による引力効果や荷重弾性変形を、物理モデルを介して定量的に検討するためには、測地観測点周辺の積雪環境（分布と時間変化）を測定する必要がある。そして、これらの積雪効果を精密に推定することは、最終氷期最盛期以降の氷床変動に対する固体地球の応答（GIA; Glacial Isostatic Adjustment）モデルの拘束や過去の氷床変動史を紐解く上でも有用である。

そこで本課題では、極域での無人航空機（UAV; Unmanned Aerial Vehicle）を活用した積雪環境調査の実用化に挑戦した。具体的には、UAV による空撮写真から、SfM（Structure from Motion）処理により高精度の表面地形モデル（DSM; digital surface model）を作成し、異なる時期（ブリザードの前後など）の DSM の差分を取ることで、積雪分布の推定を試みた。そのため senseFly 社 eBee Plus と DJI 社 INSPIRE 2 を用いて、2018 年 1 月～2018 年 12 月、2020 年 2 月～12 月の期間に、昭和基地および周辺露岩域上空で複数回空撮を実施した。

2．方法

2－1．UAV の運用

eBee Plus は固定翼タイプの UAV で、2 周波マルチ GNSS を搭載しており、地上に設置した 2 周波 GNSS 基準局とリアルタイムまたは後処理キネマティック相対測位を行うことで、DSM 導出時に地上標定点（GCP; ground control point）を別途与えなくても、GCP を用いた解析結果に匹敵する精度が得られると国内の事例では示されている。ただし、極域のような低温環境下、加えて高緯度地域での運用実績は無かったことから、まずは南極の夏期間（2018 年 1 月）にラングホブデ（雪鳥沢）、ルンドボーグスヘッタ、明るい岬、昭和基地の 4 地点で運用を行った。その実績に基づき、2020 年 2 月～12 月においては南極の冬期間を含む計 7 回の運用を昭和基地とラングホブデ（ざくろ池）にて実施した。運用者が機体を投げ上げて離陸させると、あとは自動的に空撮を行い、バッテリ残量が少なくなると砂地、あるいは雪面上に着陸させ（図 1）、空撮の進捗状況によりバッテリ交換後再度離陸させ、空撮を再開した。-28℃を下回る気温下でもバッテリ交換無しで 30 分程度の空撮が可能で、昭和基地がある東オングル島全域（2.5km 四方）の空撮（1.5 時間程度）も 1～2 回のバッテリ交換で実施できた。いずれの運用においても、GNSS 社製 GEM-2 を地上基準局として設置し、後処理 GNSS 相対測位を行った。

図 1 ：昭和基地の雪面上に着陸した senseFly eBee Plus。

一方、INSPIRE 2 は回転翼タイプの UAV で、1 周波マルチ GNSS を搭載している。第 59 次南極地域観測隊（越冬隊）の協力のもと、2018 年 1 月～12 月の期間、昭和基地上空で複数回空撮を実施した。今回の DSM 導出では使用していないが、30cm 四方の板を用いた GCP を数点設置しており、各点 GEM-2 を用いて 24 時間観測を行い、位置決定しており、GCP として使用可能である。

2-2. データ処理

地上基準局や自前で設置した GCP の位置は、RTKLIB を用い、Static PPP (Precise Point Positioning) で決定した。eBee Plus の機体位置は、機体制御用のソフトウェア eMotion を用い後処理相対測位で求めた。位置情報が付加された空撮写真から、SfM 処理ソフトウェア Pix4Dmapper を用いて DSM を導出した。Pix4Dmapper は、DSM の他、オルソモザイク画像も出力でき、DSM と組合わせることで、推定した 3 次元地形を任意の視点から表示することが可能である（図 2）。UAV の測位方法（1 周波 GNSS 単独測位、2 周波 GNSS 単独測位、2 周波 GNSS 相対測位）や GCM の有無による DSM の精度評価を行うため、SfM 処理においては同一の空撮データから条件を変えて DSM を導出した。

3. 結果

3-1. DSM の精度評価と極域探査での UAV 運用方法

2018 年 1 月 10 日、ルンドボーグスヘッタ上空で 67 分間の eBee Plus フライトで得た 710 枚の空撮データならびに 2018 年 1 月 17 日、明るい岬上空で 28 分間の eBee Plus フライトで得た 324 枚の空撮データから、2 周波 GNSS 相対測位かつ GCP の使用無しで導出した DSM と、それぞれの露岩域で同時期に南極観測（モニタリング観測）で実施した GNSS 測定（UAV の地上基準局とは別）の結果と比較した。ルンドボーグスヘッタでは、GNSS 測定結果に対して DSM が 10cm 高い結果となった。一方、明るい岬では GNSS 測定結果に対して DSM が 26cm 低い結果となった。

2018 年 1 月 24 日、昭和基地上空で 43 分間の eBee Plus フライトで得た 533 枚の空撮データから、① 2 周波 GNSS 相対測位・GCP(三角点) 使用、② 2 周波 GNSS 相対測位・GCP 使用無し、③ 2 周波 GNSS 単独測位・GCP 使用無しの 3 つの条件で DSM を導出した。このフライトで得られた DSM 範囲内に、国土地理院の三角点は 16 点存在するが、Pix4Dmapper の処理においては、7 点を使用し、他の 9 点は①の DSM の精度検証用に用いた。図 3 に①～③の条件で得られた DSM の楕円体高ヒストグラムと三角点との差を

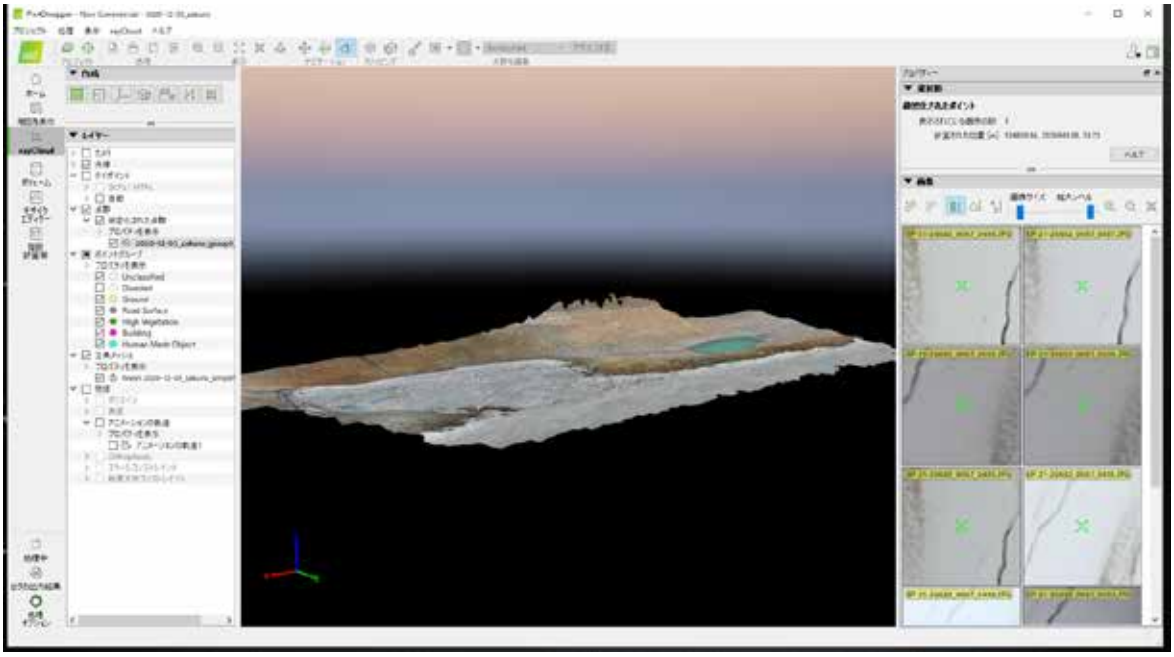


図 2：Pix4Dmapper 解析事例。任意の視点から 3 次元地形を再現することができ、アニメーションを作成することもできる。

示す。①と②の DSM の楕円体高ヒストグラムは酷似しており、最頻値の差も 15cm 程度であった。また三角点との比較でも①と②ともに、全体の 75%が±50cm 以内で一致している。一方、③の DSM の楕円体高ヒストグラムは①と②と比べ低い側にシフトした傾向が見られ、最頻値の差も 1.6m になった。三角点との比較においても、2m 程度の負のバイアスが見られる。

②と③の DSM の特徴を詳らかにするため、①の DSM を真値と仮定してその差を図 4 に示す。①と②の差の分布は、全体的に正の値（①よりも②の DSM が高い）を示し、DSM 差分全体の平均は+0.154m である。差分の水平分布では建物や施設、道路、丘や谷地形などでやや差が見られるが、DSM の水平勾配（傾斜）などは見られない。一方、③と①の DSM の差の分布は、全体的に負の値（①よりも③の DSM が低い）を示し、DSM 差分全体の平均は-1.689m である。差分の水平分布では、建物や施設、道路などに加え、地形の高低による差が②よりも顕著に見られる。また DSM の水平勾配（北側が高く、南側が低い傾斜）も見られる。

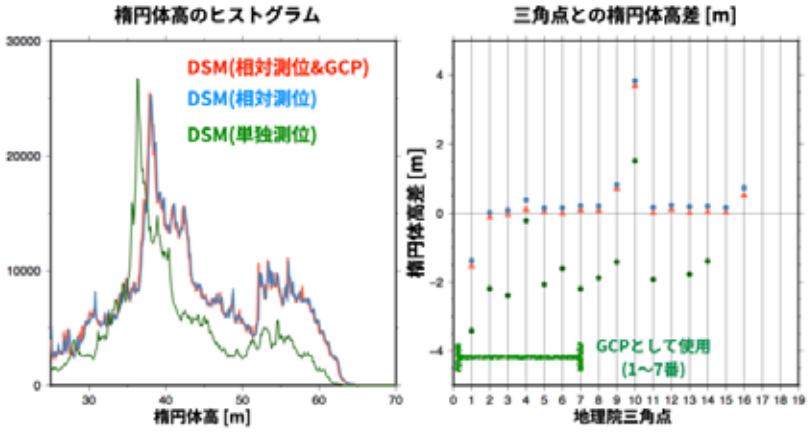


図 3：3 つの条件で eBee Plus の空撮データから導出された DSM の楕円体高ヒストグラム(左図)と三角点との楕円体高差(右図)。

2018 年 5 月 12・28 日、6 月 4 日、7 月 2 日に昭和基地上空で INSPIRE 2 フライトで得た空撮データから求めた DSM の特徴を図 5 に示す。5 月 12 日の空撮データの処理では、GCP7 点を使用して、DSM を導出したが、5 月 28 日以降は、GCP として使用している三角点が雪に埋まって使用できなかったため、GCP 無しで DSM を求めた。これらの DSM の楕円体高ヒストグラムの比較や三角点との比較から、GCP 無しで DSM を導出すると、80m～150m の高度バイアスが発生しうることが明らかになった。GCP 有りで求めた DSM と三角点（GCP として使用していない三角点）との差は、平均で 36cm であった。

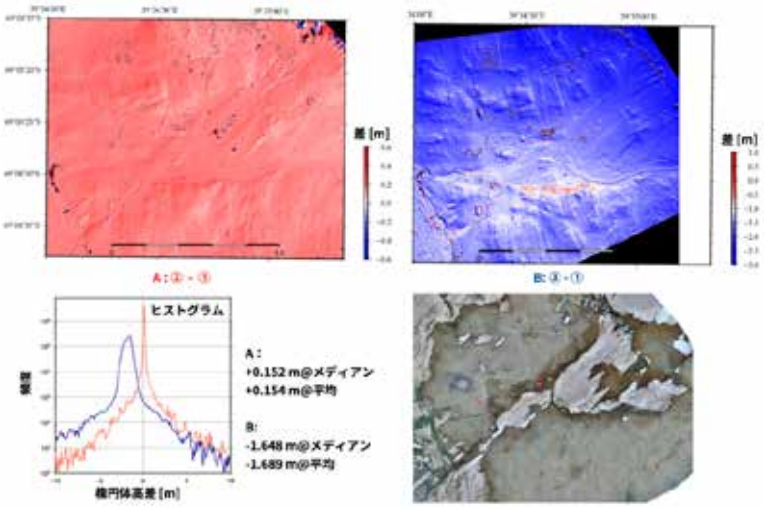


図 4：DSM の差の水平分布（左と右上図)とヒストグラム(左下図）および比較した領域のオルソモザイク画像（右下図)。

eBee Plus の空撮データから①の条件で導出された DSM と INSPIRE 2 で GCP 無しで導出された DSM の差分には、大きな水平勾配(傾斜)があり、1 周波 GNSS 搭載の UAV を用いた空撮から DSM を導出する場合には、GCP が不可欠であることがわかった。

以上より、2 周波 GNSS 相対測位で UAV の位置が決まっていれば、GCP 無しでも数 10cm 程度の確度で DSM の導出が可能であることが示された。つまり、陸上 GNSS 基準局が設置できれば、人のアクセ

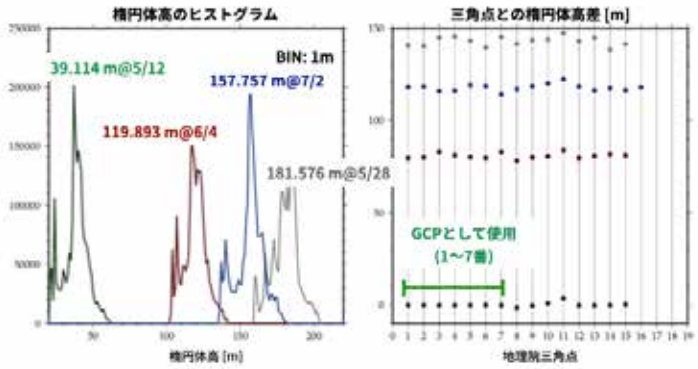


図 5：INSPIRE 2 の空撮データから導出された DSM の楕円体高ヒストグラム(左図)と三角点との楕円体高差(右図)。

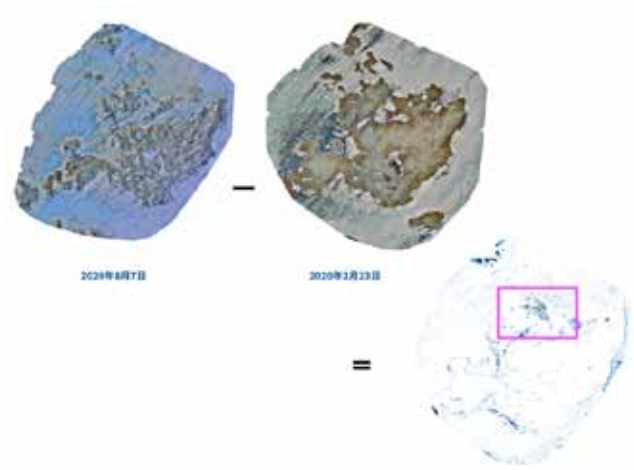


図 6：eBee Plus の空撮から得られた 2020 年 8 月 7 日と 2 月 23 日のモザイク画像と両者の DSM の差。ピンク色の四角は昭和基地主要部周辺を示す。

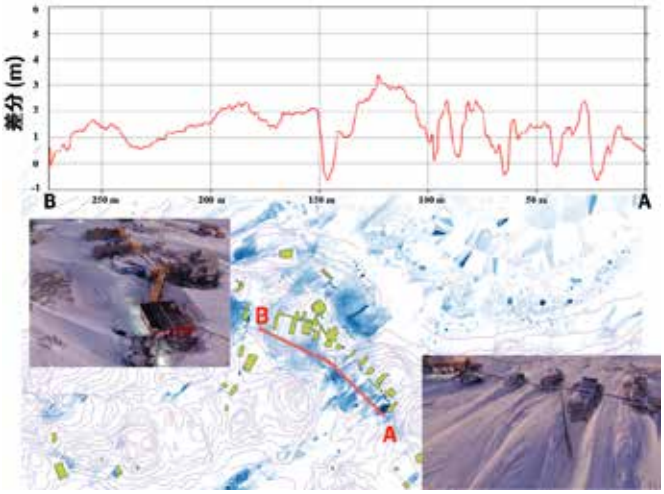


図 7：図 6 で示した基地主要部周辺の DSM の差と図中点 A から B までの断面図、および建物周辺のスノードリフトの写真。

スが難しい氷流や海氷域でも数 10cm 程度の確度で表面地形測量を実施しうる可能性が示された。一方、2 周波 GNSS 単独測位と GCP 無しで求めた DSM には数 m のバイアスや傾き、そして 1 周波 GNSS 単独測位と GCP 無しで求めた DSM には 100m を超えるバイアスや傾きが発生しうることから、測定領域内に GCP がない状態で表面地形測量を行うことは難しいと言える。

3−2．積雪環境測定

2020 年 2 月 23 日、4 月 1 日、4 月 27 日、5 月 26 日、8 月 7 日、11 月 6 日に eBee Plus フライトで得られた空撮データから 2 周波 GNSS 相対測位かつ GCP 無しで DSM を求めた。この内、8 月 7 日と 2 月 23 日のモザイク画像と両者の DSM の差を図 6 に示す。2020 年 2 月は昭和基地観測史上歴代 1 位となる日照時間を記録し、ここ数年融けずに残っていた万年雪もかなり消失し、露岩が現れた。一方、6 月、7 月に大型のブリザードが来襲し、東オングル島の大部分は深い雪に覆われ、昭和基地主要部建物周辺ではスノードリフトが発達した。モザイク画像から判別できる積雪状況（分布）を DSM の差分はよく再現している。また、主要部建物の風下側点 A から B までの積雪断面 （図 7） では 3m を超える積雪が存在するが、実際ブリザード後には 4m を超えるスノードリフトが発達することがあり、矛盾していない。一方、点 A から 25m、60m、145m 付近に−50cm 程度の負の積雪が見られる。3-1 節で示した数 10cm 程度の DSM の推定誤差 （バイアス） の可能性も否定できないが、この領域には 2020 年 2 月末までには融けきらなかった万年雪が存在しており、3 月か 4 月に更に融解していた可能性もある。今後さらなる検証が必要であるが、今回の結果は 2 周波 GNSS 相対測位を用いることで UAV を用いた積雪環境調査が可能であることが本課題により示された。

4．領域内連携

・固体地球と氷床の相互作用（固体班）（代表：福田洋一）と連携

5．謝辞

UAV による空撮の実施において、第 59 次南極地域観測隊および第 61 次南極観測地域観測隊越冬隊のご協力に深く感謝する。

参考文献

Hattori, A., Aoyama, Y., Okuno, J., and Doi, K., GNSS Observations of GIA-Induced Crustal Deformation in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *Geophysical Research Letters*, *48*(13), 2021.

南大洋の海底地形
－海洋底ダイナミクス研究から海洋モデル・古環境研究との連携へ－

藤井昌和[1,2]、野木義史[1,2]、沖野郷子[3]、
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]東京大学大気海洋研究所

A01-1 未探査領域への挑戦（探査班）（代表：野木義史）
B03 中央海嶺における海底マグマ活動が地球環境変動に与える影響に関する研究（代表：藤井昌和）

1．はじめに

極域の海洋底は、氷床–海氷–海洋システムが固体地球と接する境界であり、その地形は海洋循環を規定し、氷床の盛衰や地圏進化の痕跡が長期にわたって記録されるため、地球科学における貴重な研究対象である（藤井＆野木、2018; 佐藤ほか、2018）。しかしながら、海氷に覆われた環境や地理的な状況により調査が困難であることから、その大半は未探査であり、水深分布など基礎的な情報が不足している。氷床や海洋の変動を含めた南極システムとして学際的な研究を推し進めるためには、正確かつ高分解能な音響測深に基づく海底地形の把握が必須である。本研究では、南大洋の中でも、特に東南極のリュツォホルム湾、ケープダンレー沖、トッテン氷河沖、中央海嶺系に着眼し、詳細な海洋底の理解を進めた。

2．研究成果

2-1. 海底地形データの新しい観測と過去データの整備

本研究期間に、マルチビーム音響測深に基づく海底地形観測を 5 つの南大洋航海で新たに実施した。これらで得たデータに加え、過去に取得され利用可能なデータ全てを精査・考慮し、対象海域の最新の海底地形図を作成した（Fujii and Nogi., 2021）。新たな観測としては、学術調査船「白鳳丸」の 4 航海（KH-19-1、KH-19-6 leg3、KH-19-6 leg 4、KH-20-1）、研究船「みらい」の 1 航海（MR19-04 Leg3）を実施した。過去のデータは、「白鳳丸」の 4 航海（KH-07-4、KH-09-5、KH-10-7、KH-16-1）、「みらい」の 2 航海（MR12-05 leg2、MR12-05 leg3）、南極観測船「しらせ」の 5 行動（JARE51、52、53、54、55）、米国・研究船「N.B.Palmer」の 1 航海（14-02）、豪・研究船「Investigator」の 1 航海（IN2017-V01）で得られた記録を利用し、一部再解析を実施した。また、本研究期間中に実施された「しらせ」の 3 行動（JARE61 次、62 次、63 次）で得られた音響測深記録も逐次活用した。観測の様子や明らかとなった海底地形は、国立科学博物館「世界の海がフィールド！学術研究船『白鳳丸』30 年の航跡」展示、地質標本館特別展「南極の過去と現在、そして未来－研究最前線からのレポート－」において一般向けにも発信された。

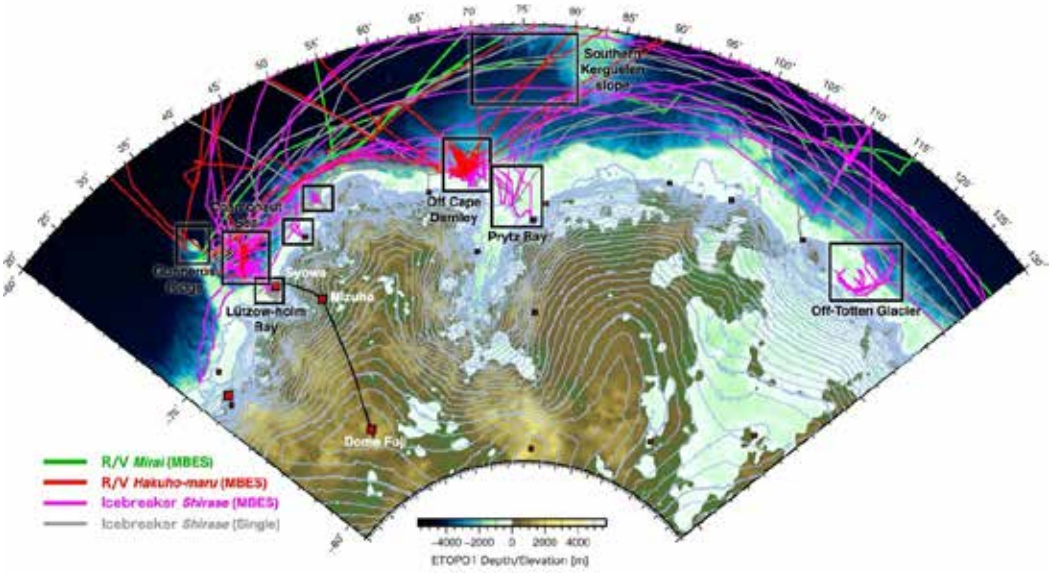


図 1．本研究で実施/活用した東南極沖合のマルチビーム音響測深記録の航跡分布の一例

2-2. 海洋数値モデルへの詳細な海底地形の実装

編纂した詳細な海底地形データを複数の海域における領域海洋数値モデルへ適用した。リュツォホルム湾においては、マルチビーム音響測深観測で得た詳細な海底地形に、過去の氷上掘削測深データや ETOPO1 を組み合わせて海底地形モデルを作成し海洋数値モデルに適用した。その結果、暖かい海水が海底谷を通ってリュツォホルム湾に流入し、白瀬氷河域の顕著な氷床底面融解を引き起こすという一連のプロセス解明に貢献した（Hirano et al., 2020）。また、地形モデル間の違いによる数値モデル評価を行った（Kusahara et al., 2021）。ケープダンレー沖においては、南極底層水の流路となる複雑な海底谷の詳細がマルチビーム音響測深によって明らかとなり、高解像度の海洋数値モデルによる南極底層水挙動の評価が可能となった（Vigan et al., 2021; Mizuta et al., 2021）。トッテン氷河においては、マルチビーム音響測深観測による海底地形データに加えて、過去のシングルビーム音響測深のデータや航空機からの透過型センサー（AXCTD）で得られる推定着底水深なども活用し、海底地形モデルを作成した。その結果、トッテン氷河沖の大陸棚の盆地と氷河縁辺域を繋ぐ海底谷に沿って沖合の暖水が入り込む様子が明らかとなった（Hirano et al., in revision）。

2-3. 古環境研究の戦略決定に必要なデータ提供

編纂した詳細な海底地形図に加えて、サブボトムプロファイラー（海底浅部地層装置）の解析を部分的に進め、リュツォホルム湾、ケープダンレー沖、トッテン氷河沖における採泥計画へこれらを活用した。本研究期間中に、KH-19-1 航海、KH-19-3 leg4 航海、KH-20-1 航海、JARE61 行動において南大洋における海底堆積物の採取が実施された。

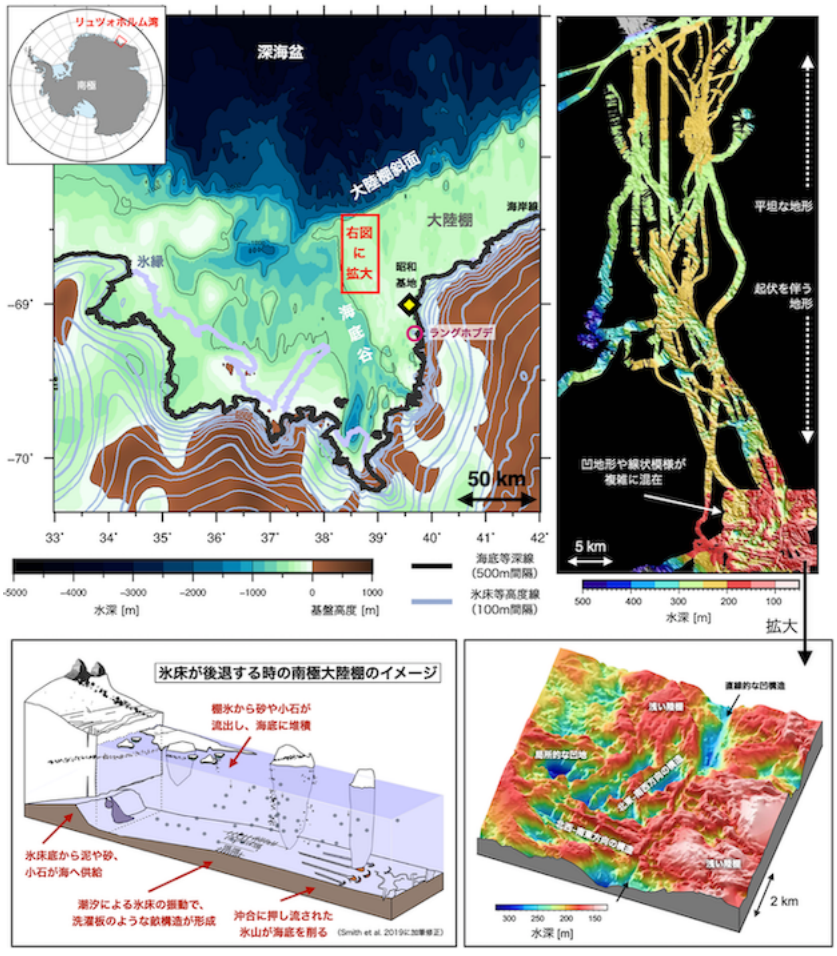


図 2. リュツォホルム湾の海底地形図と氷床後退に伴って形成された海底構造

2-4. 南極氷下 AUV 観測に向けた計画策定

リュツォホルム湾において、日本初となる氷下 AUV 観測の実現に向けて、その運用の基礎データとなる海底地形図を整備した。特にラングホブデ棚氷の沖合に対象を絞り、「しらせ」のマルチビーム音響測深で得たデータに加え、最もラングホブデ棚氷縁辺に近づいた「しらせ」59 次行動のシングルビーム音響測深データを解析した。さらに、ラングホブデ氷河の 5 地点で実施された氷床掘削時に得られた氷底深度と掘削孔下の海底水深、船上投下型センサーの水深を整理し、ラングホブデ棚氷沖合への AUV 探査計画を立案した。

2-5. 中央海嶺系における海底マグマ活動

氷期-間氷期サイクルの特徴である氷床と海水の質量再分配が地球の火成活動に影響を与えている可能性について、現代から４００万年前に形成された中央海嶺系を対象に、海底地形と海域地磁気異常の観測をもとに検証した。観測は、チリ海嶺、南東インド洋海嶺の複数海域、大西洋中央海嶺で実施した。これまでの結果により、10 万年以下の海底地形変動は見られるものの、今回観測した領域および形成時期を通じた系統的な変動は確認できなかった（藤井、2022）。少なくともミランコビッチタイムスケールでの海底マグマ活動は、大地形に現れるほど変動を作らないと考えられる。これらの変動は、マントルの部分溶融度の不均質に起因する数 100 万年の変動とメルト輸送に起因する数 10 万年の変動の複雑な重ね合わせであると考えられ、今後のさらなる理解には海底堆積物に含まれる噴出火山ガラスの観察による詳細な火成活動復元が必須であろう。本研究に必要不可欠であった深海磁気異常に基づく海洋底年代の高精度化について、KH-20-1 航海において南東インド洋海嶺で新たに取得した深海曳航式磁力計データを解析した。地磁気逆転のタイミングとは異なる高分解能な地磁気異常の変動が捉えられ、これを東太平洋の深海掘削で得られた海底堆積物、同年代に噴出したエチオピアの陸上溶岩と比較したところ、この小さな変動が地理的に離れた 3 ヶ所で同様に見られることが明らかとなった（Fujii et al., 2021）。この発見により地磁気年代クロン C12n（約 30–31 Ma）における新たな年代指標が示され、地磁気異常による海洋底年代決定の高精度化に貢献した。

３．領域内連携

探査班における海底地形チームは、海洋観測計画や海洋モデルへの海底地形実装について、底層水班やモデル班と連携を進めた。また、海底堆積物の採取計画の立案にあたっては古海洋班や固体班へデータを提供し、海底の堆積侵食プロセスなどについて議論した。最終氷期以降の氷床後退プロセスや過去の氷床接地線について、固体班や氷床班と知見・データを交換し議論を進めた。

４．国際連携

本研究を進めるにあたっては、独・Alfred Wegener Institute や豪・Geoscience Australia と相互に協力し、観測への意見交換や海底地形など海域地球物理データの共有を行った。「白鳳丸」航海の観測計画やトッテン氷河の海底地形モデルの作成にあたっては、独・砕氷船「Polarstern」や豪・研究船「Investigator」、米国・研究船「N.B.Palmer」の提供データを活用した。また、「Polarstern」のリュツォホルム湾およびコスモノート海での観測（2021/22 年）、豪・研究船「Investigator」のケープダンレー沖での観測（2021/22 年）にあたって最新の解析データを提供した。仏・パリ地球物理研究所とも、南大洋における深海磁気異常観測について情報交換および共同研究を進めた。

５．今後の課題

南大洋における海底地形の未測領域は依然として大半を占める。数値モデリングの解像度や精度を向上させる上でも、正確かつ詳細な海底地形が必須であるため、基礎的な音響測深を引き続き進めることが重要である。大陸棚や氷床末端域においては、海氷や棚氷の状況を見極めながら船上観測を進めるとともに、海中ロボット技術などを駆使した氷下の観測が必要である。中央海嶺系や海台を含む沖合の海底についても、広範囲の観測の展開が望まれ、海中ロボットの複数台同時展開などの新しい技術の開発も期待される。

参考文献

Hirano D., T. Tamura, K. Kusahara, K.I Ohshima, K. W. Nicholls, S. Ushio, D. Simizu, K. Ono, M. Fujii, Y. Nogi, S. Aoki, Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue, East Antarctica, *Nature Communications*, doi.org/10.1038/s41467-020-17527-4, 11:4221, 2020.

藤井昌和、野木義史、音波探査で海底を見る：海底地形に記録された地球環境変動、*低温科学*、76、269–284、doi:10.14943/lowtemsci.76.269、2018.

Fujii M,, Y. Nogi, Multibeam bathymetry off East Antarctica: 2010s Japanese observations, *Japan Geoscience Union Meeting 2021*, 2021.

Fujii M,, K. Okino, C. Tamura, Deep-tow magnetics for 29–33 Myr seafloor of the Southeast Indian Ridge, *Japan Geoscience Union Meeting 2021*, 2021.

藤井昌和、中央海嶺の時間変動要因の解明を目指して：太平洋チリ海嶺における観測例、*日本地球化学会第69回年会*、2022. （招待講演）

Kusahara K., D. Hirano, M. Fujii, A. D. Fraser, T. Tamura, Modeling intensive ocean–cryosphere interactions in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *The Cryosphere*, 15(4) 1697 - 1717, 2021.

Mizuta G., Y. Fukamachi, D. Simizu, Y Matsumura, Y Kitade, D. Hiran, M. Fujii, Y. Nogi, K.I. Ohshima, Seasonal evolution of Cape Darnley Bottom Water revealed by mooring measurements, *Frontiers Marine Science*, 8:657119, doi: 10.3389/fmars.2021.657119, 2021.

Mensah V., Y. Nakayama, M. Fujii, Y. Nogi, K. I. Ohshima, Dense water downslope flow and AABW production in a numerical model: sensitivity to horizontal and vertical resolution in the region off Cape Darnley Polynya, *Ocean Modeling*, 165 101843, doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101843, 2021.

佐藤暢、野木義史、藤井昌和, 佐藤太一、南大洋の形成、*低温科学*、76、243–258、doi:10.14943/lowtemsci.76.243、2018.

南大洋周極モデル・高解像度領域モデルによる棚氷-海氷-海洋相互作用に関する研究
－南大洋・南極氷床新学術を振り返って－

草原和弥[1]
[1]国立研究開発法人 海洋研究開発機構(JAMSTEC)

A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング(代表: 阿部彩子)
A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス(底層水班)(代表：大島慶一郎)
A01(公募) 東南極トッテン棚氷域における氷床海洋相互作用の観測研究(代表：平野大輔)
B02(公募) トッテン棚氷融解の引き金(代表：溝端浩平)

１．背景と目的

地球温暖化に伴う気候変動のうち、海面上昇は、世界の沿岸環境に大きな影響を与えるため、社会的、政治的、経済的に極めて重要な問題である(IPCC 2021)。南極氷床は、南極大陸の上に氷として固定されている地球表面最大の淡水貯蔵庫であることから、南極氷床の質量変動は海水準変動の要因となる(Noble et al. 2020)。20 世紀の海面上昇は、主に海水の熱膨張によるものであったが、今後の温暖化した気候では、南極氷床が大きく減少し、海面上昇の主要因となりうることが指摘されている(IPCC 2021)。

本報告で扱う棚氷とは氷床の海側末端部分である。棚氷は南極氷床全体の面積の 11%に過ぎないが(Fox et al. 1994)、南極大陸周囲の約 74%を覆っており、南極沿岸域を大きく特徴づける要素である(Bindschadler et al. 2011)。南極氷床の質量損失過程に着目すると、棚氷底面での融解が南極氷床の支配的な消耗プロセスであることが、近年の衛星観測による棚氷の流動収支解析等から、明らかになってきた (Depoorter et al. 2013; Rignot et al. 2013; Liu et al. 2015)。南大洋の海洋観測からは、南極氷床起源の淡水量増加が近年の南大洋の低塩化に寄与していることも示唆されている (Sallée 2018; Schmidtko et al. 2014; Jacobs and Giulivi 2010)。温暖化時の南極氷床・南大洋の環境場および気候システムへの影響を正しく評価するためには、南極沿岸域の海洋-棚氷相互作用の理解が必要不可欠であると言える(Convey et al. 2009; Noble et al. 2020)。

南極棚氷の厚さは、末端で数十 m～200 m、接地線付近では数百 m～2000 m にも達するため、棚氷底面はその厚い氷によって大気から隔離されている。そのため、棚氷下の海洋に流入する海水が棚氷底面融解の唯一の熱源となる。 Jacobs et al.(1992)は南極沿岸域に存在する三つ水塊による棚氷底面融解過程をモード 1、2，3 として名付け、整理している(図 1)。この棚氷底面融解モードと棚氷底面融解の定式化については、新学術開始時に執筆した和文文献 (草原 2018) を参照されたい。ここでは、前述の文献と重複するが、三つの棚氷底面融解モードについて概説する。一つ目の水塊は、沿岸ポリニヤ域で形成される高塩分陸棚水(High Salinity Shelf Water, HSSW)を起源とする高密度陸棚水(Dense Shelf Water, DSW)である(モード 1 ：図 1 の青色部分)。この水塊は表層結氷水温(−1.8℃)、高塩分(> 34.6 psu)で特徴づけられる。高密度陸棚水のうち、大陸棚外縁を超えて大陸斜面に流出したものは南極底層水(Antarctic Bottom Water,

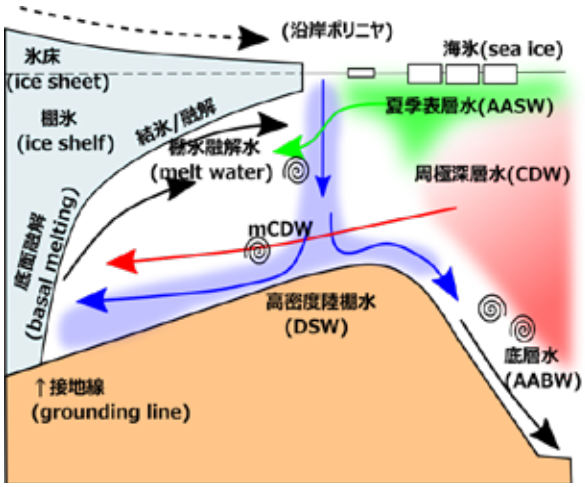


図 1: 南極沿岸域における棚氷-海洋相互作用の模式図(草原(2018,低温科学)より改変)．青は高密度陸棚水(Dense Shelf Water, DSW)，赤は周極深層水(Circumpolar Deep Water, CDW)，緑は夏季表層水(Antarctic Surface Water, AASW)を示す。青、赤、緑はモード 1 、 2 ， 3 の棚氷融解に対応。

AABW)の源になる。一方、高緯度の方向へ流れたものは、棚氷底面を融解する熱源の一つとなる。棚氷下では結氷水温の圧力/水深依存性により、たとえ水温が表層結氷点の水塊であっても、棚氷底面を溶かす熱源となる。二つ目は、周極深層水(Circumpolar Deep Water, CDW)である(モード 2：図 1 の赤色部分)。周極深層水は南大洋において相対的に高温(～1℃)・高塩分(～34.7 psu)で特徴づけられる水塊である。この周極深層水を起源とする水塊は、高い棚氷底面融解率を引き起こす。 三つ目は、南極表層水(Antarctic Surface Water, AASW)である(モード 3 ：図 1 の緑色部分)。 この水塊は夏季、海氷が溶けることによって海洋表層に形成され、 太陽放射等によって温められる水塊である。AASW は低塩分・表層結氷点より少し高温で特徴づけられる。 棚氷周辺にこの表層水が多く存在すると、 外的要因(潮汐や風)によって、棚氷下に強制的に押し込まれ、その結果棚氷末端部分の底面を融解させる。

南極沿岸域の海洋環境は季節・場所によって大きく異なることから、南極の棚氷底面融解プロセス(モード)も時空間的に異なることが想像される。しかしながら、これまでの観測・モデル研究の多くはモード 2 の周極深層水を起源とする棚氷底面融解に注目したものがほとんどで、季節的に出現・消失するモード 1 と 3 の役割の理解はあまり進んでいない。本報告では、主として南大洋周極モデルを用いた棚氷底面融解プロセスに関する研究結果 (Kusahara 2021)について記述する。南大洋・南極氷床新学術では、南大洋周極モデルだけでなく、海洋観測結果との直接比較ために高解像度領域モデル(リュツォ・ホルム湾とトッテン棚氷周辺)も構築し、共同研究に利用した。次節では、新学術で利用した周極モデルとリュツォ・ホルム湾領域モデルのモデル設定について概説する。リュツォ・ホルム湾領域モデル結果については、本報告書の平野らの報告を、トッテン棚氷周辺領域モデル結果については溝端らの報告を参照されたい。

2．数値モデル

海洋研究開発機構(JAMSTEC)と東京大学大気海洋研究所(AORI)で共同開発・運用されている海洋海氷結合モデル(COCO) に棚氷要素を導入した数値モデルを利用している(Kusahara and Hasumi 2013)。図 2 は南大洋周極モデル(SO モデル)とリュツォ・ホルム湾を高解像度化した領域モデル(LHB モデル)の計算領域とリュツォ・ホルム湾付近のモデル水平解像度である。COCO は水平方向に一般直交座標系を利用しており、一般的な緯度経度座標だけでなく、モデルの二つの特異点を任意の場所に移動した

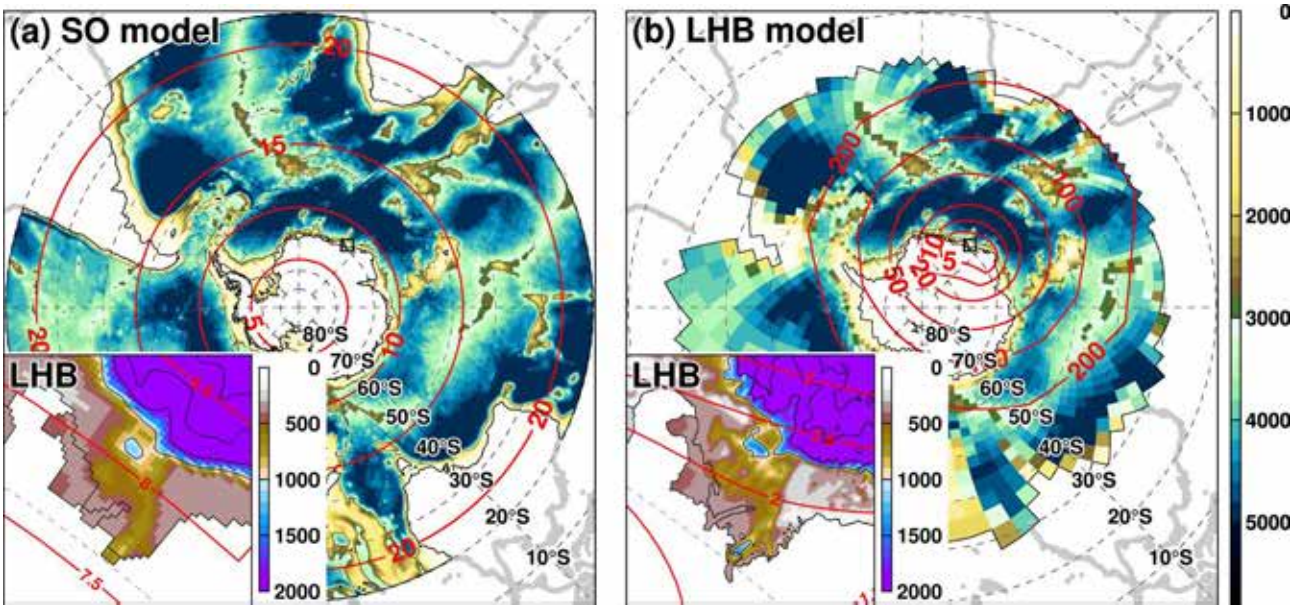


図 2: 南大洋周極モデル(SO model)とリュツォ・ホルム湾高解像度領域モデル(LHB model) の海底地形とモデル水平解像度。左下の図は各モデルでの LHB 周辺の拡大図。図はモデル格子に基いて作図。

座標系を設定することが可能である。二つの特異点に挟まれた領域が高解像度となるため、LHB の付近に二つの特異点を配置することによって、モデル領域を南大洋全体に維持しつつ、ターゲット領域を高解像度化している。SO モデルは南緯 20 度、LHB モデルは南緯 30 度に北限境界を設置した。これらの人口境界は南極周極流の存在緯度より十分に北側になるようにした。図にあるように、SO モデルでは、南極沿岸域を一様に 10km 以下の水平解像度で覆い、LHB 付近は約 8km の格子幅となる。LHB モデルは、LHB 付近を 2km 程度で解像し、LHB の海底地形を特徴づける南北のトラフがよく表現できていることがわかる。LHB から離れた領域では、LHB モデルの水平解像度が急激に粗くなり、北限境界付近や西南極域では格子サイズが 200km 以上となっている。南大洋・南極氷床新学術では、周極モデルと領域モデルを目的に合わせて使い分け、棚氷底面融解プロセスをはじめとする種々の数値モデリング研究を実施した(周極モデルによる研究成果は Kusahara(2020, 2021), Aoki et al. (2022), Ohashi et al.(2022)を、領域モデルによる研究成果は Hirano et al.(2020), Kusahara et al.(2021)を参照されたい)。

3．南大洋周極モデルの結果

以下では、上述の南大洋周極モデル(SO model)を大気再解析データ（ERA-Interim, Dee et al. 2011）を用いて駆動した 1979–2018 年の計算結果の一例を示す(Kusahara 2021)。モデル結果の詳細な解析から、南極棚氷底融解が南大洋の海氷面積と南極沿岸域の水塊の変動と同調するように変化することを示す。本モデルは南大洋上の海氷面積の季節変化をある程度現実的に再現する(図 3a)。詳細にみると、夏季海氷面積は過小評価傾向、冬季の海氷面積は過大評価傾向にある。南極棚氷底面融解量の季節変化は、夏に最大、冬に最小となり、これは海氷面積の季節変化と正反対である(図 3b)。同様な南極棚氷底面融解の季節変化は、過去のモデリング研究(Dinniman et al. 2015)においても確認されている。本モデルの棚氷底面融解量の年平均気候値は 1284Gt yr^{-1} で、衛星観測による見積(1454–1500 Gt yr^{-1})とある程度整合的である(Depoorter et al. 2013; Rignot et al. 2013)。

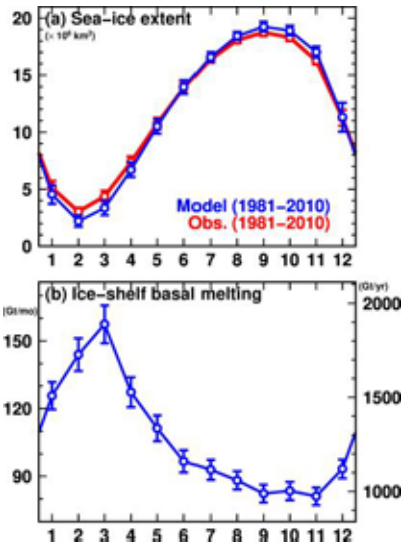


図 3: (a)全南大洋海氷面積と(b)南極棚氷底面融解の季節変動。青線がモデル結果で、赤線が衛星観測結果を示す。1981–2010 年の平均を利用。

図 4 の赤と橙の時系列は、1979–2018 年の数値モデル及び衛星観測から見積もられる月毎海氷域面積偏差を示す。月毎海氷面積偏差は、各月の海氷面積から月毎海氷面積気候値(図 3a)を差し引いたものである。この 2 つの時系列の類似性から、本モデルは南大洋の海氷変動の季節変動だけでなく、経年変動も現実的に再現していることが確認できる。1970 年代後半から 2015 年までの海氷面積の長期増加トレンドと、2016 年春にその偏差が正から負に急激にシフトする様子をモデルで捉えることができている。海氷変動は南大洋の水塊形成にも大きな影響を与えるので、モデルにおける海氷場の再現性の良さは、棚氷底面融解プロセスを調査する上でも重要である。

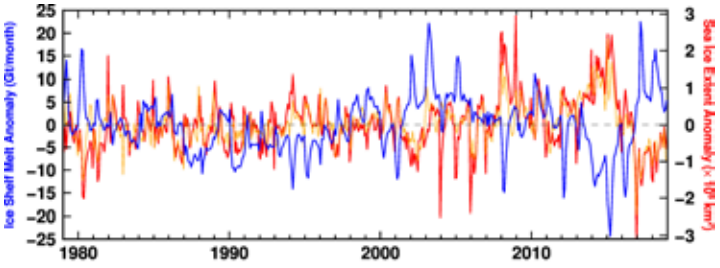


図 4: 海氷面積と棚氷底面融解量の時系列。季節変動(図 3)を除いた偏差として表示。オレンジ色は衛星観測による海氷面積偏差。

海氷面積偏差計算と同様に、棚氷底面融解の季節変動を差し引いた月毎偏差の時系列

を図示すると(図 4 青線)、海氷面積変動と強い負の相関関係にあることがわかる。例えば、2016 年後半に大きく海氷面積が負偏差となると、棚氷底面融解偏差は正値をとなっている。この海氷面積と棚氷底面融解の負の相関関係は、特に夏季(12 月–4 月)に顕著となる。

次に、海氷面積と棚氷底面融解の二つの雪氷圏の変動をつなぐプロセスを理解するために、南極沿岸域の水塊変動について調べた。海水温、塩分、密度に基づいて、7 つの沿岸水塊が定義した(図 5 の T-S ダイアグラムにその分類を示す)。高密度陸棚水(図 5 の HS)はモード 1 の融解を引き起こす。塩分濃度の低いものは LS として分類した。この 2 つは冷たい水塊($-2.0\ ℃ < \theta < -1.7\ ℃$)である。LS は塩分濃度の低い DSW、もしくは夏季海氷融解を起源とする冷たく低密度の水塊である。−1.7℃以上の海水は密度を用いて、4 つの水塊を定義した。重い水塊から、BW(Bottom Water、底層水)、CD(CDW)、MC(Modified CDW)、AS(AASW) とラベル付けした。CD と MC による棚氷底面融解がモード 2 に対応する。AS による底面融解が、モード 3 に対応する。また、−2℃より冷たい水は IS(Ice Shelf water)と定義した。図 5 はアイスフロントを横切って、棚氷下に流入する水塊の季節変化を示す。南極棚氷下海洋に流入する水塊の流入量やその構成比には大きな季節変動があることがわかる。CD、MC、AS の比較的暖かい水塊の流入量は夏季に最大となるのに対し、HS と LS の冷たい水塊の流入量は、冬季に最大となる。この棚氷下へ流入する暖水と冷水の変動が、棚氷底面融解の季節・経年変動を規定している。

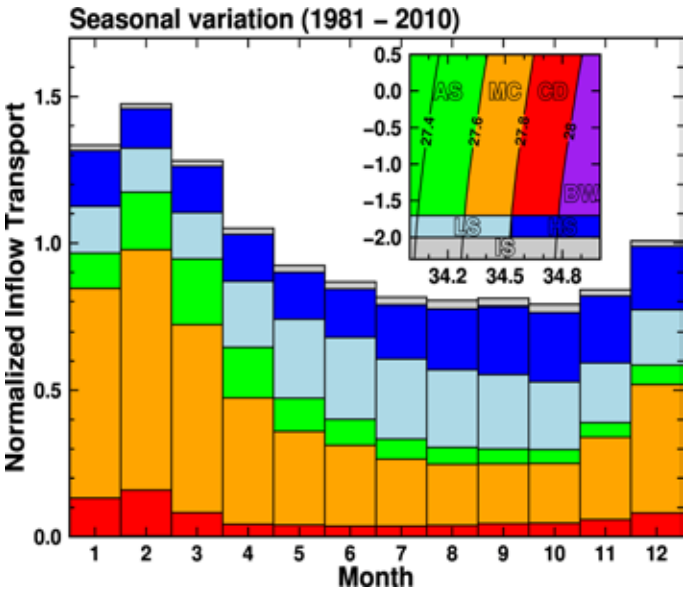


図 5: 棚氷下の海洋に流入する水塊の季節変化。T-S ダイアグラムは水塊の定義域を示す。縦軸の流入量は総流入量の年平均値で規格化している。

次に、特に海氷面積と棚氷底面融解の間に有意な相関関係にある夏季に注目して、それら二変数と棚氷融解変動に重要となる五つの南極沿岸水塊(AS, MC, CD, LS, HS)との相関関係について調べた(図 6 は南極全体とアメリー棚氷)。ここでは示さないが、各棚氷において、底面融解は 3 つの暖水域(AS, MC, CD)の少なくとも 1 つと統計的に有意な正の相関を示し、これらの水塊が夏季の南極の棚氷融解の熱源であることを確認した(Kusahara 2021)。南極棚氷全体でみると(図 6a)、夏季表層水(AS)と底面融解(BM)は強い正の相関があり、AASW の流入量の増減が夏季の棚氷底面融解の経年変動を引き起こしていることがわかる。また、夏季表層水(AS)と海氷面積(SI)に負の相関があり、夏季海氷面積が減少することにより、AASW の形成に

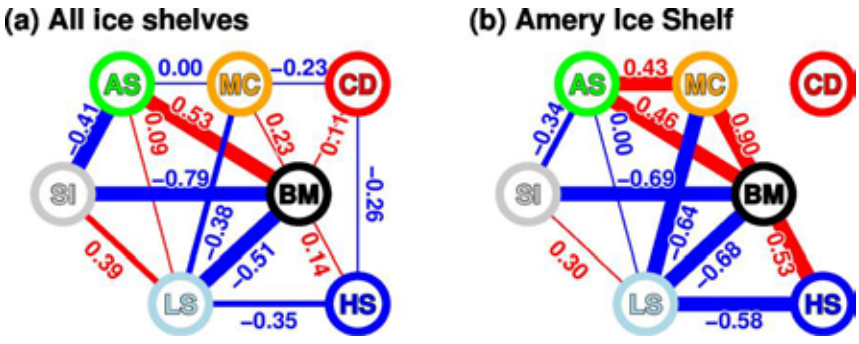


図 6: 夏季(1–4 月)における、海氷面積(SI)、棚氷底面融解(BM)、流入する水塊(LS, HS, AS, MC, CD)の相関係数。赤が正の相関関係を、青が負の相関関係を示す。(a)は南極棚氷全体、(b)は東南極アメリー棚氷周辺。

適した状況になる。BM と LS の地域相関係数はすべての棚氷で統計的に負であり、LS の流入が棚氷底面融解を抑制していることを示している。

4．現実との比較：東南極アメリー棚氷

上述の南極周極モデルの結果から、夏季棚氷底面融解の経年変動において、南極表層水の変動が重要な役割を担うことが示唆された。しかしながら、これらの関係は数値モデル内で再現されたものであり、実際に南極沿岸域で起こっているのかどうかについてはわからなかった。その原因の一つとして、棚氷前面での南極表層水の海洋観測は、ごく限られた場所でしか報告されておらず、経年変化を捉えている研究例はほとんどないことが挙げられる。そのため、南極表層水と棚氷底面融解の関係の理解は進んでいなかった。そういった状況の中で、Aoki et al.(2022) は東南極域アメリー棚氷一帯において、船舶による夏季直接観測と係留観測による通年観測(2017 年・2019 年)から、棚氷前面の海洋の構造変化とその棚氷融解への影響を調べた。図 4 に示したように、アメリー棚氷周辺海域においても、2016/2017 の夏季の海氷面積は例年より小さく、南極表層水が形成されやすい環境場であった。Aoki et al.(2022)では、一連の海洋観測から、棚氷前面海域で海面水温が非常に高いこと、棚氷融解成分が例年より約 30%高かったことを明らかにした。図 7(Aoki et al.(2022)のプレスリリースより引用)にまとめられているように、夏季に海氷が少ないことにより、太陽放射などにより暖かい南極表層水が大量に形成され、風などの強制力によって棚氷下へ押し込まれると、棚氷底面を融解させるメカニズムが働くこと提示した。また、その影響はアメリー棚氷周辺だけでなく、下流にあるケープダンレーの深層水形成にも影響を与えることも示唆した。彼らが提案した棚氷底面融解メカニズム(図 7)とモデルで同定された棚氷-海氷-沿岸域水塊の関係(図 6b)は同義であり、南極周極モデルで再現されたプロセス(図 6)が実際に南極沿岸域で起こり得るを確認することができた。

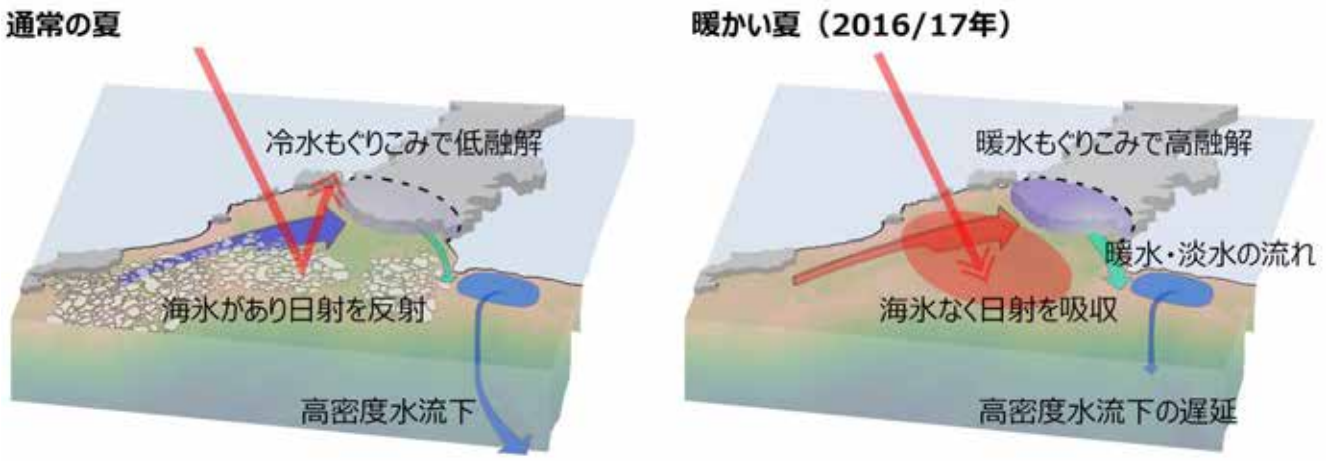


図 7: アメリー棚氷周辺における、通常の夏と暖かい夏の海洋状況の違いを示す模式図。北海道大学低温科学研究所の青木茂さんと小野数也さんから提供。

おわりに

これまで、南大洋周極モデルと高解像度領域モデルを整備・利用して、棚氷-海氷-海洋相互作用に関する研究を実施してきた。今後の展開としては、全球海洋モデルや気候モデルに棚氷要素を導入し、南極氷床の融解水が全球規模の海洋場・気候場に与える影響を研究していく予定である。

最後に、南大洋・南極氷床新学術を振り返ると、阿部彩子さん率いるモデル班の一員として、海洋観測グループとのモデル–観測間(A01-1, A01(公募), B02(公募))の連携に貢献できたと思っています。また、新学術の会議やミーティングを通じて、さまざまな分野の方々と知り合うことができ、科学研究費の応募・獲得などの新たな共同研究にもつながりました。今後も、自身の数値モデリング研究を通じて、日本の南大洋・南極研究の発展に貢献できればと思います。

参考文献

Aoki, S., T. Takahashi, K. Yamazaki, D. Hirano, K. Ono, K. Kusahara, T. Tamura, and G. D. Williams, 2022: Warm surface waters increase Antarctic ice shelf melt and delay dense water formation. *Commun. Earth Environ.*, **3**, https://doi.org/10.1038/s43247-022-00456-z.

Bindschadler, R., and Coauthors, 2011: Getting around Antarctica: New high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International Polar Year. *Cryosphere*, **5**, 569–588, https://doi.org/10.5194/tc-5-569-2011.

Convey, P., and Coauthors, 2009: Antarctic climate change and the environment. *Antarct. Sci.*, **21**, 541, https://doi.org/10.1017/s0954102009990642.

Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597, https://doi.org/10.1002/qj.828.

Depoorter, M. A., J. L. Bamber, J. A. Griggs, J. T. M. Lenaerts, S. R. M. Ligtenberg, M. R. van den Broeke, and G. Moholdt, 2013: Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, **502**, 89–92, https://doi.org/10.1038/nature12567.

Dinniman, M. S., J. M. Klinck, L. S. Bai, D. H. Bromwich, K. M. Hines, and D. M. Holland, 2015: The effect of atmospheric forcing resolution on delivery of ocean heat to the Antarctic floating ice shelves. *J. Clim.*, **28**, 6067–6085, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00374.1.

Fox, A. J., A. Paul, and R. Cooper, 1994: Measured Properties of the Antarctic Ice Sheet Derived from the Scar Antarctic Digital Database. *Polar Rec. (Gr. Brit).*, **30**, 201–206, https://doi.org/10.1017/S0032247400024268.

Hirano, D., and Coauthors, 2020: Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. *Nat. Commun.*, **11**, 4221, https://doi.org/10.1038/s41467-020-17527-4.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press*,.

Jacobs, S. S., and C. F. Giulivi, 2010: Large multidecadal salinity trends near the Pacific–Antarctic continental margin. *J. Clim.*, **23**, 4508–4524, https://doi.org/10.1175/2010JCLI3284.1.

——, H. H. Hellmer, C. S. M. Doake, A. Jenkins, and R. M. Frolich, 1992: Melting of ice shelves and the mass balance of Antarctica. *J. Glaciol.*, **38**, 375–387, https://doi.org/10.1038/228047a0.

Kusahara, K., 2021: Summertime linkage between Antarctic sea-ice extent and ice-shelf basal melting through Antarctic coastal water masses' variability: A circumpolar Southern Ocean model study. *Environ. Res. Lett.*, **16**, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0de0.

——, and H. Hasumi, 2013: Modeling Antarctic ice shelf responses to future climate changes and impacts on the ocean. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **118**, 2454–2475, https://doi.org/10.1002/jgrc.20166.

——, D. Hirano, M. Fujii, A. D. Fraser, and T. Tamura, 2021: Modeling intensive ocean-cryosphere interactions in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Cryosphere*, https://doi.org/10.5194/tc-15-1697-2021.

Liu, Y., J. C. Moore, X. Cheng, R. M. Gladstone, J. N. Bassis, H. Liu, J. Wen, and F. Hui, 2015: Ocean-driven thinning enhances iceberg calving and retreat of Antarctic ice shelves. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, https://doi.org/10.1073/pnas.1415137112.

Noble, T. L., and Coauthors, 2020: The Sensitivity of the Antarctic Ice Sheet to a Changing Climate: Past, Present, and Future. *Rev. Geophys.*, https://doi.org/10.1029/2019RG000663.

Ohashi, Y., M. Yamamoto-Kawai, K. Kusahara, K. Sasaki, and K. I. Ohshima, 2022: Age distribution of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, estimated using chlorofluorocarbon and sulfur hexafluoride. *Sci. Rep.*, **12**, 8462, https://doi.org/10.1038/s41598-022-12109-4.

Rignot, E., S. Jacobs, J. Mouginot, and B. Scheuchl, 2013: Ice-shelf melting around Antarctica. *Science (80-.).*, **341**, 266–270, https://doi.org/10.1126/science.1235798.

Sallée, J.-B., 2018: Southern Ocean Warming. *Oceanography*, **31**, https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.215.

Schmidtko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson, and S. Aoki, 2014: Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, **346**, 1227–1231, https://doi.org/10.1126/science.1256117.

草原和弥, 2018: 棚氷と海洋の相互作用とそのモデリング. 低温科学, **76**, 33–42, https://doi.org/10.14943/lowtemsci.76.33.

気候と氷床のシミュレーションから示される退氷期の気候システムの変動
－スーパー間氷期遷移、現在の南極氷床の存在要因への示唆－

小長谷貴志[1]、阿部彩子[1,2]
[1]東京大学大気海洋研究所,[2]国立極地研究所

A04　南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）（代表：阿部彩子）

１．背景と目的

過去の気候がどのように変化したかを明らかにすることは、地球史の謎を解明することと、地球の気候の形成と変動を理解して将来の気候変化への示唆を得ることにつながります。本研究では、氷期から間氷期への遷移期（退氷期）に着目しました。退氷期は、寒冷な氷期から温暖な間氷期に移行する時期のことを指し、北半球の大陸を覆っていた氷床が後退し全球的な温暖化が生じた時代です。退氷期の気候変化の特徴の 1 つは、大西洋深層循環の変化を通した急激な気候変化が途中に生じているところにあります。大気海洋の流れの変化を通して、全球的に大きな気候影響を生じます。

このような急激な気候変化は直近の退氷期には複数回ありましたが、1 つ前の退氷期では 1 回のみだったことが分かっており、この違いが何によってもたらされたのかが示されていませんでした。過去 2 回の退氷期では、急激な気候変化に違いがみられることが知られています。この急激な気候変化は大西洋深層循環の変化によるもので、大気海洋の流れの変化を通して全球的に大きな気候影響を生じます。最終退氷期（2 万年前～1 万年前）には 3 回の急激な気候変化が生じたのですが（図 1 左側の C、赤線）、それと比べ 1 つ前の退氷期（14 万年前～13 万年前）は 1 度しか生じませんでした。また、南極の気温にも違いがみられ、1 つ前の退氷期は最終退氷期に比べて南極の気温の最大値が大きい特徴を持っています（図 1 左側 D 赤線）。この 1 つ前の退氷期の直後の時代は最終間氷期（13～11.5 万年前）とよばれる時代です。最終間氷期は海水準が現在より 6-9 メートル程度高く、現在の間氷期より氷床が縮小したスーパー間氷期の 1 つと考えられています。退氷期の気候システム変動の理解は、その後に生じた間氷期の気候形成にも示唆を与えると考えられます。この 2 つの退氷期の違いについて、1 つ前の退氷期については海水準の上昇速度が速かったことから北半球氷床が速く融解し、大西洋深層循環を弱くさせるメカニズムが提案されていましたが、2 つの退氷期の両方に説明を与えた研究がまだありませんでした。

２．方法

本研究では、大気海洋結合モデルと、北半球の氷床の形状分布を計算する氷床モデルでそれぞれ退氷期の古気候実験を行いました。近年、気候モデルを用いた退氷期実験が国内外の複数の気候モデルで行われるようになってきましたが、このうち本研究で使用する気候モデル（MIROC4m）では最終退氷期についての実験から、最終退氷期の中ごろに生じた急激な海洋深層循環の強化することを示しました(Obase and Abe-Ouchi 2019)。これは、退氷期の温暖化が海洋深層循環の安定性を変えるために、氷床からの淡水量の減少がなくても海洋深層循環の強化が生じるものです。退氷期の全球気温上昇は、主に大気中 CO2 の増加、地球軌道要素の変化、北大西洋への淡水流入による大西洋深層循環に影響を受けます。現実にはこれらのすべてが 2 つの退氷期で多少異なるのですが、本研究では淡水の影響を取り出して議論することを容易にするために、淡水のみを変える設定で実験しました（図 1）。

次に、この北半球氷床の融解が何で決まっているかを検討するために北半球氷床モデル実験を行いました。このモデルは、地球の軌道要素と大気中 CO2 を境界値として、氷床上の降雪量と表面融解量を経て達成される氷床の厚さ分布と流れの時間発展を計算するモデルです(Abe-Ouchi et al. 2013)。このモデル実験では過去 40 万年の氷期サイクルの再現に成功しており、1 つ前の退氷期の氷床縮小速度が速くなる結果は得られていましたが、今回の実験ではその要因について掘り下げるために、軌道要素の中の公転軌道離心率を 1 つ前の退氷期のものに変更する実験を行いました。

3．成果

気候モデル実験の結果は、1 つ前の退氷期のように淡水流入量が 1.5 倍程度多いと大西洋深層循環が弱い状態を継続し、急激な気候変化が退氷期の終わりに 1 度しか起きない結果が得られました（図 1C、赤線）。これは、退氷期の後半に大きくなった北半球氷床の融解の重要性を示唆する結果です。また、2 つの退氷期の後半期の海面水温・地表気温を比較すると、地質記録に見える北大西洋の寒冷な気候、南極域の温暖な気候の特徴が、淡水流入量のみが異なる 2 つの退氷期実験の違いによっても生じることが分かります（図 2）。この温暖な状態は海面だけでなく、南極沿岸の海洋亜表層深度にもみられることから（図 3）、棚氷がより融解しやすい気候状態と考えられます。

北半球氷床モデル実験の結果は、北半球氷床の縮小速度が特に退氷期の後半期に速くなり、標準実験と 1.5 倍程度の差が生じる結果が得られました。これは、軌道離心率が大きいと退氷期の後半に北半球夏季の日射量と気温が高くなり、氷床の表面融解が促進されるためです。全球気候モデルと北半球氷床モデルによる実験を組み合わせて考えると、過去 2 つの退氷期の地球軌道要素の小さな違いが氷床・大西洋深層循環という気候システムの応答を通して、急激な気候変化、さらには南極の気温の違いを引き起こしたことが示唆されます。本研究では南極氷床の計算は行いませんでしたが、温暖な海洋と大気の状態は南極氷床の縮小に寄与することが予想されます。そう考えると、最終間氷期の温暖化はその前の氷期以降の過渡的応答によって形成されていたことを示唆するといえます。このような気候の過渡的応答が役割を持つのは、北半球の氷床後退・大西洋深層循環が比較的長い時間（～数千年）をかけて応答する性質があるからです。退氷期の気候システムの相互作用によって、急激な気候変化を含む大気海洋・北半球氷床の変動が形成され、その後の間氷期の形成にも寄与していることが示唆されます。

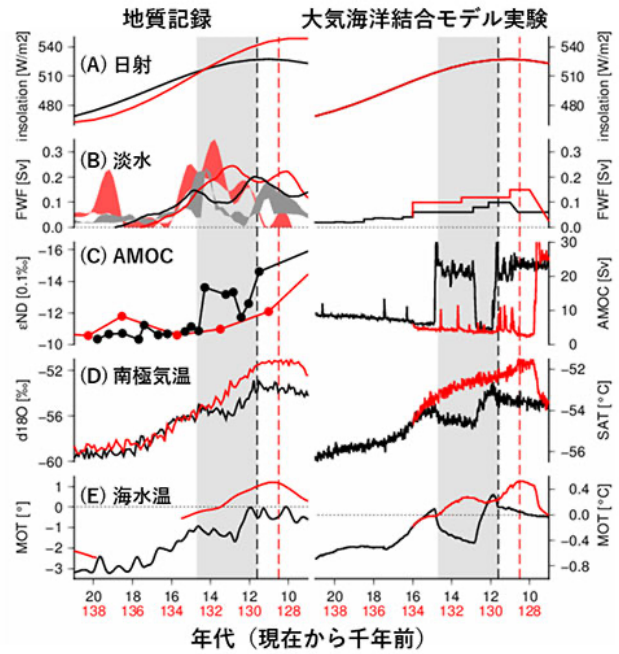
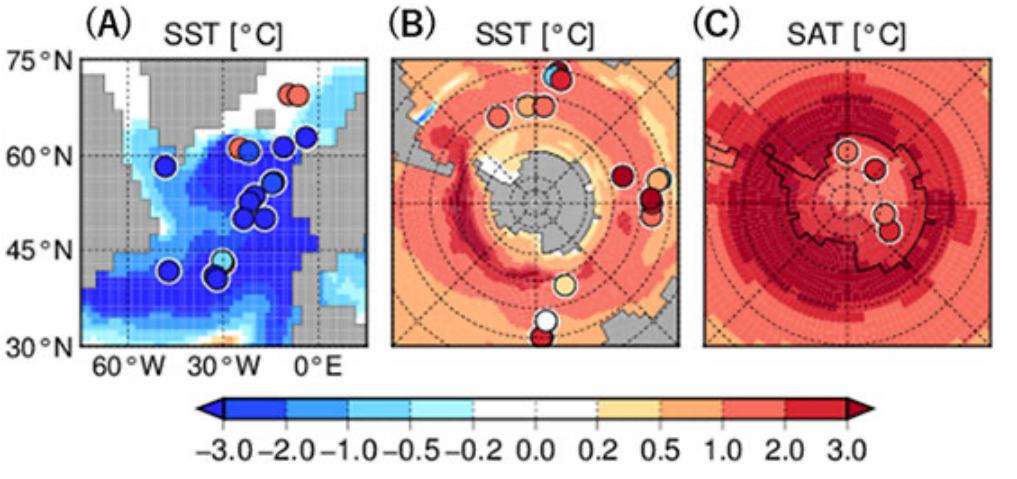


図 1：2 つの退氷期（赤，黒）の大気海洋結合モデル実験（右）と地質記録（左）を比較した図。
A と B がモデル実験設定に対応、C から E がモデル実験の結果に対応し、AMOC（大西洋深層循環）の強弱の変動について、赤で示した実験では 12.8 万年ごろまで弱い状態を継続する特徴を表現している。(D) (E) の南極気温と全球平均した海水温について、いずれも 12.8 万年ごろまで温度上昇を続けるという特徴を再現している。一方、黒で示した実験では、AMOC が強弱を 1 回振動し、AMOC の強化が海洋の熱輸送を通して南極気温の低下を生じています。図の灰色の塗りつぶしで示した時期は、地質記録に基づいた AMOC の強弱の 1 周期、赤・黒の点線で示した時刻はそれぞれの間氷期の開始時期を示している。



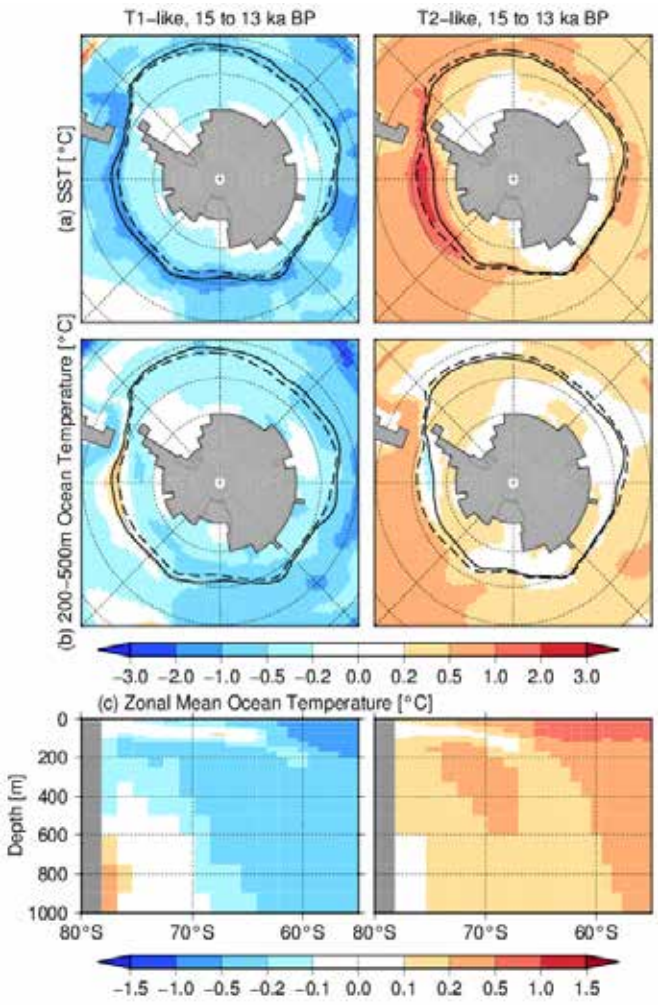


図 2：モデルで計算された 13.1 万年前(131ka)の時刻における(A)北大西洋の海面水温、（B）南極域の海面水温、（C）南極域の地表気温（1.3 万年前の間氷期からの差）を、地質記録による復元値（丸）と比較したもの。
地質記録の大勢に見える北大西洋の寒冷な気候、南極域の温暖な気候の特徴がモデルで表現されている。

図 3：モデルで計算された，退氷期後半期 1.5 万年前から 1.3 万年前にかけての南極域の海洋温度変化の違い。(a)海面水温，(b)500m 深度水温，(c)東西平均海水温を示し，(a)(b)の点線/実線が 1.5/1.3 万年前の冬季海氷縁を示す。
最終退氷期(T1-like)では大西洋深層循環の強化によって南極域の寒冷化が起きるが，1 つ前の退氷期では同時期に温暖化し，冬季海氷縁の後退・亜表層水温の上昇が生じていることを示す。

4．領域内連携に関連して

本研究の退氷期実験が可能になったのは、2015 年に海洋研究開発機構の大型計算機地球シミュレータが第 3 世代に更新されて計算速度が速くなったことに加えて、それ以前の地球シミュレータ 2 で行われた、氷期・中氷期の定常実験と海洋深層循環の安定性を系統的に調査した実験の蓄積があったこと(一部が Kawamura et al. 2017 に含まれる)の寄与がありました。大西洋深層循環は気候の温暖さ、氷床からの融解水の 2 要素から影響を受け、退氷期ではこの 2 要素が複雑に時間発展するのですが、系統的な実験から気候モデルの応答特性がある程度把握できていたことが、現実の退氷期実験をするにあたっての成功見込みに寄与していました。

本成果の退氷期実験では、大西洋深層循環の変動が、おおむね正しいタイミングで起こることが必要になりますが、これは必ずしも正しい復元値（地球の軌道要素・大気中 CO2・氷床）を入れて再現に成功する性質のものではありません。これは、ある種のモデルのバイアスなどによって気候モデルが正しい応答を正しい条件で再現するわけではないこと、いくつかの復元データに不確実性があること（たとえば、氷床分布、氷床からの融解水）から来ています。退氷期の気候モデル実験は他国の気候モデルでもなされています。退氷期実験の気候モデル比較の共同研究を現在進めているところですが、氷床他の気候復元と大西洋深層循環の変動とを整合させる点は、各国のモデルで共通して残っている問題です。

つまりは、気候モデルがすべてを再現できることはまずなく、明らかにしたい気候形成の仮説に対して、何らかの簡略化をしたうえで議論に必要な精度を要求することが必要になってきます。本研究成果の退氷期実験に関しては、氷床分布・陸面の植生・海陸分布を氷期に固定した点が、現実の退氷期を簡略化した点といえます。これらの簡略化をしたことで、大西洋深層循環の変動が気候形成に与える影響を抽出したといえますし、気候モデルと北半球氷床モデルの実験を別々に行った点も大きな簡略化です。今後、軌道要素が退氷期の気候システムの変動に与える影響の議論の精度を向上するためには、気候―氷床結合系のモデルが必要になると考えますが、そのためにはモデル自体の構築や改良とともに、実験および解析手法の構築に時間をかけて取り組んでいく必要があると改めて考える次第です。

古気候モデル研究にしばしば共通する 1 つの目的は、地質記録で示されるような過去の気候状態をモデルが再現できるかどうか検証する点ですが、本研究で行った退氷期実験はとりわけ現実の時系列データ（アイスコア、海底堆積物他）と比べられます。本研究も新学術他班の研究・これまでの研究（Kawamura et al. 2017）のデータを使用しているわけですが、このような地質記録データ側との議論は本新学術以前から、たとえば地球惑星科学連合大会での「南大洋・南極氷床」セッションは 10 年近く続いているように、手法の垣根を越えて議論する環境の蓄積があったことは大きいと考えています。

本研究成果に関わるモデルとデータの比較に関して、1 つ前の退氷期実験では、最後の最終間氷期に入った直後に南極の気温が寒冷化する結果を示しています。モデルの結果は大西洋深層循環の強化から 200 年程度で寒冷化が始まるのですが、アイスコアのデータは北大西洋深層循環が強まってからも 2000 年程度温暖な状態を維持しており一致していなかったのはかねてより気にかけていた点でした（図 1）。ところがこれに関して、Oyabu et al. (2021)はドームふじアイスコアの年代の不確実性を改善した結果、この最終間氷期の時期においては、実際の年代に対するアイスコアの年代が従来の年代スケールよりも 1000 年程度古いと考えられることを示しました。この結果をもとに図 1 を作成しなおすと、最終間氷期の南極気温変化についてのモデルとデータの不一致を解消する方向にはたらくことを意味します。

本研究の退氷期の気候モデル実験結果は、本新学術領域を中心に他でも使用されています。最終退氷期の実験は南極氷床後退史を復元した研究（Suganuma et al. 2022）の図 7 に使われ、完新世に入って以降にも東南極ドローニングモードランドの大きな氷床後退が生じたメカニズムの議論に使われました。そのほかにも退氷期の実験結果は、海洋物質循環モデルを用いて退氷期の大気中 CO2 濃度の変動を調べるモデル研究、南極域領域海洋モデルを用いて退氷期の南極域海洋循環・棚氷の融解を調べる研究にデータを提供しており、共同研究をすすめているところです。

謝辞

本研究は，新学術領域研究「南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング」（代表：阿部彩子），文部科学省科研費基盤研究（S）「過去の大規模な気候変動における氷床・海洋・大気の相互作用の解明」（代表：阿部彩子），文部科学省二国間交流事業「過去の温暖期の気候と氷床のモデル比較研究」（代表：小長谷貴志）からの助成を受けています。大気海洋結合モデルと北半球氷床モデルによる計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータ 3 を使用し，計算機資源は公募課題「古環境研究および気候将来予測に資する気候数値実験」（代表：阿部彩子）を利用しました。

参考文献

Obase, T., A. Abe-Ouchi, F. Saito (2021) Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with

different Northern ice sheet discharge and insolation, Scientific Reports, 11

Obase, T., A. Abe-Ouchi (2019), Abrupt Bolling-Allerod warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation, Geophysical Research Letters

Suganuma, Y., and others (2022): Regional sea-level highstand triggered Holocene ice sheet thinning across coastal Dronning Maud Land, East Antarctica. Communications Earth and Environment 3, 273 (2022).

Oyabu, I., and others (2021): Fractionation of O2/N2 and Ar/N2 in the Antarctic ice sheet during bubble formation and bubble–clathrate hydrate transition from precise gas measurements of the Dome Fuji ice core, The Cryosphere, 15, 5529–5555

Kawamura, K. et al. (2017), State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, Science Advances, 3(2), doi:10.1126/sciadv.1600446.

プレスリリース：気候と氷床のシミュレーションから示される退氷期の気候システムの変動 ―北半球氷床と大西洋深層循環を通した急激な気候変化―（2021 年 11 月 25 日　東京大学 大気海洋研究所，海洋研究開発機構）https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2021/20211125.html

研究トピックス：氷期から間氷期への遷移期の温暖化によって生じた急激な気候の変化（2019 年 11 月 1 日 東京大学 大気海洋研究所）https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/topics/2019/20191101.html

三千年紀の南極氷床の将来変動

Ralf Greve[1]、齋藤冬樹[2]
[1]北海道大学低温科学研究所、[2]海洋研究開発機構

A04　南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）（代表：阿部彩子）

１．背景

地球温暖化に伴う環境変化が広く社会的な関心事であるが、その中でも最も注目されているものの一つが地球の氷床・氷河の縮小などで起こる海面水位の上昇である。したがって将来の気候変動の様々な経路シナリオを考え、それが氷床・氷河の変化に起因する海面水位の変化にどのような影響を及ぼすかを理解することが重要な課題である。

ISMIP6(Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6)は、最新の様々な氷床モデルを使い、温暖化が南極とグリーンランドの氷床に及ぼす影響を評価する国際プロジェクトである。同プロジェクトは気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が最近発表した第６次評価報告書に対して研究結果の提供を行った（https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/）。現在の南極氷床全体で海面水位に換算すると 58 メートル上昇させる体積があるが、温暖化の進化という悲観的なシナリオ（「RCP8.5」や「SSP5-8.5」）では、2100 年までの海面水位の変化は「7.8 センチの下降」から「30.0 センチの上昇」の幅で予測されたことが重要な成果である。一方、排出量削減という楽観的なシナリオ(「RCP2.6」や「SSP1-2.6」)では、０から３センチの範囲の上昇が予測されている。21 世紀の全体像はその符号も含めて不確実なままであり、予測が「氷床体積の大規模な消失」から「氷床体積の微増」まで大きく分かれている。この不確実性の要因は「氷床体積を減少させる原因になる、棚氷の融解の増加」と「氷床体積を増加させる原因となる、氷床上の降水量の増加」という相殺過程のためである。

２．手法

本研究では計算期間を ISMIP6 の求める期間からさらに延長し、21 世紀以降も温暖化が進んだ場合の南極氷床について長期的な見通しを調べた。北海道大学を中心に開発されている氷床数値モデル SICOPOLIS (http://www.sicopolis.net)を使用し、ISMIP6 で行った温暖化シナリオでの１４の数値実験、排出量削減シナリオでの３つの数値実験のそれぞれの将来予想を西暦 3000 年まで期間を延長して再現実験を行った。2100 年までの設定は ISMIP6 で行った実験と同様で、2100 年以降は、さらに温暖化が進行する状況は考慮せず 21 世紀後期と同様の気候が続くと仮定した。実験結果から、氷床全体の体積の変化や、西南極、東南極、南極半島での地域ごとの体積変化のほか、表面質量収支、底面質量収支、氷崖におけるカービング（氷山分離）など、体積変化をもたらす要因を分析した。

３．結果

図に表されているように、西暦 2100 年から 3000 年にかけての南極の氷床体積の減少の予想は、２１世紀の 100 年間（ISMIP6 の予想期間）と比べて、大きく異なった状況を示すことが本研究の実験結果から明らかとなった。また、温暖化進行と排出量削減の経路シナリオへの応答に明白な差がある。3000 年までに、温暖化進行のシナリオでは海面水位換算で 3.5（1.5 から 5.4）メートルもの上昇があり、一方排出量削減シナリオでは 0.25（0.13 から 0.32）メートルの上昇にとどまっている。この結果は、21 世紀の気候変動が及ぼす南極氷床への影響は、同世紀だけにとどまらず、海面水位が数メートル上昇するという最悪の結果が見られるとしたら 21 世紀以降だということを示している。今後数十年における効果的な地球温暖化対策は、このような長期間にわたり醸成されていく惨事を防ぐために重要であることが示唆される。

実験で再現された温暖化進行シナリオにおける氷床の減少の主な理由は、西南極での氷床の縮小である。過去数十年にわたって、この可能性は科学文献で論じられてきた。これは、西南極氷床の下の陸地が多くの場合、海水準より低い高度にあることがそもそもの要因である。温められた海水により、周辺の棚氷の底面融解が増え、その結果、氷の流出が抑制できなくなり、氷床縮小を引き起こすきっかけとなる

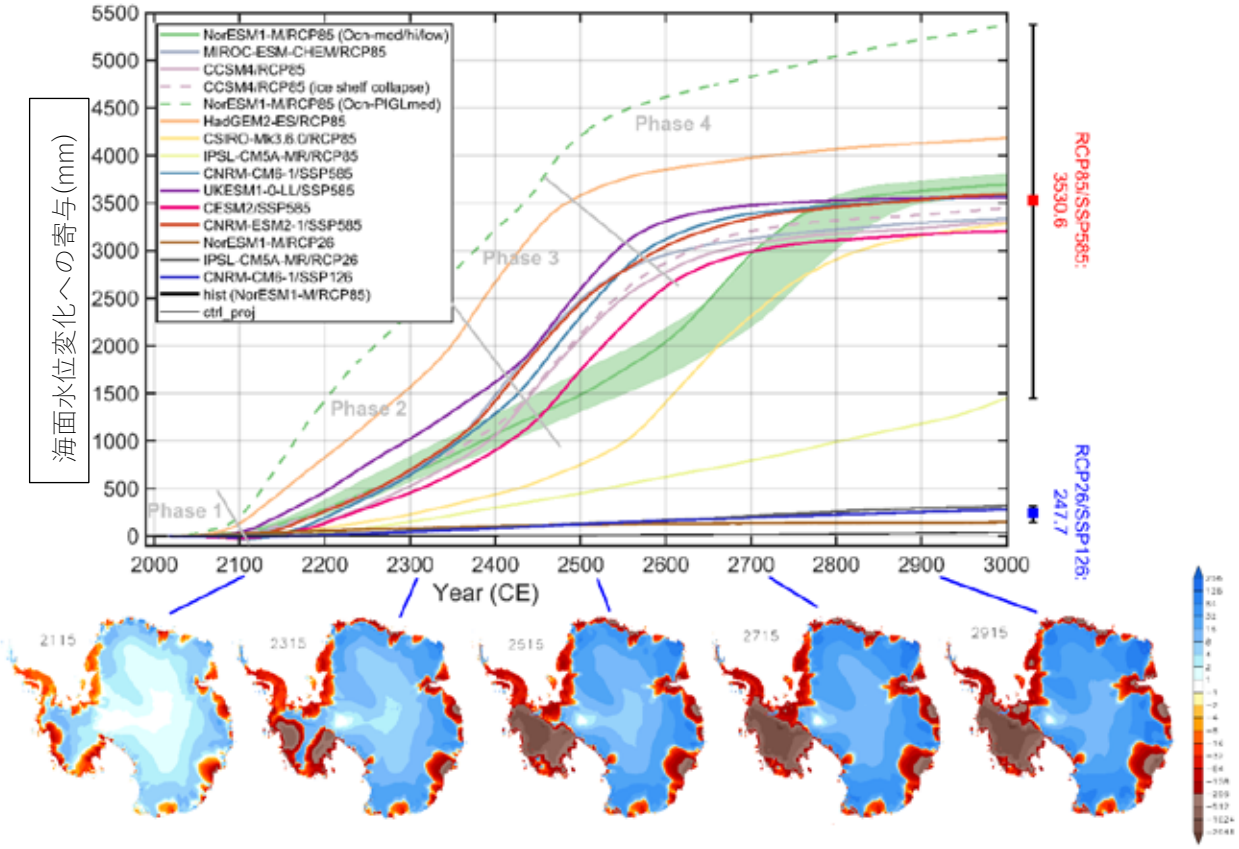
と考えらえる。ある実験例での地図で表された氷の高低差の経過によると、数世紀内に西南極でほぼ完全な退氷状態になる。一方東南極は比較的影響は少なく、逆に降水量が増えることで氷床内部は厚くなることを示している。

4．今後の課題

本研究の結果は、21 世紀後期の気候がその後も変化なく続くとの仮定に基づく。また、氷床モデルは 1 つ（SICOPOLIS）のみが用いられている。ISMIP6 関係者間の国際協力で、より現実に近いシナリオで 2100 年以降の予測を行うことが計画されており、この研究では、「温暖化の継続や広範化」（悲観的なシナリオ）から「21 世紀の行き過ぎた排出量を是正する削減」（楽観的なシナリオ）まで、全ての経路シナリオが含まれる。異なる氷床モデルを使った包括的な予測実験により、的確な不確実性評価を含む、長期的に予想される地球の氷床の損失についてより詳細な姿を示すことができると期待される。

参考文献

Chambers, C., Greve, R., Obase, T., Saito, F., & Abe-Ouchi, A. Mass loss of the Antarctic ice sheet until the year 3000 under a sustained late-21st-century climate. *Journal of Glaciology*, **68**(269), 605-617. doi:10.1017/jog.2021.124, 2022.



1990 年から 3000 年までの南極氷床の体積減少予測を「海面水位変化への寄与」換算で示す。実線や点線は、温暖化進行シナリオ（RCP8.5、SSP5-8.5）における 1 4 の数値実験と、排出削減シナリオの 3 つの数値実験（RCP2.6、SSP1-2.6）、1990 年から 2015 年における実際のデータ（hist）、1995 年から 2014 年の間は気候変化がないと仮定した対照実験（ctrl_proj）を表す。右にある赤と青の四角は、それぞれ RCP8.5/SSP5-8.5 と RCP2.6/SSP1-2.6 の平均値を示す。四角から延びている線は、寄与の範囲を示す。フェーズ 1 は ISMIP6 で予測された 2100 までの期間。フェーズ 2～4 は RCP8.5/SSP5-8.5 の温暖化シナリオの期間で、氷体積の減少の加速（フェーズ 2）、西南極氷床の不安定化（フェーズ 3）、

最後のフェーズ 4 では、氷体積の減少が横ばいになることが示されている。その下に、MIROC-ESM-CHEM/RCP8.5 で予測した、2015 年と比較した氷表面の高低差を年代ごとに地図上で示している。(メートルで表記。青は氷が厚くなっていることを示し、赤・茶は薄くなっていることを示す)

海洋炭素循環モデルによる氷期の大気中 CO_2 低下メカニズムの解明

小林英貴[1,2]、岡顕[1]
[1]東京大学大気海洋研究所、[2]富山大学

A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）（代表：阿部彩子）

1．背景と目的

1－1．研究の背景

およそ 258 万年前から現在にかけての第四紀と呼ばれる時代は、寒冷な氷期と温暖な間氷期が交互に繰り返す「氷期-間氷期サイクル」と呼ばれる気候変動で特徴づけられ、気候変動に伴い大気中の二酸化炭素濃度も周期的に変動していました。大気中二酸化炭素濃度は、約 2 万年前の現代に最も近い氷期の最盛期である最終氷期最盛期（LGM）において、現代の産業革命前と比べて 90 ppm 程度も低かったことが、氷床コア記録の分析から明らかにされています。氷期は現代と比べて寒冷で乾燥した気候で、陸域の炭素貯留は減少していたと推測されます。そのため氷期においては、海洋により多くの炭素が取り込まれていたと認識されています。海洋の炭素循環は、大気と海洋との間の二酸化炭素のガス交換と二酸化炭素の溶解、植物プランクトンの光合成に伴い生成される有機物を介した炭素の表層から深層への鉛直輸送（生物ポンプ）、1000 年の時間スケールで全地球海洋を巡る海洋深層循環、海水の炭酸水素塩収支を保つ堆積物中の炭酸塩の反応などのプロセスによって支配されています。間氷期と氷期との間ではそれらのプロセスに変化があり、氷期には炭素が大気から海洋へと取り込まれることで、大気中二酸化炭素濃度が低下したと認識されています。しかしながら、海洋炭素循環過程を組み込んだ 3 次元海洋モデルを用いた数値研究では、海洋炭素循環の変化に伴う氷期の大気中二酸化炭素濃度の低下の振幅を十分に再現することが困難でした。また、それぞれの過程がどの程度の寄与を持つのかについても、明確な答えは出ていませんでした。

モデリング研究だけでなく、海底堆積物や氷床コアといった地質学的記録を分析することで、過去の海洋環境についての手がかりを得ることができます。最終氷期最盛期の南大洋の深層水は、高い塩分および古い水塊年代（低い放射性炭素の自然存在量）で特徴づけられることや、南アメリカ大陸のパタゴニアから南大洋への微量元素である鉄の供給が、生物生産性を向上させていた可能性が指摘されています。

1－2．目的

本研究では、古海洋環境復元で報告された南大洋の環境変化に着目し、数値モデルを用いた実験により、その環境変化が海洋炭素循環に与える影響を定量的に評価しました。具体的には、従来の研究で十分に考慮されていなかった、南大洋における塩分成層の強化、（氷河性）ダスト起源の鉄供給の増加、炭酸塩堆積過程を海洋モデルに導入し、氷期モデル実験で古海洋地質記録が示す LGM 南大洋の特徴が再現されるかどうかについて、数値実験結果を復元された海水の特性と比較して議論し、プロセスの妥当性を確認しました。また、南大洋の環境変化が、海洋炭素循環の変化を介して大気中二酸化炭素濃度にどの程度影響するのかを調べました。

2．方法

2－1．モデルと実験設定

本研究では、地球温暖化予測にも使用される気候モデル（MIROC）の海洋部分を構成する海洋大循環モデル（COCO）に、炭素循環モデルと自ら作成した海洋堆積物モデルを結合したモデルを用いて、最終氷期最盛期と産業革命前の現代についての数値モデル実験を行いました。現代ならびに最終氷期最

盛期における日射量、温室効果ガス、氷床分布の条件をそれぞれ設定し、各気候ならびに海洋炭素循環の計算を行いました。また、モデルの改良と新たなプロセスの導入として、従来の氷期海洋に関する研究で十分に考慮されていなかった、南大洋における塩分成層の強化、（氷河性）ダスト起源の鉄供給の増加（鉄肥沃化）、炭酸塩堆積過程を考慮した実験を行いました。

２－２．内容

はじめに、最終氷期最盛期の気候条件の下で最終氷期最盛期の再現実験を実施しました（氷期標準実験）。しかしながら、実験で得られた大気中二酸化炭素濃度の低下幅は 40 ppm 弱にとどまり、先行研究と同様に現実の変化量を十分には再現できませんでした（図 2 の氷期標準実験）。一方、南大洋の塩分成層の強化と氷河性ダスト起源の鉄肥沃化の効果を考慮した実験では、海洋深層の炭素貯留が現代実験から顕著に増加しました。さらに、1 万年程度の長い時間スケールをもつ炭酸塩堆積物の埋没量変化に伴うアルカリ度（海洋の酸緩衝能）の上昇を含めると、氷期の海洋炭素循環の変化による大気中二酸化炭素濃度の変化はおよそ 77 ppm となり、既往研究と比べても最も現実的に氷床コア記録が示す変動（約 90 ppm）を再現することができました（図 1; 図 2 の氷期改良実験）。

次に、大気中二酸化炭素濃度の変化に対する諸過程の寄与を切り分けて調べました。塩分成層の強化で、より多くの炭素を保持する海洋深層と表層との炭素の交換が減少し、深層に炭素が隔離されます。また、鉄肥沃化で亜南極域において植物プランクトンの生物生産が増えることで、より多くの炭素が深層に輸送されます。これらは、どちらも氷期に海洋深層の全炭酸濃度を上げる、つまり大気中二酸化炭素濃度を下げる方向にはたらきました。さらに、深層の全炭酸濃度が上がると、海底炭酸塩堆積物の溶解が促進されます。これは、海洋炭酸系の均衡を変えることで、海洋全体のアルカリ度を上昇させます。アルカリ度の上昇で、海洋はさらに二酸化炭素を吸収できるため、最終的に大気中二酸化炭素濃度が大きく低下しました。この炭酸塩補償と呼ばれる炭酸塩堆積物フィードバックは、南大洋の成層強化と鉄肥沃化を考慮すると、増幅されることもわかりました（図 2）。

本研究では、海洋炭素循環にかかわる性質の異なる化学トレーサーである、溶存酸素、安定炭素同位体比（$\delta^{13}C$）、放射性炭素同位体（^{14}C）年代もモデルで計算しました。海底堆積物コア記録から復元された、貧酸素、軽い $\delta^{13}C$、古い ^{14}C 年代で特徴づけられる南大洋深層の分布は、塩分成層の強化と鉄肥沃化の効果を適切に考慮することで、従来のモデル計算に比べて現実的に再現できることがわかりました。この結果は、今回のモデル実験が再現した海洋炭素循環場の妥当性を支持しています（図 3）。以上の研究成果は原著論文として出版し、プレスリリースにて報告しています（南大洋が鍵を握る氷期の大気中二酸化炭素濃度変化、2021 年 8 月 26 日、東京大学）。

本研究の発展にあたっては、新学術領域研究の領域内から実観測に基づく広範な意見をいただいたことが大変有益でした。実際の南極周辺の深層水形成過程の描像と、モデル内での表現との違いについて、実際の物理的な観測に基づく指摘をいただくことができました。また、南極氷床コア記録や堆積物コア記録から取得される過去の気候変動の指標と、それに基づき検討されているシナリオについての知見の共有していただきました。今後さらに必要となる連携として、実際の観測的記録とモデリングの結果を突き合せたより密接な議論が挙げられる。

３．成果

約 2 万年前の最終氷期最盛期における大気中二酸化炭素濃度を、海洋炭素循環モデルシミュレーションにより再現することに成功しました。

氷期の南大洋における塩分成層の強化と表層海洋の鉄肥沃化が炭酸塩補償を増幅し、海洋への炭素貯留の増加に大きく寄与することを明らかにしました。

最終氷期最盛期における大気中二酸化炭素濃度を再現するうえで南大洋が重要となることを明らかにし、氷期-間氷期スケールの海洋炭素循環の変動メカニズムの理解に貢献しました。

４．領域内連携

・底層水班との連携

南極底層水の実観測と数値モデルにおける深層水形成過程の表現についての議論。

・古海洋班との連携

南大洋における堆積物コア記録から得られる過去の気候変動の指標や、関連した研究についての情報の共有。著者の研究航海への参加。

・生態系班との連携

南極海の海氷が生態系に及ぼす影響の議論。衛星観測に基づく生物生産性の推定手法についての情報の共有。

・氷床班との連携

南極氷床コア記録から取得される過去の気候変動の指標や、関連した研究についての情報の共有。

・モデル班との連携

モデル実験の設定と実験結果の解釈についての議論。気候モデルならびに大気ダスト輸送モデルの出力の共有。

5．今後の課題

近年、人為起源二酸化炭素の排出に起因して、大気中二酸化酸素濃度が上昇しています。一方で、氷期－間氷期における大気中二酸化炭素濃度の変動は、自然の変動により生じていました。過去の気候変動の仕組みを調べ、その根底にある普遍的な仕組みを理解することは、将来の気候変動に対するより確かな知見につながるという意味でも重要です。本研究により、最終氷期最盛期において、南大洋の環境変化に伴う海洋炭素循環の変化が、海洋深層の炭素貯留を増やし、大気中二酸化炭素濃度の低下に大きく寄与しうることがわかりました。このような海洋深層を含む変化は、数千年以上の長い時間スケールの気候変動を考える上で重要です。今回の実験は、すべてのプロセスが十分に長い時間をかけて応答した結果を再現する定常計算を行いましたが、実際に重要となるプロセスは時間スケールにより変わります。今後は、氷期から現在にかけての気候遷移期における炭素循環の再現実験など、時間スケールに応じた海洋炭素循環の過渡応答を評価する研究を進めていく予定で、気候変動と炭素循環との関わりについてのさらなる理解につなげていきたいと考えています。

参考文献

Kobayashi, H., and A. Oka, Response of atmospheric pCO2 to glacial changes in the Southern Ocean amplified by carbonate compensation, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, **33**, 1206-1229, 2018.

Kobayashi, H., A. Oka, A. Yamamoto, and A. Abe-Ouchi, Glacial carbon cycle changes by Southern Ocean processes with sedimentary amplification, *Science Advances*, **7**, eabg7723, 2021.

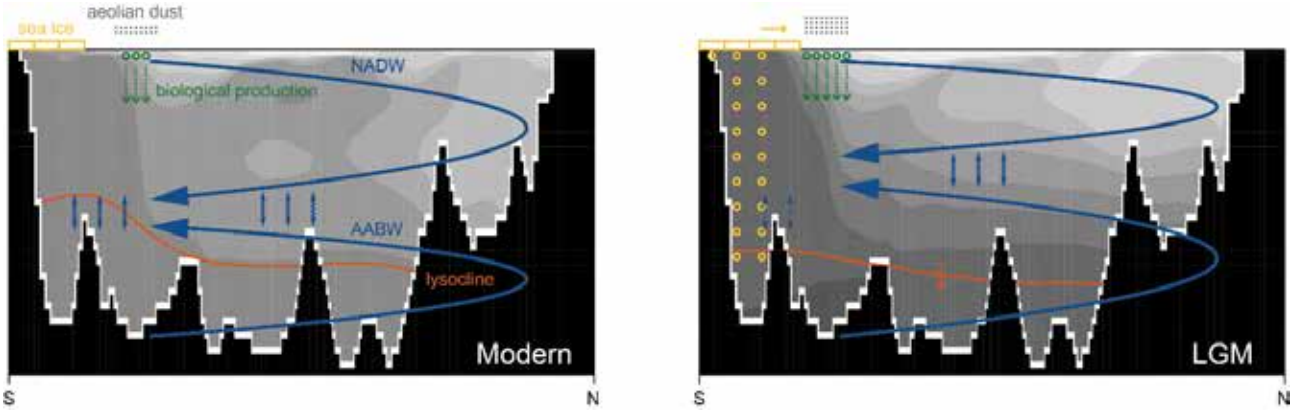


図 1. 本研究で検討した現代（Modern）および最終氷期最盛期（LGM）における深層海洋循環、南大洋の海氷の範囲（sea ice）、風送ダスト沈着量（aeolian dust）、生物生産（biological production）、リソクライン（lysocline: 炭酸塩堆積物が急激に溶解し始める深度）の違いを示す模式図。大西洋子午面循環は、大西洋表層を北上して北大西洋深層水（NADW: North Atlantic Deep Water）が深層に沈み込む上部セルと、南極大陸周辺で南極底層水（AABW: Antarctic Bottom Water）が沈み込む下部セルで構成されます。堆積物コア記録から、氷期には現代を含む間氷期に比べて上部セルが浅くなっていたことが示唆されています。氷期の南大洋においては、海氷の張り出しの拡大と、深層の高塩化が生じており、海氷生成の増加とそれに伴う高塩分水（ブライン）排出が関連していると考えられます。また、氷河性を含む風送ダスト沈着量の増加は、海面に鉄を供給することで、植物プランクトンの生産性を向上させていたと考えられます。海洋深層の全炭酸濃度が増加することで炭酸塩の飽和度が低下し、炭酸塩堆積物が溶解する深度が浅くなります。

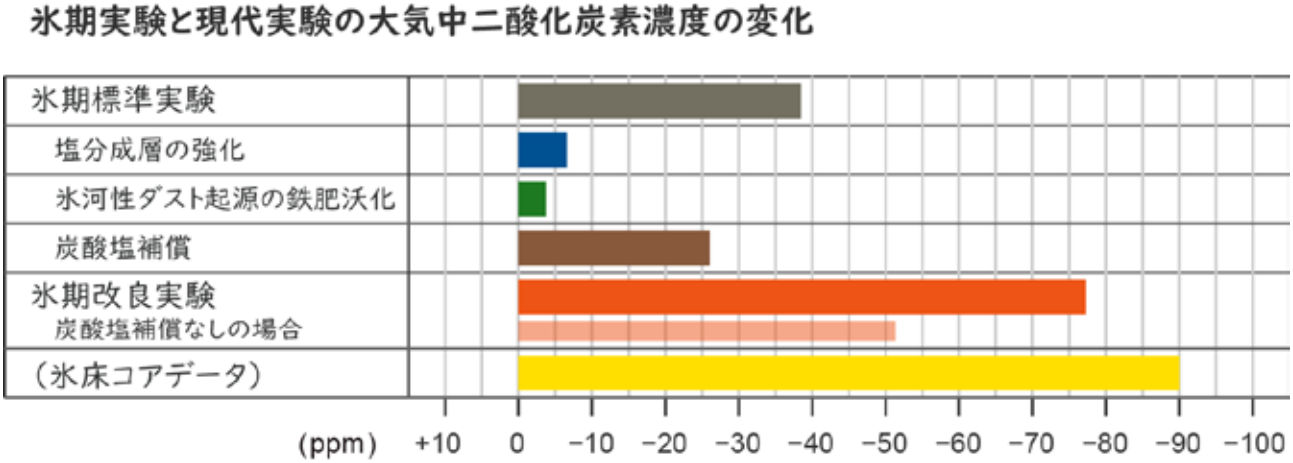


図 2. 本研究で見積もった、現代と氷期との間の大気中二酸化炭素濃度の変化に対する諸過程の寄与。最終氷期最盛期（LGM）の気候下で検討したすべての過程を含む氷期改良実験における変化（橙色）は、氷床コア記録（黄色）をおおよそ再現しています。従来の氷期実験の結果（灰色）と、南大洋の塩分成層の強化（青色）、氷河性ダストによる鉄肥沃化（緑色）、炭酸塩補償（茶色）の寄与を切り分けた結果を同時に示しています。

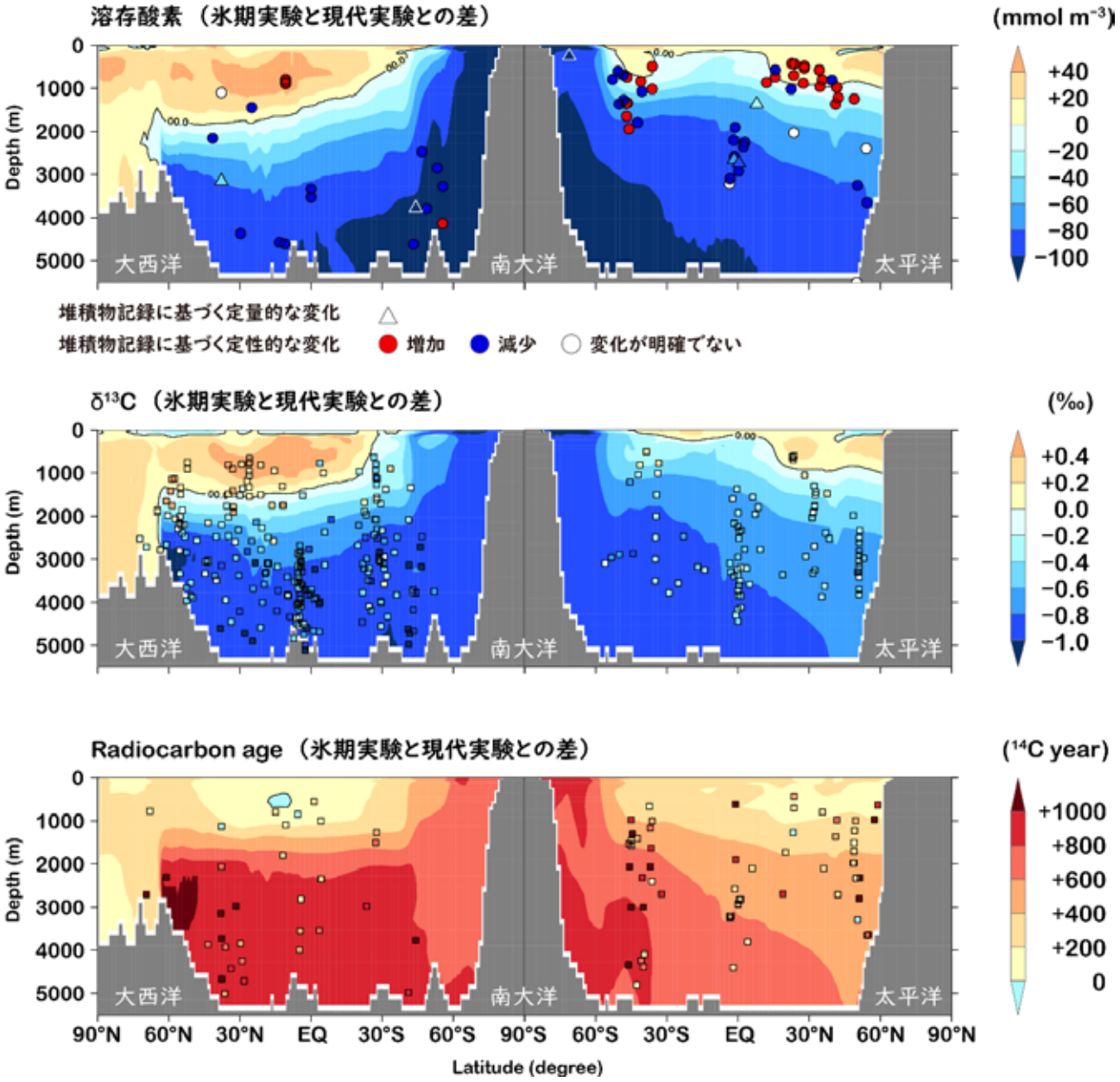


図 3. 溶存酸素（mmol m^{-3}）、$\delta^{13}C$ (‰)、^{14}C 年代 (^{14}C 年)について、本研究で検討したすべての過程を含む氷期実験と現代実験との変化を、大西洋と太平洋で東西平均した鉛直断面図。海底堆積物コア記録から復元された変化とともに示しています。

南大洋縁辺部における準リアルタイムな人為起源二酸化炭素の動態解明

渡辺　豊
北海道大学 大学院地球環境科学研究院

A01(公募) 南大洋縁辺部における準リアルタイムな人為起源二酸化炭素の動態解明（代表：渡辺 豊）

1. 背景と目的： 海水の 40%を占める南極底層水は熱と物質の巨大な貯留槽であり、この底層水の形成域である南大洋での二酸化炭素(CO_2)の取り込み量は全球の気候や生態系の変動を大きく支配する。南大洋で南極底層水に大気から取り込まれる人為起源 CO_2 は海洋吸収量の 40%にもなると推定されているが[Khatiwala *et al.* 2009]、飽和平衡量に到達する前（非平衡）に海洋内部へと沈み込み、その非平衡量は 30%までになるとの予測もある。しかし、その真偽は定かではない。その最大の理由は、海洋の CO_2 吸収を把握するための炭酸系物質（全炭酸：DIC、アルカリ度：Alk、pH)の測定が他の観測成分に比べて煩雑な作業であり、さらに、海洋観測船を基盤とせざるを得ない制約条件によりデータ数が時空間的に離散で乏しいためである。このため、南大洋に取り込まれる人為起源 CO_2 の正確な量は未だ分かっておらず、全球的な気候変動予測の大きなボトルネックとなっている。そこで、本申請では、(1)南大洋における炭酸系物質のパラメタリゼーション（炭酸系物質の関数化）の開発を行い、(2)同海域に展開されている自動海洋観測ロボット群および既存海洋水理データ群に適用することで、準リアルタイムな時空間高解像度な炭酸系物質データの獲得を行い、これを基盤に(3)「南大洋に人為起源 CO_2 はどのくらい取り込まれているのか」という最大の問いに答えることを目指した。

2. 研究計画・方法：本申請では以下の３つの研究項目を実施した。
(1)：**南大洋における炭酸系物質のパラメタリゼーションの開発**：東・南極海の観測航海に参加し、南大洋において炭酸系物質の採取と高精度・高確度分析を実施し、これらと水温(T)・塩分(S)・溶存酸素(DO)・圧力(Pr)データを用いた海洋の炭酸系物質のパラメタリゼーション（DIC, Alk, pH＝f (T, S, AOU, Pr);　T・S・AOU・Pr による炭酸系物質の関数化, AOU は DO から見積もられる酸素消費量）を行う。これを基盤として時空間高解像度な人為起源 CO_2 を見積りの定式化を行った。
(2)：**南大洋における準リアルタイムな炭酸系物質の時空間高解像度マッピングの構築**：南大洋に現在展開されている自動海洋観測ロボット（Argo）に適用することで、南大洋における準リアルタイムな炭酸系物質の動態を把握するための観測システムの構築を目指した。
(3)：**南大洋における人為起源 CO_2 分布の把握**：項目(2)で得られた時空間高解像度な炭酸系物質復元データ群と、国際的海洋横断面観測計画 CLIVAR・GOSHIP のよる南大洋の高精度・高確度な T・S・DO・Pr データ群に項目(1)のパラメタリゼーションを適用して得られた炭酸系物質復元データ群を統合し、南大洋全域にわたる人為起源 CO_2 の吸収量ならびにそれに伴う海洋酸性化の解明を目指した。

3. 結果：南大洋全体(SO)を 0m から bottom まで一本の式でそれぞれの炭酸系物質を表現出来る高確度高精度な炭酸系物質のパラメタリゼーションに成功した(Fig. 1)。項目(1)で得られたパラメタリゼーション群を南大洋に現在展開されている Argo に適用することで、南大洋における準リアルタイムな炭酸系物質やそれに連動する栄養塩類の動態を把握することが可能となった[Pan, Watanabe *et al.* 2020, 2022; Li, Watanabe *et al.* in submitted]。項目(2)で得られた炭酸系物質復元推定データ群と、国際的海洋横断面観測計画 CLIVAR・GOSHIP データ群の差分から炭酸系物質の人為起源成分と自然起源成分との分離を行い(Fig. 2)、南大洋全域にわたる人為起源 CO_2 の吸収量ならびにそれに伴う海洋酸性化の詳細な分布の見積りに初めて成功した (Fig. 3)。

1990 年代から 2010 年代にかけては、人為的な影響による海洋酸性化が SO の表層から中層 3500m までの大部分を覆い、人為的な pH の最大減少速度は 0.004pH/年と世界平均の 2 倍の減少を示していた(Fig. 3)。SO におけるこの顕著な pH の低下は、SO における 10.9 Pg-C の人為起源 CO_2 の吸収増加に起因していると考えられる。SO における人為起源 CO_2 の吸収量は、地球全体の CO_2 排出量の 11%に相当し、SO が地球全体の海洋の人為起源 CO_2 の吸収の半分を担い、海洋内部への大気起源炭素の最大の取り込み領域であることが示唆された。

公募研究

4. 今後の展開：ここで開発されたパラメタリゼーション技術をその他の栄養塩などにも応用展開し、観測が困難な南大洋での物質循環像の解明へと拡張する予定である。

参考文献

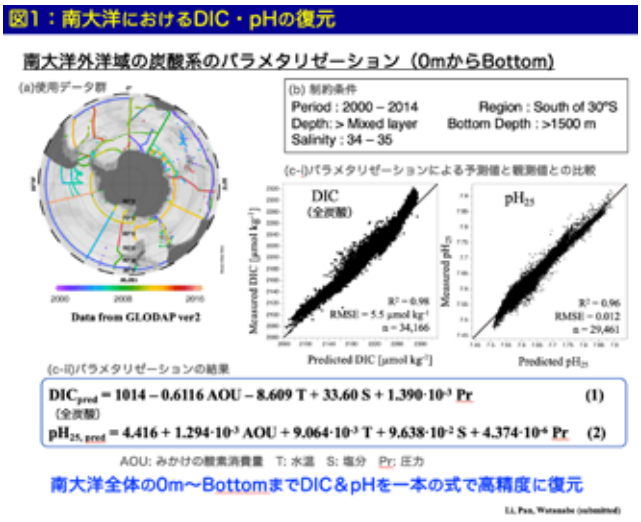
Khatiwala S, Primeau F, Hall T. Reconstruction of the history of anthropogenic CO_2 concentrations in the ocean. Nature, 462(7271): 346-349, doi:10.1038/nature08526, (2009).

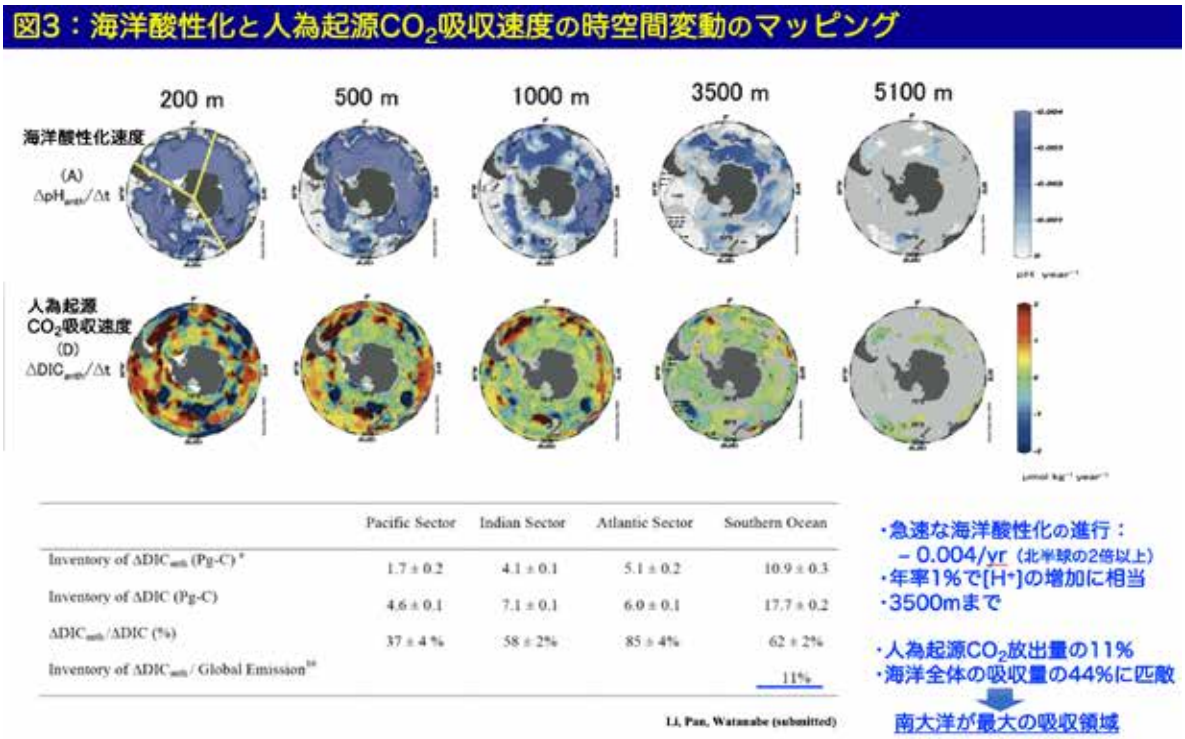
Watanabe YW, Li BF, Wakita M. Long-term trends of direct and indirect anthropogenic effects on changes in ocean pH. *Geophys Res Lett,* 45, 9106-1113, doi: 10.1029/2018GL078084, (2018).

Pan XL, Li BF, Watanabe YW. The Southern Ocean with the largest uptake of anthropogenic nitrogen into the ocean interior. *Scientific Reports*, **10**(1)**:** 8838, doi: 10.1038/s41598-020-65661-2, (2020).

Pan XL, Li BF, Watanabe YW. Intense ocean freshening from melting glacier around the Antarctica during early twenty-first century. *Scientific Reports* 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-021-04231-6, (2022).

Li BF, Pan XL, Watanabe YW. The Southern Ocean with the rapid progress of ocean acidification. *in submitted.*





南大洋南極周極流域における乱流鉛直混合
－高速水温計観測に準拠したパラメタリゼーション手法の提示－

安田一郎[1]、佐々木雄亮[1]
[1]東京大学大気海洋研究所

A01(公募）南大洋水塊形成海域における乱流鉛直混合と水塊変質・栄養物質供給（代表：安田一郎）
A01-1 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）（代表：大島慶一郎）

１．背景と目的

南大洋南極周極流海域は、様々な海域から深層水が海面近くまで湧昇し、大きな変質を受け、底層水や中層水となって北半球へ戻り、海洋物質循環を通じて生物生産を制御する、重要な海域である。底層水形成時の変質、深層水が湧昇する際に受ける変質や表層で形成された水塊が北半球へ輸送される際に受ける変質、及び、鉄や硝酸などの栄養物質が表層生物生産に供給される量を定量化するためには、乱流による鉛直混合を定量的に求めることが必要である。本研究では、独自に開発した高速水温計を CTD に取り付けて簡便に乱流混合を定量化する手法を用いた観測を、新学術領域「南極の海と氷床」における航海等において行い、乱流鉛直混合分布及び乱流構造と水塊変質・栄養物質の乱流鉛直フラックスと生物生産の関係、を明らかにすることを目的とした研究を行う。

本報告では、海洋研究開発機構調査船みらい MR19-04 航海（勝又勝郎博士首席）で得られた観測データ他を用いて、高速水温計微細構造観測から求めた乱流エネルギー散逸率とファインスケール(鉛直数 m-数 100m)の乱流パラメタリゼーションを比較し、深層の比較的弱い乱流場の広い範囲で適用可能かつ CTD から求められる水温塩分圧力データから得られるストレインパラメタリゼーションを用いた簡便な乱流評価方法を提示する。この手法を CTD 観測データに適用することにより、南大洋・南極周極流海域での乱流による海洋循環・水塊変質・物質輸送のより高精度の評価に道が開かれることが期待できる。

２．データと方法

用いた観測データは、海洋研究開発機構所属船みらい MR-19-04 航海(2019/12 月-2020/2 月)で実施した 50E を 30S から南極沿岸付近までの海底に至る CTD 観測データ、および CTD に取り付けた超音波流速計 LADCP・高速水温計マイクロライダ MR6000 観測データである。高速水温計 MR6000 データは、水温微細構造を 512Hz でサンプリングした 1 秒間のデータから水温勾配スペクトルを計算し、別航海でシアとの同時観測で求めた時定数で補正したスペクトルに、理論スペクトルをあてはめて求めたバチェラー波数から、乱流エネルギー散逸率εを求めた。この方式で求めたεは、$10^{-11} < \varepsilon < 10^{-8}\ W/kg$ の範囲での妥当性が確認されている(Goto 他 2016; 2018; 2021; Yasuda 他 2021)。乱流鉛直拡散係数は、CTD の密度観測データから求めた浮力振動数$N(N^2 = -g\rho_z/\rho)$を用いて$K_\rho = 0.2\varepsilon N^{-2}$で求めた。

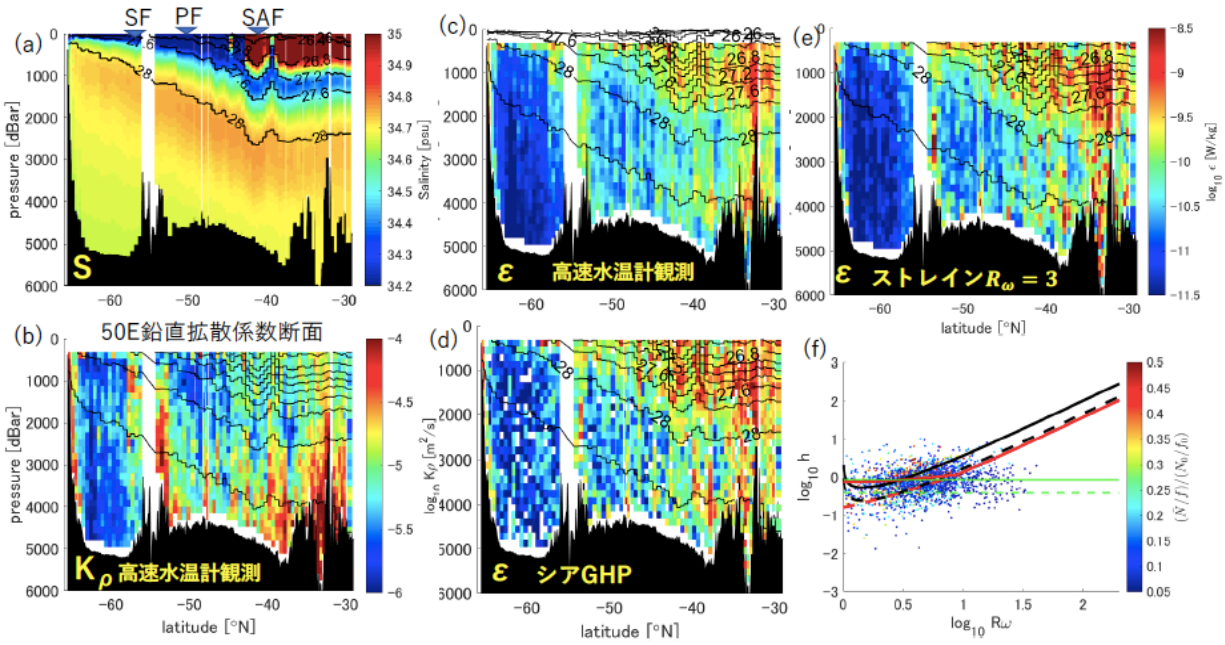
ファインスケールパラメタリゼーションは、LADCP から求めた流速シア$\langle {U_z}^2 \rangle = \int_{\min k_z}^{\max k_z} \Phi_{shear}(k_z)dk_z$, CTD 密度データから求めたストレイン$\xi_z = (N^2 - \overline{N^2})/\overline{N^2}$のスペクトルから求めたストレイン$\langle {\xi_z}^2 \rangle = \int_{\min k_z}^{\max k_z} \Phi_{strain}(k_z)dk_z$、を 320m 区間を半分ずらしながら求めた。Thurnherr(2012)に従い、流速シアをスペクトルが飽和となる波長とノイズに乱されない波長の大きい方の最小波長から最大波長 320m の区間で算出し、ストレインは Kunze 他(2006)に倣い、スペクトルが飽和となる波長と 10m の大きい方の最小波長から最大波長 150m の区間を積分区間とした。$\varepsilon_0 = 6.73 \times 10^{-10}$ W/kg, $f_0 = f(30°) = 7.29 \times 10^{-5} s^{-1}$, $N_0 = 5.2 \times 10^{-3} s^{-1}$として

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{\bar{N}^2}{{N_0}^2} \left(\frac{\langle {U_z}^2 \rangle}{GM \langle {U_z}^2 \rangle} \right)^2 \frac{f}{f_0}\, h(R_\omega, f/\bar{N}),\ R_\omega = \frac{\langle {U_z}^2 \rangle}{\bar{N}^2 \langle {\xi_z}^2 \rangle},\quad h_{GHP}(R_\omega, \bar{N}/f) = \frac{1+1/R_\omega}{4/3} \frac{cosh^{-1}(\bar{N}/f)}{cosh^{-1}(N_0/f_0)} \sqrt{\frac{2}{R_\omega - 1}}$$

（GHP ファインスケールパラメタリゼーション: Henyey et al. 1986; Gregg 1989; 2003; Polzin 1995）から、乱流エネルギー散逸率εを求め、高速水温計からのεと比較した。シアの代わりにストレインを用いる場合　$h_{Strain}(R_\omega, \bar{N}/f) = h_{GHP}(R_\omega, \bar{N}/f) \times (R_\omega/3)^2$となる。

公募研究

3．成果



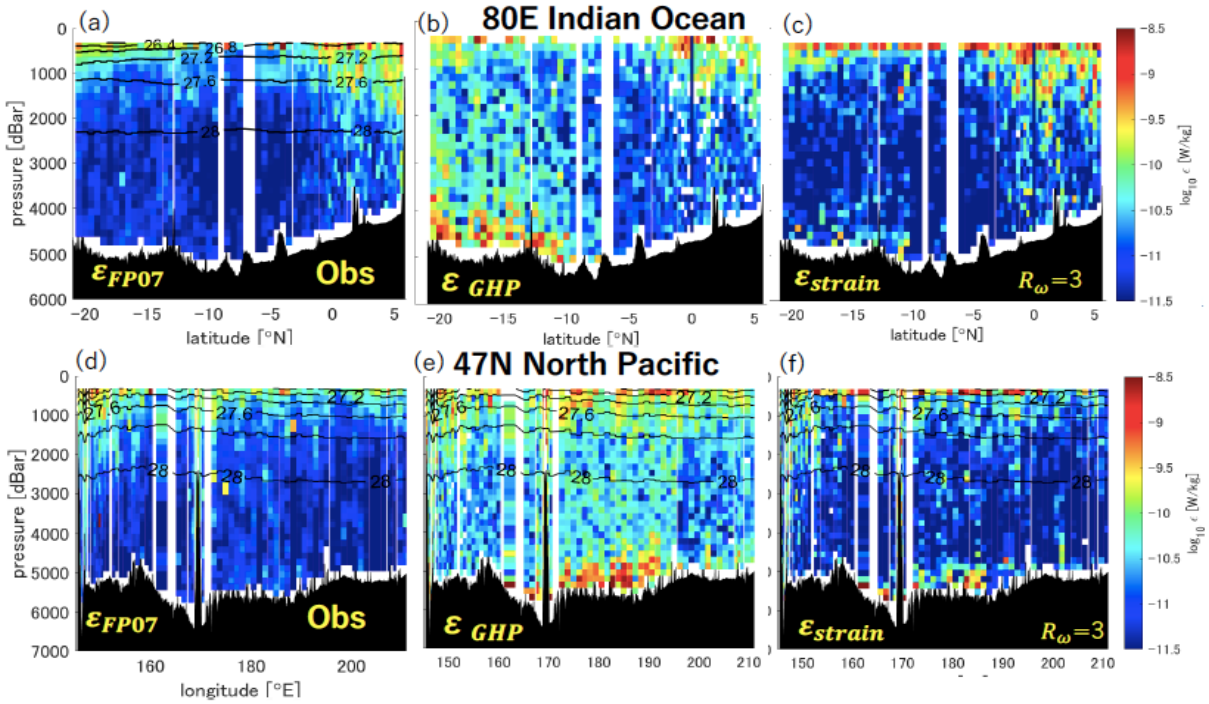
東経 50 度に沿って南極周極流を横切る塩分の鉛直断面図を上図(a)に示す(図 a-e の等値線は中立密度)。南緯 40 度から南極沿岸にかけて、中立密度線が傾斜した部分が南極周極流である。高速水温計から求めた乱流鉛直拡散係数K_ρの分布を図(b)に示す。30-40S, 55S での海底深度の変化が大きい海域および南極沿岸付近の深層で高K_ρが見られた。高速水温計観測からの乱流エネルギー散逸率ε断面図(c)(鉛直 320m 区間で平均し 160m 毎)からは、高K_ρの海域に加えて、鉛直密度勾配(図の等中立密度線が混んでいる浮力振動数N^2)が大きい海域でεが大きい傾向が見らる。図(d)は GHP パラメタリゼーションから求めたεである。両者(図 c と d)は大まかには良く整合(相関係数 R=0.77, 自乗平均誤差 RMSE=0.45)していたが、R_ωが大きい部分(>10)で過大評価となっていた(図 f: 点は高速水温計ε観測から逆算して求めたh_{Strain}、黒線 GHP パラメタリゼーション)。ストレイン$\langle {\xi_z}^2 \rangle$を用いたパラメタリゼーションで図(f)の点に示されるように、R_ωに対する依存性が殆どなくなることがわかった。そこで高速水温計に整合する$R_\omega = 3$（Garrett-Munk 内部波普遍スペクトルに対応）を用いたε断面図が図 e である。この時相関係数 R=0.88, RMSE=0.37 となり、ファクタ 3 以内に 82%が入る良好な結果が得られた。この結果は、CTD 観測密度データのみからストレイン$\langle {\xi_z}^2 \rangle$を求め、$j_* = 3,\ b = 1300\,m,\ E_0 = 6.3 \times 10^{-5},\ k_{z*} = (\pi j_* \bar{N}/b\,N_0)$ and $N_0 = 5.2 \times 10^{-3} s^{-1}$

$$\varepsilon_{strain\ R_\omega=3} = \varepsilon_0 \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 \left(\frac{\langle {\xi_z}^2 \rangle}{\langle {\xi_z}^2 \rangle_{GM}}\right)^2 \frac{f}{f_0} \frac{cosh^{-1}(N/f)}{cosh^{-1}(N_0/f_0)},\quad {}_{GM}\langle {\xi_z}^2 \rangle = \frac{\pi E_0 b j_*}{2} \int_{\min k_z}^{\max k_z} \frac{{k_z}^2 dk_z}{(k_z + k_{z*})^2}$$

で求めることができ、アルゴ CTD データから求めることが可能(Whalen 他 2015)となる。

次に、上記で妥当であることが明らかになった$R_\omega = 3$で固定しストレイン$\langle {\xi_z}^2 \rangle$を求めたパラメタリゼーションを、インド洋 80E を 5N から 20S を南北に横切る断面(次ページ図上段)、北太平洋亜寒帯海域 47N を東西に横切る断面(次ページ図下段)で、高速水温計 FP07 観測から求めたε、GHP パラメタリゼーションで求めたε、と比較した。いずれの観測においても、高速水温計 FP07 観測から求めたεは、$R_\omega = 3$で固定したストレインパラメタリゼーションと整合的であり、GHP パラメタリゼーションで求めたεは深海の弱いε海域でやや過大評価となる傾向にあった。

エネルギー供給源に近くεが一般に大きい表層 300m および海底から 300m の範囲を除いた部分で、$10^{-11} < \varepsilon < 10^{-8}\ W/kg$の範囲で妥当な与える高速水温計からの$\varepsilon$をパラメタリゼーションを比較したことが、整合的な結果が得られた原因の一つと考えられる。深海の大部分は、このような領域が広がっており、そこでの乱流分布が CTD の密度データのみで求めることが可能であることを示した本研究の結果は、未だ十分にわかっていない南大洋での乱流分布の実態解明に寄与する結果と考えている。



参考文献

Goto, Y., Yasuda, I., & Nagasawa, M. (2016). Turbulence estimation using fast-response thermistors attached to a free-fail vertical microstructure profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *33*(10), 2065–2078. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0220.1

Goto, Y., Yasuda, I., & Nagasawa, M. (2018). Comparison of turbulence intensity from CTD-attached and free-fall microstructure profilers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *35*(1), 147–162. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0069.1

Goto, Y., Yasuda, I., Nasawa, M., Kouketsu, S., & Nakano, T. (2021). Estimation of Basin-scale turbulence distribution in the North Pacific Ocean using CTD-attached thermistor measurements. *Scientific Reports*, 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80029-2

Gregg, M. C. (1989). Scaling turbulent dissipation in the thermocline. *Journal of Geophysical Research*, *94*(C7), 9686. https://doi.org/10.1029/jc094ic07p09686

Gregg, Michael C., Sanford, T. B., & Winkel, D. P. (2003). Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters. *Nature*, *422*(6931), 513–515. https://doi.org/10.1038/nature01507

Kunze, E., Firing, E., Hummon, J. M., Chereskin, T. K., & Thurnherr, A. M. (2006). Global abyssal mixing inferred from lowered ADCP shear and CTD strain profiles. *Journal of Physical Oceanography*, *36*(8), 1553–1576. https://doi.org/10.1175/JPO2926.1

Thurnherr, A. M. (2012). The finescale response of lowered ADCP velocity measurements processed with different methods. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *29*(4), 597–600. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00158.1

Whalen, C. B., MacKinnon, J. A., Talley, L. D., & Waterhouse, A. F. (2015). Estimating the mean diapycnal mixing using a finescale strain parameterization. *Journal of Physical Oceanography*, *45*(4), 1174–1188. https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0167.1

Yasuda, I., Fujio, S., Yanagimoto, D., Lee, K. J., Sasaki, Y., Zhai, S., Tanaka, M., Itoh, S., Tanaka, T., Hasegawa, D., Goto, Y., & Sasano, D. (2021). Estimate of turbulent energy dissipation rate using free-fall and CTD-attached fast-response thermistors in weak ocean turbulence. *Journal of Oceanography*, *77*(1), 17–28. https://doi.org/10.1007/s10872-020-00574-2

南極海における微小底生動物の進化を探る物語、ここに始まる

辻本　惠[1]、嶋田大輔[2]、山崎博史[3]、藤本心太[4]
[1]慶應義塾大学、[2]国立科学博物館、[3]九州大学、[4]山口大学

A01(公募) 南極大陸を取り巻く海産微小底生動物の分化過程と進化史の解明（代表：辻本惠）

１．背景と目的

これまでの南極海における海洋生物研究は、哺乳類、魚類、貝類、ヒトデ類やホヤ類などの比較的大型の生物を中心に行われてきました。一方で、南極海の底層砂泥中には多様な微小動物が生息しており、その分布は海岸から深海まで非常に広域におよぶことがわかっています。しかし、微小動物研究が進んでいる海域は南極半島北側のスコシア海やその周辺に集中しており、研究対象も甲殻類や線虫など一部の分類群に限られています。南極の生物多様性の理解を深めるために、南極海のより広範囲における微小底生動物の多様性や進化に関する知見を得ることが必要であると考えられました。

私たちは本研究の開始以前から、南極昭和基地周辺に生息している微小底生動物の調査を行ってきました。利用できる底泥試料は限られていましたが、それでも多様な微小動物を確認することができています（Shimada *et al*. 2017, 2019, 2021）。そのような研究のなかで、分散能力の乏しい微小底生動物の分布は底層水の移動に依存しており、陸上や表層を移動する大型・中型動物とは異なる要因のもとで種分化・進化を遂げている可能性に思い至りました。このことを研究底層水班の分担者である田村岳史准教授（国立極地研究所）に相談させていただき、日本南極地域観測活動において底泥試料の採取と提供をお願いできることになりました。

本公募研究課題では、まず南極海の微小底生動物の種の分布と多様性を明らかにし、さらに形態・分子の多様性に基づいた生物地理学的傾向を明らかにすることで、微小動物に特有の進化の傾向を掴むことを目的としています。本研究は、南極域における生物多様性の理解と保全という国際課題に直接的に貢献するだけでなく、南極海洋生物の多様性や進化における新しい知見を提供することが期待されます。

２．方法

本公募研究課題では、第 59 次、第 61 次日本南極地域観測隊夏期活動において、航海中に実施された海洋観測で採取された底泥試料を用いました。リュツォホルム湾、ケープダンレー沖、トッテン氷河沖の観測地点でグラブ採泥器を用いて泥を採取し、凍結またはホルマリン固定で保存して日本に持ち帰りました。試料は解凍・洗浄後に密度勾配を利用して泥と生物を分離し、上清を 32 μm のフィルターで濾過して微小動物を抽出しました。微小動物は実体顕微鏡下で各動物グループ（主に線虫、動吻動物、クマムシ）に分別し、光学顕微鏡・走査電子顕微鏡を用いた観察によって種を同定しました。冷凍サンプルから抽出した動物の一部は、同定後に DNA 塩基配列を決定して分子データも取得しました。

３．成果

本研究課題においては、これまでに下記の成果が得られています。

線虫の分布・多様性（図１）

ケープダンレー試料からは約 4,300 個体 80 種、トッテン氷河沖試料からは約 2,100 個体 190 種、リュツォホルム湾試料からは約 900 個体 120 種の線虫を採集しました。いずれの地域でも個体数に対して種数が非常に多く、ほとんどの種は 1〜数個体しか得られませんでした。しかし、複数の地域から十分な数の個体が得られた種も少なくなく，その中から系統地理解析の材料となりうる 8 種を選抜することができました。また、解析候補以外にも、未記載種（いわゆる新種）と思われる種や、過去に南極地域からの報告がない分類群（科・属）が多く含まれていることが確認できました。

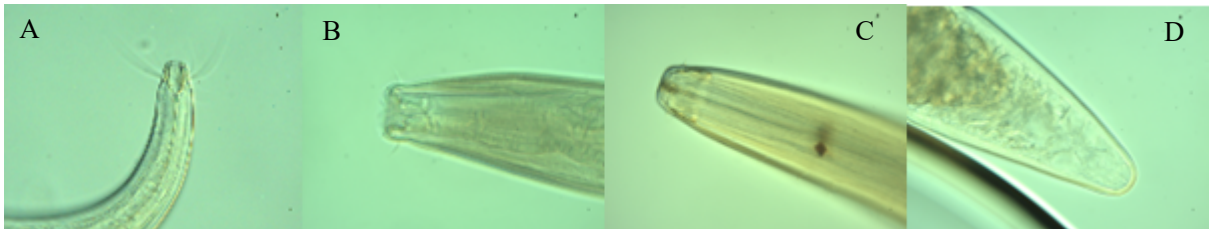


図 1 ：南極海から得られた線虫の光学顕微鏡写真。A）*Anoplostoma* 属の 1 種、B）*Cyatholaimus* 属の 1 種、C）*Thoracostoma* 属の 1 種、D）*Trophomera* 属の 1 種。

動吻動物の分布・多様性（図 2）

これまでに少なくとも 8 種の動吻動物の分子・形態データを取得できています。南極固有の *Polacanthoderes* 属では新種を記載し、本種が今回の採集地点では一番豊富に産出し、優占している動吻動物種であることが分かりました。さらに本種の分子データを用いた系統解析によって、*Polacanthoderes* 属がトゲカワムシ科動吻動物の中でも最も早く分岐した系統であることが示されました。また集団遺伝解析結果は、リュツォホルム湾とケープダンレー以東の集団の間に遺伝的な分化が見られており、分散障壁が存在する可能性を示唆しています（Yamasaki *et al*. 2022）。

クマムシの分布・多様性（図 2）

第 59 次観測活動においてリュツォホルム湾で採取された底泥試料中にサウス・シェットランド沖からのみ知られていた *Angursa antarctica*、南極海から知られていなかった *Styraconyx* cf. *qivitoq* を確認するとともに、*S. takeshii* を新種として報告し、*Styraconyx* 属の多系統性が分子データで初めて示唆されました（Fujimoto *et al*. 2020）。第 61 次観測活動で採取されたリュツォホルム湾以外のサンプルからも、これら 2 属（おそらく同種）が見つかっています。これまでの分析のなかでは、線虫や動吻動物と比べると同試料から得られるクマムシの出現頻度や個体数が少ないことが分かっています。

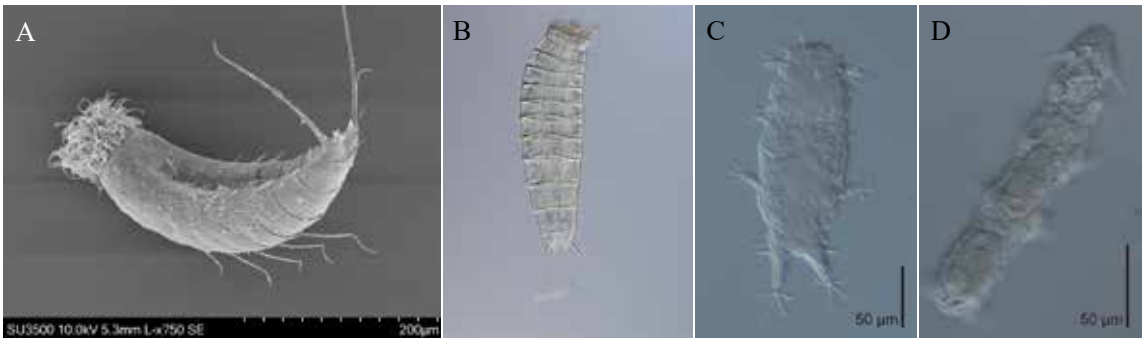


図 2 ：南極海から得られた動吻動物の新種 *Polacanthoderes shiraseae* の走査電子顕微鏡写真（A）、光学顕微鏡写真（B）、クマムシの *Styraconyx takeshii* の光学顕微鏡写真（C）、*Angursa* 属の光学顕微鏡写真（D）。

4．領域内連携

本研究課題を遂行するにあたり、A01-1「南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス」（底層水班）からは第 59 次日本南極地域観測隊夏期活動において採取された底泥試料を、また A01-2「南大洋の古海洋変動ダイナミクス」（古海洋班）からは第 61 次日本南極地域観測隊夏期活動において採取された底泥試料を、それぞれ提供して頂きました。

5．今後の課題

本研究課題の開始後にも新たな底泥試料を取得する予定でしたが、COVID-19 感染拡大の影響を大きく受けたことにより実施することができませんでした。第 59 次、61 次観測活動の取得済み試料の分析開始も予定より大幅に遅らせざるを得なかったため、種を同定できなかった標本、DNA 配列の取得まで進められなかった標本がまだ多数残されています。特に線虫では集団遺伝解析の候補種まで絞り込むことはできましたが、DNA の分析はこれから始めなければなりません。一方で動吻動物の集団遺

伝解析から、南極大陸沿岸域に、これまで認識されていなかった分散障壁が存在する可能性が示されています。線虫のデータを加えることで、この分散障壁が微小動物の多くに影響を及ぼしているのかどうかを検証できると期待できます。また、今後の研究で調査地点を増やすことができれば、南極域全体で分散障壁の有無や、具体的に何が微小動物の分散障壁となりうるのかを明らかにできると考えています。また多数の未記載種、南極初記録分類群についても分類学的な記載を進めなければ、種構成を解明したとは言えません。今後はこれらの作業を進めるとともに、新たに日本南極地域観測活動や外国基地の活動によって得られる試料も加えて、南極海のより広範囲における微小底生動物の形態・DNA データを分析していく予定です。

この度、新学術領域研究 『熱−水−物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床』において南極海で大がかりな海洋観測が実施されたなかで、公募研究という形で参加させて頂き大量の試料を分けて頂けたことは、とても幸運だったと考えています。まずはサンプル量が多いことによって、限られた種であれ、形態と分子の両方を分析するための個体数を確保することが可能になりました。そしてリュツォホルム湾、ケープダンレー沖、トッテン氷河沖など、南極海の離れた複数カ所における試料を入手できたことで、日本南極地域観測活動で取得した試料だけでも微小底生動物の広域での分布や多様性調査に着手することができました。さらに、この先のデータ分析で得られる結果によっては、他の領域と直接的な共同研究に発展できる可能性が十分に考えられます。ぜひ、始まったばかりのこの物語の続きを期待していてください。

参考文献

Fujimoto S, Suzuki AC, Ito M, Tamura T, Tsujimoto M (2020) Marine tardigrades from Lützow-Holm Bay, East Antarctica with the description of a new species. *Polar Biology* **43**:679–693.

Shimada D, Suzuki AC, Tsujimoto M, Imura S, Kakui K (2017) *Oncholaimus langhovdensis* sp. nov. (Nematoda: Enoplea: Oncholaimida), a new species of free-living marine nematode from Langhovde, Dronning Maud Land, East Antarctica. *Species Diversity* **22**:151-159.

Shimada D, Tsujimoto M, Watanabe K (2019) A new free-living marine nematode species of the genus *Graphonema* (Nematoda: Chromadorida: Chromadoridae) from Antarctica. *Species Diversity* **24**:61-67.

Shimada D, Suzuki AC, Tsujimoto M, Imura S, Kakui K (2021) Two new species of free-living marine nematodes (Nematoda: Axonolaimidae and Tripyloididae) from the coast of Antarctica. *Species Diversity* **26**:49–63.

Yamasaki H, Fujimoto S, Tanaka H, Shimada D, Ito M, Tokuda Y, Tsujimoto M (2022) Taxonomy, genetic diversity, and phylogeny of the Antarctic mud dragon, *Polacanthoderes* (Kinorhyncha: Echinorhagata: Echinoderidae). *Zoologischer Anzeiger* **301**:42–58.

