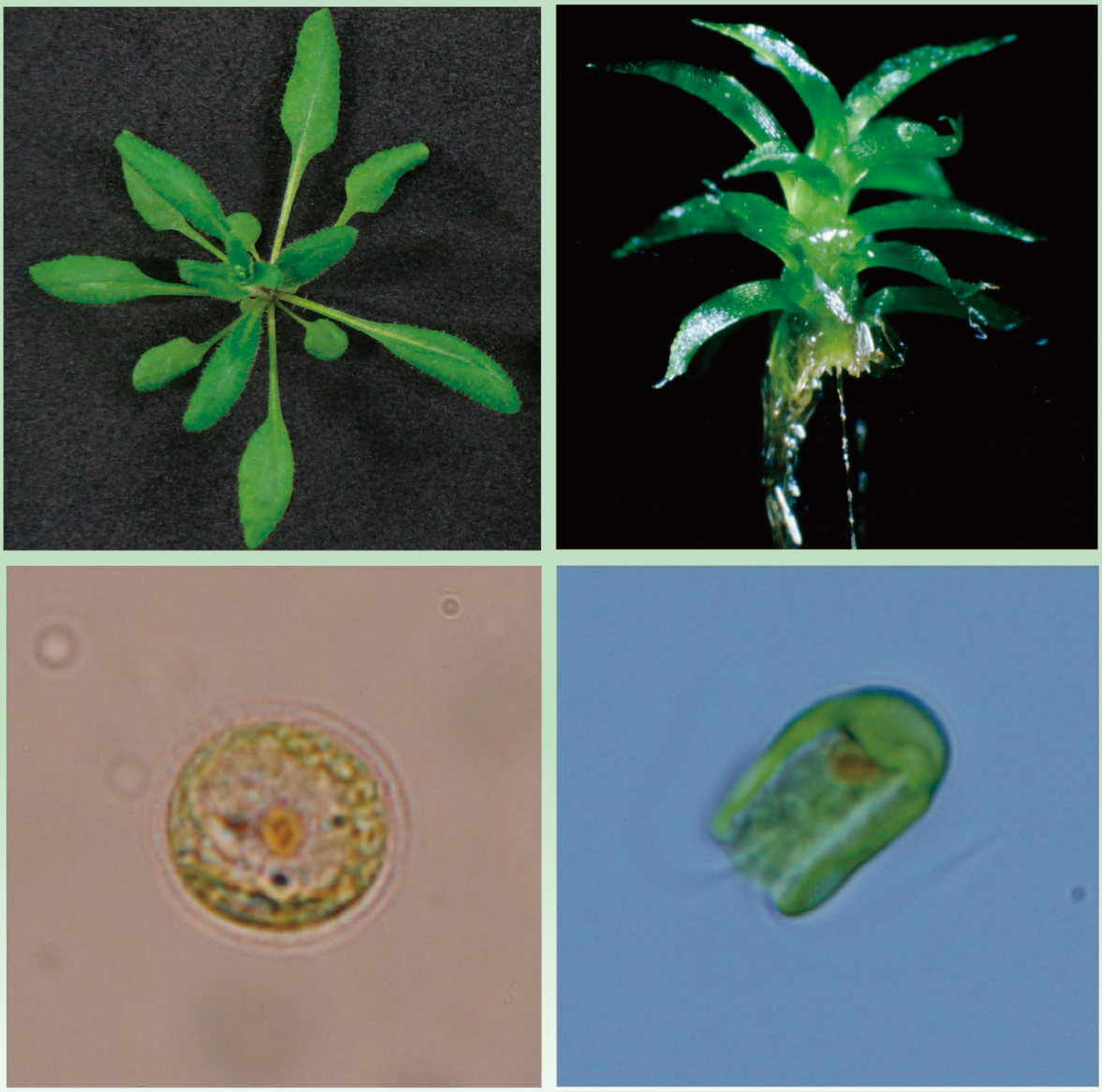
ILTS
低温研ニュース
2022年12月
No.54



(左上)シロイヌナズナ(維管束植物)、(右上)ヒメツリガネゴケ(蘚苔類)、共に陸上植物に分類される。
(左下)メソスティグマ(ストレプト藻類)、(右下)ピラミモナス(緑藻類)。
進化の過程で、緑藻の共通祖先がストレプト藻類と緑藻類に分岐し、その後、ストレプト藻類の一系統が陸上植物に進化したと考えられている。

(撮影:高林厚史(左上)、藤田知道(右上)、高村有咲(左下)、亀尾辰砂(右下))

Research

アイスコア分析拠点としての低温室の運用と発展
(飯塚　芳徳) …… 2

タンパク質複合体としての光化学系と
その単離法としてのNative電気泳動法
(高林　厚史) …… 6

Report

「同位体物質循環 国際シンポジウム2022」の開催
(滝沢　侑子) …… 11
海外調査(杉山　慎) …… 12
海外実習(杉山　慎) …… 13
海外調査(的場　澄人) …… 14

