

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

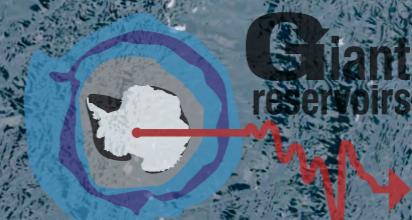
文部科学省 科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」

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



## 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します。



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)



写真1. 白瀬氷河の末端付近で観測中の碎氷船「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、世界屈指の碎氷能力を有する「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、白瀬氷河水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水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セ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説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

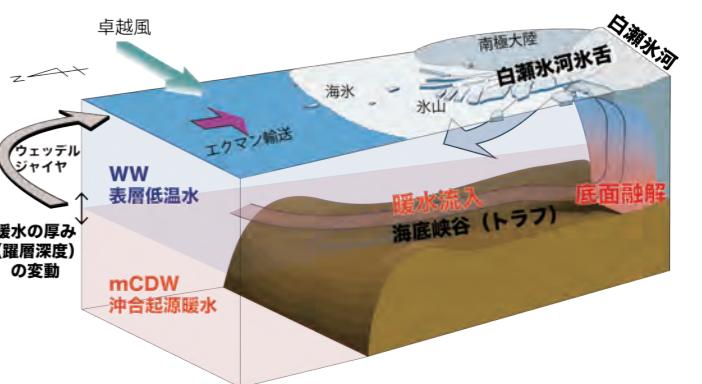


図1. 白瀬氷河域における氷床海洋相互作用  
(Hirano et al., 2020 を改変)

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。

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-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、それらの問い合わせ（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じて、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努めています。

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。

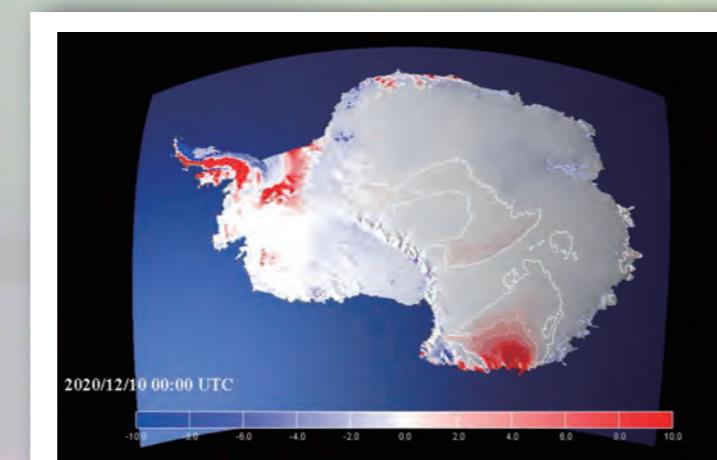


図1. 領域気候モデルNHM-SMAP最新南極版の計算領域。色は、2020年12月10日00UTCにおける前24時間表面質量収支( $\text{mm/day}$ )を示す。