南大洋インド洋区南極前線南側 ECR-1 の沈降粒子フラックスに関する予察

池上隆仁[1]、林亮太[2]、岡崎裕典[2]、池原実[3]
[1]海洋研究開発機構、[2]九州大学、[3]高知大学

A01(公募）フェオダリアが南大洋インド洋区季節海氷域の生物ポンプに果たす役割の解明（代表：池上隆仁）

1．背景と目的

南極周極流は南極大陸の周りを西から東に向かって一周する世界最大級の海流である。南極周極流の流軸と南極前線の位置はほぼ一致しており、南極前線は温暖・高塩分な水塊（低緯度側）と寒冷・低塩分な水塊（高緯度側）の境界となっている。現代の南極周極流の最大流速は南緯 50 度から 60 度の間に観測されるが、過去の温暖期には現在よりも大きく南に海流の軸が位置していた可能性が指摘されている（Oiwane et al., 2014）。近年の地球温暖化により南極周極流の軸が南に移動すれば、南極前線等の海洋フロントの位置や海氷の分布が変化し、海洋生態系や気候システムに影響を及ぼす。海洋生態系も含めた古環境の推定のためには現代の環境変化と生物の応答の詳細を明らかにし、環境指標を高精度化する必要がある。しかし南極前線より高緯度の海域における生物起源沈降粒子の研究例は極めて少ないため、この海域の生物地球化学サイクルはほとんどわかっていない。そこで、本研究では、南極周極流の変動を通じて地球温暖化による影響を受けやすい南極前線付近の様々な環境プロキシ（プランクトン群集・化学組成・同位体比）の季節変化を調査し、この海域の生物地球化学サイクルを明らかにすることを目的とした。

2．方法

南極前線南側のコンラッド海膨東方に測点 ECR-1（55°S, 45° E, 水深 4020 m）を設け、水深 3400 m にセジメント・トラップを設置し（図 1）、海洋沈降粒子試料を捕集した。セジメント・トラップの設置は白鳳丸 KH-16-1 航海で、回収は KH-19-1 航海で実施した。2016 年 2 月から 2017 年 2 月にかけて 14 日ごとに 26 本の試料ボトルに分けて合計 364 日間の沈降粒子試料を採取した。試料を>1 mm と<1 mm に分画し、それぞれの沈降粒子フラックスを推定した。>1 mm 分画と<1 mm 分画を合わせて全沈降粒子とした。ただし、>1 mm 分画についてはソーティングを行い、スイマー（カイアシ類など遊泳能力のある生物の完個体）・魚鱗・魚鱗以外の魚類の身体の一部（ヒレなど）以外の分類群を沈降粒子として扱った。>1 mm 分画沈降粒子の各分類群に由来する有機炭素と窒素含量・窒素同位体比を測定した。さらに>1 mm 分画の *Thalassiothrix antarctica* 及びその凝集体については個体数計数と生物源オパール分析を行った。また、<1 mm 分画についてはバルク試料の有機炭素と窒素含量、窒素同位体比、生物源オパールを測定した。

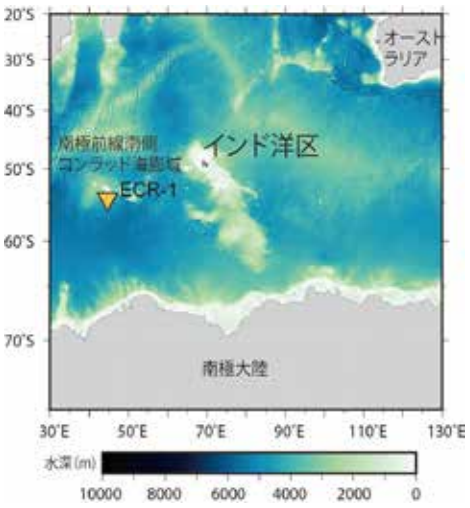


図 1. 測点 ECR-1

3．成果

3－1．<1 mm 分画の沈降粒子

<1 mm 分画の質量フラックスは観測期間に 3.60～580.26 mg m^{-2} day^{-2}（平均値：146.05 mg m^{-2} day^{-2}）の間で変動し、全沈降粒子の質量フラックス（変動幅：4.53～605.73 mg m^{-2} day^{-2}、平均値：153.80 mg m^{-2} day^{-2}）の 80%以上を占めた。クロロフィル *a* 濃度は 2016 年と 2017 年の 12 月～1 月に大きく増えて、2016 年 3～4 月にも増加が見られた。これに対応し、<1 mm 分画の質量フラックスも 1 カ月程度遅れて増加した。2016 年 9～11 月はクロロフィル *a* 濃度が減少しなかったのに対し、<1 mm 分画の質量フラックスは著しく減少し、また同時期に>1 mm 分画で珪藻 *Thalassiothrix antarctica* の凝集体が観察されなかった。そのため、<1 mm 分画の質量フラックスの顕著な減少は、珪藻群集組成変化や珪藻以外の植物プランクトンの増加による生物ポンプの効率低下が原因と考えられた。<1 mm 分画の化学分析の結果、有機炭素フラックスは観測期間に 0.55～12.42 mg m^{-2} day^{-2}（平均値：2.87 mg m^{-2} day^{-2}）の間で、有機窒

公募研究

素フラックスは 0.06〜1.70 mg m^{-2} day^{-2}（平均値：0.37 mg m^{-2} day^{-2}）の間で、生物源オパールは検出下限値以下〜452 mg m^{-2} day^{-2} の間で変動し、観測期間のほとんどで<1 mm 分画の 65%以上が生物源オパールで構成されていることがわかった。予察的な検鏡結果では、63 µm〜1 mm 分画には珪藻 *T. antarctica* が多数見られ、<63 µm 分画ではほとんど観察されなかった。

３－２．>1mm 分画の沈降粒子

1 mm 分画の沈降粒子は、フェオダリア・*T. antarctica* 単体・*T. antarctica* 凝集体・動物プランクトンの遺骸・そしてそれらの表面の付着粒子（デトライタス）で構成されていた。各分類群を 500 µm のふるい上で洗浄し、極力付着粒子と分離させたが、フェオダリアと *T. antarctica* 凝集体、*T. antarctica* 単体にはそれぞれ僅かに付着粒子が残っていた。>1 mm 分画の質量フラックスは観測期間に 0.93〜25.5 mg m^{-2} day^{-2} の間で変動し、平均値は 7.75 mg m^{-2} day^{-2} であった。>1 mm 分画の有機炭素フラックスは、観測期間に 0.05〜1.55 mg m^{-2} day^{-2} の間で変動し、平均値は 0.32 mg m^{-2} day^{-2} であった。>1 mm 分画の有機炭素フラックスが全沈降粒子の有機炭素フラックスに占める割合は 4.2〜26.3%の間で変動し、平均値は 11.5%であった。また、>1 mm 分画の有機炭素フラックスにおける各分類群の寄与率は季節によって変動し、*T. antarctica* 単体と *T. antarctica* 凝集体がそれぞれ 0〜36.2%（平均値：15.0%）と 0〜49.7%（平均値：5.9%）を占めた。*T. antarctica* とその凝集体は 2016 年 2〜7 月と 2017 年 1〜2 月に観察され、2016 年 8〜12 月には観察されなかった。*T. antarctica* 凝集体が全沈降粒子の有機炭素に占める割合（変動幅：0〜5.2%、平均値：0.7%）は低かったが、*T. antarctica* 凝集体が観察されない期間はクロロフィル *a* 濃度にほとんど変化がないにも関わらず、<1 mm 分画のフラックスが著しく減少したため、*T. antarctica* 凝集体が生物ポンプの効率化に貢献していることが示唆された。フェオダリアは年間を通して観察され、>1 mm 分画の有機炭素フラックスに占める割合は観測期間に 0〜63.3%（平均値：18.9%）の間で変動し、*T. antarctica* が観察されない期間に相対量が増加した。フェオダリア骨格はバラバラになっているものが多く、個体数は計数できなかった。その他の動物プランクトンの遺骸が>1 mm 分画の有機炭素フラックスに占める割合は、観測期間に 0〜82.3%（平均値：33.5%）の間で変動し、珪質殻をもつ *T. antarctica* やフェオダリアより高かった。

３－３．窒素同位体比

<1 mm 分画の沈降粒子の $\delta^{15}N$ は、観測期間に-0.7〜3.6‰の間で変動し、平均値は 1.8‰であった。全体的に軽い窒素同位体比は、<1 mm 分画の沈降粒子中の有機物が主に一次生産者由来であることを示した。>1 mm 分画の沈降粒子を構成する各分類群の $\delta^{15}N$ は、概ね<1 mm 分画より重く、それぞれの分類群の栄養段階を反映していると考えられた。大型珪藻 *T. antarctica* の $\delta^{15}N$ は<1 mm 分画の沈降粒子より重く、観測期間に 3.5〜9.9‰の間で変動し、平均値は 6.1‰であった。南大洋の植物プランクトンはサイズが増加すると窒素同位体比が重くなることが指摘されており（Karsh et al., 2003）、数ミリメートルの体サイズを持つ *T. antarctica* の重い $\delta^{15}N$ と整合的であった。フェオダリアの窒素同位体比は観測期間に 3.2〜17.8‰の間で変動し、平均値は 7.0‰であった。原生動物のフェオダリアは、中層に多く生息し、沈降粒子食であるため、比較的高い栄養段階に位置するのだろう。

３－４．>1 mm 分画の *Thalassiothrix* 属の個体数フラックスと生物源オパールフラックス

>1 mm 分画の *T. antarctica* 単体の個体数フラックスは観測期間に 0〜122,011 valves m^{-2} day^{-2} の間で変動し、平均値は 18,018 valves m^{-2} day^{-2} であった。>1 mm 分画の *T. antarctica* 凝集体の個数フラックスは観測期間に 0〜7.1 個 m^{-2} day^{-2} の間で変動し、平均値は 0.6 個 m^{-2} day^{-2} であり、*Thalassiothirix* 凝集体を構成する *T. antarctica* 単体の個体数フラックスは観測期間に 0〜53,951 valves m^{-2} day^{-2} の間で変動し、平均値は 3,440 valves m^{-2} day^{-2} であった。>1 mm 分画の *T. antarctica* の凝集体と単体を合わせた生物源オパールフラックスは観測期間に検出下限値以下〜8.1 mg m^{-2} day^{-2} の間で変動し、<1 mm 分画の生物源オパールフラックスに比べて最大でも 5.8%であった。

４．領域内連携及び今後の課題

・古海洋班の池原実博士（高知大学）岡崎裕典博士（九州大学）、林亮太氏（九州大学）、加藤悠爾博士（筑波大学）と連携し、ECR-1 の沈降粒子試料の<1 mm 分画の生物源オパールを構成する珪藻群集組成及び KH-19-6 Leg 4 MC10 (59°06.33S, 16°31.49W, 5602 m) 表層堆積物試料に含まれる *T. antarctica* mat に関する共同研究を進める。具体的には、南大洋の *T. antarctica* mat 堆積物を、サイズごとに分けて生物源オパール測定を行い、またサイズごとにプレパラートを作成して *T. antarctica* をはじめとした珪藻群集を

観察し、両者を比較する。セジメント・トラップの結果と *T. antarctica* mat 堆積物の結果を比較し、*T. antarctica* の物質循環における役割と *T. antarctica* mat の形成要因を明らかにする。

・生態系班の茂木正人博士（東京海洋大学）、真壁竜介博士（国立極地研究所）と連携し、提供いただいた東経 110 度線季節海氷域（図 2）の海洋沈降粒子試料に含まれる大型フェオダリアについて生物ポンプに対する寄与を定量化する。

・古海洋班の板木拓也博士（産業技術総合研究所）と連携し、測点 ECR-1、W2（図 2）における<1 mm 分画のフェオダリアと放散虫のフラックスを明らかにする。池上らが開発したマイクロフォーカス X 線 CT を用いたケイ質殻プランクトンのケイ酸塩の定量法（Ikenoue et al., 2021）を応用してフェオダリアと放散虫の南大洋の物質循環における役割を明らかにする。また、底層水班の大島慶一郎博士とも連携し、底層水の季節変動（形成・沈み込み）とフェオダリア・放散虫のフラックスの関係を明らかにする。

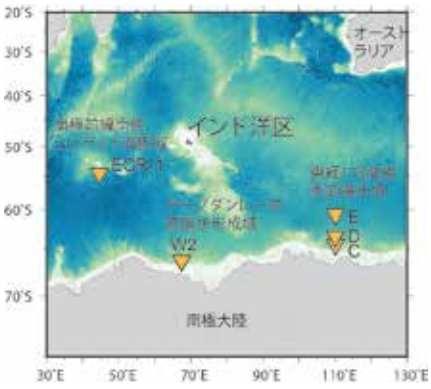


図 2. セジメント・トラップ観測点

・仲村康秀博士（島根大学）と連携し、2020 年に南大洋で採取したプランクトン試料中のフェオダリア・放散虫及びフェオダリアの糞粒を DNA 分析し、フェオダリア・放散虫の多様性とこれまで定性的であったフェオダリアの餌資源の組成を定量的に明らかにする。

5. その他の成果

Ikenoue, T., Otosaka, S., Honda, M.C., Kitamura, M., Mino, Y., Narita, H., Kobayashi, T., *Neocalanus cristatus* (Copepoda) From a Deep Sediment-Trap: Abundance and Implications for Ecological and Biogeochemical Studies, *Frontiers in Marine Science*, 9 884320, https://doi.org/10.3389/fmars.2022.884320, 2022.

深層に設置したセジメント・トラップがカイアシ類（ネオカラヌス属）のアクティブフラックスの推定に利用できることを示唆した。本研究により、福島県の沖合の沿岸—外洋の移行域において、海洋表層から水深 1000m 以深の深海へと隔離される有機炭素の約 2 割が、カイアシ類の鉛直移動によるものだと分かった。本研究の手法は、南大洋のセジメント・トラップのアクティブフラックス推定への応用が期待される。

Ikenoue, T., Kimoto, K., Nakamura, Y., Bjørklund, K.R., Kuramoto, N., Ueki, M., Ota, Y., Onodera, J., Harada, N., Honda, M.C., Sato, M., Watanabe, E., Itoh, M., Nishino, S., Kikuchi, T., New evaluation of species-specific biogenic silica flux of radiolarians (Rhizaria) in the western Arctic Ocean using microfocus X-ray computed tomography, *Limnology and Oceanography*, 66(11) 3901-3915, https://doi.org/10.1002/lno.11928, 2021.

南大洋のフェオダリア・放散虫のケイ素循環における位置づけを明らかにするため、産業技術総合研究所、オスロ大学（ノルウェー）との共同研究によりケイ質殻プランクトンのシリカ（SiO_2）を迅速、正確に定量する新たな手法を開発した。この手法を用いて試験的に西部北極海の沈降粒子試料について分析を行ったところ、放散虫が西部北極海のケイ素循環に重要な役割を担っていることを初めて明らかにできた。この成果についてプレスリリースも行った。本研究で開発した手法は、地質試料中のプランクトン化石にも適用可能であり、南大洋における過去から現代までの物質循環変遷の解明につながることが期待される。

Hernández-Almeida, I., Björklund, K.R., Diz, P., Kruglikova, S., **Ikenoue, T.**, Matul, A., Saavedra-Pellitero, M., Swanberg, N., Life on the ice-edge: Paleoenvironmental significance of the radiolarian species *Amphimelissa setosa* in the northern hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 248, 106565, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106565, 2020.

堆積物コア中の放散虫 *Amphimelissa setosa* の産出量が IRD、海氷付着珪藻に由来する IP25 と高い相関があり、海氷分布や海氷縁の生産量の指標となることを示した。*A. setosa* は北半球のみに分布する種だが、南大洋の堆積物コアの放散虫について同様の解析を行うことで新たな海氷分布の指標を得ることが期待される。

参考文献

Karsh, K. L., Trull, T. W., Lourey, M. J., & Sigman, D. M., Relationship of nitrogen isotope fractionation to phytoplankton size and iron availability during the Southern Ocean Iron RElease Experiment (SOIREE). *Limnology and Oceanography*, *48*(3), 1058-1068, https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1058, 2003.

Oiwane, H., Ikehara, M., Suganuma, Y., Miura, H., Nakamura, Y., Sato, T., Nogi, Y., Yamane, M., Yokoyama, Y., Sediment waves on the Conrad Rise, Southern Indian Ocean: Implications for the migration history of the Antarctic Circumpolar Current. *Marine Geology*, *348*, 27-36, https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.10.008, 2014.

南大洋における窒素固定と硝化の分布

塩崎拓平[1]
[1]東京大学大気海洋研究所

A01(公募）窒素循環から解き明かす南極海生態系変動（代表：塩崎拓平）

１．背景と目的

気候変動、海洋酸性化、成層圏のオゾン、窒素循環、リン循環、水資源枯渇、土地利用変化、生物多様性現象、エアロゾルの増加、化学汚染、これらは安定した地球システムを脅かす 10 大環境ストレスとして着目されている(Rockstrom, et al., 2009)。Rockström らによると、このうち窒素循環はすでに動的平衡が保たれる臨界点を突出して超えており、特に深刻な問題であることが示されている。この要因は主にハーバー・ボッシュ法によって地球上での反応性窒素(生物にとって利用しやすい窒素)の量が増加したことと、化石燃料の燃焼による NO_x の増加にある。これによって陸域窒素循環は変化し、また海洋にも影響を及ぼしつつある。しかし、陸上に比べて海洋は窒素循環の理解が極めて乏しいのが現状であり、その中でも南極海の窒素循環研究はアクセスの悪さから他の海域ほど進んでいない。本研究では、窒素循環のうち、窒素固定と硝化にフォーカスし、南大洋における各プロセスの分布について調査した。

１－１．窒素固定

窒素固定は窒素ガス(N_2)からアンモニアを合成するプロセスであり、一部の原核生物によって行われる。窒素固定は海洋において外から供給される主要な窒素源と考えられている(Gruber and Galloway, 2008)。窒素固定は他の窒素栄養塩(硝酸塩やアンモニウム塩)を利用するよりも大量のエネルギーを必要とする。そのため、窒素固定は窒素栄養塩の乏しい熱帯・亜熱帯海域においてのみで起こる現象と長らく考えられてきた(Sohm, et al., 2011)。しかし、近年の研究によって、窒素栄養塩が豊富な海域でも窒素固定が行われている事が明らかとなった(Knapp, 2012; Shiozaki, et al., 2018; Zehr and Capone, 2020)。これらの結果は海洋窒素固定が熱帯・亜熱帯海域だけのローカルな現象ではないことを示唆していた。本研究では南大洋では初めて外洋域から沿岸域に至る海域で窒素固定の調査を実施した。

１－２．硝化

硝化はアンモニアから亜硝酸、亜硝酸から硝酸に変換されるプロセスであり、窒素固定による窒素供給と脱窒による排出のちょうど間に位置する窒素循環の中心的な役割を果たしている。硝化は一般に有光層下部でピークを持つ現象として知られ、そのため全球スケールの現象として知られている。南大洋でもこれまで 4 つの観測例があり(Bianchi, et al., 1997; Mdutyana, et al., 2020; Olson, 1981; Tolar, et al., 2016)、これらの研究を総合すると、特に南極大陸沿岸域において硝化活性が高くなる傾向があることが示されていた(Tolar, et al., 2016)。しかし、これらの観測は全て西南極において行われたものであり、また沿岸域の観測は一例しかない。本研究では東南極沿岸域とその外洋域で初めて硝化の調査を実施した。

２．方法

２－１．観測海域

観測は窒素固定と硝化共に第 60 次南極地域観測隊夏隊の活動期間（2018 年 12 月から 2019 年 3 月）に南極観測船「しらせ」と南極大陸沿岸における実地調査によって行った。サンプルは 0-200 m まで光量層及び固定層から採取した。

２－２．窒素固定

窒素固定は $^{15}N_2$ ガス溶存法(Mohr, et al., 2010)で測定を実施した。$^{15}N_2$ を添加した海水サンプルは現

場水温と光量に調整したインキュベーターで 24 時間培養し、GF/F フィルターに粒子を捕集した。GF/F フィルターは冷凍で陸上実験室に持ち帰り、安定同位体質量分析計を用いて粒状窒素中の $^{15}N/^{14}N$ 比の測定を行った。さらに本研究では培養用のサンプルを採取した同じ海水の DNA と RNA サンプルを採取した。そしてそれらのサンプルを用いて窒素固定の鍵遺伝子である *nifH* をターゲットにアンプリコンシーケンスを実施した。

２－３．硝化

硝化測定用のサンプルには $^{15}NH_4^+$を添加した。サンプルは窒素固定と同じく現場水温と光量に調整したインキュベーターで 24 時間培養し、0.2μm フィルターを用いて濾液を捕集した。濾液は冷凍で陸上実験室に持ち帰った。脱窒菌法(Sigman, et al., 2001)を用いて濾液中の NO_3^-を N_2O に変換した後、安定同位体質量分析計を用いて $^{15}N/^{14}N$ 比の測定を行った。また本研究では速度測定と同じ海水から採取された DNA サンプルを用いて、16SrRNA をターゲットしたアンプリコンシーケンスを実施した。また同じ DNA サンプルに対し、海洋の主要なアンモニア酸化生物である β AOB (Ammonia Oxidizing Bacteria), shallow-clade AOA (Ammonia Oxidizing Archaea), deep-clade AOA の *amoA* 遺伝子(アンモニア酸化の鍵遺伝子)をターゲットに定量 PCR を実施した。

３．成果

３－１．南大洋沿岸域における窒素固定の発見

窒素固定は南極海沿岸域の定着氷域と氷縁域において検出された（図 1）。氷縁域の測点では熱帯・亜熱帯域沿岸域で見られるような非常に高い窒素固定活性（44.4 nmol N L^{-1} d^{-1}）が検出された。そして南極海沿岸域ではすべての測点で *nifH* 遺伝子が見つかった。*nifH* 遺伝子は種によって固有の塩基配列を持つため、微生物群集中の *nifH* 遺伝子を調べることで窒素固定生物の存在の有無だけではなく、どの種がいたかをある程度特定できる(Zehr, et al., 2003)。*nifH* 遺伝子の配列を詳しく調べた結果、他の海域で検出されていた窒素固定生物が南極海でも検出された。中でも注目すべきは UCYN-A と呼ばれるシアノバクテリアの *nifH* 遺伝子が検出されたことである。UCYN-A は亜熱帯を中心に生息する代表的な窒素固定生物のうちの一つとして知られている(Zehr, et al., 2017)。UCYN-A はいくつか亜種がいるが、南極海で見つかったのはそのうち最も主要な種と *nifH* 遺伝子の配列が完全一致した。また窒素固定の活性が検出された観測で、発現した *nifH* 遺伝子（メッセンジャーRNA 中の *nifH* 遺伝子）の組成を調べてみると、UCYN-A の *nifH* 遺伝子が最も多くなっていました。すなわち南極海の窒素固定は主に UCYN-A によって行われていることが示唆された。これまで我々は亜寒帯や北極海で窒素固定が行われていることを明らかにしてきた(Shiozaki, et al., 2017; Shiozaki, et al., 2018)。これらの結果と今回の南大洋の結果を総合すると、窒素固定は全球的なプロセスであることが明らかになった。本研究成果は 2020 年 10 月に *Nature Geoscience* から出版された(Shiozaki, et al., 2020).
[プレスリリース: https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2020/20201027-1.html]

３－２．東南極沿岸域とその外洋域における硝化の分布

硝化速度はすべての測点で表面で低く、深くなるにつれ高くなる傾向が見られ、極大値は 1%光量層もしくは 0.1%光量層付近に存在していた(図 2)。硝化速度の極大値は観測点によって大きな違いが見られ、南極海外洋域のほうが沿岸域に比べて極大値が高くなる傾向が見られた。外洋域では最も高い値(31.7 nmol N L^{-1} d^{-1})は南緯 46 度において検出された。一方沿岸域では最も高くても 3.74 nmol N L^{-1} d^{-1} 程度であった。また 200m までの水柱積算値でも外洋域(315–3435 μmol m^{-2} d^{-1})のほうが沿岸域(52–674 μmol m^{-2} d^{-1})に比べて有意に高くなった。この結果は南極大陸沿岸域において硝化活性が高くなる傾向があるという既往知見(Tolar, et al., 2016)とは異なる結果となった。

16S rDNA のアンプリコンシーケンスの結果、硝化生物の全原核生物中の割合は沿岸域で 0.02-0.88%、外洋域で 0.06-0.86%の範囲で変動しており、有意な差はみられなかった。定量 PCR の結果、すべての測点、すべての深度で shallow-clade AOA が主要になることが示された(図 3)。この 3 グループのアンモ

公募研究

ニア酸化生物の現存量はすべて硝化速度と同じく表面で低く、深くなるにつれ高くなる傾向が見られた。硝化速度と shallow-clade AOA の現存量との間には有意な正の相関が見られた。これらの結果は観測された硝化速度は主に shallow-clade AOA によって担われていたことを示唆する。Shallow-clade AOA の極大値は沿岸域が外洋域に比べて低くなる傾向があった。そのため、沿岸域で硝化速度が低かったのは shallow-clade AOA の現存量が低かったことが要因と考えられた。過去、高い硝化活性が検出された西南極沿岸域の硝化生物の全原核生物中の割合は 14.2%であり(Signori, et al., 2014)、本研究海域とは大きく異なった。すなわち、南極大陸沿岸域は海域毎に原核生物群集組成が大きく異なる可能性があり、生物地球化学過程の見積もりの際には注意を払う必要がある。

５．今後の課題

本研究では南大洋における窒素固定と硝化の分布を明らかにした。今後はこれらのプロセスの変動要因を明らかにしていく必要がある。これにより、南大洋の環境変動に伴う諸現象の変動の理解につながると考える。

参考文献

Bianchi, M.*, et al.* Nitrification rates, ammonium and nitrate distribution in upper layers of the water column and in sediments of the Indian sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Res Pt Ii* 1997;44(5):1017-1032.

Gruber, N. and Galloway, J.N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* 2008;451(7176):293-296.

Knapp, A.N. The sensitivity of marine N(2) fixation to dissolved inorganic nitrogen. *Frontiers in microbiology* 2012;3:374.

Mdutyana, M.*, et al.* The Seasonal Cycle of Nitrogen Uptake and Nitrification in the Atlantic Sector of the Southern Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 2020;34(7).

Mohr, W.*, et al.* Methodological Underestimation of Oceanic Nitrogen Fixation Rates. *PloS one* 2010;5(9):e12583.

Olson, R.J. 15N tracer studies of the primary nitrite maximum. *J Mar Res* 1981;39(2).

Rockstrom, J.*, et al.* Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecol Soc* 2009;14(2).

Shiozaki, T.*, et al.* Basin scale variability of active diazotrophs and nitrogen fixation in the North Pacific, from the tropics to the subarctic Bering Sea. *Global Biogeochemical Cycles* 2017;31(6):996-1009.

Shiozaki, T.*, et al.* Diazotroph community structure and the role of nitrogen fixation in the nitrogen cycle in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean). *Limnology and Oceanography* 2018;63(5):2191-2205.

Shiozaki, T.*, et al.* Biological nitrogen fixation detected under Antarctic sea ice. *Nature Geoscience* 2020;13(11):729-+.

Sigman, D.M.*, et al.* A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater. *Analytical chemistry* 2001;73:4145-4153.

Signori, C.N.*, et al.* Microbial diversity and community structure across environmental gradients in Bransfield Strait Western Antarctic Peninsula. *Frontiers in microbiology* 2014;5.

Sohm, J.A., Webb, E.A. and Capone, D.G. Emerging patterns of marine nitrogen fixation. *Nature reviews. Microbiology* 2011;9(7):499-508.

Tolar, B.B.*, et al.* Contribution of ammonia oxidation to chemoautotrophy in Antarctic coastal waters. *Isme Journal* 2016;10(11):2605-2619.

Zehr, J.P. and Capone, D.G. Changing perspectives in marine nitrogen fixation. *Science* 2020;368(6492):eaay9514.

Zehr, J.P.*, et al.* Nitrogenase gene diversity and microbial community structure: a cross-system comparison. *Environmental microbiology* 2003;5(7):539-554.

Zehr, J.P.*, et al.* Unusual marine unicellular symbiosis with the nitrogen-fixing cyanobacterium UCYN-A. *Nat Microbiol* 2017;2(1):16214.

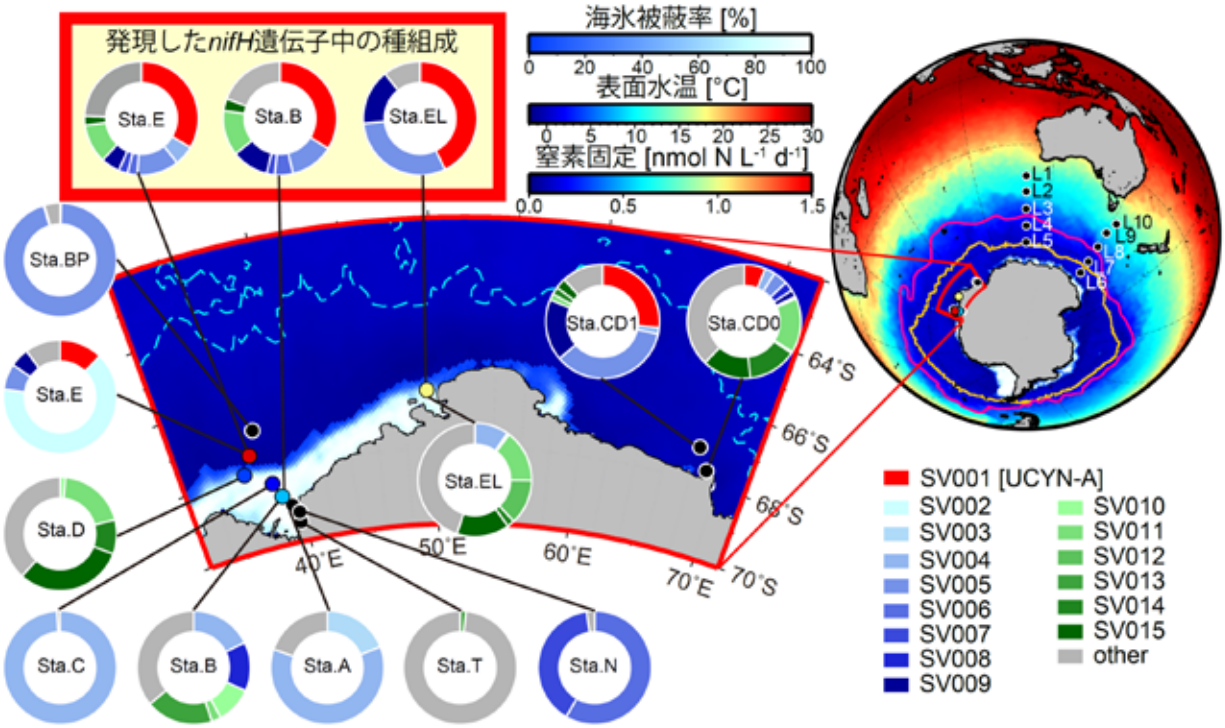


図 1：観測点と最大窒素固定速度、窒素固定生物群集組成

窒素固定は主に海氷のある海域で検出されていることがわかる。黒点は窒素固定が検出されなかった点。*nifH* 遺伝子は南極大陸周辺のすべての測点で検出された。窒素固定活性が検出された点では *nifH* 遺伝子の発現が見られ（赤い太枠中の円グラフ）、UCYN-A の *nifH* 遺伝子（赤色）が主要となっていた。地図中の海洋側のバックグランドは表面水温を示している。

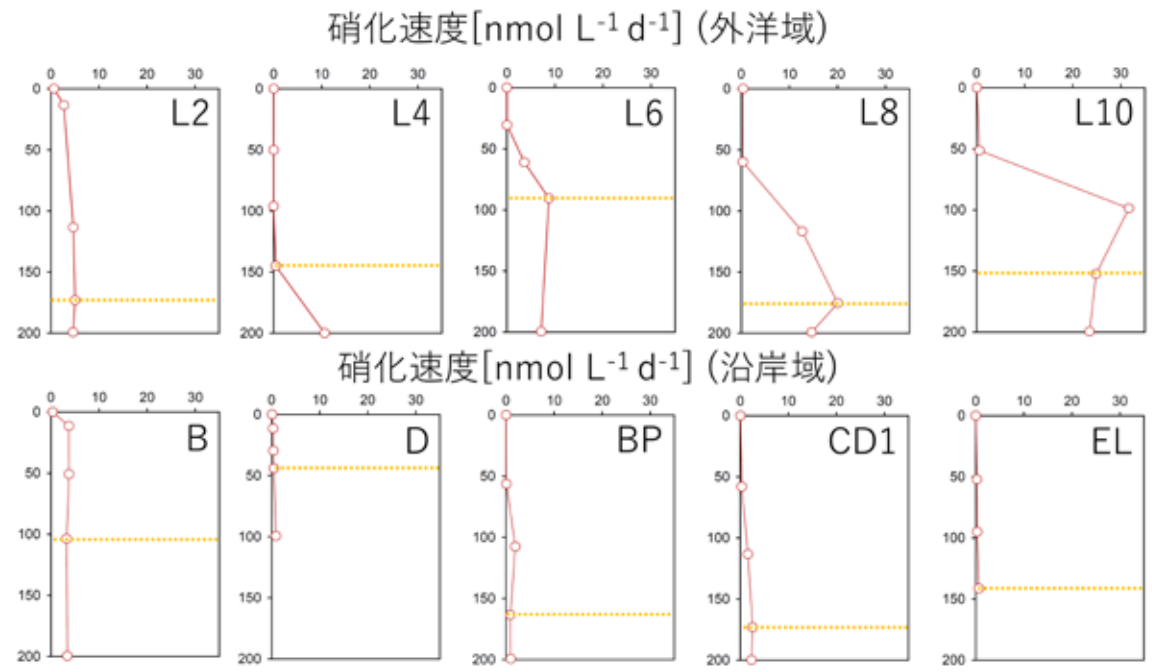


図 2：硝化速度(アンモニア酸化速度)の鉛直分布

外洋域(上)と沿岸域(下)で分けて描いている。観測点の場所は図 1 参照。

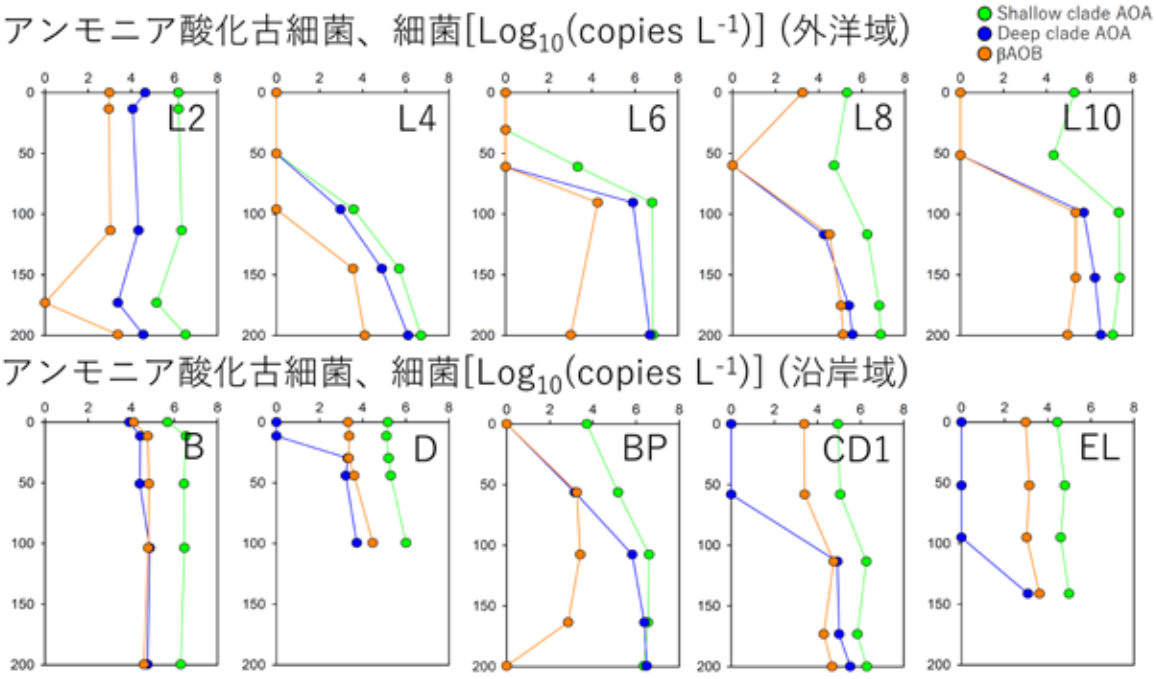


図 3：アンモニア酸化に関わる微生物の鉛直分布

緑が Shallow clade AOA，青が Deep clade AOA，オレンジが βAOB を示す。

南極氷床上における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究

新谷昌人[1]
[1]東京大学地震研究所

A02(公募）南極氷床上における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究
（代表：新谷昌人）

１．研究の背景と目的

本研究は、南極露岩や氷床上など極限的な野外環境における多点重力観測を実現するための小型絶対重力計の開発を目的とする。南極域における氷床の質量収支や氷河期からの変動を理解するためには質量分布や地盤の上下変動に感度を持つ重力観測が有効である。これまで困難であった南極域の露岩や氷床上での複数の絶対重力計による同時連続観測を実現するため、研究代表者が開発した小型絶対重力計TAG-1（Araya et al., 2014）をベースとした開発研究を行い、従来の重力観測で不十分であった観測領域を補完し、時間・空間分解能の向上を目指す。

TAG-1 はもともと火山観測を想定した自由落下式絶対重力計であり、小型・可搬とするために短距離の単純自由落下装置と組み込み加速度計による地面振動擾乱補正を特徴とした装置で、火山帯における観測実績がある（新谷, 2021）。また、レーザー光源を光ファイバーで長距離伝送し、複数の絶対重力計を簡素な構成で同時運用することを目指している（Araya et al., 2020）。これらの研究に基づき、構成要素を小型化した改良版 TAG-1 および光源の長距離伝送により南極野外の極限的な環境で重力観測を実証する。また、今後の氷床上での重力測定へ向けた環境計測を行う。

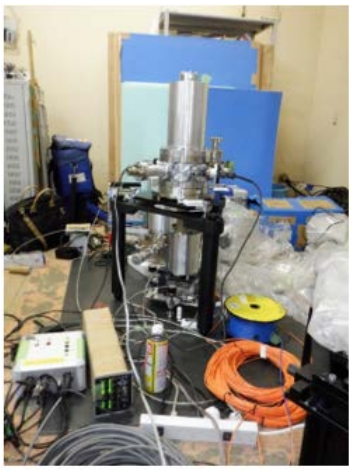
２．方法

絶対重力測定で使用するレーザー光源や干渉光の受光部は動作温度範囲が狭いため、それらを温度安定な室内等に設置し、計測部である TAG-1 本体と長基線光ファイバーで接続し、TAG-1 本体のみを野外に配置して観測を行なう。南極野外の低温環境の観測のため、TAG-1 本体の 3 つの構成部分である落下装置、組み込み加速度計、光学ユニットのうち、小型化が容易な組み込み加速度計を 7 割程度のサイズに小型化した。光学ユニットについては熱膨張係数の小さいスーパーインバー合金を使用したものを製作した。また、落下装置および組み込み加速度計についてはそれらの温度特性を測定するため、低温実験室（極地研究所）で 5℃および-10℃の環境で温度による特性変化等を測定した。落下装置については低温で熱収縮により落体を保持する部分のギャップが狭くなることがわかり、使用される低温の範囲で適正な値になるように観測時に調整を行うこととした。加速度計については温度ドリフトがみられたが、調整や補正が可能な範囲であった。

３．観測結果

2021 年 11 月～2022 年 3 月の日程で第 63 次南極地域観測隊（JARE63）夏隊に参加し、南極昭和基地の重力計室の基準点および室外の露岩、ラングホブデ雪鳥沢の露岩の計 3 ヶ所において改良版 TAG-1 を用いた絶対重力測定を実施した。また、氷床上で将来長期重力観測を行うための環境を定量的に評価するため、南極氷床上の観測点（S16）に温度、気圧、傾斜変動、振動加速度を測定する環境計測ユニットを設置しデータを取得した。

2022 年 1 月 5 日～7 日にかけて南極昭和基地の重力計室の基準点 IAGBN（A）において測定された結果を図 1 に示す。赤線は過去の同じ場所での測定値を前提とした重力の予想値を示す。潮汐力に起因する重力変動も含まれている。青点が 2 分ごとの重力測定値である。温度変化が小さい現地時間の夜間に測定を行なったため、昼の時間帯のデータは欠測している。レーザー光源や干渉光の受光部と TAG-1 本体との接続に用いる光ファイバーの長さを 5m および 50m でそれぞれ測定し、ともに整合した重力値が得られることが確認された。野外での測定では 50m の光ファイバーを使用することとした。



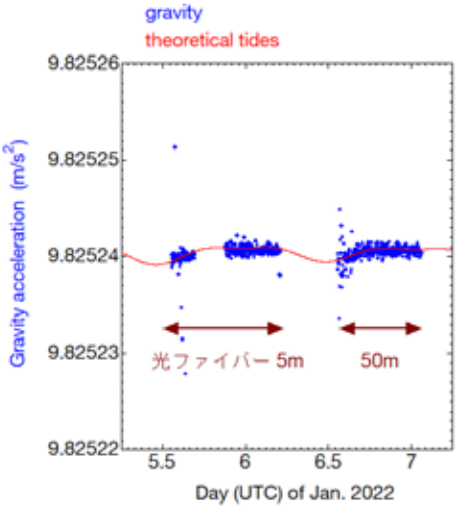


図 1：南極昭和基地の重力計室の基準点 IAGBN（A）（左）において測定された重力値（右）

2022 年 1 月 12 日～14 日にかけて、ラングホブデ雪鳥沢の重力基準点 AGS01 において測定を実施した。基準点上のテント内に TAG-1 本体を設置し、約 35m 離れた観測小屋の中に光源・受光部および収録部が配置され、50m の光ファイバーで接続された（図 2）。測定期間は本体が 1～8℃の低温環境にあり、観測小屋の室温は 20℃前後に保持されていた。

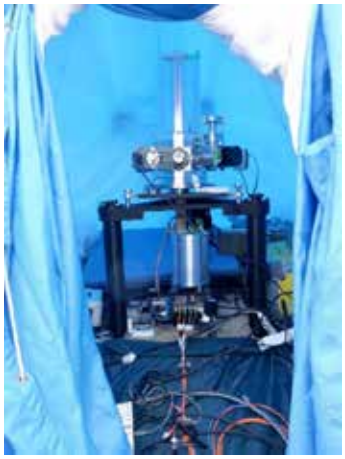


図 2：ラングホブデ雪鳥沢における重力測定。基準点上のテント内に絶対重力計を配置し、35m 離れた小屋の中にレーザーと受光部・収録装置が配置され、50m の光ファイバーで接続されている（左）。テント内の絶対重力計 TAG-1 本体。上部は落下装置、下部は小型化した地面振動補正用の組み込み加速度計とスーパーインバー合金製の光学ユニット（レーザーの照射基台）（右）

測定結果を図 3 に示す。図 1 と同様に、赤線は過去の同じ場所での測定値を前提とした重力の予想値を示す。温度変化の大きい昼の時間帯は測定していない。2022 年 1 月 13 日の記録は予想値とほぼ整合している。一方、翌 14 日の記録はばらつきが大きい。この日は風が強く、テントが揺れて地面振動が大きくなったためと推定される。

2022 年 1 月 30 日～2 月 1 日に昭和基地の重力計室から約 20m の距離にある屋外の基準点 BM2316 で重力測定を実施した。ラングホブデと同様に、基準点上のテント内に TAG-1 本体を設置し、重力計室に光源・受光部および収録部を配置し、50m の光ファイバーで接続した。測定結果を図 4 に示す。測定時は風が強く風速 10m/s を越える時間帯もあり、測定値はばらつきが大きい。但し、風速が一瞬小さくなった時間帯（横軸 32.1 付近=2 月 1 日 2 時 UTC 付近）はばらつきが小さくなっており、測定値のばらつきと風速との強い相関が示唆される。

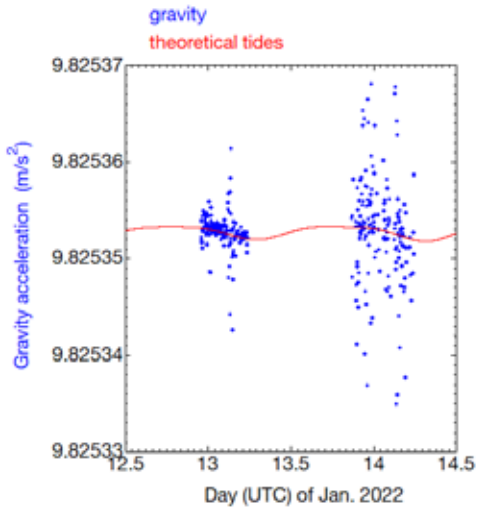


図 3　ラングホブデ雪鳥沢の重力基準点 AGS01 における測定結果

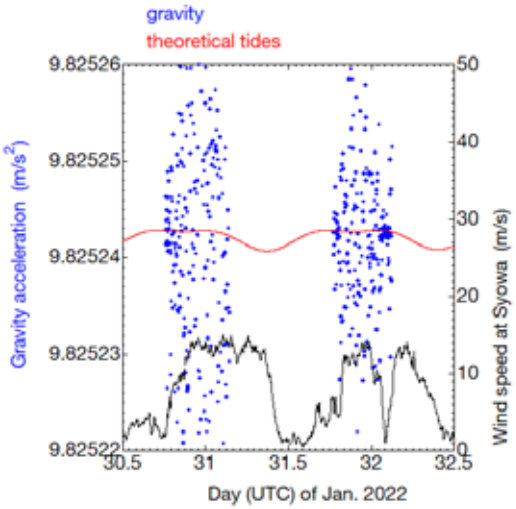


図 4：昭和基地重力計室近くの屋外の基準点 BM2316（左）において測定された重力値および昭和基地で観測された風速（右）

S16 では将来の氷床上での重力測定に向けた環境測定として、石板を表面に設置し、石板上の温度・気圧・傾斜・振動加速度（鉛直成分）の計測をテント内で行なった（図 5）。図 6 は計測された振動加速度の実効値（RMS）と風速（S16 から約 1km 離れた S17 の気象観測点の記録）を示す。風速が 10m/s を越えると大きな振動(>10mGal)が発生することや、振動加速度が風速の 2 乗に概ね比例する傾向があることがわかった。BM2316 における重力測定のばらつきも同様の傾向がみられた。すなわち、風速が大きいと精度の高い重力測定は困難となる一方、ある程度以下の風速では地面振動や測定値のばらつきが急激に小さくなる。また、氷床上での測定について、石板の傾斜と石板の温度の測定結果（図 7）からは、日中の日射によりテント内の温度が上昇し、雪面が融解し傾斜変動が生じることも確認された。傾斜変動が生じると重力計の鉛直調整が不可欠となるが、日射が少ない夜間は再凍結し石板は比較的安定しており、氷床上のテント内での重力測定は測定時間帯を考慮すれば石板上で実施可能と考えられる。

4．むすび

TAG-1 重力計の小型化および低温試験を行い、JARE63 夏隊において南極昭和基地重力計室内および周辺の露岩 2 ヶ所（昭和基地内およびラングホブデ雪鳥沢）において重力測定を実施した。長基線の光ファイバーを用いて光源・受光部と絶対重力計本体を接続した。本体は南極野外の低温環境でも正常に動作し、風があまり強くない状況では概ね所期の精度で重力値が得られ、過去の測定結果と整合した。

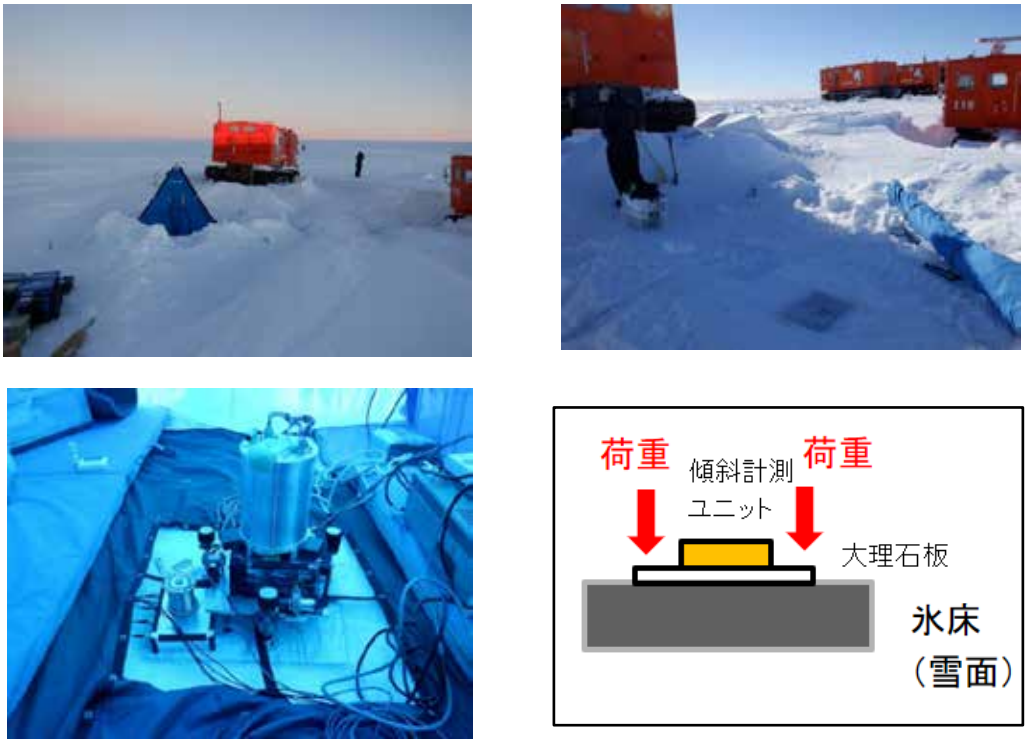


図 5：S16 における環境測定。石板を表面に設置し（左上、右上）、石板上の温度・気圧・傾斜・振動加速度（鉛直成分）の計測をテント内で行なった（左下、右下）

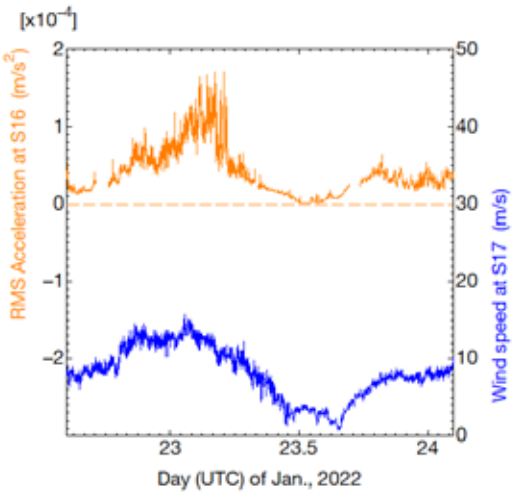


図 6：S16 で計測された振動加速度の実効値（RMS）と風速（S16 から約 1km 離れた S17 の気象観測点の記録）

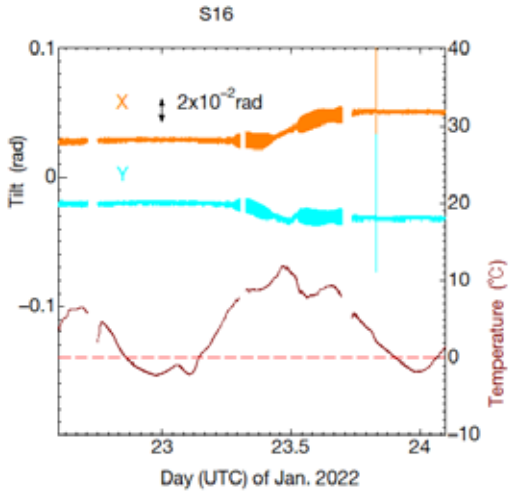


図 7：石板の傾斜と石板の温度の測定結果。日中の日射によりテント内の温度が上昇し、雪面が融解し傾斜変動が生じている

また、S16 において氷床上の測定環境に関するデータを取得した。

テント内で測定する場合、風や温度変化による影響を受けるため、風速の小さい時間帯での測定や氷床上では温度上昇を避けるため夜間に測定するなどの対応が必要と考えられる。これらの観測データや考察をもとに、低温野外環境における連続絶対重力観測へむけた具体的な方法の検討を今後進めていく。

謝辞

本研究の一部は国立極地研究所一般共同研究 3-18、第 63 次南極地域観測隊一般研究観測 AP0943、および東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究 R03/A31 として実施した。また、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究 17H06321（代表者福田洋一）および同補助金 20H04966 の助成を受けた。観

測においては、第 63 次南極地域観測隊にご支援いただいた。気象庁保有の地上気象データを利用した。

参考文献

Araya, A., H. Sakai, Y. Tamura, T. Tsubokawa, and S. Svitlov, Development of a compact absolute gravimeter with a built-in accelerometer and a silent drop mechanism, *Proc. of the IAG Symposium (TGSMM-2013)*, 98-104, 2014.

Araya, A., K. Kasai, M. Yoshida, M. Nakazawa, and T. Tsubokawa, Evaluation of systematic errors in the compact absolute gravimeter TAG-1 for network monitoring of volcanic activities, in *International Association of Geodesy Symposia. Springer*, Berlin, Heidelberg, 2020. https://doi.org/10.1007/1345_2020_107

新谷昌人, 光ファイバーネットワークを用いた火山活動監視のための重力計測技術に関する研究, *東北大学電気通信研究所研究活動報告*, **27**, 136-138, 2021.

ラングホブデ氷河と白瀬氷河の接地線位置に関する研究

奈良間千之[1]，山之口勤[2]，杉山慎[3]，青木綾乃[1]，田殿武雄[4]
[1]新潟大学，[2]リモートセンシング技術センター，[3]北海道大学，[4]JAXA

A02(公募) 東南極，ラングホブデ氷河における接地線の同定（代表：奈良間千之）

1．背景と目的

氷床から海洋に流れ出る溢流氷河において，氷河底部の陸地と海洋の境界線は「接地線（grounding line）」と呼ばれ，溢流氷河の末端として定義される．「接地線」位置の解明は，近年の氷河後退の状況，氷床の質量収支，氷河のダイナミクスの解析に必要な情報だけでなく，南極氷床の融解メカニズムの一つとして，棚氷下の海洋への暖水貫入による底面融解など，氷床-海洋の相互作用の理解にもかかわる課題である．南極の接地線は，衛星画像解析により推定されているが（例えば，Bindschadler, 2011a,b; Konrad et al., 2018），衛星データの欠損により東南極の昭和基地周辺の多くの氷河の接地線位置は明らかでない．さらにこれら接地線の多くが 1995～1996 年の衛星データを使用したものであり，西南極の一部の氷河を除いて多くの氷河の接地線位置の情報は更新されていない．

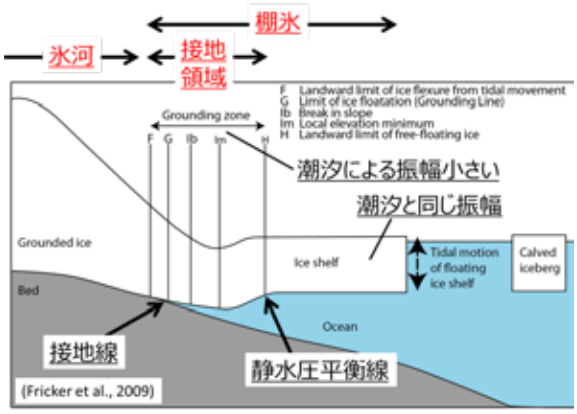


図 1 ：溢流氷河と棚氷と接地線の模式図

溢流氷河の末端は，接地線を境に「氷河」と「棚氷」に分けられる（図 1 ）．「棚氷」とは，海洋に浮遊した氷体部分であり，海洋の潮汐変動（0～2m）の影響を受ける（Goldstein et al., 1993, Yamanokuchi et al., 2005）．接地線位置を推定する方法の一つとして，差分干渉 SAR（DInSAR）解析が適用されている．地面に接地して鉛直変動しない溢流氷河と潮汐変動に応じて鉛直変動する棚氷では，2 時期のマイクロ波衛星データを干渉させると，棚氷側では潮位差による鉛直変動が発生する場合，衛星—棚氷間のスラントレンジ距離変化に伴うマイクロ波の位相差（2 時期のマイクロ波の距離のずれ）により変動縞が生じる．この変動縞が生じる位相変化領域と，氷が基盤地形に接地して変動縞が現れない領域の境界が接地線とされた（例えば，Rignot et al., 2016）．棚氷の「静水圧平衡線」から「接地線」までの間は「接地領域」と呼ばれ（図 1 ），ここでは潮汐変動に応じた鉛直変動が不明瞭になる場合がある．棚氷上の GNSS 測定結果によると，棚氷の上流側では鉛直変動が不明瞭になることが示されている（Sugiyama et al., 2014）．

南極全体の接地線は，1995～1996 年に取得された光学衛星画像の解析と ERS-1/2 のタンデムデータ（1995/1996）によるマイクロ波画像の DInSAR 解析により推定されているが（Bindschadler et al., 2011a,b; Konrad et al., 2018），そのデータセットは完全ではない．その理由として，1）光学センサによる地形モデルを用いて表面地形の特徴から接地線を推定する手法的な限界，2）SAR データの欠損（東南極の宗谷海岸沿岸域では ERS-1/2 タンデムペアでの観測が存在しない），3）データセットの SAR データは 1995 年代の ERS-1/2 と古いもので現在の位置は明らかでない，4）DInSAR 解析で検出される潮汐変動に応答する棚氷上の位相変化位置が，潮位差により変化する場合がある．特に東南極の領域では，これら DInSAR 解析結果は現地調査データで検証されていない．また，ERS-1/2 の観測数は少なく，潮汐変動による鉛直変化量の違いによる影響についても検証されていない．

本研究では，東南極のリュツォ・ホルム湾のラングホブデ氷河と白瀬氷河において，日本陸域観測技術衛星の ALOS-2/PALSAR-2 とイタリアの衛星 COSMO-SkyMed（以下 CSK と略す）のマイクロ波データを用いた衛星画像解析により接地線位置の検出を試みた．本研究の利点としては，ラングホブデ氷河

公募研究

については杉山氏，箕輪氏，近藤氏により実施された 2022 年の掘削調査で確実に溢流氷河が着底している位置が明らかになっていること，多くの ALOS-2/PALSAR-2 のデータを使用することで，潮位差の異なる画像解析ができることである．また，白瀬氷河については CSK の 1 日時間差観測がおこなわれており，白瀬氷河のような高速で流動する氷河においても最新の観測による接地線検出の期待が挙げられる．

DInSAR 解析は，潮汐変動に応じて生じる棚氷の位相変化領域を捉えることに適用されているが，この変化量には鉛直成分と水平成分が含まれる．棚氷でも氷河流動に応じて水平方向に移動している．潮汐変動に同調する棚氷の鉛直変動のみを把握するためには，水平成分を除去する必要がある．解析方法としては，2 組の DInSAR 画像を作成し，その差分から水平成分を除去する「二重差分干渉 SAR（DDInSAR）解析」が接地線検出に適用されており（Rignot et al., 1996, 2011; Lee et al., 2021; Hogg et al., 2016），本研究もその手法を用いた．

2．方法

2－1．研究地域

研究地域は，東南極のリュツォ・ホルム湾のラングホブデ氷河と白瀬氷河である．ラングホブデ氷河では，2009 年より GNSS 測量や掘削による棚氷底面での調査が実施されている（Sugiyama et al., 2014; Miowa et al., 2019）．ラングホブデ氷河の流動は年間 100m ほどだが（Fukuda et al., 2014），白瀬氷河は年間約 2.3km と流速が非常に大きい氷河である．ラングホブデ氷河では，2022 年に実施された掘削調査により確実に着底している位置が明らかになっている．白瀬氷河の質量収支は比較的安定とされているが（Nakamura et. al., 2016），リュツォ・ホルム湾で 2016 年に大規模な定着氷の流失が発生したことにより，それに伴う白瀬氷河の流速の加速が観測されている（Nakamura et. al., 2022）．白瀬氷河の棚氷でも GPS 測量がおこなわれており，潮汐変動にともなう鉛直変動が確認されている（Aoyama et al., 2016）．また，白瀬氷河の浮氷舌下において，直接的な計測により大きな底面融解速度が報告されている（Hirano, et al., 2020）．

2－2．二重差分干渉 SAR 解析

棚氷の変異領域を示す変動縞には，氷河の流動成分，地形縞，潮汐差による鉛直変化が含まれており，DInSAR 解析で抽出された変動縞から接地線を判別することは難しい．本研究では，この変動縞から，地形縞，氷河流動に伴う縞を除去し，潮汐差の鉛直変化による位相変化のみを抽出する「二重差分干渉 SAR（DDInSAR）解析」を用いた．図 2（a,b）のように，マイクロ波のペア画像から 2 組の DInSAR 画像を作成する．図 2（c）では，2 組の DInSAR 画像から，氷河の流れ（水平成分）や地形による位相差分を除去することで，潮汐差による棚氷の鉛直変化で生じた位相差のみが抽出される．潮汐変動にともない鉛直変動する位相変化領域を明らかにすることで，その領域より上流側が接地線であると推定できる．地形縞除去には，空間分解能 8m，高さ方向に平均約 1m の精度の The Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) DEM (Howat, et. al, 2019)を用いた．

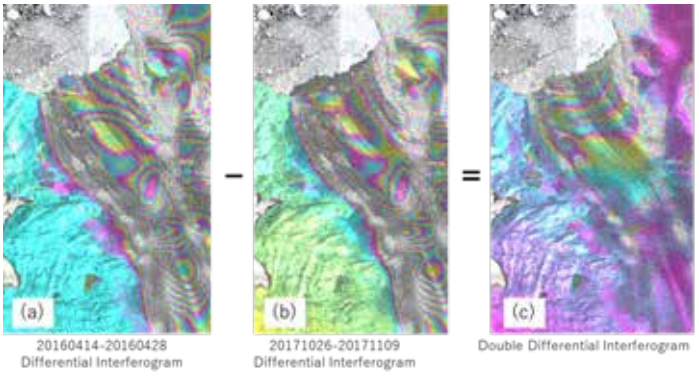


図 2：DInSAR ペア画像と DDInSAR 画像(ALOS-2)

ALOS-2 の 14 日間の観測周期は，主要分潮である Mm (27.32days)，Mf　(13.66days)に近いため，潮汐による鉛直変動量がほぼ同じになる場合がある．潮位差による位相変化領域への影響を調べるため，潮位差が異なる DInSAR 画像ペアを用いて DDInSAR 解析をおこなった．図 3 は，潮汐モデル FES2014（Lyard et al., 2021）から求めた干渉画像の観測時刻における潮位であり，ここらか DInSAR ペア画像間

公募研究

の潮位差を求めた．ALOS-２の観測時刻はおおむねUT5:10 前後，CSK による観測時刻は UT05:00～UT6:00 前後である．

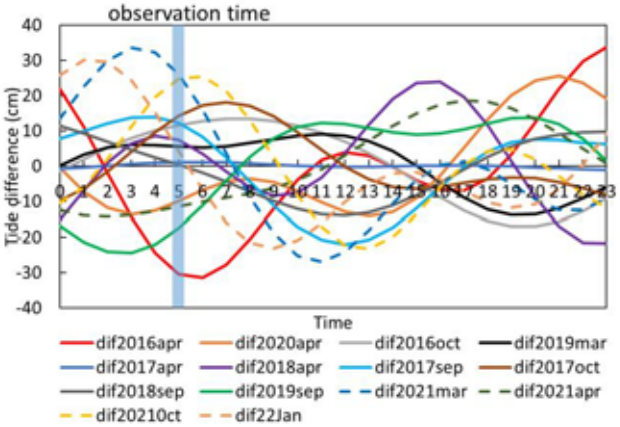


図 3：ALOS-2 の InSAR 画像の潮位差

２－３．使用データ

DDInSAR 解析は，ERS-1/2，ALOS-2/PALSAR，ALOS-2/PALSAR-2，TerraSAR-X，Sentinel-1，COSMO-SkyMed などの衛星データに適用できる．解析に必要な DInSAR 画像を作成する場合，C バンドの ERS-1/2 は，L バンドの ALOS-2/PALSAR-2 に比べて観測時間差が短くなければ干渉画像を得られないなど，衛星のセンサ波長により画像ペアの観測間隔が制限される．また，DInSAR 画像作成に使用するデータは，地形による位相差の影響が小さい 2 回の SAR 観測の軌道の短い基線距離のペア画像，氷河流動に伴う位相差の影響が小さい 2 回の短い観測時間間隔のペア画像が適している．本研究では，日本陸域観測技術衛星の ALOS-2/PALSAR-2 とイタリア地球観測衛星の CSK のマイクロ波データを使用した．

ALOS-2/PALSAR-2 は，2014 年 5 月に運用が開始されたマイクロ波センサ搭載の ALOS-1 の後継機で，使用したデータは，観測回帰 14 日間，観測幅 70km，空間分解能 10m，2016 年～2021 年に取得された Path53 , Descending F2-5, 西向き観測の画像を用いた．ALOS-2/PALSAR-2 の場合，1）14 日間の観測周期が主要分潮に近いため潮位差による変動縞が現れにくい場合がある，2）衛星の回帰時間の 14 日間に対して流速が大きい氷河の場合に，大きな観測時間差による表面形状の変化のため干渉しない（Yamanokuchi et al., 2005），3）潮汐変動のタイミング次第で変動箇所が画像の組み合わせ時期によって変化するなどの問題がある．

イタリアの地球観測衛星 COSMO-SkyMed は，2007 年 6 月～2010 年 11 月にかけて 4 機が打ち上げられた．観測波長は X-band（3.1cm）であり，最高 1m/pixel の空間分解能での観測が可能である． 1 機の CSK の観測周期は 16 日であるが, 4 機体制のため観測時間間隔を 1 日間隔(CSK2 and 4), 3 日間隔(CSK3 and 4), 4 日間隔(CSK1 and 3)と短いものを選択することが可能である. 本研究では, 観測モード HIMAGE（Stripmap）の観測幅 40 km，解像度 3m のデータを用いた．使用したデータは，2021 年 10 月～2022 年 3 月に取得された 8 画像で，H4-01 と H4-11 ビームのデータである．1 日間隔，4 日間隔，7 日間隔の DInSAR ペア画像のデータを作成した．

３．結果

３－１．潮位差の異なる DDInSAR 画像を用いた棚氷表面の位相変化領域の違い

図 4 は，ラングホブデ氷河前面の棚氷表面における，DDInSAR 解析で得られた 11 枚の DDInSAR 画像の位相変化領域を示す．図には，潮位差（TD），氷河上湖位置（2016 年），これまで棚氷上で実施された掘削地点（海洋・陸上）を示した．氷床と氷河浮氷（棚氷）の境界が接地線位置である．鉛直変動縞は, 潮位差の異なる DDInSAR 画像間でそれぞれ異った変動縞の形状を示している．潮位差が小さい画像では，位相変化領域は棚氷先端部に限定されるが，潮位差 40 ㎝を超

図 4：ラングホブデ氷河前面の棚氷表面における DDInSAR 解析により得られた位相変化領域

える画像では数百 m にわたり上流側に変化領域の拡大が確認された．

図 5 は，DDInSAR 画像のアンラップ処理で得られた，ラングホブデ氷河と棚氷の中心線における鉛直変化プロファイルである．画像間のオフセットは基盤地形を 0 として修正している．図 5(a)は潮位差が小さいグループの結果を示しており，氷河末端から 1500～1800m 地点付近で鉛直変化がなくなる．この結果は，棚氷上の GNSS 測定による鉛直変化地点と一致する．Sugiyama et al.（2014）の結果では，図 4 の末端側 2 か所の掘削地点では潮汐変動（振幅 1.5m）に応じた鉛直変動（1.5m と 0.5m）がみられたが，それより上流側では 10 ㎝以下の不明瞭な変動であった．

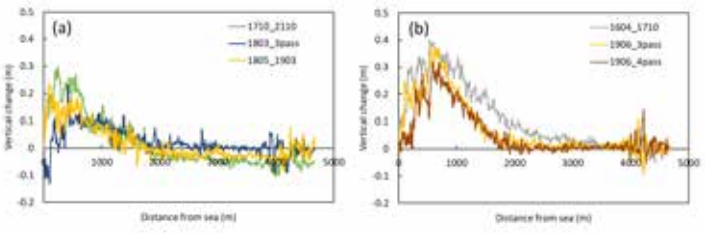


図 5：ラングホブデ氷河前面の棚氷表面における鉛直変動プロファイル

一方, 図 5(b)に示される潮位差が大きいグループでは, 鉛直変化量が大きく, その範囲は 2000～3000m 地点まで広がる．このように，潮位差の違いで棚氷の鉛直変化量は異なり，その変化領域も異なっていた．しかしながら，１）潮位差によって位相変化領域が異なること，２）その変化領域は末端部に限定されていること，３）掘削調査で得られた確実に着底している位置は 4000m 地点付近であることから，DDInSAR 解析ではラングホブデ氷河の接地線検出が困難であることを示す．鉛直変化がなくなる 2000m 付近は棚氷の表面地形が傾斜を持つ場所と一致しており，棚氷の「静水圧平衡線（図１）」付近であると考えられる．よって，この場所から，掘削調査で明らかになった確実に着底している位置までの間は，接地領域であると考えられる．図 5(a)では，接地領域にあたる箇所が数㎝低下するデータが得られた．このような接地領域の屈曲帯は，hinge line と呼ばれる．この低下が 0 に戻るところと掘削によって明らかになった接地線付近がおおよそ一致する．この表面低下は接地線検出の指標となる可能性がある．

図 6 は，2019 年 3 月の 3 画像を用いた DDInSAR 解析結果である．DDInSAR 画像から，棚氷先端部で明瞭な潮汐による変動縞を確認できる．位相変化領域は，掘削調査で明らかになった確実に着底している位置とは大きく異なる．棚氷周辺と接地線位置付近に干渉性の著しく低い領域が存在する．特に，図 6 の赤点線の場所は接地線付近と推定されることから，非干渉領域になる要因として，干渉がなくなる場所の下流側境界域が接地線なのか，クレバスが多いなど周囲に比べて凹凸など地形が大きく変化する場所なのかを確認し，その成因と接地線との関係性を探る必要がある．この場所は棚氷の緩傾斜面から急傾斜面に地形が変わる場所である．白瀬氷河においても DInSAR 画像の干渉がなくなる場所の下流側境界域が接地線と推定しているが，その理由は明らかでない．

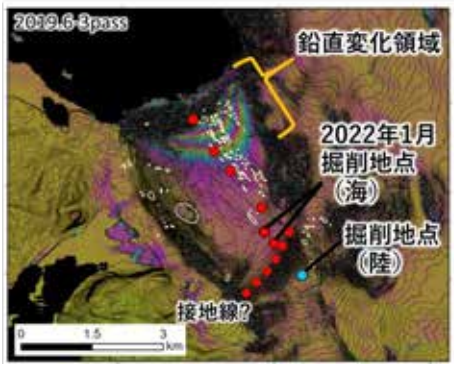


図 6：2019 年 6 月の 3 画像を用いた DDInSAR 画像

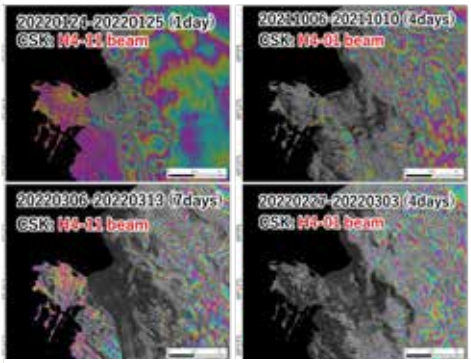


図 7：COSMO-SkyMed 衛星データを用いた InSAR 画像

図 7 は，CSK を用いた DInSAR 解析結果である．観測要求を依頼し，最適条件での観測をオーダーしていたが, 昨今の国際情勢から優先される観測が多くあり, 我々の希望するデータを取得できなかった．H4-11 ビームのデータは，1 日間隔の DInSAR 画像であるが，氷河領域を含めきれいな干渉画像が得られている．7 日間隔では，氷河流動が大きいため干渉せず，4 日間隔では一部干渉するものの氷河全体で干渉画像を得ることができなかった．ラングホブデ氷河の場合，X-band である CSK の場合は 1 日間

隔の干渉画像から DDInSAR 解析をおこなうことが最適である．

3－2．白瀬氷河の接地線の推定

図 8 に ERS-1/2 を用いた DInSAR 解析結果を示す．画像は全て観測時間差 1 日であり，白瀬氷河の接地線付近を拡大して切り出している．干渉画像は 1996 年 4 月，5 月，6 月，1999 年 11 月，12 月の 5 画像存在するが（1999 年 12 月は省略），白瀬氷河付近の接地線はいずれの画像においても明瞭に識別可能であり（画像（c）上に赤線で記す），かつその位置にほぼ変動はみられない．

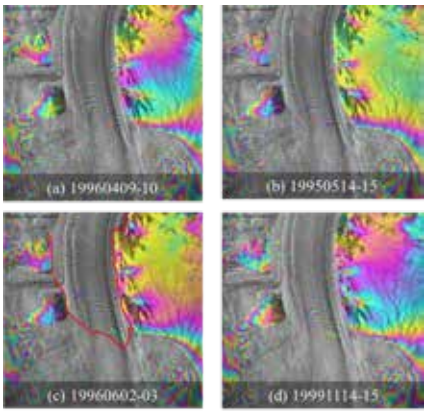


図 8：ERS-1/2 の DInSAR 画像

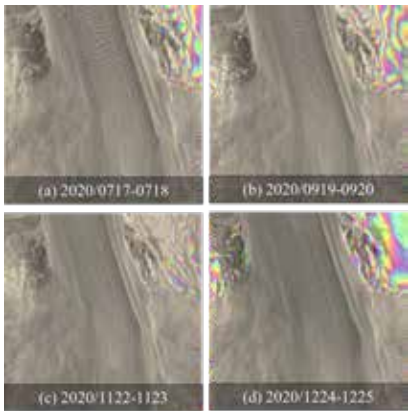


図 9：COSMO-SkyMed の DInSAR 画像

図 9 に CSK を用いた DInSAR 解析結果を示す．波長が短い X-band のため，時間差が 1 日であっても干渉性の観点では C-band である ERS-1/2 より劣る．しかし，冬期のペアである 20200717-18 の DInSAR 画像では氷床上，および白瀬氷河上全体にフリンジパターンが確認でき，20200919-20 の DInSAR 画像も弱いながらも氷床上，及び白瀬氷河上全体にフリンジを確認できる．しかし，20201122-23 の DInSAR 画像，20201224-25 の DInSAR 画像では氷河域には干渉縞はほとんどみられなかった．軌道間距離の垂直成分（Bperp）の値もそれぞれのペア間でそこまで大きくないこと，夏期に向かうにつれ干渉性が悪化していくことから，干渉性低下の原因は気温上昇に伴う表面形状の変化や，偶発的な積雪の影響が考えられる．7 月と 9 月の DInSAR 画像には氷河上にフリンジが見えていることから，DDInSAR の適用可能性を確認することができたが，20201122-23 と 20201224-25 の DInSAR ペア画像による DDInSAR 解析は不可能であった．

図 10 は，ERS-1/2 と CSK による接地線付近の DDInSAR 解析結果である．図 8，9 と比較すると白瀬氷河流軸上のストライプ状の干渉縞が大幅に減少しており，氷河流動に伴う位相変化が除去されていることが確認できる．DDInSAR 解析の結果，ここに現れる位相変化は潮位のみとなり，接地線の検出が容易になるはずだが，結果的には接地線の位置が不明瞭になった．DDInSAR 画像の接地線より上流部では，大変込み合ったフリンジがなくなり，黄色い丸で囲まれた領域はそれぞれの DDInSAR 画像ではフラットな位相が抽出された．この黄色丸の領域では氷河流動に伴う位相は除去され，残存位相が均一であることから，氷河は着底している，即ち潮汐の影響をうけていないと考えらえる．今回使用した画像ペアの潮位差は 1996 年の 4 月-5 月，1996 年 6 月-1999 年 11 月，1999 年 11 月-12 月の画像でそれぞれ-41.0cm，1.1cm，-0.6cm であるが，41 ㎝もの潮位差がある（a）においても接地線付近でフリンジの集中はみられなかった．また，Aoyama et al.（2016）から，接地線から 20km 以上の下流域において，GPS 計測による潮位による 1m ほどの鉛直変位量が確認されている．棚氷における潮位変化が，接地線の位置まで上下動として伝搬しているかの確認は今後の課題である．

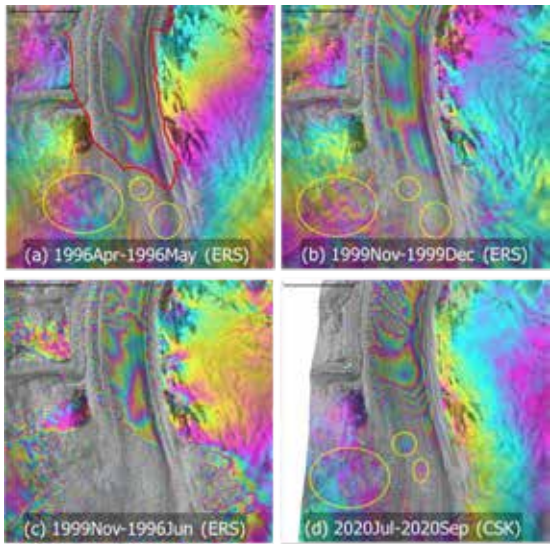


図 10：COSMO-SkyMed の DDInSAR 画像

接地線上流側において，DDInSAR 画像からフリンジが消失する理由として，１つ目は潮汐変動による鉛直変位が伝搬していない影響，2 つ目は地形の影響が推測される．DInSAR 画像をみた場合，氷河表面において，干渉性が低い位置と干渉性が高くなる位置の境目が接地線と推定される．この理由として，着底している氷河域では，基盤地形の形状（凹凸）が氷河表面にまで影響し，氷河表面の粗度が変化することにより，氷河表面のコヒーレンスが低下する接地線上流部と，氷河が基盤地形から浮く（離れる）ことにより氷河表面が基盤地形の影響を受けなくなり，底面が自由になることから，氷河表面の形状も安定し，干渉性が安定する，あるいは別の要因として，接地線付近の基盤地形が急激に落ち込んでいるため，氷床表面の勾配が急になり干渉性が低下するが，氷河が浮くことにより，氷河表面形状が安定し再び干渉するといったことも考えられる．

４．領域内連携

A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）

５．今後の課題

今回データ取得を依頼した COSMO-SkyMed の衛星データについて要望通りのデータを取得できなかった．干渉画像が得られる 1 日間隔の DInSAR ペア画像は一組しか得られなかったので，DDInSAR 解析にはもう 1 セットの DInSAR 画像が必要である．それを補うためオフセットトラッキングで流動（水平変化）を解析後，鉛直変化を抽出することも検討している．棚氷の静水圧平衡線と確実に着底している位置までの間は，接地領域である．接地領域の hinge line では表面低下が生じる場合があるので，鉛直変化の縦断プロファイルが接地線検出の指標となる可能性がある．東南極の氷河は，海水準より低い地盤に載る西南極と違い，潮汐変動で接地線を検出するには非常に難しい場合があることがわかった．東南極において衛星画像データから接地線を検出する方法は今後の継続した課題である．

参考文献

Aoyama, Y., Kim, T-H. Doi, K., Hayakawa, H., Higashi, T., Ohsono, S., Shibuya, K., Observations of vertical tidal motions of a floating iceberg in front of Shirase Glacier, East Antarctica, using a geodetic-mode GPS buoy. ***Polar Science***, 10 (2), 132-139, 2016. https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.02.005.

Bindschadler, R., Choi, H., High-resolution Image-derived Grounding and Hydrostatic Lines for the Antarctic Ice Sheet. ***U.S. Antarctic Program (USAP) Data Center***, 2011a. https://doi.org/10.7265/N56T0JK2

Bindschadler, R., Choi, H., Wichlacz, A., Bingham, R., Bohlander, J., Brunt, K., Corr, H., Drews, R., Fricker, H., Hall, M., Hindmarsh, R., Kohler, J., Padman, L., Rack, W., Rotschky, G., Urbini, S., Vornberger, P., Young, N., Getting around Antarctica: new high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International Polar Year. ***The Cryosphere***, 5, 569–588, 2011b. https://doi.org/10.5194/tc-5-569-2011

Fricker, H. A., Coleman, R., Padman, L., Scambos, T. A., Bohlander, J., Brunt, K.M., Mapping the grounding zone of the Amery Ice Shelf, East Antarctica using InSAR, MODIS and ICESat. ***Antarctic Science***, 21(5), 515–532, 2009. doi:10.1017/S095410200999023X

Fukuda, T., Sugiyama, S., Sawagaki, T., Nakamura, K., Recent variations in the terminus position, ice velocity and surface elevation of Langhovde Glacier, East Antarctica. ***Antarctic Science***, 26(6), 636–645, 2014.

Goldstein, R, Engelhardt, H., Kamband, B., Frolich, R., Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. ***Science***, *262*, 1525-1530, 1993. https://doi.org/10.1126/science.262.5139.1525

Hirano, D., Tamura, T., Kusahara, K., Ohshima, K.I., Nicholls, K.W., Ushio, S., Simizu, D., Ono, K., Fujii, M., Nogi, Y., Aoki, S., Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. ***Nature***

Communications, 11, 4221-4221, 2020.

Hogg, A., Shepherd, A., Gourmelen, N., Engdahl, M., Grounding line migration from 1992 to 2011 on Petermann Glacier, North-West Greenland. ***Journal of Glaciology***, 62(236), 1104-1114, 2016. doi:10.1017/jog.2016.83

Howat, I.M., Porter, C., Smith, B.E., Noh, M-J., Morin, P., The Reference Elevation Model of Antarctica, The Cryosphere, 13, 665-674, 2019. https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019

Konard, H., Shepherd, A., Gilbert, L., Hogg, A.E., McMillan, M., Muir, A., Slater, T., Net retreat of Antarctic glacier grounding lines. ***Nature Geoscience***, 11, 258–262, 2018. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0082-z

Lee, H., Seo, H., Han, H., Ju, H., Lee, J., Velocity Anomaly of Campbell Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential Interferometric SAR and Ice Penetrating Radar. ***Remote Sensing***, 13, 2691, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13142691

Lyard, F.H., Allain, D.J., Cancet, M., Carrère, L., Nicolas, P., FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. ***Ocean Science***, 17, 615–649, 2021. https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021

Minowa, M., Podolskiy, E.A., Sugiyama, S., Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica. ***Annals of Glaciology***, 60(79), 2019. doi:10.1017/aog.2019.25

Nakamura, K., Yamanokuchi, T., Doi, K., Shibuya, K., Net mass balance calculations for the Shirase Drainage Basin, east Antarctica, using the mass budget method. ***Polar Science***, 10 (2), 111-122, 2016. https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.008.

Nakamura, K., Aoki, S., Yamanokuchi, T., Tamura, T., Doi, K., Validation for ice flow velocity variations of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 offset tracking. ***IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing***, 15, 3269-3281, 2022. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3165581

Rignot, E., Tidal motion, ice velocity and melt rate of Petermann Gletscher, Greenland, measured from radar interferometry. ***Journal of Glaciology***, 42(142), 476-485, 1996. doi:10.3189/S0022143000003464

Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Antarctic grounding line mapping from differential satellite radar interferometry. ***Geophysical Research Letters***, 38, L10504, 2011. doi:10.1029/2011GL047109

Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., MEaSUREs Antarctic Grounding Line from Differential Satellite Radar Interferometry, Ver. 2 [Data Set]. Boulder, Colorado USA. ***NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center***, 2016. https://doi.org/10.5067/IKBWW4RYHF1Q

Yamanokuchi, T., Doi, K., Shibuya, K., Validation of grounding line of the East Antarctic Ice Sheet derived by ERS-1/2 interferometric SAR data. ***Polar Geoscience***, 18, 1-14, 2005.

南半球における中高緯度大気循環の不確実性、南極暖湿化の原因とその影響の定量化

猪上淳[1,2,3]、佐藤和敏[4,3]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]海洋研究開発機構、[4]北見工業大学

A01(公募）南半球における中高緯度大気循環の不確実性の定量化（代表：猪上淳）
B01(公募）南極暖湿化の原因とその影響の定量化（代表：佐藤和敏）

１．研究成果

本研究課題では、①中緯度海洋前線変動と南極温暖化、②南極圏の大気現象の変動、③極域予測年(YOPP)に関連した予測可能性、に関する研究を実施した。

１－１．中緯度海洋前線変動と南極温暖化に関する研究

南極半島の温暖化について、これまで熱帯や海氷の多寡の影響について指摘されてきた。しかし、北半球では中緯度の海面水温（SST）変動が高緯度の大気循環場へ与える影響が議論されており、南半球ではこれらの関係性はほとんど議論されていなかった。

そこで本研究では、中緯度海洋前線帯であるタスマン海の SST 変動による遠隔応答について、大気再解析データおよび大気大循環モデルを用いた解析を行った（Sato et al. 2021, *Nature comm.*）。冬季タスマン海の SST が上昇すると、南大洋域のストームトラックが極域側にずれ、その応答として南極半島付近の海氷減少と気温上昇がもたらされていた。大気大循環モデルを用いた SST の感度実験から、タスマン海水温の昇温のみで上記の大気応答が発生しており、このメカニズムはエルニーニョ南方振動(ENSO)や南極振動(AAO)とは独立した現象であることが示された。中緯度海洋の変動が南極の気候システムの変動の理解に重要であることを示した点が評価され、Nature communications の Editor's Highlight に選出された。

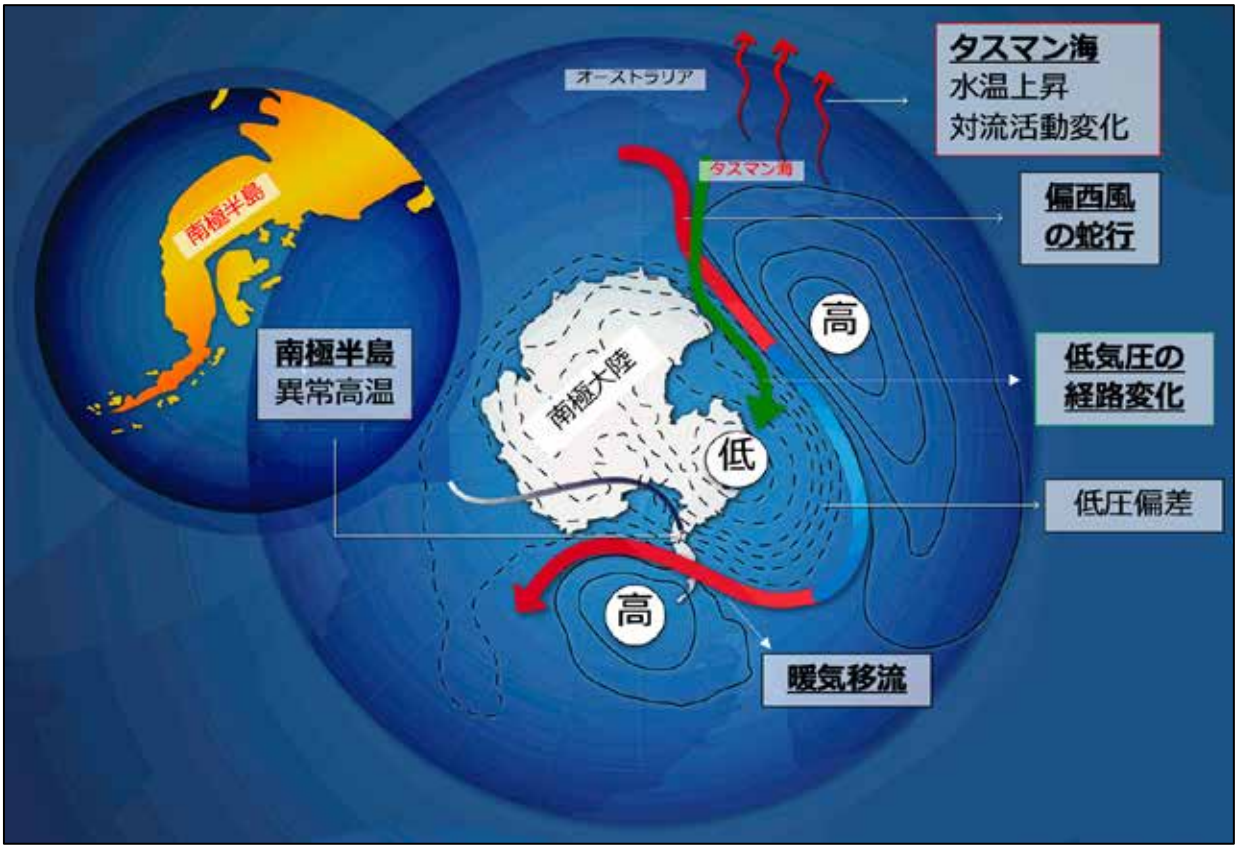


図1：タスマン海の昇温が南極半島の昇温を引き起こすメカニズムの概略図(Sato et al. 2021, Nature comm.)

１－２．南極圏の大気現象の変動に関する研究

南極圏の温暖化について、これまで様々なデータセット（再解析、衛星、地表観測データなど）を用いた解析が実施され、地表付近の気温変動の傾向や強さはデータセットや解析期間毎に異なることが報告されている。しかし、地表温度の長期変動やその原因についてはほとんど議論されてこなかった。

そこで再解析データを使用し、様々な期間（数年から数十年間の変動）を対象にして地表温度の変動やその原因を調査した（Sato and Simmonds 2021, *Env. Res. Lett.*）。解析期間が長期間（1950～2021 年）になると、ほとんどの季節（夏以外）で統計的に優位な地表の温暖化傾向が南極大陸で見られ、特に冬の温暖化が顕著であることがわかった。この地表の温暖化は、中緯度から南極大陸へ暖湿流が増加することで地表気温の上昇や雲量が増加し、地表へ到達する下向き長波放射の増加が原因であることが示された。

南大洋上の変動については、Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation（CALIPSO）衛星で取得された雲の観測データを使用し、放射特性に影響する雲の相状態（水雲か氷雲か）や存在環境の特徴を調べた（Sato and Inoue 2021, *Geophys. Res. Lett.*）。夏の南極大陸沿岸領域では、一般的に氷雲が形成される気温より比較的高い約-10℃以上の環境下で氷雲の存在割合が比較的高く、特に大陸からの寒気の吹き出しが強い時（海洋から大気へ熱や物質供給が活発になる時）に存在割合が高くなることから、海洋生物由来の粒子が氷晶の核となり氷雲の形成を促進している可能性があることが示された。

１－３．極域予測年(YOPP)に関連した予測可能性に関する研究

海洋研究開発機構のデータ同化システムや大気大循環モデルを使用し、日本の南極基地で取得された鉛直気象観測データが南半球の天気予報精度に与える影響を調査した。

ドームふじで実施したラジオゾンデ観測データは、昭和基地にブリザード級の暴風をもたらした南極大陸沿岸に接近した低気圧の予測精度向上に効果的であることを実証した(Sato et al., 2020, *Adv. Atm. Sci.*)。南極氷床上空の対流圏上層の渦位偏差に観測シグナル（観測の実施・未実施で生じた差）が取り込まれ、それが上空の風により南大洋上へ伝搬することで低気圧の発生場所や強さの予測向上に影響を与えていることが示された。同様の結果は ECMWF(観測あり)と気象庁(観測なし)の現業予報でも確認でき、前者の方がこの事例を高精度に予報できることがわかった。これまでの研究の成果も盛り込んだ南極 YOPP の Overview 論文を投稿し(Bromwich et al., 2020, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*)、日本のプレゼンス向上に努めた。

一方、現業の予報機関では同化されていない既存の観測システム（南極昭和基地大型大気レーダー：PANSY レーダー）による観測データの影響を調査する同化実験も行った（Sato et al. 2022, *Quart.J. Roy. Meteor. Soc.*）。PANSY レーダーの観測データを予報計算に取り込むことで、夏季のオーストラリアに高温を引き起こした低気圧の中心位置や気圧予報の精度が向上することを明らかにした。南極大陸沿岸域の観測は、観測シグナルが大陸周辺の偏西風の影響を受けやすいことから中緯度へ伝搬しやすく、南半球中緯度の天気予報にも重要であることが示された。今後は、現業予報にリアルタイムで組み込む手法などを検討していく。

参考文献

Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, N. Hirasawa, K. Sugiura, K. Yamada, Antarctic radiosonde observations reduce uncertainties and errors in reanalyses and forecasts over the Southern Ocean: an extreme cyclone case, *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(5), 431-440, 2020.

Bromwich, D. H. and 37 co-authors (J. Inoue: 第 22 番著者), The Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere (YOPP-SH), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 10, E1653-E1676, 2020.

Sato, K., J. Inoue, I. Simmonds, I. Rudeva, Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures, *Nature Communications*, 12(1), 2021.

Sato, K., I. Simmonds, Antarctic skin temperature warming related to enhanced downward longwave radiation associated with increased atmospheric advection of moisture and temperature, *Environmental Research Letters*, 16, 064059, 2021.

Sato, K., J. Inoue, Seasonal Change in Satellite-Retrieved Lower-Tropospheric Ice-Cloud Fraction over the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL095295, 2021.

Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, Y. Tomikawa, K. Sato, Reduced error and uncertainty in analysis and forecasting in the Southern Hemisphere through assimilation of PANSY radar observations from Syowa Station: a mid-latitude extreme cyclone case, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2022.

地表面フラックス見積もりスキームの改良
－氷床の表面質量収支評価改善にむけて－

西澤誠也[1]
[1]理化学研究所

B01(公募）地表面フラックス見積もりスキームの改良とそれによる南極域氷床の表面質量収支評価改善（代表：西澤誠也）

１．背景と目的

大気運動にとって、下部境界は非常に重要な役割を果たしている。地表面においては、大気と地面間で熱・運動量・物質が交換され、それらは大気運動の源になっている。したがって、大気運動を考えるうえで地表面におけるフラックス量を正確に見積ることが重要である。また、氷床にとっても、地表面でのフラックスは成長・減少を決める最も重要な要素であり、氷床の質量収支を考えるうえでも地表面フラックスを正確に見積ることは不可欠である。
南極域では、地表面が非常に冷たくなるなど、極めて強い静的安定状態がしばしば出現する。安定時の地表面フラックス量の見積りは不安定時に比べて難しいことが知られており、その見積りに大きな誤差が生じることが問題となっている (e.g., Viterbo et al. 1999)。例えば、南極域における数値シミュレーションにおいて、強安定時に風速が弱くなると、地表面フラックスがほとんど出なくなり、その後、日射が入り弱安定な状態になっても地表が冷たいままで大気と非物理的にデカップルした状態が続いてしまうということが起こる (Holtslag et al. 2013)。そこで実際のシミュレーションを行う際には、観測に合うように人工的に境界層内の混合を強くするなど、非物理的な対処療法によりこの問題を回避している。このような方法では、観測データと比較できる現在気候におけるシミュレーションの再現性は高くすることができても、観測による制約が難しい古気候や将来気候における計算ではその妥当性を評価することができない。したがって、現在用いられている地表面フラックスの見積り手法をできるだけ物理的な根拠を基に改良することが重要である。
そこで、本研究では、シミュレーションにおいて地表面フラックスを見積もっている既存スキームがもつ問題を解決し、より正確な見積もりを可能とするスキームを開発し、氷床の表面質量収支の評価改善に寄与する。

２．結果

地表面フラックス見積もりスキームの多くは、相似則とよばれる半理論半経験法則に基づいて構築されているが、既存のスキームでは、シミュレーションモデル内の変数と相似則の式の変数とが整合していないという問題があった。そこで、本研究では、その不整合を解決した新しい地表面フラックス見積もりスキームの開発に成功した (Nishizawa and Kitamura 2018)。そして、そのスキームの検証のため、静的不安定大気境界層のラージエディーシミュレーションを行い、従来の手法では 5% 程度地表面フラックスを過小評価する場合があることを明らかにした。また、従来の手法では、シミュレーション解像度を上げると誤差が増大することを明らかにするとともに、新スキームでは解像度に対して地表面フラックスの値が収束することを示し、新スキームの優位性を示した (図 1)。
南極域などでしばしば観測されるような強い静的安定状態における境界層のシミュレーションにおいても、不安定状態におけるシミュレーションと同様に従来の手法では地表面フラックスは過小評価であることが明らかになった。しかしながら、静的安定時においては解像度に対する収束性は新スキームで

もあまり改善しなかった。単一カラム実験などいくつかの数値シミュレーション実験の結果、これは強安定状態でのサブグリッド乱流モデルがもつ問題が主な原因であるとの結論に至った。したがって、今後は、地表面フラックス見積もりスキームだけでなく、サブグリッド乱流モデルの改良も併せて行っていく必要がある。

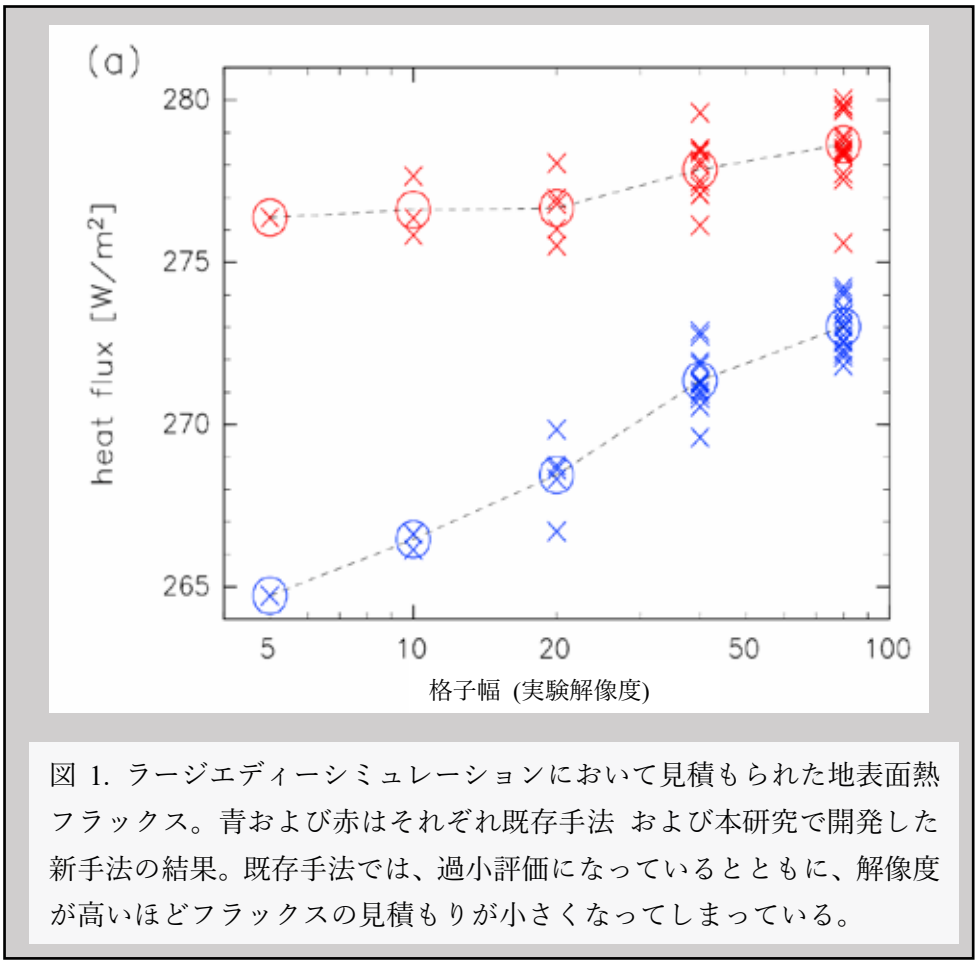


図 1. ラージエディーシミュレーションにおいて見積もられた地表面熱フラックス。青および赤はそれぞれ既存手法 および本研究で開発した新手法の結果。既存手法では、過小評価になっているとともに、解像度が高いほどフラックスの見積もりが小さくなってしまっている。

参考文献

Nishizawa, S. and Y. Kitamura, A surface flux scheme based on the Monin-Obukhov similarity for finite models, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **10**, 3159-3175, 2018.

衛星観測を用いた南大洋の雲の研究

千喜良　稔
東京大学大気海洋研究所

B01(公募）衛星観測と LES を用いた南大洋の下層雲の研究（代表：千喜良稔）

１．背景と目的

南大洋と呼ばれる南極を取り巻く海（おおよそ南緯 60 度以南）は、海洋の深層循環を駆動する南極低層水が形成される現場であり、気候システムにおいて大きな役割を果たしている。氷期・間氷期サイクルやダンスガード・オシガー振動などの過去の大きな気候の変動を理解する上で、また、将来の気候における南極氷床の変化を精度よく予測する上で、南大洋の気候の再現性は極めて重要である。しかしながら、多くの気候モデルにおいて、南大洋の雲量の顕著な過小評価が大きな問題となっている（Trenberth and Fasullo, 2010）。この地域で雲量が過小評価されることで、南大洋の海面水温は大きく過大評価され、ひいては南極周辺の海氷分布や大気の循環に大きなバイアスを生んでいる。このことは、過去の大規模な気候変動の再現実験ならびに温暖化の気候感度や南極氷床の変化の予測など、幅広い研究テーマに大きな困難をもたらしている。

近年、衛星観測により、南大洋の雲では過冷却水が卓越していることが知られるようになった。また、モデルにおいて南大洋の過冷却水を増やす方向にチューニングすると、この地域の雲量も大きく改善することが明らかとなっている（Vergara -Temprado et al., 2018）。しかしながら、過冷却水の表現が改良されたモデルにおいても、対流圏下層の雲量はまだ過小評価されており、全球の放射収支において依然として顕著な放射バイアスが残っている（Kuma et al., 2019）。また、過冷却水が卓越する素過程にはまだわからないことが多く、モデルにおける過冷却水の表現は、物理をモデル化したものとは言えない。

船舶による南大洋の現地観測によると、この地域では、対流圏下層で、浅い積雲が広範に見られ、そのアンビルが下層雲の雲量に大きく寄与していることがわかっている（Protat et al., 2017）。亜熱帯でよく見られる浅い積雲が通常の雲水で形成されているのに対し、この地域の雲は氷や過冷却水から成っている点に大きな特徴がある。

本研究は、南大洋の雲量に大きく寄与している浅い積雲の素過程の理解に資するべく、衛星観測データを用いて、南大洋における浅い積雲の動態を調べることを目的とする。

２．方法

CloudSat 衛星の雲レーダー（CPR: Cloud Profiling Radar）の観測データを使用した。本レーダーは、衛星直下の雲粒および粒径の小さい雨滴の鉛直プロファイルを観測することができる。南北方向の解像度は 1.1km、鉛直解像度は 480m であるため、サイズの小さな浅い積雲もぎりぎり解像することが可能である。データセットとしては、アルゴリズムによって雲の有無を判定したプロダクトである 2B-GEOPROF を用いている。CPR の性能が劣化していない期間である 2006 年 7 月から 2010 年 6 月の 4 年間のデータを解析した。2B-GEOPROF のアルゴリズムでは、ノイズの影響を除去するために、雲の領域が広めに判定される傾向があるため、サイズの小さい浅い積雲の領域を適切に判定するため、「反射強度が-27.5dBZ 以上のときのみ雲あり」という条件を追加している。

高度 960m 付近までの領域は、地表からのレーダーの反射の影響を受けて雲の有無の判定ができない仕様である。このことを考慮し、960m～1440m のピクセルに雲があり、さらに鉛直方向に連続して 960m 以上に渡って雲ありと判定された場合に、その場所に積雲があるとみなした。そして、全球を 2.5° × 2.5°の格子に分け、各格子で積雲頂高度の頻度分布を作成した。CloudSat 衛星は太陽同期軌道で

あり、緯度に依存した特定の Local time でしかデータが得られないため、日変化の大きい陸上は解析対象から外している。

本解析手法では、1km 程度以下に雲底を持ち、厚さが 1km 程度以上の雲を積雲とみなしている。しかし、中高緯度では、広範囲で大きな厚さ（2～4km）を持つ層雲である Nimbostratus（乱層雲）も発生し、これらの中には 1km 付近に雲底を持つものもあることが知られている。現状、本解析手法では、積雲と Nimbostratus の区別を行うことが難しい。解析結果の解釈の際は、その点に注意する必要がある。

3．結果

図 1 は、DJF、JJA において下層（4km 以下）、中層（4～8km）に雲頂を持つ雲の頻度分布である。また、図 2（左）は、DJF、JJA における東西方向に足し合わせた雲頂高度の頻度分布である。図 2（右）では、季節平均からの差をとっている。衛星データは、下層の浅い積雲が大陸西岸沖で卓越するという船舶の観測から知られている事実をよく捉えている。また、南大洋は、全球で高度 4km 以下の雲が最も多い地域の一つであることがわかる。このことは、この地域で浅い積雲が卓越しているという船舶による観測結果と整合的である。大気中層に雲頂を持つ雲の頻度は、南大洋で最も卓越しており、とりわけ南極大陸沿岸付近に極大を持っていることがわかる。

北半球では、下層・中層ともに冬に顕著に増加し、夏に顕著に減少する。南大洋は、北半球に比べ季節差が小さいが、南緯60°以北では、北半球と同様、冬に増加し、夏に減少している。これらの地域では、浅い積雲が比較的 SST が低い領域で卓越するという亜熱帯で見られる傾向と同じことが起こっている。一方、南緯60°以南では、逆に冬に減少し、夏に増加するというイレギュラーな変化をしていることが興味深い（図 2 右）。この地域は冬期に海氷が広がる地域であるため、海氷が広がっている場所では浅い積雲は発生しにくいことを示唆していると考えられる。

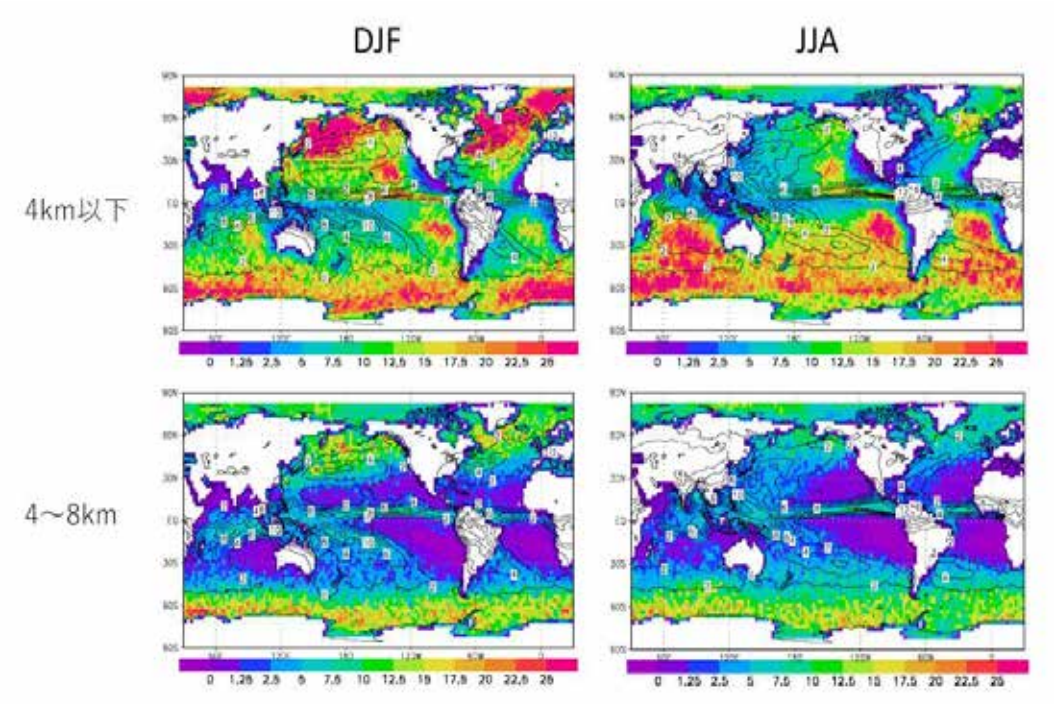


図 1：雲頂高度の頻度分布[%]。左図は DJF。右図は JJA。上段は高度が 4km 以下のもの。下段は高度が 4～8km のもの。

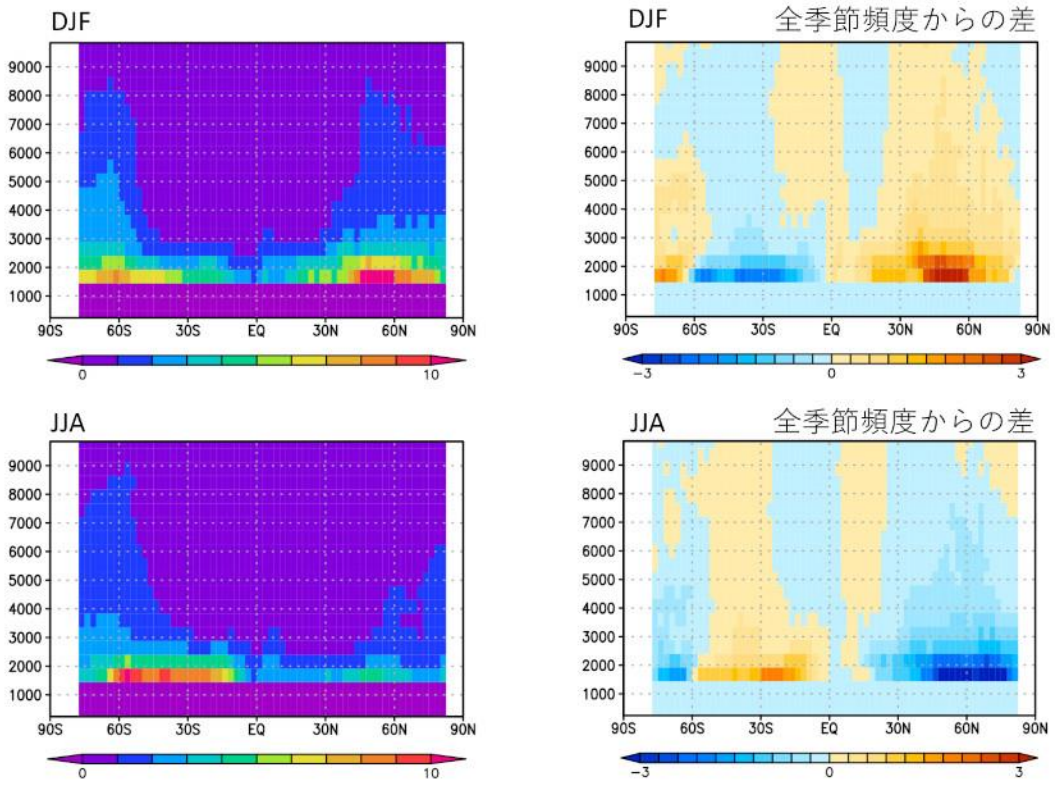


図 2：（左）東西方向に足し合わせた雲頂高度の頻度[%]。（右）（左）と同じだが、全季節の頻度からの差をとったもの。

4. 今後の課題

もともとは、南大洋の雲のパラメタリゼーションの改良を目指し、Large Eddy Simulation による浅い積雲のシミュレーション結果と組み合わせた研究を行うことを計画していたが、コロナの影響もあり、計画を変更し、衛星データを用いた解析について現状でまとめられる内容をまとめることにしたことをご理解いただきたい。しかしながら、このように積雲頂の頻度分布という基本的な図を作成したのは本研究が初めてであり、積雲頂の全球的な分布について重要な成果を出したと考えている。

南大洋については、過冷却水が卓越していることが知られており、また、その形成において、エアロゾルが重要な役割を果たしている。本研究を、CALIPSO 衛星や EarthCARE 衛星による雲氷やエアロゾルの観測データと組み合わせた研究に発展させていくことが望ましい。

極域気候モデルを用いた南極氷床表面質量収支高精度計算

庭野匡思[1]
[1]気象庁気象研究所

B01(公募）南極氷床表面質量収支高精度推定手法の確立（代表：庭野匡思）
B01(公募）過去４０年間の南極氷床表面質量収支高精度計算（代表：庭野匡思）

１．背景と目的

南極氷床では、1990 年代後半以降、雪氷質量（以下、単に質量と記す）の損失が急速に進行し、全球規模の海水準変動に影響を与えている。現在、喫緊の問題となっている温暖化の進行が将来において更に加速すると、海水準上昇に与える南極氷床の影響はより一層大きくなると考えられている。一般に、氷床の質量収支（Mass Balance; MB）は、降水量や融解・流出量の変化を規定する表面質量収支（Surface Mass Balance; SMB）と氷床流動によって海洋へ流出する量（Discharge; D）のバランスで決まる（MB＝SMB－D）。温暖化が進行すると、MB の変化に対する SMB と D の変動の各寄与は、気候変動の影響をダイレクトかつほぼ即時的に受ける SMB の方が相対的に高くなる可能性が考えられる（D の変動は SMB の変化に対する応答であり、かつ、その変動は 1 年以上の非常に長い時間スケールで起きる）。そのため、南極氷床の将来像を見通すためには、南極氷床 SMB の変動プロセスを正確に理解することが必要不可欠である。しかし、広大かつ過酷な環境の南極氷床内陸へのアクセスは非常に困難を極めることから、直接観測の数は非常に限られている。つまり、直接観測データだけで南極氷床 SMB の実態を把握することは困難である。そこで近年では、観測によって不確定性が把握されている全球気候モデルや領域気候モデルなどを用いて SMB の広域推定が行われている。

本課題代表者はこれまで、グリーンランド氷床を対象として、氷床 SMB を高精度推定することが可能な極域気候モデル NHM-SMAP（Non-Hydrostatic atmospheric Model–Snow Metamorphism and Albedo Process）（Niwano et al., 2018）を開発してきた。本モデルは、高解像度非静力学大気モデルと詳細な積雪変質モデルを組み合わせた先進的なモデルであり、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 6 次評価報告書 WG1 では、その点が評価されて引用されている。本研究では、NHM-SMAP を南極氷床に初めて適用するための技術的開発に取り組み（前期公募課題）、更に、1979 年から現在にかけての気候シミュレーションを実施した（後期公募課題）。

２．方法

前期公募課題では、グリーンランド版 NHM-SMAP をベースにして南極版 NHM-SMAP を開発した。グリーンランド版 NHM-SMAP の水平解像度は 5 km としていたが、非常に広大な南極氷床をカバーする必要がある南極版 NHM-SMAP では、計算コストの観点から水平解像度を落とす必要であった。その点について検討・調整を重ねた結果、現在の気象研究所のスーパーコンピューター（FUJITSU PRIMERGY CX2550M5）を用いる限り、水平解像度 12 km とすることが適切である、との結論に至った。南極版 NHM-SMAP を構成する大気モデルが、南極域においてその条件で問題なく動作するよう、確認を重ねた。NHM-SMAP の雪氷パートでは、まず、Slater et al. (2018)による氷床表面地形データを用いて氷床マスクの設定を行った。また、フィルン内部における融解水の鉛直方向の浸透計算について、グリーンランド版で用いている Richards 式法（Niwano et al., 2018）から、簡略かつ計算コストが低いバケツ法（Niwano et al., 2018）に変更

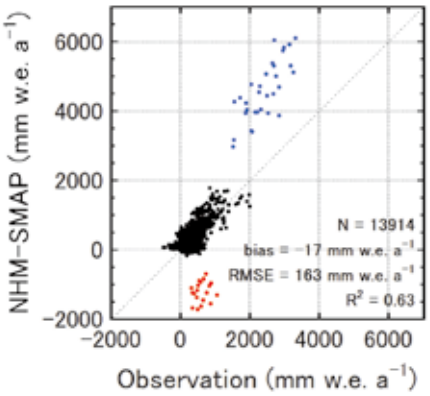


図 1：南極氷床 SMB の現地観測データ（Wang et al., 2021）と NHM-SMAP モデル計算結果の比較。青丸は Bruce Plateau における比較、また、赤丸は James Ross Island における比較結果を示す。黒丸はそれ以外の全てのサイトにおける比較結果を示す。

公募研究

した。そこで確立された南極版 NHM-SMAP を用いて、後期公募課題では、1979 年から現在にかけての長期計算を実施した。計算結果は、Wang et al. (2021)によってまとめられた現地観測データ（氷床班参画メンバーによる取得データを含む）を用いて検証した。また、今後、南極氷床における雲放射影響に着目した研究を行うために、NHM-SMAP で利用可能な雲放射に関するモデル感度実験の開発を行った。

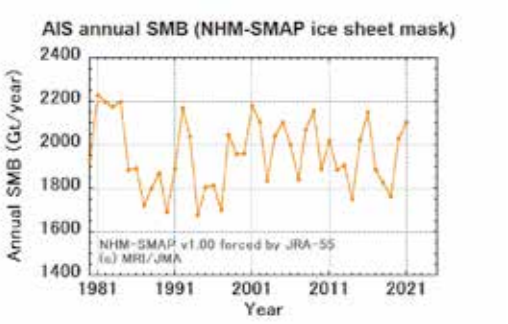


図 2：NHM-SMAP によって推定された 1980 年から 2021 年にかけての年積算南極氷床 SMB。

3．成果

南極版 NHM-SMAP モデル検証結果（図 1）によると、南極半島に位置する Bruce Plateau と James Ross Island においてモデルと観測の乖離が特に大きくなったものの、全体としてみると、グリーンランド氷床における先行研究（Niwano et al., 2018）と遜色ないモデル計算精度を得た。南極半島は、南極域の中でもとりわけ地形が複雑な領域であるため、水平解像度 12 km では現実地形を十分に解像出来ていない可能性が考えられた。領域積算した 1980 年から 2021 年にかけての年積算南極氷床 SMB 推定結果（図 2）によると、この間、明瞭な増加・減少トレンドは見られなかった。この点は、Mottram et al. (2021)の推定結果と整合的である。ただし、定量的には、Mottram et al. (2021)に示されている複数のモデル計算結果と本研究を含めて、モデル間のばらつきが大きく、更なるモデル研究が必要であることが示唆される。そこで、Antarctic CORDEX（Coordinated Regional Downscaling Experiment）と呼ばれる国際プロジェクト（https://climate-cryosphere.org/antarctic-cordex/）に参画して、海外のモデルコミュニティと密接に情報交換を行っていくことにした。上記の Antarctic CORDEX HP には、参画しているモデルグループがリストされている。

NHM-SMAP で利用可能な雲放射に関するモデル感度実験の開発では、NHM-SMAP グリーンランド版を用いて、グリーンランド氷床の SMB に対する雲の影響を調べた（Niwano et al., 2019）。モデルの中で仮想的に快晴条件を仮定する感度実験を行った結果、雲の存在は、“1 週間程度の時間スケール”で見ると下向き長波放射加熱を助長して氷床表面融解を加速させることがあるものの、“ 気候学的な時間スケール”（ひと夏より長い時間スケール）で見ると下向き短波放射を減少させて SMB 減少を抑制する役割を担うことが示された。この研究成果も IPCC 第 6 次評価報告書 WG1 において引用された。氷床表面融解に対する雲放射影響が IPCC 報告書で言及されたのは今回が初めてであり、現在ホットなトピックとして認識されている。

その他、国内の共同研究者と共に、今後の SMB 研究展開を見据えた総説論文（庭野ほか, 2021）を執筆し、国内の研究コミュニティに本取り組みを周知した。

4．領域内連携

・南極版 NHM-SMAP で用いる氷床マスクの設定に際しては、氷床班参画メンバーの津滝俊博士が入手して後処理した氷床表面地形データ（Slater et al., 2018）の提供を受け、それをモデルにおいて利用した。
・南極氷床における NHM-SMAP モデル検証では、氷床班参画メンバーらが取得している SMB 現地観測データも活用された。

5．今後の課題

領域気候モデルを実行するためには、計算領域の側面境界における大気場の時空間変動に関する情報が必要である。現在運用している南極版 NHM-SMAP では、気象庁の最新の再解析データである JRA-55（Kobayashi et al., 2015）を側面境界条件として利用している。しかし、南極域における再解析データの品質は、再解析データ間で大きくばらついていることが近年分かってきており、再解析データの選択が SMB 推定結果に無視できない影響を与える可能性が考えられる。今後は、複数の再解析データで南極版 NHM-SMAP を駆動することを検討している。また、可能な限りモデルを水平高解像度化していく

取り組みも重要である。

参考文献

Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., and Takahashi, K., The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **93**, 5–48, https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001, 2015.

Mottram, R., Hansen, N., Kittel, C., van Wessem, J. M., Agosta, C., Amory, C., Boberg, F., van de Berg, W. J., Fettweis, X., Gossart, A., van Lipzig, N. P. M., van Meijgaard, E., Orr, A., Phillips, T., Webster, S., Simonsen, S. B., and Souverijns, N., What is the surface mass balance of Antarctica? An intercomparison of regional climate model estimates, *The Cryosphere*, **15**, 3751–3784, https://doi.org/10.5194/tc-15-3751-2021, 2021.

Niwano, M., T. Aoki, A. Hashimoto, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Fujita, A. Tsushima, Y. Iizuka, R. Shimada, and M. Hori, NHM–SMAP: spatially and temporally high-resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, **12**, 635-655, https://doi.org/10.5194/tc-12-635-2018, 2018.

Niwano, M., Hashimoto, A., and Aoki, T., Cloud-driven modulations of Greenland ice sheet surface melt, *Sci. Rep.*, 9, 10380, https://doi.org/10.1038/s41598-019-46152-5, 2019.

庭野匡思, 青木輝夫, 橋本明弘, 大島 長, 梶野瑞王, 大沼友貴彦, 藤田耕史, 山口 悟, 島田利元, 竹内 望, 津滝 俊, 本山秀明, 石井正好, 杉山 慎, 平沢尚彦, 阿部彩子, 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み：2020 年夏最新版. *雪氷*, **83**, 27-50, https://doi.org/10.5331/seppyo.83.1_27, 2021.

Slater, T., Shepherd, A., McMillan, M., Muir, A., Gilbert, L., Hogg, A. E., Konrad, H., and Parrinello, T., A new digital elevation model of Antarctica derived from CryoSat-2 altimetry, *The Cryosphere*, **12**, 1551–1562, https://doi.org/10.5194/tc-12-1551-2018, 2018.

Wang, Y., Ding, M., Reijmer, C. H., Smeets, P. C. J. P., Hou, S., and Xiao, C., The AntSMB dataset: a comprehensive compilation of surface mass balance field observations over the Antarctic Ice Sheet, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 3057–3074, https://doi.org/10.5194/essd-13-3057-2021, 2021.

衛星観測に基づいた沿岸ポリニヤにおける海氷生産量ならびに海氷域の熱塩フラックス

二橋　創平[1,2]
[1]苫小牧工業高等専門学校、[2]北海道大学低温科学研究所

B02(公募）高精度薄氷厚推定アルゴリズムの開発とその氷厚を用いた海氷生産量データセットの作成
B02(公募）海氷過程の定量的なデータセットから示す熱塩フラックス，物質輸送，そして生物生産

海氷の一生（結氷・移流・融解）は、熱と塩/淡水，物質の再分配と輸送を引き起こし、海洋構造や生物環境を短期間に劇的に変化させる。例えば、沿岸ポリニヤ（風等により発散場になり形成される薄氷域）では、冬期間の盛んな結氷に伴い、大量の高塩で低温の高密度水が排出される。この高密度水は世界中の中・底層水の重要な起源水である。さらにその沈み込みは、気候システムの最重要構成要素の一つである海洋の熱塩循環に重要な役割を果しており、大気中の熱や二酸化炭素等の物質を海洋深層へと運んでもいる。また逆に、海底の鉄分や堆積物が巻き上がり、海氷に取り込まれているとも考えられている。これらのメカニズムを通して海洋の中―底層水は熱や二酸化炭素のシンクとして気候システムに重要な役割を果たしているとともに、海氷による淡水の輸送と供給が気候システムに重要な役割を果たしていることも指摘されている。さらに融解に伴う淡水や鉄分等の供給により、生物のホットスポットが形成されるとも考えられている。しかしながら、海氷による熱と塩/淡水，物質の再分配と輸送の過程や、それらに伴う生物過程はまだ十分に明らかになっていない。本研究課題では、何処でどれだけ海氷が生産されており、そして何処でどれだけ融解しているかを明らかにする熱塩フラックスデータセットを、衛星観測データに基づいて作成することを目指した。

まず、沿岸ポリニヤ域における海氷生産量の見積もりを行った。これは、これまでの衛星観測によるもの（Nihashi and Ohshima, 2015; Nihashi et al., 2017）を基にした。これらの研究では、マイクロ波放射計により観測される輝度温度から沿岸ポリニヤ域を検出し、そこでの薄い氷の厚さを見積もり、その氷厚を用いた熱フラックス計算から大気に奪われる熱がすべて結氷に使われると仮定して海氷生産量を見積もっている。薄氷厚推定アルゴリズムは、薄い氷の厚さが輝度温度の偏波比と負の相関関係になる特性に基づいている。アルゴリズム開発のために比較する氷厚は、MODIS による晴れた日の赤外線画像から薄氷表面の温度を求め、その表面温度を用いた熱フラックス計算から見積もられるものを用いている。アルゴリズム開発と海氷生産量の見積もりの際の熱フラックスの気象のインプットデータ（気温や風速）として、これまでの研究では ERA-Interim が用いられていた。しかし ERA-Interim は 2018 年の途中で後継の ERA5 に代わってしまい、更新されなくなってしまった。そこで、2018 年以降の最新のものを含む海氷生産量の見積もりのために、薄氷厚アルゴリズムの再開発と生産量の再見積もりを行った。用いた衛星観測データは、マイクロ波放射計 AMSR-E（2002－2010）とその後継機である AMSR2（2012－）である。時間分解能は 1 日、空間分解能は約 6 km である。AMSR-E と AMSR2 は観測期間が重なっていないため、空間分解能は粗い（約 12km）が両観測期間をカバーするマイクロ波放射計 SSM/I による生産量と比較・検証し、AMSR-E と AMSR2 を組み合わせて約 20 年間分の高空間分解生産量の時系列として使用できることを確認した。AMSR-E と AMSR2 による海氷生産量のマップを図 1 に示す。生産量の分布は従来のものと大きくは変わらないが、新しい薄氷厚アルゴリズムは従来のものより数 cm 氷厚を薄く見積もり、海氷生産量はポリニヤにより若干異なるが、10－30%程度多く見積もられることが示された。AMSR-E と AMSR2 の空間分解能で解像できる、全 110 箇所の沿岸ポリニヤ域における海氷生産量を足し合わせたものの時系列を図 2 に示す。AMSR-E と AMSR2 の期間における全積算生産量の平均はそれぞれ 2948.5×10^9 m^3 と 2769.2×10^9 m^3 であった。AMSR-E/2 (2002–21）期間の生産量トレンドは、-11.2×10^9 m^3/yr (－3.9%/decade）であった。このトレンドとの対応は明確ではないが、南極海の海氷面積は、2017 年以降急激に減少したことが示されている (Parkinson et al., 2019)。本研究で作成した 20 年間分の高空間分解の海氷生産量データセットは、気候変動に関する研究を行う上で重要なものである。2023 年度に打ち上げ予定である AMSR2 の後継機である AMSR3 による継続的な観測により、より理解が深まることが期待される。

熱塩フラックスデータセットの作成は、主にマイクロ波放射計 AMSR-E ならびに AMSR2 による衛星観測による海氷データを用いた熱フラックス計算に基づいている。熱フラックス計算のための大気のインプットデータは、ERA5 を用いた。計算は 2002/03―2010/11 と 2013/14―2020/21 の 4 月から翌年の 3 月の期間について行った。時間分解能は 1 日、空間分解能は約 6 km である。海氷生産量は沿岸

ポリニヤにおけるもの（図１）とリード（海氷野における開水面の部分）でのものを考えた。リードにおける生産量は、AMSR-E ならびに AMSR2 による海氷密接度を用いて、大気に奪われる熱がすべて結氷に使われると仮定して見積もった。海氷融解量は、海氷密接度の変化から一定の氷厚を仮定して見積もった。この一定の氷厚は、結氷量と融解量のそれぞれの総量がバランスするものを用いた。海氷密接度の変化は、海氷の移流によるものも考慮した。海氷の移流は、AMSR-E ならびに AMSR2 による輝度温度を用いた面相関法から求めたものを用いた。塩フラックスは、海洋と海氷の塩分を仮定し、結氷と融解に伴う海氷の体積変化から見積もった。これら方法は、AMSR-E による衛星観測の海氷データを用いてオホーツク海で熱塩フラックスを見積もったもの（Nihashi et al., 2012）に基づいている。年間平均した熱収支の気候値を図３a に示す。沿岸ポリニヤが存在するような高緯度側で大気に熱が奪われる負の値を示す。一方で高緯度側では正の値を示す。このような南北での熱収支のコントラストが周極的に分布していることが示された。年間平均の塩収支を図３b に示す。沿岸側で海洋への塩供給を、沖の氷縁側で海洋への淡水供給を示す正負のコントラストの周極的な分布を示した。図３から、海氷による高緯度側から低緯度側への負の熱と淡水の輸送が示唆される。本研究で作成した熱塩フラックスデータセットは、モデルの比較・検証やモデルの境界条件としてや、物質循環や生物基礎生産に関する研究に応用することが可能である。

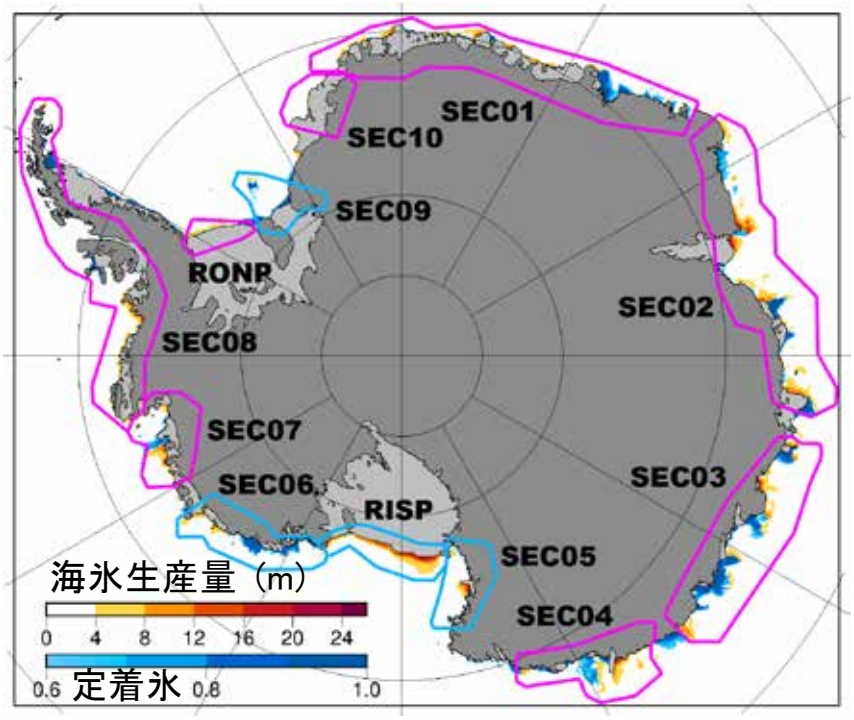


図１　AMSR-E と AMSR2 による年間積算（4 月から翌年の 3 月まで）海氷生産量の気候値（2003―11; 2013―20）。青色で示される AMSR-E と AMSR2 により検出された定着氷は、出現頻度を示す。

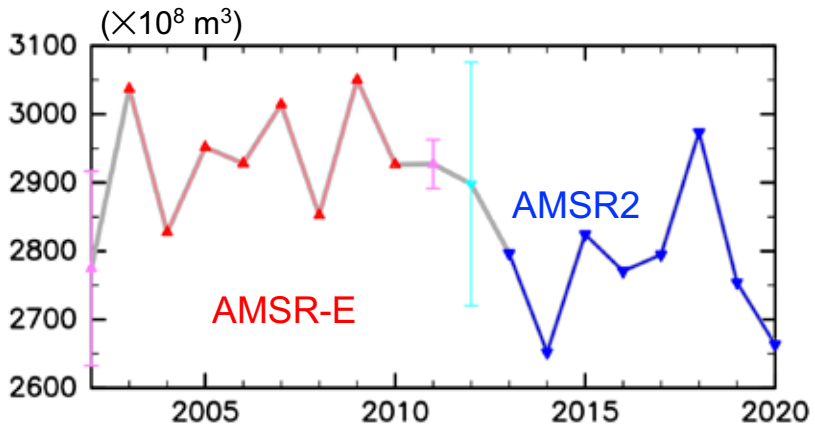


図２　全 110 箇所の沿岸ポリニヤ域における年間積算（４月から翌年３月のまで）海氷積算量の合計の時系列。2002，11, 12 年における AMSR-E（2002―11）と AMSR2（2012―21）のデータがない期間は、代わりに SSM/I によるものを用いた。

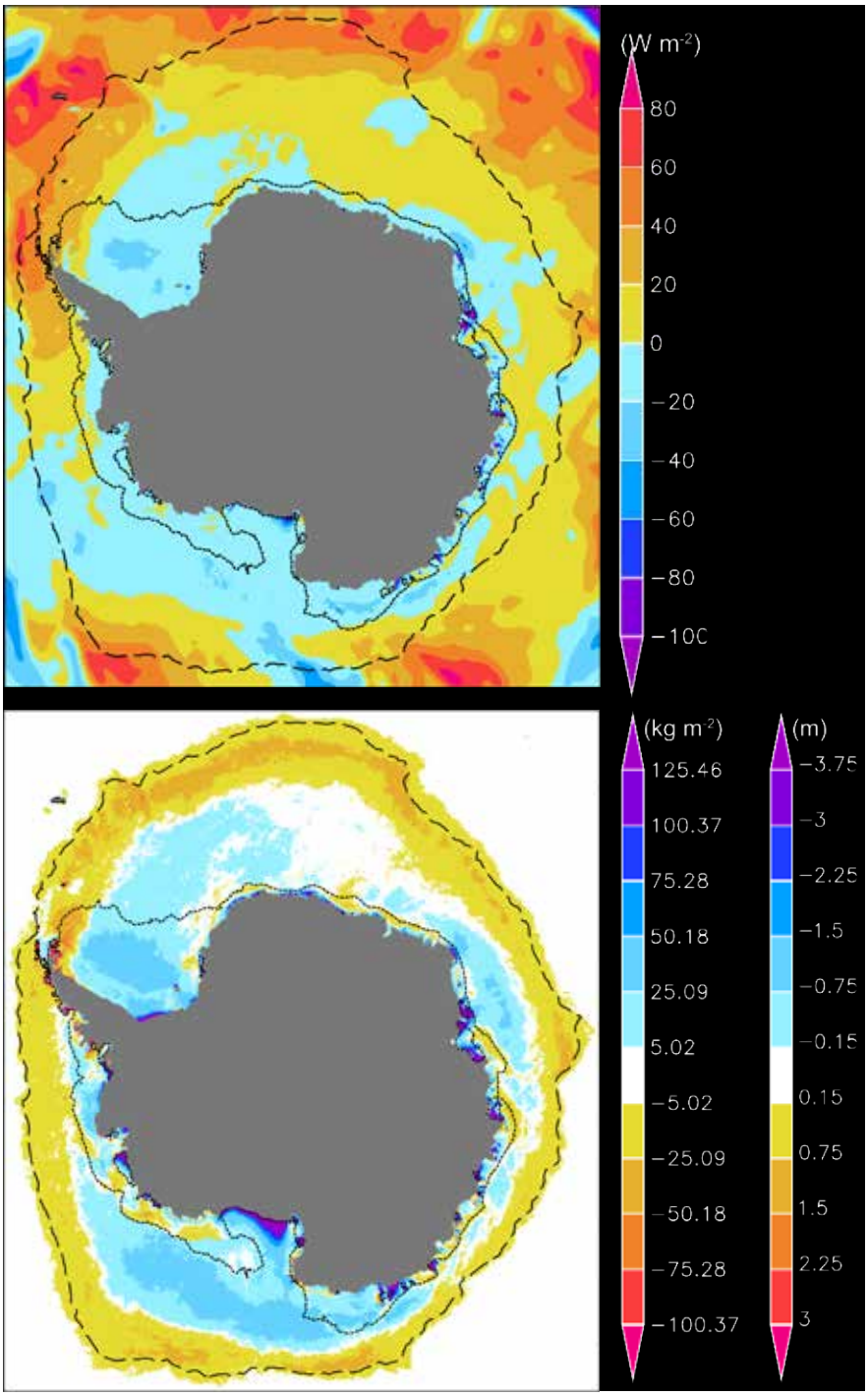


図３　(a) 年間平均熱収支の気候値（2003—11; 2013—20）。正の値は海洋が大気から熱を受け取る場合に相当する。(b) 年間平均塩（kg m^{-2}）・淡水（m）収支の気候値。破線は９月の氷縁位置を、点線は２月の氷縁位置の気候値を示す。

参考文献

Nihashi, S and K. I. Ohshima (2015) Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: relationship and variability, *J. Clim.*, 28(9) 3650-3670.

Nihashi, S, K. I. Ohshima, and T. Tamura (2017) Sea-ice production in Antarctic coastal polynyas estimated from AMSR2 data and its validation using AMSR-E and SSM/I-SSMIS data, *IEEE JSTAS*, 10(9), 3912-3922.

Parkinson, C.L. (2019) A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic, *PNAS*, 116 (29), 14,414-14,423.

Nihashi, S, K. I. Ohshima, and N. Kimura (2012) Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea ice production and melting in the Sea of Okhotsk, *J. Clim.*, 25(7) 2261-2278.

衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床質量変動と GIA の分離

山本圭香[1], 奥野淳一[2], 土井浩一郎[2], 福田洋一[2]
[1]国立天文台, [2]国立極地研究所

B02(公募) 衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床の長期質量変動決定(代表：山本圭香)
A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体地球班）(代表：福田洋一)

１．背景と目的

南極氷床の融解は、グリーンランド氷床の融解、海面の熱膨張、山岳氷河や氷冠の融解とともに、全球規模の海面上昇に大きな影響を及ぼしており、氷床の質量バランスを正確に見積もることは気候変動の研究にとって重要である。南極全域、西南極、東南極といった広域の氷床質量バランスは、従来、流域ごとの地上観測に基づく質量収支の総和として算出されていたが、近年の衛星測地技術の発展に伴い、その導出方法は変化し、精度は大きく向上した。特に質量の変化を測定する重力測定衛星データの利用は、大スケールの氷床の時間変化を質量の変化として見積もることができる強力な手段であり、これまでに多数の研究結果が報告されている。しかしながら、重力測定衛星が観測するのは、鉛直方向の質量の変化の総和であり、南極においては氷床変動の他に Glacial Isostatic Adjustment (GIA)による固体地球内部の質量再分配の影響も顕著である。氷床の質量変動を得るには GIA の影響を差し引かなければならないが、既存の GIA モデルを使用した場合、モデル間のばらつきが非常に大きく、その結果、使用する GIA モデルの違いにより得られる氷床質量変動値が大きく異なるという問題がある。

重力測定衛星のデータに加え、氷床表面の高度の時間変化を測定する衛星高度計のデータを使用することは、この問題を解決するための手段の 1 つである。本研究では、長期の重力測定衛星および衛星高度計のデータを用いることによって、GIA モデルに依存せずに氷床変動と GIA による質量変動を分離することを目的とした。

２．方法

2-1. 使用データ

南極における質量の時間変化を得るために、GRACE 衛星重力データを用いた。利用可能な全期間（2002-2017 年）の時間変動重力場の月次データ（RL06, UTCSR, 60 次まで）を使用した。短波長域の誤差を低減するため、DDK4(Kuche et al., 2009)フィルタを適用した。

高度の時間変化については、Schröder et al.(2019)による複数のレーダー/レーザー衛星高度計データの解析結果を利用した。GRACE データの解析期間と重なる期間の結果（ERS-2、Envisat、ICESat、CryoSat-2 衛星データを用いた解析結果）を用い、比較のため、データの時間補間、空間フィルタ処理を適用し、時間、空間解像度を GRACE データと合わせた。

上記の観測データに加え、モデルデータとして、南極におけるフィルン密度モデル（Ligtenberg et al., 2011）を用いた。

2-2. データ解析

我々は、第一近似として、GIA の変動を高度で見た場合は、氷床変動による高度変化と比べ非常に小さく、高度計からは観測誤差よりも小さくて検出できない仮定し、無視して考える。そして、衛星高度計から得られた南極の高度変化が、氷床表面と下部氷床の 2 層の高度変化で説明されると近似した。

これらの仮定、近似のもと、各時刻に対し、グリッドごとに高度変化および質量変化の各時刻に対し下記の方程式を立てた。

高度変化を表す式：

$$\Delta h(\phi,\lambda,t) = \Delta h_{surface}(\phi,\lambda,t) + \Delta h_{bottom}(\phi,\lambda,t) \quad (1)$$

公募研究

質量変化を表す式：

$$\Delta m(\phi,\lambda,t) = \rho_{firn}(\phi,\lambda)\Delta h_{surface}(\phi,\lambda,t) + \rho_{ice}\Delta h_{bottom}(\phi,\lambda,t) + \dot{m}_{GIA}(\phi,\lambda)t \quad (2)$$

ここで、$\Delta h(\phi,\lambda,t)$、$\Delta h_{surface}(\phi,\lambda,t)$、$\Delta h_{bottom}(\phi,\lambda,t)$、$\Delta m(\phi,\lambda,t)$は、それぞれ、緯度$\phi$、経度$\lambda$、時刻$t$における高度変化観測値、表面高度変化、下部氷床の高度変化、質量変化観測値である。$\rho_{firn}(\phi,\lambda)$は緯度$\phi$、経度$\lambda$におけるフィルン密度モデル値である。$\rho_{ice}$は下部氷床の密度値であり、990 kg/m^3 と仮定した。$\dot{m}_{GIA}(\phi,\lambda)$は緯度$\phi$、経度$\lambda$における GIA の線形質量変化の値である。
この 2 式から、反復改良を伴う時系列方向の最小二乗法を行い、氷床変動と、GIA の成分を分離した。

3．結果

図 1 の左図は GRACE から得られた質量変化の線形トレンド、右図は推定された GIA の線形質量変動値である。GIA の推定値は、GRACE とは異なる空間パターンのトレンドを示している。推定値が大きな負の値を取る地域が存在するが、これは氷床の底面融解など、本研究で仮定した単純な 2 層の氷床モデルでは十分に説明できない氷床変化が起こっている地域と対応しており、今後は、この地域の氷床変動のメカニズムを考慮した改善が望まれる。

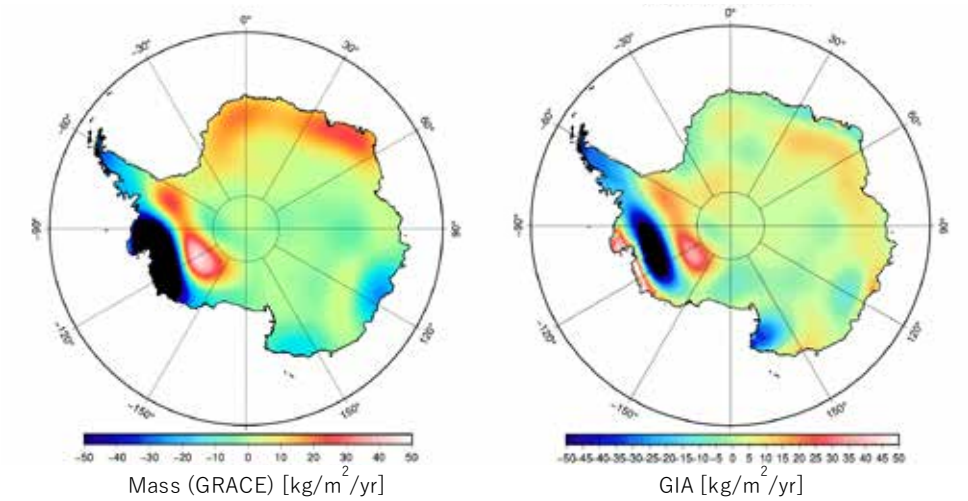


図 1 ：左：GRACE から得られた質量変化の線形トレンド（200-2-2017 年）、右：本研究で得られた GIA 変動の推定値。

4．今後の予定

上述の不自然な GIA 変動の推定地域の改善を実施後は、GRACE-FO の衛星重力データや ICESat2 の衛星高度計データを解析に取り入れ、できる限り最近のデータを含んだ形での再解析を行う予定である。また、結果の妥当性について、氷床変動および GIA のモデルとの比較、評価を実施する予定である。

参考文献

Kusche, J., Schmidt, R., Petrovic, S., Rietbroek, R., Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model, *Journal of Geodesy*, **83**, 903-913, doi:10.1007/s00190-009-0308-3, 2009.

Schröder, L., Horwath, M., Dietrich, R., Helm, V., van den Broeke, M. R., and Ligtenberg, S. R. M., Four decades of Antarctic surface elevation changes from multi-mission satellite altimetry, *The Cryosphere*, **13**, 427–449, doi: 10.5194/tc-13-427-2019, 2019.

Ligtenberg, S. R. M., Helsen, M. M., van den Broeke, M. R., An improved semi-empirical model for the densification of Antarctic firn. The Cryosphere, **5** (4), 809–819, 2011.

宇宙線変動に基づくスーパー間氷期古気候記録の陸海同期

堀内一穂[1]
[1]弘前大学大学院理工学研究科

B03(公募) 宇宙線変動に基づくスーパー間氷期古気候記録の陸海同期（代表：堀内一穂）
A02-1　南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）（代表：川村賢二）

１．背景と目的

来たるべき近未来の温暖化に備えて、現在より温暖な時代の地球の姿を理解することは、喫緊の課題と言える。温暖化世界のアナログとして、地質時代の「スーパー間氷期」が注目されている（例えば、Dutton et al., 2015）。なかでも、生物や大陸の配置が現在とほぼ異ならない直近の世界、すなわち12～13 万年前の海洋酸素同位体ステージ（MIS）5e と 40～42 万年前の MIS 11 が重要視されている。

一方で、MIS 5e や MIS 11 は、第四紀学にて知られる「^{14}C 年代と K-Ar 年代の狭間」にあたり、放射年代の適用が大きく制限された時代でもある。従って、古気候記録に年代軸を与えるためには、天文年代や層序学的な手段が必要となることがほとんどである。さらに、MIS 5 や MIS 11 の代表的な気候プロキシ曲線は、それぞれの年代モデルを横軸にした場合、両半球間、陸海間、あるいは同じ南極氷床内でも数千年やそれ以上のオフセットを示す（Past Interglacials Working Group of PAGES, 2016）。このオフセットは、年代軸の誤差に由来するみかけのものであろうか？逆にオフセットが確かにあるのであれば、正確には何年のもので、その違いは何を意味するのだろうか？その答えは、気候変動と独立にプロキシ曲線間を同期させることで、得られるはずである。

２．方法

宇宙線と大気との相互作用により生成する ^{10}Be などの宇宙線生成核種は、過去の宇宙線強度変動の、ひいてはこれのほとんどを支配する太陽活動や地磁気強度の良い代理指標である（図 1）。これは裏を返せば、^{10}Be の連続記録や地磁気強度記録に基づいて、様々な古気候アーカイブの全球対比・同期が、気候とは独立してできることを意味する。研究代表者は、こうした手法を「宇宙線層序」と名付け、実例よりその有効性を証明してきた。特に 2016 年には、南極ドームふじアイスコアと赤道域堆積物を対象に、数千年の年代モデルのオフセットを修正することで、双方の記録を精密に同期することに成功した（Horiuchi et al., 2016）。本研究では、この手法を応用して、アイスコアと海底堆積物の陸海詳細同期を試みた。

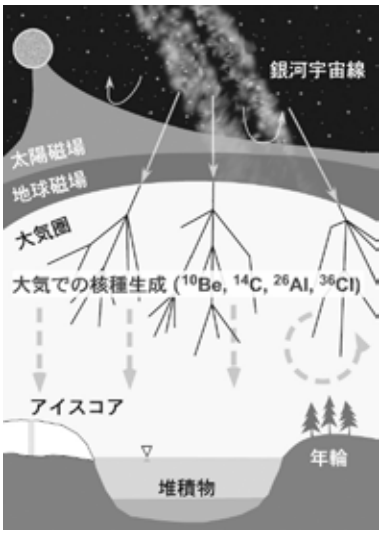


図１：宇宙線生成核種の生成と古気候アーカイブへの固定の概念図

３．成果

３－１．^{10}Be に基づく MIS5e の陸海同期

南大洋インド洋区デルカノライズにて採取された DCR-1PC コアを対象に、ターミネーション II から MIS5e のベリリウム同位体（^{10}Be/^{9}Be）変動記録を獲得し、これをドームふじアイスコアから別途得られた ^{10}Be フラックス記録と比較した。その結果、相互に対比可能な複数の変動の特徴を見出した。さらに、ドームふじアイスコアに対して AICC2012 年代、DCR-1PC コアに対して酸素同位体層序年代を適用した場合に最も陸海記録の同期性が高いことや、それでもなお相互に最大千年程度の食い違いが残されることを明らかにした。

３－２．MIS11 の ^{10}Be 記録の獲得

スーパー間氷期の一つである MIS11 に対して、ドームふじアイスコアより詳細な ^{10}Be 記録を獲得することに成功した。MIS11 の ^{10}Be 変動曲線には、タイポイントとなり得る特徴が多数認められた。

公募研究

一方で、同等に詳細な海底堆積物の ^{10}Be 記録が存在しないため、同期を試みることはできなかった。

３−３．南極表面積雪の ^{10}Be 分布の解明

陸海対比の基礎情報として、南極地域観測隊の内陸トラバースルート上での ^{10}Be の表層分布を明らかにした（Horiuchi et al., 2022）。これにより、南極での ^{10}Be の沈着過程において重要な、乾性沈着と湿性沈着の明瞭な遷移境界が見出され、^{10}Be による対比や同期に直結する水平方向の記録の連続性について新たな知見を得ることができた。

３−４．完新世の古気候記録間の同期

年輪の ^{14}C 分析により紀元前 5480 年に発見された特異な宇宙線イベントに対して、10 年解像度の ^{10}Be 記録に基づいてドームふじアイスコアを同期させた。また、同期後のアイスコアにてより詳細に ^{10}Be と ^{36}Cl を分析することで、宇宙線イベントの原因を特定した（Kanzawa et al., 2021）。この成果は、今後 MIS5e などで短期宇宙線イベントに基づく記録間同期を行う際の基礎データとなり得る。

４．領域内連携

本テーマでは、A02-1 氷床班や A01-2 古海洋班と強く連携した活動を行った。研究に用いたアイスコアや雪氷試料は、氷床班との共同研究により得られたものであり、堆積物試料は古海洋班が採取したものを分析のために提供して頂いた。議論も、これに資する参考データの提供も含めて、双方の班の協力のもとに行った。また成果の一部は、氷床班にて公表されたドームふじアイスコアの最新年代モデル（Ohyabu et al., 2022）の構築にも貢献している。

５．今後の課題

今後の課題として、本研究で得られた詳細な同期の結果に基づいて古気候記録のオフセットとその発生メカニズムを解明する必要があり、A04 モデル班を構成した研究者らとの連携に期待している。

参考文献

A. Dutton, A.E. Carlson, A.J. Long, G.A. Milne, P.U. Clark, R. DeConto, B.P. Horton, S. Rahmstorf, M.E. Raymo, Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods, Science 349 (2015) 1–10. https://doi.org/10.1126/science.aaa4019.

K. Horiuchi, K. Kamata, S. Maejima, S. Sasaki, N. Sasaki, T. Yamazaki, S. Fujita, H. Motoyama, H. Matsuzaki, Multiple ^{10}Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion, Earth Planet. Sci. Lett. 440 (2016) 105–114. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.01.034.

K. Horiuchi, S. Kato, K. Ohtani, N. Kurita, S. Tsutaki, F. Nakazawa, H. Motoyama, K. Kawamura, H. Tazoe, N. Akata, T. Yamagata, H. Matsuzaki, Spatial variations of ^{10}Be in surface snow along the inland traverse route of Japanese Antarctic Research Expeditions, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 533 (2022) 61–65. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.10.018.

K. Kanzawa, F. Miyake, K. Horiuchi, K. Sasa, K. Takano, M. Matsumura, T. Takahashi, Y. Motizuki, K. Takahashi, Y. Nakai, K. Ohtani, Y. Tada, Y. Ochiai, H. Motoyama, H. Matsuzaki, A. Yamazaki, Y. Muramatsu, T. Yamagata, High-resolution ^{10}Be and ^{36}Cl data from the Antarctic Dome Fuji ice core (~100 years around 5480 BCE): An unusual grand solar minimum occurrence?, J. Geophys. Res. Sp. Phys. 126 (2021) e2021JA029378. https://doi.org/10.1029/2021JA029378.

I. Oyabu, K. Kawamura, C. Buizert, F. Parrenin, A. Orsi, K. Kitamura, S. Aoki, T. Nakazawa, The Dome Fuji ice core DF2021 chronology (0–207 kyr BP), Quat. Sci. Rev. 294 (2022) 107754. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107754.

Past Interglacials Working Group of PAGES, Interglacials of the last 800,000years. Rev. Geophys. 54 (2016) 162–219. http://doi.org/10.1002/2015RG000482.