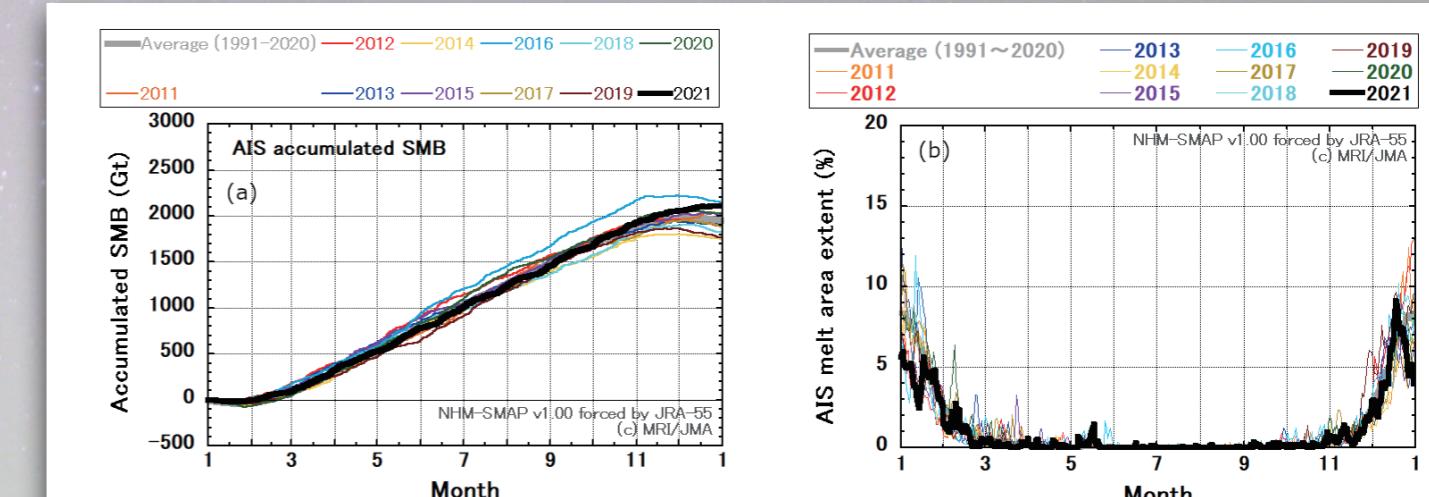


図2. 領域気候モデルNHM-SMAP最新南極版によって計算された(a)1月1日を起点とする積算氷床表面質量収支と(b)氷床表面融解面積(全氷床表面積に対する表面融解面積の比で示す)の例。

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な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

### [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, Wehrle, 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.

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变化の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遙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。

## 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、南極海における海水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、海水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は南極海中を探査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進入して海水、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「海水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「海水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ーを4基、水平配置のスラスターを2基備えることで、ロール・ピッチ・ヨー・サーボ・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おり、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、海水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搖を抑え、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)