南極大気・雪・アイスコア中の硫酸および硝酸の安定同位体組成とその応用

服部祥平[1,2,3]、石野咲子[3]
[1]南京大学 国際同位体効果研究センター、[2]東京大学 地殻化学実験施設、[3]金沢大学 環日本海域環境研究センター

B03(公募) 南極大気中の硫酸安定同位体組成の季節変動を再現する大気化学輸送モデルの構築(代表：服部祥平)
B03(公募) 南極氷床コア中の硫酸・硝酸同位体組成から復元する過去のエアロゾルの起源と生成過程(代表：服部祥平)

1．背景と目的

南極のアイスコアには、過去数十万年分の気温変動や温室効果ガス濃度の増減の他、放射収支に負の影響を及ぼす大気中微粒子（エアロゾル）が保存されている。本研究では、エアロゾルの主要無機成分であるSO_4^{2-}やNO_3^-の酸素(O)、窒素(N)、硫黄(S)の安定同位体組成を、南極のエアロゾル・雪・アイスコアについて分析し、指標変動要因の理解とその指標を用いた古環境復元を試みた。

4年間で得られた様々な成果について、総花的ではあるが以下に紹介する。

2．成果

2－1．硫酸塩エアロゾルの$\delta^{34}S$値による起源推定

フランス グルノーブルアルプス大学 IGE と共同し、南極沿岸部デュモンデュルビル基地および内陸部ドーム C 基地において通年で採取されたエアロゾル試料中のSO_4^{2-}の硫黄同位体組成($\delta^{34}S$値)を分析した。南極の沿岸と内陸の 2 地点間の$\delta^{34}S$値は、夏に高く冬に低いという季節変動を示すものの、その差異が統計的に 0 ‰から逸脱しないことが明らかとなった(Ishino et al. 2019)。この結果は、$\delta^{34}S$値が輸送中の同位体分別に顕著な影響を受けず、硫黄源の相対寄与率によって制御されるということを示している。

この結果をもとに、先行研究で報告されているボストーク深層アイスコアの$\delta^{34}S$値のデータから、最終氷期から現在にかけての南極大気中の硫黄起源の変化を推定した。結果、現在と比べて氷期には海洋生物活動が有意に低く、その活動に由来するSO_4^{2-}エアロゾルも少なかったことが示唆された（現在：86±3%、間氷期平均：59±11%、最終氷期平均：48±10%）。このことは、海洋堆積物コアの炭素固定量の記録から示唆されている、氷期における南緯 50 度以南の生物活動の減少とも整合性が高い。これは、気候が温暖化すると海洋生物活動が活発化することで大気中の SO_4^{2-}エアロゾルが増加し、温暖化を抑制するフィードバックが存在するという仮説 （CLAW 仮説)と一部整合的である。ただし、SO_4^{2-}の化学形態や粒子径の解析から、エアロゾルによる気候冷却効果は間氷期の方が低いとする研究（Iizuka et al., 2012）もある。また近年、極域におけるエアロゾルの増加を介した雲の微物理特性の変化は、季節や場所によっては寒冷化ではなく温暖化に寄与することが明らかとなってきている（Zhao and Garrett, 2015）。このため、海洋生物由来の SO_4^{2-}の増減のみでは、CLAW 仮説が立証されたわけではないことは注意したい。エアロゾルによる気候影響を解明するためには、硫黄起源の変化だけでなく、生物由来の DMS から SO_4^{2-}が生成されるまでの化学反応や、生物活動に起因する有機物など他の物質も含めたエアロゾル動態の理解が必要である。(2019 年 8 月 28 日付プレスリリース「硫黄同位体組成が解き明かす南極硫酸エアロゾルの起源」、国立極地研究所)

2－2．硫酸塩エアロゾルの $\Delta^{17}O$ 値の観測と大気化学輸送モデル

2－1 と同じエアロゾル試料について、SO_4^{2-}の三酸素同位体組成 ($\Delta^{17}O$ 値) の分析も行った。$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値は、夏の時期に沿岸部と比べて内陸部において特異的に高くなる傾向を発見した。本研究で同位体トレーサーを導入した大気化学輸送モデルでは、このような沿岸と内陸の差異は見られず、モデルに含まれない南極特有のプロセスが関与していることが明らかとなった。観測された$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値とエアロゾル中の各種化学成分の相関分析から、メタンスルホン酸（MSA）の酸化により、他の反応よりも$\Delta^{17}O$ 値が 10 倍ほど高いSO_4^{2-}が生成されていることがわかった(Ishino et al. 2021)。この MSA 酸化に由来する高い$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値は、

公募研究

これまで謎であった南極における大気と雪・アイスコア間での$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値の不一致も説明する。すなわち、南極の雪・アイスコア中の$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値は、大気中の酸化剤濃度の変動だけでなく、雪中での MSA 酸化反応の強度によって変動していることがわかった。これは従来の「$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値が大気中の酸化過程の情報を提供する」とする前提を大きく変える発見となった。

また、期間内の成果公表には至っていないが、昭和基地～ドームふじ近傍で採取された雪および浅層コアについても$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$値の分析を行った。雪中で MSA 酸化に伴う$\Delta^{17}O(SO_4^{2-})$の上昇が確認されたことに加え、ドームふじ近傍の浅層コアで西南極 WAIS divide コアよりも高い値が観測されている。こうした地域ごとの違いを足掛かりに、今後さらに指標変動要因の検討を進める。

２－３．アイスコアに基づく過去の大規模火山噴火の復元とその規模推定

火山によって放出される噴煙が成層圏まで到達する大規模な噴火では、成層圏硫酸エアロゾルが多量に生成される。この成層圏硫酸エアロゾル層が太陽光を遮ることにより、日照量を減少させ、地球の平均気温が数年にわたり低下することが知られている。しかし、観測記録の乏しい古代の火山噴火において、火山活動と寒冷化の関係を定量的に理解する手法は限られていた。

南極大陸ドーム C の 100 m のアイスコアに含まれる硫酸の硫黄同位体異常($\Delta^{33}S$ 値)から、噴煙が成層圏まで到達する成層圏噴火と、対流圏に留まっていた対流圏噴火を区別する手法を開発した。この結果、南極・グリーンランドの両極で見られる火山性硫酸ピークのほとんどが、成層圏まで噴煙が到達した成層圏噴火であり、地球規模の気候影響を有していたことが示唆された。また、硫酸の$\Delta^{17}O$ 値が 1259 CE（西暦）、575 CE、426 BCE（紀元前）という 3 つの火山ピークでは低い値を有し、これが極めて巨大な大規模成層圏噴火の結果生じていることが示唆された (Gautier et al. 2019)。(2019 年 2 月 4 日 プレスリリース「地球規模の寒冷化を引き起こす大規模噴火記録を復元」東京工業大学)

２－４．雪中における硝酸の光分解度合いに基づく表面質量収支の復元

硝酸は積雪として沈着した後、揮散もしくは紫外線による光分解反応によって消失することが知られている。このとき生じる同位体分別に伴い、残留した硝酸には ^{15}N が濃縮し大気中硝酸に比べて極めて高い$\delta^{15}N$ 値が観測される。第 54 次及び第 57 次南極地域観測隊で採取された東南極ドローニングモードランドの沿岸部から内陸部にかけての表面雪からも、$\delta^{15}N$ 値は沿岸部から内陸部に向かって最大約 180‰まで上昇することが示されている(Noro et al. 2018)。この変質プロセスは、硝酸の濃度・同位体組成を古気候解析に用いる上で足かせとなってきた。しかしこれを逆手にとり、硝酸塩の$\delta^{15}N$ 値を用いて南極の表面質量収支（SMB）を復元する手法を提案した(Akers et al. 2022)。東南極の 114 地点で採取された雪ピット試料を分析した結果から、硝酸塩の$\delta^{15}N$ 値と SMB の関係を定式化した。この関係を中程度の SMB を有する観測地点（Aurora Basin North）で掘削した浅層コア試料に適用し、700 年間の SMB 変動を復元したところ、氷のコア密度や上流の地形から推定される SMB 変動とよく一致した。今後、硝酸塩$\delta^{15}N$ 値の分析から、南極大陸の広範囲でより正確な SMB が復元できると期待される。

３．今後の展望

これまで、本研究課題を通じて南極のアイスコアを用いた過去のエアロゾルの量や起源・生成過程を復元する取り組みを続けてきた。アイスコアからエアロゾルの質量濃度の量を復元することは可能であるが、その気候影響を復元することは容易ではない。エアロゾルの雲に対する影響を評価する際には、雲凝結核粒子（CCN）として働く水溶性エアロゾルの個数濃度の情報が重要だが、CCN は雲水への融解や降雪時の衝突併合を介して沈着するため、個数濃度の情報はアイスコアに残らない。また、アイスコアは沈着した物質の情報を保存しており、大気中でのエアロゾルの高度分布の情報は失われているため、大気中での濃度へ換算することができない。さらに、本研究課題で明らかにしたような沈着後の変質の問題も依然としている。また現在の大気についても、南半球高緯度域の CCN 濃度および雲粒数密度は数値モデル上で 2 倍以上の過小評価状態にあり（Regayre et al., 2020; McCoy et al., 2020）、エアロゾルの起源や生成過程に大きな見落としがあることが指摘されている。しかしながら、私達は過去の情

報を保存するアイスコアからなんとかして可能な限りの情報を抽出して、丁寧に難解なパズルを解いていくほかない。

著者らは最近、北極アイスコアから過去 60 年間で硫酸の大気中生成過程が変化することなどを明らかにしつつある(Hattori et al. 2021)。このような南極エアロゾルの主要成分である硫黄・窒素の動態理解は重要であり、これらの同位体指標は、物質の起源・化学反応・輸送状態について様々な情報を提供できることを示してきた。また、分析手法の進展はめざましく、これまで用いられてきた安定同位体比質量分析計(IRMS)だけでなく、より感度が高いマルチコレクター型誘導結合プラズマ質量分析(MC-ICP-MS)やオービトラップ質量分析計の活用による高時間解像度の記録復元や新しい同位体指標の開発がすでに始まっている。IRMS を用いた分析では対象化合物のガス化が必須であるのに対し、MC-ICP-MS やオービトラップ質量分析計は溶液導入が可能であり、アイスコア中の化合物の分析との相性は良い。新しい分析手法の開発による南極の大気・雪氷現象の解明に今後も尽力したい。

参考文献

Akers, P.D., Savarino, J., Caillon, N., Servettaz, A.P., Le Meur, E., Magand, O., Martins, J., Agosta, C., Crockford, P., Kobayashi, K., Hattori, S., Curran, M., van Ommen, T., Jong, L., Roberts, J.L. Sunlight-driven nitrate loss records Antarctic surface mass balance. *Nature Communications*, 13, 4274 (2022).

Gautier, E., Savarino, J., Hoek, J., Erbland, J., Caillon, N., Hattori, S., Yoshida, N., Albalat, E., Albarede, F, Farquhar, J.: 2600-years of stratospheric volcanism through sulfate isotopes *Nature Communications*, 10, 466 (2019).

Iizuka, Y., Uemura, R., Motoyama, H., Suzuki, T., Miyake, T., Hirabayashi, M., Hondoh, T. Sulphate–climate coupling over the past 300,000 years in inland Antarctica. *Nature* 490, 81–84 (2012).

Ishino, S., Hattori, S., Savarino, J., Legrand, M., Albalat, E., Albarede, F., Preunkert, S., Jourdain, B., Yoshida, N.: Homogeneous sulfur isotope signature in East Antarctica and implication for sulfur source shifts through the last glacial-interglacial cycle, *Scientific Reports*, 9, 12378, (2019).

Ishino, S., Hattori, S., M. Legrand, Q. Chen, B. Alexander, J. Shao, J. Huang, L. Jaegle, B. Jourdain, S. Preunkert, A. Yamada, N. Yoshida, and J. Savarino, Regional characteristics of atmospheric sulfate formation in East Antarctica imprinted on ^{17}O-excess signature, *J. Geophys. Res. Atmos.*, e2020JD033583 (2021).

Hattori, S., Y. Iizuka, B. Alexander, S. Ishino, K. Fujita, S. Zhai, T. Sherwen, N. Oshima, R. Uemura, A. Yamada, N. Suzuki, S. Matoba, A. Tsuruta, J. Savarino, and N. Yoshida, Isotopic evidence for acidity-driven enhancement of sulfate formation after SO_2 emission control, *Science Advances*, 7(19), eabd4610 (2021).

McCoy, I. L., McCoy, D. T., Wood, R., Regayre, L., Watson-Parris, D., Grosvenor, D. P., Mulcahy, J.P., Hu, Y., Bender, F.A.-M, Fieldb, P.R., Carslaw, K.S., and Gordon, H.: The hemispheric contrast in cloud microphysical properties constrains aerosol forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(32), 18998–19006 (2020).

Noro, K., Hattori, S., Uemura, R., Fukui, K., Hirabayashi M., Kawamura K., Takenaka N., Yoshida, N.: Spatial variation of isotopic compositions of snowpack nitrate related to post-depositional processes in eastern Dronning Maud Land, East Antarctica, *Geochemical Journal*, Vol. 52 (No. 2), pp. e7-e14 (2018).

Regayre, L.A., Schmale, J., Johnson, J.S., Tatzelt, C., Baccarini, A., Henning, S., Yoshioka, M., Stratmann, F., Gysel-Beer, M., Grosvenor, D.P., Carslaw, K.S.: The value of remote marine aerosol measurements for constraining radiative forcing uncertainty, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 10063–10072 (2020).

Zhao, C., and Garrett, T.J.: Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 557–564 (2015).

珪藻遺骸群集が示す東南極沿岸湖沼の百年規模の周期的変動
－宗谷海岸・スカルブスネスの小氷期－

香月興太[1]、菅沼悠介[2]、川又基人[3]、鎌田唯斗[1]
[1]島根大学、[2]国立極地研究所、[3]寒地土木研究所

B03(公募）東南極の年縞湖沼堆積物を利用した小氷期以降の氷床融解史の解明（代表：香月興太）

１．背景と目的

１－１．研究背景と目的

14 世紀半ばから 19 世紀半ばにかけて北半球では小氷期と呼ばれる寒冷化現象が顕著に見れたが，小氷期が南極でも見られる全球変動なのかは長らく議論の対象であった．南極沿岸部のアイスコアの研究において小氷期にあたると考えられる寒冷化現象が報告されてきたが（e.g., Orsi, et al., 2012; Rhodes et al., 2012），その一方で東南極・宗谷海岸の沿岸湖沼を対象とした微化石分析（Tavernier et al., 2014）では，小氷期にあたる群集変動がみられず，東南極では小氷期がなかった可能性が示唆された．しかしながら，近年小氷期を示す結果が南極の様々な場所報告され，南極半島では小氷期における氷床の再前進が確認されており（Simms et al., 2021），東南極においても小氷期の有無の再検証は重要だと考えられる．本研究では，第 59 次南極地域観測隊で採取された東南極宗谷海岸の露岩域・スカルブスネスの沿岸湖沼，子池において採取された湖底堆積物を用いた．湖底堆積物中の珪藻遺骸群集を分析し，宗谷海岸地域の小氷期の有無と古環境を検証した．第 59 次南極地域観測隊の地質・生物班では，新学術・固体地球班「地質・地形学的調査と GIA モデルによる過去の氷床復元」の研究課題である，完新世の氷床変動を明らかにするために，宗谷海岸の露岩域において多数の浅海・湖沼堆積物を採取し，特にスカルブスネスにおいて多くの堆積物試料を得た．本研究はこの過去の氷床復元に係る知見を間接的に補うものである．

１－２．調査地域

スカルブスネスは東南極リュッツホルム湾の東岸，宗谷海岸において最も大きな露岩域である．スカルブスネスの地表には氷食によって形成された窪地に大小さまざまな湖沼が形成されている．スカルブスネスは東部の南極氷床から半島状に突き出た地形であり，西部にはオーセン湾と呼ばれる内湾が存在する．オーセン湾の南西部にはきざはし浜と呼ばれる隆起海浜が広がり，きざはし浜の最南部にはオーセン湾に面した親子池と呼ばれる大小二つの大きさの連結湖沼がある（図 1）．親子池は淡水湖沼であり，小さな湖（ここでは子池と呼称する．先行研究 Tavernier et al. (2014)および Verleyen et al. (2017)では”Mago Ike”と呼称されているが，国土地理院地図では，Mago Ike はこの池から東方約 500m にある湖の名前である．混同を避けるため，先行研究も子池として扱う．）は北部にオーセン湾に注ぐ小さな流出口を持つ．湖面の標高は 1.5m である（Tavernier et al., 2014; Verleyen et al., 2017）．

図 1．スカルブスネス・子池周辺の写真．2018 年 1 月撮影．

２．方法と結果

２－１．堆積物試料採取および処理

子池の湖底堆積物(17KI-GC1 コア)は 2018 年 1 月に，投げ込み式グラビティーコアラーを用いて採取した．採取地点の水深は 3.4m であり，中央部の湖盆の西側にあたる．採取時のコア長は 31cm であり，現地でパイプから押し出し，コア上部 10cm は 5mm 間隔で分割，10cm 以下は 1cm 間隔で分割し

た．帰国後，各試料を数mgずつ分取し，ビーカー内で過酸化水素水を加えて 1 時間半煮沸し，有機物を除去した．煮沸後ビーカーに蒸留水を加え，4 時間静置し，上澄みを捨てる作業を 3 度繰り返した．残った試料をパイプ路ピペットでカバーガラス上に滴下し，80° で乾燥させた後，マウントメディアでスライドグラス上に封入した．作成した珪藻観察スライドは生物顕微鏡（Olympus BX53）で，1000-2000 倍で観察し，珪藻殻を 400 殻以上カウントした．

２－２．小池湖底堆積物中の珪藻群集変動

17KI-GC1 コアに含まれる珪藻殻（図 2）は平均 1g あたり 1.78×10^9 殻で，コア深度 9cm より上位で明らかに増加する．第 1 優占種は淡水種である *Halamphora pratensis* で，珪藻全体の 76.3%を占めた．第 2 優占種は淡水種の *Craticula zizix*（平均産出 10.8%）で，コア下部から上部にかけて増減しながら減少した．第 3 優占種は淡水種の *Navicula gregaria*（平均産出 6.5%）コア上部 1.5cm でのみ高い値（40%以上）を示した．海生種の産出は非常に少なかったが，*Paralia sultaca* が平均 1, 4%，*Chaetoceros* spp. resting spore が平均 1.2%，*Melosira adeliae* が平均 0.6%程度産出した（図 2）．

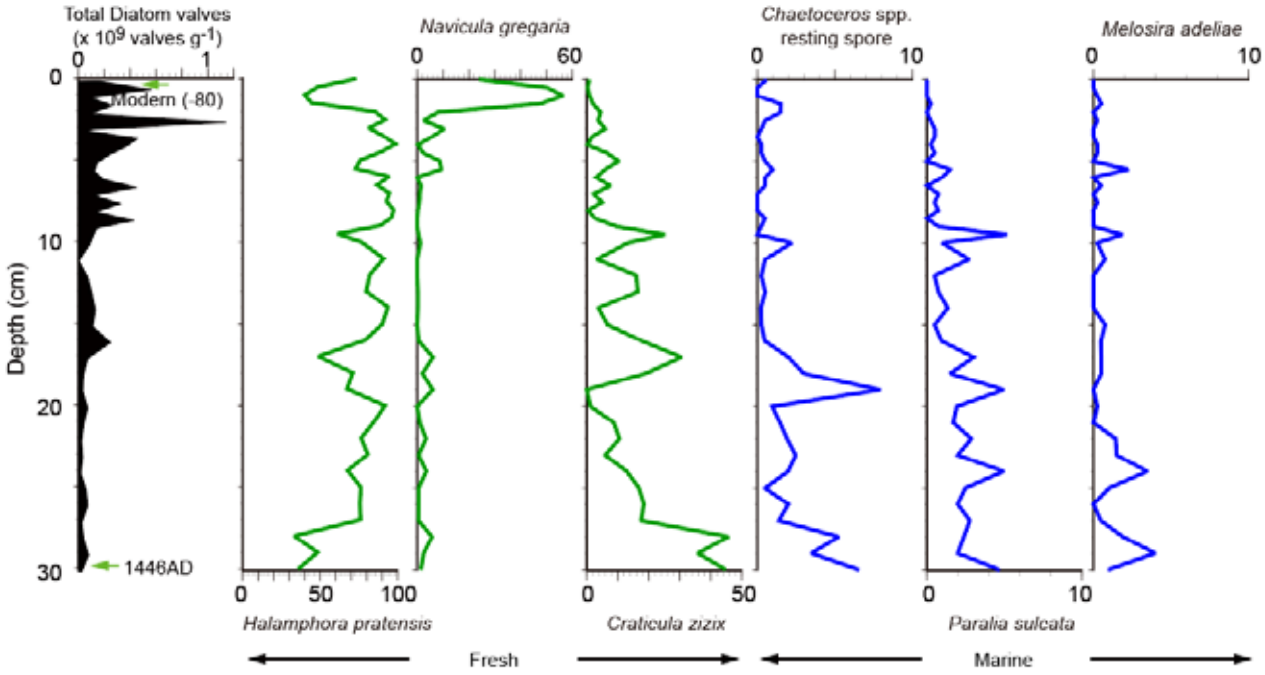


図 2．17KI-GC1 コアにおける深度別全珪藻殻数と主要な珪藻の相対頻度

３．考察

17KI-1GC コア底部の Bulk 有機物の年代は 496±19BP（SHCal20 による平均校正年代は西暦 1446 年）であった．17KI-1GC コアではコア全体を通じて淡水珪藻が優占し，過去 500 年間にわたって子池が淡水湖沼であったことを示している．この結果は，親子池が約 1000 年前に隆起により淡水湖となったとする先行研究（Takano et al., 2012; 井上ほか，2013; Tavernier et al., 2014; Verleyen et al., 2017）と調和的である．一方で，17KI-1GC コアでは海生珪藻が継続して産出している．子池はオーセン湾に面していることから，子池で産出する海生珪藻はオーセン湾から波浪あるいは暴風による飛沫によって運搬されたと考えられるが，海生珪藻がピークを示す層準は含水率が低い砂を多く含む層準であることを考慮すると暴風によって海浜から運搬された可能性がより高い．17KI-1GC コアでの第 2 優占種 *C. zizix* の変動傾向は，海生珪藻 *Chaetoceros* spp. の resting spore の変動傾向と類似している．おそらく *C. zizix* の塩分耐性は第 1 優占種の *H. pratensis* より高いため，海水の流入がわずかに高い年に *C. zizix* の増加がみられるのだと推測される．したがって，17KI-1GC コアの珪藻群集は，15 世紀半ば以降の子池は次第に塩分が減少していることとこの期間に 4，5 回の暴風イベントが起きたことを示している．

過去 500 年間に次第に塩分が減少している理由に関して，子池があるスカルブスネスは完新世中期

以降継続して隆起していることがまず考えられる．しかし，Tavernier et al. (2014)では *Craticula antarctica*（おそらく本稿でいう *C. zizix*）の産出が約 450 年前を極大期として，それ以前では減少することを示している．すなわち，子池において淡水湖になった 1000 年前以降塩分が最も高かったのは約 450-500 年前となり，隆起では子池の塩分変動は説明できない．Aoki (2002)は，南極沿岸の潮位が南極振動と顕著な逆相関があり，南極振動指数が Negative の際に海水準が高くなると報告した．南半球環状モード（SAM）は南極振動と同調した変動を示すが，南半球の夏季の SAM は西暦 1450 年頃に最も Negative となり，その後現在まで振動しながら Positive へと変動する（Dätwyler et al., 2017）．そのため，子池の塩分変動が SAM による潮位変動に関連している可能性が挙げられる．SAM は，西暦 1450 年以外にも 17 世紀前半や 19 世紀末，20 世紀前半に強く Negative に推移しているが，17KI-1GC コアで見られた海生種のピークがこの SAM の Negative 期にあたる可能性がある．Dätwyler et al. (2017)は SAM の変動が太陽活動の変動と関連性がみられなかったことを報告しており，子池の塩分変動が北半球で見られる小氷期と一致するのかについては議論の余地がある．一方で，南極半島で確認された氷床前進時期と一致しており，南極における寒冷化イベントと関連した変動であることが示唆される．

４．領域内連携

現地調査・試料採取・試料の年代測定等，研究の様々な場面において，固体地球班「地質・地形学的調査と GIA モデルによる過去の氷床復元」との関連があり，情報提供をいただいた．

参考文献

Aoki, S., Coherent sea level response to the Antarctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **29**, 11-1-11-4, 2002.

Dätwyler, C., Neukom, R., Abram, N.J. *et al.* Teleconnection stationarity, variability and trends of the Southern Annular Mode (SAM) during the last millennium. *Climate Dynamics*, **51**, 2321–2339, 2018.

井上源喜、本田英介、谷　幸則、瀬戸康史、渡辺隆広、大谷修二、中村俊夫、井村　智，南極大陸宗谷海岸の親子池湖底堆積物コアによる完新世における古環境学的研究、*人間生活文化研究*、**23**、189-197、2013.

Orsi, A.J., Cornuelle, B.D., Severinghaus J.P., Little Ice Age cold interval in West Antarctica: Evidence from borehole temperature at the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide. *Geophysical Research Letters*, **39**, L09710, 2012.

Rhodes, R.H., Bertler, N.A.N., Baker, J.A., Steen-Larsen, H.C., Sneed, S.B., Morgenstern, U., Johnsen, S.J., Little Ice Age climate and oceanic conditions of the Ross Sea, Antarctica from a coastal ice core record. *Climate Past*, **8**, 1223–1238, 2012.

Simms A.R., Bentley M.J., Simkins L.M.; Zurbuchen, J., Reynolds L.C., DeWitt R., Thomas, E.R., Evidence for a “Little Ice Age” glacial advance within the Antarctic Peninsula – Examples from glacially-overrun raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, **271**, 107195, 2021.

Takano, Y., Tyler, J.J., Kojima, H., Yokoyama, Y., Tanabe, Y., Sato, T., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., Fukui, M., Holocene lake development and glacial-isostatic uplift at Lake Skallen and Lake Oyako, Lützow Holm Bay, East Antarctica, based on biogeochemical facies and molecular signatures. *Applied Geochemistry*, **27**, 2546-2559, 2012.

Tavernier, I., Verleyen, E., Hodgson, D.A., Heirman, K., Roberts, S.J., Imura, S., Kudoh, S., Sabbe, K., De Batist, M., Vyverman, W., Absence of a medieval climate anomaly, little ice age and twentieth century warming in Skarvsnes, lutzow Holm bay, East Antarctica. *Antarctic Sciences*, **26**, 585-598, 2014.

無視されてきた微化石「黄金色藻シスト」

加藤 悠爾[1]
[1]筑波大学

B03(公募）無視されてきた微化石「黄金色藻シスト」を用いた古環境プロキシ開発（代表：加藤悠爾）

1．背景

黄金色藻は主に淡水環境に生息する微細藻類で，休眠期に珪酸質の殻を持つシストを形成することが知られている（Duff et al. 1995）（図 1，2）．珪酸質のシストは化石として保存されやすいため，特に北半球高緯度域の湖沼堆積物からは多くの化石記録が得られており，それらの成果は Duff et al. (1995)や Wilkinson et al. (2001) などのモノグラフにまとめられている．一方，南大洋をはじめとする海底堆積物にも，珪藻化石とともに黄金色藻シスト化石が産出する場合があるが，それらを対象とした研究事例はほぼ皆無であり，DSDP や ODP の船上リポート中に，シスト化石の図版がわずかに含まれている程度である（Perch-Nielsen 1975; Harwood and Gersonde 1990）．そのため，海底堆積物中の黄金色藻シスト化石に関する知見は著しく不足しており，古環境学への応用はおろか分類学的な研究すら満足になされていない状況であった．筆者は，こうした背景のもとで，淡水棲の黄金色藻シスト化石が，地質学的過去における海洋への淡水流入（南大洋の場合は融氷水の流れ込み）などを復元するための新たな古環境指標になりうると考え，南大洋で採取された堆積物試料・海水試料を用いた一連の基礎研究を実施してきた（図 3）．本稿では，これらの取り組みの概要を記載する．

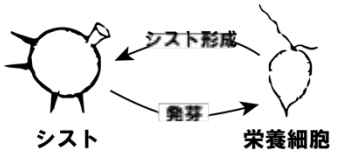


図 1 ：黄金色藻の生活環.

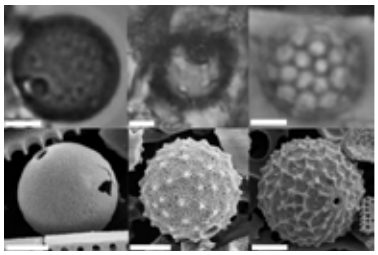


図 2 ：黄金色藻シスト化石の一例．スケールバーは 2 μm.

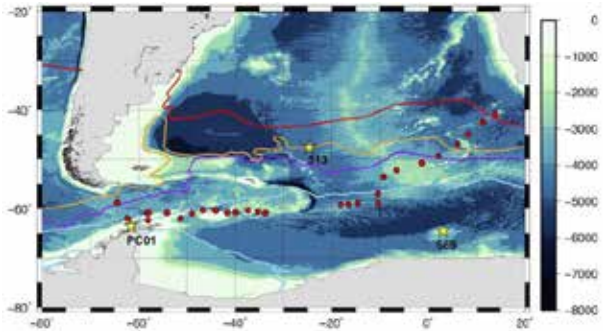


図 3：一連の研究で用いた試料群の採取位置．赤丸：表層海水，☆印：堆積物コア試料.

2．黄金色藻シストと淡水珪藻の産出量変動の比較（DSDP/ODP コアを用いた研究）

まず，南大洋大西洋区で掘削された堆積物試料 DSDP Site 513（48ºS, 28ºW）および ODP Site 689（65ºS, 3ºE）のうち後期中新世から鮮新世（約 9–3 Ma）について微化石分析を行い，珪藻化石群集の変動および黄金色藻シスト化石の産出量変動を調べた．さらに，走査型電子顕微鏡による黄金色藻シスト化石の観察も行った．その結果，黄金色藻シスト化石の産出量変動が淡水珪藻の変動とよく似たパターンを示すことを発見するとともに，淡水域から記載・報告されているシストの産出も確認した（図 4）．これらの結果から，シスト化石群集の大部分は淡水域から流れ込んだ可能性が高く，シスト化石は大陸からの融氷水の流れ込みを示す新しい指標として有用性を持つ可能性が提示された (Kato & Suto 2019).

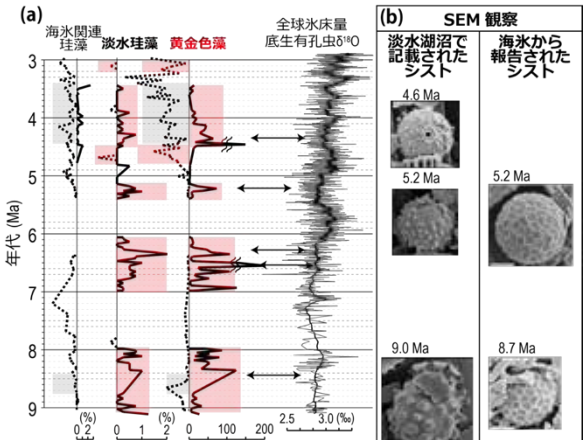


図 4：(a) 海氷関連珪藻・淡水珪藻・黄金色藻シストの産出量変動．Site 513(実線), 689(点線)．(b) 黄金色藻シスト化石の電子顕微鏡写真.

公募研究

3．生物地理分布の解明（現生海水試料）

上述の DSDP コアを用いた研究で黄金色藻シスト化石が持つポテンシャルが見えてきたが，これを古環境指標として確立させるためには，その他の独立した環境指標との比較・検討も必要となる．

そこで，筆者自身も乗船した研究航海 KH-19-6 Leg 4 (2019 年 12 月～2020 年 1 月)で採取した試料を対象とした分析を行なった．本航海では，南大洋大西洋区から約 30 地点の表層海水試料を採取した．これらの試料について光学顕微鏡による観察・分析を行うことで，黄金色藻シストの生物地理分布（どこにどのくらい黄金色藻シストが存在しているのか）が初めて解明された（図 4）．また，海水試料の酸素同位体比 $\delta^{18}O$ 測定も併せて行い，これを黄金色藻シストの生物地理分布と比較したところ，シスト多産地点で海水 $\delta^{18}O$ が低いという傾向が見られた（図 5）．一般に融氷水は軽い酸素同位体比を示すため，この分析結果からもシストと融氷水の関係がサポートされた．

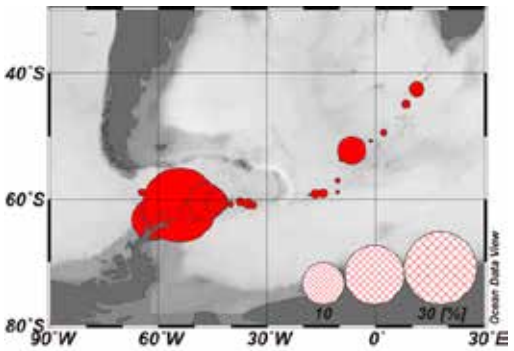


図 4：南大洋大西洋区で採取した表層海水試料おける黄金色藻シストの地理分布（珪藻に対する相対産出量）．

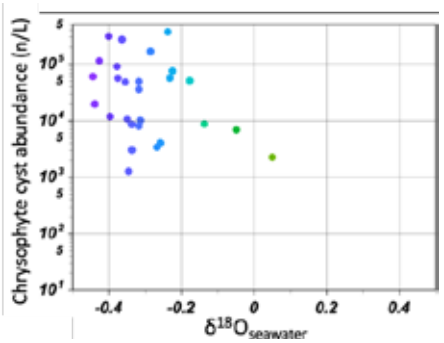


図 5：現生黄金色藻シストの産出量と海水酸素同位体比の比較．

4．南極半島沖ピストンコアの分析

さらに筆者は，KH-19-6 Leg 4 で採取された南極半島沖の堆積物コア（PC01：64ºS，62ºW）を用いて，珪藻・黄金色藻シスト化石の分析を行なった．その結果，黄金色藻シスト化石の産出量変動が IRD（漂流岩屑：氷山融解を指標）の産出量変動パターンとよく一致することが見出された（図 6）．この結果も，黄金色藻シストの産出が融氷イベントを指標することを裏付けるサポートデータとなる．

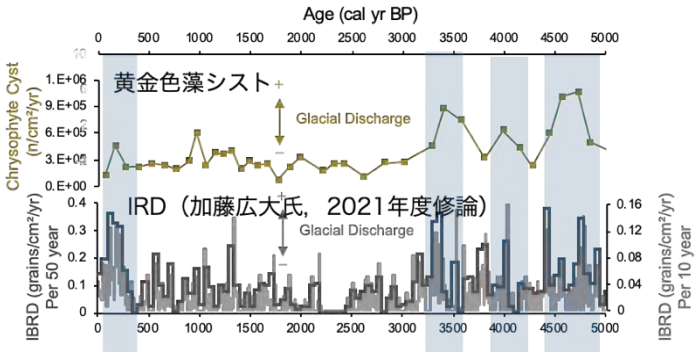


図 6：南極半島沖で採取した KH-19-6 Leg 4 PC01 コアにおける，過去約 5000 年間の黄金色藻シスト化石および漂流岩屑 IRD の産出量変動．IRD 変動データは加藤（2022MS）に基づく．

5．今後の課題

このように，現生試料・化石試料の両者の分析を通じて，黄金色藻シスト化石が，融氷・淡水流入の新たな古環境指標として高い有用性を持つことがわかってきた．

しかし，黄金色藻の中には，数は少ないながらも海棲種も知られており，海氷中からも Archaeomonads と総称される黄金色藻シストの産出が報告されている（Mitchell & Silver 1982, 1986; Takahashi et al. 1986）．したがって，南大洋堆積物に産出する黄金色藻シスト化石の全てが淡水由来であるとは言い切れない．淡水棲・海棲のシストを区別するためには，黄金色藻シスト化石の分類学的研究を進展させることが必須課題である．実際に筆者は，第 2 項で言及した DSDP・ODP コアを対象として，黄金色藻シスト化石の分類学的研究にも既に着手している（Kato 2019）．また，南極大陸沿岸に分布する湖沼群は，海底堆積物に産出していた黄金色藻シスト化石の供給源として考えられるため，こうしたエリアで採取された試料を用いた研究も必須である（e.g. 現在の南極域における黄金色藻類の栄養細胞・シストの生態解明）．

参考文献

Duff, K.E., Zeeb, B.A., Smol, J.P., Atlas of Chrysophycean Cysts. *Kluwer Academic Publishers*. 189 pp., 1995.

Harwood, D.M., Gersonde, R., Lower Cretaceous diatoms from ODP Leg 113 Site 693 (Weddell Sea), Part 2. Resting spores, chrysophycean cysts, an endoskeletal dinoflagellate, and notes on the origin of the diatoms. *In*: Barker, P.F., Kennett, J.P. et al. (eds.) *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **113**, 403–425, 1990. Ocean Drilling Program, College Station, TX. doi:10.2973/odp.proc.sr.113.201.1990.

Kato, Y., Late Miocene to Pliocene fossil chrysophyte cysts from ODP Site 689 and DSDP Site 513, the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Nova Hedwigia Beiheft*, **148**, 131–156, 2019. doi: 10.1127/nova-suppl/2019/145

加藤 広大, 南極半島北西域の海底堆積物を用いた過去 5000 年間の環境変遷に伴う氷床融解史の復元. *高知大学大学院総合人間自然科学研究科修士論文*, 2022.

Kato, Y., Suto, I., Fossil chrysophyte cysts as potentially useful paleoceanographic indicators: Comparison with Southern Ocean diatom assemblages. *Nova Hedwigia Beiheft*, **148**, 113–129, 2019. doi:10.1127/nova-suppl/2019/127

Mitchell, J.G, Silver, M.W., Modern archaeomonads indicate sea-ice environments. *Nature*, **296**, 437–439, 1982. doi:10.1038/296437a0.

Mitchell, J.G., Silver, M.W., Archaeomonad (Chrysophyta) cysts: Ecological and paleoecological significance. *BioSystems*, **19**, 289–298, 1986. doi:10.1016/0303-2647(86)90006-7.

Perch-Nielsen, K., Late Cretaceous to Pleistocene archaeomonads, ebridians, endoskeletal dinoflagellates, and other siliceous microfossils from the subantarctic Southwest Pacific, DSDP, Leg 29. *In*: Kennett, J.P., Houtz, R.E. et al. (eds.) *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **29**, 873–908, 1975. U.S. Government Printing Office, Washington D.C. doi:10.2973/dsdp.proc.29.124.1975.

Takahashi, E., Watanabe, K., Satoh, H., Siliceous cysts from Kita-no-seto Strait, north of Syowa Station, Antarctica. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, **40**, 84–95, 1986.

Wilkinson, A.N., Zeeb, B.A., Smol, J.P., Atlas of Chrysophycean Cysts: Volume II. *Kluwer Academic Publishers*. 169 pp., 2001.

白鳳丸の南大洋航海 KH19-1 で得られた堆積物コアのリンと鉄のスペシエーション

山口耕生[1,2]、大竹有裕美[1]、佐山奈緒[1]、吉岡茜[1]、池原実[3]
[1]東邦大学、[2]NASA Astrobiology Institute、[3]高知大学

B03(公募) 鉄・硫黄・リンの化学種別の存在量と同位体組成から探る南大洋の酸化還元状態の変動史（代表：山口耕生）

１．背景と目的（共同研究、新規参入経緯）

最終氷期には大気中の CO_2 濃度が約 100 ppm 低下したことが、南極氷床コア等に記録されている。しかしながら、その減少のメカニズムは、未だ不明な点が多い。南大洋は、表層に栄養塩が高濃度で存在するにもかかわらず、植物プランクトンの生産量が比較的低い状態を維持している「高栄養塩・低クロロフィル (high-nutrient, low-chlorophyll: HNLC) 海域」であり、代表的な制限栄養塩元素である鉄が供給されれば生物初期生産が増大する「飢えた海域」である。南大洋のような HNLC 海域では、氷期に陸起源のダスト（風成塵）として多量の鉄酸化物が海洋に供給され、生物初期生産が増大し、大気中の CO_2 の海洋への吸収を促進させた可能性があるという「Martin の鉄仮説 (Martin, 1990)」が提唱されている。初期生産が増大すれば、海洋の深部に輸送された有機物の酸化分解の際に溶存酸素が消費されるため、海洋深層や堆積物の酸化還元状態が変化していた可能性がある。南大洋は第四紀の氷期−間氷期サイクルでのグローバルな環境変動を理解する上で重要な役割を持つ海域である。

そこで本研究では、南大洋の深海堆積物に記録される過去の海洋の栄養塩の状態や酸化還元状態を解明するため、2019 年の白鳳丸の研究航海で南大洋インド洋区の Del Cano Rise で掘削された堆積物の柱状試料(DCR-2PC) を用いて、鉄とリンの化学形態別（スペシエーション）分析を行った。

本報告では、2021 年度の東邦大学理学部化学科での卒業研究として実施された３つの研究（大竹有裕美, 2022；佐山奈緒、2022, 吉岡茜. 2022）をまとめた概要を述べる。

２．方法

２−１．堆積物試料

上記の試料において、過去数万年間の環境変動を記録する明暗の縞々からなる互層から計 121 試料を採取し、約 30 試料を選定し、凍結乾燥後にメノウ乳鉢で粉末化したものを本研究の分析対象の試料とした。

２−２．鉄のスペシエーション分析

地球表層環境では、鉄は周囲の酸化還元状態に依存して二価または三価で存在し、様々な化学種を形成する。大陸風化や海底熱水活動によって海洋に供給された鉄は、堆積し、続成作用によって酸化還元状態の影響を受けて酸化鉄・磁鉄鉱・黄鉄鉱・菱鉄鉱、等へ化学形態を変える。砕屑性ケイ酸塩鉱物中の鉄は存在形態を変えない。以上の化学種の堆積物中での相対的存在度が、堆積時の酸化還元状態を反映する。本研究では、上記の試料を Poulton & Canfield (2011)の方法を用いて鉄酸化物 (Fe_{OX})・磁鉄鉱 (Fe_{mag}) ・鉄炭酸塩 (Fe_{carb}) の 3 形態に分画し、1N HCl 24h の抽出によって得られる鉄 (Fe_{HCl})と合わせ、試料中の鉄の化学種別の存在度を求めた。各抽出溶液中の鉄の濃度は、Ferrozine 法 (Stookey, 1970) により吸光光度計を用いて求めた。

２−３．リンのスペシエーション分析

リンは初期生産を制限する制限栄養塩元素であり、堆積物中のリンの化学種別の存在量は堆積環境の酸化還元状態や生物生産の環境因子により変化するため、これらの分画から過去の堆積環境の重要な情報が得られる。本研究では、Ruttenberg (1992) の SEDEX 法を改良した連続抽出法により、リンを吸着性リン(P_{abs})、鉄結合態リン(P_{Fe})、砕屑性リン(P_{det})、自生アパタイト態リン(P_{auth})、有機態リン(P_{org})、の 5 形態に分画した。各抽出溶液のリン濃度は、P_{Fe} のみモリブデン錯体―有機溶媒抽出法、その他はモリブデンブルー法により、吸光光度計で測定した。再現性は±6%以内であった。

公募研究

３．結果および考察

３−１．鉄のスペシエーション

他の鉄含有化学種よりも存在度が高く主要形態であった Fe_{HCl} 量は、試料の色の明暗に対応し大きく変化した。Fe_{carb} や Fe_{ox}、Fe_{mag} 量も同様に試料の明暗に対応して存在度が変化した。Fe_{HCl} 量に続いて Fe_{ox} 量が高く、Fe_{carb} 量が続き、Fe_{mag} 量は最も低かった。以上から、本研究で扱った試料の深度範囲が示す時代において、採取地点の周囲の堆積環境は、鉄のスペシエーション分析に基づけば基本的には酸化的であったことが示唆される。

３−２．リンのスペシエーション

リンの化学形態別存在量は、試料の明暗の色の違いによって変化したことが分かった。コア下部の暗色部では P_{org} の存在量が高く、上部の明色部では P_{Fe} および P_{det} の存在量が高かった。P_{org} の存在量の増加は、生物初期生産が増加したことを示唆する。リンは、酸化的環境において $Fe(OH)_3$ や FeOOH 等に表面吸着して P_{Fe} として共沈するため、存在量が高ければ堆積環境が酸化的であったことを示す。下部が明色層で上部が暗色層であれば、ダストによって鉄の供給が増加して生物初期生産が増加し、生産された有機物の酸化的分解により溶存酸素濃度が減少し、堆積環境が還元的になっていった、というシナリオが考えられ、上記の Martin の鉄仮説に沿う連続的な海洋環境の変化が起きていたことになる。

５．今後の課題

鉄のリンのスペシエーション分析の試料数の増加（約 30→約 120 試料）、硫黄のスペシエーション分析の開始（約 30 試料）、さらには有機炭素と無機炭素の安定同位体分析（約 120 試料））、が今後の課題として挙げられる。このうち、炭素同位体分析は、2022 年 10〜11 月に一部を実施した。複数の氷期―間氷期サイクルを含むよう分析試料数を増やしていきたい。

参考文献

Martin, J. H. (1990) Glacial-interglacial CO_2 change: The Iron Hypothesis. Paleoceanography 5. 1-13.

Poulton, S.W. and Canfield, D.E. (2011) Ferruginous Conditions: A Dominant Feature of the Ocean through Earth's History. Elements 7, 107-112.

Stookey, L. L. (1970) Ferrozine – a new spectrophotometric reagent for iron. Analytical chemistry 42, 779-781.

Ruttenberg, K. C. (1992) Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. Limnology and Oceanography 37, 1460-1482.

大竹有裕美 (2022)、南大洋航海 KH19-1 で得られた堆積物コア下部のリンのスペシエーション分析、2021 年度東邦大学卒業研究報告

佐山奈緒 (2022)、南大洋航海 KH19-1 で得られた堆積物コアの鉄のスペシエーション分析、2021 年度東邦大学卒業研究報告

吉岡茜 (2022)、南大洋航海 KH19-1 で得られた堆積物コア上部のリンのスペシエーション分析、2021 年度東邦大学卒業研究報告

南極ドームふじにおける最終氷期終盤～完新世初期のダスト及びブラックカーボンの変動

東久美子[1,2]、平林幹啓[1]、尾形純[1]、福田かおり[1]、茂木信弘[3]、森樹大[4]、近藤豊[1]、大畑祥[5]、小池真[3]
北村享太郎[1]、塚川佳美[1]、藤田秀二[1,2]、川村賢二[1,2]、中澤文男[1,2]、米倉綾香[1,2]、奥村裕美[1]
[1]国立極地研究所、[2]総合研究大学院大学、[3]東京大学、[4]慶應義塾大学、[5]名古屋大学

B03(公募)南極氷床コアのダストとブラックカーボンの高精度・高時間分解能分析による古環境復元
（代表：東久美子）

１．背景と目的

大気中のダストやブラックカーボン（BC）は日射の散乱・吸収したり、雲の凝結核になることで、放射強制力に影響を及ぼす。氷床・氷河や海氷上に沈着したダストや BC は、雪氷面のアルベドを低下させ、融解を促進する。CO_2 の主要な吸収･放出源である南大洋に降下するダストは、植物プランクトンに不可欠な鉄の供給源として重要であり、大気中の CO_2 の濃度に影響を及ぼす。このように、ダストと BC は地球の放射収支に影響を及ぼす物質として注目されている。また、地球温暖化の進行に伴い、ダストの発生源となる乾燥地域の砂嵐や、BC の発生源となる森林火災が増加し、健康被害や環境破壊を招く懸念がある。しかし、ダストと BC が放射強制力に及ぼす影響や、ダストが南大洋の CO_2 の吸収に及ぼす影響、また、気候変動に伴う砂嵐・森林火災の変化のメカニズムは解明されていない。それらの解明には、過去に大規模な気候変動が生じた際、たとえば氷期から間氷期への移行期などにおいて、ダストと BC の変化の実態を把握することが有効な手段となる。南極で掘削された深層氷床コアは氷期・間氷期を含む長期間にわたるダストと BC の変化を復元することができる、非常に優れた媒体である。

ダストと BC の日射への影響や雲の凝結核になりやすさは､濃度だけでなく､粒径に大きく依存する。海洋の植物プランクトンがダスト起源の鉄を取り込む際には、海水への溶け出しやすさが重要であり、これはダスト粒子の粒径や鉱物組成に依存する。従って、南極氷床コアのダストや BC のデータを、放射強制力、雪氷面のアルベド、南大洋の植物プランクトンへの影響解明のための気候モデルの検証データとして用いるには、濃度やフラックスだけでなく、粒径分布や組成のデータが不可欠である。

しかし、これまでの欧米の研究グループの研究では、複数の南極氷床コアのダストを高時間分解能で分析したデータが取得されているものの、粒径のデータは限られており、分析精度も低い。鉱物組成のデータも非常に限られている。BC については、長期間のデータは西南極の WAIS Divide（WDC）氷床コアの濃度データしかない。BC の粒径データは全く取得されていない。一方、筆者らがこれまでに分析した南極ドームふじコアのダスト･データ（Dome Fuji Ice Core Project members, 2017）は、不連続で時間分解能が低く、濃度･粒径の測定精度が低かった。そこで、本研究では、ダスト及び BC の変化と南大洋周辺域の気候・環境変動の関係解明に不可欠な情報を取得するため、南極ドームふじ氷床コアを用いて、最終退氷期を挟む最終氷期から完新世初期までの時代における、ダストと BC の濃度と粒径、及びダストの組成を高精度、高時間分解能で復元することを目的として研究を行った。更に、高時間分解能分析の副産物として、大規模砂嵐によるダスト濃度のピークや、大規模森林火災による BC 濃度のピークが検出されるが、これらを複数の氷床コアの年代同期に使うことができないか、検討した。

２．方法

本研究では､国立極地研究所で開発した氷床コア連続融解分析装置（Continuous Flow Analysis System、略して CFA）を用い、第 2 期の南極ドームふじ氷床コアを高精度・高時間分解能分析した。分析した深度は 200～640m で、6 千年前～2 万 8 千年前の時代に対応する。CFA の融解部に接続したレーザー式水安定同位体比アナライザーで $\delta^{18}O$、δD を、ICP 質量分析計で 8 元素（Na、Mg、K、Ca、Al、Si、S）を、レーザー遮蔽式固体粒子分析計でダストの濃度と粒径を、レーザー誘起白熱式ブラックカーボン分析計（SP2）で BC の濃度と粒径を測定した。

レーザー遮蔽式固体微粒子計のデータ解析ソフトウェアを改良したことで、高精度の数濃度測定が可

能になったが、測定原理に基づく粒径の不確定性のため、粒径だけでなく、数濃度と粒径から計算される体積濃度にも大きな不確定性がある（東他、2020）。このため、CFA の融解部で生成された融解水の一部をフラクション・コレクターで 50m ごとに分注し、コールターカウンターでダストの体積濃度、数濃度、粒径を高精度で分析した。BC については通常の SP2 を改良した Wide-range SP2（Mori et al., 2016）を用いることで、測定可能な粒径の上限を 0.9 μ m から 4 μ m まで拡張することができた。

3．成果

3－1．ダストの変動

図 1 に本研究で取得した第 2 期ドームふじ氷床コアのダストと水の安定同位体比のデータを示す。比較のため、第 1 期ドームふじ氷床コアと欧州が分析した南極ドーム C 氷床コアのダストのデータを示す。第 1 期ドームふじ氷床コアのデータに比べ、第 2 期のデータは測定精度と時間分解能が格段に向上した。レーザー遮蔽式固体微粒子分析計によるデータは、粒径の測定精度が低いため、ダストの体積濃度から算出したフラックスが、コールターカウンターによる分析値から算出したフラックスに比べて大きな値となっている。しかし、相対的な経年変化はコールターカウンターによるデータと同様であり、フラックスの変動が高時間分解能で良く捉えられたことが分かる。ダストのフラックスは、良く知られているように、LGM（Last Glacial Maximum、略して LGM）において高く、退氷期に減少し、完新世に低くなった。この変化傾向はドーム C とほぼ同じであったが、フラックスの値は、ドーム C の 3 倍程度であった。ダストのフラックスは 1 万 2～3 千年前までには、ほぼ完新世のレベルまで低下していた。

ダストの粒径は、先行研究により、南極のドーム C、EDML（ドイツのコーネン基地）、Vostok、Komsomolskaia では、寒冷だった LGM の方が温暖な完新世よりも小さかったと報告されているが、ドーム B ではその逆であった。ドームふじでは LGM では粒径が小さく、最終退氷期に増加し、完新世では大きくなっていた。このことから、ドーム B 以外の東南極の広域で、ダストの粒径が LGM で小さく、完新世で大かったことが明らかになった（東他、2021; Goto-Azuma et al., 2022b,c）。

ICP-MS で得られたダスト由来の元素の比が最終退氷期に変化したことから、最終退氷期には、ダストのフラックスと粒径だけでなく、鉱物組成も変化していたことが明らかになった（Goto-Azuma et al., 2022b, c）。これらのことから、LGM と完新世ではドームふじに飛来するダストの発生源が異なってい

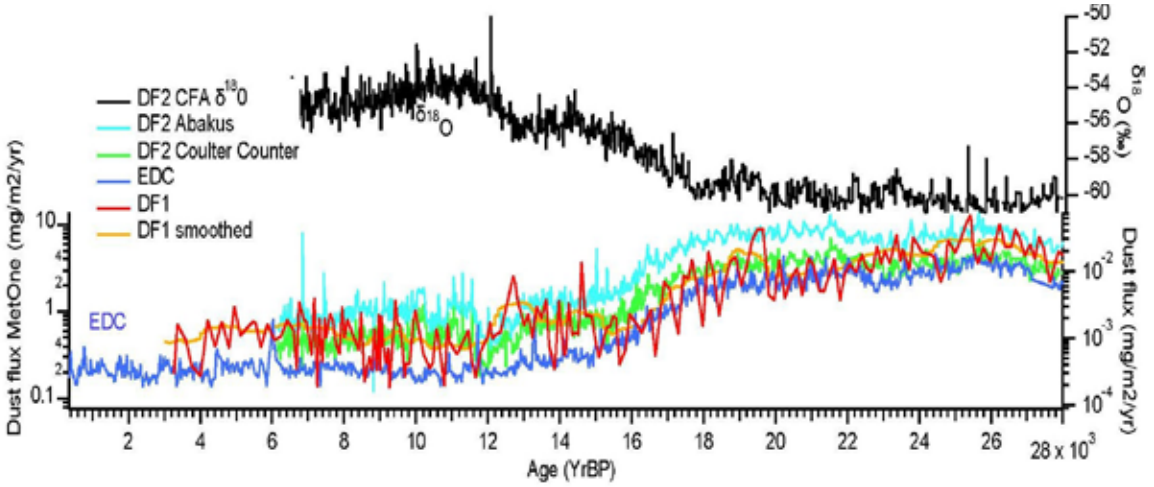


図 1：南極の氷床コアから復元されたダストのフラックス及び酸素同位体比（δ^{18}O）の変動（東他、2021；Goto-Azuma et al., 2022b, c）

DF 1 及び DF2 はそれぞれ第 1 期及び第 2 期のドームふじコアの分析データ。EDC はドーム C コアの分析データ（Lambert et al., 2008）。δ^{18}O は CFA データの 50 ㎝平均値。DF2 Abakus はレーザー遮蔽式個体微粒子分析計による CFA データの 50 ㎝平均値。DF2 Coulter Counter はコールターカウンターによる 50 ㎝平均のダストデータ。DF1 はレーザー散乱式個体微粒子分析計のデータ（Dome Fuji Ice Core Project members, 2017）。DF1 smoothed は DF1 の 1000 年平均値。DF2 Coulter Counter はコールターカウンターによるダストのデータ。DF1 のデータは左の縦軸。それ以外は右の縦軸。

たと推定される。寒冷期にダストの粒径が小さくなったことは、より遠方からのダストが東南極内陸部に到達すしていたことを示唆している。

３－２．ブラックカーボンの変動

本研究では、BC の質量濃度だけでなく、南極の深層氷床コアにおいて初となる数濃度と粒径のデータを高精度、高時間分解能で取得した。その結果、質量濃度と数濃度の経年変化が大きく異なることが判明した。質量濃度は LGM から最終退氷期にかけて減少したが、完新世に再び増加した。数濃度は LGM で低く、最終退氷期に増加し、完新世で高かった。また、BC の粒径は LGM で大きく、最終退氷期に減少し、間氷期には小さかった（Goto-Azuma et al., 2021, 2022a）。これは、ダストとは逆の傾向である。

ドームふじにおける BC のフラックスは、LGM に高く、退氷期に減少したが、完新世に入って再び増加した。これは、フラックスが LGM で低く、最終退氷期に増加した WDC とは大きく異なる。東南極のドームふじと西南極の WDC の地域差が原因である可能性もあるが、大粒径の BC を検出できない通常の SP2 による分析では検出できない BC が多かったことが原因である可能性もある。

３－３．ダストとブラックカーボンによる氷床コアの年代同期の試み

ドームふじ氷床コアでは高精度のダストと BC のデータを取得することができたが、ダスト濃度の低い完新世において、ドーム C と WDC のダストデータは精度が低いか、データが欠損しており、ドームふじと共通のピークを検出することが困難であった。BC については WDC のデータとの比較を試みたが、共通のピークを検出することができなかった。地域差の可能性もあるが、EDC では質量濃度に大きな影響を及ぼす大粒径の粒子が検出できなかったことが原因である可能性もある。

４．今後の課題

本研究は 2022 年度まで繰り越したため、現在のところ、データ解析がまだ終了していない。今後、ダストや BC の粒径変化、ダストの鉱物組成変化と気候・環境変動との関係解明に向けて、さらに解析を進める必要がある。また、南極の他の深層氷床コアと、測定法の違いも考慮して、より詳細な比較解析を実施する必要がある。氷床班やモデル班との連携も進める必要がある。

参考文献

東久美子他、アイスコア連続融解分析システムを用いたドームふじ深層氷床コアの高時間分解能固体微粒子分析、雪氷研究大会 2020、2020.

東久美子他、南極ドームふじ深層氷床コア中ダストの濃度と粒径の高時間分解能解析－最終氷期最寒期～完新世中盤における変動－、雪氷研究大会 2021、2021.

Dome Fuji Ice Core Project members, State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, **3**, DOI: 10.1126/sciadv.1600446, 2017.

Goto-Azuma, K. et al., Continuous flow analysis of black carbon in Dome Fuji deep ice core over Termination I using a wide-range single-particle soot photometer, The 12th Symposium on Polar Science, 2021.

Goto-Azuma, K. et al., Changes in concentration and size of black carbon particles at Dome Fuji, Antarctica across the Last Glacial Termination, JpGU 2022a.

Goto-Azuma, K. et al., High-resolution analyses of dust in the Dome Fuji deep ice-core from the LGM to mid-Holocene, IPICS 3rd Open Science Conference, 2022b.

Goto-Azuma, K. et al., Changes in flux, size and composition of dust at Dome Fuji, Antarctica across Termination I, The 13th Symposium on Polar Science, 2022c.

Lambert et al., Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core, *Nature*, **452**, 616-619, 2008.

Mori, T. et al., Improved technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water, *Aerosol Science & Technology*, **15**, 242-254, 2016.

東南極海岸堆積物のルミネッセンス特性と予察年代

田村　亨[1,2,3]、石輪健樹[4]、徳田悠希[5]、板木拓也[1]、佐々木聡史[6,7]、菅沼悠介[4,8]
[1]産業技術総合研究所、[2]東京大学、[3]名古屋大学、[4]国立極地研究所、[5]公立鳥取環境大学、[6]島根大学、[7]洞爺湖有珠山ジオパーク推進協議会、[8]総合研究大学院大学

B03(公募）氷床変動の高精度予測のための地質年代測定手法の開発と適用（代表：田村　亨）

１．背景と目的

南極氷床の気候変動に対する応答を理解し予測精度を向上することは喫緊の課題である．南極の氷床は地球上の全氷河･氷床の約 90%を占めており, 全てが融解すれば海面高度を約 60 m も上昇させる．しかし，南極氷床の融解メカニズムは複雑で定量的な観測も難しい．氷床の融解は表面だけでなく，沿岸の棚氷の底面融解や氷床本体からの分離によることも一因である．底面融解には温かい周極深層水の流入，また氷床からの分離には棚氷表面の融解水の貫入などが重要だが，そうした複雑なプロセスを氷床の数値モデルに取り込むことは容易ではない．

氷床モデルの精度を向上するために，南極と周辺海域の地質・地形に記録された過去の海面高度や気候の情報を，モデルの検証や制約条件に用いることが考えられる．氷床モデルは，過去の気候に対する氷床量を推定し，氷床荷重によるアイソスタシーを考慮することで，相対海面高度を計算する．ここで「検証」とは，例えば 5 万年前などの過去の相対海面高度をモデル計算し，地質・地形の記録と答えあわせをして，モデルの妥当性を確かめることである．また，予め地質・地形記録による海面高度と調和するように氷床モデルの「制約条件」を設定することもある．いずれにせよ，氷床モデルの検討には，地質・地形の情報，中でも過去の海面変動についての正しい情報が重要である．

東南極の隆起海浜・沿岸湖沼堆積物の高度・堆積年代による海面指標は，現状では氷床モデルの推定とはうまく合致していない．海面指標のデータは主に 1 万年前以降の完新世と 3〜4.5 万年前の海洋酸素同位体ステージ（MIS）3 に集中し，それぞれ現海面〜+20 m の範囲に収まる（Miura et al., 1998）．モデルとデータが完新世ではそれなりに一致する一方で，MIS3 では大きく食い違っている．また，12 万年前の MIS5 の高海面期に対応する海面指標が欠けている．Ishiwa et al. (2021)では氷床モデルの修正により MIS3 における食い違いを低減する検討を行っているものの，まだ MIS3 の高すぎる海面指標を完全に説明するには至っていない．

本研究の目的は，東南極での地質・地形データとモデルとの食い違いが年代測定に起因する可能性を検証することである．この目的のために，東南極の堆積物に最適化した OSL（Optically Stimulated Luminescence，光励起ルミネッセンス）年代測定法を開発し，また実際に適用する．OSL 年代は地層や地形の堆積年代を鉱物粒子のルミネッセンス特性を用いて求める方法で, 適用範囲が現在から数十万年前までと，放射性炭素年代に比べて広いことが特長である． 田村は，これまで中・低緯度の海岸で堆積相や地中レーダ探査, OSL 年代を組み合わせて相対海面変動を復元する研究を行ってきたが, 2019 年に固体地球班の菅沼と石輪に南極での地中レーダ探査の相談を受けた際に，年代測定に問題がある可能性に気づいた．東南極で海面指標の編年に使われてきた放射性炭素年代は，測定限界の 5 万年を超える試料に汚染があると実際よりも若く見積もられやすい．MIS3 の海面指標の年代値は，宗谷海岸で採取された貝殻から主に 1990 年代に測定されたものだが，同試料の電子スピン共鳴（ESR）年代は MIS3 よりも古い MIS4〜6 を示す（Takada et al., 2003）ものの，その後，信頼性の高い年代測定法による検討が行われてこなかった．

２．方法

OSL 年代は，堆積物粒子が地層に埋積中に被爆した自然放射線量（蓄積線量，単位：Gy）を OSL 測定から求め，年間線量（単位：Gy/ka）で除すことで求められる．測定用の試料は，令和元年度の第 61 次南極調査隊により宗谷海岸のラングホブデと西オングル島のそれぞれ 2 地点で採取されたもの

を用いた．試料から，OSL 測定のために石英および長石の砂（粒径 180–250 μm）と細粒シルト（粒径 4–11 μm）を抜き出し，また年間線量を求めるためにバルク試料について含水率測定と質量分析を行った．

蓄積線量を求めるために最適な OSL 信号について，信号の特性やドーズリカバリーテストを用いて検討した．検討を行った OSL 信号は，石英の砂とシルトについては青色光の刺激による OSL，長石の砂とシルトについては赤外光の刺激による IRSL（Infrared Stimulated Luminescence）と，IRSL の後に昇温して再度赤外光の刺激を与えることによる post-IR IRSL である．

テストの結果に基づく最適な OSL 信号により，OSL 年代を求めた．年代測定を行った試料は，ラングホブデのトレンチで認められた上下 2 層のユニットからそれぞれ 2 点ずつ採取された 4 点である．シルトについては全 4 試料から年代を求め，砂は上下 1 試料ずつの 2 試料について年代を求めた．

３．成果

本研究の結果，宗谷海岸の堆積物について，次のような OSL 特性が明らかになり，また予察 OSL 年代が得られた. 1) 石英 OSL 信号の低感度, 2) 年代による最適な IRSL および post-IR IRSL 信号の違い, 3) 完新世および MIS 7 の予察年代.

1) 石英 OSL はシルト，砂ともに信号感度（単位蓄積線量および単位重量あたりの信号強度）が低く，さらに見た目の信号の大半は，石英粒子中に混入した長石から発生している．このことから石英 OSL は年代測定に用いることができない．こうした低感度の石英は，近傍の基盤岩から直接供給されたことによると考えられる．
2) 長石の IRSL および post-IR IRSL は，砂とシルトともに信号感度が高い．ドーズリカバリーテストは，IRSL 信号は完新世の砂のみに適用でき，post-IR IRSL 信号は完新世の砂とシルトには低い測定温度（それぞれ 150℃と 225℃），更新世の砂とシルトには高い測定温度（それぞれ 260℃と 290℃）が最適，ということを示す．
3) 最適な測定条件による OSL 年代は，上位のユニットでは貝殻の放射性炭素年代（6000–7000 cal BP）と整合的で，下位の湯ミットでは 20 万から 26 万年前の，MIS 7 に相当するものとなった．

以上の結果は 2021 年 9 月にオンラインで行われた 16th International Luminescence and Electron Spin Resonance Dating conference (LED2021)でポスター発表を行い，さらに 2022 年 5 月に国際学術誌 Quaternary Geochronology で論文出版（Tamura et al., 2022）を行った．

４．今後の課題

今後の課題は，本研究で明らかになった OSL 特性にもとづき，宗谷海岸のさらなる試料について年代測定を行い，第四紀後半の海面変動史を明らかにすることである．予察年代では従来のデータでも示されていた完新世の高海面期のほか，MIS 7 の高海面期の存在も示唆された．この他，MIS 5 の高海面期の有無についての検討や，MIS 3 の放射性炭素年代が得られている地点での年代のクロスチェックを行うことが考えられる．また，年代測定結果の信頼性を担保するために，現世の表層堆積物に残存する余剰線量（太陽光によりリセットされなかった成分）のマッピングや当海岸での堆積過程において OSL のリセットが発生するプロセスについて検討することも考えられる．

参考文献

Ishiwa, T., Okuno, J.I. and Suganuma, Y., Excess ice loads in the Indian Ocean sector of East Antarctica during the last glacial period. *Geology*, **49**, 1182–1186, 2021.

Miura, H., Maemoku, H., Igarashi, A. and Moriwaki, K., Late Quaternary Raised Beach Deposits and Radiocarbon Dates of Marine Fossils Around Lützow Holm Bay, *Special Map Series of the National Institute of Polar Research*, no. 6, 46 p., 1998.

Takada, M., Tani, A., Miura, H., Moriwaki, K. and Nagatomo, T., ESR dating of fossil shells in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1323–1328, 2003.

Tamura, T., Ishiwa, T., Tokuda, Y., Itaki, T., Sasaki, S. and Suganuma, Y., Luminescence characteristics of coastal sediments in Langhovde, East Antarctica, *Quaternary Geochronology*, **70**, 101298, 2022.

成果リスト

－雑誌論文－

［著者名，論文表題，雑誌名，巻，最初と最後の頁，掲載論文のDOI，発行年，査読の有無，オープンアクセス，国際共著］

2021 年度

Ohashi Y., Yamamoto-Kawai M., Kusahara K., Sasaki K., Ohshima K. I., Age distribution of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, estimated using chlorofluorocarbon and sulfur hexafluoride, *Scientific Reports*, 12, in press. (査読有)

Shimada K., Kitade Y., Aoki S., Mizobata K., Cheng, L., Takahashi T. K., Makabe, R., Kanda J., Odate T., Shoaling of abyssal ventilation in the Eastern Indian Sector of the Southern Ocean. *Communications Earth & Environment,* (in press) (査読有)

Azevedo M., Aoki S., Kitade Y., Seasonal Variation and Governing Dynamics of the Mixed Layer in the Indian Sector of the Southern Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 127, e2021JC017838, https://doi.org/10.1029/2021JC017838, 2022. (査読有)(オープンアクセス)

Matsui, H., Ikehara, M., Suganuma, Y., Seki, O., Oyabu, I., Kawamura, K., Dust correlation and oxygen isotope stratigraphy in the Southern Ocean over the last 450 kyrs: An Indian sector perspective, *Quaternary Science Reviews*, (accepted 2022/4/4). (査読有)

Ogawa, A., Jimi, N., Hiruta, S.F., Chen, C., Kobayashi, I., Pratama, G.A., Tanaka, H., Okanishi, M., Komatsu, H., Ikehara, M., Taxonomy and distribution of deep benthos collected in and around the Southern Ocean during the 30th Anniversary Expeditions of R/V *Hakuho Maru*: Annelida, Mollusca, Ostracoda, Decapoda, and Echinodermata, *Polar Science*, https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100846, (Accepted: 21 April 2022) (査読有) (国際共著)

Patterson M O, Levy R. H, Kulhanek D. K, van de Flierdt T, Naish T R, Horgan H, Dunbar G B, Ash J, Pyne A, Mandeno D, Winberry P, Harwood D M, Florindo F, Jimenez-Espejo F J, Läufer A, Yoo K-C , Seki O, Stocchi P, Klages J P, Lee J I, ColleoniF, Suganuma Y, Gasson E, Ohneiser C, Flores J-A, Try D, Kirkman R, the SWAIS 2C Science Team, Sensitivity of the West Antarctic Ice Sheet to +2° C (SWAIS 2C), *Scientific Drilling*, 30, 101-112, https://doi.org/10.5194/sd-30-101-2022, 2022. (査読有)

Michael E. Weber, Ian Bailey, Sidney R. Hemming, Yasmina M. Martos, Brendan T. Reilly, Thomas A. Ronge, Stefanie Brachfeld, Trevor Williams, Maureen Raymo, Simon T. Belt, Lukas Smik, Hendrik Vogel, Victoria Peck, Linda Armbrecht, Alix Cage, Fabricio G. Cardillo, Zhiheng Du, Gerson Fauth, Christopher J. Fogwill, Marga Garcia, Marlo Garnsworthy, Anna Glüder, Michelle Guitard, Marcus Gutjahr, Iván Hernández-Almeida, Frida S. Hoem, Ji-Hwan Hwang, Mutsumi Iizuka, Yuji Kato, Bridget Kenlee, Suzanne OConnell, Lara F. Pérez, Osamu Seki, Lee Stevens, Lisa Tauxe, Shubham Tripathi, Jonathan Warnock, and Xufeng Zheng, Antiphased dust deposition and productivity in the Antarctic Zone over 1.5 million years, *Nature Communications*, 13, https://doi.org/10.1038/s41467-022-29642-5, 2022. (査読有)(オープンアクセス)

松井浩紀. TARB書評：地球科学に革命を起こした船―グローマー・チャレンジャー号. *Tokyo Academic Review of Books*, 41, 1–1. https://doi.org/10.52509/tarb0041, 2022. (査読無) (オープンアクセス)

Makabe, R., T. Hasegawa, M. Sano, H. Kashiwase, M. Moteki, Copepod assemblages in the water column and drifting sea-ice floes in the ice-edge region in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the austral summer. *Polar Biology*, 45: 749-762, 2022.

Makabe, R., K.T. Takahashi ,Chlorophyll a, macronutrient concentrations, and photosynthetically active radiation measured during the Umitaka-maru cruise of the 61st Japanese Antarctic Research Expedition, January 2020. *Polar Data Journa*l, 6: 9-16. (2022 年 4 月に受理)

Saruya, T., Fujita, S., Inoue, R.. Dielectric anisotropy as indicator of crystal orientation fabric in Dome Fuji ice core: Method and initial results, *Journal of Glaciology*, 68(267), 65-76. Doi:10.1017/jog.2021.73, 2022.

Ryu Uemura, Kosuke Masaka, Yoshinori Iizuka, Motohiro Hirabayashi, Hitoshi Matsui, Risei Matsumoto, Miki Uemura, Koji Fujita, Hideaki Motoyama, Soluble salts in deserts as a source of sulfate aerosols in an Antarctic ice core during the last glacial period, *Earth and Planetary Science Letters*, 578, 117299,doi:10.1016/j.epsl.2021.117299, 2022. (オープンアクセス)

福田洋一，服部晃久，奥野淳一，青山雄一，土井浩一郎，国立極地研究所での重力変化について，*測地学会誌*，2022，印刷中．(査読有)

Shi T., Fukuda Y., Doi K., Okuno J., Extraction of GRACE/GRACE-FO Observed Mass Change Patterns across Antarctica via Independent Component Analysis (ICA), *Geophysical Journal International*, Doi: 10.1093/gji/ggac033, 2022. (査読有)

Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura, Koichiro Doi, Validation for ice flow velocity variations of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 offset tracking, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3165581, April 2022.（査読有）（オープンアクセス）

Sato T., Nogi Y., Sato H., Fujii M., A new tectonic model between the Madagascar Ridge and Del Cano Rise in the Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2021JB021743, doi;10.1029/2021JB021743, 2022（査読有）

Aoki S., T. Takahashi, K. Yamazaki, D. Hirano, K. Ono, K. Kusahara, T. Tamura, G. D. Williams, Warm surface waters increase Antarctic ice shelf melt and delay bottom water formation, *Communications Earth & Environment*, accepted. (査読有) (国際共著)

Greve, R. and Chambers,C. Mass loss of the Greenland ice sheet until the year 3000 under a sustained late-21st-century climate. *Journal of Glaciology*, 68, 618-624. doi:10.1017/jog.2022.9, 2022

Kuniyoshi,Y., Abe-Ouchi,A., Sherriff-Tadano,S., Chan,W. and Saito,F., Effect of climatic precession on Dansgaard-Oeschgerlike oscillations. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095695. doi:10.1029/2021GL095695, 2022

Suzuki, T., Komuro, Y., Kusahara, K., and Tatebe, T., Transient Influence of the Reduction of Deepwater Formation on Ocean Heat Uptake and Heat Budgets in the Global Climate System. Geophysical Research Letters, 49, e2021GL095179, doi:10.1029/2021GL095179, 2022.

Fraser A. D., Massom R. A., Handcock M. S., Reid P., Ohshima K. I., Raphael, M. N., Cartwright, J., Klekociuk, A. R., Wang, Z., Porter-Smith, R., Eighteen-year record of circum-Antarctic landfast-sea-ice distribution allows detailed baseline characterisation and reveals trends and variability, *The*

Cryosphere, 15, 5061-5077, https://doi.org/10.5194/tc-15-5061-2021, 2021. [Nature Climate Change の research highlights] (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Mensah V., **Nakayama Y.**, Fujii M., Nogi Y., **Ohshima K. I.**, Dense water downslope flow and AABW production in a numerical model: Sensitivity to horizontal and vertical resolution in the region off Cape Darnley polynya, *Ocean Modelling*, 165, 101843, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101843, 2021. (査読有)

Kashiwase H., **Ohshima K. I.**, **Nakata K.**, **Tamura T.**, Improved SSM/I thin ice algorithm with ice type discrimination in coastal polynyas, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38, 823-835, https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0145.1, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Mizuta G., Fukamachi Y., Simizu D., Matsumura Y., **Kitade Y.**, **Hirano D.**, Fujii M., Nogi Y., **Ohshima K. I.**, Seasonal evolution of Cape Darnley Bottom Water revealed by mooring measurements, *Frontiers in Marine Science*, 8:657119, https://doi.org/10.3389/fmars.2021.657119, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Yamazaki K., **Aoki S.**, **Katsumata K.**, **Hirano D.**, **Nakayama Y.**, Multidecadal poleward shift of the southern boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica, *Science Advances*, 7(24), eabf8755, https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8755, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Kokubun N., Tanabe Y., **Hirano D.**, **Mensah V.**, **Tamura T.**, **Aoki S.**, Takahashi A., Shoreward intrusion of oceanic surface waters alters physical and biological ocean structures on the Antarctic continental shelf during winter: Observations from instrumented seals, *Limnology and Oceanography*, 66(10), 3740-3753, https://doi.org/10.1002/lno.11914, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Kiuchi M., Nomura D., **Hirano D.**, **Tamura T.**, Hashida G., Ushio S., Simizu D., **Ono K.**, **Aoki S.**, The effect of basal melting of the Shirase Glacier Tongue on the CO2 system in Lutzow-Holm Bay, East Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, 126(5), https://doi.org/10.1029/2020JG005762, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

川合美千代, **田村岳史**, 渡邉英嗣, 西岡純, 野村大樹, 真壁竜介, 溝端浩平, 安中さやか, 海洋学の 10 年展望 2021：極域, *海の研究* 30, 147-166, https://doi.org/10.5928/kaiyou.30.5_159, 2021. (査読有) (オープンアクセス)

Nakayama Y., C.A. Greene, F. S. Paolo, V. Mensah, H. Zhang, H. Kashiwase, D. Simizu, J.S. Greenbaum, D.D. Blankenship, A. Abe-Ouchi, **S. Aoki**, Antarctic Slope Current modulates ocean heat intrusions towards Totten Glacier, *Geophys.Res.Lett.*, 48 (17), e2021GL094149, http://dx.doi.org/10.1029/2021GL094149, 2021. (査読有) (国際共著)

Ijiri, A., Izumi, T., Morono, Y., **Kato, Y.**, Terada, T., **Ikehara, M.**, Purification of disc-shaped diatoms from the Southern Ocean sediment by a cell sorter to obtain an accurate oxygen isotope record, *ACS Earth and Space Chemistry*, DOI:10.1021/acsearthspacechem.1c00201, 2021. (査読有)

Sato, H., Machida, S., Senda, R., Sato, K., Kumagai, H., Hyodo, H., Yoneda, S., **Kato, Y.**, Petrology, geochemistry, and geochronology of plutonic rocks from the present Southwest Indian Ridge: Implications for dropstone distribution in the Indian Ocean. *Polar Science*, 29, https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100725 , 2021. (査読有) (オープンアクセス)

Civel-Mazens, M., Crosta, X., Cortese, G., Michel, E., Mazaud, A., Ther, O., **Ikehara, M.**, **Itaki, T.**, Antarctic Polar Front migrations in the Kerguelen Plateau region, Southern Ocean, over the past 360 kyrs, *Global and Planetary Change*, 202, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103526, 2021. (査読有) (国際共著)

Shukla, S.K., Crosta, X., **Ikehara, M.**, Sea Surface Temperatures in the Indian Sub-Antarctic Southern Ocean for the Last Four Interglacial Periods. *Geophysical Research Letters 48*, e2020GL090994. https://doi.org/10.1029/2020GL090994, 2021. (査読有) (国際共著)

Marschalek J W, Zurli L, Talarico F, van de Flierdt T, Vermeesch P, Carter A, Beny F, Bout-Roumazeilles V, Sangiorgi F, Hemming S R, Pérez L F, Colleoni F, Prebble J G, van Peer T E, Perotti M, Shevenell A E, Browne I, Kulhanek D K, Levy R, Harwood D, Sullivan N B, Meyers S R, Griffith E M, Hillenbrand C D, Gasson E, Siegert M J, Keisling B, Licht K J, Kuhn G, Dodd J P, Boshuis C, De Santis L, McKay R M, IODP Expedition 374 scientists, A large West Antarctic Ice Sheet explains early Neogene sea-level amplitude, *Nature*, 600, https://doi.org/10.1038/s41586-021-04148-0, 2021. (査読有)

Shimada, K., **S. Takao**, **K.T. Takahashi**, Y. Kitade, J. Kanda, **T. Odate**, Physical and chemical oceanographic data during Umitaka-maru cruise of the 59th Japanese Antarctic Research Expedition in January 2018. *Polar Data Journal 5*, 11-36. DOI: 10.20575/00000023, 2021.

Makabe, R., **S. Takao**, **K.T. Takahashi, T. Odate** , Chlorophyll a and macro-nutrient concentrations during the icebreaker Shirase cruise of the 60th Japanese Antarctic Research Expedition. *Polar Data Journal 5*, 47-53. DOI: 10.20575/00000025, 2021.

Takahashi, K.T., **R. Makabe**, **T. Odate**, Zooplankton monitoring using a twin NORPAC net during the 61st Japanese Antarctic Research Expedition in austral summer 2019-2020. *Polar Data Journal 5*, 69-79. DOI: 10.20575/00000028, 2021

Takahashi, K.T., T.R. Takamura, **T. Odate**, Zooplankton communities along a Southern Ocean monitoring transect at 110° E from three CPR surveys (Dec 2014, Jan 2015, Mar 2015). *Polar Biology 44*, 1069-1081. DOI: 10.1007/s00300-021-02862-z. 2021.

Campbell, M., D. Schoeman, W. Venables, R. Abu-Alhaija, S. Batten, S. Chiba, F. Coman, C. Davies, M. Edwards, R. Eriksen, J. Everett, Y. Fukai, M. Fukuchi, O.E. Garrote, G. Hosie, J. Huggett, D. Johns, J. Kitchener, P. Koubbi, F. McEnnulty, E. Muxagata, C. Ostle, K. Robinson, A. Slotwinski, K. Swadling, **K. Takahashi**, M. Tonks, J. Uribe-Palomino, H. Verheye, W. Wilson, M. Worship, A. Yamaguchi, Z. Wuchang, A. Richardson, Testing Bergmann's Rule in marine copepods. *Ecography 44*, 1283-1295. DOI: 10.1111/ecog.05545, 2021

Sugioka, R., K. Matsuno, K.D. Takahashi, **R. Makabe**, **K. Takahashi**, **M. Moteki**, **T. Odate**, A. Yamaguchi, North-south changes of zooplankton community and copepods population along the 110° E line in the Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer. Bulletin of Fisheries Science, Hokkaido University 71(1): 39-50. DOI: 10.14943/bull.fish.71.1.39, 2021.

Nirazuka, S., **R. Makabe**, K.M. Swadling, **M. Moteki** , Phyto-detritus feeding by early-stage larvae of Electrona Antarctica (Myctophidae) off Wilkes Land in the Southern Ocean, austral summer 2017. *Polar Biology 44*, 1415-1425, 2021.

Takahashi, K.T., G.W. Hosie, The status and trends of Southern Ocean zooplankton based on the SCAR Southern Ocean Continuous Plankton Recorder (SO-CPR) survey. SCAR Bulletin, No. 206, 97p, 2021. (査読無)

Tomoyasu, Y., T. Kuwahara, **K.T. Takahashi**, Distribution pattern of cold water pteropods in offshore and coastal Okhotsk Sea in winter. Chiribotan, 52 (1): 47-54, 2021. (査読無)

Sakurai, H., **M. Sano**, **K.T. Takahashi,** Workshop kit for promoting marine education using resin-embedded specimens

of the Southern Ocean zooplankton. Bulletin of the Plankton Society of Japan, 69 (1) , 2021. (査読無) (in press)

Tomoyasu, Y., T. Kuwahara, **K.T. Takahashi**, Distribution pattern of cold water pteropods in offshore and coastal Okhotsk Sea in summer. Chiribotan, 52 (2) , 2021. (査読無) (in press)

Tsutaki S., Fukui, K., **Motoyama, H.**, Hattori, A., Okuno, J., **Fujita, S.**, **Kawamura, K.**, Surface heights over a traverse route from S16 to Dome Fuji, East Antarctica as measured by kinematic GNSS surveys in 2012–2013 and 2018–2019, *Polar Data Journal*, 5, 144–156, DOI: 10.20575/00000033, 2021(査読有)(オープンアクセス)

Tsutaki, S., **Fujita, S.**, **Kawamura, K.**, Abe-Ouchi, A., Fukui, K., **Motoyama, H.**, Hoshina, Y., **Nakazawa, F.**, Obase, T., Ohno, H., **Oyabu, I.**, Saito, F., Sugiura, K., Suzuki, T., High-resolution subglacial topography around Dome Fuji, Antarctica, based on ground-based radar surveys conducted over 30 years, *The Cryosphere Discuss.* [preprint], DOI: 10.5194/tc-2021-266, 2021, 査読なし（査読中）（オープンアクセス）

Saruya, T., **Fujita, S.**, Iizuka, Y., Miyamoto, A., Ohno, H., Hori, A., Shigeyama, W., **Hirabayashi, M.**, and **Goto-Azuma, K.**, Development of crystal orientation fabric in the Dome Fuji ice core in East Antarctica: implications for the deformation regime in ice sheets, *The Cryosphere Discuss.* [preprint], https://doi.org/10.5194/tc-2021-336, in review, 2021.

Nakazawa, F., **Goto-Azuma, K.**, Ultraviolet germicidal irradiation of melted snow and ice samples: Inactivation of microorganisms and effects on insoluble microparticles, *Journal of Glaciology*, 1-8, 2021.

Oyabu, I., **Kawamura, K.**, Uchida, T., **Fujita, S.**, **Kitamura, K.**, **Hirabayashi, M.**, Aoki, S., Morimoto, S., Nakazawa, T., Severinghaus, J. P., and Morgan, J. D., Fractionation of O2/N2 and Ar/N2 in the Antarctic ice sheet during bubble formation and bubble-clathrate hydrate transition from precise gas measurements of the Dome Fuji ice core, *The Cryosphere*, 15, 5529–5555, 2021.

Van Liefferinge, B., Taylor, D., **Tsutaki, S.**, **Fujita, S.**, Gogineni, P., **Kawamura, K.**, Matsuoka, K., Moholdt, G., **Oyabu, I.**, Abe-Ouchi, A., Awasthi, A., Buizert, C., Gallet, JC, Isaksson, E., **Motoyama, H.**, **Nakazawa, F.**, Ohno, H., O'Neill, C., Pattyn, F., Sugiura, K., Surface mass balance controlled by local surface slope in inland Antarctica: implications for ice-sheet mass balance and Oldest Ice delineation in Dome Fuji, *Geophysical Research Letters*, 48(24), 1–10, DOI: 10.1029/2021GL094966, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Ohno, H., Iizuka, Y., **Fujita, S.**, Pure rotational Raman spectroscopy applied to N2/O2 analysis of air bubbles in polar firn. Journal of Glaciology, 67(265), 903-908. doi:10.1017/jog.2021.40, 2021.

Lee, G., Ahn, J., Ju, H., Ritterbusch, F., **Oyabu, I.**, Kim, S., Moon, J., Buizert, C., Ghosh, S., **Kawamura, K.**, Lu, Z.-T., Hong, S., Han, C. H., Hur, S. D., Jiang, W., and Yang, G.-M.: Chronostratigraphy of blue ice at the Larsen Glacier in Northern Victoria Land, East Antarctica, *The Cryosphere Discuss.* [preprint], https://doi.org/10.5194/tc-2021-294, in review, 2021.

Nagatsuka N., **Goto-Azuma K.**, Tsushima A., Fujita K., Matoba S., Onuma Y., Dallmayr R., Kadota M., **Hirabayashi M.**, Ogata J., Ogawa-Tsukagaw, Y., **Kitamura K.**, **Minowa M.**, Komuro Y., **Motoyama H.**, Aoki T., Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years, *Clim. Past*, 17, 1341-1362, doi:10.5194/cp-17-1341-2021, 2021.

M. Minowa, **S. Sugiyama**, I. Masato, S. Yamane and S. Aoki, Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica, *Nature Communications*, 12, 4209, https://doi:10.1038/s41467-021-23534-w, 2021.

Sugiyama S., **Minowa M.**, Fukamachi Y, Hata S, Yamamoto Y, Sauter T, Schneider C, Schaefer M, Subglacial discharge controls seasonal variations in the thermal structure of a glacial lake in Patagonia. *Nature Communications*, 12, 6301, doi:10.1038/s41467-021-26578-0, 2021

Podolskiy E, Murai Y, Kanna N, **Sugiyama S.**, Ocean-bottom and surface seismometers reveal continuous glacial tremor and slip. *Nature Communications*, 12, 3929, doi:10.1038/s41467-021-24142-4, 2021.

Podolskiy E, Murai Y, Kanna N, **Sugiyama S.,** Glacial earthquake-generating iceberg calving in a narwhal summering ground: The loudest underwater sound in the Arctic? *Journal of the Acoustical Society of America*, 151(1), doi:10.1121/10.0009166, 2022.

Podolskiy E, Murai Y, Kanna N, **Sugiyama S.**, Ocean-bottom seismology of glacial earthquakes: the concept, lessons learned, mind the sediments. *Seismological Research Letters*, 92(5), 2850-2865, doi:10.1785/0220200465, 2021

Wang Y, **Sugiyama S.**, Bjork A, Surface elevation change of glaciers along the coast of Prudhoe Land, Northwestern Greenland from 1985 to 2018. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 126, e2020JF006038, doi:10.1029/2020JF006038, 2021

Bourbonnais A, Ho S L, Kinnard C, Lenaerts J T M, **Sugiyama S**, Altabet M, Global change on the Blue Planet. *Communications Earth & Environment 2*, 163, doi:10.1038/s43247-021-00227-2, 2021 （査読無）（解説）

杉山慎, 南極の氷が融けると世界はどうなるのか？, *中央公論.jp,* 2021.12 （査読無）（解説）

Fukuda Y., **Okuno J.**, **Doi K.**, Lee C., Capra A., Absolute gravity measurement data at Jang Bogo Station and Mario Zucchelli Station in 2019, *Polar Data Journal*, 5, 11, Doi: doi.org/10.20575/00000032, 2021. (査読有)(国際共著)

Fukuda Y., **Okuno J.**, **Doi K.**, Lee C., Gravity observations at Jang Bogo Station, Antarctica, and scale factor calibrations of different relative gravimeters, *Polar Science* 100702-100702, Doi: 10.1016/j.polar.2021.100702, 2021. (査読有)(国際共著)

Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura, **Koichiro Doi**, Validation for ice flow velocity of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 image correlation, I*EEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2021 (IGARSS 2021),* pp.5603-5606, July 2021.（査読有）

中村和樹, 和泉勇治, 子田康弘, 畳み込みニューラルネットワークの出力結果に二値化を適用した鋼橋の腐食割合算出の一検討, *AI・データサイエンス論文集*, vol.2, no.J2, pp. 103-112, 2021 年 11 月.（査読有）

高橋晋平, **中村和樹,** 和泉勇治, 子田康弘, 畳み込みニューラルネットワークを用いた鋼橋の腐食検出とトレーニングデータ数の関係, *AI・データサイエンス論文集*, vol.2, no.J2, pp. 801-802, 2021 年 11 月.（査読有）(Corresponding author)

平田憲嵩, **中村和樹,** 和泉勇治, 子田康弘, ディープニューラルネットワークを用いたコンクリート橋における変状箇所検出の一検討, *AI・データサイエンス論文集*, vol.2, no.J2, pp. 568-577, 2021 年 11 月.（査読有）(Corresponding author)

杉山安洋, **中村和樹,** 大山勝徳, 遠隔授業実施時の演習サーバへの 2 要素認証の円滑な導入方法の検討とその評価, *日本大学工学部紀要*, 63 巻 1 号, pp. 1-10, 2021 年 9 月.（査読有）

中村和樹, 畳み込みニューラルネットワークを用いた鋼橋の腐食検出, *画像ラボ*, 32 巻 7 号, pp.1-7, 2021 年 7 月.（査読無

Sasaki, S, Irizuki, T, Seto, K, **Suganuma Y.**, Ostracoda and paleoenvironment of Holocene raised beach sediment in

Skarvsnes, East Antarctica, *Paleontological Research*, Paleontological Research, in press. (査読有)

Sasaki, S., Irizuki, T., Itaki, T., Tokuda, Y., **Ishiwa, T.**, **Suganuma Y.**, Relationship between modern deep-sea ostracods and water mass structure in East Antarctica, *Paleontological Research*, in press. (査読有)

Kanamaru, T., Furukawa, K., Zhao, X., **Suganuma Y.**, Magnetic petrology of pumice fall deposits of the 1783 eruption of Asama volcano, Japan, Earth, *Planets and Space*, in press. (査読有) , 国際共著

Suganuma Y., Head, M.J., Sagawa, T., Preface for the article collection "Stratigraphy and paleoclimatic/paleoenvironmental evolution across the Early–Middle Pleistocene transition in the Chiba composite section, Japan, and other reference sections in East Asia", *Progress in Earth and Planetary Science,* 9, 9, https://doi.org/10.1186/s40645-022-00468-5. (査読有) (国際共著)

Itaki, T., Utsuki, S., Haneda, Y., Izumi, K., Kubota, Y., **Suganuma Y.**, Okada, M., Millennial-scale oscillations in the Kuroshio–Oyashio boundary during MIS-19 based on the radiolarian record from the Chiba composite section, central Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 9-5, 2022. https://doi.org/10.1186/s40645-021-00465-0 (査読有)

Suganuma Y., Okada, M., Head, M.J., Kameo, K., Haneda, Y., Hayashi, H., Irizuki, T., Itaki, T., Izumi, K., Kubota, Y., Nakazato, H., Nishida, N., Okuda, M., Satoguchi, Y., Simon, Q., Takeshita, Y., Formal ratification of the Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Chibanian Stage and Middle Pleistocene Subseries of the Quaternary System: the Chiba Section, Japan, *Episodes*, 317-347, 2021. (査読有) (国際共著)

Balota, E.J., Head, M.J., Okada, M., **Suganuma Y.**, Haneda, Y.,Paleoceanography and dinoflagellate cyst stratigraphy across the Lower–Middle Pleistocene Subseries (Calabrian–Chibanian Stage) boundary at the Chiba composite section, Japan, P*rogress in Earth and Planetary Science*, 8:48, 2021. (査読有) (国際共著)

Kubota, Y., **Haneda, Y.**, Kameo, K., Itaki., Hayashi, H., Shikoku, K., Izumi, K., Head, M.J., **Suganuma Y.**, Okada, M.,Paleoceanography of the northwestern Pacific across the Early–Middle Pleistocene boundary (Marine Isotope Stages 20–18), *Progress in Earth and Planetary Science*, 8-29, 2021. (査読有) (国際共著)

Izumi, K., Haneda, Y., **Suganuma Y.**, Okada, M., Kubota, Y., Nishida, N., Kawamata, M., Matsuzaki, T., Multiproxy sedimentological and geochemical analyses across the Lower–Middle Pleistocene boundary: Chemostratigraphy and paleoenvironment of the Chiba composite section, central Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8-10, 2021. (査読有)

Lee, E.Y., Kominz, M., Reuning, L., Gallagher, S.J., Takayanagi, H., **Ishiwa, T.,** Knierzinger, W., Wagreich, M. Quantitative compaction trends of Miocene to Holocene carbonates off the west coast of Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*. 10.1080/08120099.2021.1915867. 2021. (査読有) (国際共著)

Ishiwa, T., **Okuno, J.**, **Suganuma Y.**, Excess ice loads in the Indian Ocean sector of East Antarctica during the last glacial period, *Geology*, 2021; doi: https://doi.org/10.1130/G48830.1(査読有)

Ishiwa, T., Yokoyama, Y., Obrochta, S., Uehara, K., **Okuno, J.**, Ikehara, M., Miyairi, Y. Temporal variation in radiocarbon pathways caused by sea-level and tidal changes in the Bonaparte Gulf, northwestern Australia. *Quaternary Science Reviews*, 266, 107079. 2021. 査読有

I**shiwa, T.**, Tokuda, Y., Itaki, T., Sasaki, S., **Suganuma Y.**, Shintaro Yamasaki, Bathymetry data and water column profiles in the shallow waters of Langhovde in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *Polar Science*, 28, 2021. (査読有)

川又基人, **土井浩一郎**, 澤柿教伸, **菅沼悠介**, 日本南極地域観測隊アーカイブ空中写真を用いた数値表 層モデル作成とその有用性, *地理学評論*, 94(1), 1-16, 2021

Saito, K., **Okuno, J.**, Machiya, H., Iwahana, G., Ohno, H., Yokohata, T., Climatic assessment of circum-Arctic permafrost zonation over the last 122 kyr, Polar Science, in press.

Hattori, A., **Aoyama, Y.**, **Okuno, J.**, **Doi, K.** GNSS Observations of GIA - Induced Crustal Deformation in Lützow - Holm Bay, East Antarctica. Geophysical Research Letters. 48, 2021.

Yamagata H., Kochii S., **Yoshida H.**, **Nogi Y.**, **Maki T.**, Development of AUV MONACA - A hover capable platform for detailed observation under ice -, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 33(6), 1223-1233, doi:10.20965/jrm.2021.p1223, 2021, (査読有)(オープンアクセス)

Jeon, M., J. Jung, M. Park, **S. Aoki**, T. Kim, and S. Kim. Tracing Circumpolar Deep Water and glacier meltwater using humic-like fluorescent dissolved organic matter in the Amundsen Sea, *Antarctica, Marine Chemistry 235*, 104008. https://doi.org/10.1016/j.marchem.2021.104008, 2021. (査読有) (国際共著)

Azevedo, M., **S. Aoki**, Y. Kitade, Seasonal Variation and Governing Dynamics of the Mixed Layer in the Indian Sector of the Southern Ocean, *J. Geophys. Res. Oceans*, 127, e2021JC017838. http://doi.org/10.1029/2021JC017838 2021. (査読有)

Hirauchi, K., I. Segawa, Y. Harigane, Y. Ohara, J. Snow, A. Sen, **M. Fujii, K. Okino**, Alteration processes recorded by back-arc mantle peridotites from oceanic core complexes, Shikoku Basin, Philippine Sea, *Island Arc*, 30, e12419, https://doi.org/10.1111/iar.12419, 2021, (査読有)(国際共著)

Sen, A., Snow, J. E., Ohara,Y., Hirauchi, K., Kouketsu, Y., Sanfilippo, A., V. Basch, Y. Harigane, **M. Fujii, K. Okino**,, N. Akizawa, Melting and evolution of amphibole-rich back-arc abyssal peridotites at the Mado Megamullion, Shikoku Basin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC010013., https://doi. org/10.1029/2021GC010013, 2021,(査読有)(国際共著)

Akizawa, N., Y. Ohara, **K. Okino**, O. Ishizuka, H. Yamashita, S. Machida, A. Sanfilippo, V. Basch, J. Snow, A. Sen, K. Hirauchi K. Michibayashi, Y. Harigane, **M. Fujii,** H. Asanuma, T. Hirata, Geochemical characteristics of back-arc basin lower crust and upper mantle at final spreading stage of Shikoku Basin: an example of Mado Megamullion, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8:65, doi:10.1186/s40645-021-00454-3 2021. (査読有)
(査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Kikunaga, R., K. Song, S. Chiyonobu, K. Fujita, R. Shinjo, **K. Okino**, Shimajiri Group equivalent sedimentary rocks dredged from sea knolls off Kume Island, central Ryukyus: Implications for timing and mode of rifting of the middle Okinawa Trough back-arc basin, *Island Arc*, 30:e12425, https://doi.org/10.1111/iar.12425 , 2021, (査読有)

Smith, J., **Nogi, Y.**, Spinoccia, M., Dorschel, B., & Leventer, A., A bathymetric compilation of the Cape Darnley region, *East Antarctica. Antarctic Science*, 33(5), 548-559. doi:10.1017/S0954102021000298, 2021. (査読有) (国際共著)

Hidetaka Kobayashi, **Akira Oka**, **Akitomo Yamamoto**, **Ayako Abe-Ouchi**, Glacial carbon cycle changes by Southern Ocean processes with sedimentary amplification, *Science Advances,* 7(35), doi: 10.1126/sciadv.abg7723, 2021.

Christo Buizert, T. J. Fudge, William H. G. Roberts, Eric J. Steig, **Sam Sherriff-Tadano**, Catherine Ritz, Eric Lefebvre, Jon

Edwards, Kenji Kawamura, Ikumi Oyabu, Hideaki Motoyama, Emma C. Kahle, Tyler R. Jones, **Ayako Abe-Ouchi**, **Takashi Obase**, Carlos Martin, Hugh Corr, Jeffrey P. Severinghaus, Ross Beaudette, Jenna A. Epifanio, Edward J. Brook, Kaden Martin, Jérôme Chappellaz, Shuji Aoki, Takakiyo Nakazawa, Todd A. Sowers, Richard B. Alley, Jinho Ahn, Michael Sigl, Mirko Severi, Nelia W. Dunbar, Anders Svensson, John M. Fegyveresi, Chengfei He, Zhengyu Liu, Jiang Zhu, Bette L. Otto-Bliesner, Vladimir Y. Lipenkov, Masa Kageyama, Jakob Schwander, Antarctic surface temperature and elevation during the Last Glacial Maximum, *Science*, 372(6546), 1097-1101, doi: 10.1126/science.abd2897, 2021

Oka, A., **Abe-Ouchi, A.**, **Sherriff-Tadano, S.**, Yokoyama,Y., Kawamura,K. and Hasumi,H., Glacial mode shift of the Atlantic meridional overturning circulation by warming over the Southern Ocean. *Communications Earth & Environment*, 2, 169, https://doi.org/10.1038/s43247-021-00226-3, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Chambers,C., **Greve,R.**, **Obase,T.**, **Saito,F**. and **Abe-Ouchi,A.**, Mass loss of the Antarctic ice sheet until the year 3000 under a sustained late-21st-century climate. *Journal of Glaciology*, 1-13. doi:10.1017/jog.2021.124, 2021.

Oldeman,A.M., Baatsen,M.L.J., von Der Heydt, Anna S., Dijkstra,H.A., Tindall,J.C., **Abe-Ouchi, A.**, Booth,A.R., Brady,E.C., Chan,W., Chandan,D., Chandler,M.A., Contoux,C., Feng,R., Guo,C., Haywood,A.M., Hunter,S.J., Kamae,Y., Li,Q., Li,X., Lohmann,G., Lunt,D.J., Nisancioglu,K.H., Otto-Bliesner,B.L., Peltier,W.R., Pontes,G.M., Ramstein,G., Sohl,L.E., Stepanek,C., Tan,N., Zhang,Q., Zhang,Z., Wainer,I. and Williams,C.J.R. , Reduced El Nino variability in the mid-Pliocene according to the PlioMIP2 ensemble. *Climate of the Past*, 17, 2427-2450. doi:10.5194/cp-17-2427-2021.

Obase,T., **Abe-Ouchi,A**. and **Saito,F.** , Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation. *Scientific Reports*, 11, 1-11. doi: 10.1038/s41598-021-01651-2, 2021

Lhardy,F., Bouttes,N., Roche,D.M., **Abe-Ouchi, A.**, Chase,Z., Crichton,K.A., Ilyina,T., Ivanovic,R., Jochum,M., Kageyama,M., **Kobayashi, H.**, Liu,B., Menviel,L., Muglia,J., Nuterman,R., **Oka,A.**, Vettoretti,G. and **Yamamoto,A.** , A First Intercomparison of the Simulated LGM Carbon Results Within PMIP-Carbon: Role of the Ocean Boundary Conditions. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36, e2021PA004302. doi:10.1029/2021PA004302, 2021.

Sherriff-Tadano,S., **Abe-Ouchi,A.**, **Oka,A.**, Mitsui,T. and **Saito,F.** , Does a difference in ice sheets between Marine Isotope Stages 3 and 5a affect the duration of stadials? Implications from hosing experiments. *Climate of the Past,* 17, 1919-1936. doi:10.5194/cp-17-1919-2021.

Payne,A.J., Nowicki,S., **Abe-Ouchi, A.**, Agosta,C., Alexander,P., Albrecht,T., Asay-Davis,X., Aschwanden,A., Barthel,A., Bracegirdle,T.J., Calov,R., Chambers,C., Choi,Y., Cullather,R., Cuzzone,J., Dumas,C., Edwards,T.L., Felikson,D., Fettweis,X., Galton-Fenzr,B.K., Goelzer,H., Gladstone,R., Golledge,N.R., Gregory,J.M., Greve,R., Hattermann,T., Hoffman,M.J., Humbert,A., Huybrechts,P., Jourdain,N.C., Kleiner,T., Munneke,P.K., Larour,E., Le Clec'h,S., Lee,V., Leguy,G., Lipscomb,W.H., Little,C.M., Lowry,D.P., Morlighem,M., Nias,I., Pattyn,F., Pelle,T., Price,S.F., Quiquet,A., Reese,R., Rueckamp,M., Schlege,N., Seroussi,H., Shepherd,A., Simon,E., Slater,D., Smith,R.S., Straneo,F., Sun,S., Tarasov,L., Trusel,L.D., Van Breedam,J., van de Wal,R., van den Broeke,M., Winkelmann,R., Zhao,C., Zhang,T. and Zwinger,T., Future Sea Level Change Under Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and Phase 6 Scenarios From the Greenland and Antarctic Ice Sheets. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091741. doi:10.1029/2020GL091741, 2021

Berntell,E., Zhang,Q., Li,Q., Haywood,A.M., Tindall,J.C., Hunter,S.J., Zhang,Z., Li,X., Guo,C., Nisancioglu,K.H., Stepanek,C., Lohmann,G., Sohl,L.E., Chandler,M.A., Tan,N., Contoux,C., Ramstein,G., Baatsen,M.L.J., von der Heydt, Anna S., Chandan,D., Peltier,W.R., **Abe-Ouchi, A.**, Chan,W., Kamae,Y., Williams,C.J.R., Lunt,D.J., Feng,R., Otto-Bliesner,B.L. and Brady,E.C., Mid-Pliocene West African Monsoon rainfall as simulated in the PlioMIP2 ensemble. *Climate of the Past*, 17, 1777-1794. doi:10.5194/cp-17-1777-2021.

Kageyama,M., Harrison,S.P., Kapsch,M., Lofverstrom,M., Lora,J.M., Mikolajewicz,U., **Sherriff-Tadano,S.**, Vadsaria,T., **Abe-Ouchi,A.**, Bouttes,N., Chandan,D., Gregoire,L.J., Ivanovic,R.F., Izumi,K., LeGrande,A.N., Lhardy,F., Lohmann,G., Morozova,P.A., Ohgaito,R., Paul,A., Peltier,W.R., Poulsen,C.J., Quiquet,A., Roche,D.M., Shi,X., Tierney,J.E., Valdes,P.J., Volodin,E. and Zhu,J., The PMIP4 Last Glacial Maximum experiments: preliminary results and comparison with the PMIP3 simulations. *Climate of the Past*, 17, 1065-1089. doi:10.5194/cp-17-1065-2021.

Edwards,T.L., Nowicki,S., Marzeion,B., Hock,R., Goelzer,H., Seroussi,H., Jourdain,N.C., Slater,D.A., Turner,F.E., Smith,C.J., McKenna,C.M., Simon,E., **Abe-Ouchi,A.**, Gregory,J.M., Larour,E., Lipscomb,W.H., Payne,A.J., Shepherd,A., Agosta,C., Alexander,P., Albrecht,T., Anderson,B., Asay-Davis,X., Aschwanden,A., Barthel,A., Bliss,A., Calov,R., Chambers,C., Champollion,N., Choi,Y., Cullather,R., Cuzzone,J., Dumas,C., Felikson,D., Fettweis,X., Fujita,K., Galton-Fenzi,B.K., Gladstone,R., Golledge,N.R., **Greve,R.**, Hattermann,T., Hoffman,M.J., Humbert,A., Huss,M., Huybrechts,P., Immerzeel,W., Kleiner,T., Kraaijenbrink,P., Le Clec'h,S., Lee,V., Leguy,G.R., Little,C.M., Lowry,D.P., Malles,J., Martin,D.F., Maussion,F., Morlighem,M., O'Neill,J.F., Nias,I., Pattyn,F., Pelle,T., Price,S.F., Quiquet,A., Radic,V., Reese,R., Rounce,D.R., Ruckamp,M., Sakai,A., Shafer,C., Schlegel,N., Shannon,S., Smith,R.S., Straneo,F., Sun,S., Tarasov,L., Trusel,L.D., Van Breedam,J., van de Wal,R., van den Broeke,M., Winkelmann,R., Zekollari,H., Zhao,C., Zhang,T. and Zwinger,T., Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. *Nature*, 593, 74-+. doi:10.1038/s41586-021-03302-y.

Devi Veytia, D., Bestley, S., Kawaguchi, S., Meiners, K. M., Murphy, E. J., Fraser, A. D., **Kusahara, K.**, Kimura, N., and Corney, S., Overwinter sea-ice characteristics important for Antarctic krill recruitment in the southwest Atlantic, *Ecological Indicators.* 129, 107934, doi:10.1016/j.ecolind.2021.107934.

Kusahara, K., Summertime linkage between Antarctic sea-ice extent and ice-shelf basal melting through Antarctic coastal water masses' variability: a circumpolar Southern Ocean model study. *Environmental Research Letters*, 16, doi:10.1088/1748-9326/ac0de0

Ando, T. and **A. Oka** , Hysteresis of the glacial Atlantic Meridional Overturning Circulation controlled by thermal feedbacks, *Geophysical Research Letters*, 48(24), e2021GL095809.

Kanzawa, K., Miyake, F., **Horiuchi, K.**, Sasa, K., Takano, K., Matsumura, M., Takahashi, T., Motizuki, Y., Takahashi, K., Nakai, Y., Ohtani, K., Tada, Y., Ochiai, Y., **Motoyama, H.**, Matsuzaki, H., Yamazaki, A., Muramatsu, Y. and Yamagata, Y., High-resolution 10Be and 36Cl data from the Antarctic Dome Fuji ice core (~100 years around 5480 BCE): An unusual grand solar minimum occurrence? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029378. https://doi.org/10.1029/2021JA029378, 2021.

Ikenoue, T., Otosaka, S., Honda, M.C., Kitamura, M., Mino, Y., Narita, H., Kobayashi, T., Neocalanus cristatus (Copepoda) From a Deep Sediment-Trap: Abundance and Implications for Ecological and Biogeochemical Studies, *Frontiers in Marine Science*, 9 884320, https://doi.org/10.3389/fmars.2022.884320, 2022. (査読有)(オープンアクセス)

Yamanokuchi, T., **Narama, C**., Sugiyama, S. Long term monitoring of grounding line on Shirase Glacier by double differential InSAR. *ISRS2022 (International Symposium on Remote Sensing ,2022)* in press (査読有)(オープンアクセス)

Pan XL, ,Li BF, **Watanabe YW**., Intense ocean freshening from melting glacier around the Antarctica during early twenty-first Century. *Scientific Reports*, 12, doi: 10.1038/s41598-021-04231-6, 2022

Weber, M.E., Bailey, I., Hemming, S.R., Martos, Y.M., Reilly, B.T., Ronge, T.A., Brachfeld, S., Williams, T., Raymo, M., Belt, S.T., Smik, L., Vogel, H., Peck, V.L., Armbrecht, L., Cage, A., Cardillo, F.G., Du, Z., Fauth, G., Fogwill, C.J., Garcia, M., Garnsworthy, M., Glüder, A., Guitard, M., Gutjahr, M., Hernández-Almeida, I., Hoem, F.S., Hwang, J.-H., Iizuka, M., **Kato, Y.**, Kenlee, B., OConnell, S., Pérez, L.F., Seki, O., Stevens, L., Tauxe, L., Tripathi, S., Warnock, J., Zheng, X., Antiphased dust deposition and productivity in the Antarctic Zone over 1.5 million years, *Nature Communications*, 13, 2044, doi:10.1038/s41467-022-29642-5, 2022, (査読有)(国際共著)

K. Kuramoto, Y. Kawakatsu, M. Fujimoto, **A. Araya**, M. A. Barucci, H. Genda, N. Hirata, H. Ikeda, T. Imamura, J. Helbert, et al., Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets, Earth, *Planets and Space*, 74, 12, https://doi.org/10.1186/s40623-021-01545-7, 2022. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Vandecrux, B., Box, J. E., Wehrlé, A., Kokhanovsky, A. A., Picard, G., **Niwano, M.**, Hörhold, M., Faber, A.-K., and Steen-Larsen, H. C., The determination of the snow optical grain diameter and snowmelt area on the Greenland ice sheet using spaceborne optical observations, *Remote Sens.*, 14, 932, https://doi.org/10.3390/rs14040932, 2022. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Oliver, T.S.N., Donaldson, P., **Tamura, T.**, Embayment-scale coastal evolution and shoreline progradation in southeast Tasmania, Australia. *Marine Geology*, 444, 106725. 10.1016/j.margeo.2021.106725. 2022. (査読有)(国際共著)

Kadowaki, S., **Tamura, T.**, Kida, R., Omori, T., Maher, L.A., Portillo, M., Hirose, M., Suga, E., Massadeh, S., Henry, D.O. Lithic technology and chronology of Initial Upper Paleolithic assemblages at Tor Fawaz, southern Jordan. *Journal of Paleolithic Archaeology*, 5, 1. 10.1007/s41982-021-00107-3. 2022. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Gao, L., Li, J., Hu, B., Yi, L., **Tamura, T.**, Long, H. Luminescence dating of a sedimentary sequence in the eastern North Yellow Sea. *Marine and Petroleum Geology,* 138, 105543. 10.1016/j.marpetgeo.2022.105543. 2022. (査読有)(国際共著)

Suursaar, Ü., Rosentau, A., Hang, T., Tõnisson, H., **Tamura, T.**, Vaasma, T., Vandel, E., Vilumaa, K., Sugita, S. Climatically induced cyclicity recorded in the morphology of uplifting Tihu coastal ridgeplain, Hiiumaa Island, eastern Baltic Sea. *Geomorphology*, 404, 108187. 10.1016/j.geomorph.2022.108187. 2022. (査読有)(国際共著)

Gugliotta, M., Saito, Y., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., La Croix, A.D., Wang, Z., **Tamura, T.**, Nakashimsa, R., Lieu, K.P. Late Holocene stratigraphic evolution and sedimentary facies of an active to abandoned tide-dominated distributary channel and its mouth bar. *Sedimentology*, 69, 1151-1178. 10.1111/sed.12940. 2022. (査読有)(国際共著)

Brooke, B.P., Huang, Z., Nicholas, W.A., Oliver, T.S.N., **Tamura, T.**, Woodroffe, C.D., Nichol, S.L. Reply to the Comment by Dougherty, A.J. on "Relative sea-level records preserved in Holocene beach-ridge strandplains – An example from tropical northeastern Australia. *Marine Geology*, 447, 106768. 10.1016/j.margeo.2022.106768. 2022. (査読有)(国際共著)

Qiaola, S., Nguyen, T.M.L., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Gugliotta, M., Saito, Y., Kitagawa, H., Nakashima, R., **Tamura, T.,** Luminescence dating of Holocene sediment cores from a wave-dominated and mountainous river delta in central Vietnam. *Quaternary Geochronology*, in press. 10.1016/j.quageo.2022.101277. 2022. (査読有)(国際共著)

Okazaki, H., Nara, M., Nakazato, H., Furusawa, A., Ito, K., **Tamura, T.**, Coastal progradation associated with sea-level oscillations in the latter phase of the Last Interglacial period, central Japan. *Quaternary Science Reviews*, in press. 2022. (査読有)

Tamura, T., Ishiwa, T., Tokuda, Y., Itaki, T., Sasaki, S., Suganuma, Y., Luminescence characteristics of coastal sediments in Langhovde, East Antarctica. *Quaternary Geochronology*, in press. 10.1016/j.quageo.2022.101298. 2022. (査読有)

Pete D. Akers, Joel Savarino, Nicolas Caillon, Aymeric P. M., Servettaz, Emmanuel Le Meur, Olivier Magand, Jean Martins, Cécile Agosta, Peter Crockford, Kanon Kobayashi, **Shohei Hattori**, Mark Curran, Tas van Ommen, Lenneke Jong, Jason L. Roberts, Sunlight-driven nitrate loss records Antarctic surface mass balance, *Research Square*, doi: 10.21203/rs.3.rs-1307003/v1, 2022(国際共著)(オープンアクセス)

Manami Tozawa, Daiki Nomura, Shin-ichiro Nakaoka, Masaaki Kiuchi, Kaihe Yamazaki, **Daisuke Hirano**, Shigeru Aoki, Hiroko Sasaki, Hiroto Murase, Seasonal variations and drivers of surface ocean pCO2 in the seasonal ice zone of the eastern Indian sector, Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2021JC017953. https://doi.org/10.1029/2021JC017953, 2022 (査読有))(オープンアクセス)

McBride, R.A., Oliver, T.S.N., Dougherty, A.J., **Tamura, T.**, Carvalho, R.C., Short, A.D., Woodroffe, C.D. The turnaround from transgression to regression of Holocene barrier systems in south-eastern Australia: *Geomorphology, geological framework and geochronology. Sedimentology* 68, 943-986. 10.1111/sed.12812. 2021. (査読有)(国際共著)

Gao, L., Long, H., **Tamura, T.**, Hou, Y., Shen, J. A ~130 ka terrestrial-marine interaction sedimentary history of the northern Jiangsu coastal plain in China. *Marine Geology,* 435, 106455. 10.1016/j.margeo.2021.106455. 2021. (査読有)(国際共著)

Pilarczyk, J.E., Sawai, Y., Namegaya, Y., **Tamura, T.**, Tanigawa, K., Matsumoto, D., Shinozaki, T., Fujiwara, O., Shishikura, M., Shimada, Y., Dura, T., Horton, B.P., Parnell, A.C., Vane, C.H. A further source of Tokyo earthquakes and Pacific Ocean tsunamis. *Nature Geoscience*, 14, 796-800. 10.1038/s41561-021-00812-2. 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Gugliotta, M., Saito, Y., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., **Tamura, T.**, Wang, Z., La Croix, A.D., Nakashima, R. Abandonment and rapid infilling of a tide-dominated distributary channel at 0.7 ka in the Mekong River Delta. *Scientific Reports*, 11, 11040. 10.1038/s41598-021-90268-6. 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Ishii, Y., **Tamura, T.**, Collins, D.S., Ben, B. Applicability of OSL dating of fine-grained fluvial deposits in the Mekong River floodplain, Cambodia. *Geochronometria*, 48, 351-363. 10.2478/geochr-2020-0006. 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Tamura, T., Komatsubara, J., Sugisaki, S., Nishida, N. Residual dose of K-feldspar post-IR IRSL of beach-shoreface sands at Kujukuri, eastern Japan. *Geochronometria*, 48, 364-378. 10.2478/geochr-2020-0036. 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Niwano, M., Kajino, M., Kajikawa, T., Aoki, T., Kodama, Y., Tanikawa, T., and Matoba, S., Quantifying relative contributions of light-absorbing particles from domestic and

foreign sources on snow melt at Sapporo, Japan during the 2011-2012 winter, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL093940. https://doi.org/10.1029/2021GL093940, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Tanikawa, T., Masuda, K., Ishimoto, H., Aoki, T., Hori, M., **Niwano, M.**, Hachikubo, A., Matoba, S., Sugiura, K., Toyota, T., Ohkawara, N., and Stamnes, K., Spectral degree of linear polarization and neutral points of polarization in snow and ice surfaces, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 273, 107845. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107845, 2021. (査読有)(国際共著)

Niwano, M., Box, J. E., Wehrlé, A., Vandecrux, B., Colgan, W. T., and Cappelen, J., Rainfall on the Greenland ice sheet: present-day climatology from a high-resolution non-hydrostatic polar regional climate model, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL092942. https://doi.org/10.1029/2021GL092942, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Ikenoue, T., Kimoto, K., Nakamura, Y., Bjørklund, K.R., Kuramoto, N., Ueki, M., Ota, Y., Onodera, J., Harada, N., Honda, M.C., Sato, M., Watanabe, E., Itoh, M., Nishino, S., Kikuchi, T., New evaluation of species-specific biogenic silica flux of radiolarians (Rhizaria) in the western Arctic Ocean using microfocus X-ray computed tomography, *Limnology and Oceanography*, 66(11) 3901-3915, https://doi.org/10.1002/lno.11928, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

M. Kimura, N. Kame, S. Watada, **A. Araya**, T. Kunugi, and R. Wang, Determination of the source parameters of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from three-component pre-P gravity signals recorded by dense arrays in Japan, *Earth, Planets and Space* , 73, 223, https://doi.org/10.1186/s40623-021-01553-7, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

K. Matsumoto, N. Hirata, H. Ikeda, T. Kouyama, H. Senshu, K. Yamamoto, H. Noda, H. Miyamoto, **A. Araya,** H. Araki, et al., MMX geodesy investigations: science requirements and observation strategy, *Earth, Planets and Space*, 73, 226, https://doi.org/10.1186/s40623-021-01500-6, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

T. Akutsu, M. Ando, K. Arai, Y. Arai, S. Araki, **A. Araya**, N. Aritomi, H. Asada, Y. Aso, S. Bae, et al., Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2015, 00000 (33 pages), https://doi.org/10.1093/ptep/ptab018, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

新谷昌人, 光ファイバーネットワークを用いた火山活動監視のための重力計測技術に関する研究, *東北大学電気通信研究所研究活動報告*, 27, 136-138, 2021.(オープンアクセス)

Sato K., J. Inoue, Seasonal change in satellite-retrieved lower-tropospheric ice-cloud fraction over the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, 48, https://doi.prg/10.1029/2021gl095295, 2021, (査読有)(オープンアクセス)

Sato K., I. Simmonds, Antarctic skin temperature warming related to enhanced downward longwave radiation associated with cloudy condition, *Environmental Research Letters*, 16, 064059-064059, https://doi.prg/10.1088/1748-9326/ac0211, 2021, (査読有)(オープンアクセス)

Sato K., J. Inoue, A. Yamasaki, Y. Tomikawa and K. Sato, The reduced error and uncertainty in reanalysis and forecast in the Southern Hemisphere by the PANSY radar observation at Antarctica Syowa station, QJRMS, (査読有)

Hirano D., **Mizobata K.**, Sasaki H., Murase H., Tamura T., Aoki S., Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica. *Commun Earth Environ* 2, 153. pp1-8, https://doi.org/10.1038/s43247-021-00217-4, 2021, (査読有)(オープンアクセス)

Mori, M., **Mizobata K.**, Ichii, T., Ziegler, P. and Okuda, T., Modeling the egg and larval transport pathways of the Antarctic toothfish (Dissostichus mawsoni) in the East Antarctic region: New insights into successful transport connections, *Fish. Oceanogr.*, https://doi.org/10.1111/fog.12560, 2021, (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Shiozaki T., F. Hashihama, H. Endo, M. Ijichi, N. Takeda, A. Makabe, A. Fujiwara, S. Nishino, N. Harada, Assimilation and oxidation of urea-derived nitrogen in the summer Arctic Ocean, *Limnology and Oceanography* ,66, 4159-4170, doi:10.1002/lno.11950, 2021, (査読有)

Ichihara H., T. Mogi, T. Uchida, H. Satoh, Y. Yamaya, **M. Fujii**, S. Yamazaki, K. Okazaki, N. Tada, Imaging of a serpentinite complex in the Kamuikotan Zone, northern Japan, from magnetotelluric soundings, *Earth, Planet, Space*, 73, 154, doi.org/10.1186/s40623-021-01482-5, 2021. (査読有)

Tanaka T., D. Hasegawa, **I. Yasuda**, D. Yanagimoto, S. Fujio, H. Nakamura, R. Inoue, J. Nishioka , Enhanced vertical turbulent nitrate flux in the intermediate layer of the Kuroshio in the Tokara Strait. *J. Oceanography*, 77, 45-53, https://doi.org/10.1007/s10872-020-00581-3, 2021. (査読有)

Dobashi R., H. Ueno, Y. Okada, T. Tanaka, J. Nishioka, T. Hirawake, A. Ooki, S. Itoh, D. Hasegawa, Y. Sasai, H. Sasaki, **I. Yasuda**, Observations of anticyclonic eddies in the western subarctic North Pacific. *Journal of Oceanography*, 77, 292-242, https://doi.org/10.1007/s10872-020-00586-y, 2021.(査読有)

Yamashita Y., T. Tosaka, R. Bamba, R. Kamezaki, S. Goto, J. Nishioka, **I. Yasuda**, T. Hirawake, J. Oida, H. Obata, H. Ogawa, Widespread distribution of allochthonous humic-like fluorescent dissolved organic matter in the intermediate water of the North Pacific. *Progress in Oceanography*, accepted on Dec. 21, 2020, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102510, 2021.(査読有)

Itoh S., H. Kaneko, S. Kouketsu, T. Okunishi, E. Tsutsumi, H. Ogawa, **I. Yasuda**, Vertical eddy diffusivity in the subsurface pycnocline across the Pacific. *J. Oceanography*. 77, 185-197, https://doi.org/10.1007/s10872-020-00589-9, 2021.(査読有)(オープンアクセス)

Tanaka, M., J. Yoshida, K. Lee, Y. Goto, T. Tanaka, H. Ueno, H. Onishi, and **I. Yasuda**, The potential role of thermohaline-shear instability in turbulence production in the Bering Sea and the subarctic North Pacific. *J. Oceanogr.* 77, 431-446, https://doi.org/10.1007/s10872-021-00602-9, 2021.(査読有)(国際共著)

Nishioka J., H. Obata, T. Hirawake, Y. Kondo, Y. Yamashita, M. Misumi, **I. Yasuda** , A review: Iron and nutrient supply in the subarctic North Pacific and its impact on phytoplankton production. *J. Oceanography*, https://doi.org/10.1007/s10872-021-00606-5, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Nishioka, J, T. Hirawake, D. Nomura, Y. Yamashita, K. Onoa, A. Murayamaa, A. Shcherbinin, Y. N. Volkov, H. Mitsuderaa, N. Ebuchia, M. Wakatsuchia and **I. Yasuda**, Iron and nutrient dynamics along the East Kamchatka Current, western Bering Sea Basin and Gulf of Anadyr. *Progress in Oceanography*, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102662, 2021.(査読有)(国際共著)

2020 年度

Nakata K., **Ohshima K. I.**, **Nihashi S.**, Mapping of Active Frazil for Antarctic Coastal Polynyas, With an Estimation of Sea‐Ice Production, *Geophysical Research Letters*, 48, doi:10.1029/2020GL091353, 2021.(査読有) (オープンアクセス)

Kashiwase Haruhiko, **Ohshima Kay I.**, **Nakata Kazuki**, **Tamura Takeshi**, Improved SSM/I Thin Ice Algorithm with Ice Type Discrimination in Coastal Polynyas, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38, 823-835, doi:10.1175/JTECH-D-20-0145.1, 2021. (査読有) (オープンアクセス)

Matsuoka Kenichi, Skoglund Anders, Roth George, de Pomereu Jean, Griffiths Huw, Headland Robert, Herried Brad, **Katsumata Katsuro**, Le Brocq Anne, Licht Kathy, Morgan Fraser, Neff Peter D., Ritz Catherine, Scheinert Mirko, **Tamura Takeshi** (他 7 名) , Quantarctica, an integrated mapping environment for Antarctica, the Southern Ocean, and sub-Antarctic islands, *Environmental Modelling & Software*, 140,105015-105015, doi:10.1016/j.envsoft.2021.105015, 2021. (査読有)(国際共著)

Shimada K., S. Takao, K. T. Takahashi, **Y. Kitade,** J. Kanda, T. Odate, Physical and chemical oceanographic data during Umitaka-maru cruise of the 59th Japanese 5 Antarctic Research Expedition in January 2018, *Polar Data Journal*, 5,11-36, doi:10.20575/00000023, 2021 (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Fraser Alexander D., Massom Robert A., **Ohshima Kay I.**, Willmes Sascha, Kappes Peter J., Cartwright Jessica, Porter-Smith Richard, High-resolution mapping of circum-Antarctic landfast sea ice distribution, 2000-2018, *Earth System Science Data*, 12, 2987-2999, doi:10.5194/essd-12-2987-2020, 2020. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Murakami Kan, Nomura Daiki, Hashida Gen, Nakaoka Shin-ichiro, **Kitade Yujiro**, **Hirano Daisuke**, Hirawake Toru, **Ohshima Kay I.**, Strong biological carbon uptake and carbonate chemistry associated with dense shelf water outflows in the Cape Darnley polynya, East Antarctica, *Marine Chemistry*,225, 103842-103842, doi:10.1016/j.marchem.2020.103842, 2020. (査読有)

Silvano Alessandro, Foppert Annie, Rintoul Stephen R., Holland Paul R., **Tamura Takeshi**, Kimura Noriaki(他 6 名), Recent recovery of Antarctic Bottom Water formation in the Ross Sea driven by climate anomalies, *Nature Geoscience*, 13, 780-786, doi:10.1038/s41561-020-00655-3, 2020. (査読有)(国際共著)

Yamazaki Kaihe, **Aoki Shigeru**, **Shimada Keishi**, Kobayashi Taiyo, **Kitade Yujiro**, Structure of the Subpolar Gyre in the Australian - Antarctic Basin Derived From Argo Floats, *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 125, doi:10.1029/2019JC015406, 2020. (査読有)(オープンアクセス)

Pérez, LF, Santis, LD, McKay, RM, Larter, RD, Ash, Bart, JP, Böhm, G, Brancatelli, G, Browne, I, Colleoni, F, Dodd, JP, Geletti, R, Harwood, DM, Laberg, JS, Leckie, RM, Levy, RH, Marschalek, M, Mateo, M, Naish, TR, Sangiorgi, F, Shevenell, A, Sorlien, CC, van de Flierdt, T, **IODP Expedition 374 Scientists**: Early and middle Miocene ice sheet dynamics in the Ross Sea: results from integrated core-log-seismic interpretation, *Geological Society of America Bulletin*, doi:10.1130/B35814.1,2021. (査読有) (国際共著)

Pérez, LF, Martos, YM, García, M, Weber, ME, Raymo, ME, Williams, T, Bohoyo, F, Armbrecht, L, Bailey,I, Brachfeld, S, Glüder, A, Guitard, M, Gutjahr, M, Hemming, S, Hernández-Almeida, I, Hoem, FS, **Kato Y**, O'Connell, S, Peck, VL, Reilly, B, Ronge, TA, Tauxe, L, Warnock, J, Zheng, X, **IODP Expedition 382 Scientists**, Miocene to present oceanographic variability in the Scotia Sea and Antarctic ice sheets dynamics: Insight from revised seismic-stratigraphy following IODP Expedition 382, *Earth and Planetary Science Letters*, 553, 116657, doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116657, 2021 (査読有) (国際共著)

Ashley, KE, McKay, R, Etourneau, J, Jimenez-Espejo,FJ, Condron, A, Albot,A, Crosta, X, Riesselman, C, **Seki O**, Massé, G, Golledge,NR, Gasson, E, Lowry, DP, Barrand, NE, Johnson,K, Bertler, N, Escutia, C, Dunbar, R, Bendle, JA, Mid-Holocene Antarctic sea-ice increase driven by marine ice sheet retreat, *Climate of the Past*, 17, 1-19, doi.org/10.5194/cp-17-1-2021, 2021. (査読有) (オープンアクセス) (国際共著)

Reilly, BT, Tauxe, L, Brachfeld, S, Raymo, M, Bailey, I, Hemming, S, Weber, ME, Williams, T, Garcia, M, Guitard, M, Martos, YM, Pérez. LF, Zheng, X, Armbrecht, L, Cardillo, FG, Du, Z, Fauth, G, Glueder, A, Gutjahr, M, Hernández-Almeida, I, Hoem, SF, Hwang, J, Iizuka M, **Kato Y**, Kenlee, B, O'Connell, S, Peck, V, Ronge, TA, **Seki, O**, Tripathi, S, Warnock, J, New magnetostratigraphic insights from iceberg Alley on the rhythms of Antarctic climate during the Plio - Pleistocene, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36, e2020PA003994, 2021. doi.org/10.1029/2020PA003994, (査読有) (国際共著)

Crosta X., Etourneau J., Orme L., Dalaiden Q., Campagne P., Swingedouw D., Goosse H., Massé G., Miettinen A., McKay R., Dunbar R., Escutia C., **Ikehara M.**, Climate modes drove Antarctic sea-ice multi-decadal heterogeneity over the last 2000 years, *Nature Geoscience*, 2021. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00697-1, 2021. (査読有) (国際共著)

Itaki T., Taira Y., Kuwamori N., Saito H., **Ikehara M.**, Hoshino T., Innovative microfossil (radiolarian) analysis using a system for automated image collection and AI-based classification of species, *Scientific Reports*, 10, DOI:10.1038/s41598-020-77812-6, 2020. (査読有) (オープンアクセス)

Civel-Mazens M., Crosta X., Cortese G., Michel E., Mazaud A., Ther, O., **Ikehara M.**, **Itaki T.**, Impact of the Agulhas Return Current on the oceanography of the Kerguelen Plateau region, Southern Ocean, over the last 40 kyrs, *Quaternary Science Reviews*, 251, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106711, 2020. (査読有) (国際共著)

Orme L. C., Crosta X., Miettinen A., Divine D. V., Husum K., Isaksson E., Wacker L., Mohan R., Ther O., **Ikehara M.**, Sea surface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean over the Late Glacial and Holocene, *Climate of the Past*, 16, 1451-1467, 2020. https://doi.org/10.5194/cp-16-1451-2020, August 7, 2020. (査読有) (オープンアクセス) (国際共著)

Itaki T., Taira Y., Kuwamori N., Maebayashi T., Takeshima S., Toya K., Automated collection of single species of microfossils using a deep learning–micromanipulator system, *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 19, https://doi.org/10.1186/s40645-020-00332-4, 2020 年 5 月.(査読有) (オープンアクセス)

小坂由紀子, **徳田悠希**, **池原 実**, **佐藤 暢**, 南大洋インド洋区コンラッドライズの深海サンゴの産状について— 白鳳丸 KH-20-1 次航海速報 —, 名古屋大学年代測定研究, 4, 48-52, 2020.

Hata S, **Sugiyama S.**, Changes in the ice-front position and surface elevation of Glaciar Pio XI, an advancing calving glacier in the Southern Patagonia Icefield, from 2000-2018, *Frontiers in Cryosphere Science*, 8:576044, doi:10.3389/feart.2020.576044, 2021 (査読有) (オープンアクセス)

van Dongen E C H, Jouvet G, **Sugiyama S.**, Podolskiy E A, Funk M, Benn D I, Lindner F, Bauder A, Seguinot J, Leinss S, Walter F: Thinning leads to calving-style changes at Bowdoin Glacier, Greenland, *The Cryosphere*, 15, 485–500, doi:10.5194/tc-15-485-2021, 2021 (査読有) (オープンアクセス) (国際共著)

Kondo K, **Sugiyama S**, Sakakibara D, Fukumoto S., Flood events caused by discharge from Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland, *Journal of Glaciology*, 62(235), 861–887, doi:10.1017/jog.2021.3, 2021 (査読有) (オープンアクセス)

Minowa M., Schaefer M, **Sugiyama S**, Sakakibara D, Skvarca P: Frontal ablation and mass loss of the Patagonian icefields, *Earth and Planetary Science Letters*, 561, 116811, doi:j.epsl.2021.116811, 2021 (査読有) (オープンアクセス) (国際共著)

Podolskiy E A, Kanna N, **Sugiyama S.**, Co-seismic eruption and intermittent turbulence of a subglacial discharge plume revealed by continuous subsurface observations in Greenland, *Communications Earth & Environment*, 2, 66, doi:10.1038/s43247-021-00132-8, 2021 （査読有）（オープンアクセス）

平沢尚彦，**本山秀明**，山田恭平，杉浦幸之助，栗田直幸, AWSの積雪深計が観測する南極氷床表面堆積量の時間変化．*雪氷*, 83(1), 67-78, 2021. (査読有)

本山秀明, 雪氷写真館 141：南極ドームふじ基地での第 2 期氷床深層コア掘削．*雪氷*、83(2)、i-ii, 2021.

日下稜，原田亜紀，**杉山慎**: 北グリーンランド、チューレ地区で使用されているグリーンランドイヌイットの毛皮衣類と毛皮を利用した狩猟道具の素材と機能，*北海道立北方民族博物館研究紀要*，30, 1-11, 2021 （査読有）

杉山　慎，**箕輪昌紘**，伊藤優人，山根志織，熱水掘削による南極氷床の底面環境探査，*雪氷*，83(1), 13-25, 2021 （査読有）

杉山慎，近藤研，グリーンランド北西部カナック村における 氷河流出河川の洪水，雪氷，83(2), 12(193-204) , 2021 （査読有）

Nakazawa F., Nagatsuka N., **Hirabayashi M.**, **Goto-Azuma K.**, Steffensen J.P., Dahl-Jensen D., Variation in recent annual snow deposition and seasonality of snow chemistry at the East Greenland Ice Core Project (EGRIP) camp, Greenland, Polar Science, 27, 100597, 2021. (査読有) (国際共著)

Komuro Y., **Nakazawa F.**, **Hirabayashi M.**, **Goto-Azuma K.**, Nagatsuka, N., Shigeyama, W., Matoba, S., Homma, T., Steffensen, J.P., Dahl-Jensen, D., Temporal and spatial variabilities in surface mass balance at the EGRIP site, Greenland from 2009 to 2017, Polar Science, 27, 100568, 2021. (査読有) (国際共著)

Goto-Azuma K., Homma, T., Saruya, T., **Nakazawaa F.**, Komuro, Y., Nagatsuka, N., **Hirabayashi M.**, Kondo, Y., Koike, M., Aoki, T., Greve, R., Okuno,, J., Studies on the variability of the Greenland Ice Sheet and climate, Polar Science, 27, 100557, 2021. (査読有) (国際共著)

Koike,,M., **Goto-Azuma K.**, Kondo, Y., Matsui, H., Mori, T., Moteki, N., Ohata, S., Okamoto, H., Oshima, N., Sato, K., Takano, T., Tobo, Y., Ukita, J., Yoshida, A.,　Polar Science, 27, 10621, 2021. (査読あり)

青木輝夫，的場澄人，庭野匡思，朽木勝幸，谷川朋範，竹内望，山口悟，**本山秀明**，藤田耕史，山崎哲秀，飯塚芳徳，堀雅裕，島田利元，植竹淳，永塚尚子，大沼友貴彦，犠本明弘，石元裕史，田中泰宙，大島長，梶野瑞王，足立光司，黒崎豊，**杉山慎**，**津滝俊**，**東久美子**，八久保晶弘，川上薫，木名瀬健:雪氷, 83, 169-191 (2021)SIGMA及び関連プロジェクトによるグリーンランド氷床上の大気・雪氷・雪氷微生物研究－ ArCS IIプロジェクトへのつながり －.(査読有)

Sugiyama, S, **Minowa, M**: Mass loss of the Antarctic ice sheet driven by ice-ocean interaction, *Open Access Government October Issue*, 174-175. 2020.

Sugiyama S., Through the Japanese field research in Greenland: A changing natural environment and its impact on human society, *Polar Record*, 56, E8, doi:10.1017/S003224742000011X, 2020 （査読有）

Ohash Y., **Aoki S.**, Matsumura Y, **Sugiyama S.**, Kanna N, Sakakibara D: Water mass structure and the effect of subglacial discharge in Bowdoin Fjord, northwestern Greenland, *Ocean Science*, 16: 545-564, doi: 10.5194/os-16-545-202, 2020 （査読有）（オープンアクセス）

Matsuno K, Kanna N, **Sugiyama S.**, Yamaguchi A, Yang E Y, Impacts of meltwater discharge from marine-terminating glaciers on the protist community in Inglefield Bredning, northwestern Greenland, *Marine Ecology Progress Series*, 642: 55-65, doi: 10.3354/meps13324, 2020 （査読有）（国際共著）

Podolskiy J, **Sugiyama S.,** Soundscape of a narwhal summering ground in a glacier fjord (Inglefield Bredning, Greenland), *Journal of Geophysical Research Oceans*, 125, e2020JC016116, doi:10.1029/2020JC016116, 2020 （査読有）（オープンアクセス）

Kanna N, **Sugiyama S.**, Fukamachi Y, Nomura D, Nishioka J, Iron supply by subglacial discharge into a fjord near the front of a marine-tterminating glacier in northwestern Greenland, *Global Biogeochemical Cycles*, 34(10), e2020GB006567, doi:10.1029/2020GB006567, 2020 （査読有）（オープンアクセス）

Mankoff K D, Noel B, Fettweis X, Ahlstrom A P, Colgan W, Kondo K, Langley K, **Sugiyama S.**, van As D, Fausto R S., Greenland liquid water discharge from 1958 through 2019, *Earth System Science Data*, 12(4): 2811-2841, doi: 10.5194/essd-12-2811-2020, 2020 （査読有）（オープンアクセス）（国際共著）

Talalay, P., Li, Y., Augustin, L., Clow, G., Hong, J., Lefebvre, E., Markov, A., **Motoyama, H.**, Ritz, C., Geothermal flux beneath the Antarctic Ice Sheet derived from measured temperature profiles in deep boreholes, *The Cryosphere*, 14, 4021–4037, 2020. https://doi.org/10.5194/tc-14-4021-2020 (査読有)（オープンアクセス）(国際共著)

Motoyama, H., Takahashi, A., Tanaka, Y., Shinbori, K., Miyahara, M., Yoshimoto, T., Fujii, Y., Furusaki, A., Azuma, N., Ozawa, Y., Kobayashi, A., Yoshise, Y., Deep ice core drilling to a depth of 3035.22 m at Dome Fuji, Antarctica in 2001–07. *Annals of Glaciology*, 1-11. 2020. doi:10.1017/aog.2020.84. (査読有)（オープンアクセス）

本山秀明, 高橋昭好, 田中洋一, 新堀邦夫, 宮原盛厚, 吉本隆安, 藤井理行, 鈴木利孝, 古川晶雄, **東　久美子**, 鈴木啓助, 武藤淳公, 五十嵐　誠, 山崎哲秀, **藤田秀二**, 斎藤　健, 渡辺原太, 古崎　睦, 李　院生, 鄭　址雄, 福井幸太郎, **中澤文男**, 亀田貴雄, 藤田耕史, 大日方一夫, 齊藤隆志, 神山孝吉, 木下　淳, 東　信彦, 中山芳樹, 渡辺興亜, 高田守昌, 小澤行雄, 小林明雄, 吉瀬也寸志, 南極ドームふじ基地における第 2 期氷床深層コア掘削. *南極資料,* 64, 284-329, 2020. （査読有）（国際共著論文）

Oyabu I., **Kawamura K.**, **Kitamura K.**, Dallmayr R., Kitamura A., Sawada C., Severinghaus J. P., Beaudette R., Orsi A., Sugawara S., Ishidoya S., Dahl-Jensen D., **Goto-Azuma K.**, **Aoki S.**, **Nakazawa T.**, New technique for high-precision, simultaneous measurements of CH4, N2O and CO2 concentrations; isotopic and elemental ratios of N_2, O_2 and Ar; and total air content in ice cores by wet extraction, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(12), 6703–6731, doi.org/10.5194/amt-13-6703-2020, 2020.(査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

川又基人，**土井浩一郎**，澤柿教伸，**菅沼悠介**，日本南極地域観測隊アーカイブ空中写真を用いた数値表層モデル作成とその有用性，*地理学評論*，94, 1－16, 2021. (査読有)

Stagpoole V., Tontini F. C., **Fukuda Y.**, Woodward D., New Zealand gravity reference stations 2020: history and development of the gravity network, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, doi: 10.1080/00288306.2021.1886120. (査読有)(国際共著)(オープンアクセス)

Andersen J.L., Newall J.C., Blomdin R., Sams S.E., Fabel D.G., Koester A.J., Stuart F.M., Lifton N.A., Fredin O., Caffee M.W., Glasser N.F., Rogozhina I., **Suganuma Y.**, Harbor J.M., Stroeven A.P., Ice surface changes along Jutulstraumen Ice Stream in western Dronning Maud Land, East Antarctica, during recent glacial cycles, *Quaternary Science Reviews*, 249, 106636, doi:10.1016/j.quascirev.2020.106636, 2020.

Kawamata Moto**, Suganuma Yusuke, Doi Koichiro**, Misawa Keiji, Hirabayashi Motohiro, Hattori Akihisa, Sawagaki

Takanobu, Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating, *Quaternary Science Reviews*, 247, 106540, doi:10.1016/j.quascirev.2020.106540, 2020.(査読有)(オープンアクセス)

菅沼悠介，**石輪健樹**，**川又基人**，**奥野淳一**，香月興太，板木拓也，関宰，**金田平太郎**，松井浩紀，**羽田裕貴**，藤井昌和，平野大輔．東南極における海域-陸域シームレス堆積物掘削研究の展望，地学雑誌，129(5), pp. 591–610, doi: 10.5026/jgeography.129.591, 2020.（査読有）（オープンアクセス）

Newall J.C.H., Dymova T., Serra E., Biomdin R., Fredin O., Glasser N.F., Lundberg C., **Suganuma Y.**, Harbor J.M., Stroeven A.P., Glacial geomorphology of western Dronning Maud Land, Antarctica, *Journal of Maps*, 16, 468-478,doi: 10.1080/17445647.2020.1761464 , 2020

川又基人，**菅沼悠介**，**土井浩一郎**，澤柿教伸，服部晃久，氷河地形調査と表面露出年代測定に基づく東南極宗谷海岸南部 Skarvsnes における氷床後退過程の復元．*地学雑誌*, 129, 315－336, doi:10.5026/jgeography.129.315, 2020. (査読有)(オープンアクセス)

Komura K., **Kaneda H.**, Tanaka T., Kojima S., Inoue T., Nishio T., Synchronized gravitational slope deformation and active faulting: A case study on and around the Neodani fault, central Japan, *Geomorphology*, 365, 107214, doi:10.1016/j.geomorph.2020.107214, 2020.

Y. Noguchi, **T. Maki**, Tracking Omnidirectional Surfaces using a Low-cost Autonomous Underwater Vehicle, I*EEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(1), 11-23, 2021.1(査読有)

Machida S., Nakamura K., Kogiso T., Shimomura R., Horinouchi K., **Okino K.**, Kato Y., Fine-scale chemostratigraphy of cross-sectioned hydrogenous ferromanganese nodules from the western North Pacific, *Island Arc*, 30(1), e12395, doi:10.1111/iar.12395, 2021. (査読有)

Aoki Shigeru, Ono Kazuya, Hirano Daisuke, **Tamura Takeshi**, Continuous winter oceanic profiling in the Cape Darnley Polynya, East Antarctica, *Journal of Oceanography*, 76, 365-372, doi:10.1007/s10872-020-00550-w, 2020. (査読有)

Aoki S., Katsumata K., Hamaguchi M., Noda A., Kitade Y., Shimada K., Hirano D., Simizu D., **Aoyama Y.**, Doi K., **Nogi Y.**, Freshening of Antarctic Bottom Water Off Cape Darnley, East Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, doi:10.1029/2020JC016374, 2020. (査読有)

Aoki S., Yamazaki K., Hirano D., Katsumata K., Shimada K., Kitade Y., Sasaki H., Murase H., Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin during 2010s, *Scientific Reports*, 10, doi:10.1038/s41598-020-71290-6, 2020. (査読有)(オープンアクセス)

浅川賢一，**山縣広和**，小型 ROV を使った教育活動，*日本船舶海洋工学会誌 KANRIN*, 90, 33-36, 2020.5

Basch V., Sanfilippo A., Sani C., Ohara Y., Snow J., Ishizuka O., Harigane Y., Michibayashi K., Sen A., Akizawa N., **Okino K.**, **Fujii M.**, Yamashita H., Crustal Accretion in a Slow Spreading Back - Arc Basin: Insights From the Mado Megamullion Oceanic Core Complex in the Shikoku Basin, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(11), doi:10.1029/2020GC009199, 2020.(査読有)(国際共著)

Ohgaito,R., Yamamoto,A., Hajima,T., O'ishi,R., Abe,M., Tatebe,H., **Abe-Ouchi,A.**, and Kawamiya,M., PMIP4 experiments using MIROC-ES2L Earth system model., *Geoscientific Model Development*, 14, 1195-1217., Doi:10.5194/gmd-14-1195-2021., 2021 （査読あり，オープンアクセス）

Zhang,Z., Li,X., Guo,C., Otterå,O.H., Nisancioglu,K.H., Tan,N., Contoux,C., Ramstein,G., Feng,R., Otto-Bliesner,B.L., Brady,E., Chandan,D., Peltier,W.R., Baatsen,M.L.J., von der Heydt,A.S., Weiffenbach,J.E., Stepanek,C., Lohmann,G., Zhang,Q., Li,Q., Chandler,M.A., Sohl,L,E., Haywood,A.M., Hunter,S.J., Tindall,J.C., Williams,C., Lunt,D.J., Chan,W. and **Abe-Ouchi,A.**, Mid-Pliocene Atlantic Meridional Overturning Circulation simulated in PlioMIP2., *Climate of the Past*, 17, 529–543., Doi:10.5194/cp-17-529-2021., 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Lunt,D.J., Bragg,F., Chan,W., Hutchinson,D.K., Ladant,J., Morozova,P., Niezgodzki,I., Steinig,S., Zhang,Z., Zhu,J., **Abe-Ouchi,A.**, Anagnostou,E., de Boer,A.M., Coxall,H.K., Donnadieu,Y., Foster,G., Inglis,G.N., Knorr,G., Langebroek,P.M., Lear,C.H., Lohmann,G., Poulsen,C.J., Sepulchre,P., Tierney,J., Valdes,P.J., Volodin,E.M., Jones,T.D., Hollis,C.J., Huber,M. and Otto-Bliesner,B.L., DeepMIP: model intercomparison of early Eocene climatic optimum (EECO) large-scale climate features and comparison with proxy data., *Climate of the Past*, 17, 203–227., doi:10.5194/cp-17-203-2021., 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Sherriff-Tadano,S., **Abe-Ouchi,A.** and **Oka,A.**, Impact of mid-glacial ice sheets on deep ocean circulation and global climate: Role of surface cooling on the AMOC., *Climate of the Past*, 17, 95–110, doi:10.5194/cp-17-95-2021., 2021（査読あり，オープンアクセス）

Kageyama,M., Sime,L.C., Sicard,M., Guarino,M., de Vernal,A., Schroeder,D., Stein,R., Malmierca-Vallet,I., **Abe-Ouchi,A.**, Bitz,C., Braconnot,P., Brady,E., Cao,J., Chamberlain,M.A., Feltham,D., Guo,C., LeGrande,A.N., Lohmann,G., Meissner,K., Menviel,L., Morozova,P., Nisancioglu,K.H., Otto-Bliesner,B., O'ishi,R., Buarque,S.R., Melia,D.S.Y., **Sherriff-Tadano,S.**, Stroeve,J., Shi,X., Sun,B., Tomas,R.A., Volodin,E., Yeung,N., Zhang,Q., Zhang,Z., Zheng,W. and Ziehn,T., A multi-model CMIP6-PMIP4 study of Arctic sea ice at 127 ka: sea ice data compilation and model differences., *Climate of the Past*, 17, 37–62., Doi:10.5194/cp-17-37-2021., 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Otto-Bliesner,B.L., Brady,E.C., Zhao,A., Brierley,C., Axford,Y., Capron,E., Govin,A., Hoffman,J., Isaacs,E., Kageyama,M., Scussolini,P., Tzedakis,P.C., Williams,C., Wolff,E., **Abe-Ouchi,A.**, Braconnot,P., Buarque,S.R., Cao,J., Vernal,A.d., Guarino,M.V., Guo,C., LeGrande,A.N., Lohmann,G., Meissner,K., Menviel,L., Morozova,P.A., Nisancioglu,K., O'ishi,R., Melia,D.S.Y., Shi,X., Sicard,M., Sime,L., Stepanek,C., Tomas,R., Volodin,E., Yeung,N., Zhang,Q., Zhang,Z. and Zheng,W., Large-scale features of Last Interglacial climate: results from evaluating the lig127k simulations for the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)–Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP4)., *Climate of the Past*, 17, 63–94., Doi:10.5194/cp-17-63-2021., 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Lambert,F., Opazo,N., Ridgwell,A., Winckler,G., Lamy,F., Shaffer,G., Kohfeld,K., Ohgaito,R., Albani,S. and **Abe-Ouchi,A.**, Regional patterns and temporal evolution of ocean iron fertilization and CO2 drawdown during the last glacial termination., *Earth and Planetary Science Letters*, 554, 116675., doi:10.1016/j.epsl.2020.116675., 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

O'ishi, R., Chan, W.-L., **Abe-Ouchi, A.**, **Sherriff-Tadano, S.**, Ohgaito, R., **Yoshimori, M.**, PMIP4/CMIP6 last interglacial simulations using three different versions of MIROC: importance of vegetation, *Climate of the Past*, 17, 21–36., doi: 10.5194/cp-17-21-2021., 2021 （査読あり，オープンアクセス）

Saito,F., **Obase,T.** and **Abe-Ouchi,A.**, Implementation of the RCIP scheme and its performance for 1-D age computations in ice-sheet models., *Geoscientific Model Development*, 13, 5875-5896., doi:10.5194/gmd-13-5875-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス）

de Nooijer,W., Zhang,Q., Li,Q., Zhang,Q., Li,X., Zhang,Z., Guo,C., Nisancioglu,K.H., Haywood,A.M., Tindall,J.C., Hunter,S.J., Dowsett,H.J., Stepanek,C., Lohmann,G., Otto-Bliesner,B.L., Feng,R., Sohl,L.E., Chandler,M.A., Tan,N., Contoux,C., Ramstein,G., Baatsen,M.L.J., von Der Heydt, Anna S., Chandan,D., Peltier,W.R., **Abe-Ouchi,A.**, Chan,W., Kamae,Y. and Brierley,C.M., Evaluation of Arctic warming in mid-Pliocene climate simulations., *Climate of the Past*, 16, 2325-2341., doi:10.5194/cp-16-2325-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Haywood,A.M., Tindall,J.C., Dowsett,H.J., Dolan,A.M., Foley,K.M., Hunter,S.J., Hill,D.J., Chan,W., **Abe-Ouchi,A.**, Stepanek,C., Lohmann,G., Chandan,D., Peltier,W.R., Tan,N., Contoux,C., Ramstein,G., Li,X., Zhang,Z., Guo,C., Nisancioglu,K.H., Zhang,Q., Li,Q., Kamae,Y., Chandler,M.A., Sohl,L.E., Otto-Bliesner,B.L., Feng,R., Brady,E.C., von der Heydt, Anna S., Baatsen,M.L.J. and Lunt,D.J., The Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2: large-scale climate features and climate sensitivity., *Climate of the Past*, 16, 2095-2123., doi:10.5194/cp-16-2095-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Brierley,C.M., Zhao,A., Harrison,S.P., Braconnot,P., Williams,C.J.R., Thornalley,D.J.R., Shi,X., Peterschmitt,J., Ohgaito,R., Kaufman,D.S., Kageyama,M., Hargreaves,J.C., Erb,M.P., Emile-Geay,J., D'Agostino,R., Chandan,D., Carre,M., Bartlein,P.J., Zheng,W., Zhang,Z., Zhang,Q., Yang,H., Volodin,E.M., Tomas,R.A., Routson,C., Peltier,W.R., Otto-Bliesner,B., Morozova,P.A., McKay,N.P., Lohmann,G., Legrande,A.N., Guo,C., Cao,J., Brady,E., Annan,J.D. and **Abe-Ouchi,A.**, Large-scale features and evaluation of the PMIP4-CMIP6 midHolocene simulations., *Climate of the Past*, 16, 1847-1872., doi:10.5194/cp-16-1847-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Brown,J.R., Brierley,C.M., An,S., Guarino,M., Stevenson,S., Williams,C.J.R., Zhang,Q., Zhao,A., **Abe-Ouchi,A.**, Braconnot,P., Brady,E.C., Chandan,D., D'Agostino,R., Guo,C., LeGrande,A.N., Lohmann,G., Morozova,P.A., Ohgaito,R., O'ishi,R., Otto-Bliesner,B.L., Peltier,W.R., Shi,X., Sime,L., Volodin,E.M., Zhang,Z. and Zheng,W., Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models., *Climate of the Past*, 16, 1777-1805., doi:10.5194/cp-16-1777-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Goelzer,H., Nowicki,S., Payne,A., Larour,E., Seroussi,H., Lipscomb,W.H., Gregory,J., **Abe-Ouchi,A.**, Shepherd,A., Simon,E., Agosta,C., Alexander,P., Aschwanden,A., Barthel,A., Calov,R., Chambers,C., Choi,Y., Cuzzone,J., Dumas,C., Edwards,T., Felikson,D., Fettweis,X., Golledge,N.R., **Greve,R.**, Humbert,A., Huybrechts,P., Le Clec'h,S., Lee,V., Leguy,G., Little,C., Lowry,D.P., Morlighem,M., Nias,I., Quiquet,A., Rueckamp,M., Schlegel,N., Slater,D.A., Smith,R.S., Straneo,F., Tarasov,L., van de Wal,R. and van den Broeke,M., The future sea-level contribution of the Greenland ice sheet: a multi-model ensemble study of ISMIP6., *Cryosphere*, 14, 3071-3096., doi:10.5194/tc-14-3071-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Seroussi,H., Nowicki,S., Payne,A.J., Goelzer,H., Lipscomb,W.H., **Abe-Ouchi,A.**, Agosta,C., Albrecht,T., Asay-Davis,X., Barthel,A., Calov,R., Cullather,R., Dumas,C., Galton-Fenzi,B.K., Gladstone,R., Golledge,N.R., Gregory,J.M., Greve,R., Hattermann,T., Hoffman,M.J., Humbert,A., Huybrechts,P., Jourdain,N.C., Kleiner,T., Larour,E., Leguy,G.R., Lowry,D.P., Little,C.M., Morlighem,M., Pattyn,F., Pelle,T., Price,S.F., Quiquet,A., Reese,R., Schlegel,N., Shepherd,A., Simon,E., Smith,R.S., Straneo,F., Sun,S., Trusel,L.D., Van Breedam,J., van de Wal, Roderik S. W., Winkelmann,R., Zhao,C., Zhang,T. and Zwinger,T., ISMIP6 Antarctica: a multi-model ensemble of the Antarctic ice sheet evolution over the 21st century. *Cryosphere*, 14, 3033-3070. doi:10.5194/tc-14-3033-2020.

Pontes,G.M., Wainer,I., Taschetto,A.S., Sen Gupta,A., **Abe-Ouchi,A.**, Brady,E.C., Chan,W., Chandan,D., Contoux,C., Feng,R., Hunter,S.J., Kame,Y., Lohmann,G., Otto-Bliesner,B.L., Peltier,W.R., Stepanek,C., Tindall,J., Tan,N., Zhang,Q. and Zhang,Z., Drier tropical and subtropical Southern Hemisphere in the mid-Pliocene Warm Period., *Scientific Reports*, 10, 13458., doi:10.1038/s41598-020-68884-5., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Rodriguez-Morales,F., Braaten,D., Hoang Trong Mai., Paden,J., Gogineni,P., Yan,J., **Abe-Ouchi,A.**, Fujita,S., Kawamura,K., **Tsutaki,S.**, Van Liefferinge,B., Matsuoka,K. and Steinhage,D., A Mobile, Multichannel, UWB Radar for Potential Ice Core Drill Site Identification in East Antarctica: Development and First Results., *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4836-4847., doi:10.1109/JSTARS.2020.3016287., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Nowicki,S., Goelzer,H., Seroussi,H., Payne,A.J., Lipscomb,W.H., **Abe-Ouchi,A.**, Agosta,C., Alexander,P., Asay-Davis,X.S., Barthel,A., Bracegirdle,T.J., Cullather,R., Felikson,D., Fettweis,X., Gregory,J.M., Hattermann,T., Jourdain,N.C., Munneke,P.K., Larour,E., Little,C.M., Morlighem,M., Nias,I., Shepherd,A., Simon,E., Slater,D., Smith,R.S., Straneo,F., Trusel,L.D., van den Broeke, Michiel R. and van de Wal,R., Experimental protocol for sea level projections from ISMIP6 stand-alone ice sheet models., *Cryosphere*, 14, 2331-2368., doi:10.5194/tc-14-2331-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

McClymont,E.L., Ford,H.L., Ho,S.L., Tindall,J.C., Haywood,A.M., Alonso-Garcia, M., Bailey,I., Berke,M.A., Littler,K., Patterson,M.O., Petrick,B., Peterse,F., Ravelo,A.C., Risebrobakken,B., Schepper,S.D., Swann,G.E. A., Thirumalai, K., Tierney.J.E., Weijst,C., White,S., **Abe-Ouchi, A.**, Baatsen,M.L.J., Brady,E.C., Chan,WL., Chandan,D., Feng,R., Guo,C., von der Heydt, A.S., Hunter, S., Li, X., Lohmann, G., Nisancioglu, K.H., Otto-Bliesner,B.L., Peltier,W.R., Stepanek,C. and Zhang, Z., Lessons from a high-CO2 world: an ocean view from ~3 million years ago., *Climate of the Past*, 16, 1599–1615., doi:10.5194/cp-16-1599-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Chan,W. and **Abe-Ouchi,A.**, Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2) simulations using the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC4m)., *Climate of the Past*, 16, 1523-1545., doi:10.5194/cp-16-1523-2020., 2020 （査読あり，オープンアクセス）

Greve, R., R. Calov, **T. Obase**, **F. Saito**, S. Tsutaki and **A. Abe-Ouchi**., ISMIP6 future projections for the Antarctic ice sheet with the model SICOPOLIS. *Technical report*, *Zenodo*, doi: 10.5281/zenodo.3971232, 2020 （査読なし，オープンアクセス，国際共著）

Kusahara, K., Hirano, D., Fujii, M., Fraser, A. D., and Tamura, T., Modeling intensive ocean–cryosphere interactions in Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *The Cryosphere*, 15, 1697–1717, doi:10.5194/tc-15-1697-2021, 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Arroyo, M. C., Shadwick, E. H., Tilbrook, B., Rintoul, S. R., & **Kusahara, K.**, A Continental Shelf Pump for CO2 on the Adélie Land Coast,
East Antarctica, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 125, ee2020JC016302, doi:10.1029/2020JC016302, 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Kusahara, K., Interannual-to-Multidecadal Responses of Antarctic Ice Shelf–Ocean Interaction and Coastal Water Masses during the Twentieth Century and the Early Twenty-First Century to Dynamic and Thermodynamic Forcing. *Journal of Climate*. 33, 4941–4973, doi:10.1175/JCLI-D-19-0659.

Gwyther, D. E., **Kusahara, K.**, Asay-Davis, X. S., Dinniman, M. S., and Galton-Fenzi, B. K (2020) Vertical processes and

resolution impact ice shelf basal melting: A multi-model study. *Ocean Modelling*, 147, doi:10.1016/j.ocemod.2020.101569.

A.Oka, Ocean carbon pump decomposition and its application to CMIP5 earth system model simulations, P*rogress in Earth and Planetary Science*, 7 (1), 1-17., 2020

Greve, R., C. Chambers and R. Calov., ISMIP6 future projections for the Greenland ice sheet with the model SICOPOLIS., *Technical report, Zenodo*, doi: 10.5281/zenodo.3971251, 2020 （査読なし，オープンアクセス，国際共著）

Chambers, C., **R. Greve**, B. Altena and P.-M. Lefeuvre., Possible impacts of a 1000 km long hypothetical subglacial river valley towards Petermann Glacier in northern Greenland., *The Cryosphere*, 14 (11), 3747-3759, doi: 10.5194/tc-14-3747-2020, 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Sun, S., F. Pattyn, E. G. Simon, T. Albrecht, S. Cornford, R. Calov, C. Dumas, F. Gillet-Chaulet, H. Goelzer, N. R. Golledge, **R. Greve**, M. J. Hoffman, A. Humbert, E. Kazmierczak, T. Kleiner, G. R. Leguy, W. H. Lipscomb, D. Martin, M. Morlighem, S. Nowicki, D. Pollard, S. Price, A. Quiquet, H. Seroussi, T. Schlemm, J. Sutter, R. S. W. van de Wal, R. Winkelmann and T. Zhang., Antarctic ice sheet response to sudden and sustained ice-shelf collapse (ABUMIP)., *Journal of Glaciology*, 66 (260), 891-904, doi: 10.1017/jog.2020.67, 2020 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Sugiyama, S., N. Kanna, D. Sakakibara, T. Ando, I. Asaji, K. Kondo, Y. Wang, Y. Fujishi, S. Fukumoto, E. Podolskiy, Y. Fukamachi, M. Takahashi, S. Matoba, Y. Iizuka, **R. Greve**, M. Furuya, K. Tateyama, T. Watanabe, S. Yamasaki, A. Yamaguchi, B. Nishizawa, K. Matsuno, D. Nomura, Y. Sakuragi, Y. Matsumura, Y. Ohashi, T. Aoki, M. Niwano, N. Hayashi, M. Minowa, G. Jouvet, E. van Dongen, A. Bauder, M. Funk, A. A. Bjørk and T. Oshima., Rapidly changing glaciers, ocean and coastal environments, and their impact on human society in the Qaanaaq region, northwestern Greenland., *Polar Science*, 27, 100632, doi: 10.1016/j.polar.2020.100632, 2021 （査読あり，オープンアクセス，国際共著）

Ishida H, Isono RS, Kita J, **Watanabe YW**, Long-term ocean acidification trends in coastal waters around Japan, *Scientific Reports*,11,5052, doi:10.1038/s41598-021-84657-0,2021. (査読有)(オープンアクセス)

Yasuda Ichiro, FujioShinzou, YanagimotoDaigo, LeeKeungJong, SasakiYusuke, ZhaiShuo, TanakaMamoru, ItohSachihiko, TanakaTakahiro、 HasegawaDaisuke, GotoYasutaka, Sasano Daisuke, Estimate of turbulent energy dissipation rate using free-fall and CTD-attached fast-response thermistors in weak ocean turbulence, *Journal of Oceanography*,77,17-28, doi:10.1007/s10872-020-00574-2, 2021. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

GotoYasutaka, **Yasuda Ichiro**, NagasawaMaki, KouketsuShinya, Nakano Toshiya, Estimation of Basin-scale turbulence distribution in the North Pacific Ocean using CTD-attached thermistor measurements, *Scientific Reports*,11,doi:10.1038/s41598-020-80029-2, 2021. (査読有)(オープンアクセス)

Sato Kazutoshi、 InoueJun、 SimmondsIan、 Rudeva Irina, Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures, *Nature Communications*,12,1497,doi:10.1038/s41467-021-21773-5, 2021.(査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

庭野匡思, 青木輝夫, 橋本明弘, 大島長, 梶野瑞王, 大沼友貴彦, 藤田耕史, 山口悟, 島田利元, 竹内望, **津滝俊**, 本山秀明, 石井正好, 杉山慎, 平沢尚彦, 阿部彩子, 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み: 2020 年夏最新版, 雪氷, 83, 27-50, 2021 （査読有）

庭野匡思, 青木輝夫, 気象研究所における積雪モデリング研究, *大気化学研究*,44,044A03 , 2021（査読有）（オープンアクセス）

Ishino S., **Hattori S.**, Legrand M., Chen Q., Alexander B., Shao J., Huang J. Jaeglé L., Jourdain B., Preunkert S., Yamada A., Yoshida N., Savarino J., Regional Characteristics of Atmospheric Sulfate Formation in East Antarctica Imprinted on 17 O‐Excess Signature, J*ournal of Geophysical Research: Atmospheres*,126,e2020JD033583, doi:10.1029/2020JD033583,2021.(査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Hiroko Miyahara, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, **Kazuho Horiuchi**, Hideyuki Hotta, Gradual onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses, *Scientific Reports*, 11, 5482, doi: 10.1038/s41598-021-84830-5,2021. (査読有り)(オープンアクセス)

Hirano Daisuke, Tamura Takeshi, Kusahara Kazuya, Ohshima Kay I., Nicholls Keith W., Ushio Shuki, Simizu Daisuke, Ono Kazuya, Fujii Masakazu, Nogi Yoshifumi, Aoki Shigeru, Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica, *Nature Communications*, 11, doi:10.1038/s41467-020-17527-4, 2020. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Pan XL, Li BF, **Watanabe YW**, The Southern Ocean with the largest uptake of anthropogenic nitrogen into the ocean interior, *Scientific Reports*,10,8838, doi:10.1038/s41598-020-65661-2, 2020. (査読有)(オープンアクセス)

HiroseYuu, **ShiozakiTakuhei,** OtaniMasahiro, KudohSakae, ImuraSatoshi, EkiToshihiko, Harada Naomi, Investigating Algal Communities in Lacustrine and Hydro-Terrestrial Environments of East Antarctica Using Deep Amplicon Sequencing, *Microorganisms*,8,497, doi:10.3390/microorganisms8040497,2020. (査読有)(オープンアクセス)

Shiozaki Takuhei, Fujiwara Amane, Inomura Keisuke, Hirose Yuu, Hashihama Fuminori, Harada Naomi, Biological nitrogen fixation detected under Antarctic sea ice, *Nature Geoscience*,13,729-732, doi:10.1038/s41561-020-00651-7,2020 (査読有)

Hernandez-Almeida, I, Bjorklund, K. R, Diz, P, Kruglikova, **S, Ikenoue**, T, Matul, A, Saavedra-Pellitero, M, Swanberg, N., Life on the ice-edge: Paleoenvironmental significance of the radiolarian species Amphimelissa setosa in the northern hemisphere, *Quaternary Science Reviews*,248,106565, doi:10.1016/j.quascirev.2020.106565, 2020. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著)

Araya Akito, Kasai Keisuke, Yoshida Masato, Nakazawa Masataka, Tsubokawa Tsuneya, Evaluation of Systematic Errors in the Compact Absolute Gravimeter TAG-1 for Network Monitoring of Volcanic Activities, *International Association of Geodesy Symposia* ,2020_107,1-7,doi:10.1007/1345_2020_107, 2020. (査読有)(オープンアクセス)

新谷昌人, 重力加速度計測による地殻変動・火山活動観測技術, *電子情報通信学会誌*, 103, 938-944, 2020.

Rodriguez-Morales, F., D. Braaten, H. Mai, J. Paden, P. Gogineni, J.-B. Yan, A. Abe-Ouchi, S. Fujita, K. Kawamura, **S. Tsutaki**, B. Van Liefferinge, K. Matsuoka and D. Steinhage, A Mobile, Multi-Channel, UWB Radar for Potential Ice Core Drill Site Identification in East Antarctica: Development and First Results. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,13, 4836-4847, doi:10.1109/JSTARS.2020.3016287, 2020.（査読有）（国際共著）

Mizobata K., Shimada K., Aoki S., Kitade Y., The Cyclonic Eddy Train in the Indian Ocean Sector of the Southern Ocean as Revealed by Satellite Radar Altimeters and In Situ

Measurements, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, doi:10.1029/2019JC015994, 2020. (査読有)(オープンアクセス)(国際共著

Kato Y., Diatom-based reconstruction of the Subantarctic Front migrations during the late Miocene and Pliocene. *Marine Micropaleontology*. doi:10.1016/j.marmicro.2020.101908, 2020. (査読有) (国際共著)

Sano, M., R. Makabe., N. Kurosawa, M. Moteki and T. Odate , Effects of Lugol's iodine on long-term preservation of marine plankton samples for molecular and stable carbon and nitrogen isotope analyses. *Limnology and Oceanography: Methods*. 18: 635-643. https://doi.org/10.1002/lom3.10390.

Takahashi K.T. and G.W. Hosie, Report on the Status and Trends of Southern Ocean Zooplankton based on the SCAR Southern Ocean Continuous Plankton Recorder (SO-CPR) Survey. https://scar.org/library/science-4/life-sciences/so-cpr/5565-so-zp-status-report/

Takahashi, K. T., and T. Odate , Zooplankton monitoring using a twin NORPAC net during the 59th. Japanese Antarctic Research Expedition in austral summer 2017–2018. *Polar Data Journa*l 4: 61-71. https://doi.org/10.20575/00000014.

Takahashi, K. T., and T. Odate , Zooplankton monitoring using a twin NORPAC net during the 60th Japanese Antarctic Research Expedition in austral summer 2018–2019. *Polar Data Journa*l 4: 72-82. https://doi.org/10.20575/00000015.

Makabe, R., S. Takao, K. T. Takahashi, T. Odate ,Chlorophyll a and macro-nutrient concentrations and photosynthetically active radiation during the training vessel Umitaka-maru cruise of the 59th Japanese Antarctic Research Expedition in January 2018. *Polar Data Journal* 4: 121-132. https://doi.org/10.20575/00000018.

Makabe, R., S. Takao, K. T. Takahashi, T. Odate , Chlorophyll a and macro-nutrient concentrations and photosynthetically active radiation during the training vessel Umitaka-maru cruise of the 60th Japanese Antarctic Research Expedition in January 2019. P*olar Data Journal* 4: 169-180. https://doi.org/10.20575/00000021.

Pinkerton, M.H., Moira Décima, J.A. Kitchener, K.T. Takahashi, K.V. Robinson, R. Stewart, G.W. Hosie, Zooplankton in the Southern Ocean from the continuous plankton recorder: Distributions and long-term change. *Deep-Sea Research Part I,* 162. DOI: 10.1016/j.dsr.2020.103303.

Weldrick, C.K., R. Makabe, K. Mizobata, M. Moteki, T. Odate, S. Takao, R. Trebilco, K.M. Swadling , The use of swimmers from sediment traps to measure summer community structure of Southern Ocean pteropods. *Polar Biology*. DOI: 10.1007/s00300-021-02809-4. 2021.

Heneghan, R.F. J.D. Everett, P.Sykes, S.D. Batten, M.Edwards, K. Takahashi, I.M. Suthers, J.L. Blanchard, A.J. Richardson (2020): A functional size-spectrum model of the global marine ecosystem that resolves zooplankton composition. *Ecological Modelling*. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109265.

Yamazaki T., T, Kuwahara, K.T. Takahashi, Rearing and morphological feature of Clione antarctica (Gymnosomata, Clionidae) collected from the Southern Ocean. *Chiribotan*, 50 (2): 213-220.

2019 年度

Crosta, X., Shukla, S., Ther, O., Ikehara M., Yamane, M., Yokoyama, Y., Last Abundant Appearance Datum of Hemidiscus karstenii driven by climate change, *Marine Micropaleontology*, 157, doi:10.1016/j.marmicro.2020.101861, 2020, (査読有り) (国際共著)

Takao S., Nakaoka S., Hashihama F., Shimada K., Yoshikawa-Inoue H., Hirawake T., Kanda J., Hashida G., Suzuki K., Effects of phytoplankton community composition and productivity on sea surface pCO_2 variations in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. Part I*, doi:10.1016/j.dsr.2020.103263, 2020. (査読有り, オープンアクセス)

Shimada K., Makabe R., Takao S., Odate T., Physical and chemical oceanographic data during Umitaka-maru cruise of the 58th Japanese Antarctic Research Expedition in January 2017. *Polar Data J.* 4, 1－29, doi:10.20575/00000010, 2020. (査読有り)

Oyabu I., Iizuka Y., Kawamura K., Wolff E., Severi M., Ohgaito R., Abe-Ouchi A., Hansson M., Compositions of dust and sea salts in the Dome C and Dome Fuji ice cores from Last Glacial Maximum to early Holocene based on ice-sublimation and single-particle measurements, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 125 (4), doi:10.1029/2019JD032208, 2020. (査読あり) (オープンアクセス)

Kinase T., Adachi K., Oshima N., Goto-Azuma K., Ogawa-Tsukagawa Y., Kondo Y., Moteki N. Ohata S., Hayashi,M., Hara K., Kawashima H., Kita, K., Concentrations and Size Distributions of Black Carbon in the Surface Snow of Eastern Antarctica in 2011, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 125, 2020. (査読あり)

Miyahara Hiroko, Horiuchi Kazuho, Sakashita Wataru, Matsuzaki Hiroyuki, Xua Hongyang, Zhou Limin, Measurement of beryllium-10 in terrestrial carbonate deposits from South China: A pilot study, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 464, 36–40, doi: 10.1016/j.nimb.2019.11.036, 2020.(査読有り)(国際共著)

Sakakibara D., Sugiyama S., Seasonal ice speed variations in 10 marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland, *Journal of Glaciology*, 66(255), 25-34, doi:10.1017/jog.2019.81, 2020. (査読有)

Seguinot J., Funk M., Bauder A., Wyder T., Senn C., Sugiyama S., Englacial warming indicates deep crevassing in Bowdoin Glacier, Greenland, *Frontiers in Cryosphere Science*, 8:65, doi:10.3389/feart.2020.00065, 2020. (査読有)(国際共著)

Sakurai Hirohisa, Tokanai Fuyuki, Miyake Fusa, Horiuchi Kazuho, Masuda Kimiaki, Miyahara Hiroko, Ohyama Motonari, Sakamoto Minoru, Mitsutani Takumi, Moriya Toru, Prolonged production of 14C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings, *Scientific Reports*, 10, 660, doi: 10.1038/s41598-019-57273-2, 2020. (査読有り)(オープンアクセス)

Haneda Y., Okada M., Kubota Y., Suganuma Y., Millennial-scale hydrographic changes in the northwestern Pacific during marine isotope stage 19: teleconnections with ice melt in the North Atlantic, *Earth and Planetary Science Letters*, 531, doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115936, 2020. (査読有り)

McCubbine J. C., Stagpoole V., Tontini F. C., Featherstone W. E., Garthwaite M. C., Brown N. J., Amos M. J., Fukuda Y., Kazama T., Takiguchi H., Nishijima J., Evaluating temporal stability of the New Zealand quasigeoid following the 2016 Kaikōura earthquake using satellite radar remote sensing, *Geophysical Journal International*, 220, 1917–1927, doi.org/10.1093/gji/ggz536, 2020. (査読有り)(国際共著)

Nomura D., Wongpan P., Toyota T., Tanikawa T., Kawaguchi Y., Ono T., Ishino T., Tozawa M., Tamura T.P., Yabe I.S., Son E.Y., Vivier F., Lourenco A., Lebrun M., Nosaka Y., Hirawake T., Ooki A., Aoki S., Else B., Fripiat F., Inoue J., Vancoppenolle M., Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico-chemistry and Ecosystems 2019 (SLOPE2019), *Bulletin of Glaciological Research*, 38, 1-12, doi:10.5331/bgr.19R02, 2020. (査読有り)

Noguchi Y., **Maki T.**, Tracking Omnidirectional Surfaces using a Low-cost Autonomous Underwater Vehicle, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, doi: 10.1109/JOE.2020.2972046, 2020. (査読有)

巻俊宏, HATTORI ～低コストだが使える AUV を目指して～, *Techno-Ocean News*, 73, 1-2, 2020.(査読無)

Sherriff-Tadano S., **Abe-Ouchi A.**, Roles of sea ice-surface wind feedback in maintaining the glacial Atlantic meridional overturning circulation and climate, *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0431.1., 2020. (査読あり)(オープンアクセス)

Haywood A.M., Tindall J.C., Dowsett H.J., Dolan A.M., Foley K.M., Hunter S.J., Hill D.J., Chan W.L., **Abe-Ouchi A.**, Stepanek C., Lohmann G., Chandan D., Peltier W.R., Tan N., Contoux C., Ramstein G., Li X., Zhang Z., Guo C., Nisancioglu K.H., Zhang Q., Li Q., Kamae Y., Chandler M.A., Sohl L.E,, Otto-Bliesner B.L., Feng R., Brady E.C., Von der Heydt A.S., Baatsen M.L.J. and Lunt D.J., A return to large-scale features of Pliocene climate: the Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2, *Climate of the Past*, doi: 10.5194/cp-2019-145, 2020. (査読あり)(オープンアクセス)(国際共著)

Logan L. C., Narayanan S. H. K., **Greve R.**, Heimbach P., SICOPOLIS-AD v1: an open-source adjoint modeling framework for ice sheet simulation enabled by the algorithmic differentiation tool OpenAD. *Geoscientific Model Development* 13 (4), doi: 10.5194/gmd-13-1845-2020, 2020 (査読あり, オープンアクセス, 国際共著)

Levermann A., Winkelmann R., Albrecht T., Goelzer H., Golledge N. R., **Greve R.**, Huybrechts P., Jordan J., Leguy G., Martin D., Morlighem M., Pattyn F., Pollard D., Quiquet A., Rodehacke C., Seroussi H., Sutter J., Zhang T., Van Breedam J., Calov R., DeConto R., Dumas C., Garbe J., Gudmundsson G. H., Hoffman M. J., Humbert A., Kleiner T., Lipscomb W. H., Meinshausen M., Ng E., Nowicki S. M. J., Perego M., Price S. F., **Saito F.**, Schlegel N.-J., Sun S., van de Wal R. S. W., Projecting Antarctica's contribution to future sea level rise from basal ice shelf melt using linear response functions of 16 ice sheet models (LARMIP-2). *Earth System Dynamics* 11 (1), 35-76, doi: 10.5194/esd-11-35-2020, 2020 (査読あり)(オープンアクセス)(国際共著)(プレスリリースあり)

Seroussi H., Nowicki S., Payne A. J., Goelzer H., Lipscomb W. H., **Abe-Ouchi A.**, Agosta C., Albrecht T., Asay-Davis X., Barthel A., Calov R., Cullather R., Dumas C., Gladstone R., Golledge N., Gregory J. M., Greve R., Hatterman T., Hoffman M. J., Humbert A., Huybrechts P., Jourdain N. C., Kleiner T., Larour E., Leguy G. R., Lowry D. P., Little C. M., Morlighem M., Pattyn F., Pelle T., Price S. F., Quiquet A., Reese R., Schlegel N.-J., Shepherd A., Simon E., Smith R. S., Straneo F., Sun S., Trusel L. D., J. Van Breedam, R. S. W. van de Wal, Winkelmann R., Zhao C., Zhang T., Zwinger T., ISMIP6 Antarctica: a multi-model ensemble of the Antarctic ice sheet evolution over the 21st century, *The Cryosphere Discussions*, doi: 10.5194/tc-2019-324, 2020. (査読なし)(オープンアクセス)(国際共著)

Fraser A. D., **Ohshima K. I.**, **Nihashi S.**, Massom R. A., **Tamura T.**, Nakata K., Williams G. D., Carpentier S., Willmes S., Landfast ice controls on sea-ice production in the Cape Darnley Polynya: A case study. *Remote Sensing of Environment*, 233, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111315, 2019. (査読あり)(国際共著)

Kashiwase H., **Ohshima K. I.**, Fukamachi Y., **Nihashi S.**, **Tamura T.**, Evaluation of AMSR-E thin ice thickness algorithm from a mooring-based observation: How can the satellite observe a sea ice field with non-uniform thickness distribution? *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36, 1623-1641, doi:10.1175/JTECH-D-18-0218.1, 2019. (査読あり)

Nakata K., **Ohshima K. I.**, **Nihashi S.**, Estimation of thin ice thickness and discrimination of ice type from AMSR-E passive microwave data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1), 263-276, doi:10.1109/TGRS.2018.2853590, 2019. (査読あり)

Li F. B., **Watanabe Y. W.**, Hosoda S., Sato K., **Nakano Y.**, Quasi-Real-Time and High-Resolution Spatiotemporal Distribution of Ocean Anthropogenic CO_2. *Geophysical Research Letters*, 46, 1-8, doi:10.1029/2018GL081639, 2019. (査読あり) (国際共著)

Watanabe Y. W., Li B. F., Yamasaki R., Yunoki S., Imai K., Hosoda S., **Nakano Y.**, Spatiotemporal changes of ocean carbon species in the western North Pacific using parameterization technique. *Journal of Oceanography*, 76, 2, 155-167, doi:10.1007/s10872-019-00532-7, 2019. (査読あり) (国際共著)

Newman L., Heil P., Trebilco R., **Katsumata K.**, (以下 37 名), Delivering Sustained, Coordinated, and Integrated Observations of the Southern Ocean for Global Impact. *Frontiers in Marine Science*, 6:433, doi:10.3389/fmars.2019.00433, 2019. (査読あり)(オープンアクセス) (国際共著)

Murase H. Abe K., Matsukura R., Sasaki H., Driscoll R., Driscoll S., Schaafsma F. L., Regteren M. van, Yang Q., Ohshima H., Ohshima K., Sugioka R., Tong J., Yamamoto N., Doiguchi H., Briggs E., Doi K., **Hirano D.**, **Katsumata K.**, Kiuchi M., Ko H., Nomura D., Orui M., Sato H., Toyoda S., Yamazaki K., Ishihara T., Hamabe K., Kumagai S., Miyashita T., Yamada N., Koyama Y., Sasaki H., Cruise report of multidisciplinary ecosystem survey in the eastern Indian sector of the Antarctic (CCAMLR Division 58.4.1) with a focus on Antarctic krill during 2018/19 season by the Japanese survey vessel, Kaiyo-maru. *Convention for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources* CCAMLR, WG-EMM-2019/42 [available from CCAMLR Secretariat], 2019. (査読なし) (国際共著)

Labrousse S., Fraser A. D., Sumner M., **Tamura T.**, Pinaud D., Wienecke B., Kirkwood R., Ropert-Coudert Y., Reisinger R., Jonsen I., Porter-Smith R., Barbraud C., Bost C., Ji R., Jenouvrier S., Dynamic fine-scale sea-icescape shapes adult emperor penguin foraging habitat in East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 46, 11,206-11,218, doi:10.1029/2019GL084347, 2019. (査読あり) (国際共著)

Guo G., Shi J., Gao L., **Tamura T.**, Williams G. D., Reduced sea ice production due to upwelled oceanic heat flux in Prydz Bay, East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 46, 4782-4789, doi:10.1029/2018GL081463, 2019. (査読あり) (国際共著) (オープンアクセス)

Kitade Y., Shimada K., **Aoki S.**, **Ohshima K. I.**, Recent research results and future project in the Antarctic Ocean by Umitaka-maru research group for physical oceanography. 123-135, *In Oceanography Challenges to Future Earth*, doi.org/10.1007/978-3-030-00138-4_10, 2019. (査読あり)

大島慶一郎, 未知の南極底層水生成域の発見, *学術研究船「白鳳丸」30 年のあゆみ*(東京大学大気海洋研究所), 7, 2019. (査読なし)

大島慶一郎, 第四の南極底層水生成域の発見, 研究船による海洋観測：地球環境問題解明と社会への成果還元へ向けて, *学術の動向* 2019 年 11 月号(日本学術会議), 66-68, 2019. (査読なし)

大島慶一郎, 氷がつくる海洋大循環とその変動, *Ocean Newsletter No.451* (海洋政策研究所), 2-3, 2019. (査読なし)

中野善之, 海洋 pH 観測のセンサー開発と海洋酸性化研究への応用, *Ocean Newsletter No.460* (海洋政策研究所), 4-5, 2019. (査読なし)

板木 拓也, AI（人工知能）を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確立―高速自動かした革新的な地層解析に道筋―, *ＧＳＪ地質ニュース*, 8, 125-127, 2019. (査読無)

Makabe R., **Takao S.**, **Odate T.**, Chlorophyll a and macro-nutrients concentration during Umitaka-maru cruises of the

58th Japanese Antarctic Research Expedition in January 2017. *Polar Data J.*, 3, 46－58, doi:10.20575/00000009, 2019. (査読有り)

Goto-Azuma K., **Hirabayashi M.**, **Motoyama H.**, Miyake T., Kuramoto T., **Uemura R.**, Igarashi M., Iizuka Y., Sakurai T., Horikawa S., Suzuki K., Suzuki T., Fujita K., Kondo Y., Hattori S., Fujii Y., Reduced marine phytoplankton Sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials, *Nature Communications*, 10, 3247, doi:10.1038/s41467-019-11128-6, 2019. (査読あり)

Yokoyama Y., Hirabayashi S., Goto K., **Okuno J.**, Sproson A., Haraguchi T., Ratnayake N., Miyairi Y., Holocene Indian Ocean sea level, Antarctic melting history and past Tsunami deposits inferred using sea level reconstructions from the Sri Lankan, Southeastern Indian and Maldivian coasts, *Quaternary Science Reviews*, 206, 150-161, 2019. (査読有り)

Hwang H., Hur S.D., Lee J., Han Y., Hong S., **Motoyama H.**, Plutonium fallout reconstructed from an Antarctic Plateau snowpack using inductively coupled plasma sector field mass spectrometry. *Science of the Total Environment*, 669:505-511. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.105. (査読有) (国際共著論文)

Kim O. Po, Noro K., Nabeshima Y., Taniguchi T., Fujii Y., Arai M., Sakurai T., **Kawamura K.**, **Motoyama H.**, Thi H.T., Takenaka N., Concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in Antarctic snow polluted by research activities using snow mobiles and diesel electric generators. *Bulletin of Glaciological Research*, 37, 23-30, doi:10.5331/bgr.19A02, 2019.(査読有)

Sugiyama S., Navarro F. J., **Sawagaki T.**, **Minowa M.**, Segawa T., Onuma Y., Otero J., Vasilenko E. V. Subglacial water pressure and ice speed variations at Johnsons Glacier, Livingston Island, Antarctic Peninsula, *Journal of Glaciology*, 65(252), 689-699, doi:10.1017/jog.2019.45, 2019. (査読有)(国際共著)

Minowa M., Podolskiy E. A., **Sugiyama S.**, Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica, *Annals of Glaciology*, 60(79), 57-67, doi:10.1017/aog.2019.25, 2019. (査読有)

Minowa M., Podolskiy E., Jouvet G., Weidmann Y., Sakakibara D., Tsutaki S., Genko R., Sugiyama S., Calving flux estimation from tsunami waves. Earth and Planetary Science Letters, 515, 283-290, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.03.023, 2019. (査読有) (国際共著)

Van Dongen E., Jouvet G., Walter A., Todd J., Zwinger T., Asaji I., **Sugiyama S.**, Walter F., Funk M. Tides modulate crevasse opening prior to a major calving event at Bowdoin Glacier, Northwest Greenland, *Journal of Glaciology*, 66(255), 113-123, doi:10.1017/jog.2019.89, 2019. (査読有)(国際共著)

Nishizawa B., Kanna N., Abe Y., Ohashi Y., Sakakibara D., Asaji I., **Sugiyama S.**, Yamaguchi A., Watanuki Y., Contrasting assemblages of seabirds in the subglacial meltwater plume and oceanic water of Bowdoin Fjord, northwestern Greenland, *ICES Journal of Marine Science*, fsz213, doi:10.1093/icesjms/fsz213, 2019. (査読有)(国際共著)

Tsutaki S., Fujita K., Nuimura T., Sakai A., **Sugiyama S.**, Komori J., Tshering P., Contrasting thinning patterns between lake- and land-terminating glaciers in the Bhutan Himalaya. *The Cryosphere*, 13(10), 2733-2750, doi:10.5194/tc-13-2733-2019, 2019, (査読有) (国際共著論文)

Pham K.O., Noro K., Nabeshima Y., Taniguchi T., Fujii Y., Arai M., Sakurai T., **Kawamura K.**, **Motoyama H.**, Thi H. T., Takenaka N., Concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in Antarctic snow polluted by research activities using snow mobiles and diesel electric generators, Bulletin of Glaciological Research, 37, 23-30. 2019.

Rodriguez-Morales F., Ailon H., Alvarez S., Braaten D., Karidi KT., Paden A., Paden J., Shang J., Akins T., Carswell J., Gogineni P., Taylor R., Yan J., Abe-Ouchi A., **Fujita S.**, **Kawamura K.**, **Tsutaki S.**, Liefferinge BV., Matsuoka K., A Compact Multi-Channel Radar for >1Ma Old Ice Core Site Identification in East Antarctica, *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama*, 4161-4164, 2019.(査読有) (国際共著論文)

Taylor RA., Gogineni S., Kolpuke S., Li L., O'Neill C., Yan JB., Akins T., Carswell J., Braaten D., **Tsutaki S.**, Abe-Ouchi A., **Fujita S.**, **Kawamura K.**, Liefferinge BV., Matsuoka K., A Prototype Ultra-Wideband FMCW Radar for Snow and Soil-Moisture Measurements, *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama*, 3974-3977, 2019.(査読有) (国際共著論文)

藤支良貴, 深町康, 漢那 直也, **杉山 慎**, グリーンランド北西部ボードイン氷河前縁フィヨルドにおける水温・塩分・流速の長期係留観測, *北海道の雪氷*, 38, 15–18. 2019. (査読無し)

近藤研, 榊原大貴, **津滝俊**, **杉山慎**, グリーンランド北西部カナック氷帽における氷流動速度のモニタリング観測と数値モデリング, *北海道の雪氷*, 38, 105–108, 2019. (査読無し)

波多俊太郎, **杉山慎**, 古屋正人, 南パタゴニア氷原 Pio XI 氷河の近年の流動速度と末端位置の変化, *北海道の雪氷*, 38, 93–96, 2019, (査読無し)

Horiuchi Kazuho, Ohno Hiroshi, Iwahana Go, **Iizuka Yoshinori**, Matsuzaki Hiroyuki, Measurements of beryllium isotopes in ice wedges in Alaska, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 459, 64–70, doi: 10.1016/j.nimb.2019.07.046,2019. (査読有り)(国際共著)

Yokoyama Yusuke, Yamane Masako, Nakamura Atsunori, Miyairi Yosuke, **Horiuchi Kazuho**, Aze Takahiro, Matsuzaki Hiroyuki, Shirahama Yoshiki, Ando Yuka, In-situ and meteoric 10Be and 26Al measurements: Improved preparation and application at the University of Tokyo. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 455, 260–264, doi: 10.1016/j.nimb.2019.01.026, 2019.(査読有り)

Xu Hongyang, Miyahara Hiroko, **Horiuchi Kazuho**, Matsuzaki Hiroyuki, Sun Hailong, Luo Weijun, Zheng Xiangmin, Suganuma Yusuke, Wang Shijie, Zhou Limin, High-resolution records of 10Be in endogenic travertine from Baishuitai, China: A new proxy record of annual solar activity ?, *Quaternary Science Reviews*, 216, 34-46, doi: 10.1016/j.quascirev.2019.05.012,2019. (査読有り)(国際共著)

Iizuka Yoshinori, Miyamoto Chihiro, Matoba Sumito, Iwahana Go, **Horiuchi Kazuho**, Takahashi Yoshio, Kanna Naoya, Suzuki Koji, Ohno Hiroshi, Ion concentrations in ice wedges: an innovative approach to reconstruct past climate variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 515, 58-66, doi: 10.1016/j.epsl.2019.03.013, 2019.(査読有り)(国際共著)

Nakamura K., **Aoki S.**, Yamanokuchi T., **Tamura T.**, Ushio S., Doi K., Fluctuations of the ice flow velocity of Shirase Glacier and its surrounding landfase ice displacement in east Antarctica derived from ALOS-2/PALSAR-2 image correlation, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019* (IGARSS 2019), 4172-4174, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898914, 2019. (査読有り)

Ishiwa T., Yokoyama Y., **Okuno J.**, Obrochta S., Uehara K., Ikehara M., Miyairi Y., A sea-level plateau preceding the Marine Isotope Stage 2 minima revealed by Australian sediments, *Scientific Reports 9*, 6449, doi:10.1038/s41598-019-42573-4, 2019. (査読有り)

Irie Y., Nakada M., **Okuno J.**, Bao H., Non-monotonic post-deglacial relative sea level changes at the aftermath of Marinoan (635 Ma) Snowball Earth meltdown, *Journal of Geophysical*

Research - Solid Earth, 124(8), 9373-9394, doi:10.1029/2018JB017260, 2019. (査読あり) (国際共著)

Simon Q., **Suganuma Y.**, Okada M., **Haneda Y.**, ASTER Team, High-resolution 10Be and paleomagnetic recording of the last polarity reversal in the Chiba composite section: Age and dynamics of the Matuyama-Brunhes transition, *Earth and Planetary Science Letters*, 519, 92-100, 2019. (査読有り)

香月興太，瀬戸浩二，**菅沼悠介**，Dong Yoon Yang，湖底堆積物調査における携帯型採泥器具の種類と特徴について，*地学雑誌*, 128, 359-376, 2019. (査読有り)(オープンアクセス)

菅沼悠介，香月興太，金田平太郎，川又基人，田邊優貴子，柴田大輔，可搬型パーカッションピストンコアラーの開発，*地質学雑誌*, 125, 323-326, 2019 年 5 月．[査読有り，オープンアクセス]

Hallenberger M., Reuning L., Gallagher S.J., Back S., **Ishiwa T.**, Christensen B.A., Bogus K., Increased fluvial runoff terminated inorganic aragonite precipitation on the Northwest Shelf of Australia during the early Holocene, Scientific Reports 9, 18356, doi.org/10.1038/s41598-019-54981-7, 2019. (査読有り)(オープンアクセス)

川又基人，**菅沼悠介，土井浩一郎，澤柿教伸**，服部晃久，氷河地形調査と表面露出年代測定に基づく東南極宗谷海岸南部 Skarvsnes における氷床後退過程の復元，*地学雑誌*（受理）．(査読有り)(オープンアクセス)

吉田弘，巻俊宏, AUV：自律型海中ロボット，*日本船舶海洋工学会誌*, 85, 19-24, 2019, (査読無)

山縣広和, STEM 教育における水中ロボットの活用と効果，*マリンエンジニアリング*, 54(6), 848-853, 2019, (査読無)

青木茂，市川雅明，小野数也，深町康，大島慶一郎，中川敏彦，小林研吾，小竹正人，小澤知史，極域海洋モニタリングブイの開発－オホーツク海における試験観測，*海洋理工学会誌*, 25, 29-34, 2019. (査読有り)

Rugenstein M., Bloch-Johnson J., **Abe-Ouchi A.**, Andrews T., Beyerle U., Cao L., Chadha T., Danabasoglu G., Dufresne J., Duan L., Foujols M., Froelicher T., Geoffroy O., Gregory J., Knutti R., Li C., Marzocchi A., Mauritsen T., Menary M., Moyer E., Nazarenko L., Paynter D., Saint-Martin D., Schmidt G.A., Yamamoto A., Yang S., LongRunMIP: Motivation and Design for a Large Collection of Millennial-Length AOGCM Simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 2551-2570. doi:10.1175/BAMS-D-19-0068.1, 2019.（査読あり）（オープンアクセス)(国際共著)

Rugenstein M., Bloch-Johnson J., Gregory J., Andrews T., Mauritsen T., Li C., Frolicher L., Paynter D., Danabasoglu G., Yang S., Dufresne J., Cao L., Schmidt G.A., **Abe-Ouchi A.**, Geoffroy O., Knutti R., Equilibrium climate sensitivity estimated by equilibrating climate models. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2019GL083898, 2019. （査読あり）（オープンアクセス)(国際共著)

Obase T., **Abe-Ouchi A.**, Abrupt Bolling-Allerod Warming Simulated under Gradual Forcing of the Last Deglaciation. *Geophysical Research Letters,* 46, 11397-11405, doi:10.1029/2019GL084675, 2019. （査読あり）（オープンアクセス)(プレスリリースあり)

Menviel L., Capron E., Govin A., Dutton A., Tarasov L., **Abe-Ouchi A.**, Drysdale R.N., Gibbard P.L., Gregoire L., He F., Ivanovic R.F., Kageyama M., Kawamura K., Landais A., Otto-Bliesner B.L., Oyabu I., Tzedakis P.C., Wolff E., Zhang X., The penultimate deglaciation: protocol for Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP) phase 4 transient numerical simulations between 140 and 127 ka, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 12, 3649-3685, doi:10.5194/gmd-12-3649-2019, 2019. （査読あり）（オープンアクセス)(国際共著)

Kodama T., Genda H., O'ishi R., **Abe-Ouchi A.**, Abe Y., Inner Edge of Habitable Zones for Earth-Sized Planets With Various Surface Water Distributions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 2306-2324, doi:10.1029/2019JE006037, 2019.（査読あり）（オープンアクセス）

Yamamoto A., **Abe-Ouchi A.**, Ohgaito R., Ito A., **Oka A.**, Glacial CO2 decrease and deep-water deoxygenation by iron fertilization from glaciogenic dust. *Climate of the Past*, 15, 981-996, doi:10.5194/cp-15-981-2019, 2019. （査読あり）（オープンアクセス)

Seroussi H., Nowicki S., Simon E., **Abe-Ouchi A.**, Albrecht T., Brondex J., Cornford S., Dumas C., Gillet-Chaulet F., Goelzer H., Golledge N.R., Gregory J.M., **Greve R.**, Hoffman M.J., Humbert A., Huybrechts P., Kleiner T., Larourl E., Leguy G., Lipscomb W.H., Lowry D., Mengel M., Morlighem M., Pattyn F., Payne A.J., Pollard D., Price S.F., Quiquet A., Reerink T.J., Reese R., Rodehacke C.B., Schlegel N., Shepherd A., Sun S., Sutter J., Van Breedam J., van de Wal Roderik S. W., Winkelmann R., Zhang T., initMIP-Antarctica: an ice sheet model initialization experiment of ISMIP6. *The Cryosphere*, 13, 1441-1471, doi:10.5194/tc-13-1441-2019, 2019. （査読あり）(オープンアクセス)(国際共著)

Ota Y., 他 41 名（Kawahata H.2 番目 Kuroda J.3 番目, **Abe-Ouchi A**.7 番目）, Indian Monsoonal Variations During the Past 80 Kyr Recorded in NGHP-02 Hole 19B, Western Bay of Bengal: Implications From Chemical and Mineral Properties. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 20, 148-165. doi:10.1029/2018GC007772, 2019. （査読あり）（オープンアクセス)

Yoshimori M., Suzuki M., The relevance of mid-Holocene Arctic warming to the future, *Clim. Past*, 15, 1375-1394, 2019.

Nakamura Y., **Oka A.**, CMIP5 model analysis of future changes in ocean net primary production focusing on differences among individual oceans and models. *J Oceanogr* 75, 441–462, 2019.（査読あり）.

Robinson A., Alvarez-Solas J., Montoya M., Goelzer H., **Greve R.**, Ritz C., Description and validation of the ice-sheet model Yelmo (version 1.0). *Geoscientific Model Development Discussions,* doi: 10.5194/gmd-2019-273, 2019. (査読なし)(オープンアクセス)(国際共著)

Seddik H., **Greve R.**, Sakakibara D., **Tsutaki S.**, Minowa M., Sugiyama S., Response of the flow dynamics of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, to basal lubrication and tidal forcing. *Journal of Glaciology*, 65(250), 225-238, doi:.org/10.1017/jog.2018.106, 2019. (査読有)

2018 年度

Nakata K., **Ohshima K. I.**, **Nihashi S.**, Estimation of thin ice thickness and discrimination of ice type from AMSR-E passive microwave data, *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 57, 263～276, doi:10.1109/TGRS.2018.2853590, 2018

Salabarnada, A., Escutia, C., Röhl, U., Nelson, C.H., McKay, R., Jiménez-Espejo, F.J., Bijl, P.K., Hartman, J.D., Strother, S.L., Salzmann, U., Evangelinos, D., López-Quirós, A., Flores, J.A., Sangiorgi, F., **Ikehara, M.**, Brinkhuis, H., Paleoceanography and ice sheet variability offshore Wilkes Land, Antarctica – Part 1: Insights from late Oligocene astronomically paced contourite sedimentation. *Climate of the Past*, 14, 991-1014, 2018.

McKay R., Exon N., Müller D., Gohl K., Gurnis M., Shevenell A., Henrys S., Inagaki F., Pandey D., Whiteside J., Flierdt van de T., Naish T., Heuer V., Morono Y., Coffin M., Godard M., Wallace L., Kodaira S., Bijl P., Collot J., Dickens G., Dugan B., Dunlea A. G., Hackney R., **Ikehara M.**, Jutzeler M., McNeill L., Naik S., Noble T., Opdyke B., Pecher I., Stott L., Uenzelmann-Neben G., Vadakkeykath Y., Wortmann U. G., Developing community-based scientific priorities and new drilling proposals in the southern Indian and southwestern Pacific oceans,

Scientific Drilling, 24, 61-70, https://doi.org/10.5194/sd-24-61-2018, 2018.

井尻暁，微小量生物源オパールの酸素同位体比測定方の開発と応用，*号外海洋,* 61, 91–96, 2018.（査読無）

Iizuka Y., Uemura R., Fujita K., Hattori S., Seki O., Miyamoto C., Suzuki T., Yoshida N., **Motoyama H.**, Matoba S., A 60 year record of atmospheric aerosol depositions preserved in a high accumulation dome ice core, Southeast Greenland, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 574–589, doi:10.1002/2017JD026733, 2018.

Schüpbach, S, (他 50 名, **大藪** 46 番目), Greenland records of aerosol source and atmospheric lifetime changes from the Eemian to the Holocene, *Nature Communications*, 9, 1–10, doi:10.1038/s41467-018-03924-3, 2018. (国際共著)

Bautista VII A., Miyake Y., Matsuzaki H., **Iizuka Y., Horiuchi K.**, High resolution 129I bomb peak profile in an ice core from SE-dome site, Greenland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 184–185, 14–21, doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.12.015, 2018. (査読有り) (国際共著)

Takahashi K., Nakai Y., Motizuki Y., Ino T., Ito S., Ohkubo S.B., Minami T., Takaku Y., Yamaguchi T., Tanaka M., **Motoyama H.**, High‐sensitivity sulfur isotopic measurements for Antarctic ice core analyses, *Rapid Commun Mass Spectrom*,32(23), doi/10.10002/rcm.8275, 2018.

Segawa T., Matsuzaki R., Takeuchi N., Akiyoshi A., Navarro F., **Sugiyama S.**, onezawa T. Y., Mori H., Bipolar dispersal of red-snow algae. *Nature Communications*, 9, 3094, doi:10.1038/s41467-018-05521-w, 2018.

Jouvet G., Weidmann Y., Kneib M., Detert M., Seguinot J., Sakakibara D., **Sugiyama S.**, Short-lived ice speed-up and plume water flow captured by VTOL UAV give insights into subglacial hydrological system of Bowdoin Glacier, *Remote Sensing of Environment*, 217, 389-399, doi:10.1016/j.rse.2018.08.027, 2018.

Kanna N., **Sugiyama S.**, Ohashi Y., Sakakibara D., Fukamachi Y., Nomura D., Upwelling of macronutrients and dissolved inorganic carbon by a subglacial freshwater driven plume in Bowdoin Fjord, northwestern Greenland, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 123, 1666-1682, doi:10.1029/2017JG004248, 2018.

Minowa M., Podolskiy E. A., **Sugiyama S.**, Sakakibara D., Skvarca P., Glacier calving observed with time-lapse imagery and tsunami waves at Glaciar Perito Moreno, Patagonia, *Journal of Glaciology*, 64(245), 362-376, doi:10.1017/jog.2018.28, 2018.

杉山慎, 箕輪昌紘, 伊藤優人, 山根志織, 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削, *北海道の雪氷*, 37, 7-10, 2018.

山根志織, **杉山慎, 箕輪昌紘, 伊藤優人**, 南極ラングホブデ氷河における氷河下の海洋環境, *北海道の雪氷*, 37, 75-78, 2018.

Christo Buizert, Michael Sigl, Mirko Severi, Bradley R. Markle, Justin J. Wettstein, Joseph R. McConnell, Joel B. Pedro, Harald Sodemann, **東 久美子, 川村 賢二, 藤田 秀二, 本山 秀明, 平林 幹啓, 植村 立**, Barbara Stenni, Frédéric Parrenin, Feng He, T.J. Fudge , Eric J. Steig, Abrupt Ice Age Shifts in Southern Westerlies and Antarctic Climate Forced from the North, *Nature*, 563, 681-685, DOI： 10.1038/s41586-018-0727-5, 2018.

Suganuma Y., Haneda Y., Kameo K., Kubota Y., Hayashi H., Itaki T., Okuda M., Head M.J., Sugaya M., Nakazato H., Igarashi A., Shikoku K., Hongo M., Watanabe M., Satoguchi Y., Takeshita Y., Nishida N., Izumi K., Kawamura K., **Kawamata M., Okuno J.**, Yoshida T., Ogitsu I., Yabusaki H., Okada M., Paleoclimatic and paleoceanographic records through Marine Isotope Stage 19 at the Chiba composite section, central Japan: A key reference for the Early– Middle Pleistocene Subseries boundary, *Quaternary Science Reviews*, 191, 406-430, doi: 10.1016/j.quascirev.2018.04.022 , 2018.

Kanamaru T., Suganuma Y., Oiwane H., Miura H., Miura M., Okuno J., Hayakawa H., The weathering of granitic rocks in a hyper-arid and hypothermal environment: a case study from the Sør-Rondane Mountains, East Antarctica, *Geomprphology,* 307, 62-74, doi: 10.1016/j.geomorph.2018.05.015, 2018.

Hattori A., Otsubo T., Time-varying solar radiation pressure on Ajisai in comparison with LAGEOS satellites, *Advances in Space Research*, 63, 63-73, doi:10.1016/j.asr.2018.08.010,2019.

菅沼悠介，田邊優貴子，香月興太，柴田大輔，**川又基人**，氷上からの湖底・海底堆積物掘削プロジェクトの報告（JARE-58/59），*南極資料* , 62, 15-42, 2018 年 7 月. (査読有り)

千葉セクション GSSP 提案書 提案チーム（責任著者 **菅沼悠介**），千葉セクション：下部—中部更新統境界の国際境界模式層断面とポイントへの提案書（要約），*地質学雑誌*, 125, 5-22, 2019 年 1 月.

Yokoyama Y., Esat T. M., Thompson W. G., Thomas A.L., Webster J. M., Miyairi Y., Sawada C,, Aze T., Matsuzaki H., **Okuno J.**, Fallon S., Braga J-. C., Humblet M., Iryu Y., Potts D. C., Fujita K., Suzuki A., Kan H., Rapid glaciation and a two-step sea level plunge into the Last Glacial Maximum, *Nature*, 559 603-607, doi: 10.1038/s41586-018-0335-4, 2018.

Zhao X., Fujii M., **Suganuma, Y.**, Zhao Z., Jiang Z., Applying the Burr Type XII Distribution to Decompose Remanent Magnetization Curves, *Journal of Geophysical Research*, 2018 年 9 月［査読有り］

Ishiwa T., Yokoyama Y., Reuning L., McHugh C.M., De Vleeschouwer D., Gallagher S.J., Australian summer monsoon variability in the past 14,000 years revealed by IODP Expedition 356 sediments, *Progress in Earth and Planetary Science,* 6-17, doi:10.1186/s40645-019-0262-5, 2019 年 2 月.

Yokoyama Y., Purcell A., **Ishiwa T.**, Gauging Quaternary Sea-Level Changes Through Scientific Ocean Drilling. Oceanography, 32(1), 64–71, doi: 10.5670/oceanog.2019.121, 2019 年 3 月.

香月興太，瀬戸浩二，**菅沼悠介**，Dong Yoon Yang，湖底堆積物調査における携帯型採泥器具の種類と特徴について，*地学雑誌*（印刷中）

菅沼悠介，香月興太，**金田平太郎，川又基人**，田邊優貴子，柴田大輔，可搬型パーカッションピストンコアラーの開発，*地質学雑誌*（印刷中）

Kaneda H., Chiba T., Stereopaired morphometric protection index red relief image maps (Stereo MPI-RRIMs): effective visualization of high-resolution digital elevation models for interpreting and mapping small tectonic geomorphic features, *Bull. Seismol. Soc. Am.,* 109(1), 2370–2391, doi: 10.1785/0120180166, 2019. (査読有り 9

Matsuda T., **Maki T.**, Sakamaki T., Accurate and Efficient Seafloor Observations with Multiple Autonomous Underwater Vehicles: Theory and Experiments in a Hydrothermal Vent Field, *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)*, 4(3), 2333-2339, doi: 10.1109/LRA.2019.2902744, 2019.

巻俊宏，自律型海中ロボット －魚のごとく－，*人工知能学会誌*, 34(2), 222-227, 2019 年 3 月

Yamagata H., Maki T., Underwater Robot Convention in JAMSTEC 2018 - from an Educational Perspective, *IEEE OES Beacon Newsletter*, 7(4), 68-72, 2018 年 12 月

Silvano A., Rintoul S. R., Pena-Molino B., Hobbs W. R., Wijk E. van, **Aoki S., Tamura T.**, Williams G. D., Freshening by glacial

meltwater enhances melting of ice shelves and reduces formation of Antarctic Bottom Water, *Science Advances*, 4(4), eaap9467, doi:10.1126/sciadv.aap9467.

百留忠洋，**吉田弘**，澤隆雄，中野善之，渡邊佳孝，福田達也，中谷武志，松本宙，菅良太郎，依田貫志，山内由章，奥田幸人，江口和樹，黒岩良太，森英男，洋上中継器（ASV）の開発，*日本ロボット学会誌*, 36(4), 286～293, doi.org/10.7210/jrsj.36.286, 2018

巻俊宏, AUV：自律型海中ロボット，*日本機械学会誌*, 121(1199), 24-27, 2018.

Maki T., Noguchi Y., Kuranaga Y., Masuda K., Sakamaki T., Humblet M., Furushima Y., Low-altitude and High-speed Terrain Tracking Method for Lightweight AUVs, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30(6), 971-979, 2018.

Matsuda T., **Maki T.**, Sato Y., Sakamaki T., Experimental Evaluation of Accuracy and Efficiency of Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), 288-310, 2018.

Fujii M., Sato H., Togawa E., Shimada K., Ishibashi J., Seafloor hydrothermal alteration affecting magnetic properties of abyssal basaltic rocks: Insights from back-arc lavas of the Okinawa Trough, *Earth, Planets and Space*, 70, 196,doi:10.1186/s40623-018-0958-6, 2018.(オープンアクセス)

Fujii M., Okino K., Near-seafloor magnetic mapping of off-axis lava flows near the Kairei and Yokoniwa hydrothermal vent fields in the Central Indian Ridge, Earth, *Planets and Space*, 70, 188, doi:10.1186/s40623-018-0959-5, 2018.(オープンアクセス)

Goelzer H., Nowicki S., Edwards T., Beckley M., **Abe-Ouchi A.**, Aschwanden A., Calov R., Gagliardini O., Gillet-Chaulet F., Golledge N. R., Gregory J., **Greve R.**, Humbert A., Huybrechts P., Kennedy J. H., Larour E., Lipscomb W. H., Le Clec'h S., Lee V., Morlighem M., Pattyn F., Payne A. J., Rodehacke C., Ruckamp M., Saito F., Schlegel N., Seroussi H., Shepherd A., Sun S., Wal R. van de, Ziemen F. A., Design and results of the ice sheet model initialisation initMIP-Greenland: an ISMIP6 intercomparison, *The Cryosphere*, doi:10.5194/tc-12-1433-2018, 2018. (査読有り,オープンアクセス,国際共著)

Kusahara K., Reid P., Williams D. G., Massom R., Hasumi H., An ocean-sea ice model study of the unprecedented Antarctic sea ice minimum in 2016, *Environmental Research Letters*, 13(8), 1-9, doi:10.1088/1748-9326/aad624, 2018. (査読有り,オープンアクセス,国際共著)

Kusahara K., Williams D. G., Massom R., Reid P., Hasumi H., Spatiotemporal dependence of Antarctic sea ice variability to dynamic and thermodynamic forcing: a coupled ocean–sea ice model study, *Climate Dynamics*, 1-18, doi:10.1007/s00382-018-4348-3, 2018. (査読有り，国際共著)

Kobayashi H., Oka A., Response of atmospheric pCO2 to glacial changes in the Southern Ocean amplified by carbonate compensation, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33, 1206-1229,doi:10.1029/2018pa003360, 2018. (査読有り)

Ohgaito R., **Abe-Ouchi A.**, O'ishi R., Takemura T., Ito A., Hajima T., Watanabe S., Kawamiya M., The effect of high dust amount on the surface temperature during the Last Glacial Maximum:A modelling study using MIROC-ESM, *Climate of the Past*, 14, 1565-1581 doi:10.5194/cp-14-1565-2018, 2018

Yamamoto A., **Abe-Ouchi A.**, Yamanaka Y., Long-term response of oceanic carbon uptake to global warming via physical and biological pumps, *Biogeosciences*, 15, 4163-4180, doi:10.5194/bg-15-4163-2018, 2018

Sato K., **Inoue J.**, Alexander S. P., McFarquhar G., Yamazaki A., Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 11406-11413, 2018.

Nishizawa S., Kitamura Y., A surface flux scheme based on the Monin-Obukhov similarity for finite volume models. J. Adv. Model. Earth Syst., 10, 3159-3175, doi:10.1029/2018MS001534, 2018.(査読あり)

Gautier E., Savarino J., Hoek J., Erbland J., Caillon N., **Hattori S.**, Yoshida N., Albalat E., Albarede F., Farquhar, J., 2600-years of stratospheric volcanism through sulfate isotopes. *Nature Communications*, 10(1), 466, 2019.(オープンアクセス)

2017 年度

Nihashi S., Ohshima K. I., Tamura T., Sea-Ice Production in Antarctic Coastal Polynyas Estimated From AMSR2 Data and Its Validation Using AMSR-E and SSM/I-SSMIS Data, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10, 3912～3922, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2731995, 2017. (査読あり)

大島 慶一, 海氷域の変動とその海洋循環に与える影響に関する研究, *海の研究*, 27, 75～96, doi:10.5928/kaiyou.27.2_75 , 2018. (査読あり)(オープンアクセス)

勝又勝郎, 南極底層水と全球海洋子午面循環, *低温科学*, 76, 1-12, doi: 10.14943/lowtemsci.76.1 , 2018. (査読なし)

大島慶一郎, 南極沿岸ポリニヤでの海氷生成と底層水形成, *低温科学*, 76, 13-24, doi: 10.14943/lowtemsci.76.13, 2018. (査読なし)

川合三千代, 南大洋における人為起源二酸化炭素の取り込み, *低温科学*, 76, 57-70, doi: 10.14943/lowtemsci.76.57, 2018. (査読なし)

Takahashi A., **Ito M.**, Nagai K., Thiebot J-B., Mitamura H., Noda T., Trathan P. N., **Tamura T.**, Watanabe Y. Y., Migratory movements and winter diving activity of Adelie penguins in East Antarctica, *Marine Ecology Progress Series*, 589, 227-239, doi:10.3354/meps12438.

池原実, 全球気候変動を駆動する南大洋海洋循環～アガラスリーケージとウェッデルジャイヤ～, *低温科学*, 76, 121-134, doi: 10.14943/lowtemsci.76.121, 2018. (査読なし)

関宰, 最終間氷期の南極氷床崩壊と海水準上昇, *低温科学*, 76, 135-144, doi: 10.14943/lowtemsci.76.135, 2018. (査読なし)

佐藤暢, 野木義史, 藤井昌和, 佐藤太一, 南大洋の形成, *低温科学*, 76, 243-258, doi: 10.14943/lowtemsci.76.243, 2018. (査読なし)

Makabe R., Tanimura A., **Tamura T.**, Hirano D., Shimada K., Hashihama F., Fukuchi M., Meso-zooplankton abundance and spatial distribution off Lutzow-Holm Bay during austral summer 2007-2008, *Polar Science*, 12, 25～33, doi:10.1016/j.polar.2016.09.002, 2017. (査読あり)

茂木正人, 真壁竜介, 高尾信太郎, 南極海生態系研究の現状と展望-炭素循環と低次生産者の視点から, *低温科学*, 76, 71-94, doi: 10.14943/lowtemsci.76.71, 2018. (査読なし)

須藤齋, 加藤悠爾, 石野沙季, 服部圭司, 高橋啓吾, **真壁竜介**, 南極環境変遷のさらなる理解に向けて-珪藻および黄金色化石研究の現状と課題-, *低温科学*, 76, 95-120, doi: 10.14943/lowtemsci.76.95, 2018. (査読なし)

Anais J. O., **Kawamura K.**, Masson-Delmotte V., Fettweis X., Box J.E., Dahl-Jensen D., Clow G.D., Landais A., Severinghaus J.P., The recent warming trend in North Greenland, *Geophysical Research Letters*, 44, 6235–6243, doi: 10.1002/2016GL072212, 2017. (国際共著)

PAGES2k Consortium（本山を含む）, A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era, *SCIENTIFIC DATA*, 4, 170088, doi: 10.1038/sdata.2017.88, 2017. (オープンアクセス)(国際共著)

Motizuki Y., **Motoyama H.**, Nakai Y., Suzuki K., Iizuka Y., Takahashi K., Characteristics of Na+and Cl− distributions in shallow samples from an Antarctic ice core DF01 (Dome Fuji) drilled in 2001: Result of strong atmospheric high-pressure blocking events?, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* 50, 144, 2017. (査読有り)

Jouvet G., Weidmann Y., Seguinot J., Funk M., Abe T., Sakakibara D., Seddik H., **Sugiyama S.**, Initiation of a major calving event on Bowdoin Glacier captured by UAV photogrammetry. *The Cryosphere*, 11, 911-921, doi:10.5194/tc-11-911-2017,2017, (国際共著)

Velasco Herrera V.M., Soon W., Velasco Herrera G., Traversi R., **Horiuchi K.**, Generalization of the cross-wavelet function, *New Astronomy*, 56, 86–93, doi: 10.1016/j.newast.2017.04.012, 2017. (査読有り) (国際共著)

Polgári M., Bérczi S., **Horiuchi K.**, Matsuzaki H., Kovács T., Józsa S., Bendő Z., Fintor K., Fekete J., Homonnay Z., Kuzmann E., Gucsik A., Gyollai I, Kovács J., Dódony I., Characterization and 10Be content of iron carbonate concretions for genetic aspects – Weathering, desert varnish or burning: Rim effects in iron carbonate concretions. *Journal of Environmental Radioactivity*, 173, 58–69, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.11.005, 2017. (査読有り) (国際共著)

本山秀明, 南極ドームアーガスでの掘削-中国と日本のかかわり-, *極地*, 53(1), 52-55, 2017.

本山秀明, 雪尺観測から見える氷床表面質量収支の変動, *気象研究ノート第 233 号*, 193-204, 2017.

本山秀明, 南極氷床内陸ドームふじ基地における特異な気温変動及び熱収支について, *気象研究ノート第 233 号*,377-386, 2017.

杉山慎, グリーンランド沿岸の環境変化とその人間生活への影響, *雪氷*, 79(5), 443-449, 2017.

Tsutaki, S., **Sugiyama S**, Sakakibara D, Surface elevations on Qaanaaq and Bowdoin Glaciers in northwestern Greenland as measured by a kinematic GPS survey from 2012-2016, *Polar Data Journal*, 1, 1–16, doi:10.20575/00000001, 2017. (査読有り)

Tsuboi K., Nakazawa T., Matsueda H., Machida T., **Aoki S.**, Morimoto S., Goto D., Shimosaka T., Kato K., Aoki N., Watanabe T., Mukai H., Tohjima Y., Katsumata K., Murayama S., Ishidoya S., Fujitani T., Koide H., Takahashi M., Kawasaki T., Takizawa A., Sawa Y., InterComparison Experiments for Greenhouse Gases Observation (iceGGO) in2012–2016, *Technical Reports of The Meteorological Research Institute* No.79, 1-77, doi: 10.11483/mritechrepo.79, 2017.

Umezawa T., Brenninkmeijer C.A. M., Röckmann T.,van der Veen C., Tyler S. C., Fujita R., Morimoto S., **Aoki S.**, Sowers T., Schmitt J., Bock M., Beck J., Fischer H., Michel S. E., Vaughn B. H., Miller J. B., White J. W. C., Brailsford G., Schaefer H., Sperlich P., Brand W. A., Rothe M., Blunier T., Lowry D., Fisher R. E., Nisbet E. G., Rice A. L., Bergamaschi P., Veidt C., Levin I., Interlaboratory comparison of $\delta^{13}C$ and δD measurements of atmospheric CH_4 for combined use of data sets from different laboratories, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 1207–1231, doi:10.5194/amt-11-1207-2018, 2018. (国際共著)

Kawamura K., **Abe-Ouchi A.**(Dome Fuji Ice Core Project), State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, 3, 1600446～1600446, doi: 10.1126/sciadv.1600446, 2017. (査読あり)(オープンアクセス)

Bereiter B., Shackleton S., Baggenstos D., **Kawamura K.**, Severinghaus J., Mean globalocean temperatures during the last glacial transition, *Nature*, 553(7686),39–44, doi:10.1038/nature25152, 2018. (国際共著)

Noro K., Hattori S., **Uemura R.**, Fukui K., **Hirabayashi M.**, **Kawamura K.**, **Motoyama H.**, Takenaka N., Yoshida N., Spatial variation of isotopic compositions of snowpack nitrate related to post-depositional processes in eastern Dronning Maud Land, East Antarctica., *Geochemical Journal.* Vol. 52 (No. 2), e7-e14, doi:10.2343/geochemj.2.0519, 2018.

Uemura R., **Motoyama H.**, Masson-Delmotte V., Jouzel J., **Kawamura K.**, **Goto-Azuma K.**, **Fujita S.**, Kuramoto T., **Hirabayashi M.**, Miyake T., Ohno H., Fujita K., **Abe-Ouchi A.**, **Iizuka Y.**, Horikawa S., Igarashi M., Suzuki K., Suzuki T., Fujii Y., Asynchrony between Antarctic temperature and CO2 associated with obliquity over the past 720,000 years, *Nature Communications*, 9, 961, doi:10.1038/s41467-018-03328-3, 2018. (査読あり) (オープンアクセス)(国際共著)

Sakakibara D., **Sugiyama S.**, Ice front and flow speed variations of marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland, *Journal of Glaciology*, 64(244), 300-310, doi:10.1017/jog.2018.20, 2018.

川村賢二, 南極のアイスコアから復元する過去の気候変動, *低温科学*, 76, 145-152, doi: 10.14943/lowtemsci.76.145 , 2018. (査読なし)

飯塚芳徳, アイスコアによる海氷面積変動の復元 *低温科学*, 76, 153-168, doi:10.14943/lowtemsci.76.153, 2018. (査読なし)

杉山慎, 南極氷床 ―その変動と海洋との相互作用―, *低温科学*, 76, 169-178, doi:10.14943/lowtemsci.76.169 2018. (査読なし)

Shiramizu K., **Doi K.**, **Aoyama Y.**, Generation of a high-accuracy regional DEM based on ALOS/PRISM imagery of East Antarctica, *Polar Science*, 14, 30-38,doi:10.1016/j.polar.2017.10.002, 2017.

菅沼悠介,川又基人,白水薫,小山拓志,**土井浩一郎**,**金田平太郎**,**青山雄一**,早河秀章,小花和宏之, 南極における無人航空機(UAV)を用いた高解像度地形情報取得の試み, *地学雑誌*, 126 巻 1 号, 1-24, doi:10.5026/jgeography.126.1, 2017.

Kaneda H., Kono T., Discovery, controls, and hazards of widespread deep-seated gravitational slope deformation in the Etsumi Mountains, central Japan, *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 122, 2370-2391, doi:10.1002/20, 2017.

Okutsu N., Ashi J., Yamaguchi A., Irino T., Ikehara K., Kanamatsu T., **Suganuma Y.**, Murayama M., Evidence for surface remobilization by earthquakes in the Nankai forearc region from sedimentary records, *Geological Society of London Special Publication* "Subaqueous Mass Movements and Their Consequences: Assessing Geohazards, Environmental Implications, 477, 27, doi: 10.1144/SP477.22 , 2018.

Nakada M., **Okuno J.**, Irie Y., Inference of viscosity jump at 670 km depth and lower mantle viscosity structure from GIA observations, *Geophys. J. Int.*, 212, 2206–2225, doi:10.1093/gji/ggx519, 2018

金田平太郎, 柏原真太郎, 小村慶太朗, 山上湿地掘削のための可搬型バーカッションコアリングシステム, *月刊地球*, 号外 69, 112-120, 2018. (査読なし)

福田洋一, 衛星観測による南極氷床質量収支, *低温科学*, 76, 187-204, doi:10.14943/lowtemsci.76.187, 2018. (査読なし)

奥野淳一 , 南極氷床変動と氷河性地殻均衡, *低温科学*, 76, 205-226, doi: 10.14943/lowtemsci.76.205, 2018. (査読なし)

三浦英樹 , 最終氷期最盛期以降の南極氷床融氷史：地形地質学から見た現状と課題, *低温科学*, 76, 227-242, doi: 10.14943/lowtemsci.76.227, 2018. (査読なし)

Hanyu T., **Nogi Y.**, **Fujii M.**, Crustal formation and evolution processes in the Natal Valley and Mozambique Ridge, off South

Africa, *Polar Science*, 13, 66–81, doi:org/10.1016/j.polar.2017.06.002, 2017.

Aoki S., Kobayashi R., Rintoul S. R., **Tamura T.**, Kusahara K., Changes in water properties and flow regime on the continental shelf off the Adelie/George V Land coast, East Antarctica, after glacier tongue calving, *Journal of Geophysical Research*, 122(8), 6277-6294, doi:10.1002/2017JC012925, 2017.

Miyazaki J., Kawagucci S., Makabe A., Takahashi A., Kitada K., Torimoto J., Matsui Y., Tasumi E., Shibuya T., Nakamura K., Horai S., Sato S., Ishibashi J., Kanzai H., Nakagawa S., Hirai M., Takaki Y., **Okino K.**, Watanabe H., Kumagai H.,Chen C., Deepest and hottest hydrothermal activity in the Okinawa Trough: the Yokosuka site at Yaeyama Knoll, *Royal Society Open Science*, 4(12), doi:10.1098/rsos.171570, 2017.

巻俊宏, 水中ドローン ～ローコスト AUV は使い物になるか～, *オキシーテック ニュースレター「海」*, 33, 14-18,2017.

青山雄一,**土井浩一郎**,渋谷和雄, GGOS における南極昭和基地の測地観測の貢献, *測地学会誌*, 第 63 巻 3 号, 211-217,doi:10.11366/sokuchi.63.211, 2018.

Labrousse S., Williams G., **Tamura T.**, BestleyS., Sallee J-B., Fraser A., Sumner M., Roquet F., Heerah K., Picard B., Guinet C., Harcourt R., McMahon C., Hindell M., Charrassin J-B., Coastal polynyas: Winter oases for subadult southern elephant seals in East Antarctica. *Scientific Reports*, 8, 3183, doi:10.1038/s41598-018-21388-9, 2018.

青木茂, 南大洋における観測から見た海洋長期変動, *低温科学*, 76, 25-32, doi: 10.14943/lowtemsci.76.25, 2018. (査読なし)

巻 俊宏,**吉田 弘**, 自律型無人探査機(AUV)による未探査領域調査, *低温科学*, 76, 259-268, doi: 10.14943/lowtemsci. 76. 259. 2018. (査読なし)

藤井昌和,**野木義史**,音波探査で海底を見る：海底地形に記録された地球環境変動,*低温科学*,76,269–284, doi:10.14943/lowtemsci.76.269, 2018. (査読なし)

Gavin A S., Severinghaus J., **Abe-Ouchi A.**, Alley B. R., Broecker W., Brook Ed., Etheridge D., **Kawamura K.**., Keeling F. R., Leinen M., Marvel K., Stocker F. T., Overestimate of committed warming, *Nature*, 547, E16-E17, doi:10.1038/nature22803, 2017. (国際共著)

Seddik H., R. **Greve R.**, T. Zwinger T, **Sugiyama S.**, Regional modeling of the Shirase drainage basin, East Antarctica: full Stokes vs. shallow ice dynamics. *The Cryosphere*, 11, 2213-2229, doi:10.5194/tc-11-2213-2017, 2017. (国際共著)

Kageyama M., Albani S., Otto-Bliesner B. L, **Abe-Ouchi A.**, Bartlein P. J., Cao J., Lohmann G., Ohgaito R., Shi X., Volodin E., Yoshida K., Zhang X., Zheng W., The PMIP4 contribution to CMIP6 ? Part 4: Scientific objectives and experimental design of the PMIP4-CMIP6 Last Glacial Maximum experiments and PMIP4 sensitivity experiments, *Geoscientific Model Development Discussions*, CMIP6 Part 4, 1～33, doi: 10.5194/gmd-2017-18, 2017. (査読あり)(オープンアクセス)(国際共著)

Sherriff-Tadano S., **Abe-Ouchi A.**, **Yoshimori M.**, **Oka A.**, Chan W., Influence of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation through surface wind change, *Climate Dynamics*, 50, 2881～2903, doi: 10.1007/s00382-017-3780-0, 2017. (査読あり)(オープンアクセス)

Obase T., **Abe-Ouchi A.**, **Kusahara K.**, Hasumi H., Ohgaito R., Responses of Basal Melting of Antarctic Ice Shelves to the Climatic Forcing of the Last Glacial Maximum and CO2 Doubling, *Journal of Climate.*, 30, 3473～3497, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0908.1, 2017. (査読あり)(オープンアクセス)

Yoshimori M., **Abe-Ouchi A.**, Laine A., The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium, *Climate Dynamics*, 49, 3457～3472, doi: 10.1007/s00382-017-3523-2, 2017. (査読あり)(オープンアクセス)

Kageyama M., Braconnot P., Harrison S. P., Haywood A. M., Jungclaus J. H., Otto-Bliesner B. L., Peterschmitt J. Y., **Abe-Ouchi A.**, Albani S., Bartlein P. J., Brierley C., Crucifix M., Dolan A., Fernandez-Donado L., Fischer H., Hopcroft P. O., Ivanovic R. F., Lambert F., Lunt D. J., Mahowald N. M., Peltier W. R., Phipps S. J., Roche D. M., Schmidt G. A., Tarasov L., Valdes P. J., Zhang A., Zhou T. J., The PMIP4 contribution to CMIP6-Part 1: Overview and over-arching analysis plan, *Geosci. Model Dev.*, 11, 1033-1057, doi:10.5194/gmd-11-1033-2018, 2018. (査読有り,オープンアクセス,国際共著)

Kodama T., Nitta A., Genda H., Takao T., O'Ishi R., **Abe-Ouchi A.**, Abe Y., Dependence of the Onset of the Runaway Greenhouse Effect on the Latitudinal Surface Water Distribution of Earth-Like Planets, *J. Geophys. Res.-Planets*, doi:10.1002/2017je005383, 2018. (査読あり)

Yoshimori, M., **Abe-Ouchi A.**, Tatebe H., Nozawa T., **Oka A.**, The Importance of Ocean Dynamical Feedback for Understanding the Impact of Mid-High-Latitude Warming on Tropical Precipitation Change. *J. Clim.*, doi:10.1175/jcli-d-17-0402.1, 2018. (査読あり)

Kondo Y., Sano K., Omori T., **Abe-Ouchi A.**, Chan W.-L., Kadowaki S., Naganuma M., O'ishi R., Oguchi T., Nishiaki Y., Yoneda M., Ecological Niche and Least-Cost Path Analyses to Estimate Optimal Migration Routes of Initial Upper Palaeolithic Populations to Eurasia, *The Middle and Upper Paleolithic Archaeology of the Levant and Beyond*, doi:10.1007/978-981-10-6826-3_13, 2018. (査読あり

草原和弥, 棚氷と海洋の相互作用とそのモデリング, *低温科学*, 76, 33-42, doi: 10.14943/lowtemsci.76.33, 2018. (査読なし)

岡顕, 海洋炭素循環モデルの考え方と基礎, *低温科学*, 76, 43-56 doi: 10.14943/lowtemsci.76.43, 2018. (査読なし)

齋藤冬樹, **グレーベラルフ**, 氷床モデリングの基礎, *低温科学*, 76, 179-186, doi: 10.14943/lowtemsci.76.179, 2018. (査読なし)

小長谷貴志, A climate modeling study on the mechanism of Antarctic ice sheet changes in the past and future, 学位論文, 2018. (査読あり)

－図書－

[著者名, 出版社, 書名, 発行年, 総ページ数]

2021 年度

奥野淳一（分担執筆）, 朝倉書店, 『世界気候の事典』 第四紀における海水準変動, 2022 年.

茂木正人, **嶋田啓資**, デジタル教材「GO TO 南極海！ ようこそ「ゆったりのんびり 海鷹丸で行く南極海クルーズ」へ」 https://earth.google.com/earth/d/1Pllgwseqrh3vTvydKK-s5qzaVDi1hadq?usp=sharing

澤柿教伸, 株式会社ナカニシヤ出版, 「図説 世界の地域問題 100」 27 氷河流域別にみるパタゴニア氷原の盛衰, 224, 2021.12.27.

澤柿教伸, 株式会社ナカニシヤ出版, 「図説 世界の地域問題 100」 40　収支で見るグリーンランド氷床の氷量（澤柿教伸）, 224, 2021.12.27.

梅澤有, 郭新宇, **塩崎拓平**, 杉本亮, 海洋生態系, 朝倉書店, 図説 「窒素と環境の科学」(林健太郎, 柴田英昭, 梅澤有編著), 2021.12.

塩崎拓平, 朝倉書店, 海洋窒素循環への分子生物学的手法の導入, 図説 「窒素と環境の科学」(林健太郎, 柴田英昭, 梅澤有編著), 2021.12.

杉山慎, 中央公論新社, 南極の氷に何が起きているか -気候変動と氷床の科学, ISBN978-4-12-102672-9,　2021 年 11 月

宮原育子, 劉泱, **澤柿教伸**, 渡辺悌二, ブイツーソリューション, 変わりゆくパミールの自然と暮らし―持続可能な山岳社会に向けてー 「第 15 章 パミールを旅する外国人観光客の動向」, p293-312, ISBN 978-4-434-27278-3, 2021

澤柿教伸, 岩波書店, 科学 2021 年 2 月号, 地球を俯瞰する自然地理学 現地住民との連携で進めるグリーンランド氷床融解の研究（寄稿）

2020 年度

高薮 縁, **阿部 彩子**, 日本評論社, 女性科学者に明るい未来をの会（編）「私の科学者ライフ　猿橋賞受賞者からのメッセージ」, 2021

金田平太郎,　1:25,000 活断層図　長良川上流断層帯とその周辺「八幡」解説書, 国土地理院技術資料 D1-No.1025,　9p, 2020.

秋澤 紀克, **沖野 郷子**, 石塚 治, 山下 浩之, **藤井 昌和**, 小原泰彦（共著）, マントル出版, 9.マドメガムリオンに分布する岩石の岩石学的・地球物理学的解釈、新地球 Volume 1 マントル特集号, ISBN:978-4-908703-84-3, 2020 年 6 月 10 日.

池上隆仁 白鳳丸南極航海記 2020.海生研ニュース, 146, 11
https://www.kaiseiken.or.jp/publish/news/lib/news146.pdf

池上隆仁 珪藻①.海洋生態系の根幹を支える海の森林.海の豆知識, 83
https://www.kaiseiken.or.jp/umimame/lib/umimame_83.pdf

池上隆仁 珪藻②.海洋表層循環の指標.海の豆知識, 84
https://www.kaiseiken.or.jp/umimame/lib/umimame_84.pdf

池上隆仁 有孔虫①.古海洋学の花形.海の豆知識, 85
https://www.kaiseiken.or.jp/umimame/lib/umimame_85.pdf

池上隆仁 有孔虫②.気候変動のシグナルを記録, 86
https://www.kaiseiken.or.jp/umimame/lib/umimame_86.pdf

池上隆仁 フェオダリアが西部北太平洋の海洋炭素循環に果たす役割の定量評価.海生研ニュース, 146, 7-8
https://www.kaiseiken.or.jp/publish/news/lib/news146.pdf

2019 年度

菅沼悠介, 講談社ブルーバックス, 地磁気逆転と「チバニアン」, 2020.

渋谷和雄, **福田洋一**,　京都大学学術出版,　南極地球物理学ノート　南極から探る地球の変動現象, 320p,　2020.

本山秀明、川村賢二（執筆分担）, 成山堂書店, 南極読本-改訂増補, 南極 OB 会編集委員会編, 270, 2019.

中村和樹（分担執筆）, NTS, リモートセンシングの応用・解析技術, 260－269, 2019.

金田平太郎,　国土地理院技術資料, 1:25,000 活断層図 牛首断層帯及び跡津川断層帯とその周辺 「立山」解説書,　D1-No.927,　8p＋付図,　2019.

阿部彩子　「気候変動力学の創成 地球史の気候・生態系変動メカニズム解明に向けて」, 東京大学大気海洋研究所広報誌 Ocean Breeze 2019 第 30 号,　2019.

2018 年度

吉森 正和 ブリタニカ・ジャパン株式会社, ブリタニカ国際大百科事典 大項目辞典「地球温暖化」, 2019

吉森 正和 日本極地研究振興会, 北極域の温暖化とそのしくみ, 極地 107 号, 特集：北極・南極から迫る地球温暖化. 54(2), 8-11, 2018

吉森 正和 日本極地研究振興会, 地球温暖化の将来予測 - 未来の気候はどのように予測するのでしょうか？ -,「南極・北極から学ぶ地球環境変動」, 5-6. 11 月発行, 2018

堀内一穂,　丸善出版,古環境・古気候研究：（日本加速器学会編）加速器ハンドブック,　2018, 459–460.

奥野淳一（分担執筆）, 朝倉書店, 図説地球科学の事典（後氷期地殻変動), 248, 2018.

岡田篤正, **金田平太郎**, 杉戸信彦, 中田　高, 国土地理院技術資料,　1:25,000 活断層図　濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」解説書, D1-No.912, 2018.

金田平太郎, 杉戸信彦, 田力正好 ,中田　高（2018）, 国土地理院, 1:25,000 活断層図「大野」, 2018.

金田平太郎, 石村大輔, 田力正好, 中田　高（2018）, 国土地理院, 1:25,000 活断層図「冠山」, 2018

金田平太郎, 石村大輔, 熊原康博 ,中田　高（2018）, 国土地理院, 1:25,000 活断層図「能郷白山」, 2018

荒木健太郎、**猪上淳**、佐々木恭子、鈴木和史、鈴木靖、田中好雄、土井威志、筆保弘徳、松本直記、道本光一郎、茂木耕作、山田広幸、吉永順一, ジャムハウス, 世界気象カレンダー2019 年版, 28, 2018.

須藤齋, 講談社ブルーバックス,「海と陸をつなぐ進化論」, 2018 年 12 月 19 日出版.

2017 年度

大島慶一郎　他, 北海道大学低温科学研究所, 低温科学76巻, 2018, 288.

三浦英樹, 南極半島の生いたちを語る地形・地質と火山活動, 極地, 53(2), 4-13, 2017.

－一般向け講演・セミナー講演等(サイエンスカフェ等も含む)－

2021 年度

青木茂, 札幌開成 SSH コズプロ成果報告会　全体講演会「南極の世界と科学」中高生 2022 年 3 月 18 日

近藤研, **杉山慎**, 「ラングホブデ氷河での熱水掘削―氷河の底に何が見えたか―」, しらせ大学夜学講演, 第 62・63 次南極観測隊員・しらせ乗員約 80 名, 2022 年 3 月 17 日

佐野正美, 「南極の海に降る雪　～マリンスノーとプランクトンの話～」, 極地研サイエンスカフェ, 立川市高松学習館, 2022 年 3 月 5 日.

松井浩紀,「浮遊性有孔虫と古海洋」、千葉大学テニュアトラック部会支援セミナー、2022 年 2 月 15 日.

庭野匡思, 勝山祐太,「雪氷圏における気候変動と気象防災」, 気象雪氷サイエンスカフェつくば,（公社）日本雪氷学会（関東・中部・西日本支部）/（公社）日本気象学会（教育と普及委員会）/（一社）日本気象予報士会, 2022 年 2 月 13 日. http://meteocafe.blogspot.com/2022/01/213_22.html

中村和樹,「鳥獣との共生のための情報基盤構築」, 第 2 回鳥獣被害対策シンポジウム, オンライン, 2022 年 2 月.

新谷昌人, 絶対重力計説明・実演, 南極授業（日出学園・武善紀之）, 南極昭和基地, 2022 年 2 月 2 日

新谷昌人, 絶対重力計説明・実演, 南極授業（日出学園・武善紀之）, 南極昭和基地, 2022 年 1 月 29 日

青木茂,朝日新聞 DIGITAL 記者サロン 南極から地球が見える第 7 回「南極の氷は減っている?」 2022 年 1 月 28 日

野木義史、交詢社同好会地球環境研究会「南極から探る地球環境」 2022 年 1 月 13 日

沖野郷子 千葉県立柏高校 夢サイエンス講座 2022 年 1 月 11 日

金田平太郎,「南極の地形を調査する」, 文京区子ども科学カレッジ, 2022 年 1 月

大藪幾美,「アイスコアから読み解く過去の気候変動」, IPCC レポートを根掘り葉掘り読む会,神戸大学サイエンスショップ, 2021 年 12 月 25 日

杉山慎,「南極氷床 ―地球最大の氷に何が起きているのか―」, しらせ大学講演, 第 63 次南極観測隊員・しらせ乗員約 80 名, 2021 年 11 月 20 日

大藪幾美,「氷床に刻まれた地球の歴史～アイスコアの分析からわかる過去の気候変動～」, 日本分析化学会北海道支部 2021 年度公開セミナー兼日本化学会北海道支部 2021 年度旭川地区化学講演会, オンライン, 2021 年 11 月 12 日

池原実,「海から探る気候変動のからくり」、令和 3 年度高知大学出前公開講座 in 大豊町、2021 年 11 月 9 日.

青木茂、「南極の海と氷を探る」 北大祭公開講義, オンライン Zoom ＋Youtube Live＋配信 2021 年 11 月 7 日

杉山慎,「南極氷床 ―地球最大の氷のかたまり―」, 北海道大学大学祭全学実行委員会 北大祭公開講座, オンライン, 2021 年 11 月 6 日

庭野匡思, 講演 1「降雪と積雪」, サイエンスアゴラ No.06-C17 「温暖化時代の雪と私達の暮らし～雪氷研究の最前線から～」, 2021 年 11 月 6 日.

杉山慎,「氷河氷床 －地球を覆う氷に何が起きているのか？－」, 中央大学, 環境社会・国際環境保全セミナー, オンライン, 2021 年 11 月 3 日

池原実,「―地球と対話するー南極絵巻と土佐清水の大地」、トークセッション、海のギャラリーテラス、2021 年 10 月 30 日.

平野大輔,「南極氷床を融かす海」, 大学共同利用機関シンポジウム 2021, 2021 年 10 月 24 日

関宰, サイエンスカフェ「コキコウ学者の事件簿」、北海道大学 CoSTEP, オンライン, 2021 年 10 月 8 日

Minoru Ikehara, Scientific Ocean Drilling and Southern Ocean Paleoceanography, International Webinar Series with the general theme "Paleoceanography and Global Climate Change" Faculty of Geological Engineering, UNIVERSITAS PADJADJARAN – INDONESIA, 2nd October, 2021. (Invited Keynote Speaker)

菅沼悠介,「南極観測からひもとく地球気候変動の歴史と未来」, クボタやさしい科学の教室, 2021 年 10 月

沖野郷子 GRAPE 夏の学校 2021「海で磁場を測る Why and How」 2021 年 9 月 12 日

茂木正人,「南極をしろう」, 中央区環境情報センター企画, 2021 年 9 月 11 日.

Wakita M., Kimoto K., **Nakano Y.**, **Sasaki K.**, Kaneko H., Tatamisashi S., Abe H., The ocean acidification monitoring in the Tsugaru Strait: Time-series observation by ship, bucket and pH sensor. 1st KAUST - JAMSTEC workshop on the Red Sea initiative, Session 3D, Aug 25, 2021.

茂木正人,「わくわく南極教室」, 台東区青少年育成清川地区委員会, 2021 年 8 月 21 日, 9 月 18 日.

藤田秀二「アイスコア研究を紹介します」, 国立極地研究所・一般公開「極地研探険 2021」,オンライン Web 展示, 2021 年 8 月 21 日 http://polaris.nipr.ac.jp/~icrc/NC/htdocs/?page_id=70

奥野淳一,「～めざせ!極地の研究者～」、協働企画公開講座 極域科学シリーズ、立川市教育委員会・たちかわ市民交流大学連携企画:極地研サイエンスカフェ, 2021 年 8 月 8 日.

津滝俊,「雪尺観測でみる南極氷床の表面質量収支」, 弘前大学学術講演会, 2021 年 8 月 5 日

巻俊宏,「海に光を、ロボットに冒険を！」, 日本建設業連合会 海洋開発委員会, 東京, 2021 年 7 月 28 日

茂木正人, 横須賀市市民大学前期講座, 2021 年 7 月 25 日.

香月興太,「南極の湖沼堆積物研究」金沢大学環日本海環境研究センター, 環日セミナー, 2021 年 7 月 20 日.

菅沼悠介,「南極氷床融解と気候変動」, 松川町みらい塾, 2021 年 7 月.

澤柿教伸,「気候変動と氷河」, 自然地理学オンラインセミナー「自然地理学の魅力」第 16 回, 2021 年 6 月 12 日

大島慶一郎,「地球温暖化って本当？どんなことが起こるのか？「備える. ウィズコロナの時代をどう生きるか」」北海道大学公開講座, Zoom オンライン開催, 2021 年 6 月 10 日.

菅沼悠介, 南極氷床融解と海面上昇, 朝日カルチャーセンター, 2021 年 4 月

「南極海の生態系」, 創価大大学院「特別講義」4 時限分

2020 年度

松井浩紀 日本地質学会東北支部総会代替企画「プレコロナ時代のフィールドワークなどを振り返る」,「南極海・調査航海」日本地質学会 YouTube チャンネル, 2021 年 3 月 31 日

野木義史, 生産技術研究奨励会特別研究会 RC91 海を拓く現場計測研究会 令和 2 年度第 3 回研究会 「南極域の分野横断観測とその展望」, オンライン, 生産技術研究奨励会, 2021 年 2 月 19 日.

杉山慎, 出前授業「雪について調べてみよう」, 札幌市立大倉山小学校 小学 4 年生約 60 名, 2021 年 2 月 12 日.

沖野郷子, 千葉県立柏高等学校, 出前授業(オンライン), 2021 年 2 月 10 日, 19 日

青木茂,「氷のしらせ、地球の未来 ～科学者とアーティストが見た自然～ 」, 第 115 回サイエンス・カフェ札幌 | オンライン, 北海道大学 CoSTEP, Online, 2020 年 12 月 19 日

青木茂,第 14 期ナカシベツ大学「南極は今」 約 20 名, 中標津町総合文化会館・北海道生涯学習協会, 中標津町総合文化会館コミュニティホール, 2020 年 12 月 17 日

杉山慎, 講演会「南極氷床　―地球でいちばん大きな氷のかたまり―」, 愛知淑徳大学創造表現学会 SNS 講演会, 大学生・社会人約 60 名, 2020 年 12 月 12 日.

野木義史, 水中ロボットコンベンション in JAMSTEC 2020 -海と日本プロジェクト- 「無人探査技術が切り拓く極域科学の新たな展開」, 国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）横須賀本部（オンライン開催）, 中日本水中ロボネット, 2020 年 12 月 5 日
http://uwr.sakura.ne.jp/jam20/水中ロボットセミナー/

杉山慎, 講演会「氷河」, 北極域課題解決人材育成講座 北極域科学概論, 大学生・社会人約 60 名, 2020 年 11 月 25 日.

池原実　高知小津高等学校 SSH サイエンスフィールドワーク, 「白鳳丸研究航海見聞録：白鳳丸世界一周航海 HEAW30 と南大洋・南極の研究～海のフィールドワーク～」, 2020 年 11 月 12 日

山縣広和, 水中ロボット教育, 水域ロボットシンポジウム, 沖縄, 2020 年 11 月 6 日

菅沼悠介, 「地磁気逆転とチバニアン」, 南極北極ジュニアフォーラム, 2020 年 10 月

菅沼悠介, 「極限フィールドワークから紐解く南極氷床変動メカニズム」, 地球化学会サマースクール, 2020 年 9 月

菅沼悠介, 「地磁気逆転とチバニアン」, 桜陰学園, 2020 年 9 月

藤井昌和, 「海と地球の科学が向き合う 21 世紀,」 茨城県立土浦第一高等学校, 2020 年 6 月 26 日

2019 年度

阿部彩子　「気候－海洋－氷床に関する特別展 ～過去・現在・未来を探る～」
・開催場所：東京大学 柏キャンパス 柏図書館 1 階 展示スペース
・期間：2019 年 10 月 25 日（金）～ 2020 年 3 月

杉山慎, 出前授業「雪について調べてみよう」, 札幌市立大倉山小学校 小学 4 年生約 60 名, 2020 年 2 月 14 日.

東久美子, 「3 キロメートルのタイムマシーンで過去の地球環境を探る～南極と北極の氷から見た過去の地球環境変動～」, 情報・システム研究機構シンポジウム 2019, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 2020 年 2 月 7 日.

福田洋一, 「南極での重力測定」, 2020 年京都大学地球物理学教室同窓会“京大知球会” 講演会, 2020 年 2 月.

佐野雅美, 「プランクトン・海を支える小さな生き物達の話」, 中学生高校生シンポジウム「海を探る、海を調べる。キャリアと研究　III」, 国立科学博物館, 2020 年 2 月 1 日.

杉山慎, 立命館慶祥 SSH 国際交流研究室訪問, 立命館慶祥高校・北海道大学低温科学研究所主催, 北海道大学 高校生・教員・タイ留学生 26 名, 2020 年 1 月 17 日.

菅沼悠介, 「南極研究の最前線」, 早稲田大学エクステンション講座, 2020 年 1 月.

本山秀明, 「南極と北極の両極での観測」, 日本機械学会イブニングセミナー, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, 2019 年 12 月 18 日.

沖野郷子, 千葉県立柏高等学校, 出前授業, 2019 年 11 月 20 日, 27 日

巻俊宏, 東京都台東区立浅草小学校, 出前授業, 2019 年 11 月 19 日.

津滝俊, 「南極観測からみた地球の気候変動」, 長野県諏訪清陵高等学校 SSH 講座, 2019 年 11 月 14 日.

奥野淳一, 「海面変化と固体地球の関係」, 東京大学宇宙線研究所技術職員研修会, 2019 年 11 月 1 日.

本山秀明, 「アイスコア研究と地球規模気候変動について」, たちかわ市民交流大学, 立川女性総合センター・アイム, 2019 年 10 月 23 日.

巻俊宏, 「ロボ×海洋探査中！」, Robo la Night, 東京, 69 人, 2019 年 10 月 17 日.

青木茂,**杉山慎**,斎藤健, SSH 国際科学交流研究室訪問「寒冷圏のしくみ」, 立命館慶祥高等学校・北海道大学低温科学研究所, 北海道大学低温科学研究所, 高校生 33 名（タイ人生徒 12 名・タイ人教員 5 名・日本人生徒 15 名・日本人教員 1 名）, 2019 年 10 月 11 日.

杉山慎, 「南極氷床　－地球最大の氷のかたまり－」　えるのす連続講座～女性大学～, 公益財団法人北海道女性協会主催, 札幌かでる 2・7, 一般市民約 200 名, 2019 年 10 月 1 日.

津滝俊, 「南極氷床ってどんなところ？～青と白の世界～」, 第 43 回ミーツ・ザ・サイエンス「南極の今！～つくばに戻った隊員たち語る～」, 公益財団法人つくば科学万博記念財団つくばエキスポセンター, 2019 年 9 月 30 日.

杉山慎, 札幌藻岩高等学校　環境教育講座　研究室訪問, 札幌藻岩高等学校・北海道大学低温科学研究所主催, 北海道大学高校生 10 名, 2019 年 9 月 13 日.

茂木正人, 「南極海の生態系　～海氷・魚・海鳥の関係～」秋田海教育フォーラム　秋田, 2019 年 9 月 7 日.

巻俊宏, 「海中ロボット」, 秋田海洋教育フォーラム, 秋田 , 2019 年 9 月 7 日.

茂木正人, 出張講義「南極海の生態系」, 創価大学, 2019 年 9 月 5 日.

Kurosawa N., Living in Cold and Hot: Bioresources from the Extreme Environments. Guest Lecture Day, Graduate School of Biotechnology, Atma Jaya Catholic University of Indonesia(BSD City (Indonesia)), Sep. 2019.

阿部彩子　2019 年東京大学大気海洋研究所 大気海洋科学スプリング・インターンシップ
・開催場所：東京大学 柏キャンパス 総合研究棟 320 号室
・期間：　2019 年 8 月 26 日（月）～2019 年 8 月 27 日（火）
・テーマ：地球システムのシミュレーション入門～長期的気候と氷床の過去や将来
・参加者人数： 5 名

津滝俊, 「南極氷床の内陸～青と白の世界～」, 国立極地研究所一般公開サイエンスカフェ, 国立極地研究所, 2019 年 8 月 3 日.

阿部彩子　「気候－海洋－氷床に関する特別展 ～過去・現在・未来を探る～」
・開催場所：東京大学 大学院総合文化研究科・教養学部 駒場博物館
・実施日時：令和元年 7 月 20 日（土）～9 月 29 日（日）10:00～18:00
・参加者人数：約 2,000 名

巻俊宏, 横浜市立南高等学校附属中学校, 出前授業, 2019 年 7 月 22 日.

巻俊宏, 東京都立新宿山吹高等学校, 出前授業, 2019 年 6 月 28 日.

大橋良彦, 「南極海での海洋化学トレーサー観測の紹介」, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会 GRAntarctic「南極の海と氷床」ブース内セミナー, 幕張メッセ, 2019 年 5 月 30 日.

杉山慎, 「南極氷床　－地球最大の氷のかたまり－」, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会ショートセミナー, 日本地球惑星科学連合・新学術プロジェクト主催, 高校生・研究者約 30 名, 幕張, 2019 年 5 月 27 日.

川村賢二, 「DF3 紹介」, 弘前大学 3 年生演習, 弘前大学理工学, 2019 年 5 月 7 日.

川村賢二, 「全球環境変動を駆動する南極氷床と南大洋」, 弘前大学学術講演会, 弘前大学理工学, 2019 年 5 月 7 日.

大藪幾美, 「アイスコア研究の話」, 弘前大学 3 年生演習, 弘前大学理工学, 2019 年 5 月 7 日.

大藪幾美, 「南極の氷に保存された昔の空気」, 弘前大学学術講演会, 弘前大学理工学, 2019 年 5 月 7 日.

菅沼悠介, 「地球温暖化で南極氷床は融けるのか？」, 市川学園, 2019 年 5 月.

黒沢則夫, 「南極探検」. 八王子学園都市大, 2019 年 4 月.

2018 年度

岡顕　2019 年東京大学大気海洋研究所 大気海洋科学スプリング・インターンシップ
・開催場所：東京大学 柏キャンパス 総合研究棟 211 号室
・期間：　2019 年 3 月 26 日（火）～2019 年 3 月 27 日（水）
・テーマ：気候変動と海 ~気候モデル研究入門~
・参加者人数：2 名

阿部彩子　2019 年東京大学大気海洋研究所 大気海洋科学スプリング・インターンシップ
・開催場所：東京大学 柏キャンパス 総合研究棟 320 号室
・期間：① 2018 年 4 月 2 日（月）～2018 年 4 月 3 日（火）
② 2019 年 3 月 18 日（月）～2019 年 3 月 20 日（水）
・テーマ：地球システムのシミュレーション入門～長期的気候と氷床の過去や将来
・参加者人数：①5 名 ②6 名

地質標本館特別展, “GSJ のピカイチ研究”「AI（人工知能）を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確率ー高速自動化した革新的な地層解析に道筋ー」, 2019 年 2 月 19 日～4 月 14 日

茂木正人, 出張講義「南極海で魚はなぜ凍らない」、2019 年 3 月 19 日、富山県立氷見高校

板木拓也, 「AI（人工知能）を用いた微化石研究の動向と新たなチャレンジ」, 石油資源開発株式会社技術研究所, 基盤技術室講演会, 2019 年 3 月 14 日（招待講演）

本山秀明, 「南極アイスコア研究による地球規模気候変動の解明」、神戸銀行協会「神戸金曜会」、神戸銀行協会会議室、2019 年 3 月 8 日

川合美千代, 東京都北区職業キャラバン「化学で海を調べる～東京湾から極域まで～」（1年生徒40名対象）, 北区立稲付中学校, 2019年3月8日.

阿部彩子「氷床と海水準と気候の過去、現在、未来 を考える」東京大学 EMP シニアプログラムオフィサー2019 年 2 月 23 日

大藪幾美, 「地球環境のタイムカプセル」, 国立極地研究所南極・北極科学館主催サイエンスカフェ, 立川ワシントンホテル, 一般市民約 30 名, 2019 年 2 月 15 日

野木義史, 「極地から地球を見る,」 神鋼東京本社 2 月度二水会例会, 2019 年 2 月 13 日

杉山慎, 出前授業「雪について調べてみよう」, 札幌市立大倉山小学校 小学 4 年生約 80 名, 2019 年 2 月 12 日.

杉山慎, 立命館慶祥 SSH 国際交流研究室訪問, 立命館慶祥高校・北海道大学低温科学研究所主催, 北海道大学 高校生約 30 名, 2019 年 2 月 5 日.

Masato Moteki, サイエンスカフェ「Overview of the Umitaka-maru voyage in the Southern Ocean」、2019 年 1 月 31 日、Hobart Brewing Co.

Aiko Tachibana, サイエンスカフェ「Application of the environmental DNA for the Southern Ocean ecosystem research」、2019 年 1 月 31 日、Hobart Brewing Co.

Ryosuke Makabe, サイエンスカフェ「Time series observation by using moorings and drifters」、2019 年 1 月 31 日、Hobart Brewing Co.

菅沼悠介, 南極研究の最前線「早稲田大学エクステンション講座」, 2019 年 1 月

三浦英樹, 「めざせ！極地の研究者」, 国立極地研究所, 2018 年 12 月 27 日

土井浩一郎, 「氷床の増減や海面上昇下降を測定する方法について」, 協働企画公開講座 極域科学シリーズ第 14 回, 立川市女性総合センター, 2018 年 12 月 12 日

黒沢則夫, アドバンストサイエンスセミナー「生物の研究におけるフィールドワーク」、2018 年 12 月 10 日、関西創価高校

本山秀明, 「南極観測と氷床コア深層掘削」、リオン株式会社 Shake Hands 主催社内講演会、リオン株式会社、2018 年 11 月 30 日

奥野淳一, **石輪健樹**, **大藪幾美**, 湘南学園高校訪問研修, 国立極地研究所, 2018 年 11 月 20 日

沖野郷子, 柏県立高校「夢サイエンス講座」”海底の火山や断層帯を旅する：宇宙から, 船から, 潜水船から”(高 1 対象, 2 日間 4 コマ, 計 170 人), 千葉県立柏高校（千葉）, 2018 年 11 月 5-6 日

青山雄一, 「南極の自然と科学観測について」, 子供おもしろ科学教室, 新潟県見附市今町中学校, 2018 年 11 月 5 日

茂木正人, 雲鷹丸シンポジウム「海鷹丸による南極海の生態系研究ーハダカイワシの保育園発見か!?ー」、2018 年 11 月 2 日、東京海洋大学

真壁竜介, ライフサイエンスセミナー「南大洋季節海氷域の生態系」, 2018 年 11 月 2 日, 石巻専修大学, https://www.senshu-u.ac.jp/ishinomaki/event/20181102-00000563.html

佐藤暢, ライフサイエンスセミナー「南大洋の形成と環境変動」, 2018 年 11 月 2 日, 石巻専修大学, https://www.senshu-u.ac.jp/ishinomaki/event/20181102-00000563.html

菅沼悠介, 「地球温暖化で南極の氷は融けるのか？：極限フィールドワークから探る南極氷床の安定性」NHK ラジオ講座, 2018 年 11 月

川村賢二, 南極教室, 北見市立若松小学校, 小学生 27 名, 2018 年 10 月 31 日.

中村和樹, 「AI 入門」, 福島県製造技術高度化研究会セミナー, 福島県ハイテクプラザ, 2018 年 10 月 24 日

川村賢二, 南極ドームふじ氷床コアが語る過去の地球環境―そして「最古の氷」探索へ, 大学共同利用機関シンポジウム, 名古屋市科学館, 約 100 名, 2018 年 10 月 14 日.

黒沢則夫, 大学院特別講義「南極細菌の低温適応戦略と南極大陸湖沼調査」、2018 年 10 月 12 日、東京大学大気海洋研究所

本山秀明「極地が仕事-気候変動と地球温暖化」、春日部高校 SSH 特別講演会、越谷市コミュニティセンター、2018 年 9 月 19 日

巻俊宏,「海中ロボットの最新動向」, 第 33 回技術連講演会, 茨城, 2018 年 9 月 5 日

川村賢二, 東北大学大学院理学研究科附属大気海洋変動観測研究センター, 大学学部生/大学院生, 2018 年 9 月.

小室芳樹, 「コンピュータが予測する北極の将来」. 第 15 回「地球環境シリーズ」講演会 北極の海氷減少がもたらすもの, ヤクルトホール（東京） 2018 年 8 月 29 日.

杉山慎 KDDI/北海道大学サイエンススクール 中学生向け：27 名 「～五感で感じる南極体験～」, 北海道大学低温科学研究所, 2018 年 8 月 17 日

青木茂, KDDI/北海道大学サイエンススクール 中学生向け：27 名, 「北海道大学低温科学研究所」, 2018 年 8 月 17 日

藤井昌和,「分裂する超大陸と拡大する海洋底」, 極地研一般公開 サイエンスカフェ, 2018 年 8 月 4 日

巻俊宏, 出前授業
2018 年 8 月 1 日@横浜市立南高等学校附属中学校（神奈川県横浜市）
2018 年 7 月 26 日@武南中学校（埼玉県蕨市）
2018 年 7 月 23 日@松尾学童クラブ（千葉県山武市）

巻俊宏, 山縣広和
2018 年 8 月 26-27 日 水中ロボットコンテスト JAMSTEC
2018 年 6 月 8-9 日 MONACA ポスター展示 東大生研

青山雄一,「南極で重力をはかりました ～ それで何がわかるの？」, 極地研究所サイエンスカフェ, 2018 年 7 月 20 日

山本正伸, 「歴史と気候変動」, 北海道大学, 北大道新アカデミー「地球環境の今 陸, 海, 空から」, 2018 年 6 月 28 日

巻俊宏,「AUV の最新事情」, 海洋開発利用システム実現学寄付講座 第 51 回セミナー, 2018 年 6 月 27 日

山本正伸, 「変わりゆく気候 太陽と火山の役割」, 北海道大学, 北大道新アカデミー「地球環境の今 陸, 海, 空から」, 2018 年 6 月 14 日

金田平太郎,「第四紀気候変動解明のための南極氷河地形調査」, 千葉芸術文化村（千葉市文化振興財団）, 千葉市文化センター, 2018 年 6 月 13 日.

北海道大学・低温科学研究所・一般公開「低温の不思議な世界を探検しよう！」2018 年 6 月 2 日 10:00-16:00
南極（―５０℃の世界）を体験しよう
南極・北極・世界の氷河・氷床を学ぼう

茂木正人, 特別講義「南極海の生態系と食物連鎖～海氷と生態系～」、2018 年 5 月 24 日、京都学園大学

川村賢二, 弘前大学 基礎ゼミナール, 弘前大学文京町キャンパス, 地球環境防災学科 1 年生, 2018 年 5 月 21 日.

藤井昌和,「分裂する超大陸と拡大する海洋底」, 朝日カルチャーセンター 湘南教室, 2018 年 5 月 13 日

川村賢二, 弘前大学 地球環境防災総合演習, 弘前大学文京町キャンパス, 地球環境防災学科 3 年生, 2018 年 5 月 8 日.

2017 年度

青木茂,「南極ダイナミクス」, 札幌月寒高校 特別講義,320 名, 2018 年 3 月 19 日

本山秀明,「極域のアイスコアから明らかになってきた過去の気候・環境変動」,気候変動シンポジウム ～ 激変する地球と災害リスク～, 日本地質学会関東支部・横浜国立大学都市科学部, 横浜国立大学教育文化ホール, 2018 年 3 月 17 日.

藤田秀二,「南極の雪と氷からわかる地球環境の歴史」, 新学術領域研究「南極の海と氷床」スプリングスクール, 国立極地研究所, 2018 年 3 月 12 日.

高尾信太郎,「宇宙（そら）と海から探る南極海」、国立極地研究所, サイエンスカフェ, 2018 年 2 月 23 日.

池原実, **三浦英樹**、**奥野淳一**、「“縄文海進”期における黒潮の水温と流路」, 日本第四紀学会シンポジウム「改めて問う “縄文海進”とは何か？－第四紀学的視点からの再検討－」, （新学術領域研究『南極の海と氷床』後援）, 明治大学, 2018 年 2 月 17 日.

奥野淳一, 「縄文時代以降の海面変化を引き起こす様々な要因ーハイドロアイソスタシーの役割ー,」 日本第四紀学会シンポジウム「改めて問う “縄文海進”とは何か？－第四紀学的視点からの再検討－」, （新学術領域研究『南極の海と氷床』後援）, 明治大学, 2018 年 2 月 17 日.

池原実, 科学実習「黒潮と南極～世界の海から気候変動を探る」, 高知大学海洋コア総合研究センター, 高知大学・高知市共催公開講座 2018 年 2 月 4 日.

藤井昌和、「地球の不思議：分裂する超大陸と拡大する海底」, 国立極地研究所 一般公開 サイエンスカフェ, 2018 年 1 月 12 日.

青山雄一,「重力で見る地球環境変動」, しらせ船上, しらせ大学, 2017 年 12 月 17 日.

黒沢則夫, アドバンストサイエンスセミナー「生物の研究におけるフィールドワーク」、2017 年 12 月 11 日、関西創価高校

中村和樹 「機械学習を用いた南極域における氷山検出の可能性」, 第 60 回日本大学工学部学術研究報告会, 福島県郡山市, 2017 年 12 月.

中村和樹 「ALOS-2 を用いた白瀬氷河と定着氷の変動観測」, 地表変動メカニズムの解明に向けた新世代 SAR の活用（東京大学地震研究所研究集会）, 東京都, 2017 年 12 月.

本山秀明,「南極や北極の氷から地球の歴史を探る」,南極・北極からの贈り物~極地観測から地球環境を考えよう～青森県環境教育促進強化事業, デーリー東北新聞社, 八戸市, 2017 年 11 月 25 日.

野木義史,「南極から地球をみる」, 兵庫県立北摂三田高等学校,平成 29 年度インスパイア講演会, 2017 年 11 月 22 日.

川合美千代, 東京都北区職業キャラバン「地球環境と海」 北区立神谷中学校 （全学年生徒157名対象）, 2017年11月18日.

茂木正人、出張講義、都立大泉高校付属中学校, 2017 年 11 月 15 日.

佐藤暢, 変動する地球の環境, 専修大学松戸高等学校, 第 29 回千葉県私学教育研究集会理科研修会講演, 2017 年 11 月 2 日

杉山慎,「氷河 ―地球を彩る氷―」, 平成 29 年度第 2 期女性大学(第 6 回), 公益財団法人北海道女性協会, 北海道立女性プラザ 2017 年 10 月 31 日.

グレーベラルフ, Ice sheets, global warming and sea level. Chitose International Forum on Photonics Science & Technology, 公立千歳科学技術大学, 2017.10.10

大藪幾美,「南極に閉じ込められた昔の空気」, 国立極地研究所 一般公開 サイエンスカフェ, 2017 年 8 月 5 日.

菅沼悠介,「地球温暖化で南極の氷は融けるのか？：極限フィールドワークから探る南極氷床の安定性」, 長野県松川町, 2017 年 8 月.

菅沼悠介,「地球温暖化で南極の氷は融けるのか？：極限フィールドワークから探る南極氷床の安定性」, 長野県飯田美術博物館, 2017 年 8 月.

菅沼悠介,「地球温暖化で南極の氷は融けるのか？：極限フィールドワークから探る南極氷床の安定性」, 高知大学海洋コア総合研究センター・国立極地研究所 合同公開シンポジウム,

（新学術領域研究『南極の海と氷床』共催）『南極: 大陸・海・氷床を探る』, 2017 年 7 月 26 日

奥野淳一, 「多様な海面変化を引き起こす固体地球」, 高知大学海洋コア総合研究センター・国立極地研究所 合同公開シンポジウム, （新学術領域研究『南極の海と氷床』共催）『南極: 大陸・海・氷床を探る』, 2017 年 7 月 26 日

池原実、**川村賢二**、**野木義史**、**田村岳史**、講演, 高知大学海洋コア総合研究センター・国立極地研究所 合同公開シンポジウム, （新学術領域研究『南極の海と氷床』共催）『南極: 大陸・海・氷床を探る』, 2017 年 7 月 26 日

小室芳樹, 「数値モデルによる北極海の将来予測：北極の未来を「スケッチ」する.」, 国立研究開発海洋研究開発機構第 3 回科学メディア意見交換会, 海洋開発研究機構,東京 2017 年 7 月 26 日.

奥野淳一, 「固体地球の応答が引き起こす海面変化の多様性」, 専修大学自然科学研究所 定例研究会, 2017 年 7 月 25 日.

川合美千代, 「二酸化炭素による海の温暖化と酸性化～50年後の海を考える～」 神奈川県地球温暖化防止活動推進委員大会, 2017年7月18日.

阿部彩子, 「古環境変動力学研究の立ち上げ」, 九州大学応用力学研究所附属大気海洋環境研究センター記念講演会, 九州大学, 2017年 7 月.

－メディア取材協力・掲載情報等－

2021 年度

川村賢二, **杉山慎**, 記事監修「地球温暖化の教科書」, ニュートン別冊, 2022 年 5 月
https://www.newtonpress.co.jp/separate/back_astronomy/mook_220505-3.html

本山秀明, 記者サロン 南極から地球が見える「100 万年前の氷に挑む」, 朝日新聞 DIGITAL, 2022 年 3 月 31 日

沖野郷子, 「深海を旅する」, 月刊土木技術, 2022 年 4 月号, 2022 年 3 月 28 日

植村立,「先端人：名大准教授　植村立さん　古気候学」, 朝日新聞 東海版, 2022 年 3 月 19 日
http://digital.asahi.com/area/aichi/articles/MTW20220320241370001.html

青木茂,「エウレカ！北大」南極海温暖化で淡水化, 読売新聞, 2022 年 3 月 9 日
https://www.yomiuri.co.jp/local/hokkaido/feature/CO055812/20220309-OYTAT50016/

津滝俊, 「南極観測に挑んだ研究者」, NHK 長野放送局イブニング信州, 2022 年 3 月 9 日
https://www.iwate-np.co.jp/article/2022/1/19/108393

青木茂,「南極巨大氷河流出加速の恐れ」, みんなの科学 5 面, 読売新聞(夕刊), 2022 年 2 月 3 日

青木茂, 南極沿岸に外洋から暖水　アザラシ越冬、一部解明 極地研など 日経新聞, 2022 年 1 月 23 日
https://www.nikkei.com/article/DGKKZO79456310R20C22A1MY1000/?unlock=1

杉山慎, 「新書・文庫：南極の氷に何が起きているか評」, 毎日新聞, 2022 年 1 月 22 日

青木茂, 「南極の厚い氷の下は、アザラシに観測お任せ　7 頭からデータ回収　極地研と北海道大」, 朝日新聞デジタル, 2022 年 1 月 19 日

津滝俊, 「最古級氷掘削へ準備着々　データ収集、作業終了」, 岩手日報南極支局, 2022 年 1 月 19 日

庭野匡思 レポート「温暖化したら降雪・積雪はどうなる？ ～サイエンスアゴラ 2021 講演会から～」, サイエンスポータル編集部, 2022 年 1 月 13 日
https://scienceportal.jst.go.jp/explore/reports/20220113_e01/
https://news.yahoo.co.jp/articles/50b7bdece2871465ed01d5dbd3807ae77e745f3f

杉山慎、**箕輪昌紘**、「流れ出す氷河に迫る 熱水掘削し過程観測、氷床融解予測に活用」, 共同通信社 岩手日報その他 2022 年 1 月 9 日

杉山慎、「比喩とレトリックで描く科学的考察：南極の氷に何が起きているか　村上陽一郎による書評」, 毎日新聞, 2022 年 1 月 8 日

箕輪昌紘、「極地ツイート：氷河での地震波観測」, 岩手日報, 2022 年 1 月 6 日

杉山慎、**箕輪昌紘**、「氷河上で迎えた新年」, 岩手日報, 2022 年 1 月 4 日

菅沼悠介, 「南極氷床の融解メカニズム」, 信濃毎日新聞, 2022 年 1 月 3 日.

杉山慎、「ビジネスパーソンの必読書：最新の研究成果、南極の氷に何が起きているか」, 産経新聞, 2021 年 12 月 19 日

朝日新聞, 「暗黒の海や湖の底、解き明かす水中ロボ　自律型が進歩、深まる用途」, 2021 年 11 月 3 日

川又基人, 過去は未来を探る鍵 – 南極氷床の過去の急激な融解から探る氷床融解メカニズム, academist Journal, 2021 年 11 月 2 日 https://academist-cf.com/journal/?p=16159

朝日新聞, 「水中ロボ進化、独りですいすい　ケーブル不要、センサー組み合わせ難所も」, 2021 年 10 月 29 日

川村賢二, **杉山慎**, 記事監修「瀬戸際に立つ南極危機」, 科学雑誌ニュートン, 2021 年 10 月号
https://www.newtonpress.co.jp/newton/back/bk_2021/bk_202110.html

奥野淳一, 親子スクール理科学, 『なぜ温暖化で海面が上がるの？』（取材協力）, 日本経済新聞, 2021 年 9 月 25 日夕刊,

庭野匡思, 「グリーンランド雨量増 氷床解ける原因 温暖化影響か」, 読売新聞, 2021 年 8 月 24 日

庭野匡思, 「気象研、「氷床に降る雨」の時空間変動を詳細解析」, 環境展望台, 国内ニュース, 2021 年 8 月 23 日
https://tenbou.nies.go.jp/news/jnews/detail.php?i=32379

青木茂, 「南極周辺の海流南下　大陸に接近氷融解加速も」, 北海道新聞（夕刊）2 面, 2021 年 7 月 3 日

電波新聞, 「高速反応や自律航行、ロボット研究進む」, 東大でオンライン公開講座, 2021 年 6 月 17 日

青木茂, 「きらめく氷海を飛ぶ　南極大陸の氷の謎を解く鍵は海に」, 朝日新聞デジタル, 2021 年 6 月 2 日
https://www.asahi.com/articles/ASP5X6T87P5WUTIL05W.html

子供の科学,「南極の氷の下を調べる海中ロボットを開発」, 84(6), p.3, 2021 年 5 月 10 日

朝日小学生新聞,「南極の氷の裏を調べるよ」, 2021 年 4 月 15 日

科学新聞,「海氷裏面の全自動計測 海中ロボで成功」, 2021 年 4 月 9 日

産業技術総合研究所 地質標本館 特別展「南極の過去と現在、そして未来－研究最前線からのレポート－」

2020 年度

東大研究チーム, 「南極の海氷や棚氷域を探査する新しい自律型海中ロボット「MONACA」を開発」, AXIS Web Magazine, 2021 年 3 月 31 日

北海道新聞, 「海氷帯の裏面 自動計測」, 2021 年 3 月 27 日

時事通信社, 「海氷下も自動航行　調査ロボ」, 実証試験成功 ―東大など, 2021 年 3 月 27 日

日刊工業新聞, 「東大・極地研, 海氷下潜行・探査ロボ　南極海調査に活用」, 2021 年 3 月 26 日

北海民友新聞, 「日本初 氷海をワイヤレス観測」, 2021 年 3 月 23 日

Nature Index. Supplement ASIA Pacific Scientist to scientist, Japan and South Korea pursue shared interests. Despite political tensions, research ties are resilient. Ichiko Fuyuno Nature 591, S24-25, 2021.3.18.

日刊工業新聞,「南極海の海氷拡大、自然変動の可能性　高知大など、氷床融解との関係解明へ」, 2021 年 2 月 23 日

青木茂, 「エキスパートが語る南極研究の最前線」北大低温研・青木茂准教授、「南極地域観測隊長としての 3 カ月半を振り返る」, 北海道大学新聞(Web 版 The Mainstreet), 2020 年 12 月 16 日.
https://www.hokudaishinbun.com/2020/12/16/4851/

青木茂, 「西南極の氷融解足踏みか　南極深海の塩分濃度、一転して上昇　－北大低温研・青木准教授ら」, 北海道大学新聞(Web 版 The Mainstreet), 2020 年 12 月 15 日.
https://www.hokudaishinbun.com/2020/12/15/4836/

杉山 慎, 「氷河溶け出す水、生態系を支える」, 日本経済新聞, 2020 年 10 月 11 日.

青木茂, 「南極　塩分濃度低下止まる　北大など深海調査　世界の気候に影響か」, 日経新聞(日曜・朝刊), 2020 年 9 月 27 日.

青木茂, AIR-G' FM ラジオ &. LOVE , 202 年 9 月 19 日.

青木茂, 「海面上昇の謎、南極で迫る　トッテン氷河調査、深海に温かい水,」 朝日新聞（夕）, 2020 年 5 月 2 日.

阿部彩子　NHK エンタープライズ　ダーウィンが来た！ 2020 年 5 月.

本山秀明ほか, 「南極移動基地ユニット」の実証実験がスタート, EMIRA トップランナー, 2020 年 4 月 30 日.
https://emira-t.jp/ace/14483/

本山秀明ほか, 7「2 万年前の氷から気候変動の謎を解き明かす！ 南極観測・研究最前線」, EMIRA トップランナー, 2020 年 4 月 28 日. https://emira-t.jp/ace/14468/

2019 年度

大藪幾美, 「氷期最寒期のダスト飛来量 -日欧の研究グループ南極のアイスコアから復元- 」, 科学新聞, 2020年3月20日.

青木茂, 「南極 短い夏の収穫」, 朝日新聞, 2020 年 3 月 13 日.

朝日新聞南極プロジェクト 2019-2021 「南極 短い夏の収穫 ヘリがフル回転 データ回収に測定も」, 朝日新聞, 2020年03月13日 朝刊.

大島慶一郎, 「バイオロギング　海中水温・塩分　アザラシで」, 讀賣新聞, 2020 年 3 月 8 日朝刊.

川合美千代, （公財）日本極地研究振興会 小学生高学年用教材, 「「北極海の海氷変化と酸性化」北極海でほかの海より深刻な酸性化が起きているのはなぜ？南極・北極から学ぶ地球の未来」, 2020年.

巻俊宏, 「水中ロボ 冬の紋別で試験」, 北海民友新聞, 2020 年 2 月 29 日.

川村賢二ほか, 「「世界最古の氷」をめざして　南国宮崎のドリル、南極へ」朝日新聞, 2020 年 2 月 15 日.
https://www.asahi.com/articles/ASN2H3Q03N1YTNAB00N.html

青木茂, 「南極別れの季節 帰る夏隊 観測漬け でも「また来たい」 残る越冬隊　昭和基地維持「３０人だけで」気候変動解明に挑む」, 朝日新聞（夕刊), 2020 年 2 月 12 日.

川村賢二ほか, 「目指すは“100 万年前の氷” 南極計画に向けドリルの掘削実験　宮崎県国富町」, UMK テレビ宮崎, 2020 年 2 月 6 日.

川村賢二ほか, 「世界最古の氷、掘削へ　九州オリンピア工業（国富）の装置、南極で」, 宮崎日日新聞, 2020 年 2 月 4 日.
https://pre-miya.com/miyabiz/general/42661.html

石輪健樹, 「微粒子観測、泥の分析…南極の地で燃やす情熱 観測隊の若手研究者たち」, 47NEWS 気象予報士のぼちぼち南極 2020 年 2 月.

阿部彩子 科学の森「チバニアンで気候変動予測」, 毎日新聞, 2020 年 2 月取材協力 科学面, 2020 年 4 月 2 日朝刊

川村賢二ほか, 「南極調査用ドリルで掘削実験」, MRT 宮崎放送, 2020 年 1 月 31 日.

板木 拓也, 「古代環境　ミクロ化石で探る,」 東京新聞 2020年1月28日 朝刊.

青木茂, 「白瀬氷河　波立つ”奔流”」, 京都新聞(夕) , 2020 年 1 月 28 日.

青木茂, 「”奔流する氷の大河” 」, 東奥日報, 2020 年 1 月 28 日.

阿部彩子　NHK BS1 スペシャル「気候クライシス～IPCC 特別報告書からの警告～」データ提供 2020 年 1 月 13 日. 番組協力

中国新聞,「南極で探せミクロの化石　観測隊 海底の泥から古代環境調査, 2020年1月12日.

板木 拓也, 「ミクロの化石探せ　南極観測隊　海底の泥で温暖化予測」, 茨城新聞 , 2020年01月10日 朝刊.

愛媛新聞,「ミクロ化石で古代環境探れ　南極海底から採取分析 観測隊の産総研研究員」, 2020年01月10日, 朝刊.

佐賀新聞,「ミクロの化石から古代探る　南極観測隊海底の泥調査　温暖化予測精度向上狙い」, 2020年01月10日 朝刊.

板木 拓也 「古代の環境南極で調査　温暖化、海底化石で探る,」 日本経済新聞, 2020年01月09日 夕刊.
https://www.nikkei.com/article/DGXMZO54196530Z00C20A1CR0000/

大分新聞,「極小化石 温暖化の手掛かりに　南極・昭和基地で調査中」, 2020年1月9日 夕刊,

杉山慎, NHK 取材協力, 2020 年 1 月 1 日, 「10years after 未来への分岐点」.

阿部彩子　ダーウィンが来た！ NHKエンタープライズ, 2020年1月.

青木茂,「しらせから昭和基地にヘリ第 1 便　「久しぶりに新しい人間を見た」」, 東京新聞, 2019 年 12 月 30 日.

青木茂,「昭和基地にヘリ第 1 便 南極観測隊「ようこそ」」, 産経新聞, 2019 年 12 月 30 日.

青木茂,「61 次南極観測隊、昭和基地に到着　21 年ぶりの再会も」, 朝日新聞デジタル, 2019 年 12 月 30 日.

青木茂,「南極でも減る氷　6 1 次観測隊、世界に先駆けて観測へ」, 朝日新聞デジタル, 2019 年 12 月 27 日. https://www.asahi.com/articles/ASMCK4Q4TMCKULZU001.html

阿部彩子　NHK スペシャル「人類誕生」第 1 集 見えてきた！ホントの恐竜, 2019 年 12 月 19 日. 番組協力 http://www.nhk.or.jp/special/jinrui/

山縣広和, Drones be ambitious, WIRED, 35, p.67, 2019 年 12 月.

青木茂,「地球環境 変化探る」, 東奥日報, 2019 年 12 月 8 日.

青木茂,「「やっとスタートライン」南極観測船しらせ、豪州出港」, 朝日新聞デジタル, 2019 年 12 月 2 日. https://www.asahi.com/articles/ASMD24W6GMD2UTIL02M.html

阿部彩子　「南極の氷床が、温暖化の行方を左右する――過去の気候変動の謎を解明する数値モデルで、未来予測に挑む」, IBM 無限大, 2019 年 12 月.

青木茂,「南極で地球を探る」（朝日新聞南極プロジェクト）, 朝日新聞　23・34 面, 2019 年 11 月 27 日.

青木茂,「解ける氷床原因究明へ」, 上毛新聞, 2019 年 11 月 24 日.

青木茂,「地球に生きる第 8 部 南極観測 官民から英知 地球の変化探る」, 中部経済新聞, 2019 年 11 月 18 日.

青木茂,「東南極最大級の氷河観測　極地研が来月　融解量など解明へ」, 日刊工業新聞　26 面, 2019 年 11 月 14 日.

青木茂,「「しらせ」南極へ出発」, 北海道新聞 p.26 左上 2 , 2019 年 11 月 13 日.

青木茂,「南極観測船「しらせ」出発　61 次隊は氷河沖観測」, 東京・晴海, JIJI.COM, 2019 年 11 月 12 日.

青木茂,「しらせ、南極へ出港　6 1 次隊、 1 月上旬到着」, 北海道新聞（電子版）, 2019 年 11 月 12 日. https://www.hokkaido-np.co.jp/article/363878?rct=n_topic

青木茂,「地球に生きる第 8 部 南極観測 地球環境の変化探る」, 山形新聞, 2019 年 11 月 12 日.

青木茂,「地球に生きる 環境の変化探り 60 年」, 宮崎日日新聞, 2019 年 11 月 12 日.

青木茂,「南極から地球の変化探る」, 京都新聞(夕刊), 2019 年 11 月 12 日.

阿部彩子, **小長谷貴志**, 知って楽しい海の話　「ゆっくり温暖化→海流の急変→温暖化の急進」が再現された, 東京大学海洋アライアンス, 2019 年 11 月.

阿部彩子　「温暖化 海面1.1 メートル上昇」, 読売新聞朝刊 1 面記事（関連記事）, 2019年9月26日.

阿部彩子　「高潮頻発 日本も脅威」, 読売新聞朝刊, 2019年9月26日.

阿部彩子　「2100 年、想定超す温暖化」, 日本経済新聞朝刊, 2019年9月26日.

茂木正人　「海洋プラ問題考えるフォーラムに 230 人」, 読売新聞（秋田版）, 2019 年 9 月 8 日.

阿部彩子　IPCC 報告書に関する取材, 読売新聞, 2019 年 9 月.

阿部彩子　NHK 総合「クローズアップ現代 独占密着！ 3 万年前の大航海 日本人のルーツに迫る」2019 年 7 月 24 日. 番組協力 https://www.nhk.or.jp/gendai/articles/4313/

本山秀明,「日本伸管 極地研にアルミ管　高耐久性・高精度実現, 南極氷床深層ドリル向け　次期掘削計画で使用」, 日刊工業新聞　2019 年 7 月 4 日

川村賢二ほか,「ダーウィンが来た！「密着！南極生きもの大調査」」NHK 総合, 2019 年 5 月 26 日. https://cgi2.nhk.or.jp/darwin/articles/detail.cgi?p=p599

青木茂,「南極観測隊長に思い熱く　北大から初 青木茂准教授」, 道総合, 朝日新聞, 2019 年 5 月 22 日. https://www.asahi.com/sp/articles/ASM4W5GVBM4WIIPE011.html

箕輪昌紘, **杉山慎,**「氷山の流出量推定　分離時の津波測定　北大など高精度手法」, 日刊工業新聞,　2019 年 5 月 13 日.

青木茂,「キュンとする雑学」, AIR-G' FM ラジオ 夜 7:00-8:00, 2019 年 4 月 14 日.

阿部彩子　日経ナショナルジオグラフィック社「恐竜超世界」, 取材協力, 2019.

阿部彩子　国立科学博物館への協力「3 万年前の航海 徹底再現プロジェクト」, 2019 年. 協力研究者として紹介・番組協力 https://readyfor.jp/projects/koukai2 協力研究者として紹介、関連 NHK 番組協力

2018 年度

山縣広和　「水中ロボコン入門 第 1 回 水中ロボコンのルールと参加機体の特徴を知ろう! 」, ロボコンマガジン 3 月号, 122, 50-53, 2019 年 2 月 15 日

子供の科学　「化石の鑑定にAI導入で、分析効率が向上！」, 2019年2月10日

阿部彩子, 三ツ井孝仁, 取材協力 NHK スペシャル　内容：氷床融解メカニズムについての紹介（予定）2019 年 2 月

講談社現代ビジネス（WEB）「5 億年前から生きている「不思議な生物」が教えてくれること」, 2019 年 1 月 4 日

Marvin（WEB）「細かな作業はお手の物：深層学習を活用した微化石の鑑定・分取システム」, https://marvin.news/5260, 2018年12月27日

日刊工業新聞 「AIで化石鑑定　ロボが分取」, 2018年12月18日

科学新聞 「AI活用　地層解析に革命」, 2018年12月14日

電経新聞 「AIで高精度な地層解析を実現　微化石を自動で分取」,2018年12月10日

朝日新聞デジタル「駿河湾の超巨大ザメ、4K で撮影成功」, 2018 年 12 月 4 日

巻俊宏,「東大 自律海中ロボ開発　深度 300m 対応・漁船運用可能」日刊工業新聞,　2018 年 12 月 3 日

小室芳樹, Blue Earth 158 号, 特集「北極の海氷減少がもたらすもの」. 国立研究開発法人海洋研究開発機構編集・発行, ISSN 1346-0881. 2018 年 12 月

山縣広和　「ロボコン OBOG の履歴書　第 17 回 水中ロボットコンベンション」, ロボコンマガジン 11 月号, 120, 60-61, 2018 年 11 月 1 日

本山秀明 RION, Shake Hands Vol.7, 2-3, Sep.2018　Future Story　Explore INNER VIEW Let Things Work Themselves Out～Exploring Earth's Past Present Through Ice. http://rion-sv.com/shakehands/Rion-ShakeHands-007-E-view.pdf

本山秀明, 国大協広報誌　国立大学　Vol.50, Sep.2018　国立大学協会 特集　大学共同利用機関　大学とともに未来へ進む Episode 2 情報・システム研究機構 国立極地研究所 「南極氷床コアから過去・未来の地球環境変動を知る」, http://www.janu.jp/report/koho/50gou.html

本山秀明 リオン、Shake Hands Vol.7, 2-3, 2018/8　特集　探る INNER VIEW　「人生はなんとかなる、掘削はなんとかする～氷から探る地球の過去と未来」, http://svmeas.rion.co.jp/shakehands/shakehands_vol7_閲覧用.pdf

阿部彩子, 取材協力 "NHK スペシャル「人類誕生」　第 2 集/最強ライバルとの出会い そして別れ"（当時の氷床を再現）2018 年 8 月

中村和樹, 河合塾進学情報誌, 栄冠めざして SPECIAL 2018「ゼミ・研究室ナビ」, 2018 年 7 月

本山秀明, 植村立,「気温・海水温に 4 万年周期-地球の自転軸の傾きが影響」, 日本経済新聞, 2018 年 7 月 22 日朝刊

本山秀明,「南極の氷で探る、72 万年の気候変動　未知の周期発見」, 日本経済新聞電子版, 2018 年 7 月 21 日 https://www.nikkei.com/article/DGXMZO33213060Q8A720C1MY1000/

野田　明, **北出裕二郎**, **茂木正人**, 松山優治, 松野　隆, 対談「海鷹丸は今冬も南極海へ　国家事業である南極地域観測事業の一翼を担う」楽水、863, July 2018

植村立,「縞模様が伝える地球の歴史」, 読売 KODOMO 新聞, 2018 年 4 月 19 日(10-11)

2017 年度

茂木正人.　「深海大スペシャル」, NHK 総合, 2017 年 12 月 30 日.

杉山慎ほか,　「氷山と流氷」, 朝日新聞　ののちゃん do 科学, 2017 年 10 月 14 日.

東久美子,　「北極と南極の氷による過去の地球環境の復元」, 朝日地球会議(朝日新聞社), 東京, 2017 年 10 月.

菅沼悠介,　「氷床調査は命懸け」,　産経新聞,2017 年 9 月 4 日.

文教ニュース「高知大と極地研　南極公開シンポジウム」, 2017 年 8 月 14 日.

茂木正人.　「Deep Ocean 南極　深海に巨大生物を見た」, NHK スペシャル, 2017 年 7 月 16 日

高知新聞「南極の氷の世界紹介　高知市　極地研と高知大シンポ」,　2017 年 7 月 2 日.

－産業財産権の出願・取得状況－

2021 年度

菅良太郎, **中野善之**, 百留忠洋, 渡邊佳孝, 吉岡孝史,「発明の名称：水中観測システム及び水中観測システムの音波競合排除方法」特許第 6980255 号(日本), 出願 2017 年 8 月 25 日, 登録 2021 年 11 月 19 日,
特許権者：国立研究開発法人海洋研究開発機構

2020 年度

菅沼悠介, 香月興太, 田邊優貴子,　特許 6824503 土砂採取装置 2018 年 12 月 25 日出願, 2021 年 1 月 15 日登録

2019 年度

PCT JP2019/018730　国際出願　「分類装置、分類方法および記録媒体」　2019 年 5 月 10 日出願

2018 年度

特願 2018-163981「分類装置、分類方法およびプログラム」（2018 年 8 月 31 日出願）鍬守直樹（NEC）,平　陽介（NEC）,**板木拓也**（産総研）,前林利典（マイクロサポート）, 竹島　哲（三谷商事）,戸谷健二（三谷商事）

－国際共同研究の実施状況－

2021 年度

底層水班 米国 スクリプス海洋研究所, オーストラリア タスマニア大学, オーストラリア オーストラリア南極局, 英国 ブリティッシュアンタークティックサーベイ

茂木正人, **真壁竜介** Humpback whale sentinel program への参画　https://www.southernoceansentinel.org/

茂木正人,　南大洋中深層性魚類データベース（Myctobase）構築

氷床班 オレゴン州立大学（共著 Science 論文、コア年代決定）, ソウル大学（アイスコア気体分析、共著論文）, ノルウェー極地研、アラバマ大（SMB 共著論文）, フランス IGE、LSCE（コア年代決定）

青木茂, フランス国立科学研究センター, 南極沿岸海洋における酸素同位体比測定に関する研究

安田一郎, ロシア極東水文気象研究所　ロシア海域の観測航海・研究

佐藤和敏, メルボルン大学 Simmonds 教授, オーストラリア南極局 Simon Alexander 主任研究員

庭野匡思, Polar CORDEX（https://climate-cryosphere.org/antarctic/）に参加中。本科研費課題で開発した領域気候モデル NHM-SMAP 南極版を用いて

服部祥平, グルノーブルアルプス大学(フランス), ワシントン大学(米国)

平野大輔, The University of Texas(米国), Scripps Institution of Oceanography(米国), CSIRO(オーストラリア), University of Tasmania(オーストラリア)

藤井昌和, 豪州南極局・Jodie Smith、Alix Post,「Polarstein」の東南極沖合観測航海にかかるデータ提供

藤井昌和, AWI・Ralf Tiedemann,「Investigator」の東南極沖合観測航海にかかるデータ提供

2020 年度

底層水班　米国 スクリプス海洋研究所, オーストラリア タスマニア大学, オーストラリア オーストラリア南極局

青木茂, 韓国極地研究所, 南極アムンゼン海沿岸域における海水特性に関する研究

佐藤和敏　オーストラリア The University of Melbourne Australian Bureau of Meteorology

服部祥平 米国 ワシントン大学，フランス Universite Grenoble Alpes, IGE, CNRS リヨン大学

庭野匡思 英国 British Antarctic Survey

池上隆仁 スイス ETH Zurich，ノルウェー University of Oslo，ロシア連邦 Russian Academy of Sciences，スペイン Universidade de Vigo，英国　University of Birmingham

2019 年度

大島慶一郎,**田村岳史**，タスマニア大学・オーストラリア南極局，「南極沿岸ポリニヤでの高海氷生産による南極底層水生成過程」

大島慶一郎，池原実 白鳳丸 KH-20-1 次航海（南大洋インド洋区）（2020 年 1 月 20 日～2020 年 2 月 16 日）
乗船者：**松井浩紀**、国立台湾大学 大学院生 Chih-Kai Chuang

池原実，白鳳丸 KH-19-6 Leg4 次航海（南大洋大西洋区）（2019 年 12 月 20 日～2020 年 1 月 16 日）
乗船者：モデル班の**小林英貴**、ボン大（独）M. Weber 博士、英国南極調査局 P. Leat 博士

茂木正人，高橋邦夫他，Kerrie Swadling 博士（タスマニア大学）との共同研究，海鷹丸乗船他，　2020 年 1 月.

茂木正人，**真壁竜介**，**小達恒夫**，高橋邦夫他，「オーストラリア・ケーシー基地―海洋大「海鷹丸」の連携による国際共同研究のためのワークショップ」，国立極地研究所，2019 年 4 月 4-5 日

青木茂,**大島慶一郎**,豊田威信,**平野大輔**,**伊藤優人**，タスマニア大学，南大洋インド洋セクタにおける水塊特性と時間変動

青木茂，韓国極地研究所，南極アムンゼン海沿岸域における海水特性に関する研究

青木茂，アルフレッドウェゲナー極地研究所，南極ウェッデル海沿岸域における海水特性に関する研究

青木茂，イーストアングリア大学，南大洋沿岸域における塩分変化に関する研究

シェリフ多田野サム，バルセロナ自治大学，日射変化に対する海洋深層循環と南大洋の応答についての研究

岡顕, Oxford University,　共同研究者：Samar Khatiwala

小林英貴, Cambridge University

阿部彩子, AWI，共同研究者：Gerritt Lohmann, Evan Gowan.

阿部彩子, PalMod, Niels-Bohr Institute, Frank Pattyn, Robert Deconto, Nickolas Golledge, LSCE , LGGE, ISMIP, PMIP4 interglacials , PMIP4 last deglaciation, PMIP4 penultimate deglaciation

Greve R., **斎藤冬樹**, LARMIP

Greve R., ABUMIP

阿部彩子，**シェリフ多田野サム**, Christo Buizert

岡顕，**阿部彩子**，氷期炭素循環、海洋物質循環，共同研究者：Jens Olaf Peterson, Gary Shaffer,

岡顕，　**小林英貴**, Pa/Th モデリング比較

岡顕，　**小林英貴**，**阿部彩子**, PMIP4 Carbon

服部祥平，ワシントン大学，グルノーブルアルプス大学，リヨン大学

猪上淳, Alfred Wegener Institute, Ohio State University, The University of Melbourne

2018 年度

マリオン・デフレンヌ CROTALE 航海（南大洋インド洋区）（2019/2/22～2019/3/11）
主席研究員：Xavier Crosta（ボルドー大学）、日本からの乗船者：池原研（産総研）、**松井浩紀**（高知大）、Xiangyu Zhao（極地研）、**Matthieu Civel**（高知大）

白鳳丸 KH-19-1 次航海（南大洋インド洋区）（2019/1/2～2019/2/12）
主席研究員：**池原実，**乗船者：**板木拓也**、ベルン大（スイス）大学院生 Eri Helen Amsler

溝端浩平，ACE CRC（Antarctic Climate and Ecosystems Cooperative Research Centre）「海面高度に関わるモデリング結果と溝端の衛星観測結果との比較検証」 共同研究者: Stuart Corney 博士(タスマニア大学)

溝端浩平，タスマニア大学　「衛星観測による海洋循環場を用いたマゼランアイナメ卵・仔魚の輸送過程に関わる研究」 共同研究者: 森麻緒博士(タスマニア大学)

シェリフ多田野サム，バルセロナ自治大学，日射変化に対する海洋深層循環と南大洋の応答についての研究

岡顕, Oxford University,　共同研究者：Samar Khatiwala

小林英貴, Cambridge University

阿部彩子, AWI，共同研究者：Gerritt Lohmann, Evan Gowan.

阿部彩子, PalMod, Niels-Bohr Institute, Frank Pattyn, Robert Deconto, Nickolas Golledge, LSCE , LGGE, ISMIP, PMIP4 interglacials, PMIP4 last deglaciation, PMIP4 penultimate deglaciation

阿部彩子，**シェリフ多田野サム**, Christo Buizert

Greve R., LARMIP /ABUMIP

服部祥平，ワシントン大学，グルノーブルアルプス大学，リヨン大学

猪上淳,　Australian Antarctic Division, The University of Oklahoma

2017 年度

日本学術振興会 二国間共同研究 韓国との共同研究（NRF）（H28-H29）「アラビア海モンスーンの第四紀後期における強度変動：堆積物供給源と生物生産量の変動」共同研究者： 代表：**池原実**

頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム「R2901 アジアモンスーンの長期的変動に関する共同研究」共同研究者： 代表：山本，**関宰**, Mckay ほか

IODP Exp. 374 Ross Sea West Antarctic Ice Sheet History
共同研究者： Rob MacKay (Victoria University), Laura De Santis (Instituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale), Denise Kulhane (Texas A&M University)，杉崎彩子（産業総合技術研究所），**関宰**（古海洋班との連携を含むことになる）（北海道大学）

大島慶一郎，タスマニア大学　オーストラリア南極局 「南極沿岸ポリニヤでの高海氷生産による南極底層水生成過程」

－受賞－

2021 年度

近藤研, 雪氷研究大会学生優秀発表賞, 「東南極ラングホブデ氷河における底面滑りの直接観測」, 2022 年 10 月.