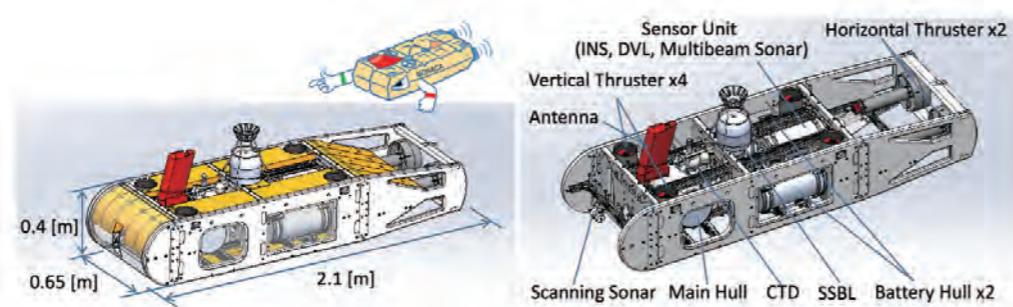


図1. (左)MONACAの概観とマスコットイラスト (右)内部構造とセンサ配置

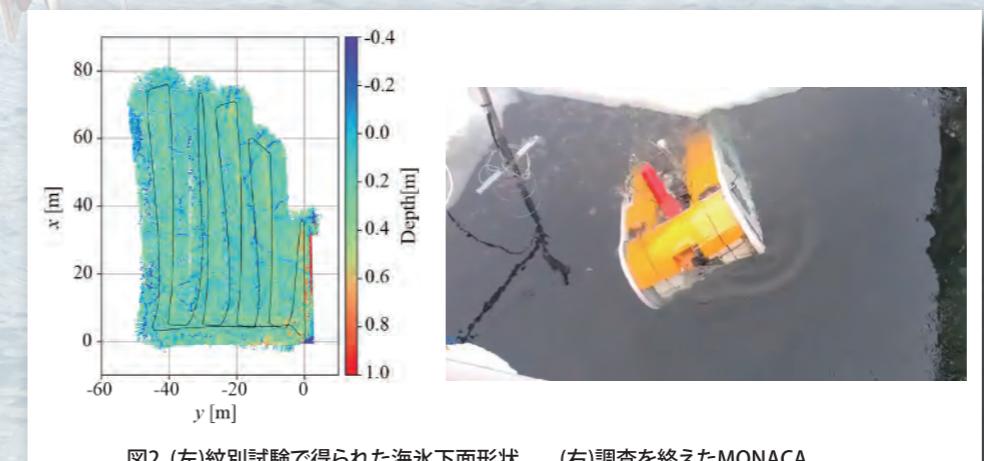


図2. (左)紋別試験で得られた海水下面形状 (右)調査を終えたMONACA

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<sup>2</sup>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水の下に展開して、合計で27回8時間の航行、5,875m<sup>2</sup>の海底地形と47,143m<sup>2</sup>の海水下面の地形を取得することに成功しました[3]。図2(左)からは海水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。

### [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水下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步 ~", <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3513/>.

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、実際に新し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が一切動かさずに終わるということではなく、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

## 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。

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

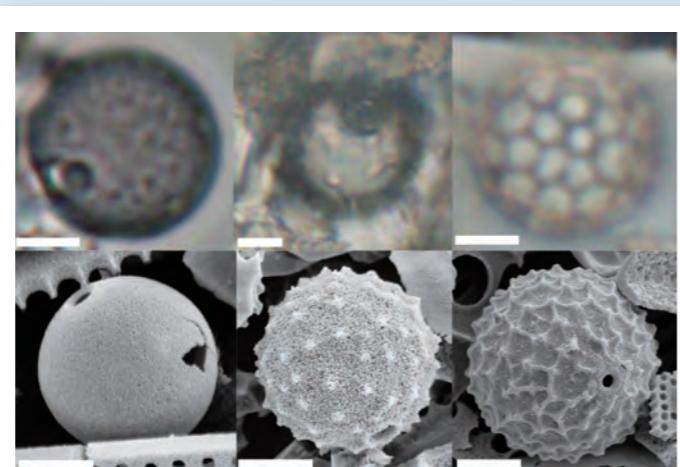


図1. 黄金色藻シスト化石の例。スケールバーは2μm。

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）。

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、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・分析を地道に行なうことで、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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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

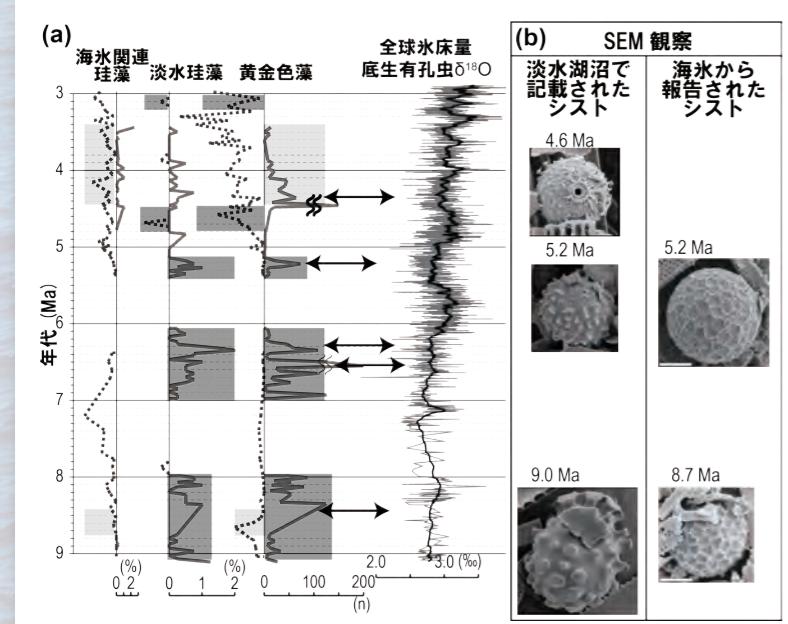


図2. (a) 海水関連珪藻・淡水珪藻・黄金色藻シストの産出量変動。淡水珪藻と黄金色藻シストの産出量変動パターンが酷似している。Site 513(実線), 689(点線)。(b) 産出した黄金色藻シスト化石の例。

## 活動報告

そのため、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ました（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。

### [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

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づ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。