石輪健樹, 日本地質学会 小澤儀明賞 「海水準変動復元と固体地球モデリングに基づく南極氷床変動メカニズム解明の研究」2022 年 9 月.

石輪健樹, 日本第四紀学会 若手学術賞 2022 年 9 月.

杉山慎, 講談社・科学出版賞, 「南極の氷に何が起きているか・気候変動と氷床の科学」2022 年 9 月.

羽田裕貴, 菅沼悠介, PEPS The Most Downloaded Paper Award 2022 2022 年 6 月 1 日.

小松瑞紀(指導教員 **大島慶一郎**), 2021 年度松野記念修士論文賞「春季データから見積られる、南大洋における海氷融解量の分布とその変動」, 北海道大学大学院環境科学院, 2022 年 3 月.

小知井秀馬, 東京大学大学院新領域創成科学研究科, 新領域創成科学研究科長賞, 2022 年 3 月 24 日.

小知井秀馬, 日本船舶海洋工学会, 奨学褒賞, 2022 年 3 月 24 日.

小知井秀馬, UTokyo-IIS Research Collaboration Initiative Award 2021, First Place , 2022 年 3 月 18 日.

阿部彩子, 2022 年度日本学士院賞, 「氷期－間氷期サイクル 10 万年周期の機構の解明」, 2022.3.14

菅沼悠介 2021 年度地球環境史学会貢献賞 「古地磁気および宇宙線起源放射性核種を用いた第四紀古環境変動研究」, 2022 年 2 月.

羽田裕貴 2021 年度地球環境史学会奨励賞 「房総半島の海成鮮新～更新統を用いた高時間分解能の古海洋・古地磁気変動復元」, 2022 年 2 月.

大藪幾美 2021 年度地球環境史学会奨励賞 「極域アイスコアの先端的分析に基づく氷期―間氷期の環境変動の解明」, 2022 年 1 月.
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20220218.html

川又基人, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会 令和三年度研究発表会 優秀発表者賞, 2021 年 12 月 3 日.

加藤悠爾, 諸野祐樹, **井尻暁**, 寺田武志, **池原実,** 日本珪藻学会最優秀発表賞, 「セルソーターを用いた海底堆積物中に産する珪藻化石のタクサごとの分離」, 日本珪藻学会第 41 回研究集会、2021 年 11 月 27.

小知井秀馬, 海洋調査技術学会, 若手優秀発表賞, 2021 年 11 月 19 日.

田村岳史, 2021 年度日本気象学会堀内賞「海氷生産量のグローバルマッピングによる地球気候の研究」, 日本気象学会, 2021 年 9 月.

大藪幾美 2021 年度日本雪氷学会平田賞「氷床アイスコアの微量気体・塩微粒子等の解析に基づく気候変動の研究」2021 年 9 月

近藤研 雪氷研究大会学生優秀発表賞（口頭発表部門）「東南極リュッツォホルム湾における溢流氷河変動に定着氷が与える影響」, 2021 年 9 月
http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/prize20210915.html

菅沼悠介, 地質学会表彰（千葉セクション GSSP 提案チームとして） 2021 年 9 月.

菅沼悠介, 地球電磁気・地球惑星圏学会 田中舘賞 2021 年 5 月.

2020 年度

阿部彩子 EGU 2021 年度 Milutin Milankovic Medal 受賞理由「Fundamental contributions to our understanding of climate-ice sheet interactions on orbital timescales and how they shape the planetary response to Milankovic cycles」

川又基人, 第 6 回 SOKENDAI 賞, 2021 年 3 月 24 日.

小野 数也 令和 2 年度 北海道大学 教育研究支援業務総長表彰（貢献賞） 奨励賞 技術部門, 2021 年 2 月 19 日
菅沼悠介, 第 31 回つくば賞, 2021 年 2 月.

菅沼悠介, 茨城大学学長学術特別表彰. 2020 年 10 月.

菅沼悠介, 日本第四紀学会功労賞（Chiba composite section research community メンバーとして）, 2020 年 8 月.

菅沼悠介, 講談社科学出版賞 「地磁気逆転と『チバニアン』」, 2020 年 7 月.

川村賢二 日本雪氷学会 2020 年度学術賞 「氷床アイスコア気体成分の分析による過去数十年の気候変動とそのメカニズムの研究」

阿部彩子 日本雪氷学会 2020 年度学術賞 「数値気候・氷床モデルを用いた地球規模環境変動の研究」

箕輪昌紘 日本雪氷学会 2020 年度平田賞 「カービング氷河の末端プロセスと変動メカニズムの研究」

吉森 正和 日本気象学会 2020 年度日本気象学会賞 「古気候シミュレーションを活用した気候感度および気候フィードバックのメカニズムに関する研究」

川又基人, 日本地質学会, 第 11 回惑星地球フォトコンテスト地質学会会長賞, 2020 年 5 月.

川又基人, 2019 年度笹川科学研究助成 奨励賞, 「東南極宗谷海岸地域における最終氷期最盛期以降の氷床後退過程の復元」, 2020 年 4 月

2019 年度

大藪幾美, 日本雪氷学会 2019 年度 関東・中部・西日本支部論文賞 「ドーム C とドームふじ氷床コア中の鉱物ダストと海塩微粒子の化学成分に関する研究」, 2020 年 4 月

大島慶一郎, 令和元年度北海道大学教育研究総長表彰（研究）, 2020 年 2 月 17 日

石野 沙季, **板木 拓也**, 日本珪藻学会第 39 回研究集会最優秀発表賞, 微化石自動鑑定システムを用いた *Eucampia antarctica* の殻形状の分類, 日本珪藻学会第 39 回研究集会, 東京学芸大学, 2019 年 11 月 30 日–12 月 1 日.

泉 孟, **井尻 暁**, **池原 実**, 2019 年度地球環境史学会年会優秀発表賞, 中心型珪藻殻の分離濃集による珪藻殻酸素同位体指標の高精度化、第 5 回地球環境史学会、産業総合技術研究所、2019 年 11 月 16-17 日.

杉山慎, 日本雪氷学会北海道支部・北海道雪氷賞・北の六華賞, 「南極ラングホブデ氷河における熱水掘削」
2019 年 5 月

高橋啓吾, 日本珪藻学会第 40 会大会最優秀発表賞, 南極沿岸域における海氷生成期のアイスアルジー群集組成, 2019 年 5 月.

2018 年度

山本彬友 優秀発表賞受賞 地球環境史学会 2018 年 11 月(仙台)

津滝　俊，日本雪氷学会 2018 年度平田賞「カービング氷河の急激な変動メカニズムの解明」 2018 年 9 月

大島慶一，第 11 回海洋立国推進功労者表彰（科学技術振興部門）（内閣総理大臣賞） 「海洋に関する顕著な功績」分野，極域海洋での中深層水形成・循環の解明，2018 年 8 月

芳村圭　日本気象学会 2018 年度堀内賞

影沢歩友子（指導教員：**小達恒夫**，**真壁竜介**），Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean 2018, Student Poster Award，「Biogeochemical cycling in the subsurface chlorophyll maximum off Wilkes Land, East Antarctica, during the austral summer」, 2018 年 4 月

2017 年度

2018/3/22，日本船舶海洋工学会奨学褒賞（野口侑要：巻研究室）

2018/3/14，東京大学大学院新領域創成科学研究科，新領域創成科学研究科長賞（野口侑要：巻研究室）

青木茂，日本気象学会 2017 年度堀内賞「南大洋における大気・海洋結合系の長期変動に関する観測的研究」2017 年 8 月.

川村賢二， 2017 年日本第四紀学会学術賞「氷床コア中の気体分析による高精度年代測定法の確立と氷期-間氷期サイクルの研究」, 2017 年 8 月.

川合美千代，第 2 回地球惑星科学振興西田賞「北極海における水塊の混合と物質循環に関する化学海洋学的研究」， 2017 年 5 月 23 日.

－ホームページ、SNS 等－

2021 年度

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「氷床変動と固体地球の関係」**奥野淳一**, 2022 年 9 月 26 日 https://www.youtube.com/watch?v=b-zn7Gr4IN4

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「南極の気候と大気循環」**吉森正和**, 2022 年 8 月 10 日 https://www.youtube.com/watch?v=3HSAvqUAHHc

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「氷床に刻まれた地球の歴史 ～アイスコアの研究～」**大藪幾美**, 2022 年 8 月 10 日 https://www.youtube.com/watch?v=DzpCtUwWhPw

YouTube【極地研公式チャンネル】#118 フィールドムービー 2022 年 4 月 8 日 https://www.youtube.com/watch?v=ZgBfphQ7ihs

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「南極の雪と氷からわかる地球環境の歴史」**藤田秀二**, 2021 年 11 月 25 日 https://www.youtube.com/watch?v=lS795VNthug

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「宇宙がつなぐ南大洋生態系と海氷」　**高尾信太郎**, 2021 年 11 月 25 日, https://www.youtube.com/watch?v=40tOH3nG13s

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「南極海から沈み込む海洋大循環」　**大島慶一郎**, 2021 年 11 月 25 日, https://www.youtube.com/watch?v=HHdlbOzj6uU

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「南極海の食物連鎖」　**茂木正人**, 2021 年 11 月 25 日, https://www.youtube.com/watch?v=FGOStTMIFPI

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「なぜ南極の氷が減っているのか？」　**中山佳洋**, 2021 年 11 月 25 日, https://www.youtube.com/watch?v=iNL_SOsHjYg

YouTube【新学術領域研究「南極の海と氷床」チャンネル】「衛生が捉えた南極氷床融解の加速」　**福田洋一**, 2021 年 11 月 25 日, https://www.youtube.com/watch?v=_Emhd_Y2d5I

YouTube【極地研公式チャンネル】#96 「南大洋」**川合美千代** 2021 年 11 月 5 日 https://www.youtube.com/watch?v=_NEgY5lcJ1o

YouTube【極地研公式チャンネル】#95 「南極氷床」**杉山慎** 2021 年 10 月 29 日 https://www.youtube.com/watch?v=zX6psshvTjY

YouTube【極地研公式チャンネル】 #79 国立極地研究所 一般公開「極地研探検 2021」,「極地研に潜入！」, **藤田 秀二**,米倉綾香,低温室・アイスコア実験室, 2021 年 8 月 21 日, https://www.youtube.com/watch?v=ir_tcmcVOSs

YouTube【極地研公式チャンネル】#50 南極内陸部での氷の厚さの調査, 2021 年 8 月 21 日, https://www.youtube.com/watch?v=GTiQv0PGd-g

YouTube【極地研公式チャンネル】#51 深層アイスコアの掘削風景, 2021 年 8 月 21 日 https://www.youtube.com/watch?v=uTXzJKUI6tY

YouTube【極地研公式チャンネル】#52 深層アイスコアの現場処理, 2021 年 8 月 21 日 https://www.youtube.com/watch?v=5fvcwvnawXA

YouTube【極地研公式チャンネル】#53 低温実験室でのアイスコア処理作業, 2021 年 8 月 21 日 https://www.youtube.com/watch?v=MfSDIRdnP04

YouTube【極地研公式チャンネル】#54 アイスコアの連続融解解析作業, 2021 年 8 月 21 日 https://www.youtube.com/watch?v=vx6sVrW-kVs

2018 年度

新学術領域研究『南極の海と氷床』英語版ホームページ開設 http://grantarctic.jp/enhp/

池原実，白鳳丸 KH-19-1 次航海ブログ 2019 年 1 月 2 日～2 月 12 日 http://kh161mikehara.blogspot.com/

ブログ「南極観測隊便り 2017 - 2018」 http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/?page_id=151

ブログ「南極観測隊便り 2018 - 2019」 http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/?page_id=175

ブログ「アイスコア研究ブログ」 http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/?page_id=166

2017 年度

新学術領域研究『南極の海と氷床』日本語版ホームページ開設 http://grantarctic.jp

新学術領域研究『南極の海と氷床』ブログ開設 http://grantarctic.jp/gr_news/

新学術領域研究『南極の海と氷床』ツイッター開設 https://twitter.com/GRAntarctic17

－国際学会・国際会議・一般向けアウトリーチ企画の主催・共催など－

2021 年度

(協力) 南極氷床・南大洋変動ワークショップ, 高知大学海洋コア総合研究センター, 2022 年 1 月 18 日.

(協力) 地質標本館特別展「南極の過去と現在、そして未来 ―研究最前線からのレポート―」, 国立研究開発法人 産業技術総合研究所つくばセンター　地質標本館, 2021 年 8 月 3 日～2021 年 12 月 26 日.

2019 年度

(協力) 「気候－海洋－氷床に関する特別展 ～過去・現在・未来を探る～」東京大学大学院総合文化研究科・教養学部 駒場博物館展示, 参加者人数：約 2,000 名, 2019 年 7 月 20 日）～9 月 29 日.

2018 年度

(主催) First GRAntarctic International Symposium and the Ninth Symposium on Polar Science, 東京, 2018 年 12 月 3 日～4 日

(後援) 石巻専修大学 ライフサイエンスセミナー「南極の海と氷から知る環境変動」, 石巻専修大学, 2018 年 11 月 2 日

2017 年度

(共催) International Symposium on Cryosphere and Biosphere 国際雪氷学会主催, 京都, 2018 年 3 月 14 日～19 日

(主催) 新学術領域研究「南極の海と氷床」スプリングスクール:『南極 春の学校 2018 ～目指せ国際・学際研究者～』, 八王子大学セミナーハウス, 参加者 80 名, 2018 年 3 月 11 日～13 日.

(後援) 日本第四紀学会シンポジウム「改めて問う”縄文海進”とは何か？ ―第四紀学的支店からの再検討－」, 明治大学, 2018 年 2 月 17 日.

(共催)高知大学・国立極地研究所　合同公開シンポジウム「南極：大陸・海・氷床を探る」, 高知大学, 2017 年 7 月 26 日.

プレスリリース集

2021 年度

2021 年 12 月 27 日
青木茂, 他「アザラシによる観測で 秋～冬の南極沿岸の海洋環境が明らかに」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211227.html
https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/211227_pr.pdf

2021 年 12 月 15 日
佐藤和敏, 猪上淳,「海洋由来のエアロゾル粒子が南極海上空の雲の性質に影響～衛星観測をもとに解明～」
https://www.kitami-it.ac.jp/wp-content/uploads/2021/12/20211215pressrelease.pdf
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211215.html

2021 年 12 月 13 日
植村立, 他「氷期の南極の硫酸エアロゾルはどこから飛来したのか？～南米アタカマ砂漠からの寄与～」
https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/upload/20211213_env.pdf
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211213.html

2021 年 11 月 11 日
杉山慎 「グリーンランドの氷河融解は 21 世紀から始まった～1980 年代の航空写真と最新の人工衛星データから氷河の縮小を解析～」https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/211111_pr3.pdf

2021 年 11 月 4 日
杉山慎, **箕輪昌紘**, 他,「夏に最も冷える，パタゴニアの湖～氷河が流れ込む湖で水温の季節変化を世界で初めて解明～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/211104_pr.pdf

2021 年 10 月 26 日
平野大輔, 溝端浩平, 佐々木裕子, 村瀬弘人, **田村岳史**, **青木茂**,「巨大な海洋渦が暖かい海水を南極大陸方向へ運ぶ 東南極トッテン氷河を下から融かす主要な熱源」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211026-2.html

2021 年 10 月 26 日
庭野匡思,「札幌の積雪中に存在する光吸収性粒子が融雪に与える影響を国内・国外由来に分離して推定しました」
https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R03/031026/press_release031026.pdf

2021 年 9 月 29 日
池上 隆仁, 木元 克典, 中村 由里子, Kjell R. Bjørklund, 倉本 直樹, 植木 正明, 大田 由一, 小野寺 丈尚太郎, 原田 尚美, 本多 牧生, 佐藤 都, 渡邉 英嗣, 伊東 素代, 西野 茂人, 菊地 隆,「ケイ質殻プランクトンのシリカ定量方法を開発 ～北極海のケイ素循環における放散虫の役割を解明～」
https://www.kaiseiken.or.jp/pressrelease/lib/20210929.pdf
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20210929/

2021 年 9 月 13 日
井尻暁, 他「セルソーターによる円盤型珪藻の完全分離手法を確立　～極域の海洋環境変動の高精度復元に道筋～」
https://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2021_09_13_01.html

2021 年 9 月 9 日
服部晃久, **青山雄一**, **奥野淳一**, **土井浩一郎**,「東南極リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS 観測と地殻変動の検出」
https://www.soken.ac.jp/news/7113/

2021 年 8 月 26 日
小林英貴, **岡顕**, **阿部彩子**, **山本彬友**, 「南大洋が鍵を握る氷期の大気中二酸化炭素濃度変化」
https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2021/20210826.html

2021 年 8 月 23 日
庭野匡思, 他, 「近年のグリーンランド氷床で増加している降雨の変動の実態を詳細に定量化することに成功」
https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R03/030823/press_030823.html

2021 年 8 月 23 日
岡顕,他,「南大洋の温暖化が引き起こした氷期における大西洋深層循環の急激な変化」
https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2021/20210820.html
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210820.html

2021 年 8 月 19 日
石輪健樹, **奥野淳一**, **菅沼悠介**,「東南極氷床の拡大は従来説よりも早かった～最終氷期の氷床変動メカニズムの解明へ～」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210819.html

2021 年 7 月 12 日
箕輪昌紘, **杉山慎**, 青木茂, 他,「南極の氷河の下で海と氷を直接観測～熱水掘削によって氷床融解のメカニズムを解明～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/2021/07/post-874.html

2021 年 7 月 8 日
村井芳夫, エヴゲニ・ポドリスキ, **杉山 慎** 「世界初！海底地震計を使い，氷河流動の検出に成功～微動を使った新しい氷河観測手法を提案～」https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/210708_pr3.pdf

2021 年 6 月 17 日
シェリフ多田野サム，他，「最終氷期の南極大陸の気温低下と氷床高度の見積もりを刷新」
https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2021/20210604.html
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210617-3.html

2021 年 6 月 14 日
青木茂，他，「南極大陸に向かって海流が接近中 ～南極海の深層が暖まるメカニズムを発見～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/210614_pr.pdf

2021 年 4 月 13 日
近藤研，**杉山慎**，榊原大貴，福本俊吾，「Modeling past and future glacial floods in northern Greenland」
https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/modeling-past-and-future-glacial-floods-in-northern-greenland/

2020 年度

2021 年 3 月 25 日
Evgeny Podolskiy，**杉山慎**，他，「グリーンランドで氷河ポンプの直接観測に成功 ～氷河前に湧き上がる融解水の実態を解明～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/210325_pr.pdf

2021 年 3 月 18 日
巻俊宏，**山縣広和**，小知井秀馬，**野木義史**，「海中ロボットによる海氷裏面の全自動計測に成功～ 南極海での調査に向けて大きな一歩 ～」https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3513/

2021 年 3 月 10 日
宮原ひろ子、門叶冬樹、堀田英之、**堀内一穂**，他，「17 世紀のマウンダー極小期直前の太陽周期の変遷を解明 ～数十年規模の太陽活動低下のプロセスに重要な示唆～」
https://www.musabi.ac.jp/wp-content/uploads/2021/03/pr_20210310_1.pdf

2021 年 3 月 10 日
佐藤和敏，猪上淳，他，「タスマン海の水温上昇が南極半島の異常高温を引き起こす ～遠隔応答を通じた中緯度海洋変動による南極大陸周辺の大気循環変動の解明～」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210309.html

2021 年 2 月 24 日
杉山慎，他，「北極域の氷河が引き起こす洪水災害のしくみを解明～極北の集落カナック村に現れた気候変動の爪痕～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/2021/02/post-796.html

2021 年 2 月 23 日
池原実，他「南極海での近年の海氷拡大が自然変動である可能性 ～南極海における過去 2000 年間の海氷分布がエルニーニョや南半球環状モードと連動して変化していたことを解明～」
https://www.kochi-u.ac.jp/information/2021021900016/files/HP.pdf

2020 年 12 月 24 日
佐野雅美、**真壁竜介**、**黒沢則夫**、**茂木正人**、**小達恒夫**，「海洋生物試料の固定・保存におけるルゴール液の汎用性を確認～遺伝子解析・安定同位体比分析・形態観察に有効～」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20201224.html

2020 年 10 月 27 日
塩崎拓平，藤原周，井之村啓介，広瀬侑，橋濵史典，原田尚美，「南極海海氷域における窒素固定の発見 －窒素固定が全球プロセスであることが明らかに－」
https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2020/20201027-1.html

2020 年 9 月 30 日
杉山慎，「氷河ポンプがフィヨルドの豊かな海洋生態系を支える～海の栄養分が補給・撹拌・移送されるしくみを解明～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/2020/09/post-727.html

2020 年 9 月 18 日
川又基人，**菅沼悠介**，**土井浩一郎**，三澤啓司，平林幹啓，服部晃久，澤柿教伸，「南極現地調査で明らかになった過去の急激な南極氷床の融解とそのメカニズム」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20200918.html

2020 年 9 月 16 日
青木茂，他、「南極の海の底、もう甘くするのは止めました！？～数十年続いた淡水化傾向が逆転。南極海観測網の継続に期待～」https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/200916_pr2.pdf

2019 年度

2020 年 3 月 27 日
岩城一郎，金山進，森山修治，**中村和樹**，「キャンパス強靭化プロジェクト中間報告」
https://www.city.koriyama.lg.jp/uploaded/attachment/14924.pdf

2020 年 3 月 10 日
大藪幾美，**川村賢二**，**飯塚芳徳**，阿部彩子，他，「氷期最寒期のダスト飛来量を複数の南極アイスコアから復元 ～ダスト起源のパタゴニアからの輸送距離の違いを反映～」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20200310.html

2020 年 2 月
Levermann A., Winkelmann R., Albrecht T., Goelzer H., Golledge N. R., **Greve R.**, Huybrechts P., Jordan J., Leguy G., Martin D., Morlighem M., Pattyn F., Pollard D., Quiquet A., Rodehacke C., Seroussi H., Sutter J., Zhang T., Van Breedam J., Calov R., DeConto R., Dumas C., Garbe J., Gudmundsson G. H., Hoffman M. J., Humbert A., Kleiner T., Lipscomb W. H., Meinshausen M.,

Ng E., Nowicki S. M. J., Perego M., Price S. F., **Saito F.**, Schlegel N.-J., Sun S., van de Wal R. S. W.,「The Antarctica Factor: model uncertainties reveal upcoming sea-level risk.」
https://www.pik-potsdam.de/news/press-releases/the-antarctica-factor-model-uncertainties-reveal-upcoming-sea-level-risk

2020 年 1 月 20 日
櫻井 敬久, 三宅 芙沙, **堀内一穂**,「紀元前 660 年頃の宇宙線増加の詳細を解明～複数の超巨大太陽面爆発の連続発生を示唆～」
https://www.yamagata-u.ac.jp/jp/files/2415/7956/1722/PRESS_20200120_sakurai.pdf

2019 年 11 月 1 日
小長谷貴志, **阿部彩子**,「氷期から間氷期への遷移期の温暖化によって生じた急激な気候の変化」
https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/info/20191105.html

2019 年 9 月 20 日
佐藤和敏,「Weathering Antarctic storms – Weather balloon data boost forecasting skill」
https://www.eurekalert.org/news-releases/482071

2019 年 8 月 28 日
石野咲子, **服部祥平**,「硫黄同位体組成が解き明かす南極硫酸エアロゾルの起源 －氷期に海洋生物起源の硫酸エアロゾルが減少した新証拠を発見－」https://www.titech.ac.jp/news/2019/045087

2019 年 8 月 26 日
東久美子, **平林幹啓**, **本山秀明**, 他,「南極の海洋生物起源の硫酸塩エアロゾルは氷期に減少していた －南極ドームふじアイスコア分析データの解析から－」https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20190826-2.html

2019 年 6 月 20 日
宮原ひろ子, **堀内一穂**, 他,「過去の太陽活動/宇宙線変動史を解明する新手法を開拓～白水台の石灰棚に残された過去の太陽活動変動～」https://www.musabi.ac.jp/wp-content/uploads/2019/06/pr_20190620.pdf

2019 年 5 月 10 日
石輪健樹, 他,「海洋堆積物コアから解明された最終氷期における短期間の氷床変動」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20190510.html

2019 年 4 月 3 日
飯塚芳徳, 他,「世界で初めて地下氷から北極海の海洋環境を復元～北極海の海洋環境を包括的に復元する指標を提唱～」
https://www.hokudai.ac.jp/news/2019/04/post-519.html

2018 年度

2018 年 12 月 3 日
「AI(人工知能)を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確立」
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2018/pr20181203/pr20181203.html

2018 年 11 月 29 日
「北極から南極へ気候変動が伝わる 2 つの経路 ～南極アイスコアのデータから立証～」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20181129.html

2018 年 10 月 23 日
佐藤和敏, **猪上淳**, 他,「南極海での船上気象観測で豪州の低気圧予報を改善 ～豪州の観測船と日本のデータ同化による南極予測可能性研究のさきがけ～
http://www.kitami-it.ac.jp/wp-content/uploads/2018/10/pressrelease20181023.pdf
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20181023.html
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20181023/

2017 年度

2018 年 3 月 7 日
植村立, 他,「南極の気温と二酸化炭素変動の不一致は日射量が引き起こす －過去 72 万年間の南極と周辺海域の温度変動を復元－」
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20180307.html
http://www.u-ryukyu.ac.jp/univ_info/announcement/data/press2018030701.pdf(リンク参照なし)

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

南極の気温と二酸化炭素変動の不一致は日射量が引き起こす
―過去72万年間の南極と周辺海域の温度変動を復元―

2018年3月7日
琉球大学
情報・システム研究機構 国立極地研究所
名古屋大学
東京大学
北海道大学
信州大学
山形大学

・南極アイスコアの同位体分析により、過去72万年間の南極と南大洋の温度変動を復元
・二酸化炭素濃度と南極の気温変動にずれがある一因が日射量の変動であることを示した
・南極の気温の自転軸傾斜角の変化に対する同調性が40万年周期で変動することを発見

琉球大学理学部の植村立准教授ら国内外11機関19名からなる研究グループは、日本の南極地域観測隊が南極ドームふじで掘削したアイスコア＊1の分析によって、過去72万年間の南極の気温と周辺海域の水温変動を復元しました。本研究のように、海水温も含めてアイスコアから復元したデータとしては、過去最長だった42万年間の記録を30万年延長するものです。地球温暖化をはじめとする気候変動を正確に予測することが社会的にも大きな課題となっています。今回の研究は、環境が大きく異なっていた過去について、二酸化炭素濃度や日射量の変動と気温変動との関係を明らかにしたもので、地球の気候変動のメカニズムの解明に役立つと期待されます。この成果は、2018年3月6日付「Nature Communications」誌にオンライン掲載されます。

研究の背景

過去72万年の間には、約10万年周期で大きな気温変動があったことが知られています。これは、氷期・間氷期サイクル＊2と呼ばれ、このサイクルでは、南極の気温変動は二酸化炭素濃度と似た変動パターンを示すことが知られていました。しかし、大気中の二酸化炭素濃度を変動させる直接的なメカニズムとしては南極の気温よりも、南極周辺の海洋環境の変動が重要な役割を果たしていると予想されています。また、これまでの研究では、南極の気温の方が二酸化炭素濃度変動よりも先に変動している可能性が指摘されてきました。このような二酸化炭素濃度と気温変動の関係性を理解するためには、同じ時間軸の上で南極と周辺海域の温度変動を正確に復元することが鍵となります。

研究の成果の概要

本研究では、南極ドームふじアイスコアの氷の同位体分析＊3に基づいて、過去72万年間にわたる南極の気温とその周辺海域の水温変動を正確に復元しました。特に、2種類の同位体比を組み合わせることで、南極だけではなく周辺海域の水温も復元した手法としては、これまでの最長であった42万年間のデータを大きく延長したことになります。復元した周辺海域の海水温は、大気中の二酸化炭素濃度の変動と非常に高い相関を示しました（図1A）。この結果は、南極周辺の海洋が二酸化炭素濃度の変動を支配しているという仮説を支持するものです。南極の気温も、二酸化炭素濃度と似た変動を示していますが、周期的にずれている時代があることがわかります（図1B）。詳しくみると、南極の気温と周辺海域の海水温の差には、約4万年の周期性があることがわかりました（図1C）。これは、約4万年周期で地球の自転軸傾斜角が変動することで引き起こされる年平均日射量の変動＊4が原因であると考えられます。この結果は、南極の気温変動が年平均日射量の影響を強く受けていることを示しており、このことが二酸化炭素濃度と南極の気温変動の不一致の原因の一つであると考えられます。

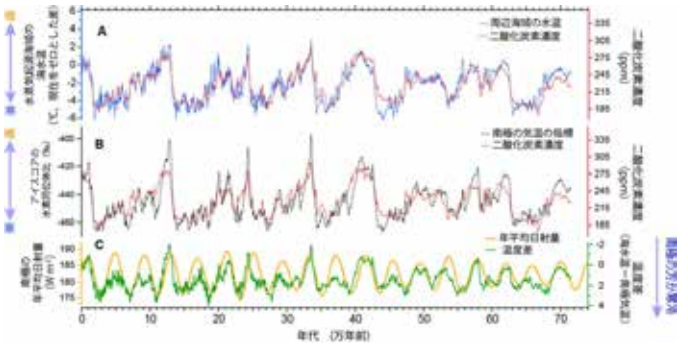


図1： 温度と二酸化炭素濃度の比較
A) 南極周辺海域の水温（青線、本研究）と大気中の二酸化炭素濃度（赤線、複数のアイスコアのデータ） B) 南極の気温（黒線、本研究）と二酸化炭素濃度（赤線）、 C) 周辺海域と南極の温度差（緑線、本研究）と南極の年平均日射量（黄線）

では、南極の気温は日射量の影響を直接受けているのでしょうか？本研究の結果を4万年周期の変動に注目して解析すると、年平均日射量の変化に対して、南極気温、二酸化炭素、海水温の順番で遅れて変動していることがわかりました。この結果は、日射量だけで南極の気温変動が直接的に決まるという説を否定するものです。さらに、この日射量に対する遅れは40万年の周期で最小の値をとる現象を発見しました。つまり、40万年ごとに年平均日射量、南極気温、海水温等が密接に同調して変動する時期があるといえます。40万年の周期は、地球の軌道の離心率（地球の軌道が正円から離れている度合い）に対応していると考えられます。地球規模の炭素循環と海洋循環にも40万年周期があることから、この現象の原因には海洋環境の長期的な変動が関連していると考えられます。なお、現在は約40万年ぶりに離心率が小さくなる周期が始まった時代にあたるため、新しい同調期に入っている可能性があります。

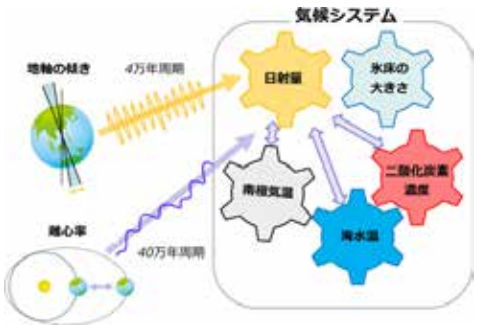


図2： 地球の日射量変動と気候要素の関係
左部分：自転軸傾斜（地軸の傾き）の変動が4万年周期の年平均日射量変動を引き起こす。軌道が円から離れる度合い（離心率）は40万年の周期をもつ。
右部分：地球の気候要素は日射量の影響を受けながら、それぞれのメカニズムで変動する。

今回の研究は、地球の気候システムを理解するために、環境が大きく異なっていた過去について、気候要素がどのように変動していたかを明らかにしたものです。現在、人為起源の排出により、大気中の二酸化炭素濃度は過去80万年間で最高の値を

記録しています。その結果、本来は数千年から数万年の時間スケールで変動する海洋循環や氷床量にも影響を与える可能性があります。今後、他の地域の気候復元データや気候モデルによる数値実験によって、メカニズムをさらに検証する研究が重要になると考えられます。

用語

＊1　アイスコア：南極や北極の氷床を掘削して得られた円柱状の氷試料のこと。本研究で使用したドームふじアイスコアは、南極地域観測事業「第2期ドームふじ観測計画」により2003～2007年に掘削された。

＊2　氷期・間氷期サイクル：過去約100万年間にわたって、地球が長い寒冷な気候（氷期）と相対的に短い温暖期（間氷期）を約10万年周期で繰り返していた現象のこと。

＊3　氷の同位体分析：氷の酸素と水素の安定同位体比（$^{18}O/^{16}O$と$^{2}H/^{1}H$）を測定することで、過去の気温変動を推定することができる。本研究では2種類の同位体比を組み合わせることで、雪として凝結した南極の気温に加えて、降雪をもたらした水分子が蒸発した海域の温度も推定した。本文中の「周辺海域」というのは、「雪をもたらした水分子が蒸発した海域」のこと。

＊4　自転軸傾斜角（地軸の傾き）が変動することによる年平均日射量の変動は緯度によって異なる。極域と赤道で最も大きく変動し、中緯度ではほとんど変動しない。

研究サポート

本研究は日本学術振興会及び文部科学省の科学研究費補助金（21221002、26550013、17H06104、17H06320）の支援を受けて行われました。また、国立極地研究所の共同研究費、研究プロジェクト（KP305）の支援を受けました。

論文情報

論文名： Asynchrony between Antarctic temperature and CO2 associated with obliquity over the past 720,000 years
著者: 植村立[1*], 本山秀明[2,3], Valérie Masson-Delmotte[4], Jean Jouzel[4], 川村賢二[2,3], 東久美子[2,3], 藤田秀二[2,3], 倉元隆之[2#], 平林幹啓[2,3], 三宅隆之[2], 大野 浩[2##], 藤田耕史[5], 阿部彩子[6,7], 飯塚芳徳[8], 堀川信一郎[8§], 五十嵐誠[9¶], 鈴木啓助[10], 鈴木利孝[11], 藤井理行[2]

1 琉球大学 理学部, 2 情報・システム研究機構 国立極地研究所, 3 総合研究大学院大学 極域科学専攻, 4 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), CEA-CNRS-UVSQ, France, 5 名古屋大学大学院 環境学研究科, 6 東京大学 大気海洋研究所, 7 国立研究開発法人 海洋研究開発機構, 8 北海道大学 低温科学研究所, 9 国立研究開発法人 理化学研究所, 10 信州大学理学部, 11山形大学 学術研究院

#現在 福島県環境創造センター, ##現在 北見工業大学 地球環境工学科, §現在 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター, ¶現在 丸善株式会社
雑誌名：Nature Communications

DOI：10.1038/s41467-018-03328-3　公表日：2018年3月6日

いいね！ 8　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

報道発表

北見工業大学 KITAMI Institute of Technology　国立極地研究所　JAMSTEC 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

平成 30 年 10 月 23 日
国立大学法人北見工業大学
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
国立研究開発法人海洋研究開発機構

南極海での船上気象観測で豪州の低気圧予報を改善
～豪州の観測船と日本のデータ同化による南極予測可能性研究のさきがけ～

北見工業大学（学長：鈴木聡一郎）の佐藤和敏特任助教、国立極地研究所（所長：中村卓司）の猪上淳准教授、海洋研究開発機構（理事長：平朝彦）の山崎哲研究員を中心とする国際研究チームは、2017年の夏季（11月）に南極海で実施されたオーストラリア（以下、豪州）観測船「オーロラ・オーストラリス」による特別高層気象観測が、2017年12月に豪州東部に大雨をもたらした低気圧の進路予報にどのように影響するのかを調べ、南極海での観測を予報計算に取り込むことで中緯度の低気圧の進路予報の精度が向上することを明らかにしました。

近年、世界中で豪雨に伴う洪水や土石流などの被害が頻繁に報告されるようになりました。南半球の豪州やニュージーランドなどのオセアニア地域でも、低気圧に伴う大雨の気象災害が増加しています。これらの被害を軽減するためには、事前に低気圧の進路や強さを正確に予測することが、防災対策上重要となります。本研究チームによるこれまでの成果で、北極域での高層気象観測が北半球の台風等の進路予報の精度を向上させることが明らかになっていますが（文献1）、本研究は、南半球でも同様に高緯度域の高層気象観測が中緯度の気象予測を向上させるかどうかを調査したものです。

進路予報の精度が向上したのは、南極海での観測データにより、予報の計算で用いる初期値（計算を始める初期時刻の大気の状態）が改善され、低気圧の進路に影響する上空の大気循環が改善されたためです。本成果は、南極地域での科学的観測研究が、南半球の中緯度での減災に役立つ可能性を初めて実証したもので、南極地域観測の意義を新しい側面から示したものであると言えます。

これらの成果は、米国地球物理学連合発行の学術誌「Geophysical Research Letters」のオンライン版に2018年10月18日に掲載されました。

＜研究の背景＞

近年、豪州やニュージーランドなどでは、南半球で発達する低気圧に伴う大雨により、人的被害や産業界に大打撃をもたらしています。これらの被害を軽減するためには、低気圧の動向を数日前から正確に予報し、事前に災害対策を講じる必要があります。精度の良い予報を行うためには、計算を始める初期時刻の大気の状態をより正確にすることが有効で、気象観測の少ない領域での観測を充実させることがその解決法の一つです。

本研究チームは、北半球において、観測数が少ない高緯度（北極域）で観測点や観測頻度を増やすと、予報のための初期場の不確実性が小さくなり、その結果、日本やアメリカ（中緯度）で発生する低気圧の予報の精度が向上することを明らかにしてきました（文献 1, 2, 3）。しかし、南極域の観測データが南半球の天気予報の精度へ与える影響についてはこれまで明らかにされていませんでした。南半球は、北半球に比べて観測の起点となる陸域が限られ、観測密度や観測頻度が極端に少ない状態です。したがって、特別気象観測を実施すると低気圧の予報精度が大きく向上することが予想されます。

そこで、南極海上で高層気象観測が実施された 2017 年 11 月から 12 月に着目し、南極海での高層気象観測データが低気圧の予測に与える影響を調べました。

〈研究の内容〉

この年の夏は、アメリカの「MARCUS」プロジェクト（注 1）の一環として、南極海で豪州観測船「オーロラ・オーストラリス」によるラジオゾンデ観測（注 2）が行われました（図 1）。この特別観測のデータが予報の取り込まれた場合に、予報に用いられる大気の初期場や低気圧の進路予報（図 2）の精度が向上するのか調べました。

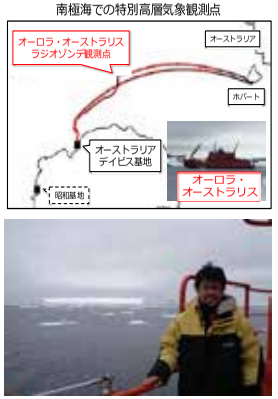


図 1:（上）特別高層気象観測を実施していた観測点。「オーロラ・オーストラリス」で 1 日 4 回実施。（下）第一著者が参加した MARCUS の南極航海の様子。

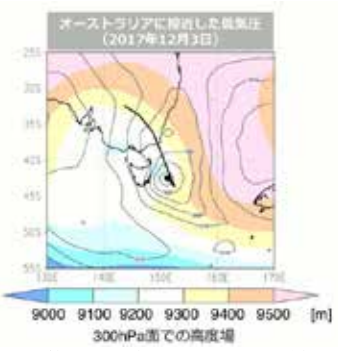


図 2: 低気圧（2017 年 12 月 3 日）における地表気圧と 300hPa 面での高度場。黒線は、低気圧発生から予報時刻までの経路。この時刻には低気圧はタスマニア島の東側に位置していた。

まず、海洋研究開発機構で開発されたデータ同化システム(注 3)を用い、特別観測データを取り込んだ場合(「特別観測あり」)と取り込まなかった場合(「特別観測なし」)それぞれで、予報に必要な大気の初期値を計算しました。次に、同機構で開発された大気大循環モデル(注 4)で、それぞれの場合の初期値を用いてアンサンブル予報実験(注 5)を行いました。

特別観測ありの予報の場合では、地上低気圧の位置に影響する高度約 9000m の気圧の谷(トラフ)の位置が予測できており、実際の位置に近い予報が多くなりました(図 3 左)。一方、特別観測なしの予報の場合では、トラフの位置が正確に予報できず、低気圧の位置が前者よりも約 350km 北側にずれて予報されていました(図 3 右)。さらに、アンサンブル予報での低気圧の中心位置のばらつきは「特別観測あり」の方が小さく、特別観測のデータが初期値に組み入れられる(同化される)と不確実性が小さくなることが示されました。

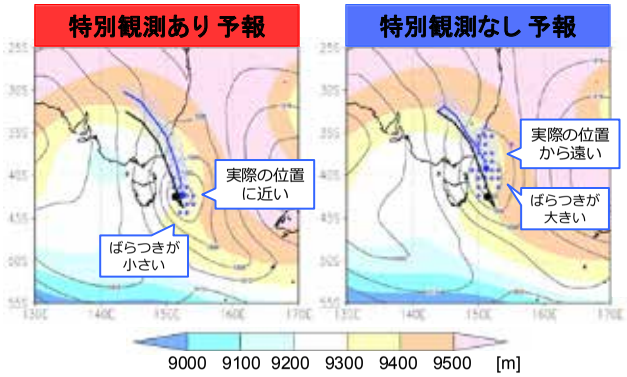


図 3: 特別観測あり予報(左)と特別観測なし予報(右)それぞれの上空 300hPa(高度 9000m 付近)の高度場(色)と地表面気圧(線)。黒線は実際の低気圧の経路、青の細い線は複数回実施した予報(アンサンブル予報)で得られた低気圧の経路。青線は、アンサンブル予報の平均した経路。特別観測あり予報では、特別観測なしに比べて黒線に近いメンバーが多く、ばらつきが小さい。

予報の精度は、「特別観測あり」予報でも予報期間が長くなれば悪くなりますが、「特別観測なし」はさらに精度が悪くなり、予報の不確実性も大きくなります。この不確実性は空間的に伝播することが考えられるため、低気圧の予報精度に影響していた「特別観測あり」と「特別観測なし」の不確実性の差(特別観測の影響)が時間と共にどのように空間的に広がるのか調べました(図 4)。解析の結果、南極大陸と異なり南極海では観測点がないことから、特別観測がないと不確定性が大きくなり、さらに上空の強い西風により南極海全体に広がっていることが分かりました。

<今後の展望>

本研究から、南極海で特別観測を実施することで、南半球中緯度の予報の精度が向上することが分かりました。しかし、船舶による高層気象観測を毎年実施することは難しいため、持続可能な南極域の観測網を構築するのが大きな課題となっています。

世界気象機関では、極域に関わる様々な時間スケールの気象予測を向上させるため、2013 年から 10 年計画の極域予測プロジェクトを開始しています。南半球では 2018 年 11 月 16 日から 2019 年 2 月 15 日までの 3 ヶ月間を集中観測期間と設定し、既存の観測点や研究船によるラジオゾンデ観測の頻度を増やす予定です(3 カ月間で約 2400 発を追加)。日本も気象庁と国立極地研究所が共同で昭和基地やドームふじ基地において特別観測を実施します。これらの観測データを用いて、予報の精度を向上させるために最も有効な観測点や観測頻度を調査し、南半球の気象予報の精度を向上させるのに効率の良い観測体制を提唱する予定です。本成果は、これらの国際集中観測の先駆けとなる成果で、今後の観測・研究の指針となるものです。

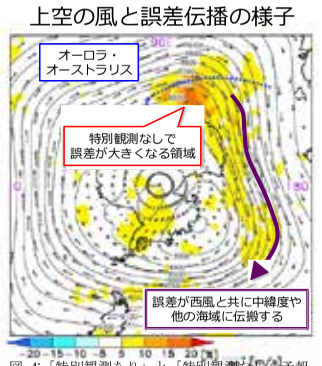


図 4:「特別観測あり」と「特別観測なし」予報での予報誤差の差(南極海の観測により大気循環が改善された)が大きい領域。観測の有無が原因となる予報誤差が強い西風により広範囲に拡大し、低気圧の進路予測に影響していた。

<研究サポート>

本研究は、科学研究費補助金 新学術領域研究(研究領域提案型)(18H05053)、日本学術振興会海外特別研究員の助成を受けて実施されました。

<注>

注 1 MURCUS

2017 年 10 月～2018 年 3 月に豪州の観測船「オーロラ・オーストラリス」により雲や大気の観測を行った観測プロジェクト。

https://www.arm.gov/publications/backgrounders/docs/doe-sc-arm-16-055.pdf

注 2 ラジオゾンデ観測

センサーをバルーンに取り付け、気温や風などの気象要素の鉛直分布を観測する。対流圏上層(高度約 10km)を超えて成層圏まで観測が可能。世界の約 800 カ所で 1 日 2 回(場所によっては 1 回)の頻度で実施され、そのデータは GTS(Global Telecommunication System)を介してリアルタイムに通報され、各国の気象予報センターが利用できる形式となっている。

注３　データ同化
数値シミュレーションモデルに観測データを融合させる手法のこと。大気モデル等で数値シミュレーションを行う際に、初期値として実際の観測データをデータ同化により取り入れることでより精度の高い大気状態の再現性（初期値）が得られ、より精度の高い予測が可能になる。JAMSTEC は独自のアンサンブルデータ同化システムと予報モデルの両方を有しており、大気大循環モデル AFES（Atmospheric general circulation model for Earth Simulator）と同化コード LETKF（局所変換アンサンブルカルマンフィルター: Local Ensemble Transform Kalman Filter）を JAMSTEC のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」上で実行し、全球大気再解析データセット「ALERA2」を構築している。
http://www.jamstec.go.jp/alera/alera2.html

注４　大気大循環モデル
流体力学や熱力学の方程式を基に、大気の温度・湿度や流れの変化を計算するためのプログラム。大気大循環モデルを用いて数日から経年スケールの大気現象をシミュレートし、メカニズムや予測可能性を調査する。

注５　アンサンブル予報
似ているがわずかに異なる初期値を複数個作成し、それぞれの初期値から予報を行う手法。不確実性の情報を加味した天気予報が可能となる。

＜文献＞

文献 1: 国立極地研究所プレスリリース「北極域の気象観測で台風の進路予報が向上」（2018 年 8 月 30 日）
http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20180830.html

文献 2: 国立極地研究所プレスリリース「北極海上の高層観測で中高緯度の大気循環の再現性が向上− 観測データ空白域での海洋地球研究船「みらい」によるデータの役割−」（2013 年 3 月 6 日）
http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20130306.html

文献 3: 国立極地研究所プレスリリース「北極の気象観測で日本の寒波予測の精度が向上」（2016 年 12 月 21 日）
http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20161221.html

＜発表論文＞

掲載誌: Geophysical Research Letters
タイトル: Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations

著者:
佐藤 和敏
（北見工業大学 工学部 特任助教／日本学術振興会 海外特別研究員／Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre）
猪上 淳
（国立極地研究所 国際北極環境研究センター 准教授／総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻 併任准教授／海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 外来研究員）
Simon P. Alexander
（Australian Antarctic Division／Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre、オーストラリア）
Greg McFarquhar
（The University of Oklahoma、アメリカ）
山崎 哲
（海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 研究員）

URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL079037
DOI: 10.1029/2018GL079037
受理原稿公開日: 2018 年 10 月 18 日（オンライン公開）

お問い合わせ先
（研究内容について）
北見工業大学 特任助教 佐藤和敏（さとう かずとし）
E-mail: satokazu@mail.kitami-it.ac.jp
国立極地研究所 国際北極環境研究センター 准教授 猪上淳（いのうえ じゅん）
E-mail: inoue.jun@nipr.ac.jp
※10 月 24 日～12 月 7 日は研究航海のため、お問い合わせの際は下記広報室（担当）へご連絡ください。お取次ぎします。
（報道について）
北見工業大学 総務課広報担当
TEL:0157-26-9116 FAX:0157-26-9174 E-mail: soumu05@desk.kitami-it.ac.jp
国立極地研究所 広報室
TEL: 042-512-0655 FAX: 042-528-3105 E-mail: kofositu@nipr.ac.jp

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

北極から南極へ気候変動が伝わる2つの経路 ～南極アイスコアのデータから立証～

2018年11月29日

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
国立大学法人琉球大学

最終氷期にグリーンランドで起こった急激な気候変動が、「大気」による迅速な影響と、「海洋」によるはるかにゆっくりとした影響の2つの経路によって、南極大陸へ伝搬していたことが初めて実証されました。オレゴン州立大学、国立極地研究所、琉球大学などの国際共同研究チームがグリーンランドと南極で掘削された氷のデータから明らかにしました。この成果は科学雑誌「Nature」11月29日号に掲載されます。

現在のような間氷期には、大西洋の海流が熱帯から北大西洋に暖かい水を運ぶため、グリーンランドやヨーロッパは高緯度の割には温暖になります。一方、氷期にはこの海流が非常に弱くなり、グリーンランドは寒冷な状態になります。しかし、直近の氷期である最終氷期（11万年前～1万年前）には、突然、海洋の循環が強くなり、グリーンランドが数十年に約10℃という急激なペースで温暖化、その後寒冷化することがありました。最終氷期におけるこの激しい気温の上下変動は、ダンスガード・オシュガーイベント（以下、DOイベント）と呼ばれ、25回確認されています。

DOイベントでグリーンランドが温暖化すれば、地球の反対側にある南極の気候にも影響を与えるはずです。気候モデルを使ったこれまでの研究で、大気と海洋の2つの経路によって南極に影響が伝搬していることが予測されていました。大気の影響は迅速で、南極の周りに吹いている偏西風が低緯度側に移動し、南極の一部では温暖化を、他の地域では寒冷化を引き起こしたと考えられていました。また、海洋による影響は大気の変化よりはずっと遅く、200年かけて南極大陸の全体で寒冷化を引き起こしたと考えられていました。しかし、これを裏付ける気温や大気循環のデータは、十分には得られていませんでした。

南極とグリーンランドでは、過去数万年から数十万年の間に降った雪が自重で固まり氷になっています。この氷を掘削して取り出した円柱状の氷はアイスコアと呼ばれ、雪が降った当時の環境を読み解くことができます。今回、研究チームは、日本のドームふじ基地を含む南極大陸の5つの異なる場所から掘削されたアイスコアを使って、最終氷期における南極の空間的・時間的な気候変化を解析しました。具体的には、火山噴出物の層を指標にして5つのアイスコアの深さと年代を対応させ、DOイベント時の南極大陸上の気温分布とその変化のデータを得ることに成功しました。さらに、グリーンランドのアイスコアとも年代を対応させて両極の詳細な解析を行いました。気温と大気循環の変化はアイスコアの水分子の同位体比から明らかにしました。その結果、DOイベントの影響が大気と海洋の2つの経路によって北半球から南半球に伝わっていたことが実証されました。

研究チームのクリスト・ビザート氏（Christo Buizert、オレゴン州立大学）は、「北大西洋は2つの異なる時間スケールで南極にメッセージを送っていたのです。大気の経路はすぐに到着する携帯電話のメッセージのようなもので、海洋の経路は配達に時間がかかる郵便はがきのようなものです」と語っています。また、この結果は、長らく謎とされてきたグリーンランドと南極の気候変動のタイミングがずれている理由の説明にもなっています。

地球の気候変動メカニズムには未解明の部分が多くあります。本研究のように、DOイベントに代表される過去の急激な気候変動がどのように地球全体に影響したかを明らかにすることは、気候システムの理解に役立つと期待されます。

発表論文

掲載誌： Nature
タイトル：Abrupt Ice Age Shifts in Southern Westerlies and Antarctic Climate Forced from the North
著者：
Christo Buizert[1], Michael Sigl[2], Mirko Severi[3], Bradley R. Markle[4], Justin J. Wettstein[1,5], Joseph R. McConnell[6], Joel B. Pedro[7,8], Harald Sodemann[5], 東 久美子[9], 川村 賢二[9], 藤田 秀二[9], 本山 秀明[9], 平林 幹啓[9], 植村 立[10], Barbara Stenni[11], Frédéric Parrenin[12], Feng He[1,13], T.J. Fudge[4] and Eric J. Steig[4]
1 College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Oregon State University, USA
2 Laboratory of Environmental Chemistry, Paul Scherrer Institute, Switzerland
3 Department of Chemistry “Ugo Schiff”, University of Florence, Florence, Italy
4 Department of Earth and Space Science, University of Washington, USA
5 Geophysical Institute and Bjerknes Centre for Climate Research, University of Bergen, Norway
6 Desert Research Institute, Nevada System of Higher Education, USA
7 Centre for Ice and Climate, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark
8 Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, University of Tasmania, Australia
9 国立極地研究所 気水圏研究グループ
10 琉球大学 理学部 海洋自然科学科
11 Department of Environmental Sciences, University of Venice, Italy
12 Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, France
13 Nelson Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin, USA
論文公開日（冊子）： 2018年11月29日（木）

論文公開日（オンライン）：2018年11月28日（水）
URL： https://www.nature.com/articles/s41586-018-0727-5
DOI： 10.1038/s41586-018-0727-5

研究サポート

この研究は、アメリカ（オレゴン州立大学、ワシントン大、砂漠研究所、ウィスコンシン大学）、スイス（Paul Scherrer Institute）、イタリア（フィレンツェ大学、ヴェネツィア大学）、ノルウェー（ベルゲン大学）、デンマーク（コペンハーゲン大学）、オーストラリア（タスマニア大学）、フランス（グルノーブル・アルプ大学）、日本（極地研、琉球大）の8か国の研究者が共同で実施しました。日本での研究はJSPS科研費（新学術領域研究17H06320）の助成を受けました。

※本リリースのイラストはOliver Day氏（オレゴン州立大）によるものです。

お問い合わせ先

国立極地研究所 広報室

お問い合わせフォーム

いいね！ 44　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）
Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

発表・掲載日：2018/12/03

AI（人工知能）を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確立

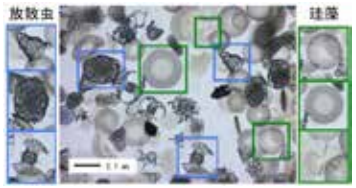
－高速自動化した革新的な地層解析に道筋－

ポイント

- 専門技術者と同じ精度を保ち、大量の微化石を高速で自動鑑定
- 人の手では成し得なかったスピードで微化石を大量に自動分取
- 石油探鉱などでの地層解析の高精度・高速度化や各種分野での活用に期待

概要

国立研究開発法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】（以下「産総研」という）地質調査総合センター 地質情報研究部門【研究部門長 田中 裕一郎】海洋地質研究グループ 板木 拓也 主任研究員、日本電気株式会社【代表取締役執行役員社長 兼 CEO 新野 隆】（以下「NEC」という）、株式会社マイクロサポート【代表取締役社長 松本 泰治】（以下「マイクロサポート」という）、三谷商事株式会社【代表取締役社長 三谷 聡】（以下「三谷商事」という）の共同開発グループは、地層を構成する堆積物に含まれる多様な粒子の中から、非常に壊れやすく複雑な形態を持つ微化石を、AI（人工知能）を用いて大量に鑑定し、自動的に分取するシステムを世界で初めて開発した。このシステムにより、これまで膨大な時間と労力をかけて人が行ってきた微化石の選別作業を、自動的に高速で行うことができる。微化石の鑑定による地層判定と、分取された微化石から詳細な年代を推定することで、石油探鉱などで迅速で高精度な地層解析が可能となる。



複数の微化石が集合した顕微鏡写真
さまざまな形態の放散虫や珪藻の微化石が見られる。

開発の社会的背景

資源探鉱や地質災害への対策などで、現代社会には地層の解析を必要とする場面が多々見られる。地層を解析するために有効なツールのひとつが「微化石」である。微化石は、地層中に含まれる放散虫、有孔虫や珪藻など、数マイクロメートルから数ミリメートルの大きさの生物の化石である。微化石の鑑定から、その地層ができた時代や、その当時の環境を特定できる。さらに微化石の微量元素組成や同位体比組成の測定から、地質ができた時代やその環境に関する詳細な情報が得られる。このように微化石は地層解析を進めるための重要な指標であり、地層の成り立ちや地球環境の変遷を研究する上で不可欠なツールである。

しかし、微化石は複雑な形態を持つため、これまでは熟練した微化石の専門技術者が長時間かけて顕微鏡下で微化石を1つずつ手作業で鑑定していた。さらに微化石の微量元素組成や同位体比組成を測定するには、顕微鏡下で微化石を1つずつ拾い上げて、専用の試料台に整理して再配置する必要があるため、専門技術者でも相当な時間と労力がかかっていた。また、微化石に限らず微小な粒子を取り扱う鉱工業や農林水産業、医療分野などの検査試験などでも、人材確保や労働時間の軽減が求められている。

研究の経緯

産総研 地質調査総合センターは、多数の微化石専門技術者を配置し、海洋や陸上の調査によって多くの知見とデータを蓄積してきた。しかし、専門技術者が微化石を顕微鏡下で1つずつ鑑定し、分取する地道な作業は微化石による地層解析が始まってから50年以上ほとんど変わらなかった。

2016年から産総研は微化石を用いた地層解析技術の革新を目指し、長年AI技術を開発してきたNEC、精密なマイクロ・マニピュレーション技術を実用化しているマイクロサポート、顕微鏡画像の精密なイメージングを得意とする三谷商事と共同で、大量の微化石を種レベルで鑑定・分取できるシステムの開発に着手した。

なお、この開発は、独立行政法人 日本学術振興会の新学術領域研究（研究領域提案型）「南大洋の古海洋変動ダイナミクス」（JSPS KAKENHI Grant Number JP17H06318）、基盤研究(B)「珪質微化石の殻に記録された海洋環境：同位体比および極微量元素の種レベル分析」（JSPS KAKENHI Grant Number JP18H01329）による支援を受けて行った。

研究の内容

今回開発したシステムは、顕微鏡部、マイクロ・マニピュレーター部、AI部からなる（図1）。顕微鏡部は、コンピューター制御された電動X-Y ステージと高解像CCD顕微鏡カメラが実装され、自動的に微化石などの多様な粒子の画像を取得し、それらの位置を精密に記録できる。マイクロ・マニピュレーター部は、微化石の位置情報をもとに微化石を分取し、所定位置に集積する機能を持つ。マイクロ・マニピュレーターの先端は、繊細でデリケートな微化石を壊さずに分取するため、2本の針で摘まむ一般的なタイプの箸型ではなく、極細のガラスチューブで空気を吸引して微化石を吸着するスポイトタイプを採用した。AI部の学習アルゴリズムには、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network; CNN）を搭載したディープラーニングのソフトウェアを採用したことで、これまでの機械学習では困難であった複雑な形態の微化石を迅速、正確に鑑定することが可能となった。また、顕微鏡のステージ上に粒子を散布すると複数の粒子同士が重なり、それが画像処理の際に1つの粒子と誤判定されてしまうため、散布した粒子が一定間隔で配列するような試料台を新たに考案・作成した。これらの複数の機能を有する総合的なシステムの開発により、顕微鏡のステージ上の試料台に散布した多数の粒子の画像を取得し、そこに含まれている微化石をAIによって鑑定し、それらを破壊することなくマイクロ・マニピュレーターで分取することを自動で、連続的に行えるようになった。

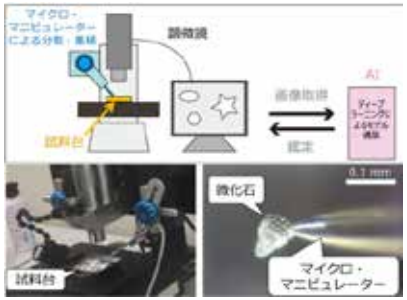


図1 今回開発したシステムの全体像
下左写真：試料台に微化石を散布し、マニピュレーターで分取する様子。
下右写真：マニピュレーター先端部の拡大。

今回開発したシステムの作業では、学習フェーズを経た後、運用フェーズを実施する（図2）。

学習フェーズでは、①産総研で保管する地質コレクションを用いて大量の粒子画像を取得し、学習画像（教師データ）として整備する、②特定の微化石を含むさまざまな粒子の形状をAIが学習してモデルを構築する。①では、例えば教師データとした3万個の粒子画像を取得するのに数か月を要していたところを、今回開発したシステムに搭載した画像処理により、わずか数日で収集できた。②では、教師データを用いて、AIで特定の微化石を鑑定できるモデルを構築する。正答率が十分に上がるまでモデルのテストと再構築を繰り返し、図3のように非常に酷似した2種の放散虫について、90 %以上の正答率で自動鑑定できるモデルが構築できた。

運用フェーズでは、まず①顕微鏡のステージ上の試料台に散布した微化石を含む粒子の画像を自動的に取得し、同時に試料台上の位置情報をシステムが記憶する。次に②学習フェーズの②で構築したモデルを用いて微化石を鑑定する。③分取対象の微化石をシステム上で選択すると、記憶した位置情報をもとにマイクロ・マニピュレーターで対象となる微化石を分取し、所定の位置に集積する。これらの大量に集積された微化石は、微量元素組成や同位体比組成などの化学分析の試料として用いることができる。

従来、こうした作業を行うには、専門的な鑑定技術をもつ人材の育成から始めると数年、教師データとなる画像の取得と整備に数か月、単一種の微化石1,000個体の鑑定と分取に数日を要していた。一方、今回開発したシステムでは、数か月で教師データとなる画像の取得とAIを用いたモデルを構築し、単一種の微化石1,000個体の鑑定・分取を3時間程度で行うことができる。運用フェーズでは特定の微化石の分取と集積を長時間、自動的に行えるので、地層解析を効率化できる。また石油探鉱などでは、このシステムによって迅速で高精度な地層解析が可能となる。さらに、これまで人の手では難しかった100マイクロメートルにも満たない微化石の分取と集積も可能なので、今回開発したシステムは地層解析技術として新たな道筋を与えるものである。

図2　今回開発したシステムでの作業行程

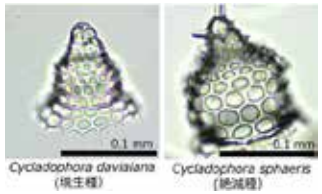


図3　今回開発したシステムで鑑定できる放散虫の酷似した2種の個体例
これら2種を90 %以上の高い精度で区分できる。

今後の予定

AIの学習作業による実用的なモデルを充実させるため、より多くの種類の微化石について教師データを整備する。その後、今回開発したシステムにより、実際の石油探査現場や調査・研究現場などでの地層解析作業を効率的に推し進め、その有効性の確認とともに、このシステムの普及を促進する。また、微小な粒子の扱いに長けているというシステムの特長を活かした社会での汎用的な活用を目指し、鉱物や火山灰などの微化石以外の粒子についても、このシステムの有用性を検証する。

用語の説明

◆微化石
顕微鏡で観察できる微小な化石の総称。植物プランクトンや動物プランクトン、海底に棲息する微小生物などの炭酸カルシウムやガラスでできた骨格、有機質の花粉などが地層の堆積物中に化石として保存される。微化石の種類や構成からそれらが棲息していた時代や当時の環境を知ることができる。[参照元へ戻る]

◆ディープラーニング
コンピューターのような機械に多量のデータを与えて、データのパターンなどを自ら見いださせ、予測させる技術を機械学習と呼び、人工知能（AI）分野では、古くから研究されてきた。機械学習を発展させ、人間の神経細胞（ニューロン）の仕組みを模倣したシステムであるニューラルネットワークを多層にして用いて、機械に学習させる手法をディープラーニングと呼ぶ。[参照元へ戻る]

参考：産総研プレスリリース「微小な化石を新たな手がかりに、北海道東部の地質を解明－5万分の1地質図幅「網走」を刊行しました－」（2018年8月10日）

お問い合わせ

研究成果

南極の海洋生物起源の硫酸塩エアロゾルは氷期に減少していた
―南極ドームふじアイスコア分析データの解析から―

2019年8月26日

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
学校法人東海大学
国立大学法人名古屋大学
国立大学法人信州大学
国立大学法人山形大学
国立大学法人東京工業大学

国立極地研究所（所長：中村卓司）の東久美子教授を中心とする研究グループは、南極のドームふじで掘削されたアイスコア（ 図1）のイオン分析データを用いて、南極海の植物プランクトンに由来する硫酸塩エアロゾルの変動を、過去72万年間にわたって推定しました。その結果、植物プランクトン由来の硫酸塩エアロゾルは、これまでの説とは異なり、氷期に減少し、間氷期に増加していた可能性が高いことが分かりました。

硫酸塩エアロゾルは日射を遮ったり、雲をできやすくしたりすることで、気候に影響を及ぼすと考えられています。本研究成果は南極海における生物活動と気候変動の関わりや、光合成と深い関係のある二酸化炭素濃度の変動要因を解明するための重要な手がかりになります。

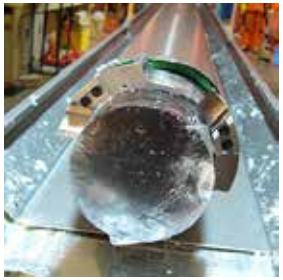


図1：ドームふじで掘削されたアイスコア

研究の背景

大気中に浮遊する固体や液体の微粒子をエアロゾルと言い、そのうち、硫酸イオン（SO_4^{2-}）を陰イオンに持ったエアロゾルは「硫酸塩エアロゾル」と呼ばれます。硫酸塩エアロゾルはそれ自体が日射を遮る働きをするほか、雲ができるときの凝結核となりうるため、気候に大きな影響を及ぼします。そのため、硫酸塩エアロゾルの濃度の変動やその要因を明らかにすることは、気候変動メカニズムの解明や将来予測への重要な手がかりとなります。

硫酸塩エアロゾルの主な起源としては、（1）化石燃料の燃焼によるもの、（2）火山噴火の噴出物、（3）海洋の植物プランクトンによって作られる物質が光化学反応によって変化したもの、（4）海塩が考えられますが、産業革命前の南極では（1）は無視できます。また、（2）と（4）の割合も小さいことが分かっています。そのため（3）が一番重要ですが、（3）の硫酸塩エアロゾルが過去の気候サイクルにおいてどのように増減していたかについては議論が続いていました。

1990年代、フランスの研究グループは南極内陸のボストーク基地やドームCで掘削されたアイスコアの分析により、南極海の植物プランクトンに由来する硫酸塩エアロゾルが氷期に増加すると発表しました。この説は現在でも支持している研究者が多くいます。

一方で、2000年代中盤にヨーロッパの研究グループが、ドームCで新たに掘削したアイスコアの分析から、硫酸塩エアロゾルのフラックス（ここでは、氷床の単位面積あたりの年間堆積量）が80万年を通じてほぼ一定であることを見いだしました。彼らはまた、南極海の植物プランクトン由来の硫酸塩エアロゾルの生成量は氷期・間氷期サイクルを通じてほとんど変化せず、気候変動に依存しないという見解を示しました。

ところが、これらの見解は海底堆積物の研究者が得た結果と矛盾します。海底堆積物のデータは、南極付近の海域で海洋の生物生産が氷期に減少し、間氷期に増えていたことを示していたのです。アイスコアと海底堆積物が示す結果が矛盾する原因はよく分かっていませんでした。

そこで本研究では、日本の南極地域観測隊が南極ドームふじで掘削したアイスコアのデータを用い、植物プランクトン由来の硫酸塩エアロゾルのフラックスを推定することに挑みました。

研究成果

研究グループはまず、南極ドームふじ（ 図2）で掘削したアイスコアの過去72万年間のイオン分析の結果から、硫酸塩エアロゾルの増減を示す硫酸イオンの変動を復元しました。その結果、ドームふじでは非海塩性硫酸イオン（硫酸イオンの総量から海塩起源のものを差し引いたもの）のフラックスが気候変動に伴って変化したことを突き止めました（図3）。フラックスは気温変動の指標である酸素同位体比が-58‰よりも低い寒冷なときは寒冷なほど増加し、酸素同位体比が-57‰よりも高い温暖な時は温暖なほど増加していました（図4a）。また、寒冷期には非海塩性硫酸イオンと非海塩性カルシウムイオンのフラックスの間の相関が高いことも分かりました（図4b）。この結果から、寒冷期の非海塩性硫酸イオンの起源として、従来考えられていた海洋生物起源よりも、南米から鉱物ダストとして飛来する石膏（硫酸カルシウム・2水和物、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）が大きな割合を占めると考えられました。

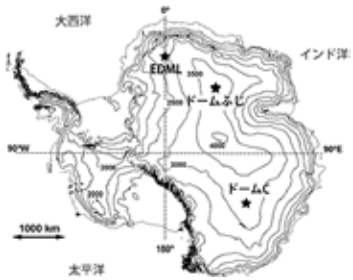


図2：本研究でデータを使ったアイスコアの掘削地点（星印）。

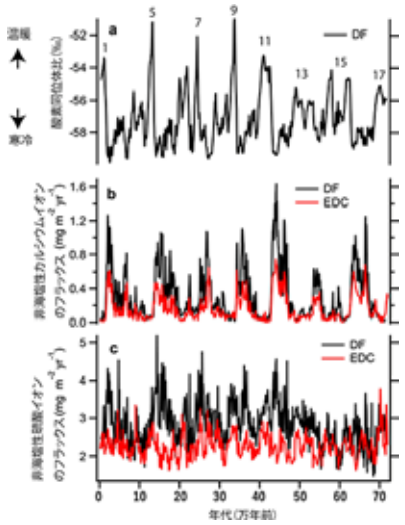


図3：過去72万年間を通じてのドームふじコアの酸素同位体比、および非海塩性カルシウムイオンと非海塩性硫酸イオンのフラックスの変動。ドームふじコア（DF）との比較のためにドームCコア（EDC）のデータも示す。酸素同位体比は気温変動の指標

で、値が大きいほど温暖だったことを意味する。aに番号で示したのは、海底堆積物から決められた酸素同位体ステージであるが、ここでは間氷期のみに番号をつけた。非海塩性カルシウムイオンは、カルシウムイオンの総量から海塩起源のものを差し引いたもので、鉱物ダストの指標とされる。

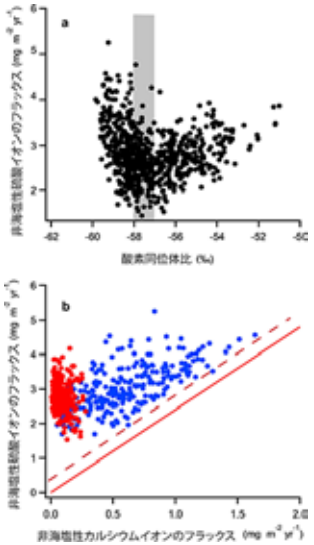


図4：ドームふじコアの非海塩性硫酸イオンのフラックスの変動。aは酸素同位体比との関係を、bは非海塩性カルシウムイオンのフラックスとの関係を示す。非海塩性硫酸イオンのフラックスはある酸素同位体比（aのハッチをつけた部分）、つまりある気温を境に、それよりも温暖な時は気温の上昇とともに増加するが、それよりも寒冷な時は気温の低下とともに増加する。bの赤点は境目となる気温よりも温暖だったとき、青点は境目となる気温よりも寒冷だったときのデータ。寒冷だったときは、非海塩性硫酸イオンと非海塩性カルシウムイオンの相関が高い。

さらに、本研究グループは非海塩性硫酸イオンのフラックスから鉱物ダスト由来のものを差し引くことで、硫化ジメチル（DMS）由来の非海塩性硫酸イオンのフラックスを見積もりました（図5）。DMSは海の植物プランクトンの光合成により発生し、大気中での光化学反応で硫酸に変化する物質です。すると、従来の説とは異なり、DMS由来、つまり海洋生物起源の硫酸イオンのフラックスは温暖な間氷期に高く、氷期の寒冷期に低くなっていました。これは、DMS放出量が間氷期に増加し、氷期に減少することを示唆しており、海底堆積物の結果とも整合性があります。同じ方法でドームCのアイスコアと東南極のEDMLで掘削したアイスコアのイオン分析データからDMS起源の硫酸イオンのフラックスを計算してみると、ドームふじと同様に、間氷期に高く、氷期に低くなっていました。

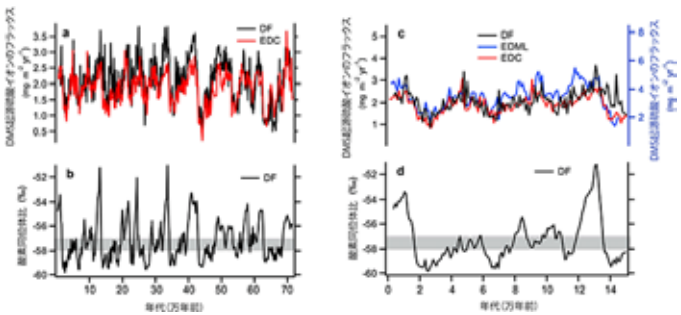


図5：DMS起源の硫酸イオンのフラックス変動（a、c）と酸素同位体比の変動（b、d）。黒線、赤線、青線はそれぞれドームふじ、ドームC、EDMLのデータを示す。b、dのグレーのハッチは、図4で示した境目の気温に対応する。a、bは過去72万年、c、dは過去15万年のデータを示す。

ドームCで非海塩性硫酸イオンのフラックスが氷期・間氷期サイクルを通じてほぼ一定だったのは、氷期にDMS起源の硫酸イオンが減少したにも関わらず、鉱物ダスト起源の硫酸イオンが増加していたためだと考えられます。ドームふじは、ドームCよりも鉱物ダストの発生源である南米大陸に近く、氷期の鉱物ダストがドームCよりも多かったために、気候変動に伴う氷期の非海塩性硫酸イオンのフラックス増加がよりはっきりと見えました。そのため、寒冷期での鉱物ダスト起源の硫酸イオンの寄与が従来考えられていたよりも大きかったことが分かりました。

今後の展望

本研究では氷期のアイスコア中に含まれる硫酸イオンの起源として石膏が重要であることを指摘しましたが、鉱物ダストには石膏だけでなく、炭酸カルシウムも多量に含まれていると考えられます。硫酸カルシウム（$CaSO_4$）には石膏由来のものだけでなく、炭酸カルシウムとDMS起源の硫酸が反応によって生成されるものもあると考えられるので、その起源を定量的に明らかにして、DMS起源の硫酸塩の割合を正確に求めることが必要です。ドームふじコアの研究グループでは、硫酸塩の硫黄や酸素の同位体比の詳細な分析を実施することで、非海塩性硫酸の起源を更に詳しく調べる計画です。

また、本研究は南極海におけるDMSの放出量やDMSから派生する硫酸塩エアロゾルが温暖な時に増えることを示唆しています。硫酸塩エアロゾルは日射を遮ったり、雲が生成される時の核となって雲の形成を促すことで、気温を低下させる可能性があると考えられています。本研究の結果は温暖化に伴って植物プランクトンの光合成が活発になって大気中の硫酸塩エアロゾルが増加し、温暖化が抑制されるというCLAW仮説と呼ばれる説と整合的です。光合成が活発になれば大気中の二酸化炭素濃度が減少して温暖化は更に抑制されるので、DMSと気候変動の関係を調べることは重要です。将来の地球温暖化でDMS放出量が増えるのか減るのか、また、その変化が雲のできやすさや二酸化炭素の濃度にどう影響するのか、エアロゾルのモデルや気候モデルなどを使って予測する必要があります。氷期・間氷期スケールの気候変動と、今後の地球温暖化によって生じるDMS放出量の変化を単純に同じものと考えることはできませんが、本研究の成果は、エアロゾルのモデルや気候モデルを検証するために貢献できると考えられます。

発表論文

掲載誌： Nature Communications
タイトル：Reduced marine phytoplankton sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials
著者：
東 久美子（国立極地研究所 気水圏研究グループ、総合研究大学院大学）
平林 幹啓（国立極地研究所 気水圏研究グループ）
本山 秀明（国立極地研究所 気水圏研究グループ、総合研究大学院大学）
三宅 隆之（研究当時・国立極地研究所 気水圏研究グループ）
倉元 隆之（国立極地研究所 気水圏研究グループ、現在、東海大学 教養学部）
植村 立（国立極地研究所 気水圏研究グループ、現在、名古屋大学 大学院環境学研究科）
五十嵐 誠（国立極地研究所 気水圏研究グループ）
飯塚 芳徳（北海道大学 低温科学研究所）

櫻井 俊光（国立極地研究所 気水圏研究グループ、現在、国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所）
堀川 信一郎（北海道大学 低温科学研究所、現在、名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター）
鈴木 啓助（信州大学 理学部）
鈴木 利孝（山形大学 学術研究院）
藤田 耕史（名古屋大学 大学院環境学研究科）
近藤 豊（国立極地研究所 国際北極環境研究センター）
服部 祥平（東京工業大学 物質理工学院）
藤井 理行（国立極地研究所 名誉教授）
URL：https://www.nature.com/articles/s41467-019-11128-6
論文公開日： 2019年7月19日

研究サポート

本研究は科研費（JP15101001、JP21221002、JP15H01731、JP17H06316）及び国立極地研究所の研究プロジェクト（KP305）の助成を受けて実施されました。

お問い合わせ先

研究内容について
国立極地研究所 気水圏研究グループ教授 東久美子

報道について
国立極地研究所 広報室
東海大学 大学広報部企画広報課
東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門

【報道機関の方 】取材・掲載申込フォーム
【一般の方】お問い合わせフォーム

いいね！ 12　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

硫黄同位体組成が解き明かす南極硫酸エアロゾルの起源

いいね！ 0
シェアする
ツイート

氷期に海洋生物起源の硫酸エアロゾルが減少した新証拠を発見

研究

RSS

公開日：2019.08.28

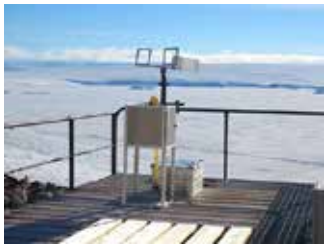
要点

- 硫黄同位体組成を南極硫酸エアロゾルの起源推定の有用な指標として確立
- 氷コア硫黄同位体記録が氷期に海洋生物活動の低下を物語っていることを示唆
- 南極大陸に中低緯度地域からの硫酸エアロゾル長距離輸送を発見

概要

東京工業大学 物質理工学院 応用化学系 吉田尚弘研究室の石野咲子大学院生（研究当時。現・国立極地研究所 日本学術振興会特別研究員PD）、服部祥平助教らはフランス・グルノーブルアルプス大らとの国際共同研究により、南極沿岸と内陸のエアロゾルの硫黄安定同位体組成[用語1]に差異がなく、両者ともに硫黄の起源の変化に応じて変動していることを発見した。
この発見は硫黄同位体組成が起源推定に有用な指標であることを意味する。南極氷コア[用語2]の硫黄同位体組成記録にこの手法を適用すると、最終氷期[用語3]における海洋生物起源の硫酸エアロゾルは現在の半分程度だったことが明らかとなった。この知見は硫酸エアロゾルによる雲生成を通じた海洋生物活動と過去の気候変動との関係を解明するうえで重要な一歩である。
これまで南極の氷コアに保存される硫酸エアロゾルは主に海洋生物活動由来と考えられてきたが、この前提に基づくと氷コア記録と海洋堆積物コア記録の間に矛盾が生じていた。氷コアの硫黄安定同位体組成の変化は硫黄起源の変化を反映するため、この矛盾の原因を解明するカギとなると期待される。だが、この指標が輸送過程の変化にも依存する可能性が指摘されていたため指標適用の足かせとなっていた。
研究成果は8月27日（英国時間）に英国科学誌「*Scientific Reports*（サイエンティフィック リポーツ）」に掲載された。

南極基地での観測オペレーションの様子



エアロゾル試料の採取装置

研究の背景

硫酸エアロゾルは雲の相互作用に重要な役割を果たし、日射に影響する。南極大陸では他の大陸上で発生する人為的な硫黄起源からほぼ隔離されており、硫酸の主な発生源は周辺の海洋に生息する植物プランクトンや藻類が放出する硫化ジメチル（DMS）[用語4]である。このため、南極の氷コアに保存されている硫酸は過去の海洋生物活動の指標として注目され、気候変動に対する海洋生物活動の応答及びフィードバック機構と関連づけて議論されてきた。
これまで、欧米を中心とした南極の氷コアの研究から「過去の8つの氷期－間氷期サイクルで硫酸フラックス（大気から雪への硫酸の年間沈着量）は有意に変化していない」とされてきた。しかし、これは「現在の温暖期よりも最終氷期の南緯50 °以南の生物活性が低かった」という海洋堆積物コア[用語5]が示す知見と矛盾した結論だった。
この矛盾の原因を解明するために、氷コア中に保存される硫酸の起源が本当に海洋生物由来のみであったかを確かめることが重要である。硫酸の硫黄同位体組成（δ^{34}S値）はその起源によって変化し、異なる値を有するため、この指標の変化から硫酸の起源が氷期と温暖期で変化していたかを調べたいと考えられてきた。事実、15年前に発表された東南極ボストーク氷コアのδ^{34}S値記録では、最終氷期のδ^{34}S値は現在の温暖期の値よりも4‰（1,000分の4＝0.4%程度に相当）低いことが知られていた。
しかし、δ^{34}S値の低下要因が仮説1：輸送中にδ^{34}S値が変化（これを同位体分別という）した、仮説2：氷期と間氷期に南極に輸送される硫黄の起源の割合が変化した―のどちらによるものかが不明だったことが、δ^{34}S値の変化が何を物語っているかを解釈するうえで足かせとなっていた（図1）。

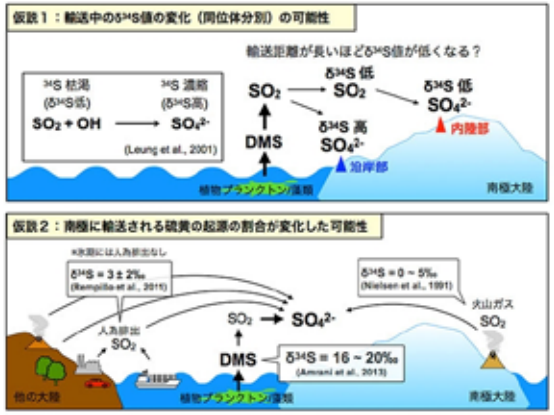


図1. 南極における硫黄安定同位体組成（δ^{34}S値）の変動要因に関する2つの仮説

研究の経緯

そこで服部助教らの研究チームは、上述した仮説1及び2を検証することとした。研究チームのうちフランスのメンバーが南極の沿岸及び内陸の2つの基地で週1回エアロゾルを採取し、東工大を中心としたメンバーがエアロゾル試料の硫黄同位体分析を実施した。もし、沿岸と内陸でδ^{34}S値に有意な差があれば仮説1を支持し、差がなければ仮説2を支持する、ということを検証することが本研究の目的になる。

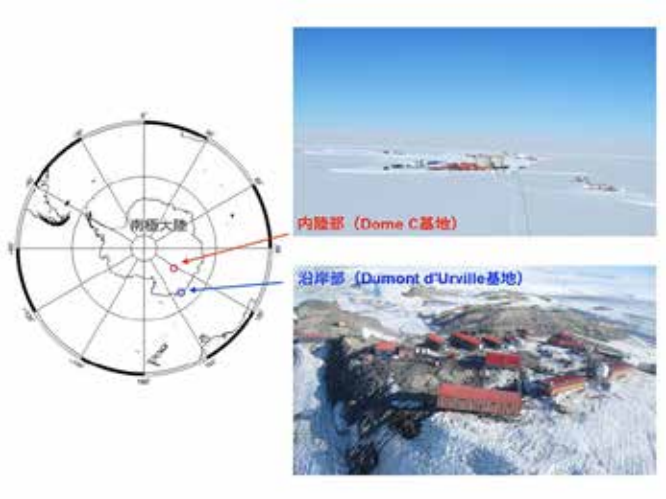


図2. 本研究におけるエアロゾル試料採取サイト。撮影：石野咲子

また、従来法では分析に必要な試料量を満たさなかったため、近年開発されたマルチコレクター誘導プラズマ質量分析計（MC-ICP-MS）[用語6]を用いた微量硫黄同位体組成分析法による分析を、フランスのリヨン高等師範学校の協力で実施した。

研究成果

【仮説の検証】内陸と沿岸での硫黄同位体組成の差異は極めて小さい

図3に示すとおり、南極の沿岸と内陸の2つの地点間の $\delta^{34}S$値は、夏に高く冬に低いという季節変動を示すものの、その差異が統計的に0 ‰から逸脱しないことが明らかとなった。この結果は、$\delta^{34}S$値が輸送中の同位体分別に支配される仮説1よりも、硫黄源の相対寄与率によって制御されるという仮説2を支持する。すなわち、$\delta^{34}S$値の分析から硫黄の起源が $\delta^{34}S$値の高い海洋生物由来であるか、$\delta^{34}S$値の相対的に低い他の起源に由来するかを区別できることが示された。また、夏に高く冬に低いという $\delta^{34}S$値の季節変動は、夏に海洋生物由来による硫酸エアロゾル生成が卓越する一方、冬には非海洋生物由来の硫酸エアロゾルの寄与が相対的に高まった結果であることが初めて明らかになった。

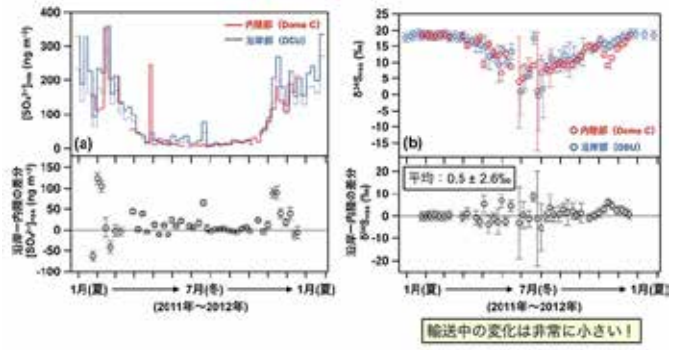


図3. 内陸部、沿岸部における（a）硫酸濃度と（b）$\delta^{34}S$値の季節変動。下部は内陸サイト沿岸サイトの差分を示す。

【氷期－間氷期の硫黄起源の変化】氷期の海洋生物活動低下に関する新証拠

ボストーク深層氷コアの結果に今回の $\delta^{34}S$値による起源推定法を適用したところ、全硫酸量に対する海洋生物由来の割合が、温暖期にあたる現在では86±3%であるのに対し、最終氷河期前後の温暖期平均で59±11%、最終氷期には48±10%と減少していることがわかった。すなわち、氷期では海洋生物活動が有意に低下し、その活動に由来する硫酸エアロゾルも減少していることを意味する（図4）。このことは先に説明した海洋堆積物コアの記録が示す氷河期における南緯50°以南の生物活動の減少とも整合性が高い。

2019年7月28日付で*Nature Communication*誌に発表されたドームふじ氷コアの硫酸及びカルシウムイオン濃度の変化（Goto-Azuma et al. 2019）からも、寒冷期における海洋生物由来の硫酸エアロゾルは24%（硫酸がすべて陸起源の石膏（$CaSO_4$）由来の一次生成物と仮定した場合）、または52%（硫酸が、石膏由来の一次生成物と、炭酸カルシウム（$CaCO_3$）と海洋生物由来硫酸エアロゾルとの反応で生成した二次生成物の両者を含むと仮定した場合）に減少する、と同様の結論が報告されている。

今回の研究で見積もられた48±10%という値は、この後者と一致することから、氷期の硫酸エアロゾルは一次生成物と二次生成物の両方が含まれている可能性を示唆する。氷期の硫酸エアロゾルの起源の理解はその気候影響を理解するため不可欠であるため、今後もさらなる検証が必要である。

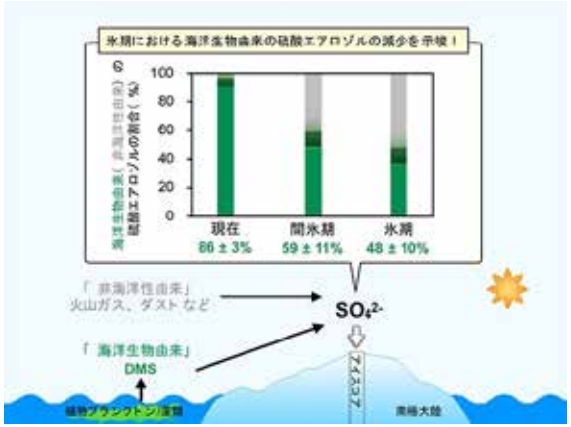


図4. 過去の気候変動に伴う南極の硫酸エアロゾルの硫黄起源の変化

【新たな発見】中低緯度から硫酸エアロゾルが南極に到達している？

今回の研究ではさらに、11月の第2週に非海洋生物由来硫酸の顕著な増大が内陸・沿岸の双方で発見された（図5左）。さらに、推定された非海洋生物由来の硫酸エアロゾル量と、大陸地殻に起源を有する鉛同位体（^{210}Pb）濃度との間に有意な相関が発見された（図5右）。このことは、他の大陸から非海洋生物由来の硫酸エアロゾルが突発的に長距離輸送されていることを示唆する。
この硫黄起源の特定には至っていないが、中低緯度の陸域に起源を持つ硫黄化合物は、南米大陸上の火山由来、もしくは人為的な化石燃料の燃焼由来である可能性が高い。大気中の硫酸は、エアロゾルー雲生成を通じて気候に影響を及ぼす可能性がある。人間活動起源の硫酸エアロゾルが南極の気候に与える影響をより正確に評価するためにも、この非海洋生物由来の硫酸エアロゾルの起源の特定は今後重要な課題である。

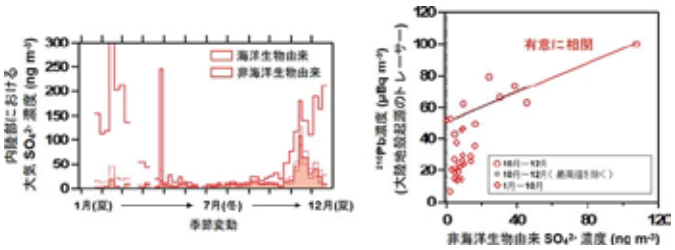


図5. 現在の南極大気中における非海洋性の硫酸エアロゾルの季節変動（左）と、その^{210}Pbトレーサー（大陸地殻起源物質）との関係（右）

今後の展開

今回の研究結果から、海洋生物活動は温暖期に増加し、氷期に減少することが明らかとなった。つまり、温暖期に海洋生物活動が増加し、その結果放出されるDMSに由来する硫酸エアロゾルも増加していたと考えられる。硫酸エアロゾルは雲生成を促進する効果を有するため、日射を遮り、負の放射収支（＝気温を下げること）に寄与する。
これは、気候が温暖化すると海洋植物プランクトンの活動が活発化することで大気中の硫酸エアロゾルが増加し、温暖化が抑制されるというフィードバックが存在するという仮説（CLAW仮説)と一部整合的である。ただし、硫酸エアロゾルの化学形態や粒子径の解析から、硫酸エアロゾルによる気候冷却効果は温暖期の方が低いとする研究（Iizuka et al., 2012 *Nature*）もある。このため、海洋生物由来の硫酸エアロゾルの増減のみでは、CLAW仮説が立証されたわけではないことは注意したい。今後はこれらの関係に着目し、さらに硫酸エアロゾルの起源及び生成過程が温暖期と氷期でどのように変化したかを詳細に理解することが重要である。
研究グループは今年度より、同様の観測を日本が有する南極・昭和基地においても実施し、本研究で対象としたフランス所有のDome（ドーム）C基地、Dumont d'Urville（デュモン・デュルヴィル）基地のエアロゾル試料と合わせて解析を進める。こうした南極における物質動態の理解には、南極に基地を有する国同士の国際連携が欠かせない。研究グループは引き続き日仏の密接な研究協力を継続し、さらに研究を発展させる予定である。

謝辞

JSPS（日本学術振興会）

日仏二国間交流事業
SAKURAプログラム：代表 服部祥平 2014～2015年
CNRS（フランス国立科学センター）：代表 服部祥平2018～2019年
科学研究費助成事業
新学術領域「南極の海と氷床」公募研究（JP18H05050）：代表 服部祥平 2018～2019年度
若手研究A（JP16H05884）：代表 服部祥平 2016～2019年度
特別研究員奨励費（JP17J08978）：代表 石野咲子 2017～2018年度
特別研究員奨励費（JP19J00682）：代表 石野咲子2019～2021年度
基盤研究S（JP17H06105）：代表 吉田尚弘 2017～2022年度

用語説明

[用語1] **硫黄安定同位体組成（δ^{34}S値）**：質量数の異なる原子で、放射壊変せず安定に存在するものを安定同位体といい、安定同位体組成はその比率のことを指す。硫黄は質量数32、33、34および36の4種類が存在しており、δ^{34}S値はマイナーな同位体である^{34}Sの^{32}Sに対する比率を指す。

[用語2] **氷コア（ice core）**：氷河や氷床から取り出された筒状の氷の試料。古気候や古環境の研究に用いられる。氷コアを用いて、過去の季節変化や古気候・古環境、過去の気温や大気の成分などを推定・復元できる。

[用語3] **氷期**：氷河時代のうち、特に気候が寒冷となり中緯度圏の非山岳地域にも氷河の発達した時期のこと。氷期と氷期の間の気候温暖な時期は間氷期という。

[用語4] **硫化ジメチル（DMS）**：硫黄を含む揮発性有機化合物の一種。海洋表層に生息する植物プランクトンや藻類によって大気中に放出される。海で感じる「磯の香り」の正体であることと言われている。

[用語5] **海洋堆積物コア**：海底の堆積物を筒状に掘削して得た試料。氷コアと同様に、古気候や古環境の研究に用いられる。

[用語6] **マルチコレクター誘導プラズマ質量分析計（MC-ICP-MS）**：質量分析計の一種。従来の硫黄安定同位体組成の分析手法に比較して高感度化が達成できるため、必要試料量が1/10～1/100程度に削減できる。本研究では、リヨン高等師範学校との共同研究によって分析が行われた（Albalat et al., 2016）。

論文情報

掲載誌：*Scientific Reports*
論文タイトル：Homogeneous sulfur isotope signature in east Antarctica and implication for sulfur source shifts through the last glacial-interglacial cycle
著者：石野咲子（東京工業大学 物質理工学院（研究当時）、現 国立極地研究所 日本学術振興会特別研究員PD）
服部祥平（東京工業大学 物質理工学院 応用化学系 助教）
Joel Savarino（グルノーブルアルプス大学）
Michel Legrand（グルノーブルアルプス大学）
Emmanuelle Albalat（リヨン高等師範学校）
Francis Albarede（リヨン高等師範学校）
Susanne Preunkert（グルノーブルアルプス大学）
Bruno Jourdain（グルノーブルアルプス大学）
吉田尚弘（東京工業大学 物質理工学院 教授／地球生命研究所 主任研究員）
DOI：10.1038/s41598-019-48801-1

プレスリリース 硫黄同位体組成が解き明かす南極硫酸エアロゾルの起源 ―氷期に海洋生物起源の硫酸エアロゾルが減少した新証拠を発見―

南極の海洋生物起源の硫酸塩エアロゾルは氷期に減少していた｜東工大ニュース

地球規模の寒冷化を引き起こす大規模噴火記録を復元｜東工大ニュース

北極の硝酸エアロゾルはNOx排出抑制に関わらず高止まり｜東工大ニュース

南極大気の歴史をひも解く新たなアプローチ ―硫酸と硝酸の三酸素同位体組成の変動から―｜東工大ニュース

地球寒冷化を引き起こす大規模火山噴火の特定が可能に―｜東工大ニュース

服部祥平助教が日本地球化学会奨励賞を受賞｜東工大ニュース

吉田グループ（吉田研・豊田研・山田研）

服部祥平助教の個人ページ（Shohato's web site）

研究者詳細情報（STAR Search） - 服部祥平 Shohei Hattori

研究者詳細情報（STAR Search） - 吉田 尚弘 Naohiro Yoshida

物質理工学院 応用化学系

国立極地研究所

グルノーブルアルプス大学

リヨン高等師範学校

研究成果一覧

物質理工学院 ―理学系と工学系、2つの分野を包括―
2016年4月に発足した物質理工学院について紹介します。
物質理工学院
学院・系及びリベラルアーツ研究教育院

お問い合わせ先
東京工業大学 理物質理工学院 応用化学系
助教 服部祥平
E-mail : hattori.s.ab@m.titech.ac.jp
Tel : 045-924-5419、045-924-5506 / Fax : 045-924-5413

取材申し込み先
東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門
E-mail : media@jim.titech.ac.jp
Tel : 03-5734-2975 / Fax : 03-5734-3661
国立極地研究所 広報室
E-mail : kofositu@nipr.ac.jp
Tel : 042-512-0655

取材申し込み

※ 8月29日14:30 用語説明に一部誤りがあったため、修正しました。

© Tokyo Institute of Technology. All rights reserved.

NEWS RELEASE 20-SEP-2019

Weathering Antarctic storms -- Weather balloon data boost forecasting skill

Peer-Reviewed Publication

INSTITUTE OF ATMOSPHERIC PHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

Media Contact

Zheng Lin

jennylin@mail.iap.ac.cn
Office: 01-082-995-053

Observational data from radiosondes deployed in Antarctica improve the forecasting accuracy for severe Antarctic cyclones, according to a Japanese research team led by the Kitami Institute of Technology, Hokkaido, Japan.

In parts of the Earth that are very sparsely populated, such as the Antarctic, direct observational weather data can be hard to come by, and with Antarctica's extreme climate, failure to accurately predict severe weather can easily become deadly. The team conducted a study that focused on the impacts of these data on forecasting an extreme cyclonic event, and the findings have been accepted and published as early view in *Advances in Atmospheric Sciences*.

IMAGE: THIS IS A PHOTOGRAPH SHOWING RADIOSONDE OBSERVATION AT DOME FUJI STATION IN ANTARCTICA. THE PERSON IN THE PHOTO IS DR. KONOSUKE SUGIURA, A CO-AUTHOR OF THE STUDY. view more ›

CREDIT: TAICHI ITO

With advancements in satellite technology and computer modeling, forecasting of storms and other weather events is constantly improving. However, accurate forecasts are not based on satellite data alone - they still rely on direct measurements taken at the surface and in the atmosphere. Direct measurements of the atmosphere can be obtained by deploying weather balloons equipped with radiosondes, devices that collect and transmit information about variables such as altitude, temperature, humidity, and wind speed.

The research team looked at the importance of weather radiosonde data in predicting severe weather events over Antarctica and the surrounding Southern Ocean. "We investigated the impact of including additional radiosonde observations from both the research vessel Shirase over the Southern Ocean and from the Dome Fuji Station in Antarctica on forecasting using an atmospheric general circulation model," explains lead author Kazutoshi Sato, an assistant professor at the Kitami Institute of Technology, Japan.

The researchers conducted a forecast experiment that focused on an unusually strong Antarctic cyclonic event that occurred from late December 2017 to early January 2018. Two datasets, one that included the additional radiosonde data and one that excluded those data, were used as the initial values. Only the experiment that included the radiosonde observations successfully captured the cyclone's central pressure, wind speed, and moisture transport 2.5 days in advance. These results clearly show that even with operational weather forecast centers, collecting radiosonde observation data is important to improve the forecasting accuracy for Antarctic cyclones.

However, the sparsity of observations in the Antarctic remains a problem. "Even with the assimilation of the additional radiosonde observations," says co-author Jun Inoue, an associate professor of polar science at the National Institute of Polar Research, part of the Inter-University Research Institute Corporation Research Organization of Information and Systems (ROIS) in Tokyo, Japan, "the experiment was unable to forecast the development of the cyclone four days in advance. That leaves a great deal of room for improvement." In a project called the 'Year of Polar Projection', many Antarctic stations have deployed additional radiosondes to provide an opportunity to further investigate the impact of the resulting data on weather forecasting in Antarctica.

To provide more accurate weather forecasts, Inoue noted that new additional observation systems need to be developed in the future. Improving severe weather forecasting in Antarctica will continue to be a priority, as the lives of researchers and other personnel in the region may depend on it.

###

The study is one of papers accepted into the evolving special issue on Antarctic Meteorology and Climate: Past, Present and Future. The special issue, scheduled to be officially released in the spring of 2020 at SpringerLink, will highlight recent research progress, including the ongoing effort of the Year of Polar Prediction (YOPP), in 1) Antarctic meteorology and numerical weather prediction and 2) climate variability and change in the Antarctic. The submission deadline of the special issue is Sept 27, 2019.

JOURNAL

Advances in Atmospheric Sciences

DOI

10.1007/s00376-019-8231-x

Disclaimer: AAAS and EurekAlert! are not responsible for the accuracy of news releases posted to EurekAlert! by contributing institutions or for the use of any information through the EurekAlert system.

氷期から間氷期への遷移期の温暖化によって生じた急激な気候の変化

2019年11月1日

小長谷貴志（東京大学大気海洋研究所　特任研究員）
阿部彩子（東京大学大気海洋研究所　教授）

発表のポイント

◆1万5千年前の氷期ー間氷期遷移期の急激な気候変化を古気候データと整合的に気候モデルで再現しました。
◆氷期ー間氷期遷移期のゆっくりとした温暖化が、海洋深層循環（注1）の急激な強化をもたらすことを示しました。
◆大気、海洋、氷床といったサブシステム間の相互作用によって氷期ー間氷期遷移期の気候変化が形成されているという、気候システムの性質理解に貢献しました。

発表概要

東京大学大気海洋研究所の小長谷貴志研究員らは、気候モデルによるシミュレーションを用いて、およそ1万5千年前の氷期ー間氷期遷移期に生じた急激な気候変化メカニズムを調べました。この頃グリーンランドで数十年のうちに10℃以上の気温変化が生じたことがわかっており、海洋深層循環の強化によるものと考えられています。従来の研究では、海洋深層循環の強化の原因を北半球氷床の融解が止まることに求めていましたが、氷期から間氷期にかけての海水準上昇の記録や、モデルから示唆される北半球氷床融解史と整合しないという問題点がありました。本研究では、氷期から間氷期にかけて生じたゆっくりとした温暖化によって、北半球氷床の融解水（注2）の流入が止まらずとも海洋深層循環の急激な強化が生じることを示しました（図1）。その変化の原因は、氷期から間氷期にかけて海洋が全球的に温められることで北大西洋の海洋密度成層がゆっくりと十分に変化すると海洋深層循環が急激に強化することにあることが示唆されました（図2）。本研究の結果は、大気海洋、氷床、炭素循環といったサブシステム間の相互作用によって氷期ー間氷期遷移期の気候変化が形成されていることを示唆するもので、気候システムの性質理解に貢献するものです。

発表内容

【研究の背景】気候の変化は、地球の自然環境の変化を通して人間社会に影響を与えます。その変化が大きくかつ急激であれば、与える影響はいっそう大きくなります。過去にさかのぼると、地球の気候は現在と大きく異なる時代があったことが知られています。そのため、地球の気候がどのように成り立っており、過去どのように変化したかを明らかにすることは、地球史の謎を解明することと、将来の気候変化への示唆を得ることにつながります。

本研究で対象とした2万年前～1万年前の時代は、最終氷期の最盛期から現在の間氷期にかけての気候遷移期にあたります。氷期から間氷期への遷移は、地球の軌道要素が変化することで、1万年かけて北半球を覆っていた氷床が融解することによって生じました（文献1）。その半ばであるおよそ1万5千年前、グリーンランドの気温が50年という短い期間に10℃以上気温が上昇しました。これは、氷期と間氷期の気温差の半分以上に相当する温度変化が短い時間で起きたことを意味しています。気温の上昇幅は場所によって異なりますが、日本を含む離れた地域でも、同時期に温暖化したことが知られています。この急激な気候変化は、北大西洋の深層循環が急激に強くなったことで生じたと考えられています。しかし、当時は北半球を覆っていた氷床の融解期にあたり、融解水が河川を通して北大西洋に流入すると、逆に深層循環を弱めるようにはたらきます。そのため、なぜこのような海洋深層循環の変化が氷期から間氷期への遷移期の半ばに生じたのかが説明できていませんでした。

【研究内容】そこで本研究では、地球温暖化予測に使用された気候モデル（MIROC）を用いて、最終氷期から現在の間氷期にかけての地球の大気・海洋の流れと温度分布を計算しました。その中で、氷期から間氷期への遷移期の半ばに急激な海洋深層循環の変化が生じる条件とそのメカニズムを調べました。このような着想に至ったのは,これまでのMIROCを用いた研究から,氷期の北大西洋深層循環は現在に比べて弱く、それは主として大気中CO_2濃度が低いことによることが示されていたことにあります（文献2）。このため最終氷期から現在の間氷期にかけての大気中CO_2の上昇によって、海洋深層循環の変化がどこかで生じることが予想されました。

実験の結果、氷期から間氷期にかけて北大西洋への氷床融解水が継続的に流入しても、急激な海洋深層循環の強化が生じることが示されました（図1）。このときの氷床融解水は、海水準復元とも整合する現実的な量で十分であることがわかりました。海洋深層循環の強化によって南北間の熱分配が変わることによって、南極域では北半球とは反対に寒冷化することも説明できました。

次に、モデルで計算された大気・海洋の流れと温度分布から、海洋深層循環の強化を生じたメカニズムを調べました。この海洋深層循環強化の後では北大西洋の冬季海氷縁が後退しています（図3）。この海氷の後退によって海面が効率的に冷却されるようになるので、海洋深層循環が強化されます（文献3）。海洋の中の温度分布をみると、この海洋深層循環が強化する以前、海洋が深層まで暖まっています（図2）。深さ3000m以深の深層では、塩分と密度が低下しています。海洋深層の密度が海面に比べ大きいという鉛直成層によって弱い北大西洋深層循環が維持されているのですが、氷期から間氷期にかけてのゆっくりとした温暖化でこの成層が弱くなり、海洋深層循環の強化を生じたと解釈されます。

【社会的意義と今後の計画】

氷期から間氷期にかけて、長い時間をかけてゆっくりと生じた温暖化が、氷期から間氷期の半ばで生じた急激な気候変化を生じさせることが分かりました。氷期サイクルの要因に対する氷床変動に関する数値シミュレーション研究（文献1）と合わせて、このような氷期から間氷期への気候変化過程において生じた現象は、氷床や大気中CO_2を決める物質循環といった、気候システムどうしの相互作用の結果として形成されていることを明確に示す結果です。

今後は、氷床融解への影響など、氷期ー間氷期の気候遷移期におけるメカニズムを調べ、現在の気候システムの成り立ちと将来の温暖化に対する応答を理解することにつなげていきます。

文献1: Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter (2013): Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume. *Nature*, **500**,190-193, doi:10.1038/nature12374.
（過去にプレスリリース有 https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2013/20130808.html）
文献2: Kawamura, K. et al. (2017), State dependence of climatic instability over the past 720,000 year from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, **3**(2), doi:10.1126/sciadv.1600446
（過去にプレスリリース有 https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2017/20170209.html）
文献3: Sherriff-Tadano, S., A. Abe Ouchi, M. Yoshimori, A. Oka and W. Chan (2018), Influence of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation through surface wind change, *Climate Dynamics*, 1 23, doi:10.1007/s00382-017-3780-0.

発表雑誌

雑誌名：「Geophysical Research Letters」（オンライン版：2019年10月10日）
論文タイトル：Abrupt Bolling-Allerod warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation
著者：Obase Takashi*, Abe-Ouchi Ayako
DOI番号：doi: 10.1029/2019GL084675
アブストラクトURL：https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL084675
謝辞：
本研究の遂行に当たっては、文部科学省科研費基盤研究(S)「過去の大規模な気候変動における氷床・海洋・大気の相互作用の解明」および新学術領域研究「南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング」（いずれも代表 阿部彩子）からの助成を受けました。モデル計算のための地球シミュレータ3の使用にあたり、公募課題「古環境研究および気候将来予測に資する気候数値実験」（代表 阿部彩子）を利用しました。

問い合わせ先

東京大学大気海洋研究所　地球表層圏変動研究センター
小長谷　貴志（おばせ　たかし）
E-mail：obase◎aori.u-tokyo.ac.jp　　※「◎」は「@」に変換して下さい

用語解説

注1：海洋深層循環
北大西洋で沈み込む、大洋をまたぐ全球的な循環です。特に大西洋域では熱量を南から北に運ぶ役割を持っています。地球の大気と海洋の温度はこの熱量の分配によって決まっているのですが、この海洋深層循環が強くなると、北半球にはより多くの熱量が運び込まれるようになって気温が上がり、逆に南半球では熱量が失われることで気温が下がるという結果になります。
（参考資料：2017年のプレスリリース https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2017/20170209.html ）
注2：氷床の融解水
最終氷期には、北アメリカ大陸とユーラシア大陸の高緯度域は、高さ約3kmの氷床（陸上に降った雪が、長い年月をかけて氷になったもの）に覆われていました。そのため、当時の海水準は現在より130m程度低下していました。最終氷期から現在の間氷期にかけ、北半球高緯度域の夏季が温暖になったことで氷床が解けて、生じた淡水が海洋に流入して海水準が徐々に上昇していきました。この水は塩分を含まず密度が小さいために、北大西洋域に流入すると海面の海水密度を下げ、海洋深層循環を弱くしようとする働きをもちます。
（参考資料：2013年のプレスリリース https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2013/20130808.html）

添付資料

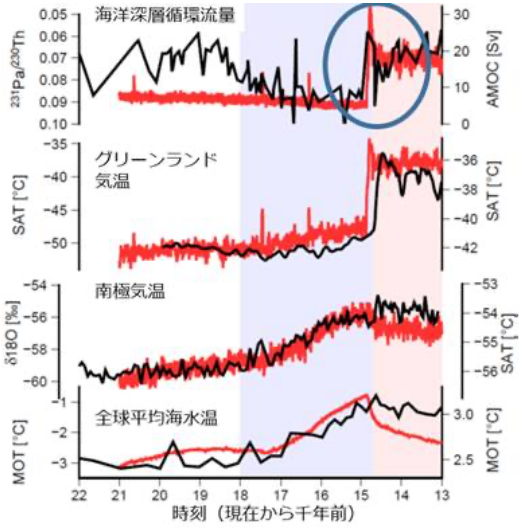


図1　気候モデルによる計算結果（赤線）を、地質記録に基づく気候復元と比較した図。黒線で示されているように、およそ1万5千年前の時期（青色背景と赤色背景の境界）に海洋深層循環が強化され、グリーンランドの気温が上昇していますが、赤線で示されたモデルの結果はそれを再現しています。また南極のアイスコアから、赤色背景で示されたおよそ2000年間、温暖化が停滞しているという特徴も再現していることが分かります。（発表論文の図1より）

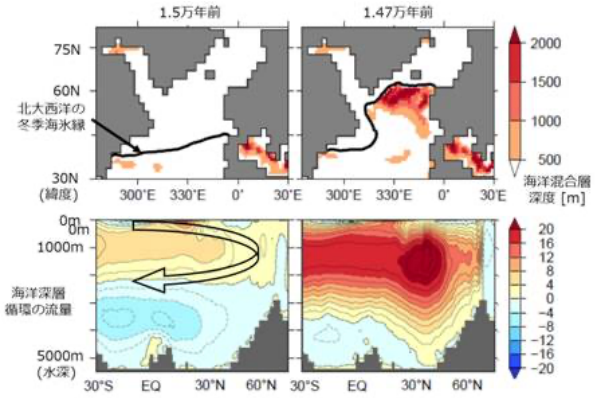


図2　海洋深層循環の強化が生じる前後での、北大西洋の海洋の様子を示した図。（上段）北大西洋域の冬季海氷分布と、海水の沈み込みを示す混合層深度分布。海洋深層循環強化前の1.5万年前は中緯度域まで海氷が張り出していますが、海洋深層循環強化後の1.47万年前には海氷範囲が北上し、海水の沈み込みが活発に起きていることが分かります。（下段）北大西洋の緯度ー水深断面図で、海洋の流れの様子を示した図で、図中黒矢印で記入されているように、流線関数が正の値を時計回りに南北・鉛直方向の流れが存在することを読み取ります。深層循環強化後はこの時計回りの深層循環の流量が大きく、沈み込みが達する水深も深くなっていることが分かります。（発表論文の図2より）

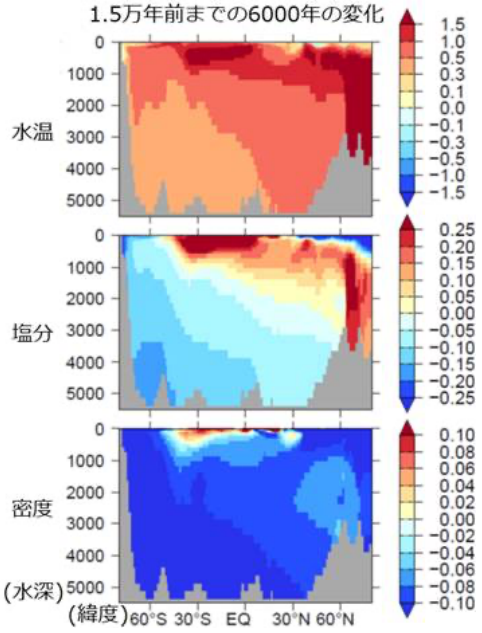


図3　氷期から、海洋深層循環の強化が生じるまで6000年間の大西洋の海洋水温・塩分・密度の変化を緯度ー水深断面で示した図です。氷期以降の温暖化によって、北大西洋の海洋は温められています（上段）。塩分を見ると、図の左で示された南極域から北大西洋域の深層およそ3000m以深の深層で塩分が低下していることがわかります（中段）。水温上昇と塩分低下はいずれも海水密度の減少、北大西洋域の深層の密度も低下するという結果になります（下段）。これは、弱い海洋深層循環を維持するための強い密度成層が徐々に弱くなっていることを示しています。（発表論文の図3より）

The Antarctica Factor: model uncertainties reveal upcoming sea level risk

Sea level rise due to ice loss in Antarctica could become a major risk for coastal protection even in the near term, scientists say. Within this century already, due to Antarctica alone global sea level might rise up to three times as much as it did in the last century. This is a finding of an exceptionally comprehensive comparison of state-of-the-art computer models from around the world.

Ice floes in the Antarctica - Photo: Giuseppe Aulicino

"The 'Antarctica Factor' turns out to be the greatest risk, and also the greatest uncertainty, for sea-levels around the globe," says lead-author Anders Levermann from the Potsdam Institute of Climate Impact Research (PIK) and Columbia University's LDEO in New York. "While we saw about 19 centimeter of sea-level rise in the past 100 years, Antarctic ice-loss could lead to up to 58 centimeter within this century. Coastal planning cannot merely rely on the best guess. It requires a risk analysis. Our study provides exactly that: The sea level contribution of Antarctica is very likely not going to be more than 58 centimeters."

Thermal expansion of the ocean water under global warming and melting of mountain glaciers, which to date have been the most important factors for sea-level rise, will come on top of the contribution from Antarctic ice-loss. The overall sea-level rise risk is thus even bigger, yet the 'Antarctica Factor' is about to become the most important one, according to the study now published in the journal Earth System Dynamics of the European Geosciences Union (EGU).

Large range of estimates makes the results very robust

The range of sea-level rise estimates from the 'Antarctica Factor' provided by the scientists is rather large. Assuming that humanity keeps on emitting greenhouse gases as before, the range the scientists call "very likely" to capture the future is between 6 and 58 centimeters for this century. If greenhouse gas emissions were to be reduced rapidly, it is between 4 and 37 centimeters. Importantly, the difference between a scenario of business-as-usual and a scenario of emissions reductions becomes substantially greater on longer time-scales, hence farther in the future.

The researchers accounted for a number of uncertainties in the computations, from the atmospheric warming response to carbon emissions to oceanic heat transport to the Southern ocean. 16 ice sheet modeling groups comprised of 36 researchers from 27 institutes contributed to the new study, which was coordinated by PIK. A similar study six years earlier had to rely on the output of only five ice sheet models. This development reflects the increasing importance of research on the Antarctic ice sheet.

"Risks for coastal metropolises from New York to Mumbai, Hamburg to Shanghai"

"The more computer simulation models we use, all of them with slightly different dynamic representations of the Antarctic ice sheet, the wider the range of results that we yield - but also the more robust the insights that we gain," says co-author Sophie Nowicki of the NASA Goddard Space Flight Center and lead author of the Intergovernmental Panel on Climate Change who led the overarching ice sheet model intercomparison project, ISMIP6. "There are still large uncertainties, but we are constantly improving our understanding of the largest ice sheet on Earth. Comparing model outputs is a forceful tool to provide society with the necessary information for rational decisions."

Over the long-term, the Antarctic ice sheet has the potential to raise sea level by tens of meters. "What we know for certain," says Levermann, "is that not stopping the burning of coal, oil and gas will drive up the risks for coastal metropolises from New York to Mumbai, Hamburg or Shanghai."

Article: Levermann, A., Winkelmann, R., Albrecht, T., Goelzer, H., Golledge, N. R., Greve, R., Huybrechts, P., Jordan, J., Leguy, G., Martin, D., Morlighem, M., Pattyn, F., Pollard, D., Quiquet, A., Rodehacke, C., Seroussi, H., Sutter, J., Zhang, T., Van Breedam, J., Calov, R., DeConto, R., Dumas, C., Garbe, J., Gudmundsson, G. H., Hoffman, M. J., Humbert, A., Kleiner, T., Lipscomb, W. H., Meinshausen, M., Ng, E., Nowicki, S. M. J., Perego, M., Price, S. F., Saito, F., Schlegel, N.-J., Sun, S., and van de Wal, R. S. W. (2020): Projecting Antarctica's contribution to future sea level rise from basal ice shelf melt using linear response functions of 16 ice sheet models (LARMIP-2), Earth Syst. Dynam., 11, 35-76. DOI: 10.5194/esd-11-35-2020.

Weblink to the article: https://www.earth-syst-dynam.net/11/35/2020/

IceArctic & AntarcticaSea-level RiseModel IntercomparisonTipping ElementsPISM-PIKFutureLab - Earth Resilience in the AnthropoceneRD4 - Complexity Science

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

氷期最寒期のダスト飛来量を複数の南極アイスコアから復元 ～ダスト起源のパタゴニアからの輸送距離の違いを反映～

2020年3月10日

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
国立大学法人 北海道大学
国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立大学法人東京大学 大気海洋研究所

国立極地研究所（所長：中村卓司（なかむらたくじ））の大藪幾美（おおやぶいくみ） 研究員（日本学術振興会特別研究員PD）と川村賢二（かわむらけんじ） 准教授、北海道大学低温科学研究所（所長：福井 学（ふくいまなぶ））の飯塚芳徳（いいづかよしのり） 准教授、東京大学大 気海洋研究所（所長：河村知彦（かわむらともひこ））の阿部彩子（あべあやこ）教授、海洋研究開発機構（理事長：松永 是）の大垣内るみ（おおがいとるみ） 研究員らによる国際共同研究グループは、南極内陸のドームふじとドームCアイスコア（図1）に含まれる微粒子（図2）のサイズや形状、化学組成を一粒ずつ電子顕微鏡によって解析することで、最終氷期の最寒期（約2万年前）にドームふじに降下したダスト（陸域を起源とする微粒子）がドームCよりも約3倍も多かったことを初めて明らかにしました（図3）。また、同時期にドームCに飛来したダストの方が小さく扁平であることから、より遠くから運ばれてきたこともわかりました。これらの結果は大気大循環モデルによるシミュレーションとも整合的であり（図4）、その原因は、氷期のダストの主な起源である南米南部のパタゴニアからの輸送距離の違いであると考えられます。この成果は「Journal of Geophysical Research - Atmospheres」誌に掲載されました。

研究の背景

大気中に浮遊しているエアロゾル粒子は太陽光を吸収・散乱させることで地球の放射収支に影響を及ぼしたり（エアロゾルの直接効果）、雲の凝結核となることで雲の生成や特性に影響を与え、間接的に地球の気候に影響を及ぼしたりします（エアロゾルの間接効果）。エアロゾルが過去の気候変動に与えた影響を評価するためには、エアロゾルの種類や量、発生起源、輸送経路などを正確に復元し、数値モデルで再現することが求められます。エアロゾル粒子の中でも鉱物ダスト（陸域を起源とする微粒子）は氷期の地球寒冷化に貢献する代表的なエアロゾルです。南極氷床には、過去に飛来したダストなどの微粒子が堆積しているため、氷床を鉛直方向に掘り抜いたアイスコアを調べることで、過去にどのような種類のエアロゾルがどれくらい南極へ飛来したかを調べることができます。

これまでの研究から、氷期に南極内陸へ飛来するダストの主な起源は南米南部のパタゴニア（図1）であるとされています。南極の周りでは時計回りの大気循環があることから、パタゴニアからのダストの飛来量は欧州連合のチームによるドームCアイスコア掘削地点（図1）よりも日本のチームによるドームふじアイスコア掘削地点（図1）の方が多かったことが予測でき、実際、複数のダスト輸送モデルがそのような結果を示してきました。ところが、アイスコアのダスト濃度は、ドームCの方が高かったという逆の結果が示されていました（文献1）。その原因の一つに欧州連合と日本でアイスコア中のダスト濃度の分析方法に違いがあることが挙げられます。

研究の内容

本研究は、日本と欧州の国際共同研究として、新しくかつ全く同じダストの分析手法をドームふじおよびドームCで掘削したアイスコアに適用し、定量的に両者のダスト濃度を比較しました。具体的には2つのアイスコアから、氷を昇華させて数μmのダストと海塩粒子（図2）を取り出し、それら一粒ごとに電子顕微鏡を用いて分析することで、両地域に飛来するダストと海塩粒子の化学組成と質量比を解明しました。ダストと海塩粒子という起源の異なるエアロゾルを復元したことが本研究の独創的な手法であり、海塩粒子を基準にして異なる2つのコアのダスト濃度を定量的に比較できるようになりました。その結果、最終氷期最寒期（約2万年前）のドームふじのダスト沈着量は、ドームCよりも約3倍高かったという結果を得ました（図3）。電子顕微鏡による形状観測から、ドームCに飛来したダストの方が小さく扁平で、ドームふじに飛来したダストよりも遠くまで運ばれやすい性質を持っていたこともわかりました。さらに、硫酸によって変質した海塩粒子の割合を比べたところ、ドームふじコアの方が硫酸によって変質した海塩が少ないことがわかりました。硫酸は海塩よりもダストと優先的に反応することから、ドームCよりも変質した海塩が少なかったのはドームふじの方がダスト飛来量が多かったためだと考えられます（注1）。大気大循環モデルを用いたダスト輸送シミュレーションもまた、ドームふじのダストフラックスがドームCよりも高かった（図4）という結果を示しています。このように、氷期のダストの主な起源がパタゴニアであることと、そこからのダストの輸送距離によって南極内陸でのダストフラックスが決まることをアイスコアのデータから初めて明らかにするとともに、モデルの計算結果を定量的に検証することができました。

さらに、最終退氷期に相当する約17,000年前以降における両コアのカルシウムを含むダスト粒子の化学組成が異なることから（注2）、この頃に飛来したダストの輸送高度がドームふじとドームCで異なっていたことも示唆されました。この結果は、間氷期にオーストラリアから輸送されるダストの割合がドームCで増えたという従来の研究結果を支持する一方で、ドームふじには引き続きパタゴニアを起源とするダストが多く飛来していたことを新たに示唆しました。

今後の展望

本研究により、南極内陸に飛来する鉱物ダスト沈着量が南極内陸でも地域によって何倍も異なり、それが輸送距離で決まるという重要な知見を得ることができ、数値モデルの検証にもつながりました。今後は、より多くの地点のアイスコアを同一の手法で分析することで、ダストフラックスの空間分布が解明されることが望まれます。それにより、ダストの輸送モデルの検証が一層進み、エアロゾルの直接効果や間接効果、気候感度に関する研究の発展や、より正確な気温の将来予測につながることが期待されます。

注

文献1：
Dome Fuji Ice Core Project Members (2017). State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. Science Advances, 3, e1600446.

注1：
南極周辺の海氷や海水を起源とする海塩粒子は、南極内陸への輸送される間に、その大部分が、南大洋の海洋生物を起源とする硫酸と反応し、硫酸ナトリウムとなる。ダスト濃度の高い氷期は、ダストが硫酸と反応するため、海塩の一部は硫酸と反応せずに輸送される。ドームふじの方がダスト飛来量が多かったため、ドームCと比べてドームふじの方が硫酸により変質した海塩が少なかったと考えられる。

注2：
本研究から、約17,000年前以降、ドームふじの方が硫酸カルシウムの割合が高く、ドームCの方が硝酸カルシウムの割合が高いことがわかった。南極へ輸送されるカルシウムを含む主な鉱物は、硫酸カルシウムと硝酸カルシウムである。両者とも、その多くは炭酸カルシウムを起源とし、大気中で硫酸や硝酸との化学反応により生成される。硫酸と硝酸は起源が異なり、大気中でそれぞれが分布する高度が異なると考えられるため、硫酸カルシウムは低部対流圏で、硝酸カルシウムは上部対流圏で生成されたと考えられる（南極において、硫酸の主な起源は海洋の生物が放出する有機硫黄化合物であり、硝酸は起源は成層圏や上部対流圏である）。そのため、2地点間の硫酸カルシウムと硝酸カルシウムの割合の違いは、各地点に飛来したダストの輸送高度が異なっていたことを示すと解釈した。

発表論文

掲載誌： Journal of Geophysical Research: Atmospheres
タイトル： Compositions of Dust and Sea Salts in the Dome C and Dome Fuji Ice Cores From Last Glacial Maximum to Early Holocene Based on Ice-Sublimation and Single-Particle Measurements

著者：
大藪 幾美（国立極地研究所 日本学術振興会特別研究員PD）
飯塚 芳徳（北海道大学低温科学研究所）
川村 賢二（国立極地研究所）
Eric Wolff（ケンブリッジ大学）
Mirko Severi（フィレンツェ大学）

大垣内 るみ（海洋研究開発機構）
阿部 彩子（東京大学大気海洋研究所）
Margareta Hansson（ストックホルム大学）

URL： http://dx.doi.org/10.1029/2019JD032208
DOI： 10.1029/2019JD032208
論文公開日： 日本時間 令和2年2月22日

研究サポート

本研究は、科学研究費補助金（若手研究A23681001、若手研究B17K12816、特別研究員奨励費17J00769、国際共同研究加速基金15KK0027、新学術領域研究17H06320、17H06323、基盤研究S17H06104、基盤研究S18H05292）、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム、北欧COE（Nordic Centre of Excellence）、ロンドン王立協会（Royal Society）の助成を受けて実施されました。

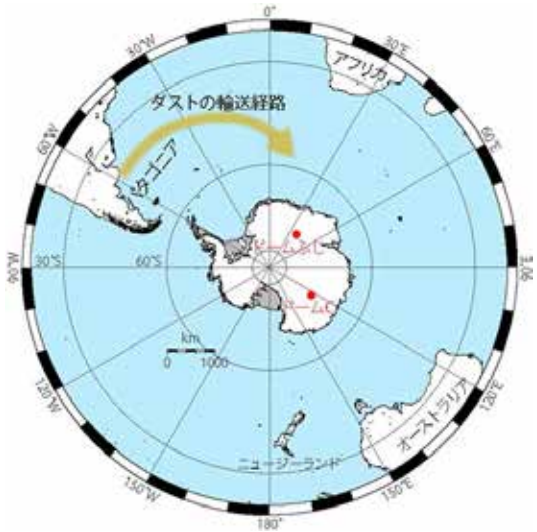


図1： 南極ドームふじアイスコアとドームCアイスコアの掘削点と、氷期のダストの主な起源とその輸送経路。氷期のダストはパタゴニアを主な起源とし、南極を中心とした時計回りの大気循環によって南極へ輸送されたと考えられている。

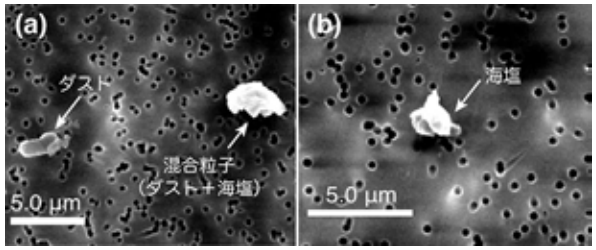


図２： 代表的な鉱物ダストと海塩粒子の電子顕微鏡写真（（a）左:ダスト、右:ダストと海塩の混合粒子、（b）海塩）。多数の黒い丸はフィルターの孔。

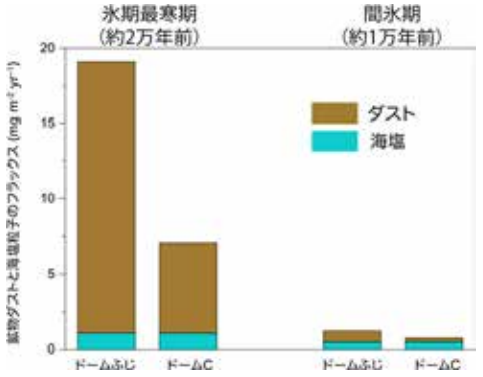


図３: 氷期最寒期（約2万年前）と間氷期（約1万年前）のダストと海塩のフラックス。海塩フラックスはドームふじもドームCもほぼ同じだが、ダストフラックスはドームふじの方が2〜3倍高い。氷期最寒期にダスト飛散量が増えた理由は、パタゴニアの氷河が拡大し氷河が地表を削ることで、ダストとして飛散する氷河性堆積物が増えたことが主な要因であると考えられている。その他にも、海水準が下がり陸地の露出面積が増えたことや、植生が変化し乾燥していた、風が強くダストが輸送されやすかったなど、複数の要因が考えられている。

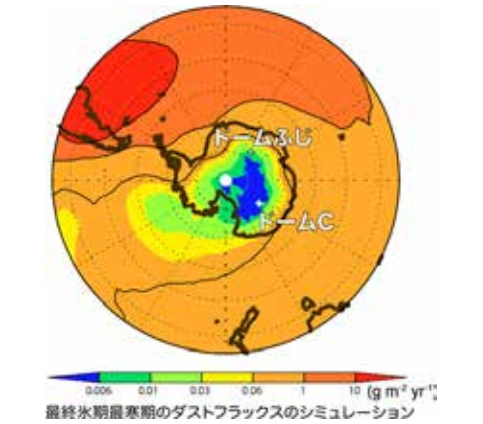


図4：最終氷期最寒期（21,000年前）の大気大循環モデルによるダストの輸送ミュレーション。パタゴニア周辺のフラックスが高いことからダストの発生源がパタゴニアであること、時計回りにフラックスの勾配があることから、南極を中心とする時計回りの大気循環によってダストが輸送され、輸送距離が長いほどフラックスが減少している様子がわかる。モデルの結果からも、最終氷期最寒期においてドームCよりもドームふじの方がダストフラックスが高いことが示されている。

お問い合わせ先

研究内容について
国立極地研究所 気水圏研究グループ（日本学術振興会特別研究員PD）
大藪 幾美（おおやぶ いくみ）
TEL：042-512-0760　E-mail：oyabu.ikumi@nipr.ac.jp

報道について
北海道大学総務企画部広報課
TEL：011-706-2610　FAX：011-706-2092　E-mail：kouhou@jimu.hokudai.ac.jp

国立極地研究所 広報室
TEL：042-512-0655　FAX：042-528-3105　E-mail：kofositu@nipr.ac.jp

いいね！ 87　　ツイート

ページの先頭へ

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

PRESS RELEASE 2020/9/16

北海道大学 HOKKAIDO UNIVERSITY
JAMSTEC
東京海洋大学

南極の海の底，もう甘くするのは止めました!?

～数十年続いた淡水化傾向が逆転。南極海観測網の継続に期待～

ポイント

・2018-19 年の開洋丸航海などによりオーストラリア南方の南極海での最新の広域観測に成功。
・1970 年代から低下してきた深海の塩分が 2010 年代に上昇に転じた実態を解明。
・今後の南極海観測網の整備による海洋モニタリングの継続に期待。

概要

北海道大学低温科学研究所の青木　茂准教授，海洋研究開発機構の勝又　勝郎主任研究員，東京海洋大学，水産研究・教育機構らによる共同研究グループは，オーストラリア南方の南極海の海底付近において，これまで加速度的に低くなってきているとされてきた塩分[*1]が，2010 年代に反転して急激に高くなりつつあることを見出しました。これまで減ってきていた重い水の量も増えています。こうした海の変化の実態は，水産庁の開洋丸による広域海洋調査や東京海洋大学の海鷹丸による観測航海といった近年の日本による観測を，世界の過去の観測も含めて比較することで判明しました。この変化は，南極深海の海洋循環が強まりつつある可能性も提示しています。変化の原因は，この海域の上流側に位置する南極の棚氷[*2]の融解が，ここ何十年か加速してきていたものの，2010 年代の前半に弱まったことにある可能性があり，南極氷床[*3]と深海との連動性を示すものです。今後の動向を見極めるためには，南極海モニタリング観測網の整備により，変化の傾向を引き続き注視していく必要があります。

本研究成果は，　2020 年 9 月 15 日（火）公開の *Scientific Reports* 誌に掲載されました。

2018-19 年に南極海の観測を行った開洋丸

【背景】

南極底層水は，南極大陸の沿岸で生まれて世界中の大洋の底に向けて拡がる，大洋でもっとも重い水です。南極沿岸を起点とした南極底層水の循環は，地球規模での熱や物質の輸送に大きな影響を与えています。オーストラリア南方に位置するオーストラリア―南極海盆における南極大陸近傍海洋では，観測記録が残っている 1970 年代から 2010 年代の前半まで，底層の塩分が低くなってきていることが知られていました。あわせて底層水の量もどんどん少なくなってきており，底層水の循環が弱まっている可能性を指摘する研究もありました。つい数年前までは，こうした塩分の低下傾向は時を追うごとに加速しつつあると考えられていました。そして，この塩分の低下には，西南極[*4]にある棚氷の融解が加速して淡水の流出が増えていることが背景にあると指摘されていました。棚氷の背後にある氷床の流出が加速しており，地球の平均海水位の上昇につながっていると考えられています。

【研究手法】

深海底の塩分の時間的な変化を捉えるためには，決まった場所において極めて高い精度で繰り返し観測を行う必要があります。南極の夏から秋にあたる 2018 年 12 月から 2019 年 3 月にかけて，水産庁の開洋丸はこの海域を海面から海底まで広範囲にカバーする海洋観測を実施しました（図 1）。観測測線は 1996 年にオーストラリアが行った観測を再度実施したものです。一方，東京海洋大学は海鷹丸によって東経 110 度に沿ったラインの上を南極大陸の近くまで長年観測して来ました。今回，この開洋丸や 2015 年の海鷹丸による高精度海洋観測の結果をこれまで世界各国で行われてきた海洋観測の結果と合わせて解析し，塩分の最新の時間的な変化傾向を調べました。

【研究成果】

船舶観測によって得られた測定結果を時間順に比較してみると，1990 年代やそれに先立つ 1970 年代から下がってきていた底層の塩分は，2010 年代中盤を境に反転し，2010 年代後半では急速に高くなっていることがわかりました（図 2）。同様に，これまで減ってきていた底層水の厚さも回復し，底層水の量が増えていることがわかりました。この高塩分化傾向はより東側にあるロス海の近傍ほど強く，西側に行くにしたがって弱まっており，東側に変動の主な原因があることを示しています。

今回発見された結果は，西南極の棚氷の融解スピードが一段落して海に淡水が供給されなくなり，下流にあるロス海でできる底層水の塩分が上昇したことが原因となっていると考えるとほぼ説明ができます。氷床から深海底へつながる水輸送ルートの働きを示していると考えられますが，これまで言われていたこととは逆のことが起こりつつあることになります。

【今後への期待】

今回の結果は，南極の深海が従来考えられていたように一方的に変化していくわけではなく，変化の様相が刻々と変わることを示しています。南極氷床から淡水がどのように失われるのか，底層水の循環は将来どうなるのか，地球の気候全体にも関わるこうした底層水の今後を読み解くうえで，底層水の塩分がこのまま増え続けて昔の状態にもどるのか，あるいは近い将来もう一度反転して低くなるのか，南極海の現場での観測網を整備して，引き続き注視していく必要があります。

論文情報

論文名	Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin during 2010s（2010 年代におけるオーストラリア-南極海盆の南極底層水の淡水化傾向の反転）
著者名	青木　茂[1]，山崎開平[2]，平野大輔[1]，勝又勝郎[3]，嶋田啓資[4]，北出裕二郎[4]，佐々木裕子[5]，村瀬弘人[4]（[1]北海道大学低温科学研究所，[2]北海道大学大学院環境科学院，[3]海洋研究開発機構，[4]東京海洋大学，[5]水産研究・教育機構）
雑誌名	*Scientific Reports*
ＤＯＩ	10.1038/s41598-020-71290-6
公表日	日本時間 2020 年 9 月 15 日（火）午後 6 時（英国時間 2020 年 9 月 15 日（火）午前 10 時）（オンライン公開）

お問い合わせ先
北海道大学低温科学研究所　准教授　青木　茂（あおきしげる）
ＴＥＬ　011-706-7430　　ＦＡＸ　011-706-7142　　メール　shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp
ＵＲＬ　http://climbsd.lowtem.hokudai.ac.jp/group/shigeru/
配信元
北海道大学総務企画部広報課（〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目）
ＴＥＬ　011-706-2610　　ＦＡＸ　011-706-2092　　メール　kouhou@jimu.hokudai.ac.jp

【参考図】

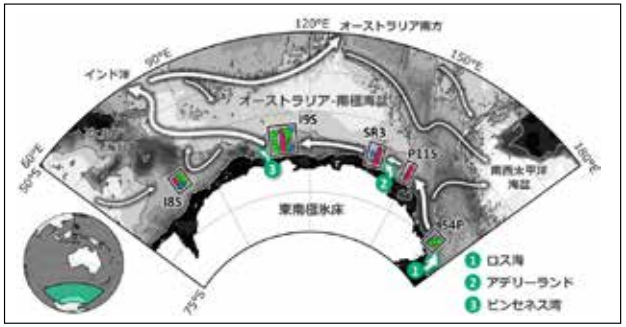


図 1. 南極海における観測海域（〇付数字は南極底層水の形成地点，矢印は南極底層水の拡がり方を示す）。

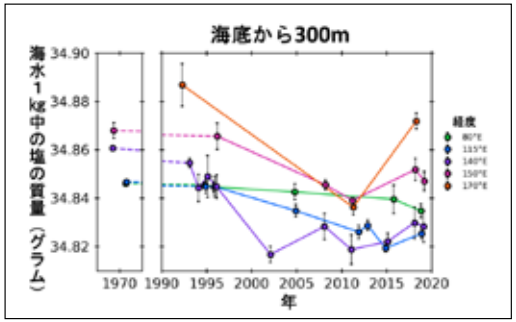


図 2. 底層の塩分の時間変化（底層の海底から 300ｍまでの平均値。オレンジは東経 170 度，ピンクは東経 150 度，紫は東経 140 度，青は東経 115 度，緑は東経 80 度での観測結果をそれぞれ示す）。

【用語解説】

＊1 塩分 … 海水の中に含まれる塩の量のこと。海水 1 kgのなかに溶けている量のグラム数で定義する。
＊2 棚氷 … 氷床から流れ出して周辺の海の上に浮かんだ部分のこと。
＊3 氷床 … 長い年月をかけて降り積もった雪が押し固められてできた，巨大な氷の塊のこと。
＊4 西南極 … 南極大陸の西経領域のこと。

研究成果

南極現地調査で明らかになった過去の急激な南極氷床の融解とそのメカニズム

2020年9月18日
総合研究大学院大学
情報・システム研究機構 国立極地研究所

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

●東南極の宗谷海岸南部での氷河地形調査と岩石の年代測定に基づいて、約2万年前の最終氷期以降における東南極氷床の融解過程を詳しく明らかにしました。
●この地域では9-5千年前の間に、南極氷床が厚さで400m以上も急激に融解したことがわかりました。
●この急激な南極氷床の融解は、外洋から流入した暖かい海水によって引き起こされたと考えられ、氷床融解のメカニズム解明のための重要な知見となります。

本研究では、氷河地形調査と表面露出年代測定（注1）から、東南極宗谷海岸南部の露岩域（注2）における時空間的な氷床融解過程を復元しました。その結果、この地域では最終氷期において完全に南極氷床に覆われており、その後およそ9千年から5千年前にかけて氷床が急激に融解したことが明らかになりました。この急激な氷床の融解時期は、沖合の暖かい海水が露岩域近傍の海底谷へ流入した時期とおおよそ一致します。以上の結果は、暖かい海水の流入によって急激な氷床融解が起きたことを示唆しています。本研究結果は南極氷床の融解メカニズムの理解に貢献するだけでなく、南極氷床変動の将来予測のためのコンピューターシミュレーションを検証・改良するための貴重なデータとなります。

研究の背景

南極氷床の変動は、海水準・海洋循環の変動を介し全球的な気候変動と密接に関連しています。そのため、南極氷床の変動メカニズムを理解することは今後の人為的温暖化による地球環境変動を適切に評価する上で非常に重要です。近年、南大洋（南極海）の水温上昇により西南極の棚氷の流出速度が急激に上昇するだけでなく、西南極氷床も融解し始めていることが報告されています。とくに、氷床末端での融解は、大陸氷床内部に伝播しさらなる氷の流出を招くため、更なる氷床融解とその結果として急激な海水準上昇につながる恐れがあります。しかし、南極氷床、とくに東南極氷床の融解メカニズムは未解明の部分が多く、また現在の観測だけでは、今後急激に変化するかもしれない南極氷床融解の将来予測は容易ではありません。日本の南極観測拠点、昭和基地が位置する東南極の宗谷海岸では、過去の氷床融解について非常に限られたデータが得られていたのみであり、詳細な現地調査を基にした時空間的な氷床融解過程とその融解メカニズムは明らかにされていませんでした。我々は、この地域で2ヶ月におよぶ現地調査を2度にわたって実施し、さらに多地点より表面露出年代を得ることで、直近の氷期である最終氷期（注3）以降の南極氷床の時空間変動の精密な復元を試みました。

研究の内容

第57次および第59次南極地域観測隊において、東南極宗谷海岸南部の露岩域（スカルブスネス、スカーレン、テーレン：図1）に赴き、現地での氷河地形調査を実施しました。また、これら露岩域の29箇所から迷子石（注4）を採取し、日本に持ち帰って試料の表面露出年代を測定したところ、標高50mから400m（最高地点）まで連続的に採取した迷子石の表面露出年代は、およそ9–5千年前に収束することが明らかになりました（図2、3）。

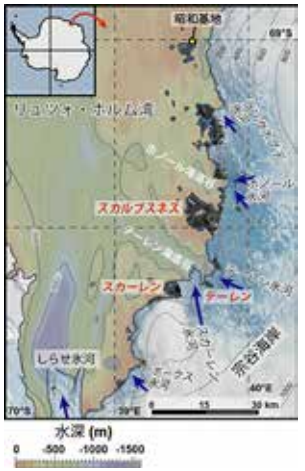


図1： 研究調査地域である東南極宗谷海岸。スカルブスネス、スカーレン、およびテーレンでの氷河地形調査および、迷子石試料の表面露出年代測定を行なった。

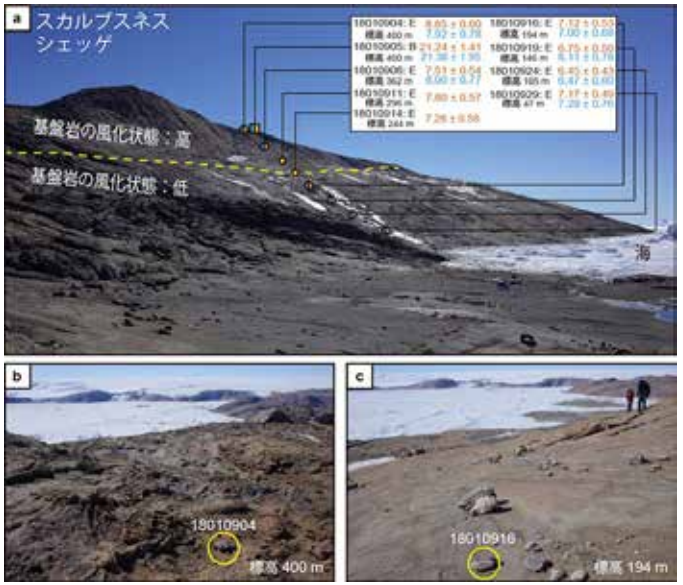


図2:
（a）スカルブスネスのシェッゲで採取した表面露出年代測定の結果。試料名（1801～）、種類（E迷子石、B基盤岩）、標高および表面露出年代を示す。赤字で示した数値はベリリウム-10（^{10}Be）を基にした表面露出年代、青字で示した数値はアルミニウム-26（^{26}Al）を基に計算した表面露出年代を表す（単位は千年）。

（b）シェッゲの標高400m地点。基盤岩は激しく風化を被っていた。
（c）シェッゲの標高194m地点。標高約250m地点を境に基盤岩の風化状態が異なっていた。黄色丸で囲まれた迷子石を採取し、表面露出年代を測定した。
基盤岩は表面が激しく風化しており、また表面露出年代も迷子石と比べて著しく古いことから、最後に氷床から露出した年代を調べるためには適さないことが明らかとなった。

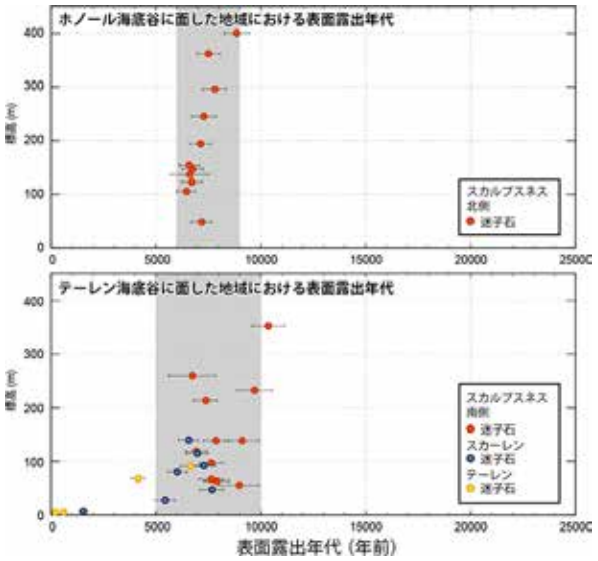


図3: 横軸は迷子石の表面露出年代、縦軸は迷子石試料の採取地点の標高。表面露出年代測定の結果はおよそ9–5千年前に集中しており、この期間に急激に氷床が融解したことを示す。

これらの結果から、最終氷期において南極氷床はこの地域の最高地点（標高400m）を完全に覆っており、その後9–5千年前にかけて急激に融解した（短期間で露出した）ことが示されました。この融解時期は南極における気温上昇のタイミングとは一致せず、むしろ調査地域近傍の海底谷への暖かい海水の流入時期と一致します（図4）。今回の結果は、急激な氷床融解を引き起こすメカニズムとして暖かい海水の流入が大きな役割を果たしている可能性を示しています。

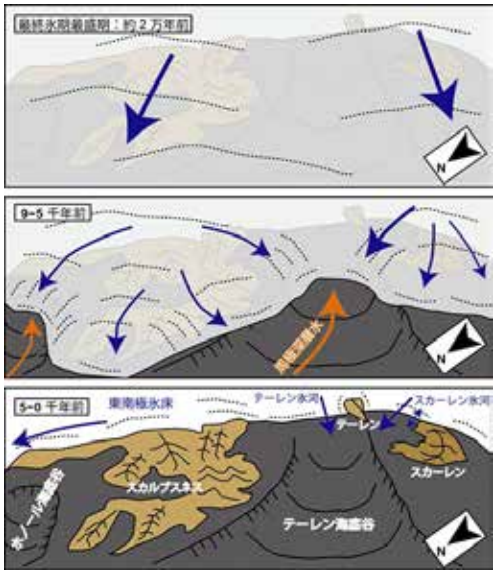


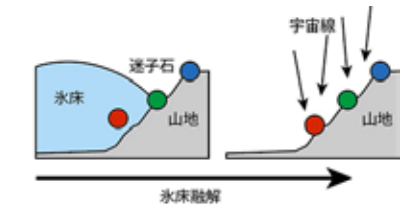
図4: 宗谷海岸南部地域の氷床融解過程の概念図。青矢印は地形調査結果から推定される当時の氷床流動方向を示す。宗谷海岸南部地域は約2万年前の最終氷期最盛期には厚さ400m以上の氷床で覆われていた。その後、約9–5千年前にかけて暖かい海水（周極深層水）が海底谷に流入したことにより氷床が急激に融解したと考えられる。

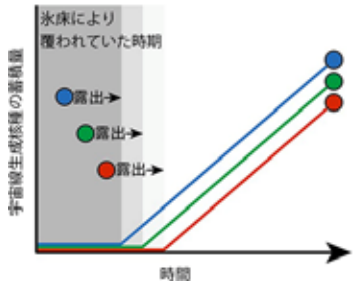
今後の展開

本研究により、西南極氷床のみでなく、地球上最大の氷床である東南極氷床においても、過去に暖かい海水の流入に起因すると考えられる急激な氷床の融解が起きたことが明らかとなりました。今後、宗谷海岸近傍から採取された海底堆積物や海底地形データの分析・解析によって、海洋による氷床の急激な融解メカニズム（海洋-氷床の相互作用）の理解がより深まると考えられます。このような知見は、今後の気候変動による南極氷床の変動の将来予測においても重要な知見となります。

注

注1：表面露出年代
地表面が宇宙線にさらされている間に岩石中に形成される宇宙線生成核種（^{10}Be・^{26}Alなど）の蓄積量から、地表面が氷床から露出した年代を推定する手法。





表面露出年代の概念図。氷床が融解するとその中に含まれていた岩石（迷子石）が氷床から露出し、宇宙線にさらされ宇宙線生成核種が蓄積する。その蓄積量から、氷床から露出してから経過した時間、すなわち表面露出年代が求められる。Heyman et al. (2011)を一部改変して作成。

注2：露岩
現在氷床に覆われておらず地表面が露出している場所。

注3：最終氷期
第四紀の氷期間氷期サイクルのうちの最後（現在から直近）の氷期。約7万から1万年前まで。とくに最終氷期中の約2万年前の全球的に最も寒くなった期間のことを、最終氷期最盛期と呼ぶ。

注4：迷子石
氷河によって削り取られた岩塊が、長い年月のうちに氷河の流れに乗って別の場所に運ばれ、氷河が融け去った後にその場に取り残されたもの。

発表論文

掲載誌： Quaternary Science Reviews
タイトル： Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating

著者：
川又基人（総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻）
菅沼悠介（国立極地研究所 地圏研究グループ 准教授）
土井浩一郎（国立極地研究所 地圏研究グループ 准教授）
三澤啓司（国立極地研究所 地圏研究グループ 准教授）
平林幹啓（国立極地研究所 アイスコア研究センター/気水圏研究グループ 特任助手）
服部晃久（総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻）
澤柿教伸（法政大学 社会学部 准教授）

南極大陸で岩石サンプリングをする著者（川又氏）

DOI：10.1016/j.quascirev.2020.106540
URL： https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106540
受理原稿公開日： 2020年9月11日（オンライン版）

研究サポート

本研究はJSPS科研費（19H00728、16H05739、17H06321、22500991）、東レ科学技術研究助成、日本科学協会の笹川科学研究助成（2019-6047）および、国立極地研究所のプロジェクト研究費（KP-7、KP306）の助成を受けて行われました。また、現地調査・試料採取は第57、59次南極地域観測隊の支援により行われました。

いいね！ 184　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

南極海海氷域における窒素固定の発見 -窒素固定が全球プロセスであることが明らかに-

2020年10月27日

東京大学 大気海洋研究所
海洋研究開発機構
国立極地研究所
ワシントン大学
豊橋技術科学大学
東京海洋大学

発表のポイント

◆南極海海氷域で窒素固定（注1）が活発に行われていること、亜熱帯種と考えられていたシアノバクテリアのUCYN-A（ 注2）が主要な窒素固定生物であることを明らかにした。
◆窒素固定は全球プロセスであり、UCYN-Aがそれを可能にしていることを明らかにした。
◆海洋において、窒素供給プロセスである窒素固定と窒素除去プロセスである脱窒との収支が合わないことが問題になっていた。極域窒素固定が解決策になると期待される。

発表者

塩崎　拓平（東京大学大気海洋研究所　准教授／海洋研究開発機構　外来研究員／
第60次南極地域観測隊　夏隊同行者）
藤原　　周（海洋研究開発機構　北極環境変動総合研究センター研究員）
井之村 啓介（ワシントン大学　海洋学科　研究員）
広瀬　　侑（豊橋技術科学大学　応用化学・生命工学系　助教）
橋濱　史典（東京海洋大学　大学院海洋科学技術研究科　助教）
原田　尚美（海洋研究開発機構　地球表層システム研究センター長／
第60次南極地域観測隊　夏隊長／国立極地研究所　客員教授（研究当時））

発表概要

海洋における窒素固定はこれまで他の窒素栄養塩が極めて乏しい暖かい海で行われているローカルなプロセスと考えられてきました。本研究が対象とした南極海は窒素栄養塩が豊富にあり、かつ窒素固定に必要な鉄が不足した海域です。そのため、これまでほとんどの海洋生態系モデルにおいても窒素固定は行われないとされてきました。

東京大学と海洋研究開発機構、ワシントン大学、豊橋技術科学大学、東京海洋大学の国際共同研究チームは、第60次南極地域観測隊（実施中核機関：国立極地研究所）の研究観測事業として南極観測船「しらせ」において南極海で広く観測を行った結果、窒素固定が南極海沿岸の海氷域で活発に行われていること、亜熱帯種と考えられていたUCYN-Aが主要な窒素固定生物であることを明らかにしました（図1）。

この研究からさかのぼること2年前、塩崎准教授を中心とする研究グループ及びアメリカ・カナダの研究グループは、北極海において窒素固定が行われていること、UCYN-Aが北極海での主要な窒素固定生物であることを明らかにしていました（注3）。これら北極海の結果と今回の南極海の結果を総合すると、窒素固定は全球的なプロセスであること、そしてUCYN-Aが全球的な窒素固定を可能にしていることが新たに明らかになりました（図2）。南極海海氷域で窒素固定が行われている要因として、海氷には鉄が多く含まれていることが影響していた可能性が考えられました。

海洋窒素循環（図3）において、これまで長い間、窒素供給プロセスである窒素固定と窒素除去プロセスである脱窒との収支が合わないことが問題になっていました。極域窒素固定はその問題を解決すると期待されています。

発表内容

窒素分子は窒素同士が三重結合で結びついた物質であり、非常に安定していて、通常の生物はその窒素を利用することができません。この窒素を直接利用できるのが窒素固定生物ですが、窒素固定生物はその三重結合を壊して窒素を利用するために、他の窒素栄養塩（硝酸塩やアンモニウム塩）を利用するよりも大量なエネルギーを必要とします。そのため、窒素固定生物は他の窒素栄養塩の乏しい熱帯・亜熱帯海域においてのみ他の生物に対して競争的に有利であると考えられてきました。しかし、近年の研究によって、窒素固定生物は非常に多様で、様々な生理特性を持つこと、それによっていくつかの種はより高緯度にも分布し、窒素栄養塩が豊富な海域でも窒素固定を行っていることが明らかになっていました。

極域は極端に低い水温や海氷の存在、豊富な窒素栄養塩といったように熱帯・亜熱帯海域とは大きく環境が異なります。しかし近年、北極海において窒素固定が行われていることが明らかになりました（注3）。そしてそこでは亜熱帯域に存在する窒素固定生物が検出されていました。北極海は低緯度域から海水が流入しています。また北極海の一部では夏季に窒素栄養塩が枯渇することがあります。そのため、北極海は極域であっても窒素固定が起こりうると考えられたのです。一方、南極海は南極大陸を一周する周極流が存在し、周囲の海と海水の行き来が分断されています。また南極海は鉄が不足しているため、窒素栄養塩が生物利用されずに大量に余った海域として知られています。窒素固定を担うニトロゲナーゼという酵素は鉄を含む酵素であり、そのため窒素固定は鉄によって制限されます。そのためこれらのことを考慮すると南極海では窒素固定が行われている可能性は低く、多くの海洋生態系モデルでも南極海では窒素固定は起こっていないとされていたのです。本研究成果は、このようなこれまでの知見を覆す発見となりました。

観測は第60次南極地域観測隊夏隊の活動期間（2018年12月から2019年3月）に南極観測船「しらせ」と南極大陸沿岸における実地調査によって行われました。窒素固定は^{15}NでラベルされたN_2ガスを海水に加え、一定期間培養した後、粒子態窒素中の$^{15}N/^{14}N$の比を測定することで調べることができます。窒素固定は南極海沿岸域の定着氷域と氷縁域において検出されました（図1）。氷縁域の測点では熱帯・亜熱帯域沿岸域で見られるような非常に高い窒素固定活性（44.4nmol N L^{-1} d^{-1}）が検出されました。そして南極海沿岸域ではすべての測点でニトロゲナーゼをコードする遺伝子である*nifH*遺伝子が見つかりました。*nifH*遺伝子は種によって固有の塩基配列を持つことが知られています。そのため、微生物群集中の*nifH*遺伝子を調べることで窒素固定生物の存在の有無だけではなく、どの種がいたかまでである程度特定できることになります。*nifH*遺伝子の配列を詳しく調べた結果、他の海域で検出されていた窒素固定生物が南極海でも検出されていました。中でも興味深かったのはUCYN-Aと呼ばれる光従属栄養性バクテリアの*nifH*遺伝子が検出されたことです。UCYN-Aは亜熱帯を中心に生息する代表的な窒素固定生物のうちの一つです。UCYN-Aはいくつか亜種がいることが分かっていますが、南極海で見つかったのはそのうち最も主要な種と*nifH*遺伝子の配列が完全一致しました。また窒素固定の活性が検出された観測で、発現した*nifH*遺伝子（メッセンジャーRNA中の*nifH*遺伝子）の組成を調べてみると、UCYN-A の*nifH*遺伝子が最も多くなっていました。つまり南極海の窒素固定は主にUCYN-Aによって行われていることが示唆されたのです。

何が南極海での窒素固定を可能にしているのでしょうか？ 一つの可能性として考えられるのは海氷に含まれる鉄です。海氷には鉄が多く含まれることが知られており、南極海では海氷融解時の鉄供給が要因で植物プランクトンのブルームがしばしば発生することが知られています。南極海での窒素固定の検出が海氷域に限られたことは、この海氷からの鉄供給に起因していた可能性が高いと考えられます。この結果は南極海の窒素固定と海氷域の分布に密接な関わりがあることを示唆しています。すなわち、気候変動による海氷面積の変化が南極海の窒素固定量を変える可能性があるのです。

南極海での窒素固定が検出されたことで、海洋窒素固定はもはや熱帯・亜熱帯海域だけのローカルなプロセスではなく、全球規模で行われているプロセスであることが証明されました（図2a）。また南極海ではUCYN-Aが主要な窒素固定者であることが示唆されました。UCYN-Aは近年北極海にも存在することが明らかになっており（注3）、全球規模の窒素固定を理解する上で重要な生物であると言えます（図2b）。

極域の窒素固定は、海洋窒素循環の最大の謎とも言える問題を解明する鍵を握っている可能性があります。海洋窒素循環において、海洋に窒素を供給するプロセスである窒素固定と窒素除去プロセスである脱窒は平衡状態にあるとされています（図3）。しかし、それぞれの測定量を足し合わせると、窒素固定のほうが脱窒より明らかに小さくなる結果となることがわかっていました。つまり、窒素固定が過小評価されていることが示唆されていました。この不均衡の解消は海洋全体の窒素循環を理解する上で不可欠です。これまで算出されていた海洋の窒素固定量は熱帯・亜熱帯域のみで得られた値から見積もられたものです。そのため、極域の窒素固定を含めるとさらに海洋の窒素固定量は大きくなるはずです。極域窒素固定はこの窒素固定と脱窒の不均衡の解明に資すると考えられ、さらなる理解が重要となります。

本研究には、JSPS科研費JP15H05712, JP17H01852, JP19H04263, 20H04985とSimons Postdoctoral Fellowship (544338)の交付を受けて行った研究の成果が含まれています。

発表雑誌

雑誌名：「*Nature Geoscience*」
論文タイトル：Biological nitrogen fixation detected under Antarctic sea ice
著者：Takuhei Shiozaki*, Amane Fujiwara, Keisuke Inomura, Yuu Hirose, Fuminori Hashihama, Naomi Harada
DOI番号：10.1038/s41561-020-00651-7
アブストラクトURL：https://www.nature.com/articles/s41561-020-00651-7

問い合わせ先

東京大学大気海洋研究所　微生物分野
准教授　塩崎　拓平（しおざき　たくへい）
E-mail：shiozaki◎g.ecc.u-tokyo.ac.jp　　※アドレスの「◎」は「@」に変換してください

用語解説

注1　窒素固定
窒素固定は窒素分子（N_2）を還元してアンモニアを生成するプロセスであり、主に微生物によって担われている。窒素固定は海洋における主要な窒素供給源として知られている。
注2　UCYN-A
亜熱帯海域に広く分布する窒素固定生物で、植物プランクトンのハプト藻に共生していることが知られている。
注3
塩崎准教授の研究グループの成果：
Shiozaki, T. et al. (2018) Diazotroph community structure and the role of nitrogen fixation in the nitrogen cycle in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean), Limnol. Oceanogr. 63, 2191-2205.2018年のプレスリリース
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20180523/
アメリカ・カナダの研究グループの成果：
Harding, K. et al. (2018) Symbiotic unicellular cyanobacteria fix nitrogen in the Arctic Ocean. Proc. Natl. Acad. Sci.

USA 115, 13371-13375.
添付資料

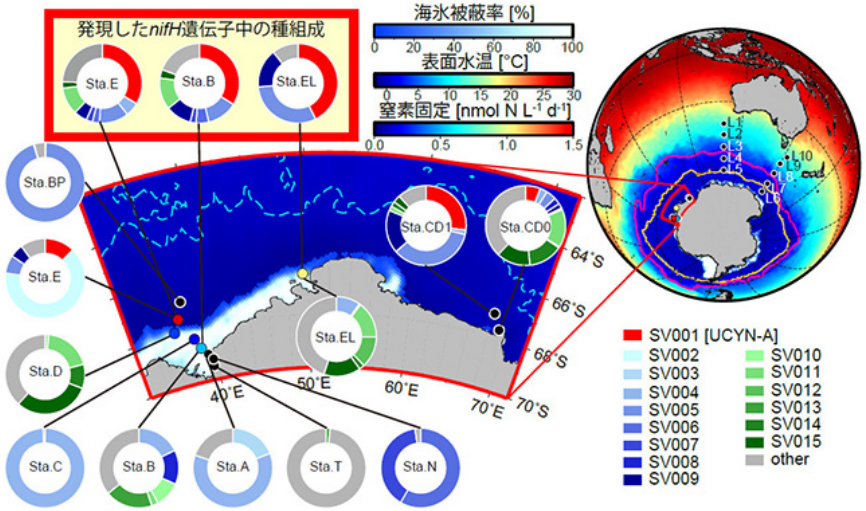


図1：観測点と最大窒素固定速度、窒素固定生物群集組成
窒素固定は主に海氷のある海域で検出されていることがわかる。黒点は窒素固定が検出されなかった点。nifH遺伝子は南極大陸周辺のすべての測点で検出された。窒素固定活性が検出された点ではnifH遺伝子の発現が見られ（赤い太枠中の円グラフ）、UCYN-AのnifH遺伝子（赤色）が主要となっていた。地図中の海洋側のバックグランドは表面水温を示している。

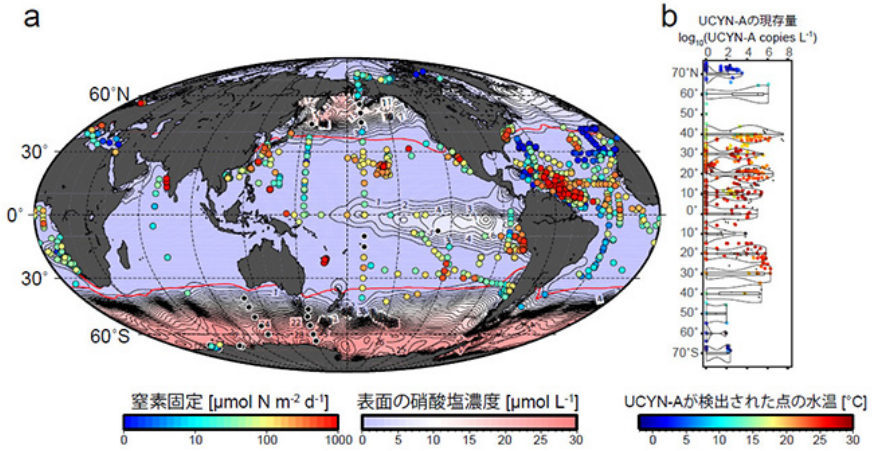


図2：(a)窒素固定が実測された点とそこで検出された窒素固定量の全球分布と(b)UCYN-Aの現存量の緯度分布
(a)今回南極沿岸域で窒素固定が検出されたことによって、窒素固定が全球規模のプロセスであることが示された。図中赤線はこれまで窒素固定が行われうる最低水温とされていた水温（20 ℃）の等温線。バックグランドは表面の硝酸塩濃度を示す。
(b)UCYN-Aは北極から南極まで広く分布していることがわかる。各点の色は水温を示す。黒点は水温データのない点。

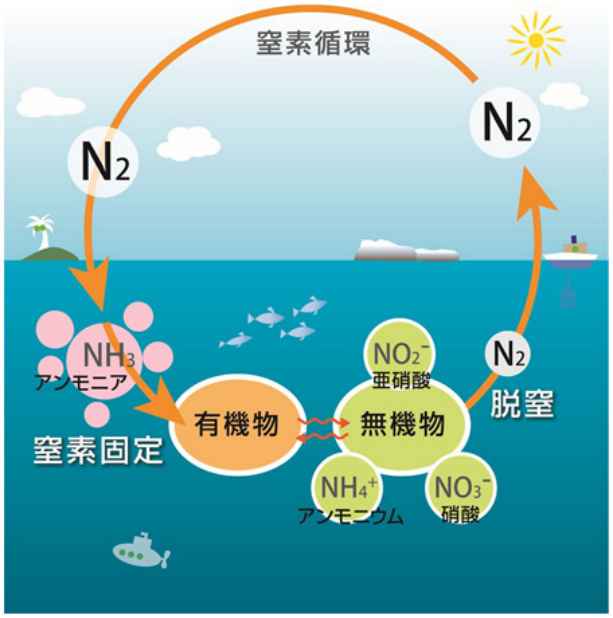


図3 海洋中の窒素循環の簡略図（提供：JAMSTEC）

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

海洋生物試料の固定・保存におけるルゴール液の汎用性を確認 ～遺伝子解析・安定同位体比分析・形態観察に有効～

2020年12月24日
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
学校法人創価大学
国立大学法人東京海洋大学

生物学では、採取した試料を持ち帰って分析するために、多くの場合、採取後すぐに凍結保存や試薬による固定・保存の処理を行います。固定・保存に用いられる様々な試薬（例えばホルマリンやエタノール）は分析目的によってそれぞれ一長一短があるため、複数の分析に適用可能な手法の開発が望まれていました。

国立極地研究所（所長：中村卓司）の佐野雅美特任研究員らの研究グループは、形態の維持が良好で、プランクトンなどの脆弱な海洋生物の固定・保存にしばしば用いられている「ルゴール液」（ヨウ素ヨウ化カリウム液、図1、注1）が、現在の海洋生態系研究で主要な研究手法である遺伝子解析や窒素・炭素安定同位体比分析（注2）目的での試料保存においても、長期にわたって有効であることを実験により示しました。

本手法は特に、極域での海洋生態系研究において重要な観測であるセジメントトラップ（注3）への活用が期待されます。セジメントトラップはその仕組み上、試料に対して一つの試薬で固定するしかありませんが、そこに本手法を用いることで、一つの試料から複数の分析ができるようになります。

また、凍結保存のような解凍時・解凍後の劣化や、エタノールのような組織の激しい収縮も発生しないため、極域のみならず広く海洋生態学、分類学に貢献するものと考えられます。

図1：10%中性ルゴール液で固定し1年以上保存した動物プランクトン試料。茶褐色に染色されるが、チオ硫酸ナトリウムにより脱色することが可能。中央の細長い個体はヤムシの一種。その右下の長い2本のアンテナを持つ個体は海洋における主要な動物プランクトンであるカイアシ類の一種。下部中央はクラゲの一種。右下のスケールバーは10mm。

研究の背景

フィールド採集を行う生物学では、試料を持ち帰って分析するために、多くの場合、凍結保存や試薬による固定・保存が必要です。特にプランクトン試料には脆弱なものが多く、採集した後に現場で速やかに保存のための処理を行うことが必須となっています。最適な固定・保存方法はその後に行う分析の手法よって異なり、例えば海洋生態系研究の分野では、形態観察であればホルマリンやグルタルアルデヒドなど、遺伝子解析であればエタノールや凍結保存など、安定同位体比分析などの化学分析であれば凍結保存などの固定・保存方法が用いられます。しかしながら、それぞれの方法に利点と欠点があるため（表1）、現場で試料を分割して各目的のための保存を行う必要があり、さらにそれができない場合には、分析の一部を断念せざるを得ないこともありました。そのため、様々な分析手法が用いられるようになった近年では、多様な分析に対応出来る保存方法が求められていました。

表1：主要な固定保存手法の分析・観測方法への適用の可否

	顕微鏡観察	窒素-炭素 安定同位体比分析	遺伝子解析
ホルマリン グルタルアル デヒド	○	×	×～△ （断片化、塩基置換など）
ルゴール液	○	（本研究）	（本研究）
エタノール アセトン	△ （脱水による収縮が激しい）	×	○
凍結保存	△ （解凍後の時間的制約 解凍時の破損）	○	○
塩化第二水銀	×～△ （高い毒性のため）	○	△ （PCR阻害のため 処理が必要）

そこで、佐野特任研究員らのグループは、一般には消毒液などとして知られ、海洋生態系研究では主に脆弱なプランクトンの顕微鏡観察目的に用いられる「ルゴール液」（ヨウ素ヨウ化カリウム液）に着目し、現在の海洋生態系研究で主要な分析手法である、窒素・炭素安定同位体比分析と遺伝子解析における、長期にわたる有効性を検証しました。

研究の方法と結果

まず、房総半島沖で動物プランクトンを採集後、2種類の濃度のルゴール液（5%、10%）でそれぞれ保存しました。また、比較のため、-60℃以下での凍結保存、5%ホルマリンでも固定・保存しました。

次に、これらの試料中の3種の動物プランクトンの窒素・炭素安定同位体比の値を6ヶ月にわたり測定したところ、10%ルゴール液で保存した試料の値は、この分析法で一般に用いられている凍結保存の試料との間に有意差はなく（図2）、凍結保存と同様に窒素・炭素安定同位体比分析に適していることが分かりました。

また、解凍後すぐに劣化の始まる凍結試料の場合は速やかな処理が必要ですが、プランクトン試料の選別と種同定には時間を必要とします。10%ルゴール液による固定試料では時間的制約が無いため、この問題を解決することもできます。

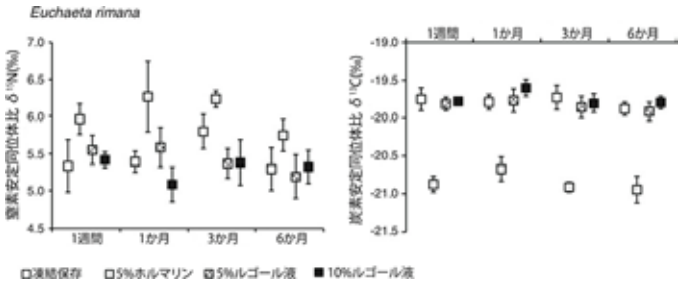


図2：動物プランクトン*Euchaeta rimana*の窒素・炭素安定同位体比の変化（平均値±標準偏差）。左側が窒素安定同位体比、右側が炭素安定同位体比の値。縦軸は安定同位体比、横軸は各保存期間を示す。凍結保存試料と10%ルゴール液で保存した試料の間で大きな差が見られないことが分かる。ほかの2種のプランクトンにおいても、凍結保存試料と10%ルゴール液試料の値に有意差はなかった。

次に、遺伝子解析での有効性を調べました。固定・保存処理から18ヶ月後に、各保存方法の試料からDNAを抽出し、PCRによる遺伝子増幅を行ったところ、10%ルゴール液で保存した試料と凍結保存試料では明瞭な増幅が確認され、5%ホルマリン、5%ルゴール液で保存した試料ではほとんど増幅されませんでした（図3）。

さらに、遺伝子の塩基配列を確認したところ、10%ルゴール液と凍結保存の塩基配列に違いはなく、ホルマリン固定で見られるような塩基置換が生じないことが分かりました。このため遺伝子解析を行う上でもルゴール液による固定保存は有効であると考えられます。

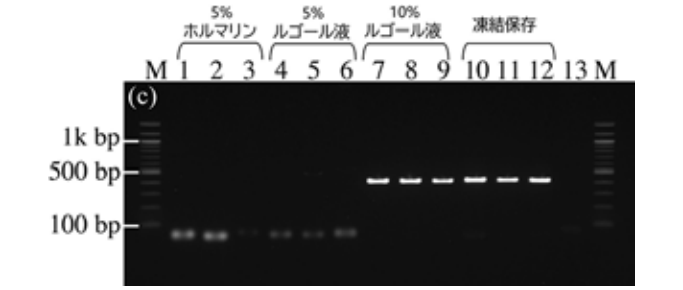


図3. 動物プランクトン*Undinula vulgaris*について、各試料を18ヶ月保存した後抽出したDNAを元に18S rRNA遺伝子V1 V2領域を対象にPCRした結果。10%ルゴール液試料と凍結保存試料で明瞭な増幅が確認された。ほかの2種のプランクトンでも、10%ルゴール液試料と凍結保存試料とで明瞭な増幅が確認された。

まとめと今後の展望

実験の結果から、10%ルゴール液による固定・保存は、従来知られていた形態観察に加え、窒素・炭素安定同位体比、遺伝子解析、いずれの目的にも使用できる、これまで海洋生態系研究で用いられてきた試薬の中で最も汎用性の高い固定保存方法であることが分かりました。コストの面でも、プランクトン試料であればエタノールの数分の1から数十分の1の費用で固定でき、また、凍結保存のように超低温フリーザーも必要としないため、導入も容易です。

本研究の成果は、極域での海洋研究で重要であるセジメントトラップでの観測で特に有効です。セジメントトラップは、長期間海中に係留してマリンスノーなどの沈降粒子や生物を捕集する装置で、海氷で船舶が近づけない南極海でも、年間を通じた生態系の観測を可能とします。セジメントトラップでの試料の保存には、これまでホルマリンや塩化第二水銀が主に用いられていましたが、表1に示したように、得られた試料が使用できる分析手法は限られていました。ここにルゴール液を用いれば、遺伝子解析に加えて顕微鏡観察や窒素・炭素安定同位体比分析を行うことができるため、複合的な解析が可能となり、南極海における海洋生態系の理解が大きく前進することが期待されます。本研究グループはすでに、ルゴール液を用いた南極海でのセジメントトラップ観測を実施しています。

また、近年の分類学で重要性が増している遺伝子解析には、エタノールによる試料の固定・保存が一般的ですが、脱水による組織の収縮が激しく、また試料が脆くなるため形態が破損する場合がしばしばあります。ルゴール液は形態の保存性が良好で、顕微鏡観察にも適しており、海洋生態系研究のみならず広く分類学への貢献も期待されます。

発表論文

掲載誌： Limnology and Oceanography: Method
タイトル： Effects of Lugol's iodine on long-term preservation of marine plankton samples for molecular and stable carbon and nitrogen isotope analyses

著者：
佐野 雅美（国立極地研究所 生物圏研究グループ 特任研究員）
真壁 竜介（国立極地研究所 生物圏研究グループ 助教）
黒沢 則夫（創価大学 理工学部 教授）
茂木 正人（東京海洋大学 海洋環境科学部門 准教授）
小達 恒夫（国立極地研究所 生物圏研究グループ 教授）

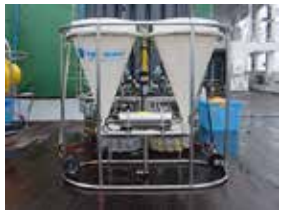
DOI： 10.1038/s41598-020-77488-y
URL： https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/lom3.10390
論文公開日： 2020年9月15日

注

注1：ルゴール液
ヨウ素・ヨウ化カリウム・純水で構成される。消毒薬などの場合は、さらにグリセリンなどが添加され調整されている。

注2：窒素・炭素安定同位体比分析
生物に含まれる炭素と窒素それぞれの質量の異なる原子の比率を調べることで、食物網やそれぞれの生物の栄養段階を調べる分析手法。

注3：セジメントラップ
マリンスノーなど海洋の表層から深層へ沈降する粒子を捕集する装置（右図）。沈降する粒子は上層の生物活動の情報を含むため、長期間海中に係留することで長期にわたって生物活動の履歴を得ることができる。また海洋表層から深層への炭素輸送量の見積もりにも用いられる。



研究サポート

本研究はJSPS科研費（JP17H01618、JP17H06319、JP17K07579、JP18K14515）の助成、および、東京大学大気海洋研究所共同利用研究（受付番号157，2019）の支援を受けました。

お問い合わせ先

国立極地研究所 広報室
【報道機関の方】取材・掲載申込フォーム
【一般の方】お問い合わせフォーム

いいね！ 69

高知大学 Kochi University

南極海での近年の海氷拡大が自然変動である可能性
～南極海における過去 2000 年間の海氷分布がエルニーニョや南半球環状モードと連動して変化していたことを解明～

1. 概要

高知大学海洋コア総合研究センターの池原実教授は、ボルドー大学（仏）の Xavier Crosta 博士との国際共同研究の一環として、ノルウェー極地研究所、ビクトリア大学（NZ）、グラナダ大学（スペイン）らの研究者と共同で、南極海における過去 2000 年間の海氷分布と表面海水温の変動を詳細に復元しました。その結果、南極海の海氷分布が熱帯域の**エルニーニョ/南方振動（ENSO）**（※1）や南半球における十年規模変動である**南半球環状モード（SAM）**（※2）と連動して変化していることを明らかにしました。

2. 発表のポイント

- 南極海（南大洋）における過去 2000 年間の海氷分布と表面海水温の変動を詳細に復元することに成功。
- 海氷分布が熱帯域のエルニーニョや南極域の十年規模変動（SAM）と密接に連動して変化していることを解明。
- 近年の南極海の海氷拡大傾向は自然変動によるものである可能性が高い。

南極海の海氷と氷山（撮影：池原実教授）

高知大学 Kochi University

3. 研究の背景

池原教授らの研究グループは、東京大学大気海洋研究所による共同利用システムを活用して**学術研究船白鳳丸**（※3）を用いた南大洋インド洋区における調査航海をこれまでに 5 回（2007 年度、2010 年度、2016 年度、2018 年度、2019 年度）実施してきています。2007 年度の KH-07-4 Leg3 航海でコンラッドライズから採取した海洋コア COR-1PC の解析からは、過去約 1 万年間の完新世において南極前線が数百年スケールで南北移動していたことを明らかにしました（Katsuki, Ikehara et al., 2014, Journal of Quaternary Science）。また、2010 年度の航海でも同じ海域から複数の海洋コアを採取し、本研究でも活用した COR-1GC の解析から、最終融氷期の 14,200 年前以降の表層水温変動を詳細に復元し、200 年～260 年の周期で表層水温が変動していたことを明らかにしました（Orme et al., 2020, Climate of the Past）。

このように南大洋のコンラッドライズ付近の海域は、南極前線の南に位置するために中深層からの栄養塩が豊富に供給されることによって珪藻を主体とする植物プランクトンの生産量が大きいため、堆積速度の速い珪藻軟泥が厚く堆積していることが海底下地層探査からも明らかになっています（Oiwane, Ikehara et al., 2014, Marine Geology）。大陸から遠く離れた外洋域では特異的に速い堆積速度をもつ珪質堆積物をコンラッドライズから採取して、センチメートルスケールで細かく分析することによって、10 年程度の時間解像度で過去から現代までの海洋環境変動を復元することができます。

本研究では、現代に続く約 2000 年間の南極海の海氷と海水温の変動を詳細に研究しました。この過去 2000 年間という期間は、中世温暖期や小氷期など人類が直接経験した気候変動が古文書などの歴史記録として残っているとともに、最近の 100 数十年は一定の精度をもつ海洋観測データが蓄積されている期間でもあることから、現代と過去をつなぐ時代として重要視されています。実際に、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が定期的にとりまとめている報告書でも、過去 2000 年間の気候変化についてのデータと情報がまとめられています。また、国際的な古気候研究ネットワークである PAGES（Past Global Changes）の中にも、過去 2000 年間の古環境変動解析に焦点を絞った「2K network」（http://pastglobalchanges.org/science/wg/2k-network/intro）が 2008 年に組織され、現代に続く気候変動の実態と将来予測のためのデータ集約がなされています。

4. 研究の目的・内容・成果

近年人為的な地球温暖化が進行しているにもかかわらず、南大洋の海氷は過去 40 年間で拡大する傾向を示していることが人工衛星による観測から指摘されています。海氷拡大傾向は、海洋の熱の鉛直再配分の変化と大規模な大気循環場の移動が関連していると考えられていますが、調査船による現場観測データや人工衛星などによる海氷分布記録は長くても 100 年程度に限定されるため、このような海氷分布の変動トレンドが人為的な要因による変動なのか、自然変動なのかを解き明かすことはできません。

そこで本研究では、南大洋インド洋区の 2 地点（図 1）から採取された**海洋コア**（※4）を解析することで、過去 2000 年間の海氷分布と海水温の変動を詳細に復元することに取り組みました。海洋コア試料の 1 つは、**統合国際深海掘削計画（IODP）**（※5）第 318 次航海（Exp.318）において南

極大陸近傍のアデリー海盆で掘削された U1357B であり、
もう 1 つは南極前線に近い南大洋インド洋区のコンラッドライズから学術研究船白鳳丸の KH-10-7 次航海で採取された海洋コア COR-1GC です。これらの海洋コア試料について、珪藻化石群集と珪藻バイオマーカーを分析することによって、表面海水温の変動と海氷の被覆期間の変化を 10 年以下の解像度で復元しました。その結果、それぞれの変動パターンの特徴が次の 4 つの期間に分類されることがわかりました。

第 1 期：紀元前 200 年～西暦 500 年
第 2 期：西暦 500 年～830 年
第 3 期：西暦 830 年～1520 年
第 4 期：西暦 1520 年～1900 年

U1357B においては、第 1 期と第 3 期では海氷珪藻種の *Fragilariopsis curta* と *F. cylindrus* が多産するとともに、海氷プロキシである高分岐イソプレノイドの組成比（Diene/Triene）が増加することから、この期間には南極大陸沿岸域において海氷が増加し、1 年のうち 8～10 ヶ月の間海氷に被覆されていたことが示されました。一方、第 2 期と第 4 期では、海氷プロキシが減少することから海氷被覆期間が 7～8 ヶ月に縮小していたことが示されています。南極前線付近の COR-1GC の珪藻群集からは、この地点には海氷が到達しなかったこと、夏季表層水温が第 1 期と第 3 期初期におよそ 4.5℃、第 2 期にはおよそ 3℃であったことが示されました。

先行研究による古気候古海洋記録と比較することによって、南大洋の海水温が高く南極沿岸域での海氷被覆期間が長い第 1 期と第 3 期は、南半球中緯度の偏西風ベルトが南下し、南半球環状モード（SAM）が強い正を示し、熱帯域ではエルニーニョ的な環境が卓越する時代であることがわかりました。これらの現象は気候モデルからも復元されています。このことは、エルニーニョ的な熱帯環境と正の南半球環状モードが継続する時代は、亜熱帯から南極域への熱移送が増加することで海氷の北方への移動（拡大）が妨げられることになり、結果として海氷が南極沿岸に制限され、海氷分布が縮小することになることを物語っています。

近年の人為的な地球温暖化にもかかわらず、南大洋では海氷分布が拡大する傾向を示していましたが、両者の同様の関係は人為的な影響が無い時代においても存在していたため、自然変動によるものである可能性が高いと考えられます。

5. 成果の意義・今後の展望

現在進行する地球温暖化が極域の海氷と氷床に与える影響の評価と将来予測は極めて重要であり、2019 年には IPCC から「海洋と雪氷圏に関する特別報告書」が公表され、温暖化による雪氷圏の変動、海氷分布の変化、氷床融解、海面上昇などに関するリスクがまとめられています。本研究は、観測記録のない時代の環境変動を海洋コアから詳細に復元し、南大洋の海氷と水温が熱帯域と連動しながら周期的に変動することを世界で初めて解明しました。

人為的な温暖化の進行に伴って、強いエルニーニョ状態の発生頻度の増加や南半球環状モードの

継続が予測されていることから、我々の研究成果に基づくと南大洋の海氷分布は今後数十年で縮小していくと考えられます。

このような研究分野は古海洋学（paleoceanography）と呼ばれており、世界中の海洋底から採取される海洋コアを試料として過去から現代に至る気候変動の実態を明らかにする研究が行われています。将来の温暖化地球のアナログとして注目されている時代が、およそ 12 万 5000 年前を中心とする最終間氷期最盛期です。今後、最終間氷期最盛期における南大洋の海氷分布や海水温の変化を詳細に復元解析し、全球的な気候変動や南極氷床の融解程度との関係を解明する研究が進展することが期待されます。

6. 論文情報

本成果は、英科学誌「Nature Geoscience」に2月22日付け（日本時間2月23日1時）に掲載されました。

なお、本研究で用いられた海洋コアCOR-1GCは、高知大学が令和元年度に開設した**学術コアレポジトリー**（※6）において冷蔵保管されており、研究者コミュニティに公開されています。本研究の一部は科研費・新学術領域研究「南極の海と氷床」の一環で行われ、科研費JP17H06318の支援を受けて実施されました。

〇論文タイトル：Multi-decadal trends in Antarctic sea-ice extent driven by ENSO-SAM over the last 2000 years
（過去 2000 年の ENSO-SAM による南極海の海氷分布の数十年規模変動）

〇著者名：Xavier Crosta [1], Johan Etourneau [1,2], Lisa Orme [3], Quentin Dalaiden [4], Philippine Campagne [1], Didier Swingedouw [1], Hugues Goosse [4], Guillaume Massé [5], Arto Miettinen [6], Robert McKay [7], Robert Dunbar [8], Carlota Escutia [9], Minoru Ikehara（池原実）[10]

1 Université de Bordeaux, CNRS, EPHE, UMR 5805 EPOC, Pessac, France
2 EPHE-PSL Research University, Paris, France
3 ICARUS, Department of Geography, Maynooth University, Maynooth, Ireland
4 Earth and Life Institute (ELI), Université catholique de Louvain (UCL), Louvain-La-Neuve, Belgium
5 LOCEAN, UMR CNRS/UPCM/IRD/MNHN 7159, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France
6 Norwegian Polar Institute, Tromsø, 9296, Norway
7 Antarctic Research Centre, Victoria University of Wellington, New Zealand
8 School of Earth, Energy, and Environmental Sciences, Stanford University, California, USA

9 Andaluz Institute of Earth Sciences, CSIC-University of Granada, Granada, Spain
10 高知大学海洋コア総合研究センター/Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, Nankoku, 783-8502, Japan

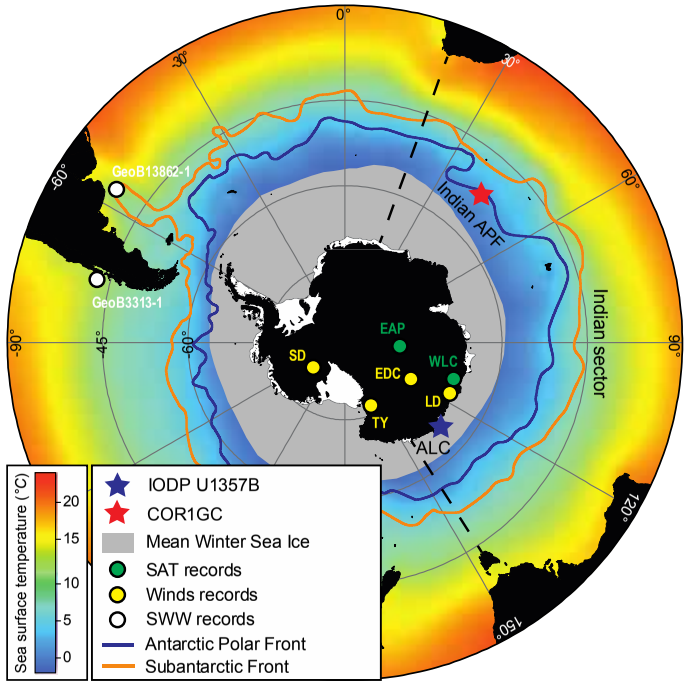


図 1　研究に用いた海洋コアの位置（★）を示すマップ。マップのベースは南大洋の表層水温分布と海洋フロント（南極前線:Antarctic Polar Front と亜南極前線: Subantarctic Front)。灰色の部分が冬季の平均的な海氷分布を示す。

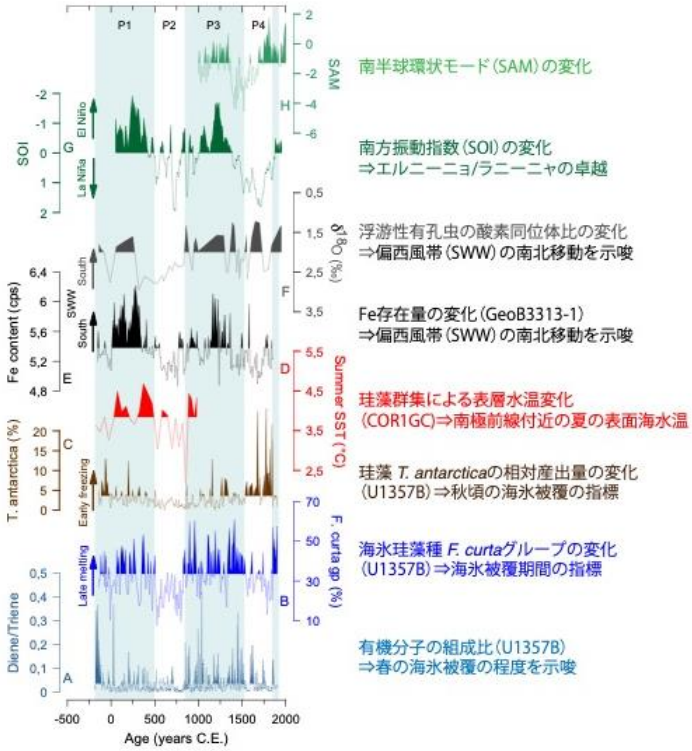
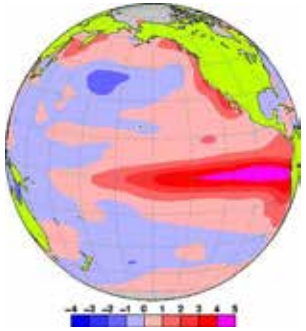


図 2　過去 2000 年間の南極海における環境変動を示すグラフ。南半球環状モード（SAM）と熱帯太平洋におけるエルニーニョ/南方振動（ENSO）の変化と、南半球の偏西風帯の移動、南極海における表面海水温や海氷被覆期間の変化の対応が見られる。

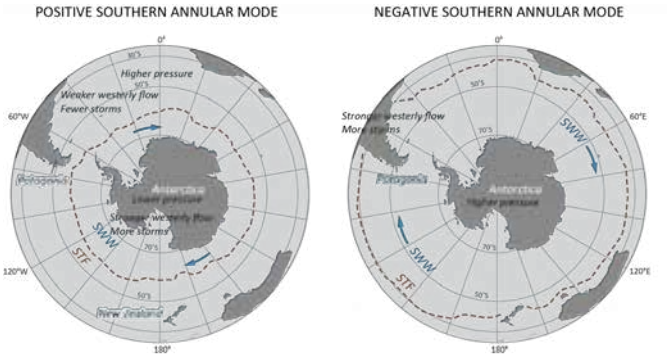
【用語解説】

※1　**エルニーニョ／南方振動（El Niño/Southern Oscillation: ENSO）**：単にエルニーニョとも呼ばれる。太平洋の赤道域に設定されたエルニーニョ監視海域（日付変更線付近から南米沿岸）の海面水温が平年より有意に高く（低く）なる現象をエルニーニョ（ラニーニャ）と呼び、それに伴って南半球の海面気圧の東西勾配が小さく（大きく）なる南方振動で特徴付けられる。太平洋熱帯域での大気と海洋の相互作用によって引き起こされる数年規模の気候変動である。ENSO の影響は地球全体に伝搬し（テレコネクションと呼ばれる）、日本をはじめ世界各地の気候に影響を与えている。



典型的なエルニーニョ現象が発生している時の太平洋の海面水温の平年偏差
https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/learning/faq/whatiselnino.html

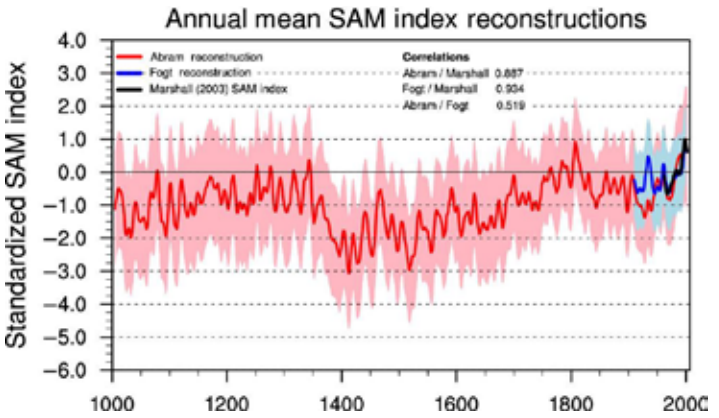
※2　**南半球環状モード（Southern Annular Mode: SAM）**：南極振動（Antarctic Oscillation: AAO）とも呼ばれる。南半球の中～高緯度帯に卓越し、南極大陸を中心として環状に吹く偏西風ベルト（中心は南緯 50-55 度）が 10 年から 100 年規模の周期で繰り返し南北に移動（振動）する現象。南極振動指数（SAM-index：南緯 40 度と南緯 65 度の気圧偏差）の値が大きな正の値の時には南極域の気圧が負偏差を示し、中緯度の海上を中心に正偏差を示す。南極振動指数が負の値の時には逆パターンとなり、南極域と中緯度の気圧がほぼ環状にシーソー的な変動を示す。南極振動指数が正の時は、偏西風は南下して強くなり、周南極深層水（Circumpolar Deep Water: CDW）の湧昇が強くなり、南極圏では相対的に温暖な CDW の影響が強くなるため南極氷床の棚氷融解を加速する。南極振動指数が負の時は、偏西風帯が低緯度側に拡大することで寒冷な環境が拡大し、CDW の湧昇は弱化し、棚氷融解も減少する。最近 10 数年間は正の南極振動指数が続いている（Fogt and Marshall, 2020）。



SWW and STF contract; increased wind strength
- Winds contract poleward
- Lower anomalous air pressure over Antarctica
- Patagonia warms; decreased precipitation; glaciers recede. Antarctic Peninsula warms.
- Increased CDW upwelling around West Antarctica and Antarctic Peninsula

SWW and STF expand; SWW decreased strength
- higher anomalous air pressure over Antarctica
- Patagonia cools; increased precipitation; glaciers advance. Antarctic Peninsula cools.
- Decreased CDW upwelling in West Antarctica and Antarctic Peninsula

http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/southern-annular-mode/



Fogt and Marshall, 2020

※3　**学術研究船白鳳丸**：海洋研究開発機構が運航する大型研究船（全長 100m）であり、海底地形探査装置など常設の観測設備に加えてピストンコアラーなど多様な観測機器を目的に応じて搭載することで長期間の多目的な研究航海を実施することができる。船内には 10 室の研究室があり、最大 35 名の研究者が乗船できる。東京大学大気海洋研究所の共同利用制度によって研究者コミュニティから研究航海計画が提案され、評価プロセスを経て採択された課題を基に長期航海が編成される。

ポートルイス港（モーリシャス）に停泊中の白鳳丸

※4　**海洋コア**：掘削などによって海底から採取される柱状の地質試料。プランクトンの遺骸、陸から運ばれる砂や泥、火山灰などが含まれる。

※5　**統合国際深海掘削計画（IODP：Integrated Ocean Drilling Program）**：平成 15 年（2003 年）10 月から平成 25 年（2013 年）9 月まで実施された多国間国際協力プロジェクト。日本が運航する地球深部探査船「ちきゅう」と、米国が運航する掘削船ジョイデス・レゾリューション号を主力掘削船とし、欧州が提供する特定任務掘削船を加えた複数の掘削船を用いて深海底を掘削することにより、地球環境変動、地球内部構造、地殻内生命圏などの解明を目的とした研究を推進した。平成 25 年（2013 年）10 月からは、国際深海科学掘削計画（IODP：International Ocean Discovery Program）として実施されている。

※6　**学術コアレポジトリー（KU-ABCR）**：高知大学海洋コア総合研究センターに令和元年度に開設された新たなコア保管管理システム。高知大学が海洋研究開発機構（JAMSTEC）と共同運営する高知コアセンターには、IODP などの科学海洋掘削によって全海洋の約 1/3 の海域（西太平洋やインド洋など）から採取されたコア試料（全長約 130 キロメートル分）を保管する IODP コアレポジトリー、JAMSTEC 船舶で採取された海洋コアのコアレポジトリーが既に運用されていた。学

高知大学
Kochi University

術コアレポジトリーではそれらで扱われない多様な海洋コア、湖沼コア、陸上コアなどを系統的に保管・管理し、コミュニティに情報公開を行い、試料の二次利用に供する仕組みを運用している。
http://www.kochi-u.ac.jp/marine-core/share/corerepository.html

高知大学学術コアレポジトリで保管している海洋コアの位置を示すマップ

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

タスマン海の水温上昇が南極半島の異常高温を引き起こす
～遠隔応答を通じた中緯度海洋変動による南極大陸周辺の大気循環変動の解明～

2021年3月9日
国立大学法人北見工業大学
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所

南極半島は、世界平均に比べ気温上昇が著しい領域の1つです。気温上昇により氷床の融解が促進され、世界中の海面上昇への影響が危惧されています。近年、南極半島の異常高温を引きおこす要因として、南極大陸の温暖化や遠方である熱帯域の水温変動による影響が議論されてきましたが、南半球中緯度の海洋からの影響は未解明のままでした。

北見工業大学（学長：鈴木聡一郎）の佐藤和敏助教、国立極地研究所（所長：中村卓司）の猪上淳准教授を中心とする国際研究チームは、中緯度のオーストラリア南東部に位置するタスマン海の水温の経年変動に着目し、南極半島の気温上昇に与える影響を調べました。タスマン海の水温が高くなると、南極大陸周辺の上空に存在する強風域が通常の年より南極側にずれます。その結果、本来ニュージーランドの東側を通過していた低気圧は、タスマン海の水温が高い年に南極周辺に到達しやすくなり、南極半島に高温をもたらす大気場が形成されやすくなることがわかりました（図1）。

本成果では、中緯度海洋の変動が、エルニーニョなどの熱帯の影響、および南極振動による極域の影響とは独立した形で、極域の大気循環に影響を与えることを示しました。過去・現在・未来のタスマン海の水温変動に着目することで、南極大陸の氷床変動の理解と予測がさらに深化することが期待されます。

本研究の成果は、2021年3月8日に英国のSpringer Natureから刊行された国際学術誌「*Nature Communications*」のオンライン版に掲載されました。

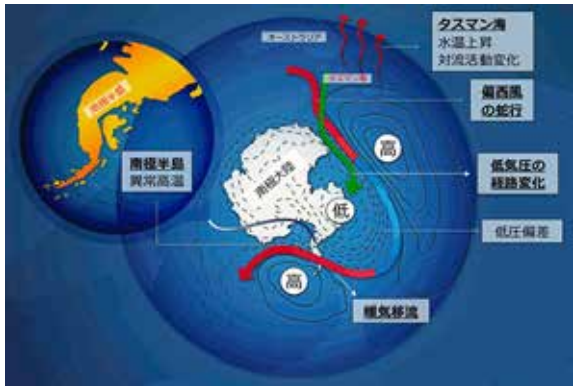


図1：本研究のタスマン海の昇温が引き起こす大気応答の概念図。

研究の背景

南極半島は、近年異常高温が観測されていることや南極氷床の融解が顕著であることから、世界中で注目されています。南極半島の異常高温は、南極大陸周辺のアムンゼン海で活発化する低気圧活動に伴う低緯度側からの強い暖気移流で引き起こされることが先行研究から分かっています。その原因としてこれまでエルニーニョ/ラニーニャなどの低緯度の変動が関連することなどが指摘されています。しかしながら、エルニーニョ/ラニーニャが発生していない年の南極半島での高温現象は、十分に理解されていませんでした。特に、中緯度海洋の水温上昇や水温分布の変動は、中・高緯度の大気循環場にも影響が及び、特に高緯度側の高温現象の一要因となることが北半球の研究結果で報告されています（文献1）。そこで本研究チームは、南半球で水温上昇が顕著な中緯度のタスマン海に着目し、タスマン海の水温変動が南極半島の気温にどのように影響しているのか、気象データ解析および数値計算から調べました。

研究の内容

南極半島に常設されている6箇所の気象観測所の冬季（6月～8月）表面気温データを使用し（図2a,b）、平年より暖かい冬の13年分（暖冬年）と寒い冬の12年分（寒冬年）の合成解析（注1、図2c）を実施したところ、暖冬年は南極周辺のアムンゼン海で気圧が低い状態（低気圧偏差）、南極半島の北側で気圧の高い状態（高気圧偏差）が顕著になり、中緯度から南極半島へ北風により暖かい空気が流入しやすくなる気圧配置になっていることがわかりました（図3上）。そのため、暖かい空気が運ばれた南極半島を含む一部の南極大陸では例年より暖かい冬になっていました。低気圧の数や活動度の指標である数密度の合成解析でも、アムンゼン海を含む南極大陸沿岸で低気圧が多くなっており（図4下）、アムンゼン海の低気圧が活発になることで南極半島の高温が引き起こされると指摘した先行研究と矛盾しない結果となりました。

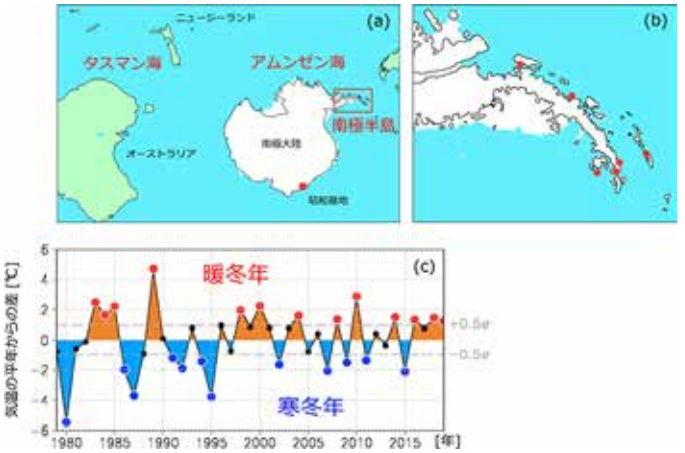


図2：（a）南極大陸と今回の研究で着目した領域の位置関係。（b）南極半島の拡大図（（a）の赤線）と研究で使用した表面気温データが取得されている6箇所の観測点（赤点）。（c）6箇所の観測所の平均気温の平年に対する差（気温偏差）の時系列。赤点は暖かい年（暖冬年：13年）、青点は寒い年（寒冬年：12年）、黒点は各年の気温偏差を示している。

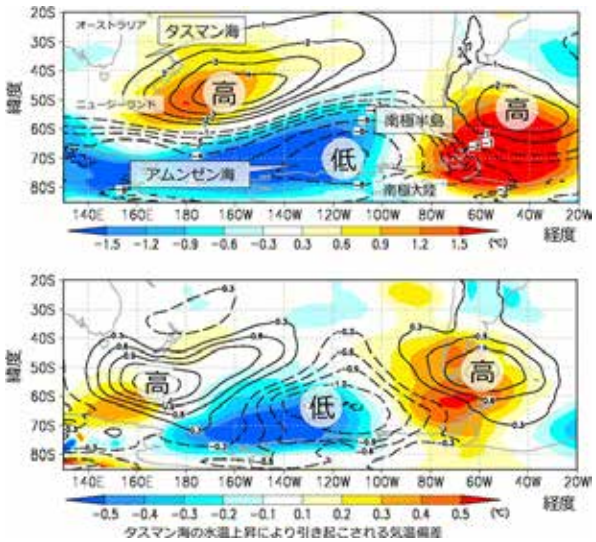


図3：（上）南極半島の6箇所の観測地点で暖かい冬（暖冬年）に出現する気圧偏差（線）と気温偏差（色）。実線（破線）は暖冬年に気圧が高い高気圧（低い低気圧）偏差、暖色（寒色）系が暖冬年に気温が高い高温偏差（低い低温偏差）を示している。（下）数値モデルで算出されたタスマン海の水温上昇により引き起こされる大気応答。それぞれの図の「高」（「低」）は高（低）気圧偏差の中心を示している。

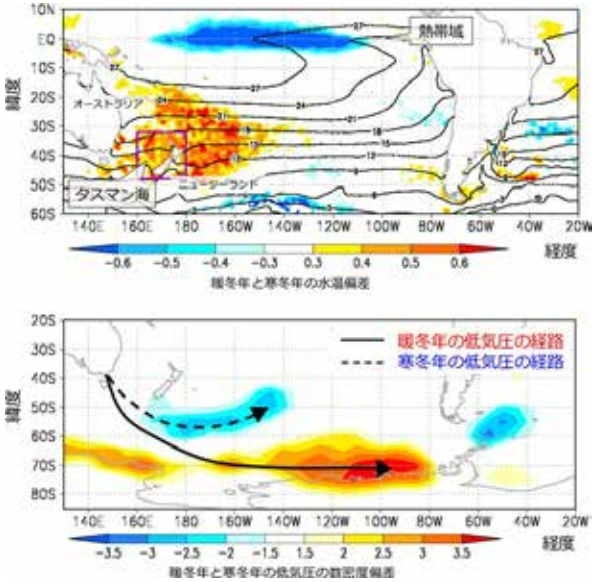


図4：（上）暖冬年の水温偏差（色）と例年の水温分布（線）。暖色（寒色）系が暖冬年に水温が高い高水温偏差（低い低水温偏差）を示している。紫の領域は、タスマン海の水温上昇の影響を調査するために数値実験で例年より水温を上昇させている領域。（下）低気圧の活動度や数の指標となる低気圧の数密度偏差。暖色系は暖冬年に低気圧の数密度が多いことを示している。矢印は数密度偏差や他の合成解析から想定される暖冬年（実線）と寒冬年（破線）の低気圧の経路。

一方、タスマン海を含むニュージーランド周辺に着目すると、ニュージーランドの東の海域では、低気圧の数密度が暖冬年には例年より少なくなっていました（図4下）。また、表面水温の合成解析では、ニュージーランドの風上側に位置するタスマン海で暖冬年は例年より水温が高くなっていることがわかりました（図4上）。以上のことから、このタスマン海の高水温によって、例年であればニュージーランド東方の海上を通過する低気圧の経路が南側に約1000kmずれ、その結果南極大陸周辺へ侵入する低気圧が増加するためにアムンゼン海の低気圧の高密度偏差が大きくなり、南極半島で気温が上昇することが示唆されました。

しかし、先行研究では、熱帯域で見られるラニーニャに伴う低水温度偏差（図4上）がアムンゼン海の低気圧偏差を強める役割を持っているとされています。そこで、熱帯域の影響とタスマン海の水温上昇の役割を比較するため、タスマン海の水温上昇の効果のみを抽出する大気大循環モデル（注2）を使用した数値実験を行ったところ、アムンゼン海で低気圧の強化と南極半島で高気圧の強化がもたらす南極半島の高温が確認され、観測事実を支持する結果を得ました（図3下）。また、熱帯の低水温偏差のみを例年の水温に与えた数値実験でも、似たような結果が得られ、先行研究を支持する結果にもなりました（図略）。すなわち、冬季の南極半島の高温現象は、ラニーニャイベントに伴う熱帯の低水温、あるいはタスマン海の高水温で引き起こされ、両者の効果が重なる年はさらに高温化することを意味しています。また、同様の解析を春（9～11月）や秋（3～5月）にも適用したところ、冬と同じくタスマン海の高水温偏差により南極半島で高温が引き起こされることが確認されました。

今後の展望

南極半島や周辺の気温変動を引き起こす新メカニズムを提唱した本研究は、氷床融解の将来予測向上に貢献すると考えられます。特に、今後のタスマン海の水温変動を指標にし、南極半島の氷床変動や地球規模の海面変動の将来予測の精度を向上させることが期待できます。本研究では、他の研究に先駆けてタスマン海の水温変化に着目しましたが、南半球の他の海流に焦点を当てた研究も今後重要になると考えられます。そのため、他の中緯度海洋に着目した研究を実施し、それぞれの海域の水温変動が南極半島、南極大陸へ与える影響の調査が今後の課題となります。また、100年規模の長期変動の精緻化のためには、本研究で着目した期間よりさらに過去に遡り、20世紀以前の変動に着目する必要もあります。

研究サポート

本研究は、科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）（20H04963、18H05053）、科学研究費助成事業 若手研究（19K14802）、日本学術振興会海外特別研究員の助成を受けて実施されました。

注

注1：暖冬年と寒冬年の合成解析
南極半島の観測点の気温偏差（平年に対する各年の気温差）の時系列から暖かい年13年分（暖冬年）、寒い年12年分（寒冬年）を抽出し、暖冬年から寒冬年を引いた大気場や海洋場を調べる手法。

注2：大気大循環モデル
流体力学や熱力学の方程式を基に、大気の温度・湿度や流れの変化を計算するためのプログラム。大気大循環モデルを用いて数日から経年スケールの大気現象をシミュレートし、メカニズムや予測可能性を調査する。本研究では、地球シミュレータに最適化された大気大循環モデルAFES（海洋研究開発機構が保有）を使用して数値実験を実施した。

文献

文献1
国立極地研究所プレスリリース「メキシコ湾流の流路変化がもたらす北極海の海氷減少とユーラシア大陸の異常寒波」（2014年8月16日）

発表論文

掲載誌： *Nature Communications*
タイトル： Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures

著者：
佐藤和敏（北見工業大学 工学部 助教／海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 外来研究員）
猪上淳（国立極地研究所 気水圏研究グループ 准教授／総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻 併任准教授／海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 外来研究員）
Ian Simmonds（メルボルン大学 教授）
Irina Rudeva（豪州気象局 研究員／メルボルン大学 研究員）
URL：https://www.nature.com/articles/s41467-021-21773-5
DOI：10.1038/s41467-021-21773-5
受理原稿公開日：2021年3月8日（オンライン公開）

お問い合わせ先

研究内容について
北見工業大学 助教 佐藤和敏（さとう かずとし）
国立極地研究所 気水圏研究グループ 准教授 猪上淳（いのうえ じゅん）

報道について
北見工業大学 総務課広報担当
国立極地研究所 広報室
【報道機関の方】取材・掲載申込フォーム
【一般の方】お問い合わせフォーム

いいね！ 131　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

ニュース

2021.03.18 プレスリリース

【記者発表】海中ロボットによる海氷裏面の全自動計測に成功～ 南極海での調査に向けて大きな一歩 ～

○発表者：
巻 俊宏（東京大学 生産技術研究所 准教授）
山縣 広和（東京大学 生産技術研究所 特任研究員）
小知井 秀馬（東京大学 大学院新領域創成科学研究科 修士課程１年）
野木 義史（国立極地研究所 地圏研究グループ 教授）

○発表のポイント：
◆海氷や棚氷の下に入り込み、全自動で航行しながら氷の裏面の形状を高精度に計測するAUV（自律型海中ロボット：Autonomous Underwater Vehicle）「MONACA」（モナカ）を開発しました。
◆北海道紋別港で、MONACAは全27回、のべ８時間17分、8.9 kmに渡って海氷下を全自動潜航し、のべ47,143m^2（東京ドームとほぼ同じ面積）の海氷裏面の形状データを得ました。完全無索での潜航にも成功し、南極海での完全結氷域探査の技術的目途が立ちました。
◆今後は更なる性能向上を図り、来年度以降に予定されている南極海への展開に備えます。南極での計測を通し、地球システムにおける南極の役割の解明を目指します。

○発表概要：
東京大学 生産技術研究所 附属海中観測実装工学研究センターの巻 俊宏 准教授（新領域創成科学研究科の協力講座を担当）および同研究室に所属する山縣 広和 特任研究員と小知井 秀馬 修士課程学生、そして国立極地研究所 地圏研究グループの野木 義史 教授らの研究グループは、文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究 『熱－水－物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床（未探査領域への挑戦）』（JSPS KAKENHI JP17H06322）のもと、南極の海氷や棚氷域を探査する新しいAUV（自律型海中ロボット、注１）「MONACA」を開発し、北海道紋別港で、日本で初めて、海氷に対して相対的に測位しながらの面的な形状計測に成功しました。

南極は地球全体の環境変動の大要因と考えられており、船舶や航空機、人工衛星などのプラットフォームにより観測されてきましたが、船の入れない棚氷や海氷の下側はほとんど観測できていませんでした。ケーブル不要かつ全自動で運用できるAUVは新たな水中探査プラットフォームとして注目されていますが、投入や回収のために母船が接近できない、AUVが浮上できる場所が限られるなどの課題から、氷海域における展開事例は限られていました。

そこで、本研究チームはMONACAが氷の奥深くへ潜入して形状計測を行い、その後投入地点まで安全に帰って来られるよう、マルチビームソーナー（注２）とDVL（注３）、INS（注４）を備えたセンサユニット、およびこれらのセンサによる氷に対する相対ナビゲーションアルゴリズムを実装しました。このセンサユニットは氷を計測する際は上向きとしますが、上下反転を可能とすることで、氷の下の海底の計測にも対応します。また、複雑な氷の形状に沿って航行できるよう、スキャニングソーナーによる障害物回避手法やホバリング（その場停止）のできる高い運動能力を備えました。

この結果、令和３年２月に北海道紋別港で行われた実験において、MONACAは全27回、のべ８時間17分、8.9kmに及ぶ海氷下

カテゴリー
すべて
イベント
プレスリリース
採用情報
トピックス
月別アーカイブ
選択してください

での全自動潜航に成功しました。一連の潜航により、のべ47,143m^2（東京ドームとほぼ同じ面積）の海氷裏面および5,875m^{2}の海底面の形状データが得られました。また、そのうち１回（10分間、走行距離80m）は安全索をつけない完全無索での潜航でした。

今後はさらなる性能向上を図り、来年度以降に予定されている南極海への展開に備えます。そして、南極の海氷や棚氷の計測を通して、地球システムにおける南極の役割の解明を目指します。

○発表内容：

＜研究の背景＞

南極は地球における熱、水、物質の巨大リザーバであり、地球全体の環境変動の大要因と考えられています。このため、そのメカニズムの解明に向けて、船舶や航空機、人工衛星などの各種プラットフォームにより南極の氷や地形、海水、気象などさまざまな観測がなされてきました。しかしながら南極大陸をとりまく棚氷や海氷の下部については、船舶が入れないことから、ほとんど観測できていません。

海中ロボットは海中探査に広く使われており、中でもAUVはケーブル不要で全自動で運用できることから、広域を効率的に観測できるプラットフォームとして注目されています。しかしながら氷海域については、母船が接近できない、浮上できるのが氷の無い場所に限られる等の課題があるため、展開事例は限られていました。

＜研究の内容＞

本研究チームは、文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究 『熱―水―物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床（未探査領域への挑戦）』(JSPS KAKENHI JP17H06322)のもとで南極の氷海域探査用のAUV MONACAの開発を進めてきました（参考文献１、２、３）（図１、図２）。ちなみにMONACAはMobility Oriented Nadir AntarctiC Adventurerの略です。MONACAは全長2.1m、空中重量235 kg、最大潜航深度1,500 mであり、動作時間は８時間、氷の裏側へ最大10 km潜入できるように設計されています。氷の奥深くへ潜入して形状計測を行い、その後投入地点まで安全に帰って来られるよう、マルチビームソーナー（注２）とDVL（注３）、INS（注４）を備えたセンサユニット、およびこれらのセンサによる氷に対する相対ナビゲーションアルゴリズムを備えています。このセンサユニットは氷を計測する際は上向きとしますが、上下反転可能とすることで、氷の下の海底の計測にも対応します。また、複雑な氷の形状に沿って航行できるよう、スキャニングソーナーによる障害物回避手法やホバリング（その場停止）のできる高い運動能力を備えています。この他、水質を計測するためのCTD（注５）センサを備えています。

令和３年２月に北海道紋別港でMONACAの潜航実験を行いました。実験フィールドを図３に、MONACAの写真を図４、図５示します。完全に結氷していたため、岸壁最奥部（図３でクレーンがある場所）の氷を砕いて、MONACAをぎりぎり投入できる大きさの開口部を設けました。気温は時としてマイナス５℃を下回る過酷な環境でしたが、MONACAは全27回、のべ８時間17分、8.9kmに及ぶ海氷下での全自動潜航に成功しました。一連の潜航により、のべ47,143m^{2}の海氷裏面および5,875m^{2}の海底面の形状データが得られました。これまでに報告されている事例は、氷の無い海域（オープンウォーター）にてAUVを展開し、氷の下へ真っすぐ潜入させたのち、Uターンして戻ってこさせる方式でした。今回はAUVの展開、回収ともに図６、図７のように狭い開口部から行い、またAUV自身が氷に対して相対的に測位しながら芝刈り機のように繰り返し往復することにより、図８、図９のように面的に広い範囲を計測し、自律的に開口部へ帰還することに成功しました。これは発表者らの知る限り日本初であり、完全結氷域の探査の実現に大きく貢献します。また、そのうち１回（10分間、走行距離80m）では安全索をつけない完全無索での潜航に成功しました。海中での無線通信は困難であるため、完全無索で運用するためには、外部支援に一切頼らずに開口部へ戻ってこられる高い自律性と安定性、高精度なナビゲーション能力が必要です。MONACAにはそれらが備わっていることが改めて証明されたことになります。

＜今後の展開＞

本実験により、氷海域探査用AUV MONACAによる南極海の完全結氷域の探査の技術的目途が立ちました。本実験で得られた各種センサデータをもとに、氷に対する相対ナビゲーションアルゴリズムのさらなる性能向上を図り、来年度以降に予定されている南極海への展開に備えます（南極観測船「しらせ」による昭和基地周辺の調査が予定されています）。そして、南極の海氷や棚氷の計測を通して、地球システムにおける南極の役割の解明を目指します。

参考文献

[1] 巻 俊宏、吉田 弘、自律型無人探査機（AUV）による未探査領域調査、低温科学、76、259-267 (2018.3)
[2] 山縣広和, 巻俊宏, 吉田弘, 野木義史, 南極海探査を目的としたAUV "MONACA"の設計と運用計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会' 19, 2A1-H07, 広島, (2019.6)
[3] GRAntartcic ウェブサイト：http://grantarctic.jp/pages/intro.html

○問い合わせ先：
東京大学 生産技術研究所
准教授　巻 俊宏（まき としひろ）
Tel：03-5452-6904　Fax：03-5452-6489
E-mail：maki（末尾に@iis.u-tokyo.ac.jpをつけてください）

○用語解説：

（注１）AUV：
Autonomous Underwater Vehicle（自律型海中ロボット）。無索・全自動で行動する海中探査ロボット。母船から離れ、広い海域を効率的に調査することができる。海中では無線通信手段が限られるため、人間の指示を受けずに行動する高い自律性が求められる。

（注２）マルチビームソーナー：
複数の超音波ビームにより物体の形状を計測するセンサ。海底地形の計測に広く用いられる。マルチビームソナーとも呼ばれる。

（注３）DVL：
Doppler Velocity Log（ドップラー式対地速度計）。海底に超音波ビームを照射し、その反射波の周波数から海底に対する相対速度を求めるセンサ。

（注４）INS：
Inertial Navigation System（慣性航法装置）。高性能な加速度・角速度センサによって自身にかかる力を計測し、自己位置や姿勢を推定する装置。

（注５）CTD：
Conductivity（電気伝導度）、Temperature（温度）、Depth（深度）という海水の基本パラメータを計測するセンサ。これらの情報から塩分濃度や水中音速を推定できる。

○添付資料：

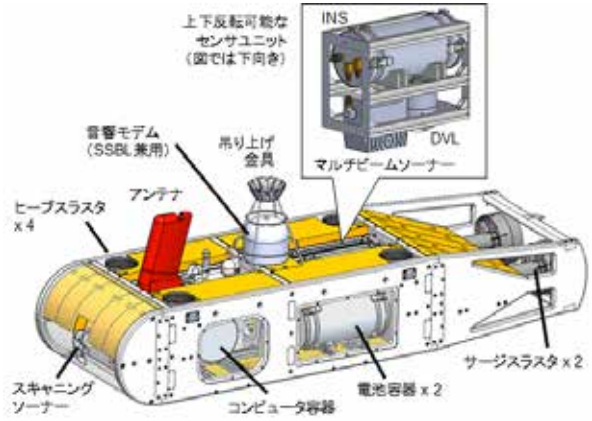


図１　AUV MONACAの機器配置

左が前方。スラスタ（推進機）はヒーブ（上下）およびロール・ピッチ（縦揺れ、横揺れ）方向の制御用に４台、サージ（前後）およびヨー（方位）の制御用に２台搭載している。動体中央部に、上下反転可能なセンサユニットを搭載している。エネルギー源はリチウムイオン電池であり、動体中央左右に各１セット搭載している。メインコンピュータおよび各種インタフェース、電源回路等は前方の圧力容器に収納されている。

図２　AUV　MONACAのイメージイラスト

　氷の下を冒険するイメージ。右上は科研費プロジェクトのロゴマーク。

図３　北海道紋別港フィールド全景

　完全に氷で覆われている。水深約10m、広さはサッカー場程度。MONACAの投入地点を図中に示す。

図４　AUV MONACA

　観測を終え、クレーンで吊り上げたところ。背後に写っているフレームは音響モデム（水中のMONACAと超音波で通信および位置計測するための機器）設置用のもの。

図５　AUV MONACAのセンサユニット

　氷の計測用に上向きに取り付けた状態。中央の箱状の装置がマルチビームソーナー。その右がDVL。

図６　実験の様子１

　潜航開始直後の様子。MONACAはその場で所定の深度まで潜り、その後氷の裏側への潜入を開始する。MONACAの上部、水面近くに見えているのは音響モデム。

図７　実験の様子２

　完全無索での潜航を終え、投入地点に戻ってきたMONACA。

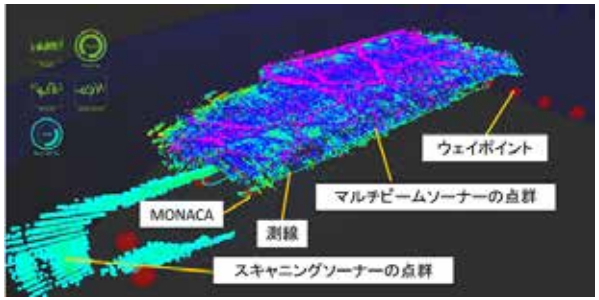


図８　観測中の様子

　センサデータを可視化したもの。スキャニングソーナーにより前方を監視しながら氷に沿ってウェイポイントを順番に辿りつつ、上向きのマルチビームソーナーにより氷裏面の形状を計測する。氷の形状は深度によって色分けされており、氷の割れ目が確認できる。

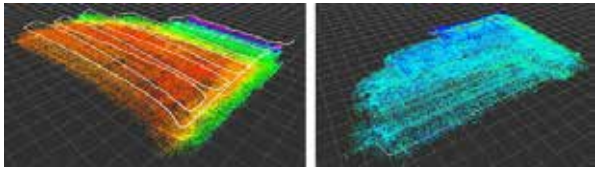


図９　取得した形状データの例

　左：海底面　右：氷裏面　いずれもグリッド幅は５m。MONACAの航跡を白線で示す。

ニュース一覧へ戻る
前へ
次へ

Home

生研について

PRESS RELEASE 2021/6/14 北海道大学 HOKKAIDO UNIVERSITY JAMSTEC 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

南極大陸に向かって海流が接近中

～南極海の深層が暖まるメカニズムを発見～

ポイント

・1990 年代以降，東南極沖の南極周極流は南極大陸に向かって拡大している。
・南極周極流が南極大陸に近づくと，南極の沿岸付近で海洋深層が暖まる。
・地球温暖化によって風が強くなると，海による南極の氷の融解が加速する可能性。

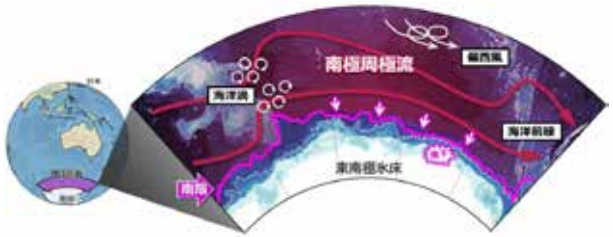
概要

北海道大学大学院環境科学院博士後期課程の山崎開平氏と，同低温科学研究所の青木　茂准教授，平野大輔助教（当時。現所属：国立極地研究所），中山佳洋助教，海洋研究開発機構の勝又勝郎主任研究員らの研究グループは，地球上で最大の海流である「南極周極流」が，南極大陸に向かって拡大することで，南極海の深層が暖まっていることを発見しました。

この研究では，東南極沖[*1]を対象とし，海洋現場観測データの時空間解析と数値シミュレーションを組み合わせて解析することで，南極周極流の「南限」が，過去 30 年間に 50km 以上南下したことを突き止めました。さらに，海の力学的な分厚さを調べることによって，海洋前線の南下と南北深層循環の強化が，南限の移動を引き起こしていることがわかりました。今回発見された南極周極流の極向き拡大は，海洋の持つ熱が南極氷床へ近づきつつあることを示しています。地球温暖化などによって南極海に吹き付ける偏西風が強くなったことが，その原因である可能性があります。南極海の深層水は南極沿岸付近では最も暖かい水で，南極の氷を融かす主な熱源であると考えられます。暖かい深層水が氷床に向かって流れ込めば，より多くの融け水が海に放出されることで，海面上昇と気候システムに影響することが懸念されます。

本研究は水産庁「開洋丸」による観測航海で取得されたデータを使用しており，科学研究費補助金（課題番号 17H01615, 17H06317, 19K23447, 21H04918, 21K13989）の助成を受けて実施されました。

なお，本研究成果は，　2021 年 6 月 11 日（金）の *Science Advances* 誌にオンライン掲載されました。



東南極沖の海洋構造。背景の青系色は海底地形で，明るい色ほど浅い。
南極周極流の南限（ピンク色の線）について，2010 年代を実線，1990 年代を点線で示す。

【背景】

「吠える 40 度，狂う 50 度，叫ぶ 60 度」―これは，南極海を航行した船乗りが「南極周極流」の荒波を緯度ごとに形容したフレーズです。実は，南極海の面積のほとんどを，この南極周極流が占めています。南極周極流は，太平洋・大西洋・インド洋の 3 大洋を繋ぐ唯一の海流で，地球上で最も流量が多い海流です。南極周極流は東西を大陸に遮られずに周回し，強い偏西風の影響を受けて波が非常に高くなります。南極海を西から東に流れる南極周極流は，水深 3,000m 以上の深海まで及ぶ分厚い流れの構造を伴っています。

南極周極流域を含む南極海を輪切りにすると，「子午面循環」と呼ばれる，地球規模で南北・鉛直方向に循環する構造がみられます（図 1）。この子午面循環は上部と下部に分かれていて，子午面循環の上部は，南極周極流に吹き付ける偏西風が駆動する北向き表層流と，その流量を補償する「南極大陸に向かって深層から湧き上がる循環」から成ります（図 1 の時計回りの循環）。南極海は子午面循環が大気に触れる「深海の窓」であり，地球上の熱と物質の循環のまさに中枢であるといえます。

近年，南極の氷が融ける主な原因として，南極海が供給する熱に注目が集まっています。南極の沿岸付近では，最も暖かい水は海洋深層に存在しています。暖かいとはいっても真冬の日本海より遥かに冷たい 1-2°Cではありますが，海水が凍る温度の約-2°Cに比べれば，格段に暖かいといえます。この暖水は「周極深層水」と呼ばれる，北大西洋のグリーンランド沖から南極海に流れてくる海水です。南極海では子午面循環によって，この暖かい深層水が南極大陸に向かって運ばれています（図 1）。南極周極流の「南限」は，上部子午面循環の南端に対応しています。実は，海氷に覆われない部分の南極周極流域の深層は，過去半世紀に渡って昇温してきたことが，現場海洋観測のデータからわかっていました。しかし，頻繁に海氷に覆われる南極周極流の「南限」付近では，観測が少なく断片的なため，変動の実態はよくわかっていませんでした。

【研究手法】

海洋子午面循環の構造は，海水の水温・塩分・溶存酸素量などを，船舶を使って観測することによって調べることができます。上部子午面循環の南端には，海面から沈み込んで最も時間が経った「古い水」，つまり最も溶存酸素が少ない深層水が存在しています。1990 年代に東南極沖で行われた観測によると，溶存酸素が少ない古い水は深層で水温 1.5°Cを示すことがわかっていました。その後，2019 年に同じ地点で実施した繰り返し船舶観測の結果から，この古い水の溶存酸素と水温との対応関係は，1990 年代と同じであることがわかりました。そこで，「深層の水温 1.5°C」という水温指標を「南極周極流の南限」として定義して，過去 30 年間に渡るその指標の変動を調査しました。

研究グループが携わった同一観測線の繰り返し観測を含む世界各国による船舶海洋観測，自動海洋プロファイリングフロート観測，南極海に生息するゾウアザラシに装着したセンサー観測など，利用可能な全ての深層水温観測データを統合して解析することで，東南極沖の南極周極流の南限の変動を復元しました。結果の妥当性を評価するために，数値シミュレーションを使って変化傾向の再現を試みました。さらに，南限が変動するメカニズムを詳しく理解するために，ジオポテンシャル[*2]と呼ばれる海水の力学的な厚さを計算することで，南極周極流を構成する東向きジェットに対応する「海洋前線」の移動を評価し，南限の位置の変化との対応関係を調べました。

【研究成果】

東南極沖の 1996 年と 2019 年の船舶観測データを比較すると，南極周極流の南限が南極大陸に向かって，50-120km 南下していることがわかりました（図 2A の青/赤点）。また，1990 年代以降の深

層水温データによって復元された南限の 10 年ごとの変位（図 2A の曲線）は，2 回の船舶観測によって得られた変化傾向と整合的で，「南極周極流の拡大」が着実に進行していることを裏付けました。先行研究として，衛星海面高度計を用いて南極周極流の南限の変動を推定した例はあったものの，「南極周極流の南限が南下している」という現象を，深層水温データを用いて直接的に示したのは，南極海の他の海域を含めても，この研究が世界で初めてです。さらに，南極周極流が拡大するパターンは，海底地形の構造に対応していることがわかりました。大陸棚斜面の形と南限の位置を比べると，谷状地形となっている東経 120 度で 120 ㎞程度と，移動距離が最も大きくなっていることがわかりました。以上の観測結果は，研究グループが実施した数値シミュレーションと定量的に整合していました。

繰り返し船舶観測データにより構造変化を詳しく調べると，1996 年から 2019 年にかけて，海洋全層に渡る，大幅な昇温と密度の減少が生じていることがわかりました。南極周極流の南限の南下は，深層の暖水が南に移動することに対応します（図 1）。その原因としては，①南極周極流の東向きジェットを構成する海洋前線の南下，②上部子午面循環の強化による暖水の南下，の 2 つが考えられます。海洋前線の位置の指標であるジオポテンシャルを用いて①の効果を定量化すると，海洋前線も南下はしているものの，南極周極流の南限である 1.5°Cの深層水の南下距離に比べると小さく，その全ては説明できないことがわかりました（図 2B）。南極周極流の拡大に対して，平均的には①が 7 割程度，②が 3 割程度寄与していると見積もられました。

【今後への期待】

過去半世紀以上に渡って，南極海に吹き付ける偏西風は強くなっています。偏西風は，海洋渦などによる南北水平循環を通じて上部子午面循環を駆動する（図 1）ので，このことが南極周極流の南限の南下の一因であると考えられます。今後，さらなる地球温暖化に伴い偏西風が強くなると，深層の暖水を大陸に向かって運ぶ循環が強化されると考えられます。暖かい深層水が大陸棚に流入した場合，南極沿岸の棚氷[*3]を融かす海洋の熱が，今までよりも多く供給されて，融解を加速させる恐れがあります。南極の氷の流出や融解が進むと，沢山の氷や融け水が海洋へと放出されることで，世界の海面が上昇するほか，南極海の海水が低塩分となって軽くなることで，南極底層水と下部子午面循環を形成する海水の沈み込みが起きにくくなるので，気候システムに対する地球規模のインパクトがあります。

今回の研究成果は，将来気候予測に用いられる各国の気候シミュレーションを改善するための重要な知見となります。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の海洋・雪氷圏特別報告書（2019）によると，21 世紀後半以降の海面上昇予測における最も大きな不確実性は，南極氷床の融解に起因しています。つまり，南極の氷を融かす南極海の振る舞いを理解することは，地球の平均海水位の上昇率を予測するために必要な知見なのです。南極海のモニタリングは，地理的条件，氷の存在もあって困難ですが，地球と人類の未来のため，根気強く続けていく必要があります。

論文情報

論文名	Multidecadal poleward shift of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica（東南極沖における南極周極流の南限の数十年規模の極向きシフト）
著者名	山崎開平[1, 2]，青木　茂[2]，勝又勝郎[3]，平野大輔[2(当時)]，中山佳洋[2]（[1]北海道大学大学院環境科学院，[2]北海道大学低温科学研究所，[3]国立研究開発法人海洋研究開発機構）
ＤＯＩ	10.1126/sciadv.abf8755
雑誌名	Science Advances
公表日	2021 年 6 月 11 日（金）

お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所　准教授　青木　茂（あおきしげる）

ＴＥＬ　011-706-5479　ＦＡＸ　011-706-7142　メール　shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp

ＵＲＬ　http://climbsd.lowtem.hokudai.ac.jp/index.html（大気海洋相互作用分野）

配信元

北海道大学総務企画部広報課（〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目）

ＴＥＬ　011-706-2610　ＦＡＸ　011-706-2092　メール　jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

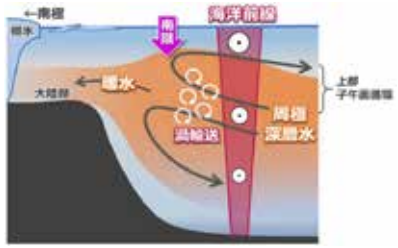


図 1. 南極周極流の断面図。上部子午面循環の南限が，南極周極流の南限に対応する。

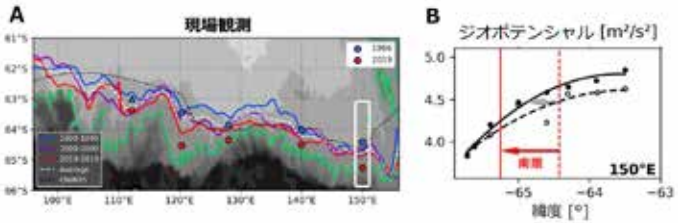


図 2．南極周極流の南限の変動。A：青/赤点が 1996/2019 年の位置で，青/紫/赤の曲線が 1990 年代/2000 年代/2010 年代の位置。白破線が 30 年間での平均で，黒破線が 1990 年代以前の位置。背景色が海底地形で，暗い色ほど浅い（緑線が 3000 m）。B：東経 150 度での 1996 年（点線）と 2019 年（実線）のジオポテンシャルの比較。海洋前線の南下（灰矢印）は，南限の移動距離（赤矢印）よりは短い。

【用語解説】

＊1 東南極沖 … 南極大陸の東経領域（東南極）の沖合の海域のこと。東南極氷床は南極大陸に存在する氷のほとんどを占めており，全て融けると世界の海面が約 50m 上昇する淡水量を誇る。

＊2 ジオポテンシャル … 海水の単位質量当たりの体積を高さ方向に積算した量で，海水の力学的な分厚さに相当する。ジオポテンシャルの等値線は，海洋前線に伴う海流の位置によく対応する。

＊3 棚氷 … 南極大陸の氷が海に突き出して浮いた部分のこと。棚氷が融けると，その背後の大陸の氷をせき止める力が失われて，氷が海に向かって急速に流出する。

最終氷期の南極大陸の気温低下と氷床高度の見積もりを刷新

2021年6月17日

東京大学 大気海洋研究所
国立極地研究所
東北大学

発表雑誌

雑誌名：「*Science*」（6月4日付）
論文タイトル：Antarctic surface temperature and elevation during the Last Glacial Maximum
著者：Christo Buizert*, T.J. Fudge, William H. G. Roberts, Eric J. Steig, Sam Sherriff-Tadano, Catherine Ritz, Eric Lefebvre, Jon Edwards, Kenji Kawamura, Ikumi Oyabu, Hideaki Motoyama, Emma C. Kahle, Tyler R. Jones, Ayako Abe-Ouchi, Takashi Obase, Carlos Martin, Hugh Corr, Jeffrey P. Severinghaus, Ross Beaudette, Jenna A. Epifanio, Edward J. Brook, Kaden Martin, Jérôme Chappellaz, Shuji Aoki, Takakiyo Nakazawa, Todd A. Sowers, Richard B. Alley, Jinho Ahn, Michael Sigl, Mirko Severi, Nelia W.Dunbar, Anders Svensson, John Fegyveresi, Chengfei He, Zhengyu Liu, Jiang Zhu, Bette Otto-Bliesner, Vladimir Y. Lipenkov, Masa Kageyama, and Jakob Schwander
DOI：https://doi.org/10.1126/science.abd2897

発表内容

南極の過去の気温を復元するため、これまでとは異なる2つの測定方法を検討した結果、約2万年前の最終氷期における南極大陸の気温が判明しました。その結果、最終氷期の南極大陸は、これまで考えられていたほど気温が低くなかったことが明らかになりました。

地球上で最も寒い場所である南極大陸は、最終氷期にはさらに冷え込んでいました。氷期の南極の気温は、現在よりも平均して約9℃低かったという説がこの数十年支持されてきました。一方、地球全体の平均気温は、現在よりも5～6℃低かったとされています。

オレゴン州立大学の地球・海洋・大気科学部のクリスト・ブイザート助教を中心とする国際研究チームは、南極大陸の一部の地域では、氷期の気温は現在より10℃も低かったのに対し、東南極の中央部では、従来の推定値の約半分である4～5℃の気温低下に過ぎなかったことを明らかにしました。

この研究成果は、2021年6月4日発行の*Science*誌に掲載されました。

気候変動の専門家であるブイザート氏は、「今回、南極大陸全体を対象とした、初めての決定的かつ一貫した結果が得られました」と述べています。「驚くべき発見は、南極大陸のどこにいるかによって、冷却の程度が大きく異なることです。このような冷却の地域パターンは、氷期と現在の間に起こった氷床の高さの変化によるものと考えられます。」

古気候学者で共著者の一人であるオレゴン州立大学のエド・ブルック氏は、「最終氷期における地球の温度を理解することは、寒冷気候から温暖気候への移行を理解し、気候変動によって地球が温暖化した場合に何が起こるかをモデル化する上で非常に重要です」と述べています。「南極大陸は、気候システムの中でも特に重要です。私たちは気候モデルを使って未来を予測していますが、その気候モデルは様々なことを正しく再現していなければなりません。モデルを検証する方法の1つは、過去を正しく再現しているかどうかを確認することです」。

最終氷期は、二酸化炭素などの温室効果ガスの変化に対する地球気候の感度を理解するための自然の実験のようなものです。何十万年もの時間をかけて形成された氷から採取されたコアサンプルは、その物語を読み解くのに役立ちます。

これまでの研究では、温度計の役割を果たす氷の層に含まれる水の同位体を用いて、最終氷期の温度を復元してきました。グリーンランドでは、これらの同位体の変化による気温復元を他の方法と比較することで、その正確さを確認することができます。しかし、南極大陸の大部分では、水の同位体の温度計を他の方法で較正することができませんでした。例えて言えば、温度計はあっても目盛りが読めないようなものです。較正不能だった場所の一つが東南極ですが、そこでは最も古いアイスコアが掘削されており、気候の歴史を理解する上で重要な場所です。

今回の研究では、南極大陸の7カ所（東南極5カ所、西南極2カ所）のアイスコアを用いて、古代の気温を復元するための2つの手法を採用しました。

一つ目は、アイスコアの掘削孔を使って氷床の温度を測定するものです。南極の氷床は非常に厚いため、堆積当時の温度を「記憶」しており、氷床の表面から底までの温度を測定することで過去の気温を復元することができます。

二つ目の方法は、積雪が時間をかけて圧密し、氷に変化していくときの特性を調べるものです。東南極では、厚さ50～120メートルの層を経て、数千年かけて雪が氷に変化しますが、その層の厚さは気温変化に敏感に反応します。その記録は、アイスコアの気体成分のデータとして測定可能です。

研究者たちは、どちらの方法でも同じような気温の復元結果が得られたことから、その結果に確信を持ったとともに、氷期の冷却量が氷床の形状に関係していることを発見しました。氷期には、降雪量の減少に伴い、南極の一部地域では氷床が薄くなったと考えられます。それによって表面の標高が下がり、その地域の冷却量は4～5℃に止まりました。一方、氷期に氷床がより厚くなった地域では、気温が10℃以上も低下したのです。標高と気温の関係はよく知られており、標高が上がるほど寒くなります。

今回の発見は、将来予測に用いられる気候モデルを改善する上で重要なものですが、人間活動によって発生する主要な温室効果ガスである二酸化炭素に対して地球がどれほど敏感であるかに関して、研究者の認識を変えるものではありません。ブイザート氏は、「この論文の結果は、気候感度に関する主要な理論と一致しています」と述べています。「私たちは、今日も昨日までと同じように、人為起源の気候変化を懸念しています。」

今回の研究には、米国、日本、イギリス、フランス、スイス、デンマーク、イタリア、韓国、ロシアのチームが貢献しました。

日本チームの研究者らは、気候モデリング、アイスコアの気体分析、掘削孔の温度解析などを通じて、論文の主要な結論を導くのに大きく貢献しました。

気候モデリングでは、東京大学大気海洋研究所の地球表層圏変動研究センター古環境研究分野のシェリフ多田野特任助教（当時）、阿部彩子教授、小長谷特任研究員が貢献しました。将来予測にも用いられている日本のMIROC大気海洋大循環モデルとイギリスのHadCM大気海洋大循環モデルが用いられ、南極氷床の形状を様々に想定した数値実験が多数実施され詳細に結果解析されました。氷期の当時の気温の冷却の度合いが氷床の形状と大きく関係していることがわかっただけでなく、その計算結果が今回のアイスコアや掘削孔で復元された独立の結果とほぼ全ての地域で整合的であることを示しました。また、気候の将来見通しの判断に寄与するCMIP6（大気海洋結合モデル国際比較プロジェクト）の一環として実施された最新のPMIP4(古気候モデリング国際比較プロジェクト)による多数の世界の気候モデルの結果ともその整合性の度合いが比較検討されました。将来予測見通しを今後分析する際、今回の古気候モデリング研究結果が活用されることが大きく期待されます。

アイスコアの分析やデータ解析に関しては、日本が掘削した南極ドームふじアイスコアを用いて、国立極地研究所の川村賢二准教授、大藪幾美特任研究員、本山秀明教授、東北大学大学院理学研究科附属大気海洋変動観測研究センターの青木周司名誉教授、中澤高清名誉教授が貢献しました。特に、東南極を代表するドームふじアイスコアやその掘削孔データから、過去の気温を復元するための掘削孔の温度プロファイルや、積雪層のモデリングに使用するメタン濃度と窒素同位体比、東南極と西南極の相対標高変化を推定するための空気含有量といった、氷期の温度の解析に不可欠なデータを提供し、解析結果の議論や執筆に参加しました。ドームふじコアの結果と、欧州が掘削した東南極内陸のドームCアイスコアとは極めて整合的であり、広大な東南極内陸を代表する両コアが本研究において決定的な役割を果たしました。今後、高精度データをさらに蓄積することで、より過去にさかのぼった温度復元も可能になることが期待されます。

本研究は、米国のNational Science Foundation、日本の新学術領域研究『熱ー水ー物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床』（領域代表 川村賢二）はじめ複数の科研費の支援を受けています。15J12515, 17H06104, 17H06323, 20K14552, 18749002, 26241011, 15KK0027, 17H06316, 20H00639, 20H04327, 22310003

本研究では、海洋研究開発機構の地球シミュレータを用いました。また、特別教育研究経費（研究推進）事業「地球気候系の診断に関わるバーチャルラボラトリーの形成」による支援を受けました。

国内著者（著者リスト順）

シェリフ 多田野 サム（東京大学 大気海洋研究所地球表層圏変動研究センター）
川村 賢二（情報・システム研究機構 国立極地研究所／総合研究大学院大学／海洋研究開発機構）
大藪 幾美（情報・システム研究機構 国立極地研究所）
本山 秀明（情報・システム研究機構 国立極地研究所／総合研究大学院大学）
阿部 彩子（東京大学 大気海洋研究所地球表層圏変動研究センター／情報・システム研究機構 国立極地研究所）
小長谷 貴志（東京大学 大気海洋研究所地球表層圏変動研究センター）
青木 周司（東北大学 大学院理学研究科附属大気海洋変動観測研究センター）
中澤 高清（東北大学 大学院理学研究科附属大気海洋変動観測研究センター）

問い合わせ先

東京大学　大気海洋研究所　地球表層圏変動研究センター
教授　阿部 彩子（あべ あやこ）
メールアドレス：abeouchi◎aori.u-tokyo.ac.jp　　※アドレスの「◎」は「@」に変換してください

情報・システム研究機構 国立極地研究所
准教授　川村 賢二（かわむら けんじ）
メールアドレス：kawamura◎nipr.ac.jp

東北大学
名誉教授　青木 周司（あおき しゅうじ）
（理学研究科附属大気海洋変動観測研究センター）

メールアドレス：shuji.aoki.a3◎tohoku.ac.jp

東北大学
名誉教授　中澤 高清（なかざわ たかきよ）
（理学研究科附属大気海洋変動観測研究センター）
メールアドレス：takakiyo.nakazawa.d7◎tohoku.ac.jp

添付資料

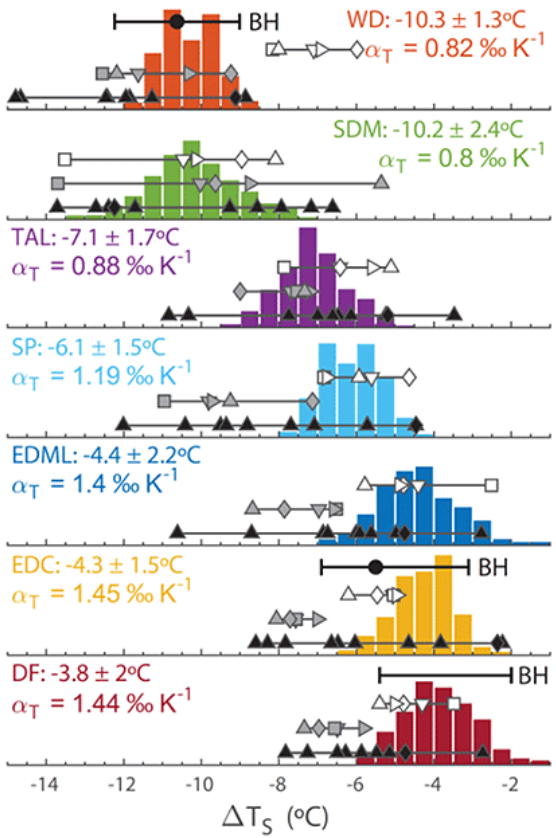


図1　様々な研究方法による最終氷期の南極の7カ所の気温低下量と推定幅の一覧（上から2つが西南極、次の5つが東南極、地点は図2を参照）。掘削孔の温度による推定はBHで示す横棒,アイスコア試料からの温度推定は棒グラフ（頻度分布）で示す。異なる気候モデルによる推定は、マークをつなげた横線で表示（マークは、白抜き：日本のMIROC、グレー：英国HadCM、黒印：国際比較プロジェクトPMIP4/CMIP6の結果）。

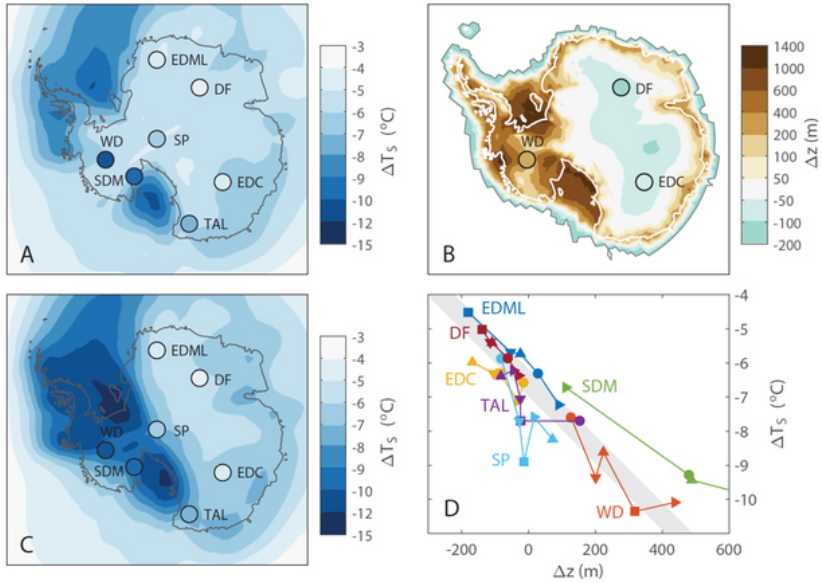


図2　南極地形と気候モデル結果（7カ所の観測は丸印で示す）。A 現在の南極地形を用いた時の気候モデルによる気温低下量。B 5つの推定方法の平均高度。C 最終氷期の南極地形を用いた時の気候モデルによる気温低下量（MIROCモデルとHadCMモデルの平均）。D 気候モデル推定による気温低下量と高度変化量の関係。

PRESS RELEASE 2021/7/12 北海道大学 HOKKAIDO UNIVERSITY

南極の氷河の下で海と氷を直接観測

～熱水掘削によって氷床融解のメカニズムを解明～

ポイント

・南極ラングホブデ氷河で熱水掘削を行い，棚氷下の海洋環境を直接観測。
・棚氷下の全域で水温・塩分・循環を明らかにし，氷の底面が融ける量を算出。
・南極氷床の急激な変動を駆動する，棚氷底面の融解メカニズムを解明。

概要

北海道大学低温科学研究所の杉山　慎教授，青木　茂准教授，箕輪昌紘氏（当時）らの研究チームは南極ラングホブデ氷河を掘削し，厚さ 234~412m の棚氷*1 の下に広がる海を直接観測しました。その結果，棚氷底面での氷融解とそのメカニズムを明らかにしました。

近年，南極氷床が氷を失っており，海水準の上昇につながる地球環境変動として注目されています。氷床の周縁では氷が海に張り出して棚氷を形成し、その底面が海の熱で融けるプロセスが氷床変動の引き金と考えられています。しかし，厚い棚氷の下へ海水がどのように流入し，どれだけ氷を融かしているのか，その測定は非常に困難で理解が遅れています。本研究では，研究チームが開発した熱水掘削システムを用いて，ラングホブデ氷河の棚氷を 4 地点で掘削し，棚氷下の海水温，塩分，循環を直接観測しました。その結果，海水は結氷温度よりも最大 1°Cほど暖かく，棚氷の全域で氷の融解が示されました。また棚氷の全域における測定によって，これまで予想されていた海洋循環の確認に成功しました。測定された貴重なデータは，棚氷下の海洋循環と底面融解の物理プロセスを検証し，氷床数値モデルの精緻化に貢献するものです。

本研究成果は，　2021 年 7 月 9 日（金）公開の Nature Communications 誌にオンライン掲載されました。

観測を行ったラングホブデ氷河と熱水掘削の様子

【背景】

南極氷床は地球上の氷の約 90%を占めており，その変化は海水準変動や気候変動を考える上で非常に重要です。南極では，降り積もる雪によって成長した氷が沿岸部へ流れ，海にせり出して棚氷を形成します。せり出した氷の底面は海と接して融解しており，末端からは氷山が切り離されます。これら棚氷の底面融解と氷山分離が降雪量を上回ると，氷床が縮小することになります。

近年，海洋環境の変化によって棚氷の底面融解が増加し，南極氷床が氷を失いつつあることが明らかになってきました。しかし，数百メートルを超える厚い棚氷の下で，海洋の循環や水温・塩分，底面融解を測定することは非常に困難です。その結果，棚氷下での観測データは極めて少なく，棚氷の一部で得られたものがほとんどでした。棚氷の融解メカニズムを理解し，正確な底面融解の数値モデルを構築するためには，複数の場所で棚氷下の海洋環境を測定し，詳細なデータを得ることが必要とされています。

【研究手法】

研究チームは第 59 次南極地域観測隊に参加し，2018 年 1 月に昭和基地から 20 km 離れたラングホブデ氷河にて観測を行いました（p.1 図左）。棚氷の掘削には，北海道大学で開発した熱水掘削システムを使いました。約 80°Cの熱水ジェットで氷を融かしながら，厚さ数百メートルの棚氷を掘削します。棚氷を貫通する直径約 10cm の縦孔に，水温，塩分，流速，流向を測定できるセンサーをロープで吊って孔の中におろして，海洋環境を測定しました。特に氷が融解する棚氷底面と海洋の境界付近では，精密な水温・塩分・流速測定を実施しました。さらに耐圧容器に入れたビデオカメラを使って，棚氷の底面や海底の様子を撮影しました。

このような掘削と観測を合計 4 か所（図 1）で行った結果，接地線*2 から氷の末端まで，棚氷のほぼ全域における海洋データが得られました。

【研究成果】

掘削を行った地点では，厚さ 234~412m の棚氷の下に，深さ 302~12 m の海水層が確認されました（図 1 右）。このような棚氷の構造は，氷を掘削することで初めて正確に測定できるものです。4 地点で得られた海水特性の観測結果を統合すると，外洋から暖かい海水が棚氷の下に流入し，接地線の近くで氷を融かしている様子が明らかになりました。また氷の近くでは，水温が結氷点よりも 0.7~1.0°C高く，盛んに氷が融けていることを示しています。接地線付近では，海水に氷の融け水が混ざって密度が小さくなり，軽くなった海水が棚氷の底面に沿って湧昇しながら外洋に流れ出る様子も確認されました（図 2）。またビデオカメラによる棚氷底面の観察では，融解によって刻まれる特徴的な氷の凹凸が見い出されました（図 3）。このような海水循環や氷と海洋の境界におけるプロセスは従来から予測されていたものの，本研究で初めて直接的に確かめられたものです。測定された水温・塩分・流速を使って計算したところ，氷の底面が毎年 1m 以上融けていることが判明しました。この融解量は，ラングホブデ氷河が位置する東南極氷床でこれまで報告されたよりも大きな値です。急速な融解が伝えられる西南極氷床だけでなく，東南極氷床でも大きな底面融解が発生しており，急速な氷床変動が起きる可能性があることを示しています。また南極の他地域に存在するよく似た棚氷でも，同様のメカニズムで底面融解が起きていることが示唆されます。

【今後への期待】

本研究で得られた観測データは，棚氷全域をカバーする点でその価値と独自性が高く，棚氷の底面融解と海洋循環の検証データとして，また氷床数値モデルの精緻化に活用されることが期待されます。研究チームは 2021 年 11 月から第 63 次南極地域観測隊に参加し，再びラングホブデ氷河で観測を実施する予定です。棚氷と海洋の経年的な環境変化を測定し，底面融解が氷河変動に与える影響を明らかにすることで，海洋と気候の変化が南極氷床に与える影響の解明を目指しています。

【謝辞】

本研究は，南極地域観測事業・第IX期重点研究観測プロジェクト「氷床・海氷縁辺域の総合観測から迫る大気–氷床–海洋の相互作用」及び新学術研究「熱–水–物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」の支援を受け実施しました。

論文情報

論文名	Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica（東南極ラングホブデ氷河棚氷下の熱塩構造と海洋循環）
著者名	箕輪昌紘 1，杉山　慎 1，伊藤優人 1,2，山根志織 1，青木　茂 1（1 北海道大学低温科学研究所，2 海洋研究開発機構）
雑誌名	Nature Communications（イギリスの科学誌）
ＤＯＩ	10.1038/s41467-021-23534-w
公表日	2021 年 7 月 9 日（金）（オンライン公開）

お問い合わせ先

北海道大学大学院低温科学研究所　教授　杉山　慎（すぎやましん）

ＴＥＬ　011-706-7441　　ＦＡＸ　011-706-7142　　メール　sugishin@lowtem.hokudai.ac.jp

ＵＲＬ　http://wwwice.lowtem.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学総務企画部広報課（〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目）

ＴＥＬ　011-706-2610　　ＦＡＸ　011-706-2092　　メール　jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

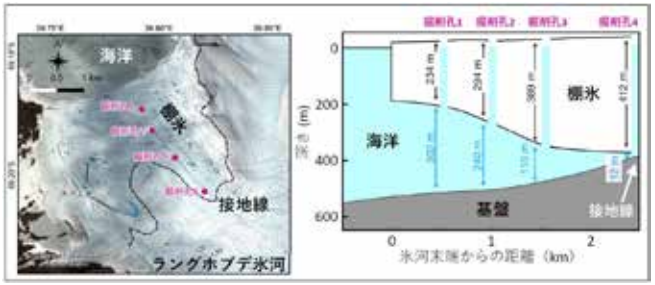


図 1. 左：観測を行ったラングホブデ氷河の棚氷上の熱水掘削地点（●）と接地線位置（点線）。右：観測によって明らかになったラングホブデ氷河棚氷の断面図。

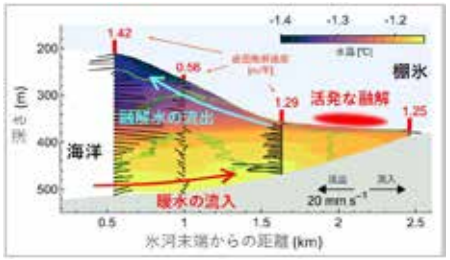


図 2. ラングホブデ氷河棚氷下の水温（カラースケール）と水流（黒矢印）。数字は底面融解の速度。海底近くを暖水が流入し，接地線近くの氷を融かし，融け水が棚氷の底面に沿って流出する。

図 1. ビデオカメラによって撮影された棚氷底面の形状。氷の表面に融解を示す凹凸が確認できる。

【用語解説】

＊1 棚氷 … 南極氷床から流れ出す氷が海洋にせり出して浮いている部分。

＊2 接地線 … 陸地の上に接地している氷と海洋に浮いた棚氷との境界。

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

東南極氷床の拡大は従来説よりも早かった
～最終氷期の氷床変動メカニズムの解明へ～

2021年8月19日
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所

南極の東経側（東南極）の氷床は巨大な体積を有することから、融解した場合の人類への影響は甚大なものになります。将来の氷床変動の予測のために、過去の氷床量の変遷（氷床変動史）の解明は重要な課題です。しかし、これまでのモデル計算による氷床変動史は、南極での地質学的調査から得られるデータとの矛盾が指摘されていました。

国立極地研究所の石輪健樹特任研究員を中心とする研究グループは、氷床の変動による隆起や沈降を考慮したモデル（Glacial Isostatic Adjustmentモデル）を用いて、最終間氷期以降（約12万年前から現在）の東南極の氷床変動史について検討を重ね、南極・昭和基地周辺をはじめとする東南極の沿岸域で得られている地質学的データと矛盾しない結果を得ることに成功しました。その結果、最終氷期において東南極の一部で氷床量が最大となった時期が、従来説よりも2～7万年早かった可能性が示されました（図1）。本成果は、最終間氷期以降の東南極氷床の変動メカニズム解明につながると期待されます。

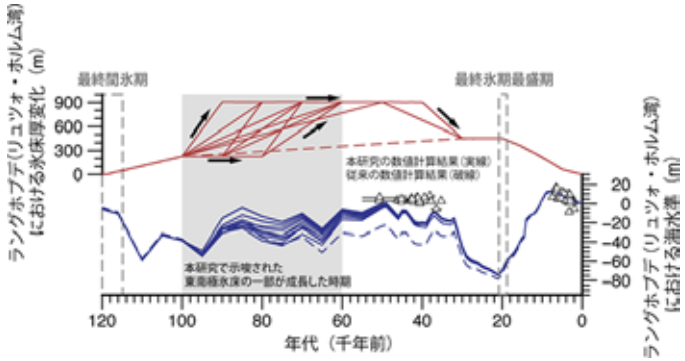


図1：ラングホブデにおける氷床厚変化（赤）と海水準（青）。実線は本研究の複数の数値計算結果を、破線は従来の数値計算結果を示す。△は地質学的試料から示される海面の位置。本研究では全球的に氷床が拡大した最終氷期最盛期よりも前のタイミングで東南極の一部が拡大した可能性が示唆された。

研究の背景

喫緊の課題となっている気候変動の影響の中でも、南極氷床の融解（縮小）と、それに伴う海面上昇は特に懸念されています。将来の氷床変動のより正確な予測のためには、過去にどのように氷床が変動してきたかを知り、さらに、その変動メカニズムを理解する必要があります。

約12万年前の最終間氷期（注1）から約2万年前の最終氷期最盛期（注2）にかけて、大陸上の氷床が発達するのに伴って全球的な海面は低下し、最終氷期最盛期では、現在より約130m海面が低下していました。南極氷床もほかの氷床と同様、最終氷期最盛期では約10～20m全球的な海面を下げることに相当するほど拡大したと言われています。しかし、「南極氷床はどのような過程で拡大していったのか」という問いに対しては明確な答えが得られていませんでした。

氷床が融解すれば海面が上昇することから、過去の氷床変動を知るためには、過去の海面変動を知ればよいことになります。過去の海面の位置は堆積物（地層）の地質学的な調査などで知ることができますが、大陸を覆う氷床が成長すると、大陸とその周囲は氷床の重みで沈降し、縮小すると隆起するため、海面の位置が氷床の融解量を単純に反映しているわけではありません。そのため、海面変動から氷床の変動を推定するには、この「沈降や隆起（アイソスタシー）」の影響（GIA：Glacial Isostatic Adjustment）を考慮し、GIAモデルにより補正する必要があります。しかし、これまで使われてきたGIAモデルでは、計算による海面位置の変遷の結果が、南極での地質学的な調査から得られた海面位置の変遷と一致していないことの矛盾が指摘されていました。

研究の内容

本研究グループは東南極のリュツォ・ホルム湾とプリッツ湾（図2）で採取された貝化石や堆積物の年代測定から得られた地質学的データ（これまでに南極地域観測隊で取得されたデータも含む（図3））に着目しました。これらのデータは5万年前から3万年前の間と、過去1万年間に集中しています（図1の△）。特に5万年前から3万年前の地質学的データは南極においては限られた地域でしか得られておらず、貴重なものですが、これまでのGIAモデルによる数値計算とは矛盾が生じていました。

研究グループがGIAモデル上のパラメータを数百通り以上変更して検討を重ねたところ、約9万年前から約4万年前の東南極氷床の沿岸域に、最終氷期最盛期よりもさらに多い氷床量を推定することで、5万年前から3万年前の地質学的データと、GIAモデルによる計算結果が矛盾しないことが見いだされました。つまり、最終氷期最盛期以前に、東南極の一部で氷床が拡大していた可能性が示されたことになります（図1）。これは、従来考えられていた「南極氷床は最終氷期最盛期に最大量に達した」という説とは異なる結果となりました。

図2：本研究の対象地域。「Quantarctica」を利用して作成。

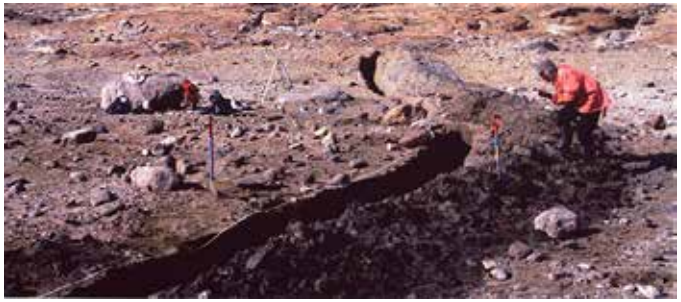


図3：第37次南極地域観測隊（1995～96年）における堆積物試料の試料採取風景。国立極地研究所 三浦英樹准教授撮影。

今後の展望

約10万年前から約6万年前に起きた氷床の成長は、南極海の古環境変動とも密接に関連していると考えられます。また、今後の野外調査による試料採取や分析、そしてモデル実験の進展により、氷期における南極氷床変動メカニズムの解明が進むと期

待されます。

さらに、現在の南極では、過去の氷床変動によるGIAの影響が残っています。このGIAの評価は、「今、南極のどの地域がどのくらい融解しているか」を推定する上でも重要です。そのため、本研究のGIAモデルの改善は、過去のみならず、現在・未来の南極を知る上でも重要な成果と言えます。

注

注1：最終間氷期
現在から約12万年前の時期を指す。全球的な海面は現在よりも6m前後高かったとされ、グリーンランドや南極氷床が融解していたと考えられる時期。

注2：最終氷期最盛期
現在から約2万年前の時期を指す。北欧や北米にも氷床が発達し、全球的な海面は約130m低下したと考えられる時期。

論文情報

掲載誌： *Geology*
タイトル： Excess ice loads in the Indian Ocean sector of East Antarctica during the last glacial period

著者：
石輪健樹（国立極地研究所 地圏研究グループ 特任研究員）
奥野淳一（国立極地研究所 地圏研究グループ 助教）
菅沼悠介（国立極地研究所 地圏研究グループ 准教授）

DOI： 10.1130/G48830.1
URL： https://doi.org/10.1130/G48830.1
論文公開日： 2021年6月14日（Early Publication）

研究サポート

本研究はJSPS科研費（若手研究：18K13621、基盤研究B：16H05739、基盤研究A：19H00728、新学術領域研究：17H06321）、東レ科学技術研究助成の支援を受けて実施されました。

お問い合わせ先

【報道機関の方】取材・掲載申込フォーム
【一般の方】お問い合わせフォーム

いいね！ 60　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

南大洋の温暖化が引き起こした氷期における大西洋深層循環の急激な変化

2021年8月23日

東京大学 大気海洋研究所
国立極地研究所

発表のポイント

◆大西洋深層循環の変化は、氷期における急激な気候変動を引き起こしたと考えられていますが、南大洋の温暖化がその引き金となっていた可能性を指摘しました。
◆大西洋深層循環は南半球から北半球への熱輸送を通じて、地球上の気温分布をコントロールしている一方、南大洋での温暖化が大西洋深層循環の急激な変化につながりうることを、海洋モデルシミュレーションにより明らかにしました。
◆本研究の成果は、氷期における急激な気候変動をはじめとする数百～数千年の時間スケールで生じる気候変動の仕組みの理解に貢献するものです。

発表者

岡　　顕（東京大学 大気海洋研究所 准教授）
阿部　彩子（東京大学 大気海洋研究所 教授）
シェリフ多田野　サム（研究当時：東京大学 大気海洋研究所 特任助教／現：リーズ大学 研究員）
横山　祐典（東京大学 大気海洋研究所 教授）
川村　賢二（国立極地研究所 准教授）
羽角　博康（東京大学 大気海洋研究所 教授）

発表概要

海のコンベアベルトとも呼ばれる海洋深層循環は、海洋の表層と深層をつなぐ地球規模の循環であり、千年程度の時間をかけて世界中の海を巡っています（図1）。大西洋北部は海洋深層循環の沈み込み域にあたり、大西洋における海洋深層循環（以降、大西洋深層循環）は、その北向きの熱輸送を通じて気候に大きな影響を与えています。そのため、大西洋深層循環は数百～数千年の時間スケールでの気候変動を引き起こす最も重要な要素となります。実際、今から約10万～2万年前の最終氷期には、ダンスガード・オシュガーイベント（注1）と呼ばれる急激な気候変動が何度も起こっていたことが知られていますが、それらは大西洋深層循環の急激な変化によって引き起こされたと考えられています。しかしながら、大西洋深層循環の急激な変化がどのような仕組みで起こったのかについてはまだ良く分かっていません。東京大学大気海洋研究所の岡　顕准教授らは、海洋大循環モデルによる数値シミュレーションにより、氷期における大西洋深層循環の急激な変化を引き起こす仕組みとして、南大洋での温暖化がその引き金となりうる可能性を指摘しました。本研究は、氷期における急激な気候変動についての新たな知見を与えるものであり、数百～数千年の時間スケールで生じる気候変動の仕組みの理解にも貢献する成果です。

発表内容

【研究の背景】

グリーンランド氷床コアの気温データから、今から約10万年～2万年前の最終氷期にはダンスガード・オシュガーイベント（以降、DOイベント）と呼ばれる急激な気候変動が起こっていたことが知られています（図2）。DOイベント発生のメカニズムについてはさまざまな説が提案されてきましたが、氷床コアデータを用いた詳細な解析などから、近年では大西洋深層循環の変化により引き起こされたと考えられるようになってきました。現在の大西洋深層循環は、図1に示すように北大西洋を沈み込み域とする全球規模の循環であり、その北向きの熱輸送は現在の気候形成に大きな役割をもつことが知られています。これまでの研究から、氷期においては、大西洋深層循環は現在と同様な「亜間氷期モード」に加えて、現在よりもやや弱い状態の「亜氷期モード」も存在し、2つのモードの間を何度も行き来していたことがDOイベントの要因となっていたという考えが提案されていました。氷期において存在した大規模な北半球大陸氷床からの融解水が、このようなモード遷移を引き起こしうることは広く知られていましたが、循環の弱化は説明できても循環の強化についての説明にはならない、氷床融解と循環変化の因果関係が必ずしも明確でないなど、融解水以外にモード遷移を引き起こす他の仕組みが存在する可能性も示唆されていました。現在もさまざまな研究が行われていますが、氷期における大西洋深層循環のモード変化がどのような仕組みで起こったのかについての結論はまだ得られていません。

【研究方法の概要】

Oka et al. (2012)（文献1）では、海洋大循環モデルを用いた数値実験の結果から、最終氷期最盛期（注2）の大西洋深層循環が現在に比べて弱化していた要因として、海面の冷却により北大西洋での深層水形成域が南にシフトすることが重要であり、そのシフトは冷却がある閾値を超えると急激に起こるという熱的閾値（注3）の存在を指摘しました（Nature誌のNews&Viewsで紹介記事も掲載されました）。この熱的閾値は、先行研究により提唱されていた「亜氷期モード」と「亜間氷期モード」の2つのモードの存在に物理的説明を与えるものであると考えられます。本研究では、「北半球」および「南半球」での海面熱境界条件の変化により、熱的閾値を超える大西洋深層循環のモード遷移がどのように起こりうるのかをさらに詳細に調べました。具体的には、海洋大循環モデルCOCO (Hasumi, 2006；文献2) を用いた数値実験を、大気海洋結合モデルMIROC（K-1 model developers, 2004；文献3）による現在および氷期のシミュレーションの結果から作成した海面境界条件（注4）を利用することで実施しました。Oka et al. (2012) と同様に、現在と氷期の間の海面熱境界条件を複数作成し（20%氷期、40%氷期など）、その境界条件のもとで大西洋深層循環が定常状態になるまでそれぞれ実験を実施するとともに、北半球と南半球での冷却の影響を分離して評価するために、「北半球のみ」あるいは「南半球のみ」で熱境界条件を変更した感度実験（計81通りの実験）を系統的に行いました。

【結果】

海面境界条件を現在から氷期に徐々に変更すると、冷却が大きくないうちは大西洋深層循環がだんだんと強化されていきます（図3aとb）。これは、海面の冷却により、大西洋北部で沈み込む海水が冷やされることで密度が上昇し、循環を強化する効果があるためだと考えられます。一方、冷却の大きさがある閾値を越えると、大西洋深層循環は急激に弱化することが確認できます（図3bとc）。この弱化は、Oka et al. (2012) で提唱された熱的閾値により説明ができます。つまり、海面の冷却が十分に大きくなると、海氷が広範囲に南下し、北大西洋北部における深層循環の沈み込み域においても、海氷で覆われてしまいます。海氷に覆われた場所では、大気との熱交換が遮断されて、これまでの沈み込みが維持できなくなります。そのため、新しい沈み込み域の場所は、海氷がまだ覆われていない南側に移動することになります。つまり、沈み込み域の移動を伴うほどに海面の冷却が十分に強くなると、大西洋深層循環は強化ではなく、沈み込み域の南下によって弱化することを意味します。これまでの研究でも、氷床からの融解水が大西洋深層循環の強さを大きく変えることは知られていましたが、海面における冷却の効果のみでも循環の変化、とくに弱化が起こりうることを示した点が新しい知見でした。今回のモデル結果によると、熱的閾値による大西洋深層循環のモード遷移が起こるかどうかは、全球的な冷却の程度だけでなく、北半球および南半球それぞれでの冷却の程度にも依存して決定していることが分かりました（図4aの白線）。とくに、北半球の冷却が十分大きく、かつ南半球の冷却はやや小さいという熱境界条件下では、熱的閾値を超えるかどうかは、北半球よりも南半球の熱条件がより重要となることを示唆しています。追加実験として、南半球での熱境界条件のみを徐々に温めていく遷移実験についても実施したところ、DOイベントに相当する「亜氷期モード」から「亜間氷期モード」へのモード遷移が南半球での温暖化により再現できることも確認できました。グリーンランドと南極における氷床コア記録（図4b）においても、南極での大きな昇温を伴い、比較的長く継続するDOイベント（図2のtype L）については、多くのイベントが互いに類似した気温条件において発生しており、その気温条件はモデル結果から得られた熱的閾値を超える条件と概ね一致していることが確認できます（図4c）。南半球の大部分は海に覆われており、南半球の温暖化は南大洋の温暖化と同期していたと考えられます。これらのことは、比較的長く継続するDOイベントについては、南大洋の温暖化がDOイベントの引き金となっていた可能性を示唆する結果です。

【研究の意義と今後の展望】

大西洋深層循環の変化は、氷期における急激な気候変動を引き起こしたと考えられていますが、そのメカニズムについてはよく分かっていませんでした。北大西洋深層循環のモード遷移については、氷床からの融解水がその要因となりうることは広く知られていましたが、南大洋での温暖化という全く別の要因によっても起こりうることを本研究によって示すことができました。また、大西洋深層循環は南半球から北半球への熱輸送を通じて、地球上の気温分布をコントロールしていることは広く認識されていましたが、逆に南大洋での温暖化が大西洋深層循環の急激な変化につながりうることを示したという点も意義があると考えています。

一方、本研究の結果は、比較的長く継続するDOイベントについて、南大洋の温暖化が引き金となっていた可能性を示唆するものですが、南大洋の温暖化の要因については、本研究では十分に調べることができていません。また、比較的短周期で起こるDOイベントについては、本研究とは別の説明が必要であると考えています。近年の研究では、MIROCを含めた複数の大気海洋結合モデルによってDOイベントに類似した現象が再現されるとの結果も報告されはじめており、今後の理解の進展が期待されます。本研究の成果は、氷期における急激な気候変動をはじめとする数百～数千年の時間スケールで生じる気候変動の仕組みの理解に貢献するものですが、その全容を理解するためには海洋と大気の相互作用を考慮に入れたモデル実験を進めるなど今後のさらなる研究が必要です。

本研究は、JSPS科研費JP19H01963、JSPS科研費　新学術領域研究『熱-水-物質の巨大リザーバ　全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床』、JPSP科研費17H06104からの助成を受けました。

文献1：Oka, A., H. Hasumi, A. Abe-Ouchi (2012), The thermal threshold of the Atlantic meridional overturning circulation and its control by wind stress forcing during glacial climate, Geophysical Research Letters, 39, L09709, doi:10.1029/2012GL051421.
（参考情報：https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2012/20120711.html）

文献2：Hasumi, H. (2006), CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0, CCSR Report, 25, 103pp.
（参考情報：https://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~hasumi/COCO/）

文献3：K-1 model developers (2004), K-1 Coupled Model (MIROC) Description. K-1 Technical Report 1 [Hasumi, H., and S. Emori (eds.)]. Center for Climate System Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 34 pp.

発表雑誌

雑誌名：「*Communications Earth & Environment*」（8月20日付）
論文タイトル：Glacial mode shift of the Atlantic meridional overturning circulation by warming over the Southern Ocean
著者：Akira Oka, Ayako Abe-Ouchi, Sam Sherriff-Tadano, Yusuke Yokoyama, Kenji Kawamura, Hiroyasu Hasumi
DOI番号：10.1038/s43247-021-00226-3

問い合わせ先

東京大学　大気海洋研究所
准教授　岡　顕（おか　あきら）

E-mail：akira◎aori.u-tokyo.ac.jp　　※「◎」は「@」に変換してください

用語解説

注１：ダンスガード・オシュガーイベント（Dansgaard-Oeschger event）
グリーンランドの氷床コアデータにより発見された氷期における急激な温暖化イベント。最終氷期には20回以上のイベントが発生しており、大きな温暖化イベントでは10年程度の期間に10度を超える気温上昇が起こっていた。
注２：最終氷期最盛期（LGM; Last Glacial Maximum）
最終氷期において最も寒冷な気候状態であった今から約２万年前にあたる時期。
注３：大西洋深層循環の熱的閾値
Oka et al. (2012) で提唱された大西洋深層循環のモード遷移を引き起こす海面冷却の閾値。
下記の情報も参照。
https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2012/20120711.html
注４：海面境界条件
海洋モデルを駆動するために用いる気温、風、降水量など、大気の状態についての情報。

添付資料

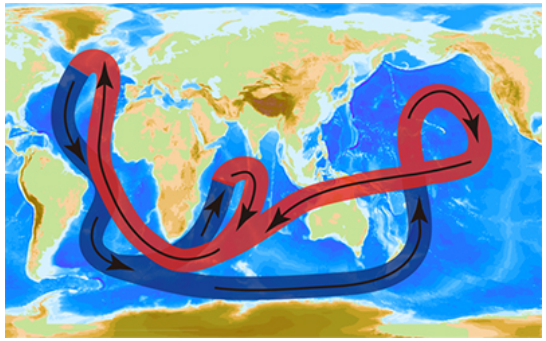


図1：海洋深層循環の模式図。青色が深層、赤色が表層での流れを示しています。大西洋北部は海洋深層循環の沈み込み域となっています。大西洋深層循環は、大西洋における表層での北向きの流れ（赤矢印）と深層での南向きの流れ（青矢印）から成る循環のことを指します。

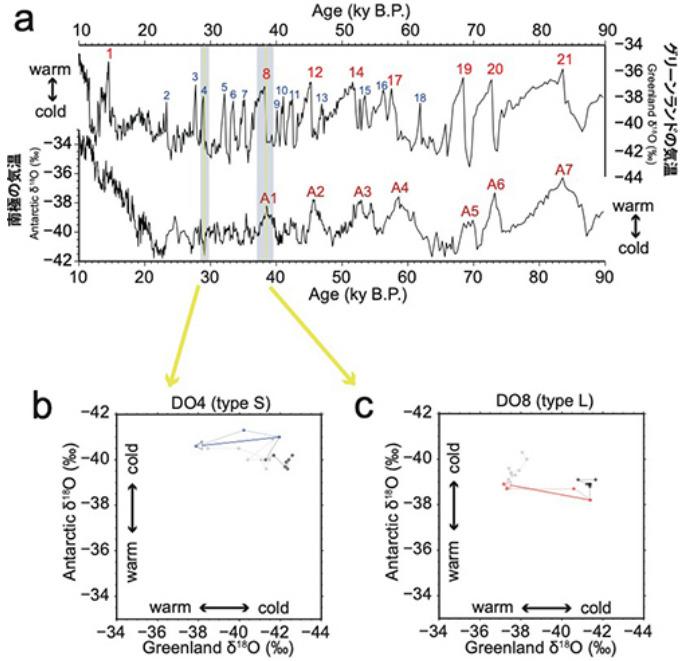


図2：(a) グリーンランドおよび南極の氷床コアによる酸素同位体比データで、当時の気温を記録した指標。数字はDOイベントを示しており、南極での大きな気温上昇イベント（A1～A2）を伴ったDOイベントをtype L（赤字）、それ以外をtype S（青字）と分類して図示しています。(b) type Sと (c) type LのDOイベントの比較。横軸と横軸は、それぞれグリーンランドと南極の酸素同位体比で、矢印の始点がDOイベントの開始、矢印の終点がDOイベントのピークを示しています。

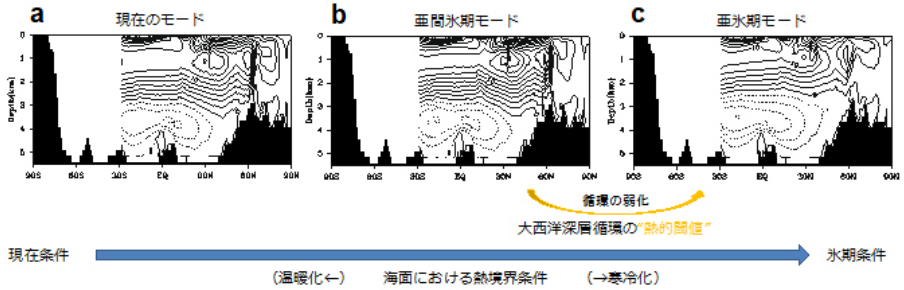


図3：海洋大循環モデルにより再現された大西洋深層循環。等値線の値が正の場合に時計回りの流れがあり、値が大きいほど流量が大きいことを意味しています（等値線の間隔は$10^6 m^3/s$）。図のaは現在気候条件での実験、bとcは氷期気候条件での実験であり、bよりもcのほうがより寒冷な海面熱境界条件のもとでの実験の結果。bからcにかけて、海面での冷却により循環が弱化しており、大西洋深層循環の熱的閾値の存在(Oka et al. 2012)が確認できます。

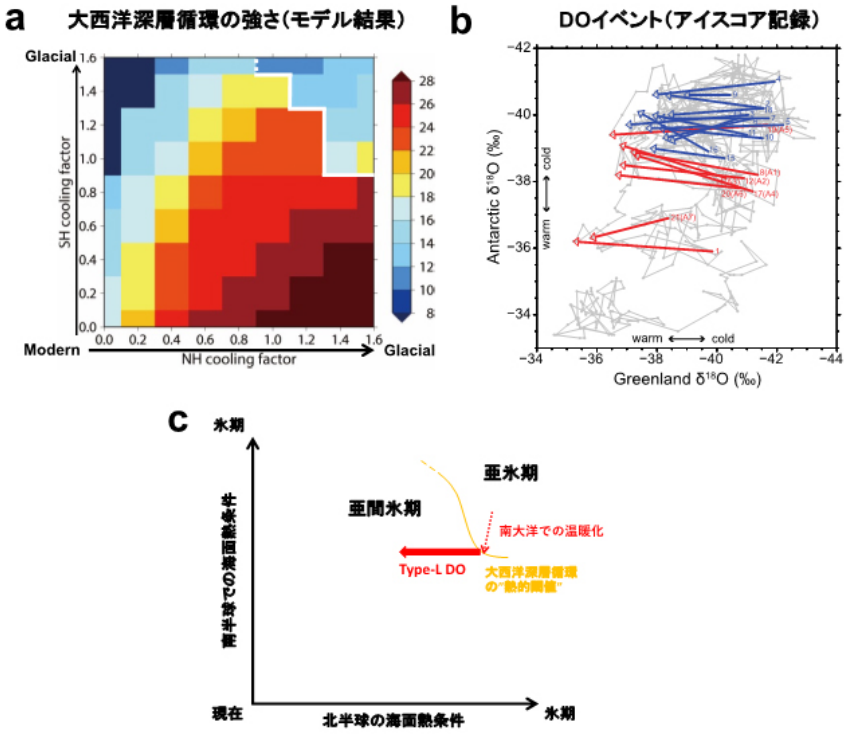


図4：(a)モデル結果と(b)氷床コアデータとの比較。(a) 横軸と縦軸は、それぞれ北半球と南半球の海面境界条件で、図の値はモデルで再現された大西洋深層循環の強さを示しています。白線は熱的閾値の場所を示しており、それを境にして大西洋深層循環の強さが急激に変化していることが分かります。(b)図2と同様に氷床コアデータから、すべてのDOイベントを矢印で示した図。(c)南大洋の温暖化がtype LのDOイベントを引き起こすことを示した模式図。

南大洋が鍵を握る氷期の大気中二酸化炭素濃度変化

2021年8月26日

東京大学 大気海洋研究所
海洋研究開発機構

発表のポイント

◆約2万年前の最終氷期最盛期における大気中二酸化炭素濃度を、海洋炭素循環モデルシミュレーションにより再現することに成功しました。
◆氷期の南大洋における塩分成層の強化と表層海洋の鉄肥沃化が炭酸塩補償を増幅し、海洋への炭素貯留の増加に大きく寄与することを明らかにしました。
◆最終氷期最盛期における大気中二酸化炭素濃度を再現するうえで南大洋が重要となることを明らかにし、氷期?間氷期スケールの海洋炭素循環の変動メカニズムの理解に貢献しました。

発表者

小林 英貴（東京大学 大気海洋研究所 特任研究員）
岡 顕（東京大学 大気海洋研究所 准教授）
阿部 彩子（東京大学 大気海洋研究所 教授）
山本 彬友（海洋研究開発機構 地球環境部門 特任研究員）

発表概要

地球の大気中二酸化酸素濃度は、現在400ppmを超え、産業革命前の280ppmから大きく上昇しています。一方、約2万年前の最終氷期最盛期（注1）には190ppmと低かったことが、氷床コア記録から明らかにされています。この大気中二酸化炭素濃度の低下は、大気から深海に炭素が貯蔵されたことで生じたと考えられており、また世界中の古海洋掘削データは、当時の海洋環境を記録した化学トレーサー（注2）の分布を明らかにしつつあります。しかし、その大気中二酸化炭素濃度の低下の仕組みや化学トレーサーの示す海洋物質循環の全体像の詳細はよくわかっておらず、３次元の海洋モデルを用いた氷期の変化の再現も困難でした。東京大学大気海洋研究所の小林英貴研究員、岡顕准教授らは、海洋研究開発機構の山本彬友研究員と協力し、海洋炭素循環モデルを用いた数値実験で、氷床コア記録と整合した大気中二酸化炭素濃度の変化の再現に成功しました。今回の実験では、氷期の南大洋における強い塩分成層と氷河性ダスト起源の鉄肥沃化（注3）の効果を適切に考慮すると、化学トレーサーの分布をうまく再現できることもわかりました。成層の強化は深海に炭素を隔離し、鉄肥沃化で炭素は効率的に下向きに輸送されるため、どちらも深海の全炭酸濃度を上昇させます。それは、炭酸塩堆積物の溶解とそれに続く海洋全体のアルカリ度（注4）の増加（炭酸塩補償; 注5）により増幅され、大気中二酸化炭素濃度の低下に大きく貢献することを明らかにしました。

発表内容

(1) 研究の背景・先行研究における問題点
第四紀（注6）の更新世において、地球の気候は寒冷な氷期と温暖な間氷期を交互に繰り返しており、大気中の二酸化炭素濃度も周期的に変動していました。氷床コア記録から、約2万年前の最終氷期最盛期における大気中二酸化炭素濃度は、産業革命前の現代を含む間氷期と比べて90ppm程度低いことが明らかにされています。氷期は現代と比べて寒冷で乾燥した気候で、植生等の縮小に伴い陸域の炭素貯留は減少していたと推測されています。そのため、海洋炭素循環を構成する、海面の二酸化炭素濃度の溶解過程（注7）、表層海洋の生物過程（注8）、海洋深層循環（注9）、炭酸塩補償などの変化が組み合わさることで、大気中二酸化炭素濃度が低下したと認識されています。しかしながら、海洋炭素循環過程を組み込んだ従来の3次元海洋モデル研究では、大気中二酸化炭素濃度低下の振幅を十分に再現することが困難で、変動に対するそれぞれの過程の寄与についても、明確な答えは出ていませんでした。

(2) 研究内容（具体的な手法など詳細）
本研究では、地球温暖化予測にも使用される気候モデル（MIROC）の海洋部分を構成する海洋大循環モデル（COCO）に、炭素循環モデルと自ら作成した海洋堆積物モデルを結合したモデルを用いて、最終氷期最盛期と産業革命前の現代についての数値モデル実験を行いました。古海洋環境復元研究から、最終氷期最盛期の南大洋の深層水が、高い塩分および古い水塊年代（低い放射性炭素の自然存在量; 注10）で特徴づけられることや、南アメリカ大陸のパタゴニアから南大洋への氷河性ダストの供給の増加が、鉄肥沃化をもたらしていたことが指摘されています。本研究では、これら南大洋の環境変化に着目した感度実験も行いました。
まず、従来のモデル実験と同様な設定で実施した最終氷期最盛期の再現実験では、大気中二酸化炭素濃度の低下幅は40ppm弱と、実際の変化量を十分には再現できませんでした（図2の氷期標準実験）。一方、南大洋の塩分成層の強化と氷河性ダスト起源の鉄肥沃化の効果を考慮した実験では、海洋深層の炭素貯留が現代実験から顕著に増加しました。炭酸塩補償を含めると、氷期の海洋炭素循環の変化による大気中二酸化炭素濃度の変化はおよそ77ppmであり、既往研究と比べても最も現実的に氷床コア記録が示す変動（約90ppm）を再現することができました（図1; 図2の氷期改良実験）。
さらに、大気中二酸化炭素濃度の変化に対する諸過程の寄与を切り分けて調べました。塩分成層の強化で、海洋表層と深層との炭素の交換が減少し、深層に炭素が隔離されます。また、鉄肥沃化で亜南極域において植物プランクトンの生物生産が増えることで、より多くの炭素が深層に輸送されます。これらは、どちらも氷期に海洋深層の全炭酸濃度を上げる、つまり大気中二酸化炭素濃度を下げる方向にはたらきました。さらに、深層の全炭酸濃度が上がると、海底炭酸塩堆積物の溶解が促進されます。これは、海洋炭酸系の均衡を変えることで、海洋全体のアルカリ度を上昇させます。アルカリ度の上昇で、海洋はさらに二酸化炭素を吸収できるため、最終的に大気中二酸化炭素濃度が大きく低下しました。この炭酸塩補償と呼ばれる炭酸塩堆積物フィードバックは、南大洋の成層強化と鉄肥沃化を考慮すると、増幅されることもわかりました（図2）。
本研究では、海洋炭素循環にかかわる性質の異なる化学トレーサーである、溶存酸素、安定炭素同位体比（$\delta^{13}C$）、^{14}C年代もモデルで計算しました。海底堆積物コア記録から復元された、貧酸素、軽い$\delta^{13}C$、古い^{14}C年代で特徴づけられる南大洋深層の分布は、塩分成層の強化と鉄肥沃化の効果を適切に考慮することで、従来のモデル計算に比べて現実的に再現できることがわかりました。この結果は、今回のモデル実験が再現した海洋炭素循環場の妥当性を支持しています（図3）。

(3) 社会的意義・今後の予定 など
近年、人為起源二酸化炭素の排出に起因して、大気中二酸化酸素濃度が上昇しています。一方で、氷期?間氷期における大気中二酸化炭素濃度の変動は、自然の変動により生じていました。過去の気候変動の仕組みを調べ、その根底にある普遍的な仕組みを理解することは、将来の気候変動に対するより確かな知見につながるという意味でも重要です。本研究により、最終氷期最盛期において、南大洋の環境変化に伴う海洋炭素循環の変化が、海洋深層の炭素貯留を増やし、大気中二酸化炭素濃度の低下に大きく寄与しうることがわかりました。このような海洋深層を含む変化は、数千年以上の長い時間スケールの気候変動を考える上で重要です。今回の実験は、すべてのプロセスが十分に長い時間をかけて応答した結果を再現する定常計算を行いましたが、実際に重要となるプロセスは時間スケールにより変わります。今後は、氷期から現在にかけての気候遷移期における炭素循環の再現実験など、時間スケールに応じた海洋炭素循環の過渡応答を評価する研究を進めていく予定で、気候変動と炭素循環との関わりについてのさらなる理解につなげていきたいと考えています。

発表雑誌

雑誌名：「*Science Advances*」（8月25日付）
論文タイトル：Glacial carbon cycle changes by Southern Ocean processes with sedimentary amplification
著者： Hidetaka Kobayashi*, Akira Oka, Akitomo Yamamoto, Ayako Abe-Ouchi
DOI番号：10.1126/sciadv.abg7723

問い合わせ先

東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系
特任研究員 小林 英貴（こばやし ひでたか）
E-mail：hidekoba◎aori.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系
准教授 岡 顕（おか あきら）
E-mail：akira◎aori.u-tokyo.ac.jp

※アドレスの「◎」は「@」に変換してください

用語解説

注1：最終氷期最盛期（Last Glacial Maximum: LGM）
更新世後期の現代に直近の氷期の最盛期で、約2万1000年前に相当します。南極大陸やグリーンランドだけでなく、北アメリカ大陸やスカンジナビア半島などにも氷床が発達し、氷床量の増加により、現代と比べて海水準がおよそ130m低下していたと考えられています。
注2：化学トレーサー
海水に溶けた化学物質の濃度は、海洋の流れや混合、大気と海洋とのガス交換、生物による影響などを受けて変化します。また、流体の動きを追跡するために使われる特性は、トレーサーと呼ばれます。溶存化学物質やその同位体指標をトレーサーとして利用し、その分布を調べることは、海洋で何が起こったのかを理解するための手がかりとなります。
注3：鉄肥沃化
現代の南大洋は表層海洋で栄養塩が豊富であるにもかかわらず、植物プランクトンがもつクロロフィル量が低い海域として知られています。その要因として、海水中の溶存鉄の不足が挙げられています。一方で氷期は、間氷期に比べて寒冷で乾燥した気候であり、観測的知見から風送ダストの沈着量が増えていたことが明らかになっています。海面におけるダスト起源の鉄供給の増加で、植物プランクトンが現代に比べて増殖していた可能性が考えられています。
注4：アルカリ度
海水の酸緩衝能を示す指標で、海水の単位質量あたりのプロトン供与体に対するプロトン受容体の過剰量に相当する水素イオンのモル数で定義されます。海洋炭酸系の状態を示す重要なパラメータの一つです。炭酸系の他のパラメータが一定の条件下で、アルカリ度が上昇すると、海水の二酸化炭素分圧は低下します。
注5：炭酸塩補償
海水中を沈降し、溶解することなく海底に到達した炭酸塩粒子は、堆積物中の間隙水における炭酸塩の飽和度に依存して溶解し、一部は堆積物として埋没し、地質学的スケールで地球を循環します。炭酸塩堆積物の埋没はアルカリ度の除去源となりますが、それは1万年以上の時間スケールで、岩石風化起源のアルカリ度の供給との均衡が保たれています。何らかの要因でそれらの均衡が崩れると、それらの均衡を保つ方向に海洋炭酸系が変化し、海洋全体のアルカリ度が変化します。
注6：第四紀
地質時代区分の一つで、現在を含む最も新しい時代です。およそ258万年前から1万1700年前の更新世と、それ以降の現在までの完新世に大きく区分されます。南北両半球に大陸氷床が形成され、寒冷な氷期と温暖な間氷期が交互に繰り返す「氷期-間氷期サイクル」と呼ばれる気候変動で特徴づけられます。
注7：二酸化炭素濃度の海水への溶解
大気と海洋との間では、二酸化炭素のガス交換が生じ、海水中に溶けた二酸化炭素は、水和した二酸化炭素、炭酸、炭酸水素イオン、炭酸イオンの4つの異なる形態で存在しています（これらの炭酸物質の総和が全炭酸濃度です）。海水における二酸化炭素の

溶解度は、温度が高くなるほど小さくなります。
注8：表層海洋の生物過程
表層海洋において、植物プランクトンは、栄養塩と光を利用した光合成により、有機物を生成します。生成された有機物の一部は、死がいや排泄物として沈降し、海洋表層から深層へと下向きに輸送されます。また、生物の中には石灰質や珪質の殻を形成するものもあり、それらを介した物質の鉛直輸送も生じます。これらは総称して「生物ポンプ」と呼ばれます。
注9：海洋深層循環
1000年の時間スケールで全地球海洋を巡る海洋循環で、海水の水温と塩分による密度差による循環です。現在の海洋では、重い深層水が北大西洋と南極大陸周辺の2箇所で形成されて沈み込み、全球海洋にわたって底層を広がり、流れていくうちに軽くなって湧き上がり、再び表層へと戻ってきます。
注10：放射性炭素の自然存在量（$\Delta^{14}C$）
炭素14は、半減期が約5730年である炭素の放射性同位体です。宇宙線の影響により大気中で生成され、大気から離れると壊変して減少します。放射性炭素の自然存在量（$\Delta^{14}C$）は、炭素12に対する炭素14の割合を、炭素13の割合を用いて補正した値です。炭素14は、海水中で半減期に従って減少していくことから、海水の$\Delta^{14}C$とその海水が海面にあったときの$\Delta^{14}C$との差が、水塊の年代を示す指標となります。

添付資料

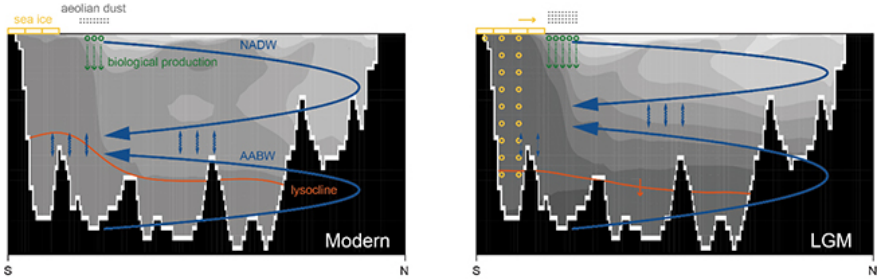


図1. 本研究で検討した現代（Modern）および最終氷期最盛期（LGM）における深層海洋循環、南大洋の海氷の範囲（sea ice）、風送ダスト沈着量（aeolian dust）、生物生産（biological production）、リソクライン（lysocline: 炭酸塩堆積物が急激に溶解し始める深度）の違いを示す模式図。大西洋子午面循環は、大西洋表層を北上して北大西洋深層水（NADW: North Atlantic Deep Water）が深層に沈み込む上部セルと、南極大陸周辺で南極底層水（AABW: Antarctic Bottom Water）が沈み込む下部セルで構成されます。堆積物コア記録から、氷期には現代を含む間氷期に比べて上部セルが浅くなっていたことが示唆されています。氷期の南大洋においては、海氷の張り出しの拡大と、深層の高塩化が生じており、海氷生成の増加とそれに伴う高塩分水（ブライン）排出が関連していると考えられます。また、氷河性を含む風送ダスト沈着量の増加は、海面に鉄を供給することで、植物プランクトンの生産性を向上させていたと考えられます。海洋深層の全炭酸濃度が増加することで炭酸塩の飽和度が低下し、炭酸塩堆積物が溶解する深度が浅くなります。

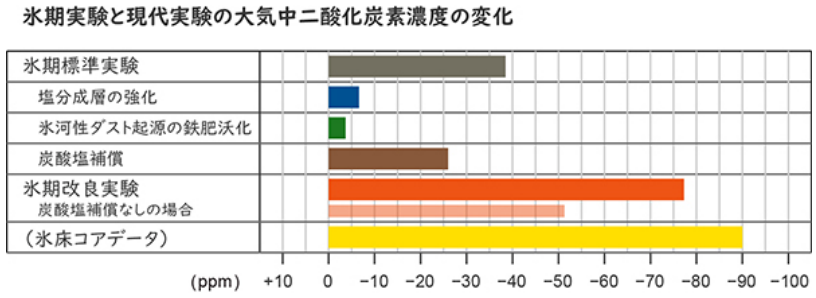


図2. 本研究で見積もった、現代と氷期との間の大気中二酸化炭素濃度の変化に対する諸過程の寄与。最終氷期最盛期（LGM）の気候下で検討したすべての過程を含む氷期改良実験における変化（橙色）は、氷床コア記録（黄色）をおおよそ再現しています。従来の氷期実験の結果（灰色）と、南大洋の塩分成層の強化（青色）、氷河性ダストによる鉄肥沃化（緑色）、炭酸塩補償（茶色）の寄与を切り分けた結果を同時に示しています。（発表論文の図1より）

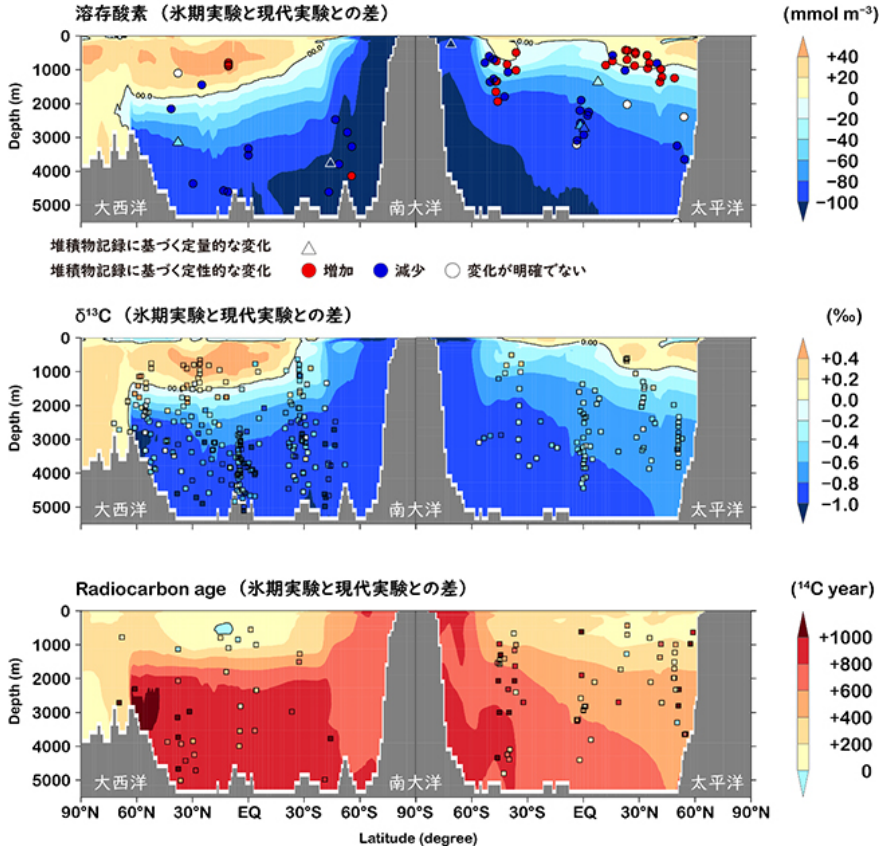


図3. 溶存酸素（mmol m^{-3}）、$\delta^{13}C$ (‰)、^{14}C年代 (^{14}C年)について、本研究で検討したすべての過程を含む氷期実験と現代実験との変化を、大西洋と太平洋で東西平均した鉛直断面図。海底堆積物コア記録から復元された変化とともに示しています。（発表論文の図2から4より）

【プレスリリース】東南極リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS 観測と地殻変動の検出

2021.09.09 プレスリリース

東南極リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS 観測と地殻変動の検出

服部晃久[1], 青山雄一[1,2], 奥野淳一[1,2], 土井浩一郎[1,2]

[1]総合研究大学院大学, [2]国立極地研究所

【研究の概要と成果、新規性】

- 寒冷だった約２万年前から現在にかけての間に、南極大陸を覆う氷床は減少したと考えられています。それによる氷床質量の減少が、地球表面・内部に加わる力を変化させた結果、地殻変動が生じました。さらに、それが現在に至っても緩やかに続いています。
- 東南極のリュツォ・ホルム湾沿岸の露岩域で実施した GNSS 観測から、当地域が現在隆起していること、またその隆起速度が南北方向に空間的な特徴を持つことを明らかにしました。
- このように精密に観測された現在の詳細な地殻変動は、過去の南極氷床の融解史と地球の内部構造を明らかにするための重要な知見となります。

【研究概要】

本研究では、日本の南極地域観測事業によって実施された東南極リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS （Global Navigation Satellite System）観測のデータ解析から、当地域の現在の地殻変動を明らかにしました。これに加えて、当地域は近年の衛星重力観測や衛星高度計観測の結果から積雪が増加していると考えられるため、積雪が荷重となって引き起こす短期的な変形を補正することで、長期的な地殻変動の大きさを評価しました。その結果、現在この地域は全体的に隆起の傾向にあること、また南側の地域ほどより速く隆起するという空間的特徴が明らかになりました。南極氷床は約 2 万年前には現在より大きく発達していたと考えられ、その後、数千年スケールで生じた氷床融解によって、今もなお地殻変動が継続していることが予測されています（氷河性地殻均衡）。本研究結果は南極氷床の融解史、および地球の内部構造の理解に貢献する重要なデータとなります。

【研究背景】

約 2 万年前の最終氷期最盛期は南極、グリーンランドをはじめとして、現在よりも氷河・氷床が発達していたと考えられています。これら高緯度地域に存在していた氷が融解し、地球表面で水の移動といった質量の移動が生じることによって地球表面・内部に加わる力が変化し、地殻・マントル・コアからなる固体地球は変形します。GIA (Glacial Isostatic Adjustment, 氷河性地殻均衡)と呼ばれるこの固体地球の変形を詳しく調べることで、過去の氷床分布やマントルの粘性構造などが明らかできると期待されます。 GNSS観測は、人工衛星から発信される時刻情報を含んだ電波を受信することで、受信したアンテナ位置を推定する測地観測手法のひとつです。同じ観測点でGNSS 観測を継

続的に実施することで、その場所の地殻変動を捉えることが可能となります。南極は極限の自然環境のため現場観測が容易ではないことから、GNSS観測点はあまり多くなく、特に東南極（おおまかに南極大陸のうち東半球側）では非常に少ない地点でしか観測が実施されていません。そこで日本の南極地域観測隊は、20年以上にわたって昭和基地を中心にGNSS観測拠点の整備を進め、地殻変動観測を実施してきました。本研究では、GNSS 観測のデータを解析することで、当地域の GIA による地殻変動を明らかにすることを試みました。

【研究の内容】

本研究では、昭和基地内のIGS (International GNSS Service：国際GNSS事業)点SYOG、リュツォ・ホルム湾沿岸露岩域（ラングホブデ、スカルブスネス、パッダ、ルンドボークスヘッタ）で実施されたGNSS 観測データの解析を行いました（図１）

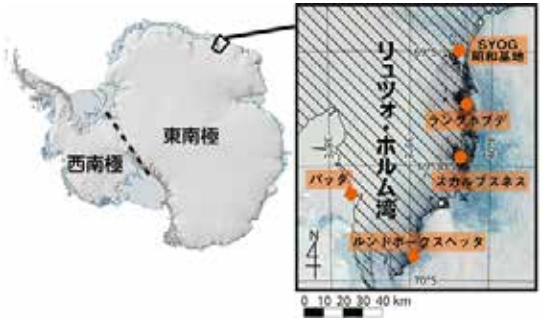


図1. 本研究の対象地域とリュツォ・ホルム湾沿岸露岩GNSS観測点の位置。

リュツォ・ホルム湾は日本の南極観測拠点・昭和基地のあるオングル諸島を内包する南北にひろがる湾で、過去複数回のキャンペーン観測の実施、また定常観測点の設置が進められてきました。これらの点で得られた観測データをPPP（Precise Point Positioning, 精密単独測位）手法を用いて解析することで、各点で水平変動・上下変動の時間変化を推定しました（図2）。

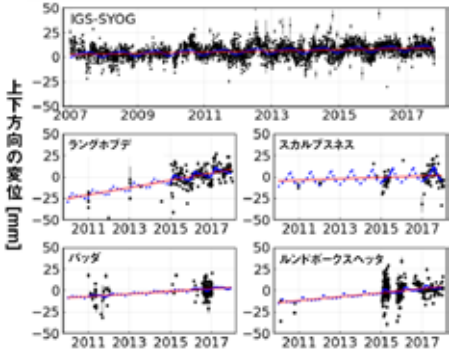


図2. GNSS観測データを解析することで得られた、各観測点の上下変位の時系列。全体的に隆起の傾向が見られる。縦軸は上下方向の変位（隆起が正の方向）、横軸は観測年を示す。

一方、当地域は近年の降雪量増加によって質量が増えていることが衛星重力観測や衛星高度計観測から示唆されています。GNSS 観測から推定される地殻変動には、この近年の積雪に起因する成分が含まれます。GNSS観測の結果に近年の積雪による影響を補正することで、GIA による地殻変動を抽出しました。これによって得られた上下方向のGIA成分と、いくつかのGIAモデルから求められた予測値との比較を行い、当地域の変動を説明することができるGIAモデルと想定される過去の氷床変動史について考察しました（図3）。

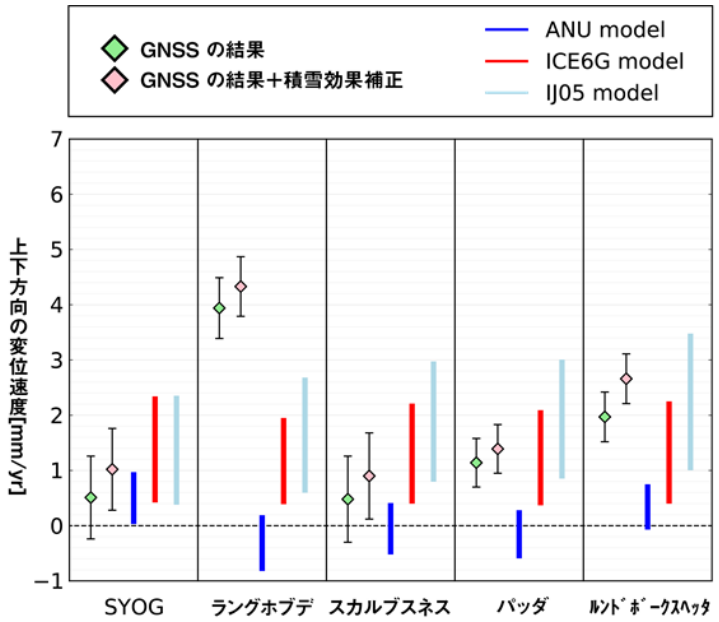


図3. GNSS観測の結果に近年の積雪成分を補正することで得られたGIA成分と、既存のGIAフォワードモデルとの比較。右側ほど南側の観測点を示す。青、黄、赤の線は、最終氷期からの南極氷床融解史のモデルの違い（ANU: オーストラリア国立大モデル、 ICE6G: トロント大モデル、 IJ05: NASAモデル）によるGIAモデルによるシミュレーション結果を示す。

今回の解析結果によって、まず、リュツォ・ホルム湾でのGIA 起因の上下変動に、観測点の位置に関係した特徴的な違いが存在することが明らかになりました。後述するようにラングホブデでは異なった傾向が見られましたが、その他の観測点では南側ほどより速い隆起が観測されました（図３）。特に、より南に位置するルンドボークスヘッタでの隆起速度は、一番北であるSYOGよりも１年あたり1.5mm大きい隆起速度を示しました。これは、解析の推定誤差を考慮しても地点間でのGIAの違いを議論する上で十分に大きな違いです。過去の南極氷床変動については、GIAモデルに基づくいくつかの融解史が提案されていますが、融解史の選択によっては予測される現在の地殻変動が大きく変化します。今回の解析で比較に用いたGIAモデルのシミュレーションによる予測値は、GNSS観測を十分説明可能であることが示されました。また、予測値の幅は、シミュレーションの入力モデルである過去の氷床分布およびその融解時期と、地球内部の粘性構造との微妙なバランスによって特徴づけられていることを示唆しており、観測値が詳細なモデルの拘束条件になることを示すものです。

【今後の展望】

本研究ではリュツォ・ホルム湾沿岸で実施されたGNSS 観測の解析を行うことで、観測報告の少ない東南極における GIA による地殻変動を明らかにしました。これにより、地質学的研究など関連する他分野の研究と連携することで、過去の南極氷床融解史や地球内部構造の理解がより進むと考えられます。また、今回のGNSS 観測の結果では、ラングホブデの観測点はやや異なる傾向を示しました。これは、よりローカルな荷重の変動による影響や、観測期間の長さが不十分であることによる推定誤差の影響などが要因として考えられます。これらの問題を解決し正確な議論を進めるためには、より長期にわたって今後も観測を継続し、観測点を広範囲に拡げていくことが非常に重要となります。

【用語解説】

- 最終氷期最盛期：約２万年前に全球的に気温が約7°Cほど低下した時代で、北アメリカのハドソン湾やスカンジナビア半島を中心として、最大厚さで3000mを超えるような巨大な氷床が存在したと考えられている。
- GIAモデル：地球を弾性的性質と粘性的性質をもつ物体と仮定して、その地球表面に加わる力が変化することで、どのような変形が生じるかを計算する数値シミュレーションモデル。

【謝辞】

本研究はJSPS科研費（17H06321）、および、国立極地研究所のプロジェクト研究費（KP306）の助成、総合研究大学院大学の支援を受けて行われました。また、本研究では南極地域観測事業で得られた GNSSデータを使用しました。

【著者】

- 服部晃久
  （総合研究大学院大学　複合科学研究科　極域科学専攻）
- 青山雄一
  （国立極地研究所 地圏研究グループ 准教授／総合研究大学院大学　複合科学研究科　極域科学専攻　准教授）
- 奥野淳一
  （国立極地研究所 地圏研究グループ 助教／総合研究大学院大学　複合科学研究科　極域科学専攻　助教 ）
- 土井浩一郎
  （国立極地研究所 地圏研究グループ 准教授／総合研究大学院大学　複合科学研究科　極域科学専攻　准教授）

【論文情報】

- 論文タイトル
  GNSS Observations of GIA-Induced Crustal Deformation in Lützow-Holm Bay, East Antarctica
- 掲載誌
  Geophysical Research Letters
  DOI： https://doi.org/10.1029/2021GL093479

お問い合せ先

- 研究内容に関すること
  服部晃久　電子メール：hattori.akihisa@nipr.ac.jp
  土井浩一郎 電子メール：doi@nipr.ac.jp
- 報道担当
  国立大学法人 総合研究大学院大学
  総合企画課　広報社会連携係
  電子メール: kouhou1@ml.soken.ac.jp

Like 0　シェアする 0　ツイート

国立大学法人
総合研究大学院大学（総研大）

〒240-0193
神奈川県三浦郡葉山町（湘南国際村）

TEL046 (858) 1500 / 代表
FAX046 (858) 1542

Copyright © 2018 The Graduate University for Advanced Studies. All Rights Reserved.