## 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—研究最前線からのレポート—』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いました。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すが、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やってみたい！といったご意見もいただきました。本領域で行っている研究は、将来の地球環境を知るために重要な研究です。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！

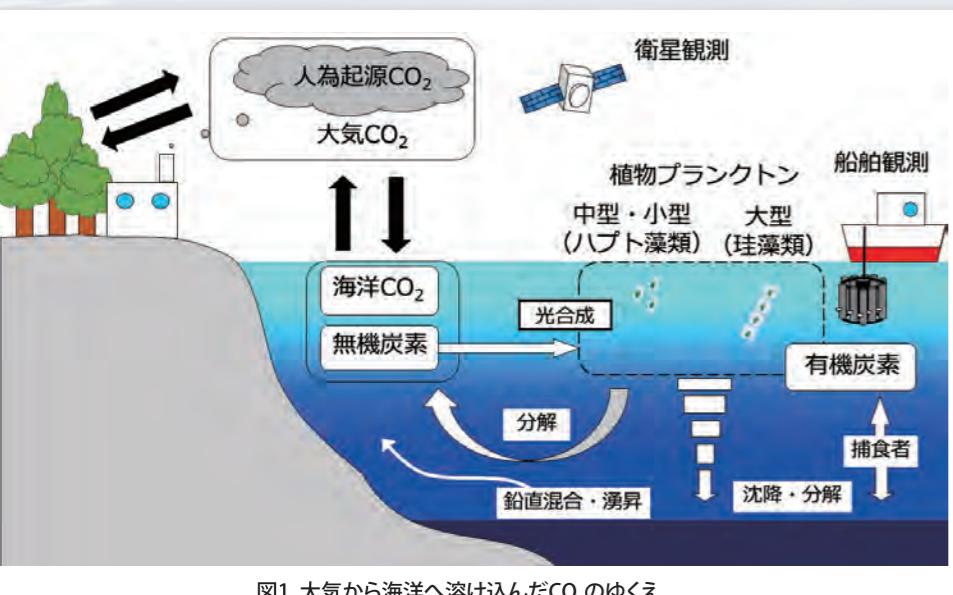


## 南大洋の二酸化炭素吸収：微細藻類の量だけでなく種類が鍵となる？

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<sub>2</sub>の主要な吸収源の一つであり、人為起源CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>分圧は低下し、その分海洋は大気からCO<sub>2</sub>を取り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<sub>2</sub>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、是非そちらをご覧ください。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。



ひとことで植物プランクトンといつ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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>分圧を高める群集が優占した場合には、海洋はCO<sub>2</sub>の放出源となります。そのため、海洋におけるCO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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

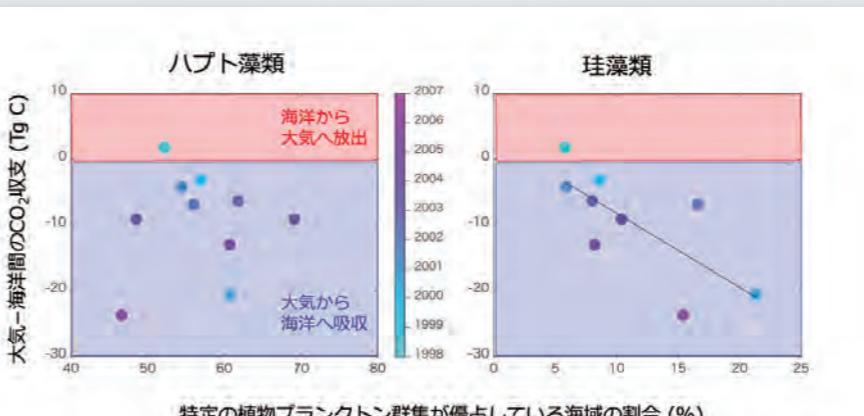
の群集（珪藻類）が優占する年ほど、植物プランクトンの正味の炭素固定量は大きくなり、海洋へのCO<sub>2</sub>吸収量も増加することが分かりました。この結果はウェッデル海で報告された傾向とは異なっ

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<sub>2</sub>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。

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『若手研究者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！