セルソーターによる円盤型珪藻の完全分離手法を確立　～極域の海洋環境変動の高精度復元に道筋～

▸ 2021/09/29 14:00 ▸ 掲載: 2021/09/29 理学研究科
研究ニュース

【追記 2021/09/29】

9月13日にプレスリリースした本研究結果が、アメリカ化学会の出版する雑誌の中から Editors' choice として選ばれました。

ACS Editors' Choice (ACS Publications)

神戸大学大学院海事科学研究科の井尻暁准教授、高知大学大学院修士課程修了生の泉孟氏、高知大学海洋コア総合研究センターの加藤悠爾研究員（JSPS-PD）、自然科学系理工学部門の池原実教授、海洋研究開発機構の諸野祐樹主任研究員、株式会社マリン・ワーク・ジャパンの寺田武志総括主任の研究グループは、セルソーターを用いた珪藻殻の形態別分離手法の開発を行い、円盤型珪藻の完全分離に成功しました。

この手法を用いて、南大洋（南極海）で採取された堆積物試料から円盤型珪藻を抽出して酸素安定同位体比を測定したところ、その酸素同位体比が、全球的な海洋環境変動の指標である底生有孔虫の酸素同位体標準曲線や、南極大陸で採取された氷床コアに記録された気温の変動と対比可能であることを明らかにしました。今後、この手法を用いることにより、過去の水温や塩分などの定量的なデータが少なかった南極や北極周辺（極域）の海洋環境の変動について正確なデータを得ることができ、極域の古海洋研究が飛躍的に進むことが期待されます。

この研究成果は、9月3日に、アメリカ化学会が発行する専門学術誌「*ACS Earth and Space Chemistry*」に掲載されました。

ポイント

- 1/50ミリメートルサイズの珪藻殻の形態別分離濃集に世界で初めて成功
- この手法を用いて南大洋（南極海）の堆積物試料から抽出した円盤型珪藻の酸素同位体比は、全球の海洋環境変動や、南極氷床の気温記録と対比可能
- これまで定量的なデータの空白域であった南極、北極周辺海域の古水温・塩分記録を得ることができる

研究の背景

過去の海洋環境の変動は海底堆積物中に記録されており、海底から柱状の堆積物試料（コア試料）を採取し、その中に保存された化石や化学組成の変化を調べることで海洋環境の変遷を推定することができます。なかでも動物プランクトンである有孔虫は炭酸カルシウムで構成される殻をもち、その酸素安定同位体比＊[1] は、海水の温度と酸素同位体比を反映することから、海水温や塩分、氷床量の指標として最も重要かつ定量的な基礎データとして古海洋環境復元に大きく貢献してきました。しかし炭酸カルシウムは、有孔虫の産出の少ない高緯度海域や、炭酸塩補償深度以深の深海底には堆積しないため、世界の海洋の1/3程度を占めるこれら高緯度海域や深海底では酸素同位体比のデータを得ることが出来ません。南大洋など極域の海洋環境は全球気候変動に大きな役割を果たしているため、極域から有孔虫の同位体データが得られないことは古気候・古海洋研究にとって大きな障壁となっていました。

一方、極域には植物プランクトンである珪藻の殻を多く含む珪藻軟泥が堆積しています。珪藻の殻はオパール($SiO_2 \cdot nH_2O$)で構成され、その酸素同位体比は有孔虫の殻と同じく水温と海水の酸素同位体比を反映すると考えられており、有孔虫が産出しない極域の古海洋環境指標として期待されています。しかし、その分析には多くの課題が残されており、特に最大の課題は、測定に用いる試料の前処理法が確立されていないことでした。珪藻は殻のサイズが数十μmと小さいために、有孔虫殻のように実体顕微鏡下において任意の分類群のみを手作業で分取することができません。そのためこれまでの研究では、測定用試料に堆積物中の粘土鉱物が混入し、かつ複数の珪藻種が混在したまま同位体比の分析が行われてきており、そのデータは不確実性を含んでいました。粘土鉱物は珪藻殻に比べて低い酸素同位体比をもつため、粘土鉱物の混入は珪藻殻の酸素同位体比測定結果に深刻な影響を及ぼします。また珪藻は中心型珪藻と羽状型珪藻に大きく二分され[*2]、それらの殻は、種ごとの生息水深や増殖時期の違いのために異なる海水の情報（水深、季節）を記録している可能性があります。したがって、珪藻殻酸素同位体比の古海洋指標としての精度・信頼性を向上させるためには、粘土鉱物の除去および任意の分類群の珪藻殻を抽出できる新たな試料前処理法の開発が必要でした。

研究の内容

本研究では、重液分離法や遠心分離、およびセルソーターによる処理を組み合わせ、粘土鉱物の除去、中心型珪藻殻の中でも円盤状の形をした殻の濃集および分取を行うことで、堆積物試料から円盤型珪藻殻を完全分離する新たな前処理法を開発しました。開発のための基礎実験には、南大洋インド洋区コンラッド海台（図１）から採取された堆積物試料を用いました。円盤型の珪藻は南大洋に広く分布し、氷期-間氷期を通して産出する *Thalassiosira lentiginosa* がその代表種であるため、円盤型珪藻殻は南大洋の古海洋研究に広く利用できると期待されます。セルソーターは特定の光学的特徴を持つ粒子を高速で分取することができ、微生物や細胞の分取に用いられていますが、珪藻の形態別の分離はこれが初めての試みです＊3。

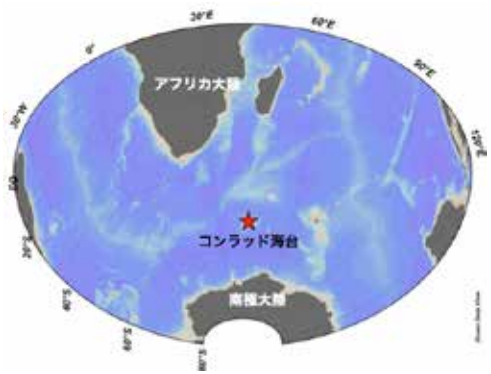


図１　南大洋インド洋区コンラッド海台の位置図
Schlitzer, R., Ocean Data View, http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV, 2003.

新たに開発した前処理方法により、コア試料のすべての層準で粘土鉱物や珪藻以外の堆積粒子を取り除き、ほぼ100%珪藻殻だけを抽出し、さらに円盤型珪藻殻を95%以上の純度で分取することに成功しました（図２）。分取した円盤型珪藻殻の48–96%は *T. lentiginosa* によって占められていました。同層準における複数回の酸素同位体分析＊4 の結果、従来の前処理法と比べて繰り返し測定精度が向上したことが確かめられました。これは、粘土鉱物や珪藻以外の混合物を取り除いたことと、分析に供した珪藻種を円盤型珪藻に絞ることができたためだと考えられます。この前処理法を用いて、過去４万年分の堆積物試料から円盤型珪藻を抽出して酸素同位体測定を行いました。その結果、中心型珪藻の酸素同位体比は、底生有孔虫の酸素同位体変動曲線や、南極大陸で採取された氷床コアから得られた気温記録と同様の変動を示し対比が可能であることが明らかになりました。

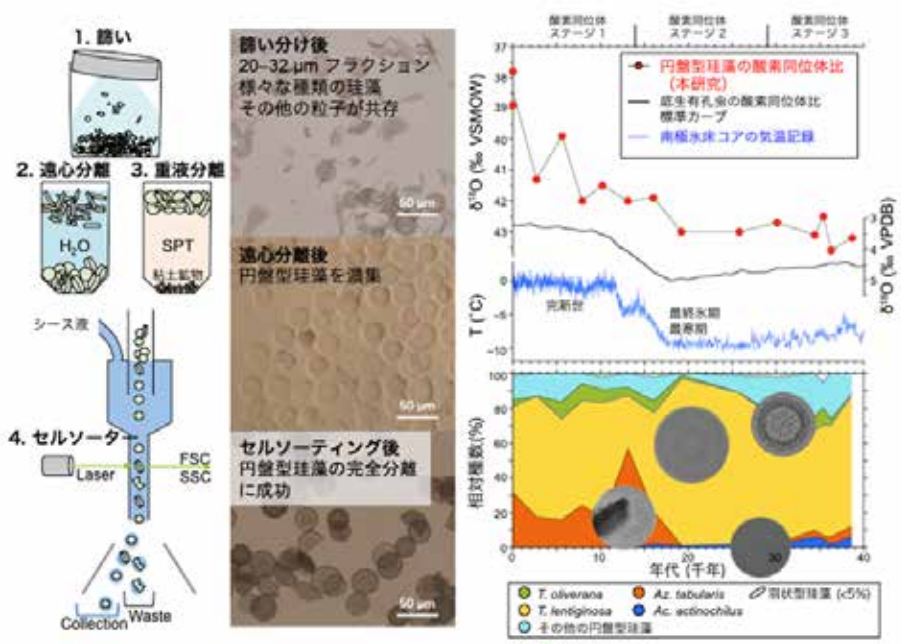


図2　円盤型珪藻分離手法と、その酸素同位体比分析結果
Adapted with permission from Ijiri et al., 2021, ACS Earth and Space Chemistry. Copyright 2021 American Chemical Society.

今後の展開

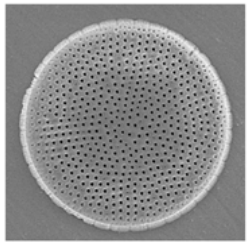
南極や北極など極域の海洋表層の水温や塩分は、氷床の拡大・縮小の影響を鋭敏に反映し、またその水温、塩分の変化は深層水の形成など全球的な海洋循環・気候変動に大きな影響を与えています。本研究で開発した手法を用いることにより、これまでデータの空白域であった極域における過去の水温や塩分の指標となる酸素同位体比データを高精度で得ることができ、極域の古海洋環境復元の研究が飛躍的に進むと期待されます。

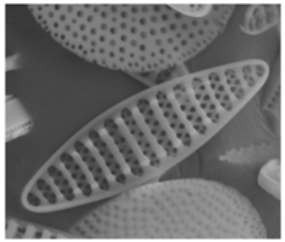
用語解説

＊1　酸素安定同位体比：
酸素原子には、質量数が異なる３種類の安定同位体（^{16}O、^{17}O、^{18}O）が存在し、有孔虫殻を構成する炭酸カルシウム中の酸素原子にもこうした複数種の安定同位体が含まれている。そのうち、有孔虫殻に含ま

れる質量16の酸素に対する質量数18の酸素の割合（酸素安定同位体比）は、殻形成時の水温や海水の酸素安定同位体比（塩分指標）に依存することが知られている。同様に、珪藻殻を構成する生物源オパールの酸素安定同位体比も、殻形成時の水温や海水の酸素安定同位体比に依存することが知られている。

＊2　中心型珪藻・羽状型珪藻：
珪藻は殻の形から中心型珪藻と羽状型珪藻に大きく分けられる。中心型珪藻の多くは円盤状の形をしている。


中心型珪藻（円盤型）


羽状型珪藻

＊3　セルソーティング技術（微生物細胞の光学分取技術）：
0.1ミリメートル以下の微細水流中を流れる細胞にレーザー光を照射し、発生する前方・側方散乱光や蛍光を測定し、その光学的特徴に基づいて目的の細胞集団を高速に（一秒間に数千から数万個）分離する技術。本研究では堆積物の構成粒子を微細水流中に流し、レーザー光の照射により発生する前方・側方散乱光について、珪藻殻が発する散乱光を特定し、円盤型珪藻殻の選択的回収に成功した。

＊4　珪藻殻の酸素同位体分析：
酸素同位体分析は井尻らが開発した、「微小量生物源オパール酸素同位体分析システム」を用いて行った。この分析システムでは最小40μgのオパールの酸素同位体比を±0.3‰の精度で測定できる。セルソーターで分取される数十〜数百マイクログラムと微小量の珪藻殻の酸素同位体分析には不可欠の分析システムである。
Ijiri, A., Yamane, M., Ikehara, M., Yokoyama, Y., Okazaki, Y. (2014) Online oxygen isotope analysis of sub-milligram quantities of biogenic opal using the inductive high-temperature carbon reduction method coupled with continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. Journal of Quaternary Science, 29, 455–462.

謝辞

本研究はJSPS科研費23244102, 19H00730, 17H06318の助成を受けたものです。

論文情報

タイトル
“Purification of Disc-Shaped Diatoms from the Southern Ocean Sediment by a Cell Sorter to Obtain an Accurate Oxygen Isotope Record”

DOI：10.1021/acsearthspacechem.1c00201

著者
Akira Ijiri, Takeshi Izumi, Yuki Morono, Yuji Kato, Takeshi Terada, Minoru Ikehara

掲載誌
ACS Earth and Space Chemistry

関連リンク

- 海事科学研究科

【研究ニュース】
- 深海掘削により室戸岬沖の海底下生命圏の実態とその温度限界を解明

研究成果

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前
ページの先頭へ

巨大な海洋渦が暖かい海水を南極大陸方向へ運ぶ 東南極トッテン氷河を下から融かす主要な熱源

2021年10月26日
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
国立大学法人東京海洋大学
国立研究開発法人水産研究・教育機構
国立大学法人北海道大学

東南極で最大級の規模を有するトッテン氷河（注1）の周辺域では、近年、氷床（注2）質量の減少が報告され、また、将来の大規模な氷床流出も懸念されています。国立極地研究所の平野大輔助教、東京海洋大学の溝端浩平助教、水産研究・教育機構の佐々木裕子研究員、北海道大学低温科学研究所の青木茂准教授らの研究グループは、水産庁漁業調査船「開洋丸」および南極観測船「しらせ」により実施された大規模な海洋観測で取得した現場観測データと衛星観測データを統合的に解析し、トッテン氷河の沖合に定在する巨大な海洋渦が、比較的温度の高い海水を効率的に南極大陸方向へと輸送していることを明らかにしました。氷河末端に流れ込む暖かい海水は、氷床を下から融解することで氷床流出の引き金となるため、本成果は、氷床の質量損失が加速するトッテン氷河域での質量損失プロセスの包括的理解につながると期待されます。

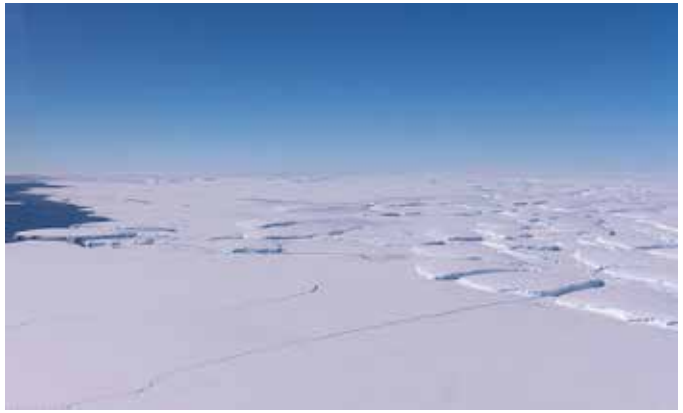


図1：東南極のトッテン氷河末端域。左側の青い部分は海。

研究の背景

南極大陸を覆う氷床は、大陸沿岸に向かってゆっくりと流れ、やがて氷山となって海に流出します。氷床末端域には、氷床から海に突き出した「棚氷（たなごおり）」という部分があり、この棚氷には、氷床・氷河の流動を抑制するという重要な役割があります（図2）。しかし、棚氷の下に暖かい海水が流れ込むと、棚氷が底面から融かされて薄くなり、その結果、流動を抑制する力が弱まって、海洋への氷床の流出が増大してしまいます。つまり、「周りの海」を知らずして、氷床の質量変動を正しく理解することはできません。このようにして氷床が海に流れ出してしまうと、海水準が上昇するだけでなく、世界を巡る海洋大循環の駆動力をも弱めてしまいます。南極氷床の質量損失は、全球の海水準変動や気候システムに対し、大きなインパクトを有すると考えられています。

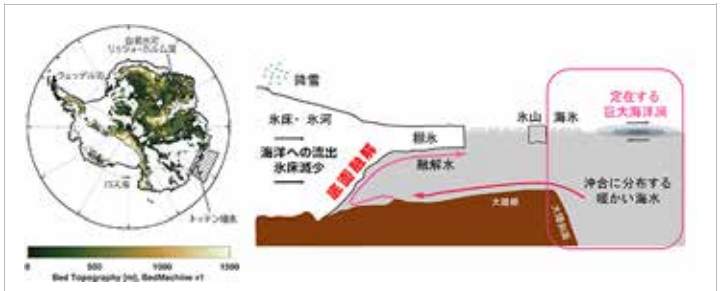


図2：（左）海面に対する南極氷床底面の標高。白抜きの領域は、氷床基盤が海面よりも下に位置する領域を示す（Morlighem et al., 2020）。（右）海洋による氷床末端部・棚氷の融解プロセスを示す模式図。

東南極・トッテン氷河の流域には、全球の海水準を3～4m上昇させる量に相当する氷床が存在し、近年、この地域の氷床質量損失が報告されています。このトッテン氷河とその周辺の氷床は、氷床基盤が海面よりも低い場所に存在するため（図2）、海洋からの熱供給に対してより脆弱であると考えられています。過去1回のオーストラリアによる観測により、沖合を起源とする暖かい水がトッテン氷河の前面に分布することは分かっていましたが、そもそもこの暖かい水がどのように沖合から大陸氷河方向へと運ばれるかについては不明でした（図2の枠で囲まれた部分）。

近年の研究で、トッテン氷河の沖合には、複数の巨大な（水平方向に100-200km程度）時計回りの海洋渦が常に存在していることが明らかになっています（文献1）。そこで研究グループは、この巨大な海洋渦が大陸方向へ沖合の暖かい水を運ぶ重要な役割を担っているであろうと考え、これを実証すべくトッテン氷河沖での海洋観測を行いました。

研究の内容

水産庁漁業調査船「開洋丸」の第10次南極海調査（2018年12月～2019年2月）、および、第61次南極地域観測隊（2019年11月～2020年3月）における南極観測船「しらせ」での航海において、トッテン氷河沖合の広域で海洋観測を実施し、水温・塩分・溶存酸素などの鉛直プロファイルデータを取得しました。両航海での海洋観測地点のうち91地点で得られたデータと、衛星による観測データを統合して解析を行いました。

その結果、大陸斜面に沿った水温の分布を見ると、暖かい水は東西方向に一様ではなく、むしろ点在して分布するという状況が観測されました（図4左）。このような特に暖かい水（図4で白線で囲まれた部分）は、定在渦の東側、つまり南下流域に分布していました（図4右）。このことは、時計回りの定在渦によって沖合の暖かい水が効率的に大陸方向へ運ばれていることを示すものです（図2右）。

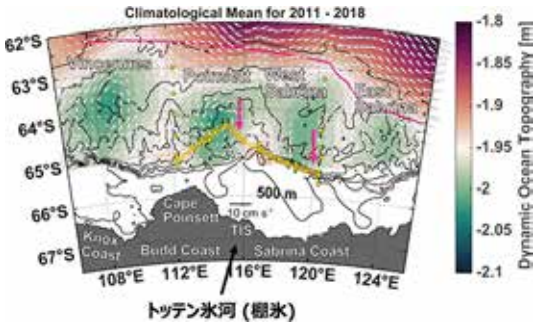


図3：トッテン氷河沖に定在する巨大渦：西から，ピンセンネス渦，ポインセット渦，西サブリナ渦，東サブリナ渦。黄色の丸は，「開洋丸」による海洋観測点を示す。また，ピンクの矢印は，特に暖かい水（コア）が観測された場所を示す。

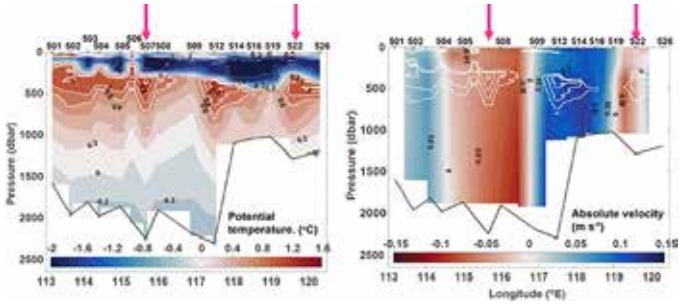


図4：大陸斜面（図3の黄色の太線）に沿ったトッテン氷河沖での東西方向の（左）海水温の分布。白い線で囲まれた部分は0.8℃以上の特に暖かい水。（右）流速（赤：南下流，青：北上流）の分布。ピンクの矢印は南下流域で特に暖かい水が観測された場所を示す。
縦軸は水圧で、水深とほぼ対応している（下に行くほど深い）。

元来、海洋は大小様々な渦で満ちあふれていますが、大半は出来ては消え、出来ては消えを繰り返します。しかし、トッテン氷河沖の巨大渦は「定在」しています。これがとても重要な特徴であり、定在する渦の東側（南下流域）では「常に」暖かい水が沖から大陸方向へと効率的に輸送されているのです。さらに、定在渦によって大陸方向へ輸送されている海洋熱は、トッテン氷河の融解に十分な量であることが推定されました。

今後の展開

今回の成果は、氷床の質量損失が加速するトッテン氷河域における質量損失プロセスの包括的な理解につながると期待されます。しかし、定在渦によって大陸棚上へ輸送された暖かい水は、その後どのように大陸棚上を循環して最終的にトッテン氷河の前面まで運ばれるのか、また、トッテン氷河の前面に到達した暖かい水の特性（水温や塩分）は何によって決まるのかは不明なままです。トッテン氷河の融解プロセスを包括的に理解するためには、海中に係留系を設置しての長期間の時系列観測の展開や、現場観測と数値モデルの融合研究の推進を図り、残された未知のピースを明らかにしていく必要があります。

注

注1：氷河
南極やグリーンランド、山岳地では陸上に降り積もった雪が自身の重みで氷塊となり、重力によってゆっくりと流動する。この流れを氷河という。最終的に海へと流れ出して浮いている領域を棚氷と呼ぶ。図2（右）も参照。なお、海水が凍った海氷とはいずれも異なる。

注2：氷床
降り積もった雪が、長い年月をかけて押し固められて形成された氷の塊のこと。南極大陸上の氷床を南極氷床と呼び、地球最大の氷の塊である。

文献

文献1：Mizobata, K., Shimada, K., Aoki, S. & Kitade, Y. The Cyclonic Eddy Train in the Indian Ocean Sector of the Southern Ocean as Revealed by Satellite Radar Altimeters and In Situ Measurements. J. Geophys. Res. 125, e2019JC015994 (2020).

発表論文

掲載誌：*Communications Earth & Environment*
タイトル：Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica

著者：
平野大輔（国立極地研究所南極観測センター／気水圏研究グループ・助教）
溝端浩平（東京海洋大学・助教）
佐々木裕子（水産研究・教育機構・研究員）
村瀬弘人（東京海洋大学・准教授）
田村岳史（国立極地研究所気水圏研究グループ・准教授）
青木茂（北海道大学低温科学研究所・准教授）
DOI：10.1038/s43247-021-00217-4
URL：https://www.nature.com/articles/s43247-021-00217-4
論文公開日：2021年8月6日

研究サポート

本研究はJSPS科研費（JP20H04961, JP20K12132, JP17H06316, JP17H06317, JP17H06322, JP17H01615, JP20H04970, and JP21H04931）、水産庁、水産研究・教育機構、日本鯨類研究所、南極地域観測事業（JARE）重点研究観測（サブテーマ2）、および国立極地研究所プロジェクト研究（KP-303）の助成を受けて実施されました。

お問い合わせ先

（研究内容について）
国立極地研究所 南極観測センター／気水圏研究グループ 助教
平野大輔（ひらのだいすけ）

（報道について）
国立極地研究所 広報室

【報道機関の方】取材・掲載申込フォーム
【一般の方】お問い合わせフォーム

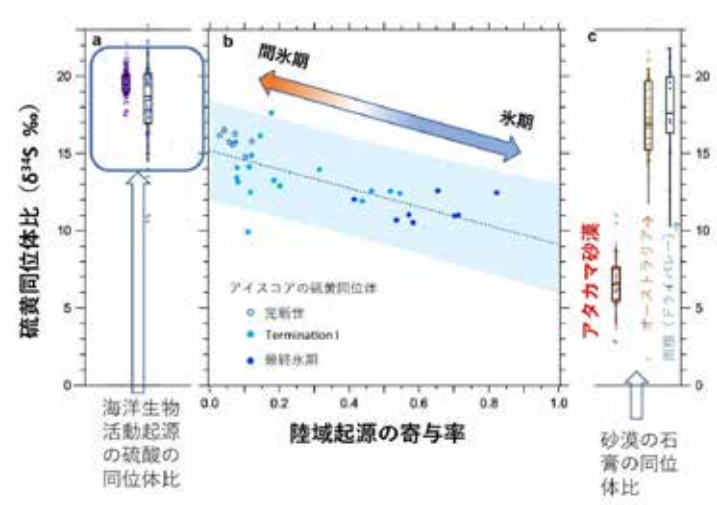
いいね！ 125　　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.



氷期の南極の硫酸エアロゾルはどこから飛来したのか？
～南米アタカマ砂漠からの寄与～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院環境学研究科の植村 立 准教授、松井 仁志 准教授、藤田 耕史 教授らの研究グループは、国立極地研究所、北海道大学、琉球大学との共同研究で、南極ドームふじアイスコアに含まれる硫酸エアロゾルの硫黄同位体比（$\delta^{34}S$）の分析を行い、その供給源地域を解析しました。

硫酸エアロゾルは南極における主要な水溶性エアロゾル成分であり、海洋生物活動、海塩、陸域の表面など複数の起源があります。一方で、「なぜ南極の硫酸エアロゾルの沈着量は、氷期と間氷期で大きく変化しないのか？」や「氷期に陸域からの硫酸エアロゾルの供給が多いとすれば、どの地域が起源なのか？」等の未解明の問題も残されています。

本研究では、南極ドームふじアイスコア[注1)]の硫黄同位体比の分析結果から、最終氷期では「陸域」を起源とする硫酸エアロゾルの寄与が大きかったことを明らかにしました。この結果は、最終氷期における硫酸エアロゾルの起源は、海洋生物活動であったという従来の有力な説と異なります。さらに、同位体比データから、南米のアタカマ砂漠[注2)]周辺の高地が最も有力な供給源地域であることが分かりました。これらの結果から、極度に乾燥した低・中緯度の砂漠に存在する水溶性物質が、南極の硫酸エアロゾルの供給源の一つであることを明らかにしました。

本研究成果は、2021年12月3日付地球科学分野の国際学術誌「Earth and Planetary Science Letters」に掲載されました。

【ポイント】

- 南極ドームふじアイスコアから、最終氷期における硫酸エアロゾルの硫黄同位体データを得た。
- 最終氷期では、「陸域」を起源とする硫酸エアロゾルの寄与が大きかったことを明らかにした。
- 陸域起源の硫酸エアロゾルの供給源は、南米のアタカマ砂漠の高地が有力であることが分かった。
- これまで考慮されていなかった低・中緯度の砂漠からの微粒子を、氷期の南極への硫酸エアロゾルの供給源として考慮すべきである。

【研究背景と内容】

大気中のエアロゾルは、放射及び雲との相互作用を通じて地球の放射収支を変化させることで、気候に影響を与えています。南極アイスコアを用いた分析によると、約2万年前の寒冷な氷期の南極大陸は、現在の間氷期に比べて「埃っぽい」環境であることが示されています。例えば、不溶性ダストの沈着量は、氷期には現在よりも10～25倍も多かったことが分かっています。

硫酸エアロゾルは南極域における主要な水溶性エアロゾルであり、主に海洋生物活動、海塩、陸域の表面等の複数の起源をもっています。興味深いことに、南極アイスコアに保存された海塩起源を除いた硫酸イオンの沈着量は、氷期－間氷期[注3)]のサイクルの中でほとんど変化していません。現在の気候では、南極氷床上への硫酸エアロゾルの主な起源は海洋プランクトンからの代謝物の分解物であるジメチルスルフィド（DMS）です。このことから、「なぜ南極氷床における硫酸エアロゾルの沈着量が氷期－間氷期サイクルで大きく変動しないのか？」という問題は、一般的には南極氷床に近い海域でのDMS排出量の変動が小さかったからであると解釈されています。

最近の研究では、氷期には陸域の硫酸カルシウム（石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）や無水石膏（$CaSO_4$））が硫酸エアロゾルの起源であったという説も提唱されています。一方で、平均的には陸域の硫酸カルシウム存在量は非常に低く、「仮に氷期に陸域からの硫酸エアロゾルの供給が多いとすれば、その供給源はどこなのか？」は未解明の問題でした。

本研究では、これらの問題に新しい知見を得るために、南極ドームふじアイスコアの硫酸エアロゾルに含まれる硫黄の安定同位体比（$\delta^{34}S$）を分析しました。硫黄同位体比は起源によって異なる値を取るため、起源の推定に活用できます。分析の結果、硫黄同位体比は、現在の温暖な気候では海洋生物起源のDMSの値と一致するのに対し、寒冷な氷期に向かうにつれて低い値を持つことを明らかにしました（図1）。この結果は、$\delta^{34}S$が低い特徴を持つ陸域起源の硫酸エアロゾルの供給量は氷期に増加し、$\delta^{34}S$が高い海洋生物活動起源の硫酸エアロゾルの供給量は減少したことを示唆しています。したがって、南極の硫酸エアロゾルの沈着量が、氷期・間氷期サイクルにおいて比較的安定している原因は、陸域起源の増加と海洋生物起源の減少のバランスがもたらした結果であると説明することができます。

さらに「氷期に増加した陸域起源の硫酸エアロゾルはどこから飛来したのか？」について検証しました。南極ドームふじアイスコアから得られたデータからは、硫酸イオン

/カルシウムイオン比が地表の平均値よりも異常に高いことが分かりました。このことは、石膏などの硫酸カルシウムが豊富にある地域が起源であることを示唆しています。降水がある地域では、地表の石膏は降水によって、地下水などに少しずつ溶出してしまいます。しかし、降水量が少ない砂漠のような乾燥した地域では、石膏は溶出せずに地表に偏在しています。そこで、南半球の様々な乾燥地域の石膏を比較・検証したところ、南米のアタカマ砂漠の高地に存在する石膏が、硫黄同位体比の低さなど、氷期の南極ドームふじアイスコアの化学的特徴と一致することが分かりました。他の地域からの寄与を否定することはできないものの、氷期には遠く離れた砂漠表面に存在する水溶性の物質（水溶性塩）が南極氷床に飛来していたことを示唆しています。したがって、南極アイスコアのイオンデータを解釈する際には、これまで軽視されてきた遠方の砂漠起源の寄与を考慮する必要があります。

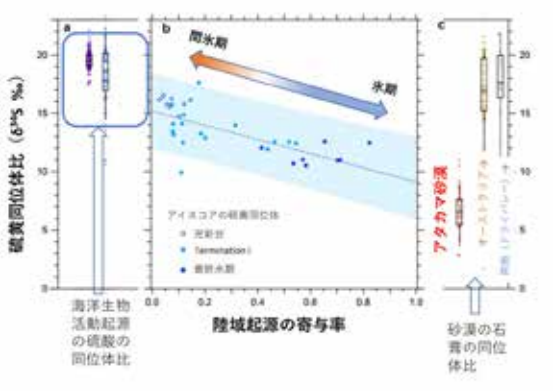


図１　アイスコアの硫黄同位体比とその起源

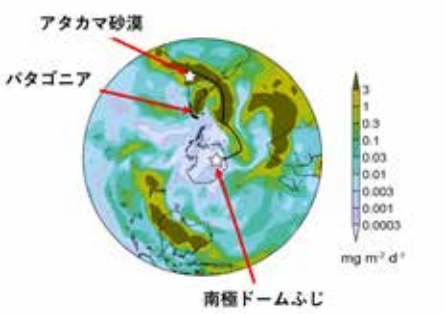


図２　砂嵐が発生した際のダスト沈着量のシミュレーション
本文中にある地域名称を示した

【成果の意義】

これらの結果は、ドームふじという南極氷床の高標高地域と世界で最も乾燥した砂漠であるアタカマ砂漠がリンクしている可能性を示しており、大気中の物質輸送という観点から興味深いです。これまでの研究では、南極内陸部への不溶性ダストの供給源は、主には南米パタゴニア地域と考えられていました。本研究の結果は、エアロゾルの特定成分に注目すると、より遠方で中低緯度地域からの供給の可能性があることを示しています。このようなエアロゾル供給源地域の推定は、アイスコアに記録された、硫酸エアロゾルの沈着量と気候との関係の解釈に影響します。将来的には、石膏等の鉱物の地域分布を考慮した気候モデルと組み合わせることで、過去の大気大循環のパターン（亜熱帯ジェット気流の位置や強度など）を推定する際に重要な制約を与えるデータとなります。

【用語説明】

注 1）アイスコア：

南極や北極の氷床を掘削して得られた円柱状の氷試料のこと。本研究で使用したドームふじアイスコアは、南極地域観測事業により掘削された。

注 2）アタカマ砂漠

南米アンデス山脈の高地に位置する砂漠（図 2）。南極北極を除くと、世界で最も降水量が少なく、乾燥した地域として知られる。

注 3）氷期-間氷期サイクル：

過去約 100 万年間にわたって、地球が長い寒冷な気候（氷期）と相対的に短い温暖期（間氷期）を約 10 万年周期で繰り返していた現象のこと。

【論文情報】

雑誌名：Earth and Planetary Science Letters
論文タイトル：Soluble salts in deserts as a source of sulfate aerosols in an Antarctic ice core during the last glacial period
著者：Ryu Uemura[1], Kosuke Masaka[2], Yoshinori Iizuka[3], Motohiro Hirabayashi[4], Hitoshi Matsui[1], Risei Matsumoto[2], Miki Uemura[2], Koji Fujita[1] and Hideaki Motoyama[4]
DOI: 10.1016/j.epsl.2021.117299
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X21005550
1 名古屋大学大学院 環境学研究科
2 琉球大学 理学部
3 北海道大学 低温科学研究所
4 情報・システム研究機構 国立極地研究所

報道発表　北見工業大学 KITAMI Institute of Technology　国立極地研究所

令和３年12月15日
国立大学法人北見工業大学
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所

海洋由来のエアロゾル粒子が南極海上空の雲の性質に影響 ～衛星観測をもとに解明～

南極大陸を取り巻く南大洋では、大陸由来及び海洋由来の微粒子（エアロゾル粒子）が大気中を浮遊しており、雲粒を生成する核として機能しています。雲粒には水滴と氷晶の2種類があり、上空の気温などによってその構成比が決まりますが、エアロゾル粒子の中には、比較的高温な環境でも氷晶の核として氷雲の生成を促進するものがあります。氷雲の多寡は、地球が受け取る太陽エネルギー量に大きく影響することから、氷雲が形成される環境を調べることは気候システムとその変動を理解する上で重要です。南極大陸や南大洋の上空に存在する大陸由来のエアロゾル粒子の研究は以前より行われ、古気候研究にも応用されてきていますが、海洋由来のエアロゾル粒子の雲形成への役割については十分に検討されてきていません。

北見工業大学の佐藤和敏助教及び国立極地研究所の猪上淳准教授の研究チームは、衛星観測で得られた雲の相状態（水雲か氷雲か）を判別できるデータから、南大洋及び南極大陸沿岸域での氷雲の存在割合を調査しました。その結果、夏季には、上空の気温が約-10℃以上の環境下で、ほかの温度帯よりも氷雲の存在割合が高く、海洋生物由来の粒子が氷晶の核となり氷雲の形成を促進している可能性が示されました。一方、冬季には、海から大気へ雲の核となる粒子を大量に供給する波しぶきが形成される強風時に、上空の気温が約-20℃以上の環境下で氷雲の存在割合が高くなることが明らかとなりました。

本成果では、海洋性エアロゾル粒子が氷晶核粒子として働くことで比較的高温な環境下で大気下層の氷雲が形成される可能性を示しており、将来予測モデルで用いられる雲物理過程の改良に極めて重要な知見を含んでいます。この成果は、2021年12月9日（日本時間）に*Geophysical Research Letters*のオンライン版に掲載されました。

＜研究の背景＞

雲は、放射過程を通じて地球が受け取るエネルギーの量を変動させるとともに、降水を通じた水循環変動にも密接に関連します。特に高緯度地域で発生する雲は、海氷の生成過程や氷床の涵養にも影響を及ぼすことから、気候システムを理解する上での重要な要素の１つです。雲には水滴でできた水雲と氷晶でできた氷雲があり、それぞれの雲の放射特性（日射の透過量や反射量など）が異なることから、広範囲の雲の相状態とその空間分布を把握することが重要です。

全球の雲分布を数値モデルで再現することは気候研究において大きな課題であり、雲の相状態の誤差は海面でのエネルギー収支にも影響することが報告されています（文献 1）。特に南大洋では、IPCC第６次評価報告書などでも指摘があるように、観測値より数値モデル内の氷雲の割合が多くなる傾向にあります。氷雲は水雲に比べ日射の反射量が小さいため、氷雲の割合が実際より過大評価される数値モデル内では、海面へ到達する日射量が多くなることで海面水温が実際より高くなり、南半球全体の大気・海洋循環の再現性にも影響しています。そのため、観測データを用いて南大洋で発生する雲の相状態や存在環境を調査する必要がありますが、広範囲の南大洋の雲に着目した観測的研究はこれまでほとんどありませんでした。

そこで本研究チームは、南大洋や南極大陸に存在する雲の相状態と存在環境を調べるため、Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation（CALIPSO）衛星で取得された雲の観測データを使用した解析を実施しました。

＜研究の内容＞

本研究では、CALIPSOの観測データから算出された雲粒子タイプデータセット（注１、図1b）を使用し、南極や南大洋３領域（太平洋、大西洋、インド洋：図 1a）で形成されている雲の相状態や気温について2006年から2015年までを対象に調べました。その結果、高度2km以下の対流圏下層に存在する南大洋の雲（下層雲）は、南極大陸沿岸域において比較的高温度の環境下（冬：－17.5～－10℃、夏：－7.5～0℃）で全下層雲（水雲+氷雲）に対する氷雲の存在割合が高くなっていたことがわかりました（図 2a, d）。このような高温環境では、氷晶の核となる微粒子の存在なしに氷雲は形成されません（注２）。

次に、氷晶核粒子の由来を検討しました。冬のインド洋の南極大陸沿岸域（南緯66°以南）では、気温-30℃以下に存在している氷雲の存在割合が80%以上と最大になっていますが、－17.5～－10℃の比較的高温下でも存在割合が50%以上と極大になる結果となりました（図2a）。この比較的高温下に存在する氷雲は、南極大陸からの寒気の吹き出しが強い（大気-海洋間の熱交換インデックス（℃・m/s）が高い）時に存在割合が高く（図 2b）、熱や蒸発の盛んな環境下で海洋由来（海洋中の氷晶核粒子）の物質も大気中に供給されることで氷雲の形成を増加させている可能性があることを示唆しています。一方、夏のインド洋の南極大陸沿岸域では、高温環境下での氷雲の存在割合が気温-7.5℃以上で60%以上と最大になっています（図

2d）。氷雲の存在割合が高くなると同時に海面でのクロロフィル *a* 濃度（注 3）も高くなっており（図 2f）、海洋から放出された生物由来の氷晶核粒子が、比較的高温下での氷雲の存在割合を増加させている可能性があることがわかりました。大西洋や太平洋の南極大陸沿岸域でも氷雲の高い存在割合がそれぞれの季節で似た傾向にあることから、同じプロセスで海洋由来の氷晶核粒子が増加し、氷雲の増加に影響していると考えられます。

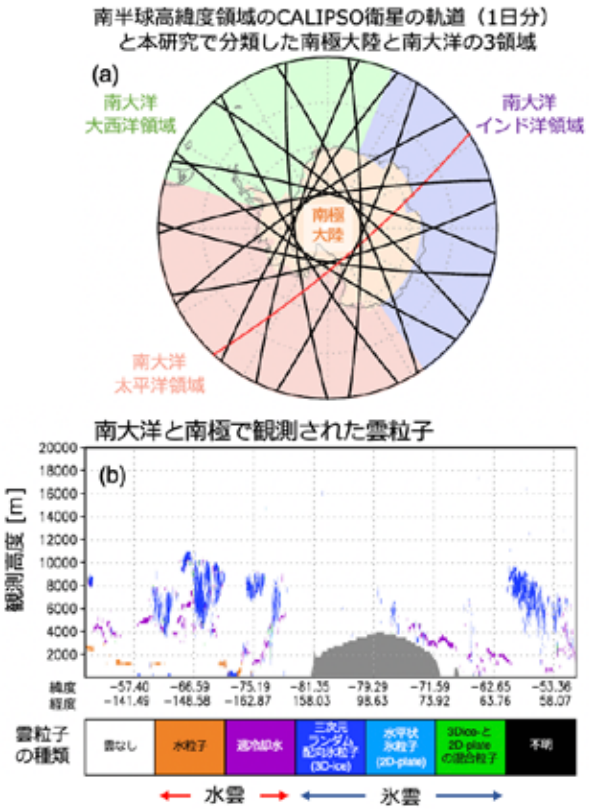


図 1:（a）南大洋と南極大陸での CALIPSO の 1 日間の軌道（黒・赤線）。色は解析で着目したそれぞれの領域（橙：南極大陸、青：南大洋インド洋領域、青：南大洋太平洋領域、緑：南大洋大西洋領域）を示している。(b)（a）の赤の軌道で取得された雲粒子の高度-緯度・経度断面図と雲粒子の種類、本研究で定義した水雲と氷雲。

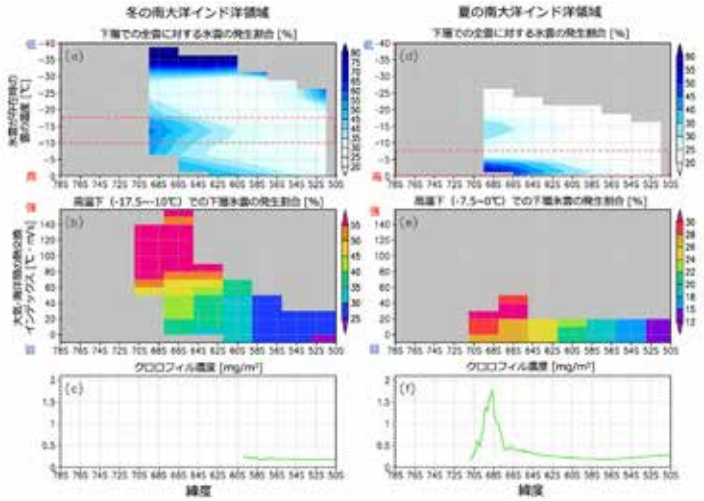


図 2:（a）冬の南大洋インド洋領域(図 1a 青領域)における各緯度の各温度下で発生した下層全雲に対する氷雲の割合[%]。赤破線は本研究で定義した冬の高温環境（−17.5〜−10℃）。(b)各緯度の高温の環境下で発生した下層氷雲と大気−海洋間の熱交換インデックスとの関係。熱交換インデックス（℃・m/s）は、海面水温と地表気温の温度差と地表付近の風速を乗算した値で、高い値は南極大陸からの強い風に伴い寒気が流入していることを示している。(c)各緯度でのクロロフィル濃度（mg/m³）。(d)〜(e)は夏の事例。

＜今後の展望＞

海洋由来のエアロゾル粒子により比較的高温下で氷雲が存在していることを示した本研究の成果は、数値モデル内の雲の再現性の理解に貢献すると考えられます。前述の通り、IPCC の報告書で使用されている将来予測モデル内でも、南大洋上の雲の再現性が低いことによる大気・海洋循環の再現性への影響が指摘されています。そのため、本研究で明らかになった比較的高温下での氷雲の形成を考慮した数値モデルの雲物理過程を開発することで、将来予測計算の精度を向上させることが期待できます。北極域では船舶観測データから波しぶきにより供給された海洋中の有機物が氷晶核として氷雲の形成を促進させることが示されていますが（文献 2）、本研究では大気中や海洋中の微粒子の直接観測は実施されていません。本研究で提唱した氷雲と海洋由来のエアロゾル粒子の関係性を実証するためには、大気エアロゾルや海水のサンプリングなどの現場観測が望まれます。本研究チームは、2022 年度からの南極地域観測事業において、南極観測船「しらせ」を用いた南大洋上の雲やエアロゾル粒子の直接観測を実施する予定です。

図 3: 本研究の氷雲と海洋由来のエアロゾル粒子の関係を示した概念図。

＜研究サポート＞

本研究は、科学研究費補助金　新学術領域研究（研究領域提案型）（20H04963、18H05053）、科学研究費助成事業　若手研究（19K14802）の助成を受けて実施されました。

＜注＞

注 1　CALIPSO の観測データから算出された雲粒子タイプデータセット

宇宙航空研究開発機構の雲エアロゾル放射ミッションプロジェクトサイエンスチームが開発したアルゴリズムを用いて、複数の衛星から得られた観測を基に作成されたデータセット。雲エアロゾル放射ミッション研究 A-Train プロダクトともいう。

注 2　氷雲の形成温度

微粒子を含まない純水の場合、低温度環境である約-36℃以下にならないと氷晶の形成が活性化されず、雲中では過冷却水水滴として存在する。大気中には氷晶を形成する際に核として働くエアロゾル粒子が存在するため、比較的高温度の環境でも雲の中で氷晶が形成される。氷晶核として働く微粒子は様々あり、氷晶の形成を促進する温度はそれぞれ異なる（例：バクテリア：気温-10℃以上、有機物：気温-10℃以下）。

注 3　クロロフィル *a* 濃度

ほとんどの植物プランクトンに含まれており、水域では植物プランクトンの量を示す。植物プランクトンは大気や雲の中で氷晶を形成する氷晶核として働かないが、-10℃の温度下で氷晶核として働くバクテリアの数と比例することが知られている。濃度の測定に太陽光が必要であることから極夜のある極域では観測可能な時期が限定される。

＜文献＞

文献 1：　国立極地研究所、北見工業大学プレスリリース「北極海の結氷予測は「雲」がカギ～「みらい」北極海航海データを利用した、数値予報モデルの検証プロジェクトから～」（2021 年 1 月 27 日）
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210127.html

文献 2：　国立極地研究所、北見工業大学プレスリリース「北極海の海氷減少で雲の性質が変化　～強風による波しぶきにより氷雲の割合が増加～」（2021 年 11 月 16 日）
https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211116.html

＜発表論文＞

掲載誌：Geophysical Research Letters
タイトル：Seasonal Change in Satellite-Retrieved Lower-Tropospheric Ice-Cloud Fraction over the Southern Ocean

著者：
佐藤 和敏
（北見工業大学 工学部 助教）
猪上 淳
（国立極地研究所 気水圏研究グループ 准教授／総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻 併任准教授）

URL：https://doi.org/10.1029/2021GL095295
DOI：10.1029/2021GL095295
受理原稿公開日：2021 年 12 月 9 日（オンライン公開）

お問い合わせ先
（研究内容について）
北見工業大学　助教　佐藤 和敏（さとう　かずとし）
E-mail: satokazu@mail.kitami-it.ac.jp
国立極地研究所　気水圏研究グループ　准教授　猪上 淳（いのうえ　じゅん）
E-mail: inoue.jun@nipr.ac.jp
（報道について）
北見工業大学　総務課広報戦略担当
TEL:0157-26-9116　FAX:0157-26-9174　E-mail: soumu05@desk.kitami-it.ac.jp
国立極地研究所　広報室
TEL: 042-512-0655　E-mail: kofositu@nipr.ac.jp

研究成果

アザラシによる観測で秋～冬の南極沿岸の海洋環境が明らかに

2021年12月27日
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
国立大学法人北海道大学

国立極地研究所の國分亙彦助教を中心とする研究グループは、南極・昭和基地でウェッデルアザラシに水温塩分記録計を取り付けて調査を行い（図1）、その観測データから、秋に外洋の海洋表層から暖かい海水（暖水）が南極大陸沿岸に流れ込んでいること、また、その暖水を利用することでアザラシが効率よく餌をとっていたことを明らかにしました。本成果は、秋期から冬期の南極海沿岸の海洋循環のメカニズムと海洋生態系の応答プロセスの解明につながると期待されます。この観測は第58次南極地域観測隊（2016年～2018年）の一環として実施されました。

図1：頭にCTDタグを装着したウェッデルアザラシ。装置は体重に比べて十分に軽く、一定期間後、体毛が抜け替わる時期に脱落する。（撮影：国立極地研究所 國分亙彦）

研究の背景

南極沿岸にはペンギンやアザラシなど多くの大型動物が生息しています。それを可能にする要因のひとつとして、外洋の深層からの栄養塩に富んだ暖水の流入に伴う高い生物生産が挙げられます。これまでにこのような現象が観測されたのは、深い海底谷や海洋渦の存在など、外洋の深層水が流れ込みやすい条件を備えた海域や、広い大陸棚のある海域などに限られていました。

一方、南極沿岸には、定着氷と呼ばれる陸から一続きとなって容易に動かない海氷に覆われた海域が広く存在し、そこでも多くの大型動物が見られます。しかし、厚い氷のために船で海洋調査をすることが難しく、この海域の大型動物がどのような仕組みによって生息できているのかはよく分かっていませんでした。

動物に小型の記録計を取り付けて、動物の行った場所の環境や行動を記録することをバイオロギングと呼びます。この手法を活用すれば、これまで船による観測のできなかった海域や時期の海洋環境データを集めることができます。そこで本研究チームは、南極・昭和基地周辺に生息するウェッデルアザラシにCTDタグという最新の水温塩分記録計（図1）を取り付け、これまで未知だった秋期から冬期の沿岸の海洋環境を計測しようと考えました。このCTDタグは位置情報、塩分と水温を計測し、同時に潜水深度を記録して、そのデータを衛星通信で送信するものです。この機器は重量580gとアザラシの体重（平均326kg）に比べて十分に軽いため動物への負荷は少なく、一定期間後、アザラシの体毛の抜け替わる時期には体毛と共に脱落する仕組みになっています。ウェッデルアザラシは最大で深さ904m、96分間も潜水した記録のある南極沿岸の代表的な大型動物であるため、定着氷の張り出す大陸棚上の海底近くの深さまでの海洋環境データ収集が期待できます。

研究の内容

2017年の秋（3月～4月）から春（9月）にかけて8頭のアザラシにCTDタグを取り付け、うち7頭から最長で約8か月間の十分な量のデータを得ることができました。アザラシは、昭和基地周辺の装着場所から最大633kmも東に離れた海域まで移動しており、秋期から冬期の南極沿岸の広い範囲の海洋環境を調べる上でこの手法が有効であることを確認できました。

このようにして得られた秋～冬の水温塩分データを分析したところ、従来の知見と同様に、低温低塩分の水（図2中の黒色の水塊）が観測期間中に観測海域全体で見られ、高温高塩分の水（図3中の赤色の水塊）が秋から冬にかけて、深い海底谷など限られた海域の深い深度で見られました。一方で、高温低塩分の水（図2中のオレンジ色の水塊）が秋に沿岸の多くの地点の浅い深度（100～150m）で見られ、時期が進むと共に最大400mまで沈み込んでいたことが、本研究で初めて明らかになりました。また、アザラシの潜水深度の記録から、どれくらい効率的に餌をとっていたかを示す指標（注1）を計算し、海水のタイプが餌とり行動にどう影響していたかを分析したところ、低温低塩分の水と比べて、高温低塩分の水や高温高塩分の水でアザラシはより効率的に餌をとっていたことが明らかとなりました。

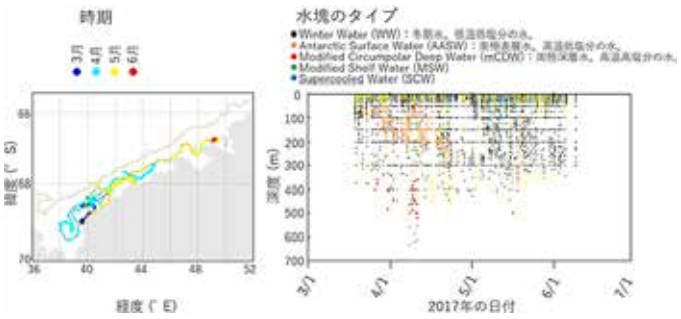


図2：アザラシの観測した南極沿岸の海洋環境の時系列パターン。1個体の例を示している。
（左）移動軌跡（★は昭和基地の位置）、（右）時系列に沿った各水塊の深度分布。

さらに、風向風力を使ったモデル計算によってこの高温低塩分の水の由来を詳しく調べると、秋に沿岸を西向きに吹く風が強まることで、外洋から沿岸に向けて表層を流れる流れが強まり、さらに一部の海水は下の方へ潜り込むような力が特に強まっていたことが示唆されました。南極沿岸を取り巻く外洋側の暖かい水には、ナンキョクオキアミなどの高次捕食動物にとって重要な餌生物が生息しています。このような餌生物が、秋に外洋側から風の力によって沿岸へ運ばれてきた結果、沿岸側に生息しているウェッデルアザラシがより効率よく餌をとっていたものと考えられました（図3）。

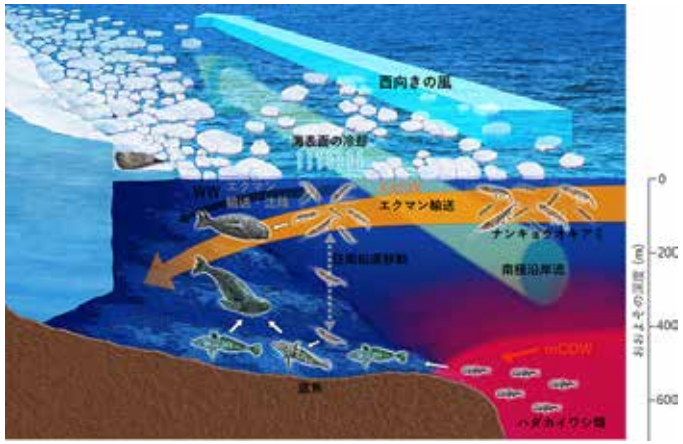


図3：本研究で明らかになった秋期～冬期の昭和基地近海の大陸棚上の海洋環境の模式図。色のついた矢印は海水の流れ、白抜きの矢印は想定される栄養の流れを示す。略語の意味は以下の通り。mCDW：Modified Circumpolar Deep Water（周極深層水）。高温高塩分の水。WW：Winter Water(冬期水)。低温低塩分の水。AASW：Antarctic Surface Water（南極表層水)。高温低塩分の水。（イラスト：木下真一郎）

本研究の意義

本研究は、南極沿岸域で秋に強まる風の力によって、外洋の表層から海水と餌生物がもたらされている可能性を初めて示しました。研究グループでは、今回の調査結果をモデル計算と組み合わせ、風の力によって大陸棚に運ばれる海水と餌生物の量の推定につなげたいと考えています。さらにこの結果を南極沿岸のいろいろな海域に応用することで、外洋から沿岸にどれくらいの海水が流れ込んできているのか、またそれによって沿岸の海洋生態系にどのような影響があるのか、より詳しい仕組みの解明が期待されます。

注

注1：どれくらい効率的に餌をとっていたかを示す指標
Residual diving bottom time （Rbt）と呼ばれる。プラスの値であれば餌とりに正の影響があったこと、マイナスの値であれば餌取りに負の影響があったと判断する。

発表論文

掲載誌： *Limnology and Oceanography*
タイトル： Shoreward intrusion of oceanic surface waters alters physical and biological ocean structures on the Antarctic continental shelf during winter: Observations from instrumented seals.

著者：
國分亙彦（国立極地研究所 生物圏研究グループ 助教）
田邊優貴子（研究当時：国立極地研究所 生物圏研究グループ 助教）
平野大輔（研究当時：北海道大学低温科学研究所・国立極地研究所 気水圏研究グループ 助教、現：国立極地研究所 南極観測センター助教）
Vigan Mensah（北海道大学低温科学研究所 特任助教）
田村岳史（国立極地研究所 気水圏研究グループ 准教授）
青木茂（北海道大学低温科学研究所 准教授）
高橋晃周（国立極地研究所 生物圏研究グループ 准教授）

URL： https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.11914
DOI： 10.1002/lno.11914

論文出版日： 2021年10月9日

研究サポート

本研究はJSPS科研費（JP16K16185、JP17K12811、JP20K12132）、南極地域観測事業（重点研究観測サブテーマ2「氷床・海氷縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」、一般:AP0922「一年を通した生態計測で探る高次捕食動物の環境応答」）の助成を受けて実施されました。

お問い合わせ先

（研究内容について）
国立極地研究所 生物圏研究グループ 助教 國分亙彦
北海道大学 低温科学研究所 准教授 青木茂

（報道について）
国立極地研究所 広報室
北海道大学 総務企画部広報課

【報道機関の方】取材・掲載申込フォーム
【一般の方】お問い合わせフォーム

2022年度
2021年度
2020年度
2019年度
2018年度
2017年度
2016年度
2015年度
2014年度
2013年度
2012年度以前

ページの先頭へ

いいね！ 125　ツイート

ページの先頭へ

お問い合わせ　サイトポリシー
情報・システム研究機構｜国立情報学研究所｜統計数理研究所｜国立遺伝学研究所｜データサイエンス共同利用基盤施設

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3（交通アクセス）

Copyright © National Institute of Polar Research All rights reserved.

文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：
全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

南極の海と氷床

News Letter vol.1

領域代表挨拶

国立極地研究所 川村賢二

私たちの暮らしの中で，あるいはグローバルな環境や気候の問題を考えるとき，南極を意識することは少ないのではないでしょうか．しかし最近の観測から，南極の氷や海が変化しつつあると言われています．南極の変化は本当に起こっているのでしょうか．もし変化しているなら何故？今後はどうなるのでしょうか．そして地球全体の環境とどう関係するのでしょうか．そういった問題を多くの研究分野が一致協力して解き明かそうというのが本領域です．

南極には，地球の氷の約 90%が存在します．淡水の量としても地球全体の約 70%，海面の高さに換算して約 60mにも相当することから，南極は淡水の巨大な貯蔵庫（リザーバ）と言えます．その量は一定でなく，例えば約 12 万年前の最終間氷期には，CO_2 濃度は現在よりだいぶ低い 280 ppm 程度でしたが，南極の気温は現在より 2℃程度高く，南極氷床は縮小して海面を 2 – 7 m 上昇させました．

南大洋は，南極大陸の周辺から南半球中緯度にかけて広がっています．南極大陸の縁では，海氷の生産にともなって南極底層水という重い水が作られます．これは大気から取り込んだ熱を深海に送り込み，その体積は全海水の 30–40%を占めます．また南大洋は炭素の深海への最大の出入口であり，氷期ー間氷期サイクルの CO_2 変動は南大洋が制御していたと考えられています．南大洋は熱と物質の巨大リザーバであると言えます．

このように，南極氷床と南大洋は熱・水・物質の巨大リザーバであるがゆえに，ひとたび変化すれば全球の気候や海面高度に大きな影響が及びます（図 1）．同時に，観測が極めて困難なため，現象の理解やモデル化が難しいことが特徴です．

南極氷床は比較的安定していると考えられてきましたが，最近，西南極氷床の縮小が報告されています．棚氷（大陸の氷が海に張り出したもの）の底面を暖水が融解し，その影響で氷床流出が加速するためだと考えられています．一方，温暖化には積雪増加により氷床を成長させる効果もあるため，氷床全体の質量変化の推定には，地域ごとの収支を正確に押さえる必要があります．南極の氷のほとんどが存在する東南極には，年降水量が 100 mm 以下の領域が広大にあり，そのわずかな変化を検出しなければなりません．氷床量の予測には，過去の変動を大規模な数値モデルで再現できることも重要です．

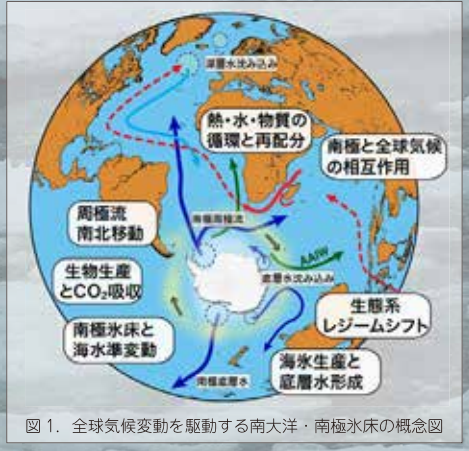


図 1．全球気候変動を駆動する南大洋・南極氷床の概念図

南極氷床の縮小による海への淡水供給は，海水の低塩・低密度化を通じて底層水生成を弱め，いずれ海洋大循環を変化させる可能性があります．海洋の成層構造が強化して亜表層の水温が上昇し，さらに氷床を縮小させるフィードバックも考えられます．また，CO_2 増加による海洋酸性化は極域で最大となるため，莫大な生産量を持つ南大洋生態系への影響を通じて，海洋による CO_2 吸収量を変化させる可能性もあります．

産業革命を機に始まった人為起源の CO_2 増加は，現在も加速し続けています．南極氷床や南大洋への影響が現れることは自明のように思われます．しかし，気温や海水温，温室効果などの変化に応答するには長い時間がかかるため，それらの変化傾向や速度を把握し予測することは簡単ではありません．西南極の大気や南大洋深層水が昇温している一方，表層水温や東南極の気温には有意な温暖化は検出されず，海氷は最近数十年で増加傾向にあるなど，理解されていないことが多くあります．南極氷床や底層水には，一度超えてしまうと容易に後戻りできない「ティッピング・ポイント（Tipping point）」が存在し，そこに近づいている可能性も指摘されていますが，実態は分かっていません．

日本はこれまで，底層水生成域の発見や，数十年にわたる海洋酸性化や氷床質量収支に関わる観測データの蓄積，数十万年にわたる海洋環境や大気環境・気候の復元，過去数百万年の氷床高度復元などの個別分野で成果を上げてきました．いま，南極環境を一つのシステムとして理解し予測するために，それらのグループが結集し，無人探査や統合的モデリングの分野とも手を組みました（図 2）．様々な時間・空間スケールにおける相互作用の理解と予測のため，種々の観測と分析，モデリングを統合的に進めます（図 3）．主に東南極で行う観測により現在起こっている現象を把握し，アイスコアや海底コアなどの分析から長期にわたる環境を復元します．地域スケールから南極全体，全球までを対象としたモデル研究とデータを融合し，気候や氷床，底層水，周極流，生態系，固体地球などの実態と変動にかかる素過程，およびそれらの相互作用を理解し，長い時間スケールの変動メカニズムも明らかにしていきます．

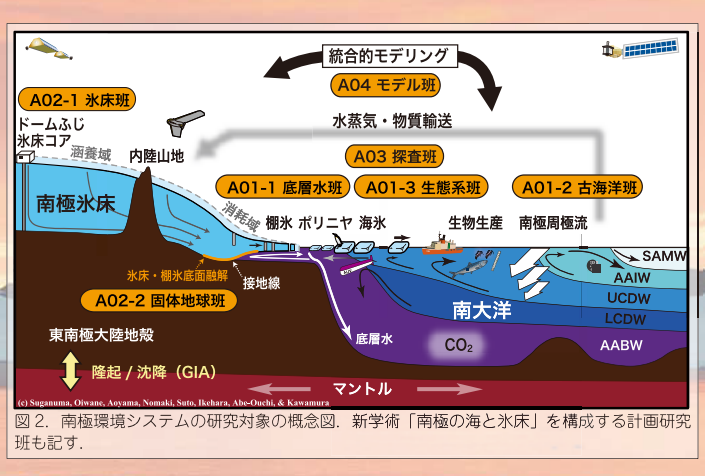


図 2．南極環境システムの研究対象の概念図．新学術「南極の海と氷床」を構成する計画研究班も記す．

まだ助走期間ですが，キックオフミーティングを機に各分野の知識やノウハウを共有し，初年度の様々な観測に活かしました．私自身も南極ドームふじ基地とその周辺地域に赴き，本領域で研究するための試料の採取や輸送，雪氷観測などを行い，現在は次の内陸観測の準備に励んでいます．

本ニュースレターで紹介する様々な研究を通じて，南極環境システムの理解と予測を大きく進めたいと考えています．

2018 年 2 月　南極の海と氷床を目の前に，昭和基地にて

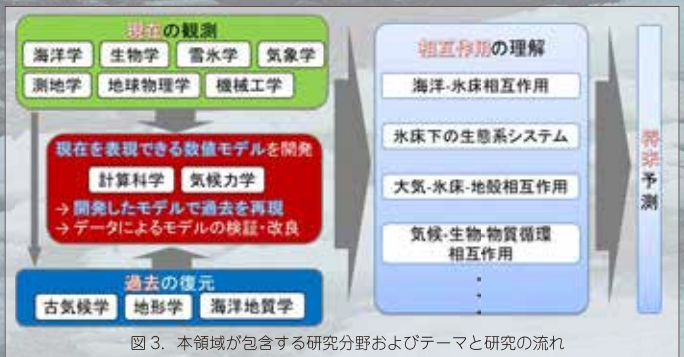


図 3．本領域が包含する研究分野およびテーマと研究の流れ

南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス（底層水班）

北海道大学 低温科学研究所 大島 慶一郎

1. 学術的背景

地球の全海水の 30−40%を占める南極底層水は，巨大な負の熱と CO_2 等の物質のリザーバであり，全球の気候システムや長期の気候変動の鍵を握っています．IPCC の第 5 次評価報告書では，南極底層水の生成が顕著に減少していることが示唆され，これは全球規模の熱塩循環をも変化させる可能性を意味します．この底層水の変化の主要因は，西南極での氷床融解の加速による淡水フラックスの増加にある可能性が指摘されています．一方，南極底層水は地球の気候システムの重要因子であるにも関わらず，観測の困難さにより，その実態がよくわかっておらず，例えば，最近までその生成域ですら明確ではありませんでした．底層水の起源は，沿岸ポリニヤと呼ばれる海氷生産が非常に盛んな海域における，海氷生成の際にはき出される低温高塩の高密度水です．初めて示された南大洋の海氷生産量マッピング (Tamura et al. 2008) から，昭和基地東方約 1200 km にあるケープダンレーポリニヤが南極第 2 の海氷生産海域であることが明らかになりました（図 1）．さらに，日本の国際極年集中観測から，ここが未知（第 4）の底層水生成域であることも突き止められました (Ohshima et al. 2013).

この発見を契機に，いくつかある東南極の高海氷生産ポリニヤにおいて底層水形成の可能性を探る研究が行われつつあります．海鷹丸による観測からは，海氷生産量 6 位のビンセネス湾ポリニヤ（図 1 参照）でも少量ながら底層水が生成されていることが示されました（Kitade et al. 2014）．一方，ケープダンレーの東にあるアメリー棚氷域は，ケープダンレーに匹敵する海氷生産がありますが，ケープダンレー程の底層水は生成されません．これは棚氷の融解水による低塩化によって底層水生成が抑制されるためと考えられます．このように，底層水生成は，ポリニヤでの海氷生産という正の効果と棚氷の融解という負の効果の兼ね合いで決まることが示唆されますが，東南極に関しては未だ底層水の定量化は緒についたばかりと言えます．

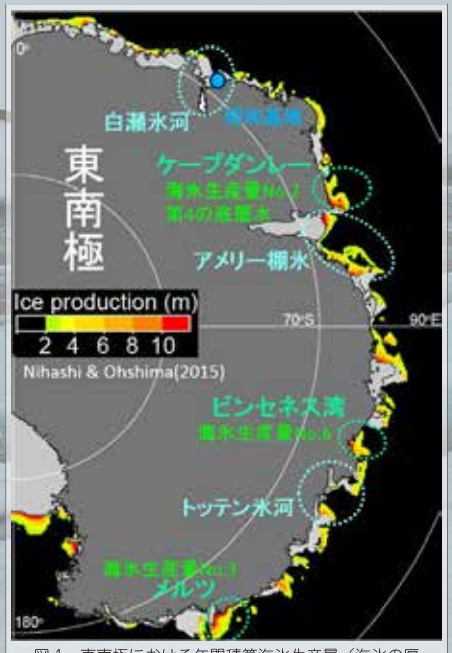


図 1．東南極における年間積算海氷生産量（海水の厚さ（m）に換算）のマッピングと観測ターゲット海域

南大洋は物質の巨大リザーバでもあり，特に南大洋での CO_2・炭素収支が全球の CO_2 の収支に大きく関わっている可能性があり，過去の氷期・間氷期変動は南大洋での CO_2 の貯蓄量の変化が決めているという説が有力です．それを明らかにする目的で，Southern Ocean Carbon & Climate Observations & Modeling (SOCCOM) という大プロジェクトが米国主導で行われ，約 200 個の生物地球化学フロートによる観測が行われつつあります．ただし，このプロジェクトでは外洋域のデータしか得ることができず，海水が底層に潜り込む南極沿岸域は，CO_2 収支にとって重要であるにも関わらず，観測は手付かずのままなのです．

2. 明らかにする点

まず，東南極において，断片的にしかわかっていない底層水の形成域・生成量・拡がりを定量化することをめざします．特に，東南極最大の底層水生成域であるケープダンレー沖をターゲット海域として集中的な観測を行います．また，ビンセネス湾や（東南極で海洋による融解が最も進むと予測される）トッテン氷河（図 1）の沖など，東南極の鍵となる海域において，底層水の形成と拡がりを，ポリニヤでの海氷生産と氷床融解の兼ね合いという観点を中心に，明らかにしたいと考えます．その理解の上で，近年の氷床融解加速が底層水形成へ与えるインパクトを評価し，さらに氷床融解が進んだ場合の熱塩循環の応答の予測に資することを目指します．また，ケープダンレーポリニヤをテストサイトに，底層水形成を介して行われる CO_2・炭素交換過程を直接観測から明確にし，底層水を起点とする CO_2，栄養塩等の物質循環の理解を深め，底層水による人為起源 CO_2 の取り込み速度を評価することも重要な目的です．

3. 観測計画

東南極においては研究期間中，毎年の海鷹丸・しらせに加え，平成 30 年度は白鳳丸，開洋丸が，平成 31 年度は白鳳丸，みらい，の航海観測が計画されており（図 2），この 2 年間は連続して 4 隻の船が東南極域に結集することになります．過去にはない絶好の機会を活かし以下の観測を行います．

図 2．2017-2021 年における、南極航海観測の予定

①底層水の通り道において，係留系アレイ観測等を行い（図 3），自動採水装置や独自開発の pH センサー等も設置して，高密度水及び熱・塩・物質の表層から底層へのフラックスを見積もります．②化学トレーサ（フロン，SF_6，$\delta^{18}O$）の観測を行い，底層水・氷床融解水の拡がり・混合過程・滞留時間などを定量化します．③過去 10−30 年間にフロン，$\delta^{18}O$ データがある点を再観測し，東南極での底層水形成量の変動を推定し，近年の氷河融解加速による影響を評価します．④海水中の人為起源 CO_2 量を，全炭酸・アルカリ度とフロン・SF_6 から見積もり，底層水による人為起源 CO_2 の取り込み速度を再評価します．また，人為起源 CO_2の取り込みによる酸性化への影響を定量的に評価します．⑤探査班が導入・運用する無人水中探査機等も利用して，白瀬氷河やトッテン氷河の周辺海域において，氷床の海洋による融解量や融解過程を推定します（氷床班と連携）．⑥底層水の変遷史を明らかにするため，底層水流路付近にて海底コア採取を行い，係留系にセジメントトラップも取り付ける（古海洋班との連携）．

図 3．ケープダンレー沖の底層水形成域に設置する係留系の概要

南大洋の古海洋変動ダイナミクス（古海洋班）

高知大学 海洋コア総合研究センター 池原 実

1. 学術的背景と目的

南大洋は南極大陸の周りをとり囲む海であるとともに，負の熱と CO_2 をはじめとする物質の巨大リザーバであり，全球気候変動の鍵を握ります．南大洋を特徴付ける南極周極流（Antarctic Circumpolar Current：ACC）（図１）は世界最大級の表層循環流であり，ドレーク海峡での流量は黒潮流量の４倍以上の最大 135 Sv（10^6 m^3/s）に達します．ACC や海氷分布（図２），表層水温，塩分などの変動は，南大洋の海洋循環とそれに伴う深層から大気への CO_2 放出の強さ，南極氷床に作用し，炭素循環や海水準変動を介して全球気候変動を駆動していると考えられています．

私たちは，これまで南大洋インド洋区のコンラッドライズ，デルカノライズ（図３の CR，DCR の海域）を対象とした調査を行い，最終氷期から現在にかけての ACC や極前線，海氷分布などの変動を復元してきました．その結果，次の３点が明らかとなってきています．

(1) 冬季海氷分布が氷期ー間氷期変動に同調して大きく変動し，最終氷期には冬季海氷分布が 10 度以上北上していた上に，千年スケールで拡大縮小を繰り返していた．

(2) 現在ウェッデルジャイヤ北東部にある氷融解ホットスポットが，氷期にはデルカノライズ付近に東進（拡大）していた可能性が高い．

(3) コンラッドライズにおいて新発見したセジメントウェーブ（巨大砂丘様海底地形）の時空間分布から，現在型の気候モードが確立した前期更新世（約 150-200 万年前頃）に ACC が大きく北上した可能性が高い．

これらの成果は，氷期ー間氷期サイクルの気候変動や長期の気候進化に対して，南大洋が重要な役割を果たした可能性を示唆するとともに，二つの仮説（氷期ウェッデルジャイヤ東進仮説，前期更新世 ACC 北上仮説）を提起することになりました．しかしながら，南大洋での基礎データ不足により古環境指標（プロキシ）の検証と精密化が不十分であるのに加えて，時空間的な古海洋情報が圧倒的に不足しているため，様々な時間スケールの気候変動における冬季海氷縁や前線帯（STF，SAF，PF；図１参照）などの南北シフトの全体像は未解明のまま残されています．そのため，全球気候変動の駆動力としての ACC や南大洋の役割が明確にされていません．そこで，次の**A**～**C**を目的とする学際的研究を立案し，現場観測や他班との連携を強化しながら国際共同研究を推進する計画です．

A) 南大洋における古環境指標（プロキシ）を高精度化する．様々なプロキシ（微化石群集，化学組成，同位体比など）の緯度分布と季節変動を明らかにし，現在の南大洋における表層水温，塩分，海氷分布などとの対応関係を調べることによって，プロキシの開発と検証を行う．

B) 氷期ウェッデルジャイア東進仮説を検証する．近未来の温暖化地球のアナロジーとなるスーパー温暖期（12.7 万年前，41 万年前他）を含めた第四紀の氷期ー間氷期サイクルにおける南大洋の古海洋変動を復元し，ACC，ウェッデルジャイア，極前線，冬季海氷分布と海洋成層化の南北・東西シフトの実態を把握し，氷期ー間氷期変動に対する南大洋の役割を解明する．

図２．南大洋の海氷

C) 前期更新世 ACC 北上仮説を検証する．約 300 万年前（鮮新世後期）から第四紀後期にいたる長期スケールでの ACC，ウェッデルジャイア，海氷移流のダイナミクスを復元し，長期の気候進化に対する南大洋の役割と相互作用のメカニズムを解明する．

２．調査航海と研究の計画

学術研究船白鳳丸を利用した調査航海（2010 年度，2016 年度）において，南大洋インド洋区のコンラッドライズおよびデルカノライズなどから海底コア試料，表層海水とプランクトン試料を確保しており，現在それらの分析を進めています．また，2018 年度にはコンラッドライズおよびデルカノライズから新たな海底コアの採取とセジメントトラップの回収が行われます（図３）．さらに，2019 年度にはウェッデル海およびスコシア海における調査航海が計画されており，現場観測データや海底コア試料を補強しながら本プロジェクトを展開していきます．

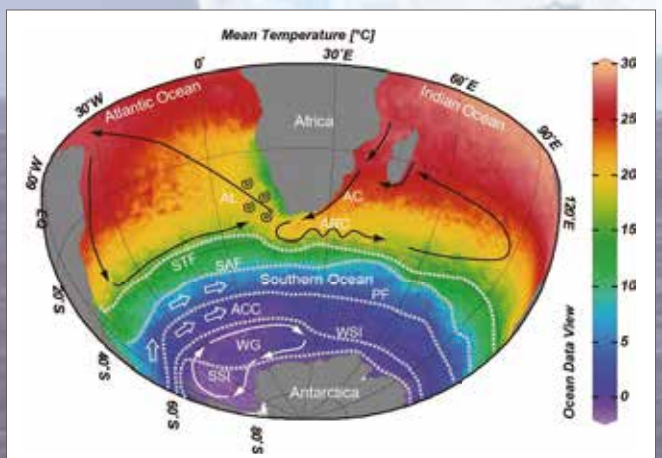
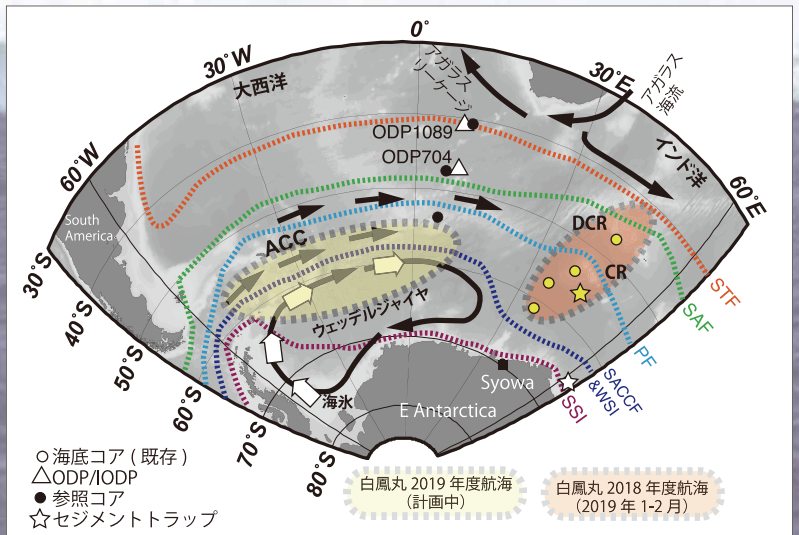


図 1．南半球における海洋循環とアガラスシステムの概念図．背景のカラーは海洋表層における年平均水温の分布を示す．矢印（黒と白）は主要な表層循環パターンを示す．南大洋は風成循環である南極周極流によって複数のゾーンに分けられ，各ゾーンは異なる水温と塩分で特徴づけられる．図中の略号は次の通り．アガラス海流（AC），アガラスリーケージ（AL；渦で示されている），アガラスリターン海流（ARC），亜熱帯前線（STF），亜南極前線（SAF），極前線（PF），南極周極流（ACC），冬季海氷縁（WSI），夏季海氷縁（SSI），ウェッデルジャイヤ（WG）．



DCR: デルカノライズ, **CR**: コンラッドライズ, **ACC**: 南極周極流, **STF**: 亜熱帯前線, **SAF**: 亜南極前線, **PF**: 極前線, **SACCF**: 南極周極流南方前線, **WSI**: 冬季海氷縁, **SSI**: 夏季海氷縁.

図 3．本研究のターゲット海域の海底地形と表層循環，前線，海氷分布の概要

海氷下の生態系と物質循環の相互作用（生態系班）

東京海洋大学 学術研究院 海洋環境科学部門 茂木 正人

1. 海氷と生態系

南極海の生態系を理解するうえで最も重要なのは海氷の役割を知ることです．海氷は冬季に，南極大陸よりも広い 2000 万 m^2 の面積の海を覆いつくします．この面積は世界の海洋の 10 % に及びます．しかし一方で，夏季にはこの面積の 80 % 以上が融解し海面が現れます．この毎年繰り返される季節変化は南極海の生物の生活にとってきわめて重要なイベントです．発生の仕組みは完全に理解されているわけではありませんが，海氷の融解期に見られる氷縁域でのブルーム（植物プランクトンの爆発的な増殖）に，海氷の融解プロセスが関わっていることは間違いありません．このブルームが起点となって食物連鎖がつながり，種によっては生活史をブルームのタイミングに合わせるように進化してきました．

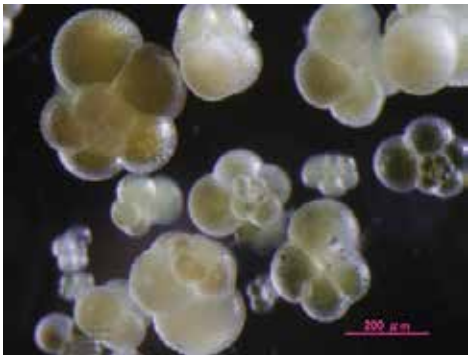


図１．海氷中に見出された有孔虫．高密度で出現するがその生活史についてはよくわかっていない．（撮影：小島本葉）

海氷には，海洋生態系にとってもうひとつの役割があります．海氷は氷といってもその内部には間隙をもち，そこにはアイスアルジー（微細藻類）が繁茂します．珪藻類を主体とするアイスアルジーは，沿岸ポリニヤと呼ばれる大陸近くの特定の海域で，海氷生成プロセスにおいて海水中から取り込まれ，海氷とともに風や海流によって北の方に運ばれていきます．運ばれていった先の氷縁付近（海氷域の北縁）では水温・気温がある程度高いので，海氷は融けてアイスアルジーは海水中に放出されていきます．海氷は，秋から冬にかけて次々に沿岸ポリニヤで生成されるので，氷縁域では次々にアイスアルジーが供給されていると考えられます．氷に閉じ込められたアイスアルジーが輸送過程でどうなっているのかはよく分かっていませんが，少なくとも一部の種は海氷の中で生き延びていることが分かっており，増殖している可能性もあります．氷のなかという一見過酷な環境ですが，常に光エネルギーの豊富な表層に滞留できることは光合成の面では大きなメリットとなるかもしれません．海氷は春から秋にかけて北側から融けはじめ氷縁は南に下がっていきます．この間にもアイスアルジーが放出されていくわけです．この放出は先ほど述べたブルームとは異なる経路の一次生産として海洋中にもたらされます．実は海氷中には微細藻類のほかに原生動物やカイアシ類などの動物相も含まれていることが知られ，藻類と動物を含めた総称として Sea Ice Biota（SIB，海氷生物相）と呼ばれます．SIB は放出後どのような運命をたどるのか，つまり海洋生態系にどのようにインプットされるのか，それともただ沈んでいくだけなのか，そもそもどのくらいの量が放出されるのかなど，ほとんど分かっていません．

図２．ハダカイワシ科魚類 *Electrona antarctica*．南極海のなかでも高緯度域で優占する．大きな生物量をもち，餌としてのエネルギー量も大きく，様々な大型動物の餌となる．成魚はナンキョクオキアミを食べる．

2．ナンキョクオキアミとハダカイワシ

南極海の食物連鎖・食物網について描かれた図では，たいてい中心付近にナンキョクオキアミ（Krill）が登場します．Krill は 4 億トンの生物量を誇るとされる生物で，海鳥類（ペンギンを含む），アザラシ・オットセイ，鯨類など大型捕食者の餌として最も重要です．したがって，この生物を知ることは南極海の生態系を理解することに最短距離でつながっているといえます．そのため Krill の研究には非常に大きなエネルギーが研究に割かれており，この生物についてのモニタリングは重要な課題となっています．しかし一方で，情報が蓄積してくると Krill があまり多く分布していない海域もあることが分かってきました．我々のプロジェクトが研究対象としている東南極海域（インド洋セクター，オーストラリア南側海域）もそんな海域のひとつです．このような海域ではハダカイワシ科魚類が，低次生産を高次捕食者へエネルギー転送する重要な役割を担っています．南極海においては近年盛んにハダカイワシ類の研究が行われるようになって来ましたが，Krill にくらべると情報量は乏しいのが現状です．南極海で最も生産性が高い海域は南極半島西側海域やスコシア海などで，Krill の生物量はこれらの海域に集中しています．研究はどうしても生産性の高い海域に集中するので，「南極海の生態系＝Krill を中心とした生態系」，という構図のインパクトが大きく，その他の生物に対して研究資源が十分に割かれていないように感じられます．

3．なぜ南極海の生態系を研究するのか

大気中の CO_2 は表層で海中に溶け込み，光合成によって植物プランクトンの体として有機物に変換されます．植物プランクトンは，植物食性の動物プランクトンから動物食性プランクトン・魚類などに食べられていく過程で体サイズは大きくなり，彼らの糞粒も大きくなっていきます．海中では大きな粒子ほど早く沈むので，栄養段階が進む（順に食べられる）過程は炭素（有機物）を深海に閉じ込める効果を加速します．この機能は生物ポンプと呼ばれ，大気中の CO_2 濃度を安定させる重要なプロセスとなっています．生物ポンプは生物過程に依存したプロセスなので，その機能は生態系変動にダイレクトに影響を受けることになります．

我々は，海氷を起点とする SIB を経た低次生産過程やハダカイワシ類を中心とした食物網構造について，明らかにしていきます．このことは，海氷量・面積の変動に伴う生態系変動の予測に寄与するものです．CO_2 が溶け込みやすい寒冷な環境，広大な季節海氷域をもつ南極海における生物ポンプ機能の理解は，地球環境変動予測の高精度化のために必須といえます．

図３．近年分布域を南に拡大しているザトウクジラ．彼らが何を食べているのか，分布域の拡大が何を意味するのかは分かっていない．

南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）

国立極地研究所 川村 賢二

研究の背景

南極氷床は最大の淡水リザーバであり，その気候変化に対する応答の量と速度は，科学的・社会的に重大な関心事となっています．南極氷床の末端は大部分が海と接しているため，氷河末端の崩落や，氷床から海に張り出した氷（棚氷）の底面融解などが質量損失の引き金となります．したがって，棚氷底面融解の定量化や暖水貫入といった種々のプロセスを解明する必要がありますが，氷河末端や棚氷，海氷下の海などの総合的な観測は難しく，研究が進んでいません．また，温暖化は降雪を増加させるため，東南極の一部では氷床質量が増加していますが，広大な東南極における表面質量収支の推定誤差は大きく，そのことが南極氷床全体としての質量収支の評価にも大きく影響します．温暖化による氷床変動のタイミングと速度を予測する上で，質量収支の変動とメカニズムの理解が不可欠です．

巨大な氷床全体の変動を理解するためには，長期にわたる過去を見る必要があります．高解像度の気候モデルで 1 万年以上の計算が可能になってきたことから，その入力や，計算結果との比較のため，質の良い古環境データが必要です．南極ドームふじ氷床コアからは，氷期ー間氷期サイクルにおける気温や大気組成などの環境変動が得られますが（図 1），これをさらに正確かつ高分解能にし，より古い時代にさかのぼる必要があります．また，この図から，大気中 CO_2 濃度と南極の気温，海水準が同期して変動したことが分かりますが，それらの因果関係はよく分かっておらず，重要問題として残されています．また最近，氷床コア中のエアロゾルの分析技術が向上し，過去の大気化学環境や海氷変動が復元できる可能性も出てきました．

何をどこまで明らかにするか

下記の点に的を絞り，南極氷床と気候の変動及び相互作用に関して研究を進めます（図 2）．

（1）長期気候と氷床の相互作用.

最終間氷期から現在までの期間や，約 40 万年前の「スーパー間氷期」に着目し，第 2 期ドームふじ氷床コアの分析から大気組成と気候変動を復元します．これらを地球システムモデルの入力・検証データとし，気候と氷床の変動と相互作用を解明していきます．ドームふじコアの年代決定精度を活かして世界標準となる年代データを確立し，世界の古気候・古海洋データを同一年代において議論します．また，沿岸及び内陸の氷床コアの分析から，過去千年以上の気温や涵養量，大気組成，海氷に係るデータを取得し，温室効果ガスや火山噴火，太陽活動，南極環状モードなどとの関連を調べます．

（2）氷床と海洋の相互作用・広域質量収支.

氷床の縁辺部から内陸にかけての雪氷観測と衛星データの解析により，氷床表面の質量収支と流動をおさえます．また，棚氷の掘削（図 3）や水中探査機により，氷下の海を観測します．棚氷の底面融解が氷床変動に与える寄与の定量化や，海水の物理化学特性や海洋循環などの把握を通じて，氷床・海洋相互作用の理解を進めます．

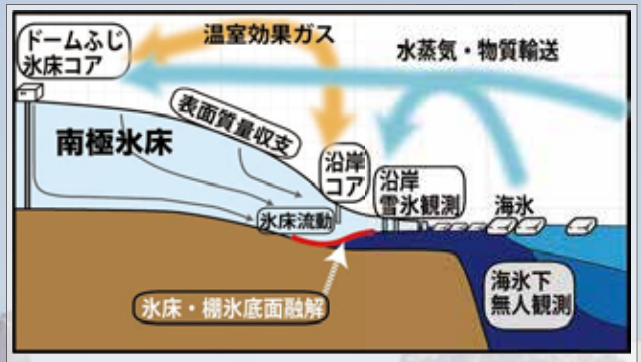


図 2．本研究の対象領域と主な環境要素．枠内に主な観測・実施項目を示す．

研究手法

まず分析手法の開発と改良を行います．沿岸の氷床コアと掘削孔空気，積雪の解析を開始し，気候シグナルや気体の氷床への記録過程の理解を進め，ドームふじコアの気体解析と海底コアデータの調査を開始します．また，ラングホブデ氷河と棚氷の観測を実施します．

その後，沿岸氷床コアと掘削孔空気の解析から，過去千年以上の気温や大気環境，海氷に係るデータを取得し，それらと温室効果ガスや火山噴火などとの関連を調べます．また，第 2 期ドームふじ氷床コアを分析し，過去の南極や全球規模の環境変動を復元します．モデル班が実施する過去 100 万年間におよぶ気候･氷床・海洋のシミュレーションに入力データや検証データを提供するとともに，古海洋班との連携により世界各地の古環境データをドームふじコアの年代に統合し，シミュレーションの結果とデータを比較することで，気候と氷床の変動と相互作用の理解やモデル検証を推進します．

また，探査班や底層水班と連携し，熱水掘削や無人機を駆使した氷床沿岸部と海洋の総合観測により，表面質量収支や氷床流動，棚氷の底面融解プロセス，海水の物理化学特性，海洋循環，海底の生物・地質などを把握します．観測機器を長期稼働して，氷床表面と棚氷下環境の季節変化や年々変動も把握します．さらに，衛星データと過去の現地データを整備し，広域の表面質量収支や氷河流動速度，棚氷末端位置，海氷密接度などを過去数十年にわたって明らかにします．モデル班との連携で，氷床ー海洋結合モデルや気候モデルへの境界条件の提供や，シミュレーション結果と観測データとの比較などを通じて，氷床ー海洋相互作用や表面質量収支変動の理解を進めます．固体地球班との連携では，当班が得る氷床末端のデータを GIA モデルの境界条件として使用することで，氷床質量収支の推定を向上させます．

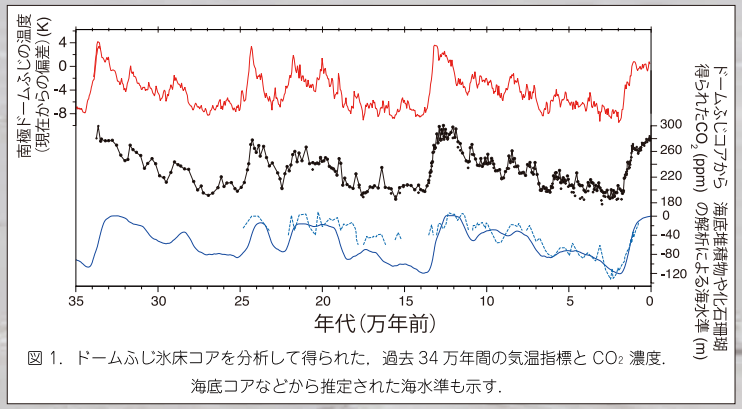


図 1．ドームふじ氷床コアを分析して得られた，過去 34 万年間の気温指標と CO_2 濃度．海底コアなどから推定された海水準も示す．

図 3．熱水掘削システムを用いた氷河末端の観測風景

固体地球と氷床の相互作用（固体地球班）

京都大学大学院 理学研究科 福田 洋一

南極氷床は，海水準上昇や海洋循環を通して全球的な環境変動と密接に関係しており，その変動を把握することは将来の環境予測にとっても不可欠なことです．東南極の氷床は，これまではその基盤岩の大部分が海面上にあると考えられており，海洋の影響を直接受けにくく，また，ほぼ全域が通年氷点下であるので，100 年程度の時間スケールでは地球が温暖化しても影響は少ないと思われていました．しかし，近年，航空機レーダーや周辺海底の地質掘削調査が進むと，東南極の太平洋区側の基盤岩がほぼ海面下にあることや，大気中の CO_2 濃度が現在と同じ 400 ppm 程度であったと考えられる約 500〜250 万年前（鮮新世）にも，東南極氷床が大規模に融解して海水準を上昇させていたらしいことが判明し，現在の CO_2 濃度でも東南極氷床が大規模に融解し縮小する可能性が懸念されるようになっています．特に，東南極の氷床は，南極氷床の 9 割以上を占めており，もしその融解が加速するとなると重大な問題です．

一方，最近の気候モデルや，衛星重力・高度計データなどによると，現在，西南極の氷床の融解は進んでいるものの，東南極の一部では，降雪増加の影響で氷床が増える傾向にあることも指摘されています（図 1）．このため，今後，温暖化により東南極の氷床融解が進むのか，あるいは進むとしてもその時期やメカニズム，また規模や速度は今のところ全く判らず，これは科学的に重要な課題であると同時に，社会的にも大きな関心事となっています．

今後の氷床変動を予測する上で，現在の氷床質量収支を精密に観測し監視することが重要なことは明らかですが，その際の大きな障壁の一つが GIA（Glacial Isostatic Adjustment）の不確かさです．GIA とは，氷床荷重の変化に対して固体地球が粘弾性的に応答し，重力と浮力が釣り合う，アイソスタシーが成立した状態に向かおうとすることですが，重力と浮力の釣り合いは静的なものであるにも関わらず，固体地球の粘弾性的な性質のために，釣り合いが達成するまでに時間遅れが生じることから，GIA の正確なモデリングのためには地球全体の粘弾性的構造とともに，過去から現在に至る氷床荷重変動すなわち，氷床融解の履歴，氷床融解史に関する情報が必要です．しかし GIA モデルを拘束するこれらの地上データの乏しい南極では，GIA モデルそのものの不確かさが特に顕著で，現在の氷床変動の見積もりに欠かせない衛星重力観測でも GIA モデルの不確かさが最大の誤差要因となっています．また，氷床変動による GIA の影響は，例えば 3000 m の氷床が融解すると 1000 m の標高変動が生じるというように，アイソスタシーが成り立った状態では，氷床と固体地球の密度比に相当する大きな変動を固体地球にもたらすため，過去の海水準変動や氷床量変動の定量的な復元や高精度化には，GIA による標高変動や海底地形変化などの影響も考慮する必要があり，GIA モデルそのものの精度向上が重要になってきます．

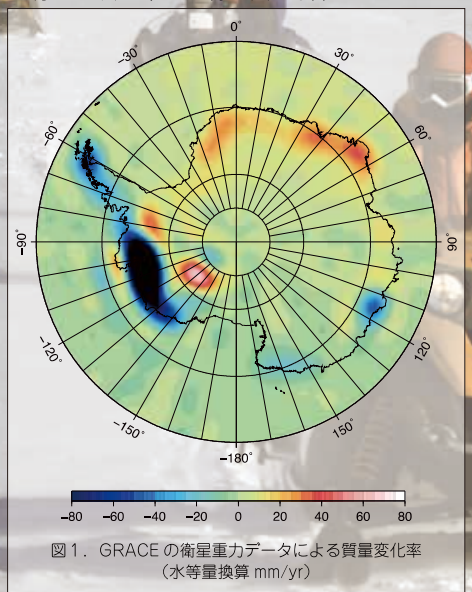


図 1．GRACE の衛星重力データによる質量変化率（水等量換算 mm/yr）

そこで固体班では，GIA をキーワードとして固体地球と氷床の相互作用の研究を進めることで，南極氷床変動や地球環境変動予測といった我々が直面している問題解決に加え，GIA から地球深部の粘弾性構造を探究するといった純学問的にも重要なテーマも視野に入れ研究に取り組むことにしました．

具体的には，まず第一に，圧倒的に不足している南極での現場観測データの取得のために，**(1)** 東南極の各国基地，沿岸・内陸山地での絶対重力測定ならびに GNSS 地殻変動観測，**(2)** GNSS ブイ，衛星データによる氷床・海水準変動などの現場観測，**(3)** 無人探査機などによる東南極内陸山地の氷河地形・堆積物分布マッピングと現場試料を用いた表面露出年代測定などを実施する予定です．

図 2．南極野外での絶対重力測定の様子（ボツヌーテン）（撮影：池田博氏）

これらの観測の手始めとして，2017 年度には，昭和基地周辺およびリュツォ・ホルム湾の複数の露岩地域での絶対重力測定（図 2）や GNSS 観測，地形調査や表面露出年代測定用試料の採取（図 3）などを実施しています．南極での絶対重力測定，特に野外での測定は，これまで実施された例はごくわずかしかなく，今回はその観測点数を一気に増やすことができました．今後，東南極の外国基地やその周辺でも同様の観測を実施する予定です．

これらの測地学的観測による地殻変動，重力変化，氷床流動，海水準変動データや，地形学的調査による海岸線隆起や氷床変動復元，さらには，公募研究も含めたさまざまな衛星観測データも利用しながら，東南極での現場観測データに最も適合する GIA モデルの構築を進めることが，固体班の重要な目標です．さらに氷床・気候モデルなど他の計画研究とも連携をすすめながら，過去数百万年から現在に至る氷床変動過程を精密に復元し，全球気候変動に対する東南極氷床の応答メカニズム解明を目指します．

図 3．東南極リュツォ・ホルム湾における表面露出年代測定用試料の採取の様子

未探査領域への挑戦（探査班）

国立極地研究所 野木 義史

南極の大気ー氷床ー海氷ー海洋からなる南極環境システムは，海水準や海洋深層循環，大気中 CO_2 などの変化を通じて地球規模の気候形成に重要な役割を果たしています．そのため，将来予測には南極環境システムの挙動の把握が必要となります．このうち南極氷床と南大洋は，互いに影響しあいつつ急速に変化し始めた可能性が指摘されていますが，その兆候は氷河流動の加速や棚氷の崩壊，底層水生成量の変化等として，南大洋沿岸域と氷床周縁部に顕れるため，これらの地域での観測が求められています．しかし，南大洋沿岸域の海氷・棚氷下の海底地形や水温・塩分などの海洋構造とその時間変化，沿岸域の表面・基盤地形はほとんど分かっておらず，南極氷床と南大洋の変動を理解する上での大きな障害となっています．具体例として，棚氷の底面融解や底層水の形成の定量的理解に不可欠な海底地形や南極氷床下地形については，国際的なプロジェクトである南極基盤地形データベース（BEDMAP2）において，航空機や船舶による各国で取得された物理探査結果がとりまとめられ，一定の進捗が見られましたが，未だ詳細な海氷下や沿岸域のデータは得られていません．また，水温・塩分等の海洋構造には長期的変動がこれまでに検出されていますが，その動態の把握に不可欠な連続観測も，氷に覆われる南大洋沿岸域では難しい状況です．さらに，氷河末端の標高変化観測により夏期の海洋による氷床底面融解の加速も示唆されていますが，底面融解量の定量化のためには広範囲での氷厚と表面地形の観測が必要です．いずれも，厚い海氷に閉ざされた海氷・棚氷域や沿岸部クレバス帯へのアクセスが大きな障壁となっている現状があり，新たな現場観測手法の導入による海氷域および沿岸域での機動的な観測が国内外で強く求められています．

近年，海洋観測においては，自律型海中無人探査機（Autonomous Underwater Vehicle：AUV）や有索型無人探査機（Remotely Operated Vehicle：ROV）といった水中ロボット技術の発展により，広範囲に渡る海中観測の実用化が進んでいます．そこで我々は，南極氷床と南大洋の変動を理解する上で必須である，南大洋沿岸域と氷床周縁部において，新たに AUV などの無人観測技術を導入した海氷・棚氷下での未探査領域への観測の展開を考えました．しかしながら，氷に覆われている海域である事から，AUV 等の水中ロボットによる調査が未だ難しい場所ですので，運用方法の確立が不可欠です．こうした観測手法が確立されれば，南極沿岸の海氷域を基点とする気候変動や生態系変動のダイナミクス解明等，多分野での現場観測による実態把握の大きな進展が期待されます．また，無数のクレバスが存在する沿岸部での観測についても，近年急速に発達した各種の無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle; UAV）を導入することによって，広範囲かつ高精度での表面形状データの取得が可能となります．以上の事から，無人観測手法の確立と未探査領域でのデータ取得により，多分野にまたがる研究のブレークスルーをもたらす本課題を計画しました．

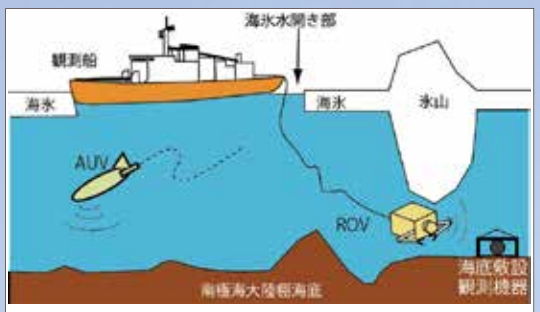


図 1．無人探査機による海氷下調査イメージ

本課題では，未探査領域である海氷域での海洋観測や南極沿岸氷床・露岩域での雪氷・地形観測の時空間的な地平を拡げるため，広域にわたる無人探査技術や衛星通信によるデータ伝送技術の導入を計画しました．海氷下で AUV などを活用した海中無人探査手法や東南極の沿岸域での UAV による観測手法（表面地形測量など）を実用化し，南極底層水の形成域における動態，東南極の氷床融解に果たす海洋の役割や，過去の氷床範囲の証拠が残る海底や陸上の地形，生物生態の解明に向け，観測研究の基盤的インフラを構築します．また，海氷域において浮沈式水温塩分計などによる定点無人連続観測システムを展開し，その観測データを衛星回線で自動伝送することで，海洋構造等の時間変動を準リアルタイムでの把握も目指します．

図 2．東京大学生産研究所の小型軽量のクルーズ型 AUV，HATTORI(Highly Agile Terrain Tracker for Ocean Research and Investigation)．これをベースにした海氷下観測用 AUV を現在設計中．

このような観測基盤の構築により，南極沿岸域と沿岸海氷域における面的な現場観測が可能となり，これまでほとんど未踏であった領域への観測網の展開が可能となります．さらに，未探査領域で得る観測データは，本領域内の各計画研究を大きく発展させるとともに，新たに分野を横断する研究を創出し，領域内の有機的結合をより強め，領域全体のサイエンスにブレークスルーをもたらす事が期待されます．

南極沿岸の海氷域における海底定点無人連続観測システムの設置と通年観測，海氷域の広範囲にわたる三次元観測を目指した AUV の設計・導入，UAV を活用した極域での表面地形三次元測量の実現を本課題の目的としています．本課題で構築する無人探査技術や定点無人連続観測システムは，南極域での導入に先立って，まず北海道やオホーツク海などの国内寒冷海域での試験を行い，南極の海氷域から沿岸域への導入は，本領域内の観測研究や，他の国内外の南極観測プログラムと連携しながら実施します．また，複数の無人探査機の運用と，それらに搭載する様々な観測センサーの導入を図り，海洋構造，生態系観測，採水観測，海底面・海底地形観察等の実用的な観測手法の確立を目指します．

機種	概要	特徴・調査地域	観測項目	導入時期
AUV Autonomous Underwater Vehicle		海中 海氷縁・海氷下 完全自動航行	海氷下地形探査 水温・塩分 ビデオ撮影	平成 30 年度 （2 年目）
UAV 回転翼 Unmanned Aerial Vehicle		空中 半自動航行・搭載能力大 露岩・氷河・氷床	地形・雪氷 レーザー測量	平成 29 年度 （導入済）
UAV 固定翼 Unmanned Aerial Vehicle		空中 広範囲・完全自動航行 露岩・氷河・氷床	地形・雪氷 空撮測量	平成 29 年度 （導入済）

表 1．本課題で導入を予定している無人探査機

南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（モデル班）

東京大学 大気海洋研究所 阿部 彩子

地球温暖化により，氷床変動とその海洋循環や海水準などへの影響が懸念されています．南極氷床は巨大な淡水リザーバですが気候変化に対する応答は極めて遅く，より温暖なグリーンランド氷床の応答のほうが速いと思われていました．しかしながら，近年，衛星観測によって南極氷床が縮小する傾向にあり，アイスコアや地質記録からも，間氷期や鮮新世などの温暖期において現在よりも縮小していたことなど，南極氷床の予想外の変動が相次いで報告されています．特に，南極の平均気温が現在よりたかだか 2℃高いだけの最終間氷期 (13 万年前) にも氷床が縮小していたことは，大きな驚きを与えています．しかし，その説明も数値モデルによる再現も未だ実現出来ておらず，将来予測に対し重大な懸念となっています．

北半球氷床の変動には，大気ー氷床ー地殻マントルの相互作用が重要であることがわかってきていますが，南極氷床にはそれらに加えて海洋との相互作用が極めて重要です．これは，氷床と岩盤の接地面が海面下にある部分が多いため (図 1(b))，海に張り出した棚氷の下へ暖水が入って底部から氷床が融解し，急激に接地線が後退したり流動が加速したりするからです．従来の氷床モデルでは，小さな氷床を初期条件とすれば温暖期の縮小状態は維持される結果が得られていますが（図 1 (a) の C 温暖期），大きな氷床（図 1 (a) の B 現在）を初期条件とした温暖化への過渡応答は十分再現できていない状況です．一方で温暖化は水循環を活発にして氷床の涵養を促進する効果もあることが知られています．数値モデルにより氷床融解と降水増加の影響を定量的に予測することが国際的に急務と策定され、IPCC 第 6 次（次期）報告書と連動するモデル比較プロジェクトにも氷床モデルが加えられるという状況です．

このような状況の中，本研究では，全球気候モデルを中心に大気・海洋・氷床に関する数値モデルを用いて，南極氷床・南大洋・極域気候の過去や現在の状態や変動のしくみを明らかにし，将来予測に貢献することを目指します．そのため，他班と連携して観測に基づく知見を取り入れ、これまで蓄積してきた異なる階層のモデリング手法を駆使した数値実験を展開します．異なる時間スケールにおいて，気候システムにおいて南極・南大洋のもつ役割を普遍的かつ統一的に理解することが最終目標です（図 2）．具体的には以下のような課題に取り組みます．

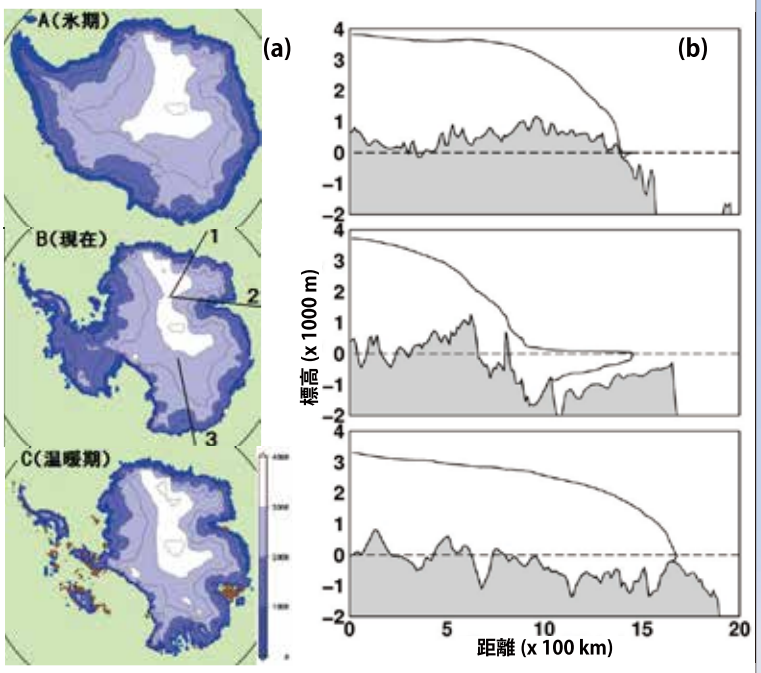


図 1．南極大陸および周辺における海洋と氷床の断面図。(a): 南極氷床のモデル計算による標高分布（A 氷期，B 現在，C 温暖期 ）．(b):『現在』の①，②，③の線上の断面図 (観測高度分布). ②や③は，接地面が海面下か海面すれすれに位置していて，海洋氷床相互作用による非可逆的な後退が起こりやすい．

A) 氷床ー海洋相互作用および氷床ー固体地球相互作用の役割に重点をおいた観測と高解像度モデルの融合的研究をもとに，南極氷床モデルの飛躍的改良を行います．大気や海洋の素過程の理解を元にモデルを高度化して，気候モデルの南大洋の表面水温や海氷場の再現性を評価し，南極・南大洋のティッピング・ポイントを実験的に明らかにします．

B) 気候モデルと南極氷床モデルなどを組み合わせた数値実験と，古気候データとの比較検討により，過去数百万年のスーパー温暖期の気候変動と南極氷床後退の要因や，氷期間氷期サイクルの南大洋や海氷の変動メカニズムを明らかにします．

C) 最近数十年から数百年の気候変化に関する数値実験に基づき，南極氷床および南大洋について実際に観測された変動やアイスコアの気候シグナルの要因を明らかにします．さらに気候と氷床に関して長期的な将来見通しを立て，国際プロジェクトを通じて南極将来予測に貢献します．

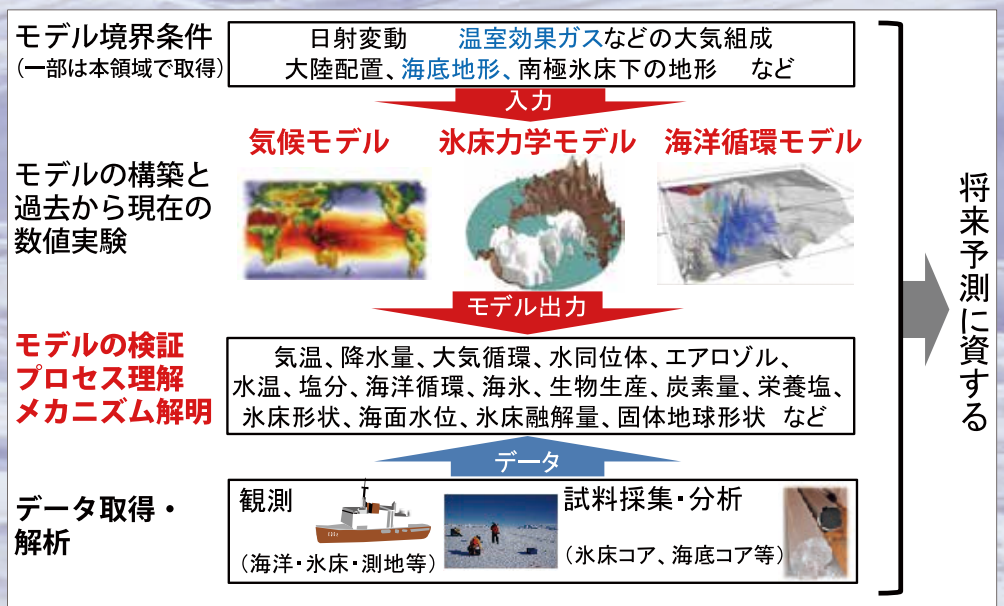


図 2．本研究計画と領域に関連する課題についての概念図

キックオフミーティングを開催しました！

2017 年 9 月 30 日～10 月 2 日に，北海道札幌市定山渓において本領域のキックオフミーティングを開催しました．参加者は 76 名（学生・院生 13 名を含む）で，九州から北海道までの南極・南大洋に関わる研究者が一堂に会した盛大なミーティングとなりました．参加者の多くは南極・南大洋をテーマにもつ研究者で，南極とは縁のない研究者はわずかだったにもかかわらず，このキックオフミーティングで初めて対面する研究者が実に多く，この領域の裾野の広さを実感できました．改めて南極・南大洋そのものが，さまざまな分野の研究者らの貢献によって初めてその理解に近づくのだと再認識しました．会の冒頭では，川村賢二領域代表から，これまでの本領域の申請のいきさつから研究概要までが語られ，本領域を構成する 7 つの計画研究班の班長から，本領域で目指す研究のターゲットとその道筋について具体的なビジョンが示されました．なお，本ミーティングでは，アドバイザー（住明正先生，花輪公雄先生，小池勲夫先生）と本領域の運営に関する事務的なサポートをしていただく学術調査官（波多賢二先生，廣理英基先生），合計 5 名の先生方にも参加していただき，新学術を運営していく上での注意点や短期的・中期的研究目的の設定やその成果公表までのマネージメントなどについて，貴重なアドバイスをいただきました．

本領域では，経験のある中堅やシニア研究者から分野横断型の勉強会『南極俯瞰セミナー』を実施していくことが領域計画書にも明記されています．ミーティング初日には，『南極俯瞰セミナー』の記念すべき第 1 回として，川村領域代表より，本領域が目指す研究概要とその究極の目標に加えて，氷床コアと気候モデルが高度に融合した最新の研究成果について，分野外の研究者へもわかりやすく紹介されました．また，本領域の運営に関する概要（構造や仕組み）について，菅沼悠介事務局代表から説明があり，引き続き，国際活動支援・若手支援についての仕組みと今後の募集計画案や，アウトリーチの進め方などが，それぞれの担当者より述べられました．本ミーティングには，ポスドクを始めとする多くの若手研究者の参加がありましたが，このミーティングをきっかけに若手研究者による『南極若手会』も結成されました．早速，若手会主導による領域外の若手（院生・ポスドク）までをまきこむような研究セミナーの開催が提案され，2017 年度末に開催予定のスプリングスクールに併せて開催を準備することが決まりました．2 日目は，各班の班長から本領域で目指す研究テーマについて紹介があり，各班との連携テーマの設定やその研究課題をどのように進めるべきか，国外も含めた研究航海，南極観測計画とどのようにリンクし，観測船などのプラットフォームの有効的な活用方法などについて，積極的な意見交換と情報共有が行われました．2 日目の午後からは，本領域が発足してから初めての運営委員会が開催されました．学術調査官の先生方から，中間審査までの領域の研究の進め方や，今後公募される公募研究との連携などのついての具体的な仕組み作りなどについて，貴重なアドバイスをいただきました．並行して，各班のメンバーが班の垣根を越えて，今後の連携研究への模索や観測データの共有，シンポジウム・合同研究会等イベントの効果的な開催などといった，一歩踏み込んだ議論が行われました．

最初に述べましたように，初めて対面する研究者が多く集まった本ミーティングでしたが，全員が関係する『南極の海と氷床』というキーワードを基に，各研究者が今後の研究イメージを明確にすることができ，さらにそれらを共有できました．まさに，本領域のキックオフとなりました．

今後の主な行事予定

- 4 月 8 日～4 月 13 日　：European Geosciences Union General Assembly 2018 @ ウィーン・オーストリア
- 4 月 9 日～4 月 13 日　：Marine Ecosystem Assesment for the Southern Ocean @ ホバート・オーストラリア
- 4 月 24 日～4 月 25 日　：**第 1 回年次報告会・第 2 回南極俯瞰セミナー @ 国立極地研究所**
- 5 月 21 日　：**日本地球惑星科学連合 2018 年大会『南大洋・南極氷床が駆動する全球気候変動』セッション（主催）**
- 6 月 3 日～6 月 8 日　：Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting @ ホノルル・ハワイ
- 6 月 19 日～6 月 23 日　：SCAR/IASC Open Science Conference @ダボス・スイス
- 7 月 9 日～7 月 11 日　：**拡大総括班会議（@ 高知大学海洋コア総合研究センター）**

新メンバー紹介！

シェリフ 多田野 サム（モデル班・東京大学大気海洋研究所）

皆様こんにちは，東京大学大気海洋研究所のシェリフ多田野です．私は，生まれも育ちも福岡県福岡市で，博多弁を自由自在に操る博多っ子です．もちろん，福岡ソフトバンクホークス（野球）とアビスパ福岡（サッカー）を応援しています．また，山笠に出たこともあります．趣味はスポーツで，学部時代はアメリカンフットボール部に所属しており，最近はよくサッカーをしています．

もともと自然や地球環境に興味を持っていたのですが，ある映画を見て気候の研究者を志すようになりました．宣伝になってしまうので，タイトルは伏せます．この映画は，過去の氷期と呼ばれる時代に，海洋循環の変動と関連した気候変動が多発していたことを紹介しています．修士，博士課程では，気候モデルを用いて氷期に海洋循環の変動や気候変動が多発した要因を調べました．具体的には，大陸上に拡大した氷床が，海洋循環や気候形成に与える影響について調べました．

昨年の 10 月から新学術「南極の海と氷床」のモデル班でお世話になっています．ここでは，気候モデルでの南極・南大洋周りの雲表現の改善が，現在気候，古気候，将来気候予測シミュレーションに及ぼす影響を調べています．現在の気候モデルでは，南極や南大洋周辺でシミュレーションの精度が低いところがあるからです．これまで行っていた研究と少しテーマが違うので，自分の中で日々新しい発見があり，楽しんでいます．今後，気候モデルを使用して，他班から得られたデータの解釈や仮説の検証などに貢献したいと考えています．これからもよろしくお願いします．

松井 浩紀（古海洋班・高知大学海洋コア総合研究センター）

みなさま初めまして．高知大学の松井浩紀と申します．私は愛知県の出身で，東北大学で学位を取得し，昨年から新学術古海洋班のメンバーに加わりました．博士課程では過去 3,400 万年間を対象として，赤道太平洋の古海洋研究を行いました．専門は微化石の一種である浮遊性有孔虫であり，群集解析と炭素酸素安定同位体比分析から水温躍層の長期的な変遷を明らかにしました．研究の一環として，2 ヶ月間の掘削航海にこれまで 2 度乗船しています（微化石，堆積物研究者として）．

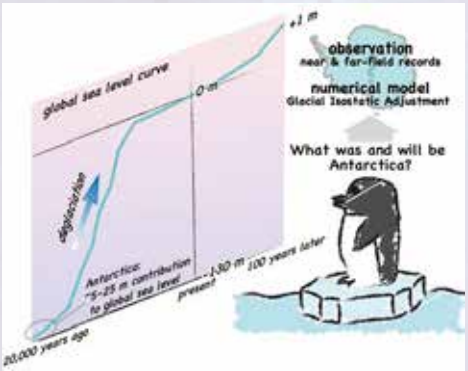
新学術古海洋班においては第四紀の南大洋をターゲットに，浮遊性有孔虫群集の解析を進めています．現在は過去 50 万年間のアガラスリターン海流の変動を捉えることを目指しています．これまでの研究は長期的な気候変動を対象としていたため，第四紀の高解像度研究に触れ勉強の毎日です．新たな環境で新たな研究に臨むことで，これまでの経験も活きてくると信じています．古海洋研究における自らの手法を拡張し，新学術プロジェクトに積極的に貢献したいと考えています．

来年には白鳳丸の南大洋航海が予定されています．観測やセディメントトラップ設置に関わるのは初めてですが，南大洋・南極を目にすることができると思うと，今から待ち遠しいです．日々の研究・長期の航海に気持ちを引き締めて臨んで参ります．また，昨年結成された南極若手会の初代代表を務めます．新学術を通じて広範な分野の研究者に接し，多くを吸収したいと考えています．みなさまのご指導をどうぞよろしくお願い申し上げます．

石輪 健樹（固体地球班・国立極地研究所）

はじめまして．私の名前は石輪健樹といいます．名前の読み方が難しく，初対面で読んでくれた方は今まで一人しかいません．2018 年 1 月から新学術「南極の海と氷床」固体地球班の特任研究員として着任しました．主な研究内容は数値モデルを用いた過去の南極氷床変動史の復元です．さらに，数値モデルの計算結果と他の古気候・古海洋データを統合的に比較・検討することで南極氷床変動メカニズムの解明を目指しています．修士・博士課程では海洋堆積物の地球化学分析を主に扱っていましたが，博士取得後は数値モデルを扱った研究に興味を持っています．

現在，南極氷床の融解・崩壊による海水面上昇が危惧されていますが，約 2 万年前の氷期では南極の氷床量は現在よりも多かったことが知られています．しかし，知られているだけであり，その正確な氷床量は十分に解明されていないのが現状です（先行研究間で 2 倍以上の差がある！）．氷期の南極氷床量が正確に復元されていないことは，氷期における気候システムの理解の大きな妨げとなっていると考えられます．私は新学術「南極の海と氷床」で主にこの問題に対してアプローチし，将来的にはフィールドで得られたデータと数値モデルの結果を総合的に議論することで，より精度の高い南極氷床変動史の復元を行っていきたいと考えています．また，新学術「南極の海と氷床」は多種多様な研究を網羅的に行っているので，地球化学分析と数値計算の背景を駆使し，分野横断的な研究に積極的に取り組んでいきます．最後になりましたが，新学術「南極の海と氷床」に貢献できるよう研究に励んでいきますので，今後とも宜しくお願い致します．



編集後記

新学術「南極の海と氷床」ニュースレター創刊号をお届けします．初回は，各計画研究概要と新メンバーの若手研究者紹介です．キックオフミーティングを皮切りに，各計画研究，研究連携，国際支援，若手支援と順調にスタートいたしました．今後は、我々の研究や活動を余すことなくお伝えてして参ります．背景の写真は，本領域の複数のメンバーによる観測時に撮影されたものです．今回の使用を許可していただきありがとうございました．手作りのニュースレターをどうぞお楽しみに！　(A, O)

新学術領域研究（研究領域提案型）

南極の海と氷床

News Letter vol.1

発行・問い合わせ先

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518　東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp

発行日 2018.3.11

文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：
全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

南極の海と氷床

News Letter vol.2

アイスコアから復元した海水温と CO_2 濃度の変動

琉球大学理学部 植村 立

過去100万年の間には、氷期・間氷期サイクルと呼ばれる約10万年周期の大きな気温変動があったことが知られています。このサイクルでは南極の気温変動はCO_2濃度と似た変動パターンを示すことが知られていました。地球温暖化を訴えた有名なアル・ゴアの「不都合な真実」でも、南極の気温変動とCO_2濃度が類似していることを示して、CO_2濃度の増加と気温上昇がリンクしていることを訴えています。

大気中のCO_2濃度は北半球と南半球で濃度差があるものの、数百年の平均値で見れば空間的にほぼ均一です。しかし、気温変動は地域によって大きく異なります。実際に北極のグリーンランドの気温変動と南極の気温変動との間には一貫してズレが存在します。

それでは、なぜ南極の気温とCO_2濃度を比べるのでしょうか？おそらく、(1)CO_2濃度変動が南極アイスコアから復元されている、(2)数十万年間に及ぶ定量的な気温復元データが少ない、(3)同じアイスコアから復元しているので同じ時間軸で対比が可能である、等々が理由でしょう。つまり、南極の気温と比較する物理的な理由はあまりないと思われます。

大気中のCO_2濃度が変動するメカニズムとしては南極の気温ではなく、南大洋が重要な役割を果たしていると予想されています。気候モデルでは、炭素循環が海水温に関係していることが予想されていました。

そこで、我々の研究(Uemura et al., 2018)では同じ時間軸の上で過去72万年間にわたる南極と周辺海域の温度変動を正確に復元することを試みました。手法としては、南極ドームふじアイスコアから酸素と水素の2種類の同位体比($^{18}O/^{16}O$と$^{2}H/^{1}H$)データを測定し、両者を組み合わせて解析をしました。これによって、雪として凝結した南極の気温に加えて、降雪をもたらした水分子が蒸発した海域の温度も推定しました。「周辺海域」というのは、「雪をもたらした水分子が蒸発した海域」のことです（図１左）。周辺海域の水温も復元したデータとしては、これまでの最長であった42万年間のデータを大きく延長したことになります。

復元した周辺海域の海水温は、大気中の二酸化炭素濃度の変動と非常に高い相関を示しました（図１A）。この結果は、南極周辺の海洋が二酸化炭素濃度の変動を支配しているという仮説を支持するものです。

南極の気温も、二酸化炭素濃度と似た変動を示していますが、周期的にずれている時代があることがわかります（図１B）。詳しくみると、南極の気温と周辺海域の海水温の差には、約4万年の周期性があることがわかりました（図1C）。

これは、約4万年周期で地球の自転軸傾斜角（地軸の傾き）が変動することで引き起こされる年平均日射量の変動が原因であると考えられます。自転軸傾斜角が変動することによる年平均日射量の変動は緯度によって異なり、極域と赤道で最も大きく変動し、中緯度ではほとんど変動しません。したがって、南極の気温変動が年平均日射量の影響を強く受けていることを示しており、このことが二酸化炭素濃度と南極の気温変動の不一致の原因の一つであると考えられます。

では、南極の気温は日射量の影響を直接受けているのでしょうか？本研究の結果を4万年周期の変動に注目して解析すると、年平均日射量の変化に対して、南極気温、二酸化炭素、海水温の順番で遅れて変動していることがわかりました。この結果は、日射量だけで南極の気温変動が直接的に決まるという説を否定するものです。さらに、この日射量に対する遅れは40万年の周期で最小の値をとる現象を発見しました。地球規模の炭素循環と海洋循環にも40万年周期があることから、この現象には海洋環境の長期的な変動が関連していると考えられます。なお、現在は約40万年ぶりに離心率が小さくなる周期が始まった時代にあたるため、新しい同調期に入っている可能性があります。

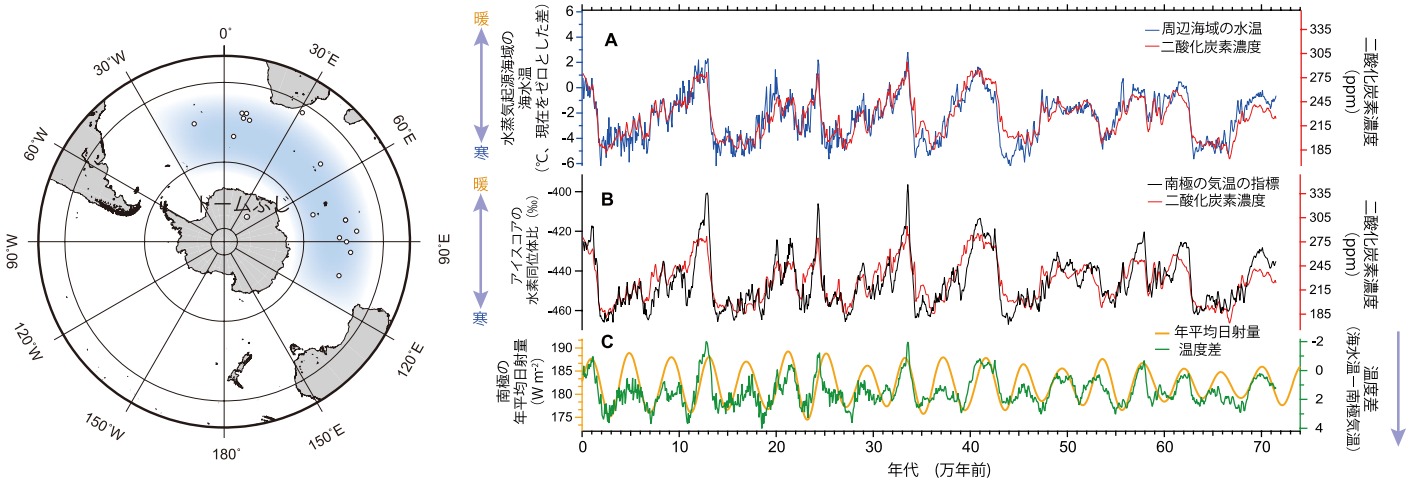


図1　左図：ドームふじコアとその水蒸気起源海域（水色）。丸い点は海底コアの掘削地点。**右図**：温度と二酸化炭素濃度の比較。**(A)** 南極周辺海域の水温（青線, 本研究）と大気中の二酸化炭素濃度（赤線, 複数のアイスコアのデータ）。**(B)** 南極の気温（黒線, 本研究）と二酸化炭素濃度（赤線）。**(C)** 周辺海域と南極の温度差（緑線, 本研究）と南極の年平均日射量（黄線）

南極の気温が4万年周期の自転軸傾斜角の影響を受けていることとCO_2変動との関係については、我々のアイスコア論文と前後して、2つの説が発表されました。詳細な議論はここでは避けますが、それぞれ固体地球との相互作用と降雪量の季節変動という全く異なる時間空間スケールから同じトピックが議論されています。1つは、海水準の変動によって中央海嶺の火山活動が活発化することでCO_2濃度が変動するとする説（Hasenclever et al., 2017)、もう1つは南極の気温復元が降雪の季節変動のバイアスを受けている（Erb et al., 2018）という論文です。

今回の我々のアイスコアの研究は、長期間（数1000年平均）の準定常状態として気候システムを観測した場合に、CO_2と海水温の間に強い相関関係があることを明らかにしたものです。現在の現象の観測研究をされている方々からするとあまりに単純な関係で捉えどころなく感じられるかもしれません。一方で、俯瞰的に見れば，単純な関係性が成立するという事実は、「説明は簡単な方が良い」(最節約原理: the principle of parsimony）という観点からは、南大洋とCO_2の関係に潜む本質的なメカニズムを反映しているとも捉えられます。南大洋と深層水循環、炭素循環が背景にあるメカニズムなら、この相関関係はいつ頃から始まったのか？鮮新世の温暖期（500万～300万年前）にも同じような関係性は維持されるのか？等の疑問も生じます。今後、新学術領域研究の新しいアイスコア・堆積物や気候モデルによる研究によってこれらの謎の解明に取り組んでいきたいと思います。

[文献]
Uemura et al., *Nature Communications* (2018) 9:961, DOI: 10.1038/s41467-018-03328-3
Hasenclever et al., *Nature Communications* (2017) 8:15867, DOI: 10.1038/ncomms15867
Erb et al., *Nature Communications* (2018) 9:1361, DOI: 10.1038/s41467-018-03800-0

植村 立（琉球大学理学部 准教授）
東京工業大学博士課程修了。日本学術振興会特別研究員（国立極地研究所）、海外特別研究員（フランス気候・環境科学研究所）、琉球大学助教を経て、2013 年より現職。専門は同位体地球化学、古気候学。本領域では、氷床班において、氷床コアの同位体解析を担当する。

南極氷床表面質量収支高精度推定手法の確率

気象庁気象研究所 庭野 匡思

気象研究所の庭野匡思と申します。私は、地球の気候システムにおける大気ー雪氷相互作用に興味を持っており、雪氷圏における気候変動メカニズム解明に資する研究をしたいと考えています。現在の主な研究フィールドはグリーンランド氷床と北海道です。現地観測と、私が主導的に開発してきた積雪変質モデルSMAP・領域気候モデルNHM-SMAPを組み合わせる多角的なアプローチを取りながら、上記目標のハイレベルな達成を目指しております。南極には行ったことがありませんが、グリーンランド氷床上には、2012年から現在にかけて、現地観測のために計7回・通算80日以上滞在しております。2018年は、春と夏に2回、現地観測を実施しました。特に、春の観測では、共同研究者2名（山崎哲秀氏、山口 悟博士）とともに犬橇を使って氷床上多点雪氷観測を行うことを試み、成功に導きました（図）。折しも2018年は、かの伝説的探検家、植村直己氏のグリーンランド氷床単独犬橇縦断から40年後にあたることから、一生の思い出となりました。本新学術課題では、NHM-SMAPを南極に適用し、南極で進行している気候変動の実態解明に貢献したいと考えております。どうぞ、よろしくお願いいたします。

地表面フラックス見積りスキームの改良とそれによる南極域氷床の表面質量収支評価改善

理化学研究所 西澤 誠也

理化学研究所計算科学研究センターの西澤と申します。気象力学を専門としており、最近は主に大気中の乱流に関する研究を行っています。大気数値モデルの開発や「京」コンピュータなどスパコンを用いた大規模シミュレーション実験を行っており、大気乱流のようにこれまで見ることが難しかった時空間スケールの小さな現象の解明を目指しています。小さなスケールの現象が大きなスケールの現象に大きな影響を与えていることはとても興味深いです。本新学術領域研究では、数値シミュレーションにおける地表面と大気間の熱や物質の交換量（地表面フラックス）の見積もりスキームの改良に取り組んでいます。氷床の地表面質量収支の見積もり精度の改善に貢献できればと考えています。本領域には多様な分野の研究者の方々が集まっておられるため、普段接することのない研究に接することができると期待しています。さまざまな観点からの議論を通して自分の視野を広げたいと思っております。どうぞよろしくお願いいたします。

衛星高度計による南極海海氷域の海洋循環の解明と周極深層水の輸送経路の推定

東京海洋大学 溝端 浩平

東京海洋大学の溝端です。公募課題では衛星高度計を用いて、南極海海氷域の海洋循環の解明と周極深層水の輸送経路の推定を行います。これまで、衛星リモートセンシングで今まで見えなかった海の姿をあぶり出し、その姿の変動要因を明らかにする事を念頭に研究を行ってきました。特に私が得意とするものは衛星海面高度計を用いた研究です。衛星データで必ずNo Dataとされている海氷域で、どうすればよいかを考えてきた中で、ようやく北極海の海氷域で海面高度を導くことが可能になり、今回の公募課題につながっています。ただ、単純に北極海での手法を南極海に適用するだけではうまくいかないため、どう克服するかが腕の見せ所です。海氷域で海面高度から得られる海洋循環の情報は、周極深層水の輸送経路や生物分布の理解にも役立てると考えています。また、底層水班や生態系班の方々と連携し、現場観測と衛星観測の2方向から新学術にふさわしい新しい教科書となるような知見を得られるよう頑張りたいと思います。どうぞよろしくお願いいたします。

高精度薄氷厚推定アルゴリズムの開発とその氷厚を用いた海氷生産量データセットの作成

苫小牧工業高等専門学校 二橋 創平

私はこれまで沿岸ポリニヤにおける薄氷厚推定アルゴリズムの開発を、マイクロ波放射計による衛星観測データを用いて行ってきました。この薄氷厚を用いた熱収支計算から、海氷生産量を見積もることができます。しかし従来のアルゴリズムは、最大で10 cm 程度の誤差を含んでいました。これは生産量の見積もりに数倍程度の違いを引き起こす可能性があります。一言で薄氷といっても、実際には様々な種類があります。そこで薄氷の種類を考慮することにより、今までより格段に精度の良いアルゴリズムの各マイクロ波放射計センサーで開発を行い、最長で30 年近い連続した南極海沿岸ポリニヤ域における高精度の海氷生産量データセットを作成すること目指していきます。最後に簡単な自己紹介です。高専では授業数が多く、週末にも寮や部活での仕事があるのでなかなか時間が取れないのですが、自転車に乗ることを趣味としています。心身のリフレッシュになるとともに、かけがえのない仲間ができて最高のスポーツです。

南極大気中の硫酸安定同位体組成の季節変動を再現する大気化学輸送モデルの構築

東京工業大学 服部 祥平

「南極の海と氷床」が僕にとって初めての新学術領域研究との関わりになるので、この種目の意味を考えていました。基盤でも若手でもなくどうして新学術なのか、申請時のグループ以外に公募班を募ることでその先に何を見据えているのか、とか。新しいことをやる、というのはサイエンスの基本です。けど、普段の生活ではどうしても思考が無意識に規定・制約されてしまうし、そのせいで可能性を閉じてしまっていることが多々あります。そういった閉塞感から自身を開放し、限界も常識も疑い、分野の境界さえ取っ払って考えるための起爆剤、という意味で新学術は意味を持つはず、と思っています。一つのグループでは到底なし得ないスケール・ビジョンを共有・具現化し、なんならそこにまっさらな若者を巻き込む…、なんだかわくわくしません？いつか後世から見て、「あの人たちは、あの頃にあれを考え始めていたのか…」と言ってもらえるような、そんな良い意味での徒党が組めればと思います。どうぞよろしくお願いいたします。

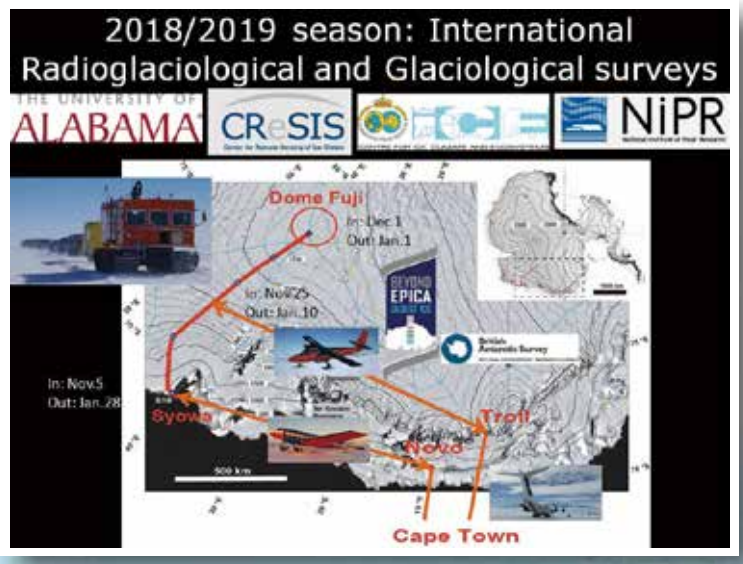
国際研究動向調査派遣事業「IPICS oldest ice meeting および POLAR2018 Open Science Conference 発表参加」報告

国立極地研究所 藤田 秀二

目的：「IPICS oldest ice meeting, Davos」および。「POLAR2018 Open Science Conference」へ参加した。これらの会合への参加やプレゼンテーションを通じ、「最古のアイスコア」掘削についての国際議論や情報交換をするほか、南極雪氷・氷床に関する研究動向を探るため渡航した。

成果：過去約80万年を超える年代をもつ非常に古いアイスコア掘削に関する欧州・米国・日本等の摺り合わせおよび今後の連携の可能性について協議・調査を実施した。具体的な直近の氷床レーダ探査にかかる連携、それに、深層掘削段階での連携可能性について協議した。また、極域のフィルンの物理・化学プロセスについても最新動向と共同研究化の可能性を模索するためのプレゼンテーションを実施した。(詳細は、http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/?page_id=27 を参照)

所感： Oldest Ice にかかる年次計画的様相は各パーティーが似たような様相にある。欧州は計画承認に苦労しているように見えたが、ひとたび動き出せば80億円レベルの巨額な研究予算のもとに迅速に動くであろう。豪州は技術的要素を固めながらすすむように見えた。日本は掘削機の製作や現地探査は動いているが、正念場はまだこれからあり、今回の会議のような国際動向を今後も注視しいく。複数のアイスコアプロジェクトが並行にすすみつつある様相のなかで、デンマークのDorthe Dahl-Jenssen氏から以下の提案があった。ひとたびコアを掘ったら、特に特定のラボでしかできないような解析項目については、そこにコア解析を託するような国際体制をとるべきとの提案であり、賛同者が多かった。この提案は、有効に主要グループ間の垣根を取り除く方策となる可能性があると思えた。



【図】IPICS Oldest Ice Workshop で藤田が使用した、2018/2019年度の国際共同のドームふじレーダ観測を説明する模式図。米国のカンサス大学（KU)とアラバマ大学(UA)がレーダを供給し、日本が内陸トラバース調査旅行を運用する。ノルウェー極地研究所がヨーロッパ連合（Beyond EPICA - Oldest Ice、略称BE-OI）の一員としてこの内陸調査に２名の科学者を派遣する。レーダの輸送とノルウェー人員の輸送はBritish Antarctic Surveyがツインオッター機で実施し、これはBE-OIの予算により実施される。日本は第59次および60次の南極地域観測隊が10名でトラバースを担う。

若手国際学会派遣事業「15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society 発表参加」報告

北海道大学大学院 山崎 開平

目的：「15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society」へ参加しポスター発表を行った。

所感：第一に感じたのは、自分の研究領域、すなわち南大洋の海洋物理に対する注目度の高さである。兼ねてから国内学会では、海洋の振る舞いが氷床と気候システムに及ぼしうる影響の大きさについて、理解を共有できる人が少ないと感じていた。今回のAOGSでは、私が参加した南大洋の気候力学のセッションに加え、海洋貯熱量に関するセッションや、海水準上昇に向けた社会適合に関するセッションにおいて、「南大洋と南極氷床」の気候学的な重要性を再認識することができた。海外の一流の研究者からアドバイスをもらえたことは、自分の研究を続けるうえでの大きな励みとなった。もうひとつ感じたことが、非英語話者のコミュニケーションのバリアが、日本で開かれる国際学会よりも薄いということである。英語を厭わず、積極的に質問をする若い学生が多かったことは、非常に印象的であった。特に、韓国や中国による強力な国際協働体制のもとでの数々の南大洋での研究成果を目の当たりにしたことは、良い刺激となった。その一方で、日本人学生が、諸外国と比べると極端に少なかったのは、勿体なく感じた。今回の経験を糧として、引き続き国際的な議論の場に参加していければと思う。

南極春の学校・南極若手勉強会を開催しました！

南極春の学校2018

2018年3月11日(日)～13日(火) 大学セミナーハウス、国立極地研究所にて「南極春の学校2018～目指せ国際・学際研究者～」を開催いたしました。各大学等でポスターの掲示、チラシの配布, 大学の講義等およびwebで告知したところ、東京周辺だけでなく、全国26大学、学部生31名、院生24名が参加してくれました。

・実験や映像を交えながらの７研究分野の講義
・低温室と南極北極科学館見学ツアー
・南極昭和基地との中継
・南極観測から戻ったばかりの研究者の話
・海外で活躍中の研究者の話など

盛りだくさんのプログラムに講師もスタッフも大忙し! その甲斐あって、「また開催してほしい」との感想をたくさんいただきました。

南極昭和基地からのリアルタイム遠隔講義

第1回南極若手勉強会

3月13日(火)～14日(水) 国立極地研究所にて「第１回南極若手勉強会～国際・学際研究者への第一歩～」を開催しました。分野を横断したセッションを開催することで、若手研究者が世界の研究の現状を把握し、異分野の知見を幅広く獲得することを目指し、2017年9月 のキックオフミーティングにて結成された南極若手会が主体的に運営しました。全国18大学、40名が参加し、「モデルを網羅的に学ぶ」、「探査を学ぶ」、「古環境プロキシを徹底的に学ぶ」の3セッションについて助教、PDが自身の研究分野のレビューを発表しました。会場内は良い緊張感に包まれ、質疑応答では厳しい質問やコメントが飛び交い、かなり白熱した議論が行われていました。2018年11月下旬に「第２回南極若手勉強会」も開催される予定です。また、ぜひご参加ください。

参加者集合写真

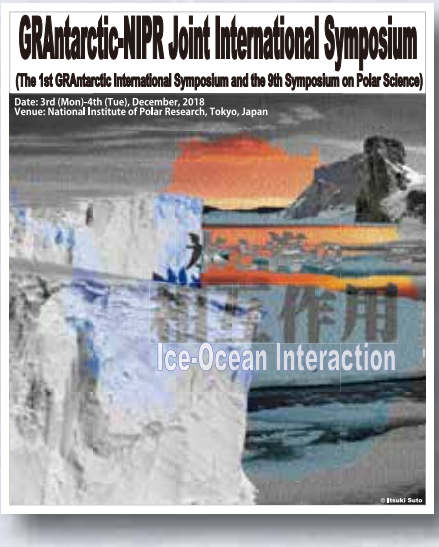
今後の主な行事予定

- 11 月 30 日～12 月 2 日 ：第２回南極若手勉強会 @ 山中湖
- 12 月 3 日～12 月 4 日 ：第１回新学術国際シンポジウム / 第９回極域科学シンポジウム@ 国立極地研究所
- 12 月 5 日 ：第３回拡大総括班会合@ 国立極地研究所
- 12 月 10 日～12 月 14 日：2018 AGU Fall Meeting @ ワシントン
- 3 月 13 日～3 月 15 日 ：第２回年次報告会 @ 国立極地研究所

2019 年

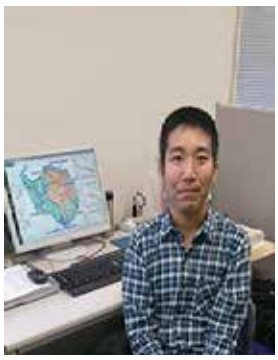
- 4 月 7 日～4 月 12 日 ：EGU 2019 @ ウィーン
- 5 月 26 日～5 月 30 日 ：日本地球惑星科学連合 2019 年大会 @ 幕張

第1回国際シンポジウムポスター



新メンバー紹介！

小長谷 貴志（モデル班・東京大学大気海洋研究所）



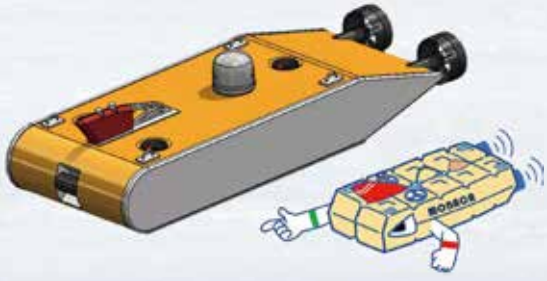
東京大学大気海洋研究所の小長谷貴志です。2012年から大気海洋研究所の学生で、2018年春から南極新学術モデル班の特任研究員です。これまでの研究では、気候変化に対する南極棚氷の底面での融解量の変動メカニズムと、最終間氷期（現在よりも南極氷床が縮小した時期）に南極が温暖だった要因について、気候モデルを用いて調べました。一見別の研究のようですが、複雑な気候システムの中で理解が大きく遅れている場所が分かれて存在していることが背景にあります。どのようなモデル実験・観測データとの比較をすれば気候の理解につながるかを考えるところが、モデル研究のおもしろさです。これからは、過去の南極氷床変動や、過去の気候変動における南極・南大洋の役割を気候モデル・氷床流動モデルを用いて調べ、現在さらには将来の環境変動理解につなげることに取り組んでいきます。また現在、次期南極深層コア掘削のためのモデル研究も行っていますが、このように様々な研究課題とかかわれることを楽しみにしています。

立花 愛子（生態系班・東京海洋大学）

はじめまして、東京海洋大学の立花愛子です。今年度から新学術・生態系班のメンバーに加わりました。私はこれまで動物プランクトン、中でもカイアシ類の群集構造と海洋環境との関係を中心に、季節変動から数十年単位の変動まで様々なスケールでの生態学的な研究を行ってきました。南大洋の観測航海には過去に2回ほど参加してきましたが、最後の南極航海は5年以上前なので久しぶりの極域研究への参加となります。新学術・生態系班では、外洋から季節海氷域にわたる広範囲な生態系の群集構造や高次捕食者として重要なハダカイワシやオキアミ類の分布の把握を目指して、従来の方法に加えて新たに分子生物学的手法を用いた研究を進めています。遺伝子による南大洋生態系の生物多様性とその分布の網羅的な解明を目指しています。1月には海鷹丸による南大洋の観測航海に乗船し、新たな生物試料やデータを得る予定でおり、とても楽しみにしています。新学術に貢献できるよう精一杯がんばります。これからもどうぞよろしくお願いいたします。

山縣 広和（探査班・東京大学生産技術研究所）

こんにちは、東京大学生産技術研究所の山縣広和です。私は学生時代、慶應義塾大学で機械工学を専攻していました。義塾では、ロボットの設計論を研究テーマとしていて、様々な状況に即した機能を適宜発揮することのできる可変ロボットについて研究していました。また、教育学も重要視しており、高校の教員免許を取得して、中高生に向けたロボコンの運営も行っています。ちなみに、生家は築地の仲卸業者で、海洋生物は観察よりも食べるほうが好きです。今年の4月から生産技術研究所に所属し、探査班が開発する、南極探査 AUV “MONACA” の開発を担当しています。MONACA は全長2mの機体で往復合計20㎞以上の移動を行います。長距離の移動を安全・確実に行うためにはエネルギー源や通信などの確実性をいかに向上するかが重要です。



しかし、低温環境はエネルギー効率を低下させ、氷は通信を阻害します。そんなチャレンジングな環境で活躍するロボットを作る機会をいただけたことに感謝し、取得したデータが役立つことを目指して頑張りたいと思います。よろしくお願いいたします。

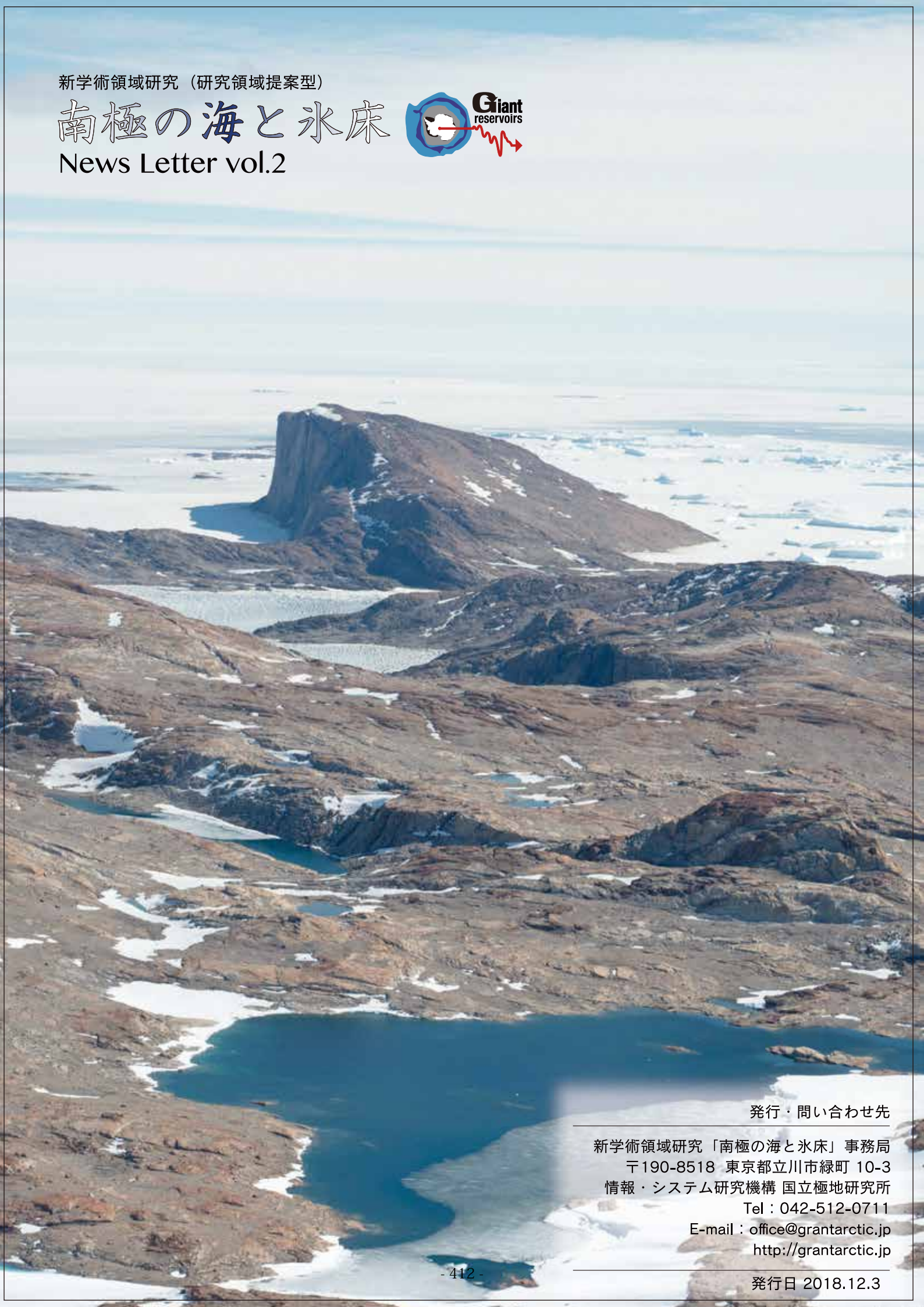
編集後記

新学術「南極の海と氷床」ニュースレター 2 号をお届けします。今号より、本領域から公表された重要な研究成果について紹介していきます。第一回目の注目成果は、氷床班 琉球大学 植村さんが中心となって *Nature Communications* 誌に公表された “Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years” です。これは、川村領域代表や阿部モデル班班長らも共著者に名を連ねる成果となっています。これからも研究成果を次々と紹介して参ります！ (A, O)

新学術領域研究（研究領域提案型）

南極の海と氷床

News Letter vol.2



発行・問い合わせ先

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp

発行日 2018.12.3

文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：
全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

南極の海と氷床

News Letter vol.3

Giant reservoirs

第 22 次「海鷹丸」南極観測航海

東京海洋大学 茂木正人

係留系設置の直前に、セジメントトラップの前で記念撮影。1年後の再開を期して。

箱根駅伝の往路が4区から5区の山登りに入ったころ、東京海洋大学「海鷹丸」は、同じ岸壁に並んで停泊していた白鳳丸より一足先にフリマントルを出港しました。22回目となる海鷹丸の南極観測航海。いつものとおり多くの研究課題を抱えた航海で、さらに、今回は新学術領域研究の課題が加わった合計27日間の日程です。新学術関係としては、生態系班、底層水班、古海洋班の研究課題が絡みあい、10回目の航海となる私にとっても、いつになく南大洋の理解が進みそうな予感がします。

この航海における大きなミッションのひとつは、3系の係留系の設置でした。これらの係留系観測は上述の3班が共同で計画を立案し、東経110度トランゼクト上の南緯61～65度の間、水深2625～4280mの海底に予定通りに設置されました。主席研究者の私は現場を見守るだけでしたがなぜかたいへん緊張していたので、すべてうまく入ったときはひとり心の中で乾杯をしました。係留系は、海底から海面下400mくらいまで立ち上がったロープに沿って各種のセンサーやセジメントトラップ（沈降粒子を 1 年間経時的に補足する装置、沈降粒子の量の組成・季節変化が分かる）が取り付けられたシステムで、1年後に海鷹丸で回収されます。実は、係留系の回収は設置より根気の要る危険を伴う作業です。しかし、回収に成功しセンサー類がうまく作動していたら、いちどに世界でもあまりない大きなデータセットが得られます。研究者は、すでにうまく回収できたときのことを妄想して興奮しています。

このような大規模な観測には多くの人たちの協力が必要です。研究者同士は、実際の観測航海までにミーティングを重ねて研究の目的や意義を共有します。また、長期の乗船には家族の理解も必要です。さらには、海鷹丸の仕官や乗組員の献身的な協力は欠かせませんし、海鷹丸には水産専攻科の実習生40名あまりが乗船しています。全員の協力があって貴重なデータが得られます。そう、駅伝と同じです。ひとりの力で走るのではなく、10人の選手が襷（たすき）をつなぎます。さして、多くのスタッフのサポートを得ながら、私たちもゴールに向かいます。

海鷹丸（手前）と白鳳丸（前方）。どちらもこれから南極海に向かいます。
西オーストラリア州、フリマントル港。

航海の様子は、
FacebookページKARE 東京海洋大学「海鷹丸」南極観測隊
https://www.facebook.com/KARE.umitaka.nankyoku/

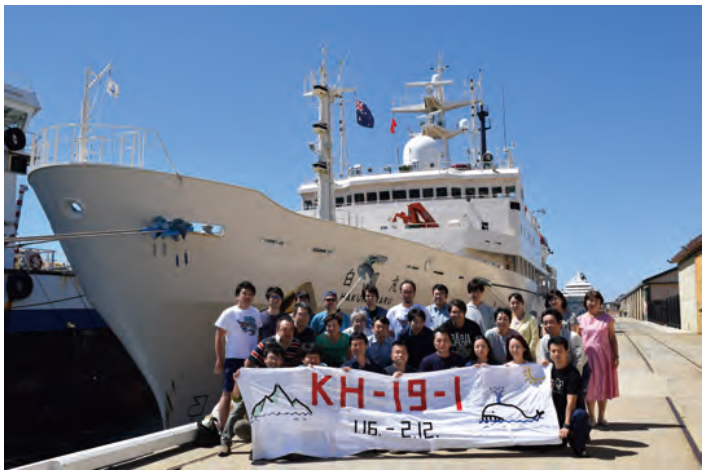
南極ゲートウェイジャパン
https://www.jr-eaest.com/からもご覧いただけます。

次の23次航海は、2020年1月8日にフリマントル出港、
2月4日ホバート入港の予定です。

白鳳丸 KH-19-1 次航海：偶然と必然の南大洋航海

高知大学海洋コア総合研究センター 池原 実

Leg 1: 2019年1月2日フリーマントル～1月13日ポートルイス
Leg 2: 2019年1月16日ポートルイス～2月12日 フリーマントル
主席研究員：池原実（高知大、古海洋班）
次席研究員：大島慶一郎（北大、底層水班）



白鳳丸KH-19-1次航海の乗船者（フリーマントル港にて）（撮影：池原）

古海洋班、底層水班、探査班、そしてモデル班の豪華（?）メンバーが乗船した白鳳丸KH-19-1次航海が2019年1－2月に行われました。航海は２つに分かれており、レグ１は1月2日にフリーマントル港からスタートしました。これは全くの**偶然**でしたが、同時期に海鷹丸もフリーマントル港に寄港することになっており、日本の2隻の研究船と練習船が異国の港でしかも前後に並んで停泊するという珍しい状況となりました。事前に海鷹丸主席研究者の茂木さんと調整し、大晦日と元日に双方の船を見学することにしました。また、大晦日の晩には新年を迎える街で合同壮行会を開き、待ち受ける南大洋での厳しい観測へ向けて英気を養ったのでした。

２隻とも1月2日に出港し、海鷹丸は一路南大洋へ向けて南下し、白鳳丸は南へは向かわずポートルイスを目指して西進しました。レグ１は観測準備と船に慣れることが狙いでしたが、船酔いに悩まされる大学院生が続出し先が思いやられる船出となりました。ポートルイスではレグ２から乗船する多くの研究者が合流し、いよいよ南大洋航海の始まりです。

1月16日にポートルイス港を出港し南を目指します。観測海域が点在するので航走距離が長く、天候が悪化したら退避できる島影もないので、時化たら全ての観測をスキップしてどんどん先に進むしかありません。暴風圏との闘いの始まりです。出だしはほぼ快調で、デルカノライズ周辺で反射法地震探査、ピストンコア採泥を行い、IODP掘削プロポーザルの改訂に向けて良いデータが取得できました。また、名も無き海山で岩石ドレッジにもチャレンジして多様な岩石と深海サンゴをゲット。

個人的に大きな山場だったのは、セジメントトラップの回収でした。遡ること4年前、KH-16-1次航海で南大洋にトラップを係留しました。研究費が無い状況だったので設置を半分諦めていましたが、多くの共同研究者から少しずつ費用と労力を提供してもらい中古のセジメントトラップを整備し、ダメモトで積み込んで設置したのでした。結果は、見事回収に成功!!しかも回収された沈降粒子は教科書に出てくるような明瞭な季節変化を示していて、それを見ただけでワクワクしてきます。南極前線付近の沈降粒子研究は極めて限られているので、南大洋でのトラップ研究に楔を打ち込む貴重な試料が手に入りました。

航海中で最も厳しい状況となったのがケープダンレーでの係留系の設置でした。朝から降りしきる雪と暴風の中、乗組員の多大なる協力の下なんとか計画した３系すべての係留系を設置することが出来ました。今年度の白鳳丸航海で回収し、ケープダンレー底層水の実態に迫る新たな学際研究への展開が期待されます。

吹雪の中の係留系設置（ケープダンレー沖）（撮影：高塚）

暴風圏では周期的に暴風目玉が東進していきますが、その合間をスルリスルリと抜けながら南下しつつ多くの観測を実施することができました。後から思えば、これも**必然**。天候任せの南大洋航海はなるようにしかならないのです。異なる分野から集まった総勢27名の研究者と技術者が一致団結して1ヶ月間の航海を見事に成功裏に導いたのでした。

東南極の外国基地における絶対重力測定

京都大学大学院理学研究科 風間卓仁

南極における地上重力観測の重要性

南極氷床の時空間的な変動を詳しく知ることは、将来の気候変動を予測する上で非常に重要です。氷床変動を把握するには様々な手法がありますが、有効な手段の1つに重力観測があります。そもそも地球表面の重力加速度は$g = 9.8\ m/s^2 = 980\ Gal$と知られていますが、この値はあくまでも近似値です。重力計という装置を用いて重力値をより細かい分解能で測定すると、重力値の場所による違いや時間変化を観察できます。ところで、重力値は数学的には「重力測定点周辺の質量がもたらす万有引力の空間積分値」として表現できるので、重力測定点周辺で質量の増減や移動が発生するとその場の重力値は時間変化します。すなわち、重力計によって重力値の時間変化をモニターすることで、南極氷床質量の変動を直接的に把握することができるのです。

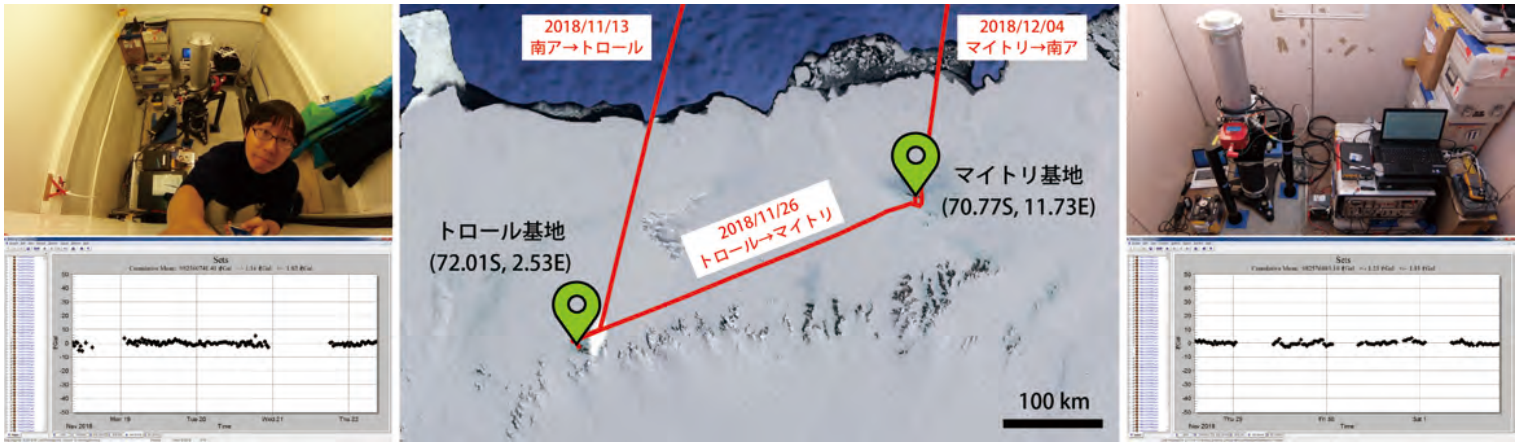
実際、重力観測衛星GRACEの観測によると2000年代～2010年代には西南極で質量減少が、東南極で質量増加が観察されていて、それぞれ氷床融解および積雪増加がその主要因と考えられています[1]。しかしながら、衛星重力データには固体地球内部の質量変動、特に過去の氷床変動に伴う固体地球の粘弾性的変形（GIA: Glacial Isostatic Adjustment）の影響も含まれていて、衛星重力データのみから氷床変動を定量的に把握することは困難です。しかもGRACEの軌道高度は500kmと高く、小さな空間スケールの氷床変動に対しては十分な感度を有していません。つまり、南極大陸における氷床変動をより詳細に知るためには、氷床のより近い場所で重力を定期的に測定し、かつ地殻変動観測などによってGIA変動も同時に把握することが重要です。

そこで私たちの研究チームでは、南極地域の陸上において重力値や地殻変動をその場測定してきました。例えば昭和基地（東経39.59度）では、他機関と協力して絶対重力計を用いた重力測定を1990年代以降数年間隔で実施してきました。なお絶対重力計とは重力加速度の絶対値を高い分解能で測定できる装置のことで、FG5という機種では2μGal（絶対値980 Gallに対して0.0000002%）という高い精度・確度を保障できます。その結果、昭和基地ではこの約20年間で-0.26μGal/yearという微小な重力変化を検出することに成功しています[2]。また、昭和基地周辺のより広域における重力時空間変化を把握するために、2012年2月に日本南極地域観測隊として初めて南極大陸（ラングホブデ;　東経39.72度）における絶対重力の直接測定が行われたほか[3]、2017～2018年にはリュツォ・ホルム湾露岩域の複数点で絶対重力測定が新たに実施されました[4]。これらの重力測定点ではGNSSによる地殻変動観測も行ってきたので、今後重力変化量と地殻変動量を比較することによって氷床変動とGIAの寄与を適切に分離できるものと期待しています。

トロール・マイトリ基地における絶対重力測定

さらに今回私たちは、東南極全体の氷床変動をモニターするため、GRAntarcticプロジェクトの一環で2018年11月～12月にノルウェー・トロール基地（東経2.53度）およびインド・マイトリ基地（東経11.73度）にて絶対重力計FG5-210を用いた絶対重力測定を実施しました。なお、文化圏～南極間の移動には飛行機を活用したため、30日間（日本出国11月9日→日本帰国12月8日）という短期間で任務を遂行することができました。

まず最初に訪問したトロール基地では、重力計内部を真空化す



中央地図（Google Earthより）における緑色のピンはトロール・マイトリ両基地の位置、赤線はGPSロガーで取得した航路の軌跡。左右上部の写真は両基地内の重力測定室の風景。左右下部のグラフは両基地で取得した絶対重力値の時系列。

るための真空ポンプが低温の影響で起動しないなど、測定前の準備段階でいくつかのトラブルに見舞われました。測定準備に通常の2倍程度の期間（約5日間）を費やした結果、11月18日に絶対重力測定を開始することができました。その後、11月18日～22日の連続測定によって絶対重力の平均値をg = 982 360 741.41 ± 1.16 ± 1.82 μGalという高い精度で得ることができました。

次に訪問したマイトリ基地では、重力計内部の制震機構である長周期バネが正常に動作しないという問題に直面しましたが、同行者の国立極地研究所・青山雄一さんによる的確な調整作業のおかげでこの問題を解決することができました。その後、11月28日に最初の絶対重力測定を開始し、12月1日までの連続測定によってg = 982 576 883.10 ± 1.23 ± 1.83 μGalという重力平均値を得ることに成功しました。

これらの絶対重力測定の他、両基地では測地基準点においてGNSS観測も実施しました。取得されたGNSSデータを今後解析することで、各基準点の座標値を高精度に決定する予定です。また、同様の絶対重力・GNSS観測は2011～2012年にフィンランドの研究グループによって実施されています。私たちの今回の測定結果を彼らの結果と比較することで、2010年代の重力変化や地殻変動を把握し、東南極の氷床変動やGIA変動を詳細に議論できるものと期待されます。

本稿の最後に、今回の絶対重力測定は多くの方々のご協力の下に達成することができました。今回の観測に同行くださった青山雄一さん、重力測定に際して助言や支援をくださった国立極地研究所および京都大学の皆さん、重力計を安全に輸送してくださった南アフリカやノルウェーの輸送チームの皆さん、そして基地内における測定や生活をサポートくださったトロール・マイトリ両基地の隊員の皆さんに感謝申し上げます。

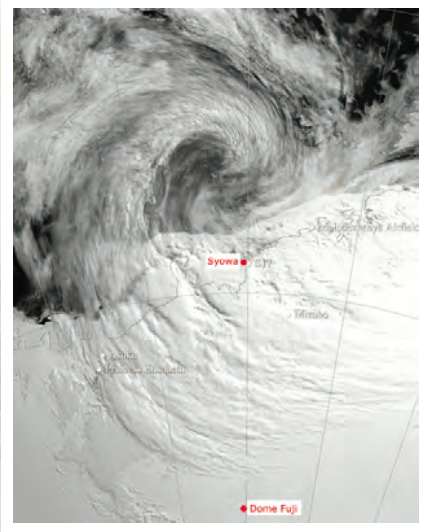
参考文献
[1] 福田 (2018), GRAntarcticニュースレター, vol. 1.
[2] 東ほか (2013), 測地学会誌, 59, 37-43, doi:10.11366/sokuchi.59.37.
[3] Kazama et al. (2013), Polar Science, 7, 260-277, doi:10.1016/j.polar.2013.07.001.
[4] 西島ほか (2018), 日本地球惑星科学連合2018年大会, SGD01-P04.

トロール基地の南東約2kmの山頂 Trollveikja から撮影した、トロール基地周辺の風景。2018年11月25日、360度カメラにて撮影した。筆者の背後左側には南極氷床が、右側には氷床が作ったと考えられる緩やかな平地が広がっている。

南半球における中高緯度大気循環の不確実性の定量化

国立極地研究所 猪上 淳

これまで15年間以上北極の研究を行ってきましたが、こんな私にも南極研究に携わる機会が到来しました。そのきっかけは世界気象機関で進めている極域予測プロジェクトです。当公募研究は、特に南極の予測可能性研究に大きく貢献します。2018年度に昭和基地等で実施したラジオゾンデの強化観測には、気象庁や南極観測隊のご支援をいただき、3ヶ月間で130回以上の追加観測が実現し、これらのデータは各国の現業数値予報に利用されました。2019年度はこれらの観測データの影響評価を行う予定です。特に、昭和基地やドームふじで気象観測を強化すると、南半球の低気圧等に伴う極端気象等の予測精度はどのように向上するのかを国際共同研究の枠組みで調べます。一方で、低気圧に伴う降雪が南極氷床の涵養量に大きく貢献することは指摘されていますが、その数十年スケールの変動については未解明な部分も多いです。当研究課題では北半球で培ってきた、中緯度の海洋前線変動と高緯度大気循環の関係性を南半球へ応用し、積雪や気温の数十年変動を理解することも目指しています。



GRAntarctic-NIPR Joint International Symposium

2018年12月3日から4日の2日間にわたり、国立極地研究所において、『The 1st GRAntarctic International Symposium』を開催しました。初日は本領域が主催するシンポジウムとし、2日目を『The 9th Symposium on Polar Science』と共催で行うシンポジウムとしました。2日間の参加者は132名で、発表数は48件と盛況でした。本領域メンバーから招聘した10名を含め、米・英・独等の主要な南極研究の先進国を中心に、海外研究者合計28名の参加がありました。今回はIce-Ocean Interaction（氷床海洋相互作用）をメインテーマと設定し、この分野で世界の第一線で研究を推進している研究者を海外から招聘しました。このシンポジウムの発表や質疑を通して活発な議論がされた他、前後の日程において関連の本領域メンバーと精力的な今後の連携研究についての打ち合わせを行いました。さらに今回の国際シンポジウムには、計32名の若手研究者が参加しました。発表・質疑を通じて交わされた南極環境システム学に関わる議論が、本領域に関わる若手研究者にとって、研究の視野や幅を広げることに大きく貢献しました。最終年度には、本領域の最終成果報告シンポジウム（国際シンポジウム）の開催が予定されています。今回の国際シンポジウムは、国際的な研究の流れや南極での共同研究、異分野の新知見の共有といったさまざま側面から、重要な位置づけとなり、最終年度開催予定の成果報告国際シンポジウムに繋がる重要な流れが構築されました。

第2回南極若手勉強会

昨年の11月30日から12月2日までの4日間にわたって、レイクロッジヤマナカにて第2回南極若手勉強会　～国際・学際研究者を志す実習合宿を行いました。異分野の若手研究者がお互いの研究内容を学び、その関係性を理解した上で、学際研究についての考えを深める会として、9大学から総勢20人の学生・ポスドクが集まりました。ポスターセッションを通じてお互いの分野について、「何を知っていて、何を知らないのか、また何を知りたいのか」を共有し、異なる分野に対する基本的な質問が飛び交う中で、自分の専門分野だけでは得られない思いがけない意見も聞くことができ、連日議論が白熱しました。さらに、学生向けとして、研究遂行の上で必要不可欠となるデータ描画のツールの使い方や、基本的なデータアーカイブの利用方法などについて、経験のあるポスドクが主体となって、実践的な技術を習得するという試みを行い、若手勉強会の新しい一面を開拓しています。今年も8月22日（予定）から第3回目の南極若手勉強会が企画されています。本領域とも関係の深いIPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」が公表されたということで、その内容を共有し今後の研究の大きな流れを俯瞰する予定です。詳細情報は、領域ホームページにて随時お知らせします。学生・若手研究者の皆さん、自分の専門分野は問いません！奮ってご参加ください！

今後の主な行事予定

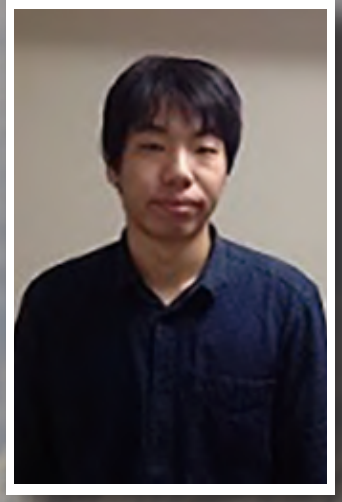
- 5月26日～5月30日　：JpGU2019 @ 幕張メッセ（27日：セッション名：南大洋・南極氷床が駆動する全球気候変動：M-IS14）
- 7月1日～7月3日　：2019年度第1回拡大総括班会合@ 鳥羽
- 7月8日～7月18日　：27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly @ Montreal, Canada
- 7月20日～9月29日　：気候ー海洋ー氷床に関する特別展　～過去、現在、将来を探る～ @ 東大 駒場博物館（本領域協力）
- 7月22日～7月26日　：13th International Symposium on Antarctic Earth Sciences @ Incheon, Republic of Korea
- 7月25日～7月31日　：20th Congress of the International Union for Quaternary Reserach 2019 @ Dublin, Ireland
- 8月22日～8月24日　：第3回南極若手勉強会@ 東京大学大気海洋研究所（予定）

新メンバー紹介！

小林英貴（モデル班・東京大学大気海洋研究所）

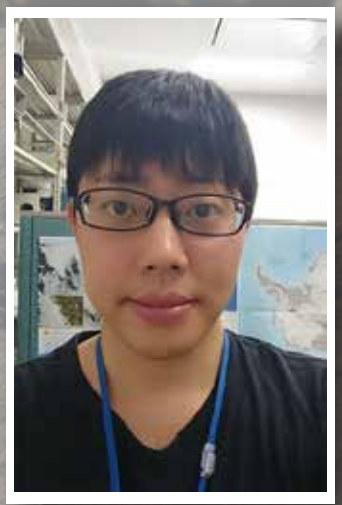
東京大学大気海洋研究所の小林英貴です。2018年春よりモデル班の特任研究員として着任しております。これまでの研究では、氷期-間氷期サイクルと呼ばれる過去の気候変動において、主に海洋の炭素循環の変化に起因すると認識されている、大気中の二酸化炭素濃度の変化要因に迫ることを目指し、海洋モデルを用いて、海洋内部の生物地球化学過程を含めた数値実験を行ってきました。領域の題目にもあるように、南大洋は巨大な物質のリザーバーです。そのため、南大洋がこの古気候研究の謎を解く鍵ではないかと考え、研究の過程において南大洋の変化が全地球規模の炭素循環の変化に及ぼす影響に着目してきました。これからの研究においては、モデル班のみなさまとの協力の中でこれまで取り組んできた研究を発展させるとともに、他班のみなさまのもつ豊富な観測的知見との積極的な比較を通して、既存の海洋モデルの改善や開発に関する議論も新たに進めていきたいと思っています。班の枠組みを越えてみなさまと切磋琢磨し、新学術「南極の海と氷床」の発展の一翼を担えるように取り組んでいきます。

大橋良彦（底層水班・東京海洋大学）



みなさまはじめまして、東京海洋大学の大橋良彦です。昨年の8月から底層水班のメンバーに博士研究員として加わりました。博士課程では、北極グリーンランドを対象に、氷河の融解がフィヨルドの水塊特性に与える影響に着目して研究を行ってきました。現在は、南極底層水の拡がりや循環時間スケールを研究のターゲットとして、フロン類や六フッ化硫黄といった化学トレーサーの分析・解析を進めています。化学トレーサーの海水中の濃度を調べることで、その水がいつ大気と接していたかを推定でき、底層水の循環時間スケールなどの定量的な理解につながります。これまで私は、化学分析を行った経験がなかったため、日々勉強の毎日です。今年の1月には、白鳳丸の南大洋観測航海に参加し、実際に化学トレーサー試料の取得・分析を行いました。来年の1月にも、再び南大洋観測航海に参加する予定で、どのような新しい発見があるか楽しみにしています。今後、新学術「南極の海と氷床」に貢献できるように研究に励んでいきたいと思います。これからどうぞよろしくお願いします。

柏瀬陽彦（底層水班・国立極地研究所）



こんにちは、国立極地研究所の柏瀬陽彦です。今年度から南極新学術・底層水班のメンバーになりました。よろしくお願いします。私はつい先日の第60次南極地域観測隊に参加し、南極底層水の形成域であるケープダンレー沖での海洋観測や係留系回収・設置作業などを行ってきました。が、普段は衛星リモートセンシングを用いて海氷の長期変動に関する研究をしています。南極底層水の形成に関して鍵となるのは沿岸ポリニヤと呼ばれる場所での活発な海氷生産です。沿岸ポリニヤでの海氷生産量を定量的に見積るためには、まず衛星マイクロ波放射計から薄氷厚分布を推定することが必要です。この薄氷厚を推定するための手法（薄氷厚アルゴリズム）は海域毎にそれぞれ研究されていましたが、それらを統合して高精度かつ汎用的なアルゴリズムを開発していきます。さらに複数の衛星データを組み合わせることで、本格的な衛星観測が開始した1970年代末から現在に至るまでの40年間での海氷生産量や底層水形成量の長期変動を明らかにすることを目指して頑張りたいと思います。

編集後記

新学術「南極の海と氷床」ニュースレター 3 号をお届けします。今号は、本格的な観測が始まった海洋観測について、底層水班・古海洋班・生態系班・探査班・モデル班（？！）のメンバーが参加した白鳳丸・海鷹丸観測の速報です。さらに、固体地球班の外国基地での観測や、公募研究の紹介と盛りだくさんの内容となっています！（A, O）

新学術領域研究（研究領域提案型）

南極の海と氷床

News Letter vol.3

発行・問い合わせ先

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518　東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp

発行日 2019.5.26

文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：
全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

南極の海と氷床

News Letter vol.4

南極氷床と気候システムのモデル研究

東京大学大気海洋研究所　小長谷 貴志

私が自身の研究を説明するときには、身近な気候の話から始めることにしています。まず気候とは、日々の天候を平均したようなもの、と説明しています。たとえば、日々の天候はさまざまでも、おおまかには毎年同じような季節変化があるのが1つの気候の例です。この気候が地球温暖化によって変わりつつあるのが今の時代です。例えば、福井では1年間を平均した気温は過去100年で1.5度上がりました。おおざっぱには、100年前の福井の気温は現在の酒田に相当するような変化が生じたといえます。日々の生活では実感しづらいものですが、西日本では冬の雪が減少してスキー場が閉鎖、夏は夜の高温で稲の作柄が悪くなったように、長い目で見れば生活に影響が出てきます。

地球温暖化がおきるしくみを説明するためには、地球をより広い状態、上空の大気や深海の状態までも含めた「気候システム」ととらえて理解することが必要になります。ちょうど日本の気候を考えるときに、地球規模の循環や、東アジア域の大気海洋循環によって影響を受けることを考える具合です。長い目で見た場合、地球が太陽から受け取る熱量と宇宙に放出する熱量がつりあうことで地球の平均気温がおおむね一定に保たれます。この状態から大気中の温室効果ガスが増えると、地球が宇宙に放出する熱量が少なくなり、より地球に熱がたまり気温が上がるのが地球温暖化の仕組みです。実際の気温変化の値とその分布を知るためには、赤道域の熱量を極域に運ぶ大気・海洋の流れの状態やその変化など、地球上の熱分布を決めている過程を考える必要があります。

冒頭の例に示したように、気温変化によって環境への影響が出るのが温暖化問題ですが、その一つが極域の氷床の融解です。氷床は陸上にふった雪が夏でも解けずに残り、長い年月をかけて氷となったものです。極域の気温が上がると氷が融解するようになり、その水は海に流れこむので海水の体積が増え海面が上昇します。2010年代は、世界で平均して年間およそ4mmの速さで海面が上昇しています。現在の南極の氷床質量の減少速度は海水準変化にして1mと推定されていますが、南極大陸には海水準を60m程度上げる量の氷が存在しますし、今後の温暖化によって短い時間で急激に氷床が失われる可能性があることが指摘されています。このような急激な変化の可能性は、海洋の流れや、生態系などにもあてはまります。つまり、温暖化によって生じる変化は気温だけでなくほかの地球環境への影響があり、そのいくつかは社会にとって急激になりうるものであることが問題点です。

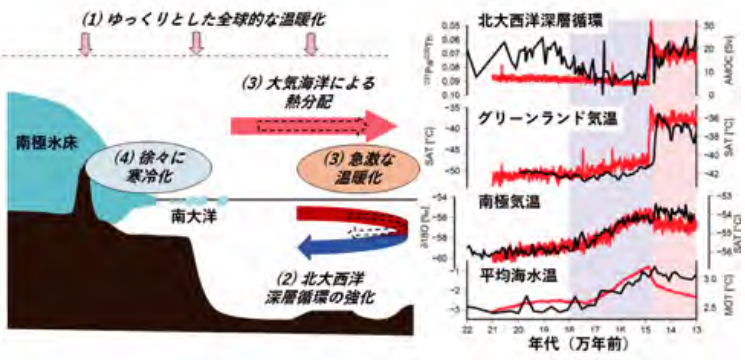


図2　**（左）**急激な北大西洋深層循環の変化による南極の気温変化過程を示した模式図。**（右）**気候モデルによで計算された北大西洋深層循環の強さと、各地の気温海水温の時系列データを、地質記録に基づく気候復元と比較した図。

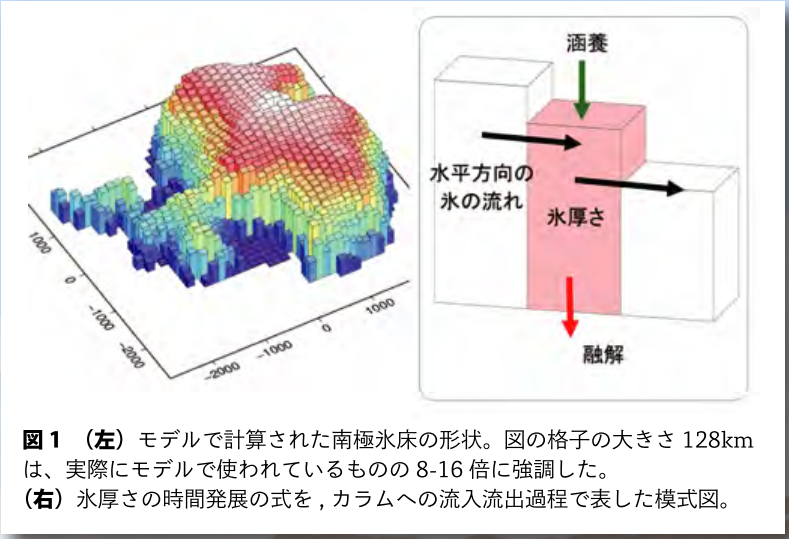


図1　**（左）**モデルで計算された南極氷床の形状。図の格子の大きさ 128km は、実際にモデルで使われているものの 8-16 倍に強調した。
（右）氷厚さの時間発展の式を，カラムへの流入流出過程で表した模式図。

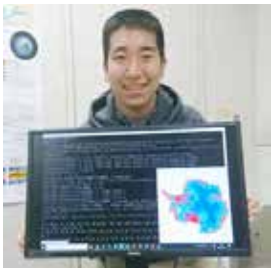
私は主に南極氷床の研究を行っていますが、中でも過去（古気候）に着目しています。古気候に着目する動機は主に2つあります。1つ目は、現在わたしたちが生きている世界を、地球史としての気候形成・気候進化からとらえたいというものです。2つ目は、何らかの外力によって大気海洋、氷床が形を変えるという地球の気候システムのしくみは、現在・過去という時代によらない物理過程と考えていることにあります。つまり、過去に生じた環境変動から現在と将来を理解するための手がかりを得られるという考えです。地球の歴史を過去にたどると現在よりも温暖な時代が存在します。その一つがおよそ13万年前の「最終間氷期」で、地球の気候はおよそ10万年周期の氷期・間氷期サイクルを繰り返しており現在は温暖な間氷期に相当しますが、1つ前の間氷期に相当するのがこの時代です。アイスコアや海洋堆積物から南極域の気候は現在よりも温暖だったということ、各地の古海岸線記録から現在より海水準が高かったことから、南極氷床が縮小していたと考えられています。

このような南極氷床の変動を理解するために、氷床モデルを用いて研究を進めています。ここでいう氷床モデルとは、南極大陸の地形と気候場のもとで達成される氷厚さの分布と時間発展を計算することで、氷床の形状を求めるモデルのことをいいます。氷床の形を決めている物理過程には、降雪による涵養、氷の流動、氷の融解過程などがあり、これらの過程を方程式（氷の質量保存則と流動則）で記述します。氷床を有限の大きさの格子に区切り、コンピュータを用いて方程式を解くことで氷床の形を計算します（図1）。現実の氷床の形を決める過程はもっと複雑ですが、ここでは詳細は問わずに氷の収支を気にしたモデル化を行っています。

気候モデル研究の特色は、現実の地球で起きる複雑な現象を理解する助けとして、知りたい現象を抽出して方程式という形で表現し、しくみを理解しようとするところにあります。モデルは、いわば地球を模し

た「実験装置」でもあります。たとえば、 現在からさらに気温が上がったときに、南極氷床がどれだけの速さで融解するかを現実の地球で知ることはできませんが、モデルではこのような計算が可能になります。ただし、計算結果のもっともらしさを確かめる方法が必要で、それがないと結果がどの程度信用できるかがわかりません。この部分に古気候研究の役割があり、私たちがどれだけ気候システムのしくみを理解したかを試す場が古気候であります。

過去の南極氷床変動要因を理解するためには、氷床を決めている気候状態、つまりは大気や海洋の状態を同時に考えることが必要です。その例として2019年に出版した論文(Obase & Abe-Ouchi, 2019, *GRL*)の主たるメッセージは、氷期から間氷期にかけてのグリーンランドの急激な温暖化は、ゆっくりとした温暖化が海洋深層循環を急激に変えることで生じることでした。この海洋循環の変化によって、本来南半球にたまるはずだった熱が北半球に運ばれ、南極では逆に寒冷化します(図2)。ここには、最初に紹介した地球温暖化による日本域の気候変化と共通するメッセージがあります。それは、地球をより広い状態で見ると、地球規模の気候変化が南極域の気候と氷床に影響を及ぼすものであることです。現在、この気候変化が南極氷床の融解史に与えた影響に着目して研究を進めています。全球気候形成における南極の役割とあわせた気候システムのしくみを理解していきたいです。

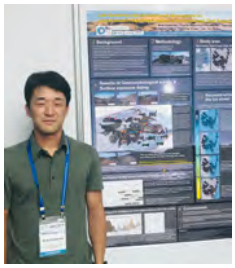

筆者近影（研究室にて）

[文献・参考資料]
Obase & Abe-Ouchi, *Geophysical Research Letters* (2019) 46, 11397-11405.
東京大学大気海洋研究所ホームページ https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/topics/2019/20191101.html

若手国際学会派遣事業報告（国際南極地学シンポジウム・国際第四紀学会）

総合研究大学院大学　川又 基人

国際南極地学シンポジウム(International Symposium on Antarctic Earth Science:ISAES)および、国際第四紀学会(International Union for Quaternary Research Congress:INQUA)に参加しポスター発表を行った。ISAESは南極の地学研究をテーマにした研究集会であり、INQUAは4年に一度開催される第四紀研究の全般を扱う研究集会であった(期間:2019年7月21日～2019年8月2日)。



ISAESでは南極の地学研究に関する様々な発表を聴くことができ、自身の研究内容(東南極宗谷海岸における氷床後退過程の復元)にとどまらない、南極全体の最新の研究動向について知ることができた。とくに活発に議論されていたのは、二酸化炭素濃度が現在と同程度以上(400～600ppm)だったと考えられ、今後の地球環境のアナログとしても注目されていている鮮新世温暖期における南極氷床の発達・融解メカニズムであった。研究地域としてはRoss seaやWilks land周辺では海底地形調査と堆積物採取が活発に行われており、陸棚上に流入する温暖水塊として近年注目されている周極深層水(Circumpolar deep water:CDW)をキーワードとして、氷床と海洋との関連性が活発に議論されていた。その中で海氷の減少がCDWの棚氷下への流入を誘発するとの指摘や、氷河性地殻均衡(Glacial Isostatic Adjustment:GIA)効果による地殻の隆起によってCDWの流入が抑えられる氷床融解の抑止効果などが指摘されておりとても興味深かった。一方、最終氷期最盛期(Last Glacial Maximum:LGM)以降の氷床変動の研究に関しては依然としてその重要性が指摘されていた。今回印象的だったのは、東南極に関しては単にLGM後の後退過程だけでなく、そもそもLGMの年代と期間についての疑問も提唱されていたことである。これは東南極における最終間氷期以降の氷床最拡大期がLGM(酸素同位体ステージ2)ではなかったとされる研究成果に端を発しており、東南極のそれぞれの地域において詳細な氷床拡大範囲とその時期を復元することが、氷床モデルやGIAモデルの高精度化・検証に重要であると再認識した。自身の研究は地形地質データの少ないDronning Maud Landの地形地質調査から氷床の後退過程を復元するものであり、まさに世界的に必要とされている研究であることを自覚した。INQUAでは南極に限らない第四紀をキーワードにした北半球の氷河・周氷河に関連する発表を数多く聞くことができた。学会中日にはGlacial Deposits in the Irish Midlands field tripに参加し、北半球氷床特有の融氷河性の堆積物、氷床の再拡大による変形した構造、および氷山起源のドロップストーンなど興味深い堆積構造を観察でき、南極とは異なる北半球氷床の復元の難しさ、面白さを認識した。実際に現地での露頭を観察できたこともあり、学会期間中の北半球氷床の復元研究に関しても理解が深まった。また表面露出年代に関しては、これまでの10BeからIn situ 14Cを用いた研究成果も目立っており、様々な地質学的イベントに対する年代の高精度化が図られていた。ポスター発表ではとくに南極の地形学が専門のDuanne White博士、南極におけるGIAモデリングを専門とするPippa Whitehouse博士、氷河地形と表面露出年代測定に詳しいRichard Selwyn Johns博士と話す機会が得られた。発表内容に関して、LGMに露出していた根拠とする基盤岩石の風化状態や、本研究においてLGMとしている年代値が具体的にいつなのかといった今後の論文出版において重要なコメントをいただいた。とくにRichard Selwyn Johns博士とは今年出版された表面露出年代測定の計算ツールに関する話ができ、疑問点があれば快く答えるとの言葉をいただいた。また他にも日本から来ている研究者とも新たに交流する機会があった。

これら二つの学会での参加・発表により自身の専門の地形学にとどまらない、氷河域周辺の最新の研究動向(出版物や研究状況)や自身の研究の立ち位置など明らかとなり、有意義な学会参加となった。本学会で発表した成果を基にした国際紙への出版を急ぎたい。

氷期の大気中二酸化炭素濃度低下における海洋炭素循環の役割

東京大学大気海洋研究所　小林 英貴

私は、気候学における大きな謎のひとつである、氷期-間氷期サイクルにともなう大気中二酸化炭素濃度変化のメカニズム解明を目指す研究をこれまで行ってきました。気候モデルを用いた数値シミュレーションを通じて、その物理的および生物化学的メカニズムを解明し、将来の気候変動において、特に海洋が果たす役割についての知見を得ることを目的としていて、地球温暖化問題などの社会的な要請が高い問題にも関わる重要な研究課題です。

氷床コアデータに含まれる気泡の解析から、最終氷期最盛期(LGM: Last Glacial Maximum)の大気中二酸化炭素濃度は、産業革命前の現代と比較して 100 ppm 程度低かったことが知られています。現代のような間氷期と比べ、氷期は寒冷で乾燥した気候で、陸域の炭素貯蔵も減少していたと推測されています。そのため、大気の 60 倍以上の巨大炭素リザーバーである海洋深層が、余剰の二酸化炭素を取り込んでいたと認識されています。大気-海洋間の気体交換で海水に溶けた二酸化炭素の一部は、海洋表層で植物プランクトンの光合成により有機炭素に変化し、食物連鎖・酸化分解を経て、無機炭素として深層に蓄積されます(生物ポンプ)。それらの無機炭素が海洋循環に従って輸送され、長い時間をかけて表層へと戻されることで、全球の海洋炭素循環が形成されています。氷期の海面水温低下は大気中二酸化炭素を下げる方向にはたらく一方で、大陸氷床の増加による海水準低下とそれに伴う海面塩分上昇は大気中二酸化炭素濃度の上げる方向にはたらくため、合わせて 15 ppm 程度の低下を説明するに留まります。残る変化は、海洋内部の生物過程や海洋循環、堆積過程の変化で生じたと考えられますが、諸過程の定量的な寄与について明確な答えは今なお出ていません。私たちの研究もこの変化メカニズムの解明に取り組んでいますが、その中でも特に「南大洋」の役割に着目してきました。

現代の南大洋は、中深層水が大気と通気する海域で、栄養塩利用効率が低いことが知られています。一方、多くの古気候復元研究により、LGM の南大洋の海洋環境が明らかにされてきました。南大洋の湧昇に影響する偏西風の強さは、LGM にほとんど変わらないか少し強かった可能性が報告されています。また、南大洋の海氷面積が現代と比べて 2 倍程度に張り出していたことや、南大洋が高塩・低温の深層水で占められ、放射性炭素同位体比 Δ^{14}C から算出した海水の年齢が現代に比べて 1000 年以上古かったことが報告されています。さらに、LGM には海洋へのダストの沈着が多いことが報告され、ダスト起源の鉄肥沃化により生物生産が増加していた可能性があります。栄養塩の指標となる δ^{13}C の鉛直勾配が大きいことや、南大洋深層の溶存酸素濃度が低下していたことも報告され、この考えを支持しています。以上の知見は、氷期の南大洋における効率的な生物ポンプと、鉛直的な水塊交換ならびに気体交換の抑制が、海洋深層への炭素貯蔵の増加をもたらした可能性を提示します。

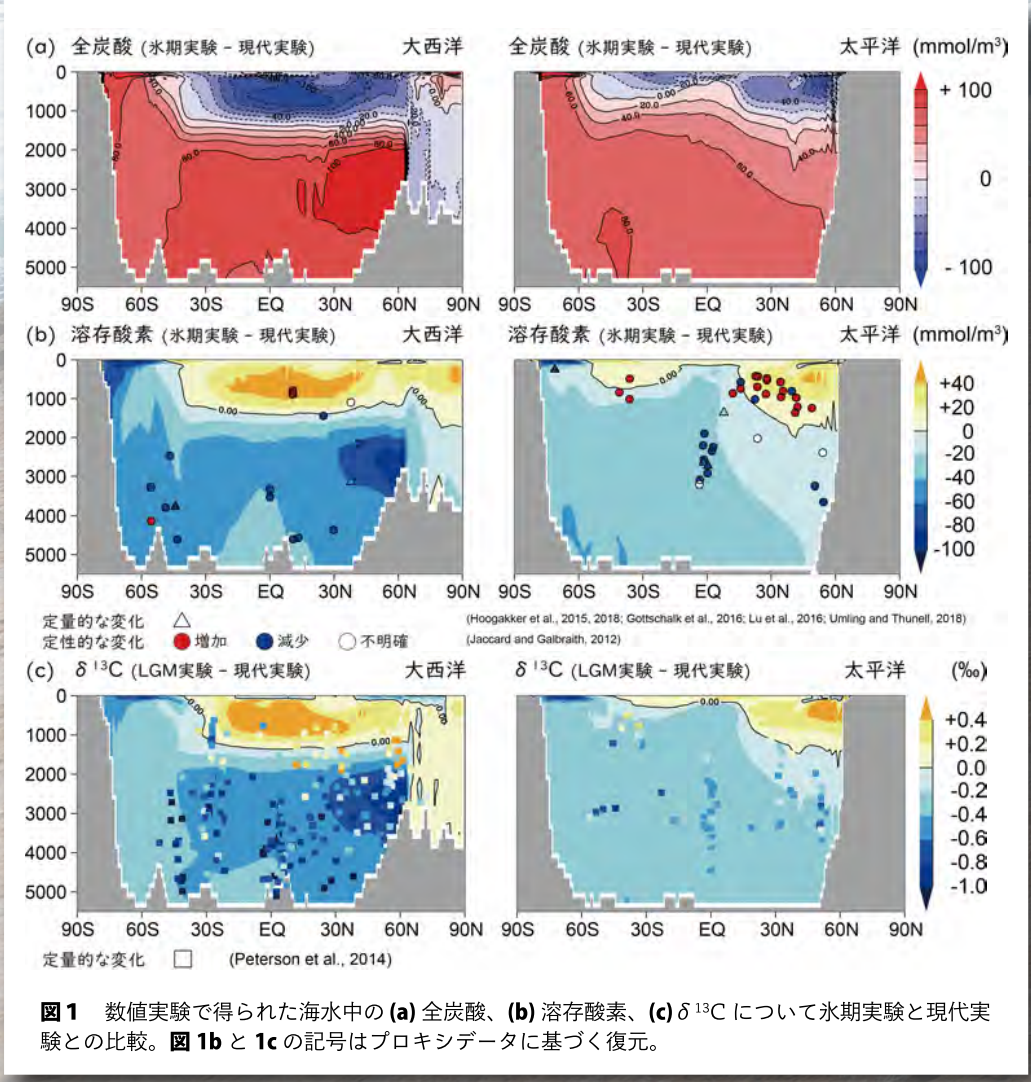


図 1　数値実験で得られた海水中の **(a)** 全炭酸、**(b)** 溶存酸素、**(c)** δ^{13}C について氷期実験と現代実験との比較。**図 1b** と **1c** の記号はプロキシデータに基づく復元。

私たちの研究では、全地球規模の海洋炭素循環を表現する「モデル」を用いて数値実験を行い、海洋の諸過程の変化が氷期の大気中二酸化炭素濃度に及ぼす影響を定量的に評価しています。これまでに行われた海洋大循環モデルによる研究は、海洋炭素循環の変化でデータが示す大気中二酸化炭素濃度の変化を十分に説明できていません。これらの研究は、古海洋復元から推測される氷期の南大洋の水塊特性を十分に表現できていない課題もあり、モデルが実際の過程を正しく表現していない、あるいは考慮できていないと考えられます。そこで私たちは、LGM の南大洋において復元された水塊特性を再現することを試み、その上で海洋炭素循環の応答を調べることで、大気中二酸

化炭素濃度変動に対する南大洋の諸過程の寄与を見積りました。

Kobayashi et al.（2015）において実施した氷期実験では、南極周辺の底層の塩分を古海洋データへ緩和するとともに、小さい鉛直拡散係数を与えて強い成層を表現することで、澱んだ深層により多くの炭素が蓄えられ、大気中二酸化炭素濃度が 47 ppm 低下しました。Kobayashi and Oka（2018）では、上記の南大洋の成層化に加えて、新たに構築した堆積モデルを用いて、炭酸塩堆積物と海洋炭素循環の相互作用（炭酸塩補償）の寄与を評価しました。南大洋で成層が強まると、深層の全炭酸濃度が増加しますが、それは同時に炭酸カルシウムの飽和度の低下をもたらします。その結果、海水中で溶解することなく堆積層に埋没する炭酸カルシウムが減少するため、海洋全体のアルカリ度が上昇し、より多くの二酸化炭素を海洋に取り込むことができます。南大洋の成層が強くなることで炭酸塩補償はより効果的に機能し、これらの過程を総合すると氷期の大気中二酸化炭素濃度低下は 73 ppm に達しました（図1a）。この氷期実験では、溶存酸素や $\delta^{13}C$ や $\Delta^{14}C$ の炭素同位体指標の再現性も向上することもわかり（図1b, 1c）、これまでの研究に比べて現実的なシナリオを再現することができました。

これまでの研究においては、氷期の南大洋における強い塩分成層と炭酸塩補償を考慮することが、その大気中二酸化炭素濃度の再現に対して重要であることを、数値モデルを用いて初めて定量的に示し、氷期の海洋炭素循環の理解に大きく貢献しました。近年の研究成果として、溶解度が高い氷河性ダスト起源の鉄の供給が、氷期の南大洋における生物ポンプの効率を高めることで、大気中二酸化炭素濃度の低下と、海洋深層の溶存酸素濃度の低下をもたらすことが報告されています（Yamamoto et al., 2019）。また、南大洋の深層水形成過程の現実的な表現は、多くの全球規模海洋大循環モデルで難しい課題ですが、適切なパラメタ化を導入することで、モデルの水塊特性の再現性を向上できる可能性があります。このような知見を取り入れることで、今後より現実的な氷期の海洋炭素循環の再現と、それに伴う大気中二酸化炭素濃度の低下メカニズムの解明に迫ることができると期待され、炭素循環を含む気候システムの変動メカニズムの解明の一翼を担うことができると考えています。

筆者近影（白鳳丸南大洋航海 KH-19-6 Leg4 にて、チリ南部のフィヨルド域を背景に）

[文献]
Kobayashi, Abe-Ouchi, Oka, *Paleoceanography* (2015) 30, 1202–1216, DOI: 10.1002/2015PA002786
Kobayashi & Oka, *Paleoceanography and Paleoclimatology* (2018) 33, 1206–1229, DOI: 10.1029/2018PA003360
Yamamoto, Abe-Ouchi, Ohgaito, Ito, Oka *Climate of the Past* (2019) 15, 981–996, DOI: 10.5194/cp-15-981-2019

若手国際学会派遣事業報告（ヨーロッパ地球科学連合大会）

高知大学海洋コア総合研究センター　松井 浩紀

南大洋インド洋区の海底堆積物を用いた古海洋研究についてヨーロッパ地球科学連合大会（EGU）で研究発表を行うため、本派遣事業に応募した。さらに学会を通じて広範なコミュニティから情報収集を行うとともに、研究打合せを行い自身の研究の発展に資する機会とした。EGUの主な研究発表は4月8日に始まり、私は「Sea level rise」や「The role of ocean circulation in glacial-interglacial climates」セッションを聴講した。古海洋研究で見落としがちな現在の海水準変動の観測情報や、南極前線に限らない海洋循環の過去の挙動について最新の情報を得ることができた。4月9日には東北大学の木下峻一氏とウィーン大学を訪問し、微化石を対象としたマイクロXCTの活用について研究打合せを行うことができた。同大学で「Experimental Approaches in Marine Biogeosciences」セッションのレセプションが行われており、EGUに参加する有孔虫の研究者と意見を交換することができた。4月10日は「Climate response to orbital forcing」や「Climate Change in the geological record」セッションを聴講した。地質時代の気候変動について高時間解像度のデータに基づく議論が行われており、今後の自身の研究を進める上で有意義な知見を得ることができた。4月11日は「The state-of-the-art in ice coring sciences」セッションを聴講し、古海洋研究のタイムスケールとも関わる氷期間氷期のアイスコア情報について理解を深めることができた。4月12日の「The Southern Ocean in a changing climate」セッションにてポスター発表を行い、過去15万年間の有孔虫群集に基づく南極前線の挙動について海外研究者（C. Fogwill氏、セッションコンビーナーのC. Turney氏を含む）から有意義なフィードバックを得ることができた。漂流岩屑や渦鞭毛藻の研究者とも直接議論する機会を得て、現在執筆を進めている論文の考察をさらに深めることができた。5月のJpGUにおいて南極前線のレビューと同ポスター内容の一部を発表する予定である。4月13日にはベルン大学のE. Amsler氏と2019年1月～2月に採取済みの南大洋の新規試料を用いた研究計画の打合せを行った。特に同氏が研究している南大洋の陸起源粒子の過去の挙動について私の発表データと比較を行い、将来の共同研究が期待できる古気候イベントと最適な試料について議論を行うことができた。今回、EGUを通じて多数の研究者と知り合い、または再会し非常に有意義な時間を過ごすことができた。南大洋・南極氷床に関する研究発表は複数のセッションにわたり、改めて関連分野の広さを認識するに至った。ヨーロッパを中心とした研究コミュニティの動向を調査できたことは重要であり、自身の研究活動にも大きな刺激を与えることができた。

若手研究者海外派遣事業報告（AGU Fall meeting 2019～オレゴン州立大）

国立極地研究所（日本学術振興会特別研究員 PD） 大藪幾美

2019年12月にアメリカのサンフランシスコで開催されたAGUに参加し、その後続けて領域代表の川村さんと共にオレゴン州立大学に2週間滞在しました。訪問の目的は、Christo Buizert 助教（フィルンの物理過程の専門家）からドームふじ氷床コアの気体年代推定に必要なフィルンのモデリングを学び、年代決定について議論することと、Edward Brook 教授（氷床コアの温室効果ガス濃度の専門家）とメタン濃度の分析手法や取得済みデータについて議論することでした。AGUは初参加でしたが、AMOCや過去のCO_2変動など、トピックに絞ったセッションが立てられており、興味深い発表がいくつもありました。私はアイスコアのセッションにおいて、ドームふじ氷床コアのO_2/N_2や最新のフィルン圧密モデル、年代計算モデルを用いたドームふじ氷床コアの年代と、二つ前の氷期最寒期の氷山流出イベントの可能性について発表しました。

オレゴン州立大学では、Buizert助教と現在進めているドームふじ氷床コアの年代決定を中心に議論をし、彼が構築したフィルンの圧密モデルを用いて気体年代の計算を実施しました。滞在中にはデータと良く一致する初期的な結果が得られました。現在もメールにて議論を続けており、より良い年代推定の方法を模索中です。

Brook教授とは、極地研でこれまでに取得してきたメタン濃度や、極地研におけるアイスコアの気体の測定手法について議論しました。私たちが取得したメタン濃度のデータは、出版済みの他のコアのデータとも整合的で、データの質に関して高く評価していただきました。さらに、今後の共同研究として、標準ガススケールやアイスコアの温室効果ガス濃度の信頼性を確認するための相互比較を実施することになりました。極地研で使用している標準ガスと、同一深度のアイスコアを極地研とオレゴン州立大学のそれぞれの測定装置で測定し濃度を比較するテストを実施します。この相互比較によりデータの信頼性が確認でき、さらなる高精度データ取得に繋がれば良いと思います。

オレゴン州立大にて。

クリスマス休暇と重なったにも関わらず、お二人には貴重な時間をたくさん割いていただき、非常に濃密で有意義な時間を過ごすことができました。この時間と経験が無駄にならないよう、ますます研究に励みたいと思います。最後に、貴重な機会を与えてくださった本事業の関係者の皆様と、海外共同研究参画の機会を与えてくださった川村代表に御礼申し上げます。

第3回南極若手勉強会報告

昨年の8月22日から25日までの4日間にわたって、東京大学大気海洋研究所を中心として、『第3回南極若手勉強会～公募研究申請にむけて～』を行いました。異分野の若手研究者がお互いの研究内容を学び、その関係性を理解した上で、学際研究についての考えを深める会として、5大学から総勢11人の学生・ポスドクが集まりました。すでに3回も会を重ねていることや、今回は特に本領域の公募研究が募集されるということで、公募研究の申請にむけた実際的な勉強会という目的もありました。前半は、本領域とも関係の深いIPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」が公表されたことで、その内容を共有し今後の研究の大きな流れを俯瞰するセミナーを開催しました。特に大学院生にとっては、IPCC報告書に実際に触れ、すでに深く関わる研究を実際に進めているポスドクの研究成果も併せて聞くことができ、貴重な機会になりました。また、科研費申請については、個々人の方向性や採択経験も含めた実際的なコメントや、将来的な共同研究についてざっくばらんに語り合うなど、積極的な意見交換ができました。

若手研究者海外派遣事業報告（メルボルン大学，南極気候生態系共同研究センター）

北見工業大学　佐藤和敏

目的：　オーストラリアのメルボルン大学と南極気候生態系共同研究センターに約1ヶ月滞在し、現地や海外の研究者と共同研究の議論を行いました。

成果：メルボルン大学では、南極大陸の温暖化の要因について、オーストラリア南東部に位置するタスマン海の昇温が影響していることを明らかにしました。これまでの研究では、高緯度の局所的な影響（海氷減少に伴う海洋からの熱供給の増加やフェーン現象など）や熱帯からの遠隔的な影響が議論されてきましたが、近年の昇温が顕著である南半球中緯度の海洋が影響していることを示したのはこの研究が初めてです。メルボルン大学では、受入研究者であるSimmonds教授だけでなく、Rudeva博士と解析結果についての議論を行いました。派遣前に実施した解析では、上記のメカニズムを説明するのに十分でなかったため、Rudeva博士が作成した独自の低気圧トラックデータを提供してもらい、上記のメカニズムを立証しました。これらの解析結果は、Simmond教授やRudeva博士との共同研究として論文にまとめ、査読付き国際誌に現在投稿中です。また、これらの研究成果をさらに補うため、別の解析手法を用いた共同研究を今後も行うことになりました。

メルボルン大学での関係者の集合写真。右から受け入れ研究者のSimmonds 教授、申請者、Rudeva 博士、博士課程の李さん。

南極気候生態系共同研究センター（ACE CRC）では、ACE CRCのAlexander博士やカンタベリー大学 のMcDonald教授とこれまでの研究や今後の共同研究の議論を行いました。主に議論を行ったのは、2017年12月から2018年1月の南極航海で報告者自身が観測した雲や低気圧の初期解析の結果についてです。これらの初期解析では、南極大陸周辺に存在している表面水温が急激に変動するポーラーフロントが雲の形成や低気圧に影響している可能性を示していました。そこで今後の共同研究では、他の年に取得された観測データも提供してもらい、解析事例を増やすことになりました。特に、ニュージーランドで雲やエアロゾルを対象とした「Clouds & aerosols over the Southern Ocean」というキャンペーンにより雲の観測が実施されており、雲に関する複数のデータセットが使用できる可能性があります。

メルボルン大学から見たメルボルン市内の様子。

今回の滞在では、計画していた共同研究を進展させるだけでなく、オーストラリアやニュージーランドで実施・計画されている研究を把握することでさらなる共同研究の可能性を模索することができました。また、南極の大気・海洋・海氷研究者が大勢いるオーストラリアやニュージーランドでは様々な研究が実施されており、見識を広げることのできた非常に有意義な滞在でした。

今後の主な行事予定

- 3 月 27 日　：若手研究者・学生を対象とした南大洋・南極研究集会 @ オンライン会合（国立極地研究所ほか）
- 5 月 3 日～5 月 8 日　：EGU General Assembly 2020 @ Vienna
- 5 月 24 日～5 月 28 日　：JpGU-AGU Joint Meeting2020 @ 幕張メッセ
  （セッション名：南大洋・南極氷床が駆動する全球気候変動 :M-IS15, 24 日：ポスター , 25 日：オーラル）
- 6 月 21 日～6 月 26 日　：Goldschmidt 2020 @ Hawaii
- 7 月 31 日～ 8 月 11 日　：SCAR 2020 Open Science Conference @ Hobart, Tasmania, Australia
- 9 月 14 日～9 月 16 日　：Joint PALSEA - SERCE meeting @ NY, USA
- 10 月 19 日～10 月 23 日　：3rd World Seabird Conference @ Hobart, Tasmania, Australia
- 7 月中旬～9 月　：拡大総括班会合，年次報告会，運営委員会等（開催調整中）

編集後記

新学術「南極の海と氷床」ニュースレター 4 号をお届けします。今号は、主にモデル班の研究成果の報告です。若手研究者の活躍盛りだくさんの内容となっています！ (A, O)

新学術領域研究（研究領域提案型）

南極の海と氷床

News Letter vol.4

発行・問い合わせ先

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp

発行日 2020.3.11

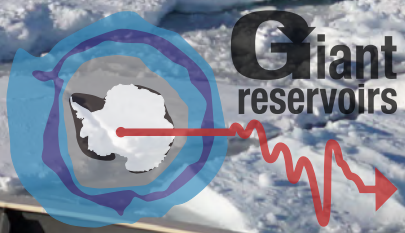
文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：
全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

南極の海と氷床

News Letter vol.5



©Takara Teramura

第 61 次南極地域観測隊で実施したトッテン氷河域海洋での ー氷床ー海氷の総合観測

北海道大学低温科学研究所　青木　茂

南極氷床は地表面付近にある淡水の7割を貯蔵しています。ここ20年ほどの人工衛星観測の結果から、西南極氷床が加速度的に流れ出し、海面上昇に寄与している、と考えられるようになってきました。近年になって、西南極だけでなく東南極にも氷が減り始めている場所があることに国際的な注目が集まっています。それがトッテン氷河の流域です。トッテン氷河流域の氷が全て流出すると、地球の海面は約４ｍも上昇するといわれています。

しかしながら、これまでにこの海域で実際に調査を行ったのは、2010年代も半ばをすぎてから、アメリカとオーストラリアのグループだけでした。しかも、厚い海氷に阻まれたため、彼らが到達できた場所は限られていました。そのため、サブリナ海岸とよばれるこのあたり一帯の海底地形や海の水温や流れの実態はどうなっているのか、重要な要素はまだよく分かっていません。そこで、第61次南極地域観測隊の主要なターゲットは、トッテン氷河と近傍の海洋へ挑戦するビッグプロジェクトに定められ、私はその隊長を任されました。

今回のトッテン観測のため、海の流れや水温などを測る海洋物理チーム、海底堆積物から過去の水温変遷の復元をめざす古海洋研究チーム、海と海底での生態系を調べる生物チーム、海底地形を明らかにする地形チーム、そして氷河の上から氷厚をはかるチームと、いままでの新学術領域を網羅するような多分野連合が結成されました。大陸沿岸一帯が今回のターゲットですが、調査の焦点となる場所は海氷をかきわけたこの海域の西の奥に位置するトッテン氷河の前面です。61次隊では、昭和基地へ向かう往路と復路にこの海域に立ち寄り、観測を行うことを計画しました。こうした海を中心にした往復路の観測は、日本の観測隊の歴史の中にもほとんど例がありません。

往路の12月の天気は穏やかで、「しらせ」は大陸の近くの氷の隙間に出現した水路を利用してトッテン氷河に向かって西に進みました。西への道すがら、ヘリコプターを縦横無尽に展開して海洋観測プローブを落とすことで、船がいかない場所でも海洋調査を行うとともに、未知であった水深の情報を得ることができました。もちろん、「しらせ」を使った

観測風景

トッテン氷河

海洋観測も順調にすすみました。海の水温や流れの係留系観測もスタートしました。とりわけ、毎日のように海底堆積物が順調に取得でき、この海域では初めての貴重な試料を蓄積できました。しかし、肝心のトッテン氷河の前面はまだ厚い定着氷でおおわれており、ここでの観測は復路に行うことにして、いったん海域を離れました。

昭和基地からの復路にあたる２月後半は、秋に向かって天気が悪くなってくる季節で、雲が多く風も強まります。また我々がこの海域を離れていた1月の間に、南に張り付いていた厚い定着氷が運悪くはがれて流れ出し、大陸縁の海には厚い氷盤が密集し、夏には空いていた水路もほとんど閉じてしまいました。

復路は2月18日に到着し、夏のように大陸縁からアプローチを開始するも、今度はほとんどすすめないどころか、進路を変えるだけでも半日かかるような氷況でした。他の観測ラインでもやはり思うように氷河のほうへはすすめません。時には強風が吹いて、海氷のなかで停滞せざるを得ませんでした。私たちは、毎日天気をにらみつつこの海域を走り回り、できる限りの観測を進めつつ、好機が到来するのを待ちました。

すると、2月29日頃から大陸から強い風が吹きおろしはじめ、急に氷河前面から氷が流れ出し始めました。私たちもその強烈に冷たい風でかなり北に流されましたが、風がひと段落してみると望んでいた観測地点にあった氷もきれいさっぱりなくなっていました。おかげで、寒さに凍えながらも、ようやく待ち望んでいた場所での観測をすることができました。

61次隊での観測のタイミングに復旧がまにあったマルチナロービームは最大限に活躍しました。船がすすむ場所場所で新たな情報が得られ、船で走ることが成果に直結しました。大陸に近い場所では氷河が削ったような地形の姿があらわになる一方、その沖側には深いお盆のような地形が広がっていました。大陸棚の縁のところの様子もかなりわかりました。そして、こうしたお盆のような深みや無数の谷の深部にはことごとく暖かい水が存在していることが分かりました。加えて往路に設置した2つの係留系を復路で回収することができ、また新たに氷河の前面に係

留して観測を始めることができました。この系を回収する日を心待ちにしています。詳しいデータの解析にいま取り組んでいる真っ最中です。

今回のもう一つの大きな成果は、堆積物コアや底質、生物のサンプルがたくさんとれたことです。こうしたサンプルがこの海域で取得できたのももちろん世界で初めてのことで、今後の研究の進展が大いに期待されます。

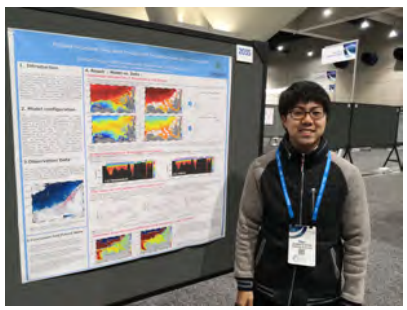
集合写真

文字通りの海図のない航海でたいへんな部分も多かったですが、竹内艦長率いる「しらせ」乗員のみなさんが素晴らしいパフォーマンスで無事に成功に導いてくれました。そしてこの計画を実現するために奔走していただいた極地研南極観測センターの皆さんと観測隊、その全員が一丸となって得られた成果です。私自身、このように探検的な観測に臨めてワクワクする思いでした。

昭和基地で観測を続けている61次越冬隊も、地球環境の監視という面で欠かせない役割を担っています。地球規模に影響を及ぼす場所の実態を明らかにしその状態を監視すること、それによって将来の地球環境の変化を予測すること、そうした点に南極観測の今日的な意義があるのだと思います。

若手国際学会派遣事業報告（Ocean Sciences Meeting 2020）

北海道大学大学院　瓢子 俊太郎



米国カリフォルニア州で開催された国際学会Ocean Sciences Meeting 2020に参加し、南極海に位置するベイリングスハウゼン海における棚氷融解に関するポスター発表を行いました。また、多くのセッションに参加することで海外研究者と面識をもち、今後の研究の幅を広げる機会になりました（期間：2020年2月15日～2月23日）。

初めての国際学会発表であったため、かなり緊張しましたが、練習をしてきた甲斐もあり、発表が始まるとスムーズに進めることができました。ポスター前には常に海外研究者の方々が来て下さり、発表時間中は、時間を持て余すことがほとんどありませんでした。限られた時間ではありましたが、自身の研究を多くの研究者に発表することは、自分の研究に対する自信につながりました。また、自分がどんな研究をしているかを伝えるために、学会に参加する重要性を認識しました。また、修士1年という早期での発表でありましたが、学会発表で示す内容を早期に決めることで、発表までの期間、計画的に研究を進めることができました。

この国際学会では、多くの海外研究者と面識を持つこともできました。発表をきいて下さった研究者の中には、自分の研究対象海域であるベイリングスハウゼン海についての研究をしている方もおり、情報共有をすることもできました。また、現在、世界に先駆けて、ベイリングスハウゼン海の研究を行っているカリフォルニア工科大学の研究グループ（Prof. Andy Thompsonら、チーム名称はTABASCO）の食事会にも参加させていただきました。現段階で、共同研究の模索とまでは言えないと思いますが、研究の最前線にいる方々とお会いできたのはとてもいい経験になりました。

この学会においてベイリングスハウゼン海に関する研究は、2019年夏の観測データを用いた大陸棚上のCDWの流入経路に関するものや、ベイリングスハウゼン海を西向きに流れる南極沿岸流がどのように形成されるのかといった研究などが発表されていました。周辺海域と比較して、まだまだ研究が進んでいないベイリングスハウゼン海ですが、現存する観測データをうまく使って、理解を深めようとする研究者の姿勢を強く感じました。今回得た"国際学会での発表"や"海外の研究者との交流"などの経験は自分の中でとても大きなものになりました。それは、研究だけを単に深めようと思うのではなく、研究を広げるためにネットワークを構築するには、海外の研究者とコミュニケーションをとることが私にとって重要であると気付くものでした。今回の経験を大切にし、今後の研究を進めていきたいです。

現地調査と数値モデルを駆使した南極氷床の変遷に関する研究

国立極地研究所　石輪健樹

私は主に古環境学の分野で研究を進めており、氷期の全球的な気候変動に興味を持っています。博士課程時は低緯度域の海底堆積物コア試料を対象とした全球的な海水準変動をはじめとする古環境復元が研究テーマでした。現在は高緯度域の南極氷床を研究対象域としています。南極氷床は将来の温暖化による融解が危惧されていますが、長期的な時間スケールの変動を追うためには地質学的記録やモデルシミュレーションから過去の南極氷床変動史を復元する必要があります。「最終間氷期（約12万年前）から氷期を経てどのような過程で南極氷床が現在の状態に到達したか」を研究課題とし、現地調査で取得した地質・地形学的データと試料の分析およびGIAモデル（後述）の解析を主なアプローチとして、研究を進めています。

南極氷床の変遷を復元するためには海水準変動の記録が重要になります。海水準変動の復元は主にモデルシミュレーションによる手法と地質学的データを用いる方法があります。氷期－間氷期サイクルにおいて大陸氷床は消長を繰り返し、それに伴い全球的な海水準は変動します。「過去の海水面が現在からどれくらい変化したか」を表す指標を相対的海水準といいますが、その振幅および時間スケールは地域によって異なります。それは大陸氷床の消長や海水量の変化に伴う地球表層の荷重変化により、隆起や沈降が引き起こされるためです。この効果はGlacial Isostatic Adjustment（GIA）と呼ばれます。GIAモデルは海水面が等ポテンシャル面に位置することを利用し、ある地域の相対的海水準を計算します。その際、球殻構造を仮定した地球の内部構造と空間的・時間的な氷床変動史がGIAモデルの入力値として必要になります。相対的海水準は堆積物試料からも復元（ここでは観測値と呼びます）が可能であるため、GIAモデルの計算値と観測値の比較により入力値である地球の内部構造と氷床変動史に制約が可能です。

約2万年前は最終氷期最盛期と呼ばれ、大陸氷床の成長により全球的に海水準が約130m低下し、南極氷床も現在より海水準換算で10–20mほど氷床が多く存在していました（Clark and Tarasov, 2014）。最終氷期最盛期における南極の最大氷床量と現在の状態に至る過程は時空間的な地質学的データの不足により、十分に復元されていません。GIAが数万年から数百年の変動スケールを持つため、現在の氷床量の推定には氷床下の大陸地殻のGIAによる上下動の評価が不可欠です。しかし、前述のように約2万年前から現在の南極氷床変動史は十分に復元されておらず、現在及び将来の南極氷床質量収支の正確な推定の妨げになっています。

図1は昭和基地があるオングル島の過去6万年間の相対的海水準変動史を示しています。最終間氷期と最終氷期最盛期は観測値が欠如しており、約3万年前と過去1万年間に地質学的記録が集中しています。しかし、約3万年前は地質学的記録から得られた値とGIAモデルの計算値に乖離があります。この乖離には様々な要因（北半球の氷床量の見積もり、地球の内部構造など）が考えられますが、私はGIAモデルの入力値である南極氷床変動史がこの乖離の主要因であると考え、氷期の南極氷床変動史について研究を進めています。最終間氷期から最終氷期最盛期に至る過程で南極氷床は成長しますが、その氷床成長の時空間分布について200近くのパターンの計算を行いました。従来の説では南極氷床は最終氷期最盛期に最大量に達した可能性が示されていましたが、この研究では東南極の一部では最終氷期最盛期よりも前の時期に最大量に達していた可能性が示唆されました。この結果は、氷期の南極氷床変動史を解明する上で重要な成果であると考えています。

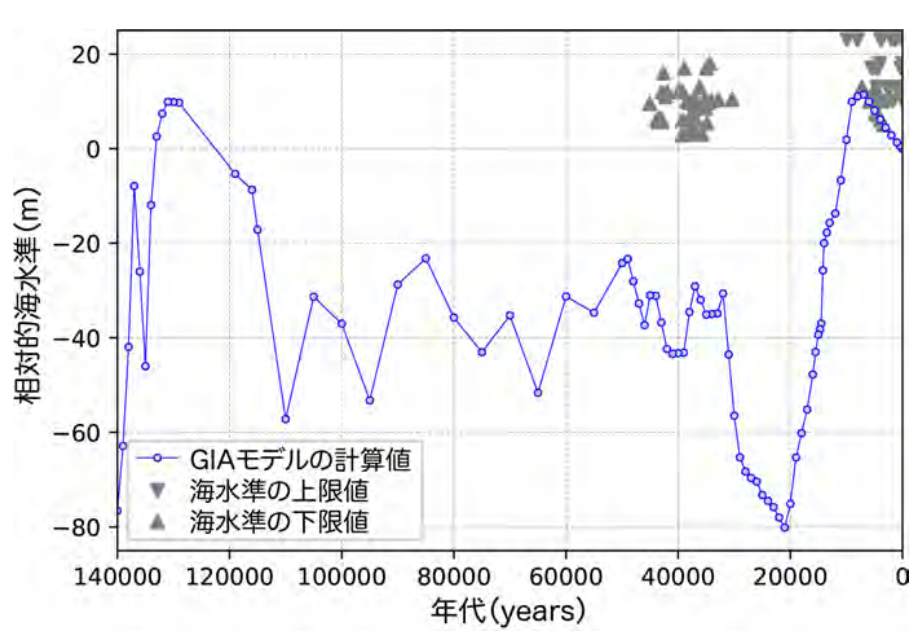


図1　オングル島における過去 14 万年間の相対的海水準変動史

私は第61次日本南極地域観測隊に参加し、重点研究観測「南極から迫る地球システム変動」のサブテーマである「地球システム変動の解明を目指す南極古環境復元」の一環である地形調査を担当しました（図2）。この調査は最終間氷期（約12万年前）から現在の南極氷床変動史の復元に不可欠な地形学・地質学的データを取得することを目的として実施されました（石輪他、南極資料、印刷中）。オングル島から南20kmに位置するラングホブデでは、極域の調査に特化したボートを利用し、浅海域の海底地形を測量しました。その結果、ラングホブデ近傍の浅海域では浅海域の堆積物採取により最終氷期最盛期から現在にかけて海水準変動の復元が可能であることが示唆されました。また、ラングホブデのぬるめ池では約3mの湖沼堆積物コア試料の採取に成功し、現在、過去の1万年間の相対的海水準の復元を進めています。西オングル島では地中探査レーダーを実施し、数メートル以上の海成堆積物があることが判明し、今後の陸上調査で最終間氷期の海水準データの取得が期待され

ます。2020年3月に帰国して以降、私は現地調査で取得した地質・地形学的データおよび堆積物試料から相対的海水準を復元する研究を進めています。引き続き、試料分析およびGIAモデルの双方からアプローチし、最終間氷期から現在に至る過程で南極氷床が全球的な気候システムの中で果たしてきた役割について解明していきたいと考えています。

図 2　（左）ぬるめ池の湖底地形測量風景。（右）ぬるめ池近傍調査の集合写真

図 3　筆者近影（ラングホブデ露岩域にて）

[文献]
Clark, P., Tarasov, L. (2014). Closing the sea level budget at the Last Glacial Maximum Proceedings of the National Academy of Sciences 111(45), 15861-15862. https://dx.-doi.org/10.1073/pnas.1418970111
石輪健樹, 徳田悠希, 板木拓也, 佐々木聡史, 第61次日本南極地域観測隊における宗谷海岸域の地形調査の報告, 南極資料, 64, 330-350, http://id.nii.ac.jp/1291/00016229/

新学術領域研究「南極の海と氷床」2020 年度全体会議の報告

2020年8月11日（火）に南大洋新学術の全体会議を、そして翌日の12日（水）に拡大総括班会議を開催しました。本来、今回の全体会議は今年の4月に秩父（いこいの村ヘリテイジ美の山）で開催する予定で準備を進めて参りましたが、世界中を覆うコロナ禍の影響により開催を断念せざるを得ませんでした。そして、オンライン（Zoom上）会議として仕切り直し、改めて8月に開催することにしたのです。しかし、我々にとってオンライン会議は初めてのトライでした。そのため，混乱を避けるべく日程を短縮し、さらに発表の大部分を事前収録動画として、事前にそれらを閲覧してもらうというスタイルをとりました。この結果，会議当日は大きな混乱もなく、会議システムを担当した外部スタッフを含めて、最小限の事務局メンバーで運営することができました。

今回の全体会議には、領域関係者計121名（うち学生14名，ポスドク23名）と、当初の予定より多数のメンバーに参加頂きました。そして、各班からの研究計画の報告や目玉となる研究発表、そして昨年度終了した第1期公募研究と新しく始まった第2期公募研究など、計44題の発表が行われました。はじめてのオンライン会議ということもあり、発表後の議論にはややぎこちない部分もありましたが、事前収録動画への質問や、チャットを使ったコミュニケーションなど、従来の全体会議にないスタイルでの議論も並行して進み、大変新鮮な経験となったと思います。とくに、オンライン会議の一番のメリットは、日本中に広がっている我々新学術のメンバーが、旅費の心配なく参加できた点にあったと思います。一方、リアル開催と比較すると、直接会って議論ができない点など、やはりオンライン会議特有のデメリットもあったかもしれません。学会関係の多くのオンライン会議でも同様だと思いますが、これまでの全体会議では日中の講演や質疑応答について、食事や休憩時間、そして夜の懇親会などを通して議論が継続し、翌日には次の研究計画へとブラッシュアップされていくような、ダイナミックな展開はなかったと思います。この点、オンライン会議には多くのメリットもありますが、この状況が長期化すると徐々にデメリットが顕在化してくるのではないでしょうか。

我々の新学術研究も4年目を迎えて、研究成果の取りまとめに向かうタイミングとなりました。南極観測事業を始め、今年度のフィールドワークは大きな影響を受けていると思います。ただ、幸いな事に各研究班の中核をなす計画については、昨年度までにフィールドワークを終えているものが多く、著しい影響を受けることはなさそうです。しかし、いまだコロナ禍の先行きは不透明であり、今後の全体会議および拡大総括班会議についても、残念ながら当面はリアル開催が困難な状況が続くでしょう。しかし、立ち止まってばかりはいられません。オンラインのメリットを活かしつつ、メンバー一丸となって新学術の取りまとめに向かって進んでいきましょう。

©Takara Teramura

東南極の陸棚へ暖かい「周極深層水」を運ぶ時計回り循環

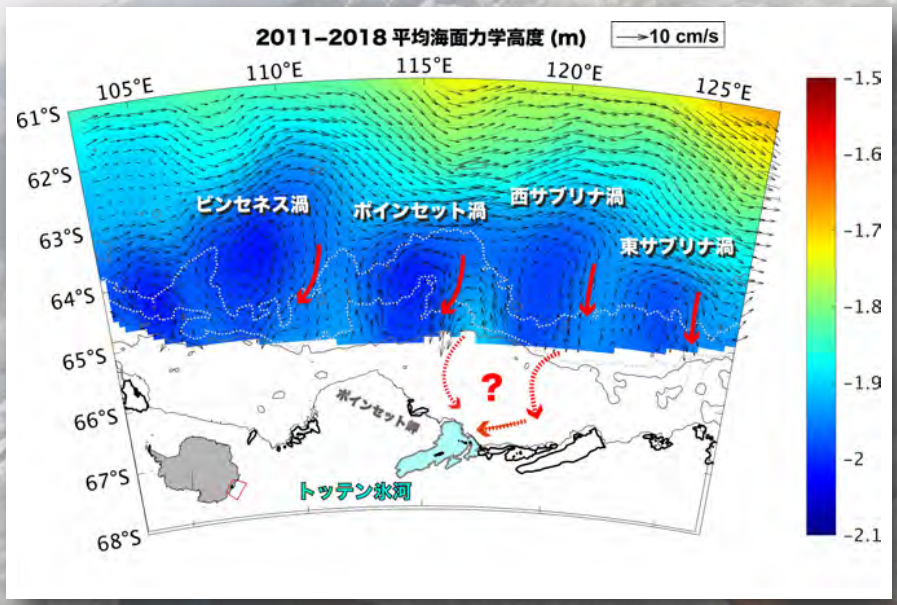
東京海洋大学学術研究院　溝端浩平

地球温暖化による海水準上昇が最近の数十年で加速しています。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は2019年に発行した海洋・雪氷圏に関する報告書で、この加速の理由として、南極やグリーンランドにおける氷床消失の速度増大を挙げています。一方で、地球温暖化に対する南極氷床の質量消失の応答については不確定な部分があります。

現在、南極氷床の質量消失過程についてはカービング（氷河氷床が海洋に氷山を分離する現象）と棚氷の底面融解が挙げられ、後者は特にMarine Ice Sheet Instability（海洋氷床の不安定性）として上述の報告書でも大きく取り上げられています。主に西南極において「沖合から流入した暖水による底面融解」と「融解に伴う氷床の海洋への流出」の連鎖が指摘されてきましたが（e.g., Rignot et al., 2014）、近年では東南極のトッテン棚氷や白瀬氷河で海洋の暖水流入に端を発する底面融解が示唆されています（Li et al., 2016; Hirano et al., 2020）。これらの底面融解をもたらす暖水は、もともとは南極沿岸から離れた沖合、しかも深度約300m以深に存在する「周極深層水」が変質したものです。

さて、亜表層に暖水があるのは南極海だけでしょうか？実は、北極海にも太平洋夏季水という暖水がおよそ深度50m～100mに見られます。太平洋夏季水の流入は表層混合層の温暖化につながり、北極海の海氷形成量を減少させます。つまり、両極域海に存在する亜表層の暖水は、地球上の氷を減少させる極めて重要な共通点なのです。北極海・南極海において、氷の減少への影響という観点でこれらの暖水を論じる場合、最終的には熱量として扱う必要があります。しかし、現場観測が他の海洋に比して圧倒的に不足する極域では、いつどこにどれだけの暖水があるのか不明な状態です。そこで真っ先に必要な情報は暖水を運ぶ海洋循環（海の流れ）です。通常、海洋循環を把握する際には現場観測や衛星データ解析を行います。しかし、極域の海では海氷によって観測可能な海域・季節が限定されます。また、宇宙から海氷に覆われた海を観測することが困難なので、一般的な衛星データは海氷域で「データなし」となります。北極海の研究をするようになって以降、海氷下の海の様子がわかる衛星データにはなにがあるか？と頭の片隅で考え続けてきました。そんな中、カナダ砕氷船による観測航海中にあることに気づきます。宇宙からは全面結氷しているように見えている場所でも海面が露出する海域が点在しているのです。そこで海氷の厚さを計測する衛星CryoSat-2による観測データから、海面が露出する海域のみの海面力学高度（静止した仮想的な海面を基準とした海面の凸凹）を導出して空間補間を行うことで、最終的に海洋循環を求めることを可能にしました。

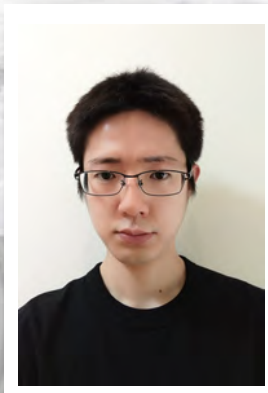
新学術領域の公募研究では同様の手法を応用し、沖合から東南極のトッテン棚氷まで周極深層水を運ぶ海洋循環を調べています。トッテン棚氷を含む東南極の沖合における海洋循環の詳細は不明でしたが、トッテン棚氷の沖合に「100～200kmスケールの時計周り循環」が定在していることを明らかにしてきました（図1, Mizobata et al., 2020）。海面力学高度からは海洋表層の流れを求めることしかできませんが、現場観測からこの時計回り循環の流速構造は海面～深度1000m付近まではほぼ一様であることもわかりました。現場観測ではさらに時計回り循環がその東側で暖かい周極深層水を陸棚方向へ運ぶことも確認しました。つまり、これらの定在する時計回り循環は、恒常的に暖かい周極深層水を陸棚へ運び続けており、氷河・氷床・棚氷の底面融解と海水準上昇に寄与すると考えられるのです。そこで、2020年度から始まった公募課題では、まず氷河氷床の底面融解と海水準上昇を理解・予測する上で必要不可欠な時計回り循環の成因と変動要因の解明に挑みます。実は、時計周り循環は成因と変動要因について、いくつかのヒントを提示しています。それは「循環強度を風応力（風が海面をこする力）で説明できないこと」と「循環が海嶺（海底山脈）の東側で定在すること」です。海鷹丸による観測から、時計回り循環の構造を決定する水塊の一つは海嶺に沿って流れる南極底層水であることも次第にわかってきました。これらは、大気ではなく「海洋そのもの」が時計回り循環の形成・変動をもたらしていることを暗示しており、係留系観測や衛星データ解析により海洋に起因する時計回り循環の形成・変動要因を明らかにすることができると考えています。この公募課題ではもう一つ明らかにしたいことがあります。それは沿岸域の海洋循環です。海氷が密集する沿岸域では海面露出域が少なく、衛星1基では利用できるデータはまばらにしか存在しないため、海面力学高度を導出できません。そこで、複数の衛星高度計観測・海氷運動データ・氷山追跡データを駆使し、沿岸域の海洋循環と周極深層水の行方の理解を進めます。2つの課題を抱えてはいますが、底層水班やほかの公募課題とも密に連携し、氷床―海洋相互作用の実態解明や南極環境システム学の創成に貢献できるよう邁進するつもりです。



[文献]
Hirano, D., Tamura, T., Kusahara, K. et al. Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. Nat Commun 11, 4221 (2020). https://doi.org/10.1038/s41467-020-17527-4
Li, X., E. Rignot, J. Mouginot,and B. Scheuchl (2016), Ice flowdynamics and mass loss of TottenGlacier, East Antarctica, from1989 to 2015,Geophys.Res. Lett.,43, 6366–6373,doi:10.1002/2016GL069173.
Mizobata, K., Shimada, K., Aoki, S., & Kitade, Y. (2020). The cyclonic eddy train in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean as revealed by satellite radar altimeters and in situ measurements. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125, e2019JC015994.
Rignot E., J. Mouginot, M. Morlighem, H. Seroussi, & B. Scheuchl, Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011, Geophysical Research Letters, 41, 3502–3509, doi:10.1002/2014GL060140.

新メンバー紹介！

入江芳矢（固体地球班・国立極地研究所）



はじめまして、国立極地研究所の入江芳矢です。今年度より固体班の特任研究員として着任しました。これまで、氷床荷重変動に伴う固体地球の粘弾性応答（GIA）の数値シミュレーションを用いて、約6億年前のスノーボールアース（全球凍結）現象が引き起こした海水準変動を再現する研究を行ってきました。この研究により、当時の地球内部の粘弾性構造と氷床変動史の制約や、GIA現象の基礎的な理解の深化ができました。固体班では、現在の南極周辺域においてGIAによって引き起こされている重力場変動に着目して、数値シミュレーションと重力衛星データ解析を進めています。このようなGIAによる重力場変動を評価することは、近年の地球温暖化により融解が加速している南極氷床の変動を正確に見積もるために重要となります。これまでの研究とは対象とする時代が大きく異なるため理解が不足していることが多いですが、固体班や他班のみなさまと積極的に議論し知見を深めていければと思います。新学術に貢献できるように研究を進めていきます。これからよろしくお願いいたします。

Vigan Mensah（底層水班・北海道大学低温科学研究所）

I am Vigan Mensah, a postdoctoral researcher currently belonging to the Institute of Low Temperature Science (ILTS) in Hokkaido University, which I joined in the summer of 2017. Prior to coming to ILTS, I belonged to National Taiwan University where I took my Ph.D. in physical oceanography. Since arriving in ILTS, part of my research works have been focused on the Sea of Okhotsk and Oyashio, based on hydrographic data and satellite observation. As part of GRantarctic, I have recently shifted my research topic, focusing on the Cape Darnley Polynya (CDP) region in East Antarctica, using a regional, coupled ocean-ice configuration of the Massachusetts Institute of Technology global circulation model (MITgcm). With Prof. Ohshima and Prof. Nakayama, our aim is first to reproduce the downslope flow of Dense Shelf Water along the continental slope and the formation of Antarctic Bottom Water (AABW) in the CDP region. This part of the plan is well underway, with a manuscript submitted to Ocean Modelling. Following this, we plan on studying the temporal variability of AABW production in the CDP area, as well as the effects of fine-scale topography on the DSW downslope flow. Our long-term aim is to include bio-geochemical processes in our model, so that issues such as biological productivity and atmospheric or biological carbon uptake can be evaluated through our model.

今後の主な行事予定

- 1 月後半　：拡大総括班会議（開催調整中）@ オンライン会合
- 3 月 17 日～3 月 19 日　：2020 年度年次報告会・運営委員会・拡大総括班会議（開催調整中）@ オンライン会合
- 3 月　：オンライン春の学校（開催調整中）
- 4 月 19 日～4 月 30 日　：EGU General Assembly 2021 @ vEGU21:Gather Online(#vEGU21)
- 5 月 30 日～6 月 6 日　：JpGU Meeting 2021 @ パシフィコ横浜ノース & オンライン
  （セッション名：南大洋・南極氷床が駆動する全球気候変動）

編集後記

新学術「南極の海と氷床」ニュースレター 5 号をお届けします。今号は、第６１次隊での観測報告、研究紹介、公募研究紹介です！ (A, S)

©Takara Teramura

新学術領域研究（研究領域提案型）

南極の海と氷床

News Letter vol.5

発行・問い合わせ先

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518　東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp

発行日 2020.12.25

文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

熱－水－物質の巨大リザーバ：
全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床

Giant Reservoirs - Antarctic

南極の海と氷床

News Letter vol.6

Giant reservoirs

東南極の暖かい海と氷床の相互作用：白瀬氷河やトッテン氷河

国立極地研究所　平野大輔

こんにちは、国立極地研究所の平野大輔です。本新学術領域には、底層水班の研究協力者および第二期公募班のメンバーとして、初期の頃よりお世話になっております。私は本領域の枠組みの下で、多くの方々との連携により、東南極の白瀬氷河やトッテン氷河域での海と氷床の相互作用に関する研究を進めてきました。紙面を少々お借りし、これまでに得られた成果について紹介させていただきます。

地球上の約9割もの氷が存在する南極は、いわば地球最大の淡水（氷）の貯蔵庫です。南極氷床の質量損失の加速が指摘され始めましたが、もし、南極氷床が全て融解すると、全球の海水準は約60mも上昇します。そして50m分に相当する大部分の氷は東南極に存在します。氷床・氷河は沿岸へ向かって流れ、その末端部は海に突き出し「棚氷（氷舌）」となって海に浮いています。棚氷は氷河の流れを抑制するという重要な役割を担っていますが、棚氷の下へ暖かい海水が流れ込むと、棚氷は底面から融かされて薄くなります。その結果、上流の氷の流動を抑制する力が弱くなり、海への氷床流出（損失）が促進されます。つまり、「周りの海」を知らずして、氷床の質量変動を正しく理解することはできません。大陸の上にあった氷が海へ流出すると、海水準の上昇に直結するだけでなく、世界を巡る大きな海洋循環の駆動力をも弱めてしまいます。このような背景のもと、私たちは主に南極地域観測の第Ⅸ期重点研究観測プロジェクト・サブテーマ2（通称・ROBOTICA）の下で、南極沿岸域での現場観測を進めてきました。

写真2.
アイスレーダーApRES回収後のひととき

白瀬氷河氷舌の上でのランチタイム
(撮影：青山雄一)

はじめに、底層水・モデル・探査班との連携による「白瀬氷河域での氷床海洋相互作用」に関する成果（Hirano et al., 2020）を紹介します。昭和基地のあるリュツォ・ホルム（LH）湾の奥には、

写真1. 白瀬氷河の末端付近で観測中の砕氷船「しらせ」
(撮影：小野数也)

南極で最大級の流動速度をもつ白瀬氷河が存在します。質量損失が顕著な西南極とは対照的に、大半の東南極沿岸域は結氷点に近い冷たい水で占められています。それゆえ、棚氷の融解強度は大方低いのですが、局所的に白瀬氷河域では高い値が推定されていました。しかし、LH湾は年間を通じて厚い定着氷に閉ざされ、世界屈指の砕氷能力を有する「しらせ」でさえ航行に困難を伴う難所ゆえ、「周りの海」を知る上で欠かせない湾内の船舶観測事例はほとんどありませんでした。第58次南極地域観測隊（2016―17年）では、過去約60年にも及ぶ日本の南極観測で初めて、LH湾口から白瀬氷河の前面にいたる大規模な海洋観測が実現しました（写真1）。また、白瀬氷河氷舌上に氷厚を直接計測できるアイスレーダー（ApRES）を設置し（写真2）、底面融解強度の長期データ取得にも成功しました。海洋観測データの解析を軸に、数値モデルや測地・雪氷学分野との融合研究を行い、海洋による白瀬氷河の融解プロセスを多角的に調べた結果、「沖合起源の暖水が、LH湾内の深いトラフに沿って白瀬氷河氷舌の下へ流入することで顕著な融解が生じていること、また、融解強度の明瞭な季節変動は卓越風の変動が湾内へ流入する暖水の厚さをコントロールすることで決まる」という一連のプロセスを提唱しました（図1）。LH湾の沖合は時計回りのウェッデルジャイヤの東端付近に位置し、この絶妙な位置関係が暖かい海を局所的に作り出す1つの背景要因であると考えられます。こうして、厚い海氷の下の、そして氷河前面の海の様子が現場観測によって明らかになり、白瀬氷河域での氷床海洋相互作用の理解に繋がりました。

続いてトッテン氷河に関する公募研究の成果です。トッテン氷河の流域には全球の海水準を3―4m上昇させる量に匹敵する莫大な氷が存在しますが、この地域の大陸基盤が海面より低い場所に位置するため、海洋の熱供給に対して脆弱であると考えられています。潜在的に不安定なトッテン氷河域で質量損失が加速しているという現実が明るみとなり、将来的な大規模氷床流出や海水準上昇への懸念など、国際的に大きな注目を集めいています。豪州の観測（Rintoul et al., 2016）により、トッテン氷河の前面にまで沖合の暖水が運ばれていることは分かっていましたが、そもそもどのように沖合から大陸氷河方向へ暖水が輸送されるかについてはよく分かっていませんでした。近年、トッテン氷河の沖合に複数の巨大な時計回りの定在海洋渦（空間スケール100―200km, 通称・溝端エディーズ）の存在が示されました（Mizobata et al., 2020; 詳細はニュースレターvol.5参照）。これら定在渦が暖水の運び屋であろうと考え、これを実証すべく水産庁「開洋丸」と「しらせ」による海洋観測を実施しました。取得した海洋観測データと衛星高度計データを統合して解析し、「暖かい周極深層水は大陸斜面に沿って東西に一様ではなくむしろ点在し、特に高温の水は渦の東側（南下流域）に分布していること」が分かりました（Hirano et al., 2021；溝端公募課題および底層水班との連携）。元来、海は大小様々な渦で満ち溢れていますが、大半は出来てはやがて消滅します。それに対し、トッテン沖合の渦は「定在」しており、これがとても重要な特徴です。定在する渦が「常に」暖水をトッテン氷河方向へと輸送しているという知見は、この地域における氷床海洋相互作用の気候学的な新しい視点を与えてくれます。

さて、溝端エディーズによって大陸棚へと輸送された暖水は、その後どのような経路を辿って氷河まで到達するのか？棚氷の下へと流入する暖水特性の変動は何が決めるのか？など、トッテン氷河融解プロセスの包括的理解には未知のピースが残されています。北大低温研の青木隊長率いる第61次南極地域観測隊（2019―2020年）では、トッテン氷河近傍の大陸斜面から大陸棚上、そして氷河前面にいたる広域で、「船」や「ヘリ」を駆使した大規模な海洋・海底地形観測が実施されました（詳細はニュースレターvol.5を参照）。この広域観測データが語るところによると、沖合起源の暖水は大陸棚上へと広く流入してお椀状地形に沿って時計回りに循環し、その一部は1000m級の深いトラフに誘われて棚氷下へと流れ込みます。沖から氷河へと繋がる暖かいルートが見えてきたのですが、これは最新の海底地形データを組み込んだ数値モデル結果とも非常に整合的です。底層水・モデル・探査・公募班の連携の成果として「トッテン棚氷へ向かう暖水循環」として論文を投稿中ですが、良い形で世に出せるよう尽力したいと思います。

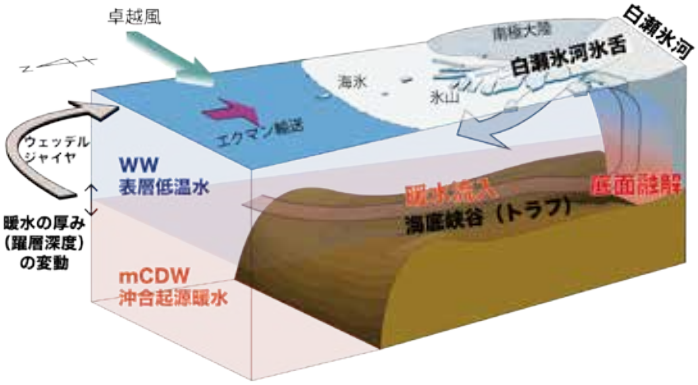


図1. 白瀬氷河域における氷床海洋相互作用
（Hirano et al., 2020 を改変）

さて，南極氷床変動の理解には「周りの海」を知ることが不可欠として話を進めてきました。2016年に始まった日本による氷床海洋相互作用の現場観測により、冷たい東南極沿岸域の中でも、沖合に暖水の運び屋が存在する白瀬氷河やトッテン氷河の周りには、局所的に暖かい海が作り出されていることが分かってきました。しかし、海のことを知るにつれ、その重要性を認識するとともに、海だけでは説明できない部分も炙り出されてきます。同じように暖かい海が目の前に広がっていても、白瀬氷河域の氷床質量は増加、トッテン氷河域では減少傾向を示します（例えばhttps://svs.gsfc.nasa.gov/30880）。基盤標高や氷床を涵養させる降雪プロセスには、東南極内でもその東西で地域特性が大きく異なります。こういった観点も含め、分野の垣根をさらに超えて氷床変動プロセスの統合的な理解に貢献できるよう、今後も地道に観測データを積み上げていきたいと思います。

[文献]
Hirano, D., Tamura, T., Kusahara, K. et al. Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. Nat Commun 11, 4221 (2020). https://doi.org/10.1038/s41467-020-17527-4

Rintoul, S. R., et al. (2016), Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf, Sci Adv, 2(12), e1601610, doi:10.1126/sciadv.1601610.

Mizobata, K., Shimada, K., Aoki, S., & Kitade, Y. (2020). The cyclonic eddy train in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean as revealed by satellite radar altimeters and in situ measurements. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125, e2019JC015994. https://doi.org/10.1029/2019JC015994

Hirano, D., Mizobata, K., Sasaki, H. et al. Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica. Commun Earth Environ 2, 153 (2021). https://doi.org/10.1038/s43247-021-00217-4

極域における大気ー雪氷相互作用に関する研究

気象庁気象研究所　庭野匡思

近年の地球温暖化に伴い、地球上では様々な環境変化が引き起こされています。中でも、雪氷圏は温暖化に対してとりわけ脆弱な地域であり、その消長は全球海面水位変動に重要な影響を与えることから、その変化を詳細に観測して理解する（モデル化する）ことが、将来気候予測の精度向上や、効果的な緩和策・適応策の策定にとって必要不可欠です。地球上に存在する雪氷の変化を最初に直接駆動する主要因は、大抵の場合、考えている時間スケールによらず、大気場の変化（例えば、近年の地上気温の上昇）に求めることが出来ます。しかし、雪氷圏が存在する地表面は、大気の下部境界にあたることから、雪氷圏の変化が転じて大気場の更なる変調を誘発することもあります。その代表例が、アイス・アルベドフィードバックです。では、大気場の変化は、具体的にどのようなプロセスを経て雪氷圏の変化を引き起こすのでしょうか？また、雪氷圏の変化が大気場に与える影響とは、具体的にはどのようなものが考えられるのでしょうか？私のこれまでの雪氷研究は、それらの問い（究極的には、「大気－雪氷相互作用とは何か？」）に対して信頼のおける定性的・定量的回答を与えることを第一の目標として掲げておりました。勿論、現在の雪氷圏で起きている全ての変化を網羅的に1人で説明することは出来ません。その代わりに、国内外の多くの共同研究者と協調して研究を進めることなどを通して、個々の研究成果をIPCC（気候変動に関する政府間パネル）報告書などの大きな枠組みの中に位置づけるように努めてきています。

私の極域との関わりは、2012年夏に北西グリーンランド氷床上で実施された気象・雪氷集中観測（例えば、Niwano et al. , 2015）に参加したことから始まりました。それ以来、一貫して、熱・水収支の観点で、極域における大気－雪氷相互作用を考えています。一方で、同時並行で推進している日本国内の積雪を対象とした研究では、ブラックカーボンやダストといった光吸収性粒子を介した大気－雪氷相互作用の研究（例えば、Niwano et al., 2021a）にも取り組んでおり、そこで培われた知見を極域へ適用することも目指しています。上述の2012年夏の集中観測では、偶然にも、氷床上の90%以上の領域で表面融解が引き起こされるという記録的なイベントに遭遇しました。そこで、その集中観測の最初に設置した自動気象観測装置のデータを解析して、更に、当時既に開発していた積雪変質モデルSMAPを用いて雪面熱収支を計算しました。それらの結果を精査したところ、この記録的な表面融解イベントの主要因が、温かい空気を伴う大気下層の雲の存在に起因する下向き長波放射加熱であることを突き止めました。同時期に、海外の研究グループからも、グリーンランド氷床表面融解に対する雲の影響を示す論文が複数発表されたこともあり、雲―氷床相互作用に関する研究が急速な盛り上がりを見せ始めました。

業界のそのような潮流の中、個人的には、Niwano et al. (2015)の研究成果が北西グリーンランド氷床上の一地点での結果に基づくものであり、また、解析期間が記録的表面融解イベントの前後を含む高々1ヶ月程度であったことから、グリーンランド氷床全域で、かつ、ひと夏以上の長いスケールで雲―氷床相互作用を考えることの必要性を感じ出しました。そのことを1つの契機として開発に着手したのが雪氷圏に特化した領域気候モデルNHM-SMAP（Niwano et al., 2018）です。そのモデルを用いて、グリーンランド氷床表面融解に対する雲放射影響を定性的・定量的に調べました（Niwano et al., 2019）。その結果、雲の存在は、2012年夏の記録的な表面融解イベントのように一時的かつ加速度的に雪氷表面融解を助長することがあるものの、ひと夏より長い気候学的な時間スケールで考えると短波放射を減少させて雪氷質量損失を抑制する役割を担う、ことを明らかにしました。2021年に発表されたIPCC第6次評価報告書は、IPCC報告書としては初めて、氷床質量変動と雲の関係を取り上げましたが、我々の研究成果も引用され、基本的には上で記した我々の主張に沿う記述がなされておりました。

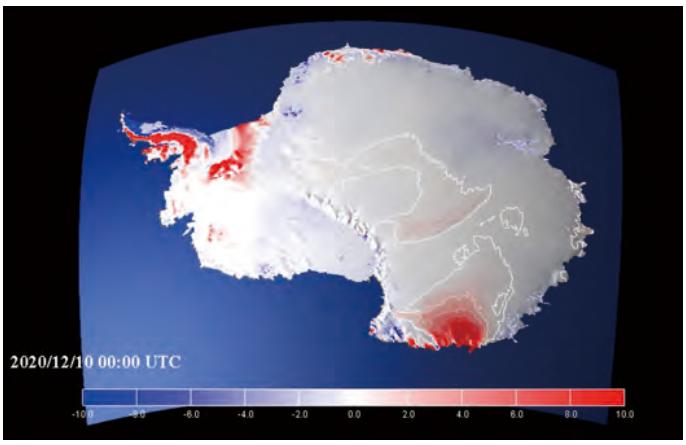


図1. 領域気候モデルNHM-SMAP最新南極版の計算領域。色は、2020年12月10日00UTCにおける前24時間表面質量収支（mm/day）を示す。

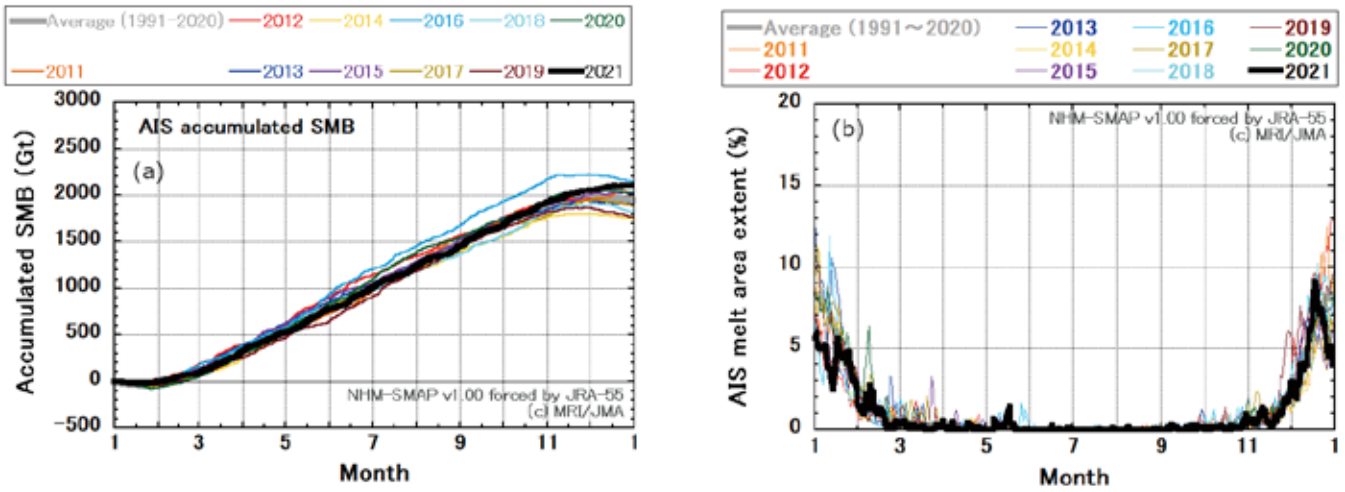


図2. 領域気候モデルNHM-SMAP最新南極版によって計算された(a)1月1日を起点とする積算氷床表面質量収支と(b)氷床表面融解面積（全氷床表面積に対する表面融解面積の比で示す）の例。

その後、本新学術領域研究に公募課題として参画し、NHM-SMAPを南極氷床に適用する機会を得ました。共同研究者との試行錯誤を経て構築したNHM-SMAP最新南極版では、南極全体を広く覆う領域（図1）を設定し、水平解像度12kmで計算を行っています。出力データの時間間隔は1時間です。この高時空間分解能なモデル計算設定は、海外の同種のモデルと比べてみても全く遜色がなく、我々の強みの1つになると期待しています。公募課題開始当初は、IPCC AR6に向けて参画していた2つのモデル国際相互比較プロジェクトのための計算に忙殺されて、南極での長期気候計算をなかなか行うことが出来なかったのですが、ようやく1980年から現在にかけての長期気候計算が完了し、現在は準リアルタイムでの計算も行っています（図2）。今後は、グリーンランドで行った氷床表面融解に対する雲放射影響を調べるモデル感度実験（Niwano et al., 2019）を南極氷床においても実施したいと考えています。そして、その結果を、国立極地研究所の山内恭名誉教授らが実施した雲放射に関する先駆的観測研究（例えば、Yamanouchi, 1983）と対比することを楽しみにしています。また、グリーンランド氷床では、NHM-SMAPによるシミュレーション結果を海外の共同研究者と共に解析することを通して、近年の氷床上で降雨が増えていることを明らかにしました（Niwano et al., 2021b）。温暖化が続くと、南極氷床でも同様の降雪から降雨への遷移が生じる可能性があるので、その点にも注意を払っていきたいと考えています。

冒頭、私は、「地球上に存在する雪氷の変化を最初に直接駆動する主要因は、大抵の場合、考えている時間スケールによらず、大気場の変化である」と述べました。しかし、本ニュースレターの読者諸氏の中には、もしかしたらこの記述に違和感を持たれた方もいるかもしれません。ご存知の通り、南極氷床における近年の代表的変化の1つは棚氷底面で引き起こされている底面融解であり、これを直接駆動しているのは大気の変化ではなく海洋の変化です。近年、グリーンランド氷床でも棚氷底面融解の重要性が指摘されるようになってきましたが、その重要性は南極氷床において遥かに高いと考えられています。私は、このことを初めて知った時、自分の既成概念が壊されるようで、純粋に驚きました。現在は、この点を自分なりにどうモデル化していくか、に興味があります。この研究は、大気－雪氷相互作用のみを考えていた自分にとっては新しい挑戦になると思いますので、新たな南極環境システム学の創成を志す本新学術領域研究の強力なメンバーの皆様方と引き続き深い議論をさせて頂ければ、と思っております。そして、これらの取り組みを通して、南極氷床における（海洋の影響を考慮した）大気－雪氷相互作用に関する新しい描像を皆様と一緒に提示することが出来れば大変嬉しく思います。

[文献]
Niwano, Aoki, Matoba, Yamaguchi, Tanikawa, Kuchiki, and Motoyama, The Cryosphere, (2015), 9, 971-988, https://doi.org/10.5194/tc-9-971-2015.

Niwano, Aoki, Hashimoto, Matoba, Yamaguchi, Tanikawa, Fujita, Tsushima, Iizuka, Shimada, and Hori, (2018), The Cryosphere, 12, 635-655, https://-doi.org/10.5194/tc-12-635-2018.

Niwano, Hashimoto, and Aoki, Sci. Rep., (2019), 9, 10380, https://doi.org/10.1038/s41598-019-46152-5.

Niwano, Kajino, Kajikawa, Aoki, Kodama, Tanikawa, and Matoba, Geophys. Res. Lett., (2021a), 48, e2021GL093940, https://-doi.org/10.1029/2021GL093940.

Niwano, Box, Wehrlé, Vandecrux, Colgan, and Cappelen, Geophys. Res. Lett., (2021b), 48, e2021GL092942. https://doi.org/10.1029/2021GL092942.

Yamanouchi, J. Meteorol. Soc. Jpn., (1983), 61, 879–893, 1983.

南極展開に向けたAUV “MONACA” の開発

東京大学生産技術研究所 山縣広和

私は、海中工学分野を主なフィールドとしており、本プロジェクトにはAUV(Autonomous Underwater Vehicle, 自律型海中ロボット)の極域展開を目標として参加しています。これは、南極における氷の融解や海流の変化は、地球規模での気候変動を知る上で重要であるためです。これらを知るために、南極海における海氷や棚氷の体積変化や、海底地形、海流などを三次元的に計測する必要がありますが、海氷下面や海底を面的に観測する方法は限られていました。そこで、近年氷下を直接観測できるAUVの活用が検討され、各国の研究チームがAUVを投入しています[1]。私達が開発しているAUVは南極海中を探検することを志向して "Mobility Oriented Nadir AntarctiC Adventurer" から文字をとって "MONACA" と命名されました。MONACAは南極の棚氷下に最大10km進入して海氷、海底を観測することを目標に開発が進められています。

さて、MONACAで氷下の探査を成功させるためにはクリアするべき課題が複数あります。1つ目に「海氷下面と海底の両方の観測が可能であること」、2つ目に「しらせでの安定運用のための仕組みづくり」、3つ目に「信頼性を高める仕組みづくり」です。

まず、1つ目の「海氷下面と海底の両方の観測が可能であること」を成立させるためにMONACAの設計を工夫しました。MONACAは全長約2mで空中重量は約230kgあり、同様の探査を行うためのAUVと比べれば比較的小型です。図1のように垂直配置のスラスタを4基、水平配置のスラスタを2基備えることで、ロール・ピッチ・ヨー・サージ・ヒーブの5自由度を独立に制御でき、深度を推力によって制御するホバリング型と流線型に近い形状を持ち長距離航行に適する航行型の2つの特徴を両立しています。この高い自由度と形状を生かして、MONACAは垂直上昇や背面航行といった運動が行えるため南極のような複雑な地形にも対応することができます。

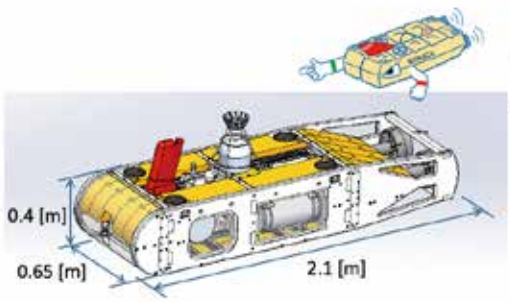
また、AUVのナビゲーションと地形計測に重要なセンサであるINS(Inertial Navigation System,慣性航法装置)、DVL(Doppler Velocity Log, ドップラー式対地速度計)、マルチビームソナーは機体中央のセンサユニットに集中して配置してあり、上下に向きを変えることができます。必要に応じてセンサユニットの方向を変えることで、海氷と海底両方の探査を行える構造となっています。

2つ目に「しらせでの安定運用のための仕組み」についてです。しらせは一般的な調査船と比べて舷の高さが10m程度と非常に高く、環境上ボートやダイバーを下ろすことも難しいため、MONACAの投入・回収には十分な準備が必要になります。特に問題になるのは回収で、揺れ動く船から10m下で揺れ動くAUVにフックを掛けることは大変困難となります。そこで、確実な回収のためにMONACAには2段構えの回収方法を用意しています。1つ目はROV“ANCO”による水中での回収です。ANCOを遠隔操作によって水中に定点保持しているMONACAにドッキングさせ、そのままクレーンで回収します。水中で回収を行うことで動揺を抑え、さらに水面で凍りつくことを防ぐことができます。

次の手は浮上後に回収する方法です。ドッキング用の金具を棒によって直接MONACAに嵌合させて回収を行います。決して簡単な方法ではありませんが、嵌合金具を入れさえすれば回収することができるため、波の少ない氷海域であれば十分に実現可能です。

3つ目に「信頼性を高めるための仕組み」として、電源の冗長化やモジュール構造の採用、複数のセンサを合わせることが挙げられます。MONACAのバッテリは左右2本の耐圧殻に3系統ずつ、

しらせでの試験(一番右が著者)



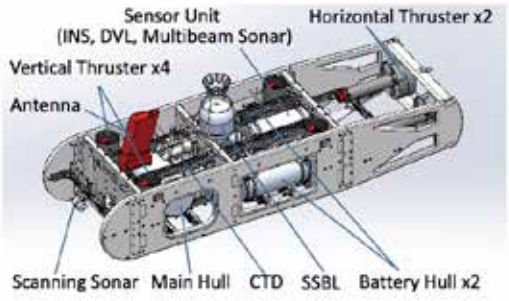


図1. (左)MONACAの概観とマスコットイラスト　(右)内部構造とセンサ配置

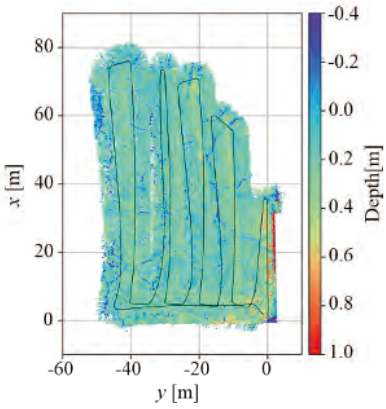


図2. (左)紋別試験で得られた海氷下面形状　(右)調査を終えたMONACA

計6系統となっています。独自開発した電源回路によりバランスよく使用することで各系統の負担を軽減するだけでなく、異常時には遮断することも可能となっており、1系統でも生きている限り航行し続けることができます。機体構造はモジュール構造とすることでメンテナンス性を高め、航海中の限られたリソースでも交換修理に対応できるようにしています。また、将来の機能拡張にも対応しやすくなっています。

更にナビゲーションの信頼性を高めるために、DVL、INSでMONACAが自身の位置をリアルタイムに推定するだけでなく、音響測位装置で船から計測した結果を音響通信でMONACAに伝えることで誤差を補正する機能も実装されています。

上記の機能について確認をするために、2019年のMONACAの進水以来，多くの水槽試験と7回の海域試験を重ねてきました。例を上げると、2020年10月に下田で行われた試験ではのべ12回、合計約2時間の航行を行い、12,946m^{2}の海底地形を取得しました[2]。また2021年2月には紋別港にて海氷の下に展開して、合計で27回8時間の航行、5,875m^{2}の海底地形と47,143m^{2}の海氷下面の地形を取得することに成功しました[3]。図2（左）からは海氷裏面の割れ目が確認できます。2022年2月にも紋別での運用を予定しており、南極運用に向けた長距離航行性能の試験を行う予定です。また、2021年の下田での実験では短距離ながら海底地形に対する自動追従性能を確認できました。

7回の海域試験には2021年のしらせ訓練航海も含まれます。訓練航海ではMONACAをしらせから投入して航行、回収を行いました。このときは海況にも恵まれ、棒と嵌合金具により水面で回収を行うことができました。また、2021年12月には水槽試験でANCOによる水中での回収に成功しました。ANCOによる回収は今度の紋別試験でも行い、実際に近い環境での回収が可能であることを確認する予定です。（図3）

当然ながらすべて順調だったわけではありません。海域試験前後の鉄道やトラックによる輸送や船舶での保管など、長期にわたり振動にさらされる中でMONACAが不調に見舞われることもあり、試験開始までに急ピッチで調整することもありました。しかし、幸いなことにMONACAが一切動かずに終わるということはなく、動作させて何かしらのデータを持ち帰ることができました。これらは3つ目の信頼性を高めるための仕組みづくりが機能していると言えるでしょう。

2022年度にはいよいよ南極への展開を行う予定です。南極研究の進展のため、MONACAが信頼できるデータを持って帰ってこられるように全力を尽くしたいと思っています。

図3. ANCOによる嵌合試験の様子

[文献]
[1] Camilli, R., & Duguid, Z. ,"Improving resource management for unattended observation of the marginal ice zone using autonomous underwater gliders", Frontiers in Robotics and AI, 7, 184,2020.

[2] H. Yamagata, S. Kochii, H. Yoshida, Y. Nogi, T. Maki, Development of AUV MONACA - A hover capable platform for detailed observation under ice -, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.33, No.6, 1223-1233.

[3]東京大学生産技術研究所, "【記者発表】海中ロボットによる海氷裏面の全自動計測に成功～ 南極海での調査に向けて大きな一歩 ～", https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3513/.

無視されてきた微化石「黄金色藻シスト」の研究

筑波大学生命環境系　加藤悠爾

筑波大学の加藤悠爾と申します。環境変動史や生物進化に興味を持ち、植物プランクトンの一群である珪藻類の化石を対象として層序学や古環境学などの分野の研究に取り組んできました。さて、そんなある日、いつものように珪藻化石の分析（顕微鏡観察）を行なっていたところ、なにやら得体の知れない小さな球体の化石が珪藻化石と一緒に産出することに気がつきました。これが、黄金色藻と呼ばれる微細な淡水藻類の休眠期細胞（シスト）の化石です（図1）。これに関心を持った筆者は、黄金色藻シスト化石に関する研究事例を求めて、様々な文献をあたりました。しかし、過去数十年間に渡って行われてきたDSDP/ODP/IODPといった深海掘削のレポートなどを見ても黄金色藻シスト化石は殆ど報告されておらず、古環境学への応用はおろか分類学的な研究すら満足に進んでいないことがわかりました。いわば、黄金色藻シスト化石は、ほとんどの微古生物学者から「無視」されてきた分類群だったのです。筆者は、この黄金色藻のほとんどが淡水棲であることに注目し、黄金色藻シスト化石が過去の海洋への淡水流入や融氷などを捉えることができる新たな古環境指標として使えるかもしれないという着想に至り、これを実証するための研究を始めました。

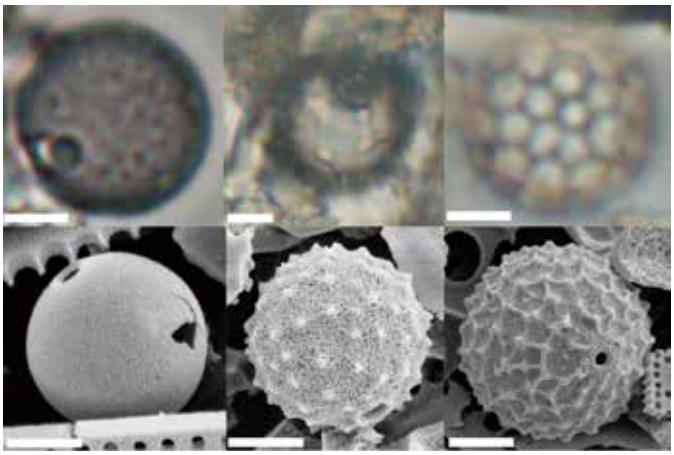


図1. 黄金色藻シスト化石の例。　スケールバーは2μm.

まず筆者は、南大洋大西洋セクターの堆積物コア（DSDP　Site 513）のうち後期中新世～鮮新世に当たる試料を用いて、珪藻化石群集の変動および黄金色藻シスト化石の産出量変動を比較しました。その結果、黄金色藻シスト化石の産出量変動が淡水珪藻の変動パターンと一致することなどを発見し、シスト化石群集の大部分は淡水域から流れ込んだ可能性が高く、シスト化石は大陸からの融氷水の流れ込み（南極の場合は氷床融解）を示す新しい指標として有用性を持つ可能性を示しました（図2：Kato　&　Suto 2019）。

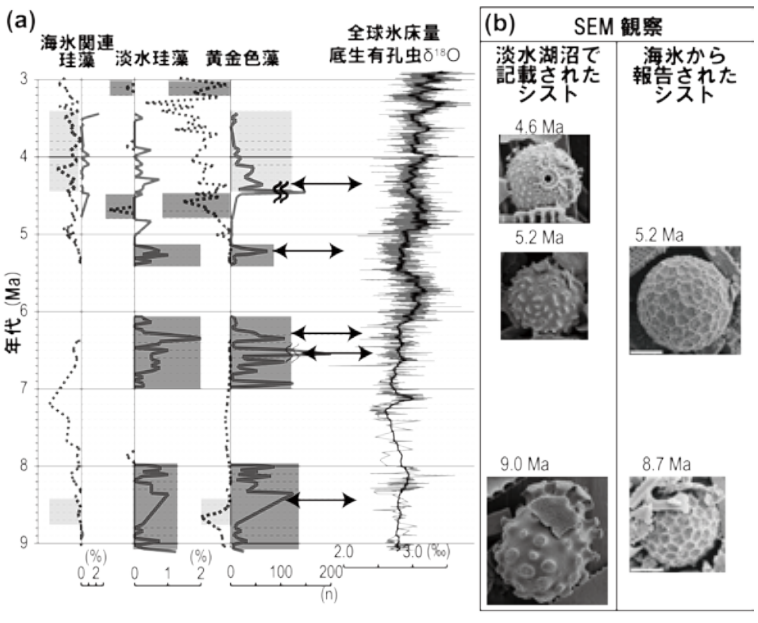


図2. (a) 海氷関連珪藻・淡水珪藻・黄金色藻シストの産出量変動。淡水珪藻と黄金色藻シストの産出量変動パターンが酷似している。Site 513(実線), 689(点線). (b) 産出した黄金色藻シスト化石の例。

こうして黄金色藻シスト化石が持つポテンシャルが見えてきましたが、これを古環境指標として昇華させるためには、その他の独立した環境指標との比較・検討も必要となります。そこで最近では、自身も乗船した研究航海KH-19-6 Leg 4（2019年12月～2020年1月）で採取した試料を対象とした分析を進めています。

まず、本航海では、南大洋大西洋セクターから約30地点の海水濾過試料を採取しました。これをプレパラートに封入し、光学顕微鏡による観察・分析を地道に行うことで、黄金色藻シストの生物地理分布（どこにどのくらい黄金色藻シストがいるのか）が初めて解明されました。さらに、海水試料の酸素同位体比$\delta^{18}O$測定も併せて行い、これを黄金色藻シストの生物地理分布と比較したところ、シスト多産地点で海水$\delta^{18}O$が低いという傾向が見られました。一般に融氷水は軽い酸素同位体比を示

すため、この分析結果からもシストと融氷水の関係が支持されたことになります。さらに、この航海で南極半島沿岸において採取された堆積物コア（KH-19-6 Leg 4 PC01）の分析では、黄金色藻シスト化石の産出量変動がIRD（漂流岩屑：氷山融解を指標）の産出量変動パターンと概ね一致するなど、黄金色藻シストの産出が融氷水を指標することを裏付ける証拠を得ることができました。こうして現生試料・化石試料の両者の分析を通じて、黄金色藻シスト化石が持つ古環境指標としての有用性がはっきりと見えてきたのです（これらの成果は複数の国際誌論文として鋭意準備中です）。

とはいえ、まだまだ課題も残されています。実は、黄金色藻の一部には海氷内部などから産出する海棲のものも知られているのです。したがって、南大洋の堆積物に産出する黄金色藻シスト化石の一部には海棲のものも含まれていることになり、淡水棲・海棲のシストを区別するためには、地道な分類学的研究も避けては通れません（Kato　2019）。また、海底堆積物に産出する黄金色藻シスト化石の供給源と思われる南極湖沼の堆積物を用いた研究も必須課題です。今後、こうした基礎研究にも少しずつ取り組んでいきたいと思います。

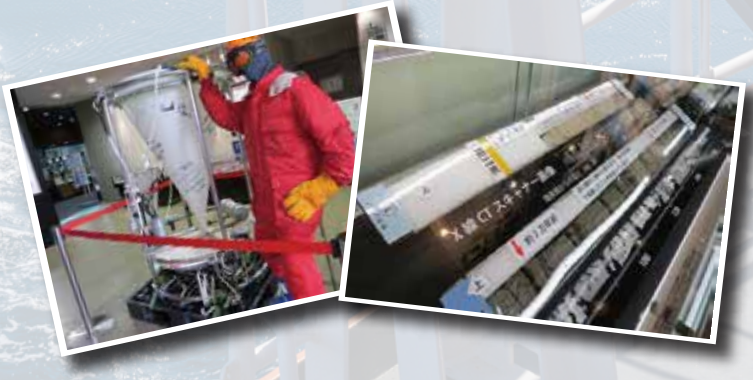
なお、これらの研究成果は、新学術領域「南極の海と氷床」の公募研究や構成員の皆様からのご支援無しでは到底得られないものでした。関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

[文献]
Kato, Y. (2019) Late Miocene to Pliocene fossil chrysophyte cysts from ODSite 689 and DSDP Site 513, the Atlantic sector of the Southern Ocean. Nova Hedwigia Beiheft, 148, 131–156. doi: 10.1127/nova-suppl/2019/145

Kato, Y. & Suto, I. (2019) Fossil chrysophyte cysts as potentially useful paleoceanographic indicators: Comparison with Southern Ocean diatom assemblages. Nova Hedwigia Beiheft, 148, 113–129. doi:10.1127/nova-suppl/2019/127

国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質標本館特別展『南極の過去と現在、そして未来ー研究最前線からのレポートー』を終えて

本領域の活動と研究成果を広く一般へむけて周知するための広報活動として、国立研究開発法人　産業技術総合研究所つくばセンター　地質標本館１階にて、特別展示を開催しました。南極で何が起こっているのか。今後どうなっていくのか。本領域が実施している最新の研究から明らかにされつつある南極大陸とそれを取り囲む海の謎に迫る内容となりました。当初の予定では2021年8月から約3ヶ月間の開催で、夏休みを利用した家族連れの来館者を期待しておりました。しかし、新型コロナの感染拡大のため、あえなく特別展開始4日目から臨時休館となってしまいましたが、その後の感染状況の緩和より10月1日から展示再開となり、12月26日まで延長して展示できました。新型コロナ感染状況が厳しい期間ではありましたが、期間中来館者数は7,906名に達し、結果的に盛況でした。今回の展示では、パネル展示だけでなく、実際の南極調査・観測で使用する防寒着や地質調査装備、海洋観測機器、海底堆積物のボーリングコア試料とそのCT画像、海洋の浮遊物を採取するセジメントトラップなど、研究成果だけではなくサンプルを採取するための重要なツールについても展示・説明する内容となりました。実際の観測風景の写真を多く用いた説明パネルなどは、本領域に参加する研究者と産総研の研究者と共同して作成しました。入館者からのアンケートでは、南極域の極限環境下での観測の厳しさ、地球温暖化の理解へむけた研究者の熱意やそこから得られた新しい知見などについての感想だけでなく、研究以外の裏話的なエピソードなども好評で、南極観測への期待や実際に行ってみたい！といったご意見もいただくことができました。本領域で行っている研究は、将来の地球環境を知るための重要な研究です。プロジェクトの期間だけで解決する問題ではありません。この展示がきっかけとなって、新しく南極を目指す人たちと、今後一緒に研究できる日がくることを期待しています！



南大洋の二酸化炭素吸収：微細藻類の量だけでなく種類が鍵となる？

国立環境研究所　高尾信太郎

私の研究対象は海水中に浮遊する微細藻類（以下、植物プランクトン）です。細胞ひとつの大きさは1mmの1000分の1から100分の1という肉眼では見えない世界の住人達ですが、過去、現在そして未来の地球環境を考える上で欠かすことのできない重要な役割を担っています。

海洋は大気中のCO_2の主要な吸収源の一つであり、人為起源CO_2の2～3割に相当する量を吸収していると言われています。また、海洋がこれまで吸収してきた人為起源CO_2の約4割が南極海（南大洋）で吸収されたと見積もられています。海洋のCO_2吸収には溶解ポンプ、生物ポンプ、アルカリポンプと呼ばれる3つの過程が関与していますが、植物プランクトンはこの生物ポンプを駆動する、いわばエンジンのような役目を果たしています。植物プランクトンの光合成によって、海水中に溶け込んだCO_2が有機物として固定されると、その一部は食物連鎖・分解によって形を変えながら海洋の表層から中深層へと運ばれていきます（図1）。その結果、表層海洋のCO_2分圧は低下し、その分海洋は大気からCO_2を取込みやすくなります。海洋における過去（最終氷期最盛期）のCO_2吸収に関する話はニュースレター第4号で東京大学大気海洋研究所の小林英貴さんが非常に興味深い研究を紹介されているので、是非そちらもご覧ください。ここでは生物ポンプについて、もう少し話を掘り下げたいと思います。

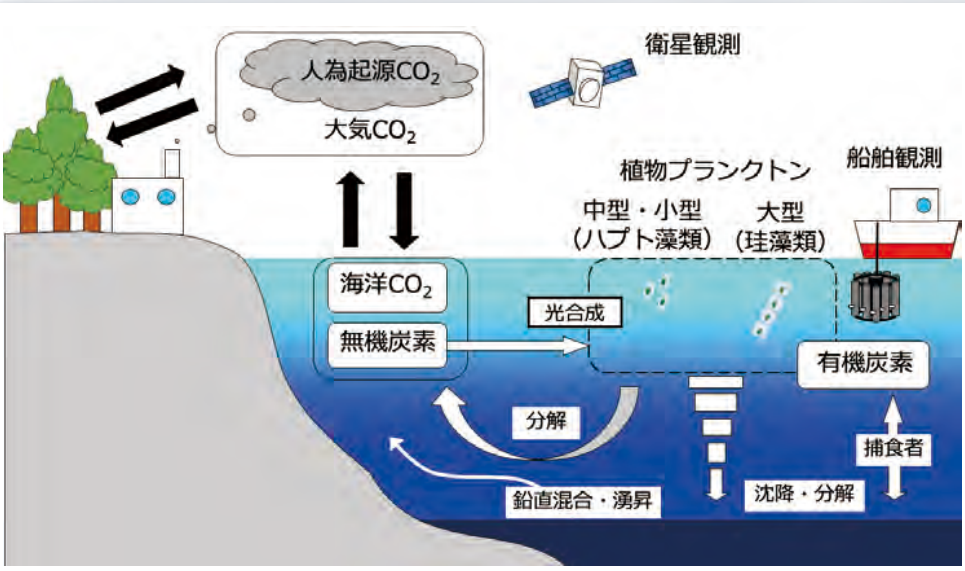


図1. 大気から海洋へ溶け込んだCO_2のゆくえ

ひとことで植物プランクトンといってもその種類は多く、海洋における生物地球科学的物質循環に与える影響は様々です。例えば、珪藻類はケイ素で出来た重い被殻を持ち、表層で固定したCO_2を効率よく中深層へと運ぶこと（生物ポンプを強化すること）が知られています。一方、ハプト藻類に属する円石藻のような、炭酸カルシウムの外殻を形成する過程において海洋のCO_2分圧を高める群集が優占した場合には、海洋はCO_2の放出源となり得ます。そのため、海洋におけるCO_2収支の変動要因を明らかにするためには、どのような植物プランクトンによってどのくらい炭素が固定されているのかを把握することが重要となります。現在取り組んでいる研究テーマは、この植物プランクトンの現存量や炭素固定速度、優占する群集の変化が海洋炭素循環にどう影響を与えるのか、これらの変化は何によって生じているのかを明らかにすることです。

これまでの研究から、地球温暖化を始めとする海洋環境の変化に伴って、優占する植物プランクトン群集が変化する可能性が指摘されています。実際、地球上で最も温暖化が進行している場所の一つである南極半島の周辺海域では、植物プランクトンの量や優占群集の変化が報告されています。しかし、このような変化が大気－海洋間におけるCO_2の吸収や放出に与える影響については、南大洋のごく限られた海域でしか調査されておらず、インド洋区での知見はありませんでした。

私たちの研究チームでは、表層海洋のCO_2分圧の変化に対する植物プランクトンの現存量、炭素固定速度、群集組成との関係を調べることで、優占群集の変化が南極海のインド洋区における夏期のCO_2吸収量に影響を及ぼすことを船舶観測と衛星画像解析により初めて明らかにしました。特定

の群集（珪藻類）が優占する年ほど、植物プランクトンの正味の炭素固定量は大きくなり、海洋へのCO_2吸収量も増加することが分かりました。この結果はウェッデル海で報告された傾向とは異なっていましたが、南極半島の周辺海域で報告された傾向とは同様でした。従来研究との比較から、植物プランクトン群集の変化が海洋のCO_2分圧に与える影響は、南大洋の中でも海域によって異なることが示唆されました。本研究で得られた知見は、温暖化等の気候変動によって生じる可能性がある植物プランクトンの群集変化が海洋の炭素循環を通じて、気候変動に及ぼす影響を評価・予測する上でも重要な情報であると考えています。

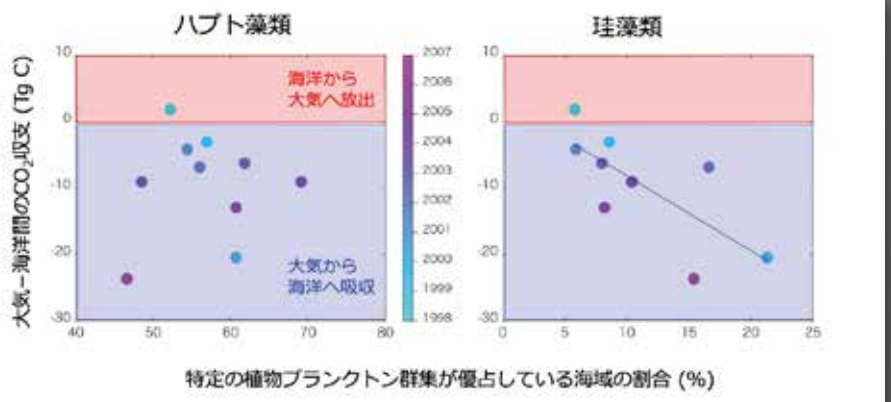


図2. 大気ー海洋間のCO_2収支と優占する植物プランクトン群集の関係(衛星画像解析の成果)

最後に本研究を行う上で観測にご協力くださった東京海洋大学付属練習船「海鷹丸」の皆さま、関係者の皆様に感謝申し上げます。

[文献]
Takao et al., Deep-Sea Res., Pt. 1 (2020), doi:10.1016/j.dsr.2020.103263.

本領域が実施した南極域での研究足跡

思い返せば、代表自らが初年度より越冬隊として南極に向かうところから、本研究プロジェクトが本格始動しました。下図に示すように、本プロジェクトの期間だけで、従来、日本の南極観測がカバーしている領域を大きく拡張した研究観測を実施できました。最終年度まで、のべ100名を超える領域メンバーが、南極大陸・南大洋の観測に赴きました。班長や観測研究を主とする若手研究者のみならず、モデル班のポスドクへも間口を広げ、加えて多くの大学院生も派遣することができました。本領域が目指した『若手が現場での最先端の研究に携わる』研究観測を実現しました。この経験を基に、今後の新しい研究展開が強く期待されます！

編集後記

領域の各種紹介を行ってきましたニュースレターですが、本号をもって最終号となります。一からの手作りでお見苦しい点もあったかと思います。ひとえに編集長の力不足でした。しかしながら、ニュースレターに寄稿していただいた皆様の研究にかける情熱、南極の壮大な景色とそこで進む深刻な環境変化、極限環境下で挑む過酷な観測などを、ほんの一部でもお伝えできていたら幸甚です。本プロジェクトはこれで一端終了しますが、南極環境システム学の深化はさらに進みます。近い将来に、ここで紹介できた研究のさらなる展開をお伝えできる日を待ち望みながら、本号をお届けします。
また、南極・南大洋でお会いしましょう！

新学術領域研究（研究領域提案型）

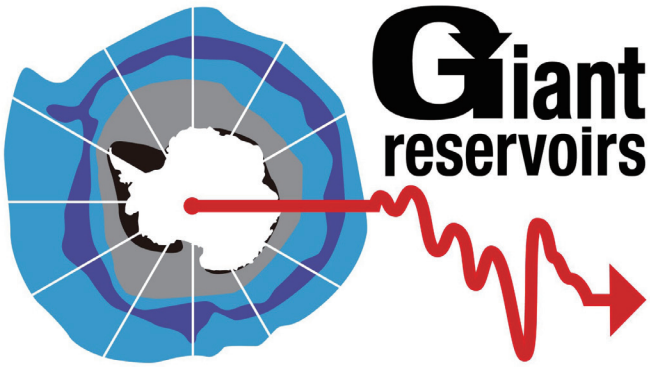
南極の海と氷床

News Letter vol.6

発行・問い合わせ先

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518　東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp

発行日 2022.3.11



発行

新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
情報・システム研究機構 国立極地研究所
Tel：042-512-0711
E-mail：office@grantarctic.jp
http://grantarctic.jp