Press Release／News

アイスコア分析拠点としての低温室の運用と発展

雪氷新領域部門　飯塚　芳徳

低温研の－ 50℃低温室と見学者

低温科学研究所には約 25 年前（1998 年）から－ 50℃の低温室が設置されています（図 1）。当時は大型の学術的利用を目的とする低温室として日本で唯一の－ 50℃仕様の低温室でした。－ 50℃低温室は主にアイスコアに関する様々な実験や共同研究に利用されてきました。また、低温研は今回ご紹介する南極やグリーンランドのアイスコアを見学できる環境を整えており、コロナ前は年間延べ 1500 人もの見学者を－ 50℃の低温室に受け入れていました。低温室の見学者には、なぜ－ 50℃の低温室が必要か、という理由として「地球上の氷の融点は 0℃でこれは約 273K です。家庭用冷凍庫の庫内温度－ 20℃は 253K で、融点に対する割合が 0.93 くらいになります。0.93 は固体としてとても融点に近く、鉄で考えると刀鍛冶のときに真っ赤になっている状態で、鉄塊が刀に代わるように、氷も変質しやすい状態です。」というような話をしています。－ 50℃ですと割合が 0.82 くらいになり、氷試料が変質しにくくなります。

文部科学省や諸外国などから北大への来訪者があったときは、1．理学部の博物館、2．低温研の低温室、3．創成研究機構の同位体顕微鏡という北大の 3 大名所に選ばれているようで、たいへん光栄です。低温室は中学生以上でしたら見学可能で、低温研の一般公開では多くの方にご見学いただいています。個別で見学を希望される場合は事務部総務担当で入室者の集計を取っていますので、先ずは総務担当に連絡してください。その後、技術補佐員の斎藤健さんか飯塚のどちらかがご案内できますので、私どもと日程を調整させていただくことになります。ただ、一度に入れる人数は 7 名程度ですので、あまりにも多い見学者の場合はお断りさせていただく可能性があります。高校生や大学学部生が目を輝かせて－ 50℃を体験しているのを見るとこちらもうれしくなります。

図 1　低温研の－ 50℃低温室と保管されている南極ドームふじアイスコア

南極アイスコアの運用

約 25 年前は南極内陸で深層アイスコア掘削が行われ始めた頃で、これまでに 1 期（1996 － 98）、2 期（2004 － 07）と 2 回の掘削がされています。採取した氷をより高品質で保管するために低温研が先駆けて－ 50℃低温室を作りました（図 1）。当時、低温研は南極アイスコアの物理（氷の物性など）の研究を分担しており、氷の質が研究の質に直結しますので施設の存在が重要となりました。現在は、より大型の－ 50℃低温室が立川の国立極地研究所にありますが、どちらの掘削も極地研が－ 50℃低温室を作る前でした。当時は南極ドームふじアイスコア（1 期、2 期あわせて国内に持ち帰られた長さは約 3000m）のほぼすべてが低温研で保管され、多くの研究者がアイスコアを解析するために低温室を利用しにやってきました。氷を切ったり磨いたり薄片を作成

したりという低温室内での基本解析と、外部利用者への対応というような作業をこなしつつ、自身の研究を進めていくのがあたり前の環境で、北大低温研は日本のアイスコア解析の中心にいるという雰囲気がありました。

極地研が 2010 年に大型低温室を設置してからはほとんどの南極アイスコアが極地研に輸送され、低温研にはアーカイブコア（長期保管のための氷）が残されています。深度 1000m ～ 3000m の氷でアイスコア全体の 25%に相当します。東京と札幌の 2 か所で南極アイスコアを保管することで震災などのリスクを回避することが主な目的です。2018 年の北海道胆振東部地震では北海道全域が停電となりましたが、そのときにはー 50℃の低温室がー 37.2℃まで上昇しました。幸い試料の損失や劣化は免れました。2023 年から南極で第 3 期となる深層掘削が開始されます。今のところ人類は 82 万年前までのアイスコアを取得していますが、今回は 150 万年前を目標にしています。低温研の低温室にも 100 万年よりも古い氷がやってくる日が近いかもしれません。

北極グリーンランドアイスコアの運用

2012 年ころから環オホーツク観測研究センターの的場先生や関先生とともに、低温研がアイスコアの掘削からリードして低温室を利用したプロジェクトを進めています（図 2)。両極の氷床ドーム（頂上）の中でもっとも涵養量が多く、近過去の古環境を世界で最もよく保存している「グリーンランド南東ドーム」地域で 2015 年、2021 年にアイスコアを掘削しました。2021 年には 250m のアイスコアの掘削に成功し、11 月に低温室にアイスコアが運ばれてきました（図 3)。運ばれてきたアイスコアですが、さまざまな分析のためには低温室内での試料準備が必要です。この処理を低温研の低温室で行うことで外部の研究者と多くの共同研究を進めることができ、いまでは国内外の 30 研究室を超える皆様とともに古環境復元に関するプロジェクトを進めることができるようになりました。シニアの研究者がさまざまな研究成果を残しているだけではなく、北大環境科学院の学生に限らず日本のアイスコアコミュニティの多くの修士・博士学生や若手研究者がこのアイスコアを利用した古環境復元研究を研究課題として取り組まれてきたという教育的な効果もございます。このプロジェクトによって、ー 50℃低温室をはじめとする周辺の低温施設が日本のアイスコア解析の中心でいることが続いています。

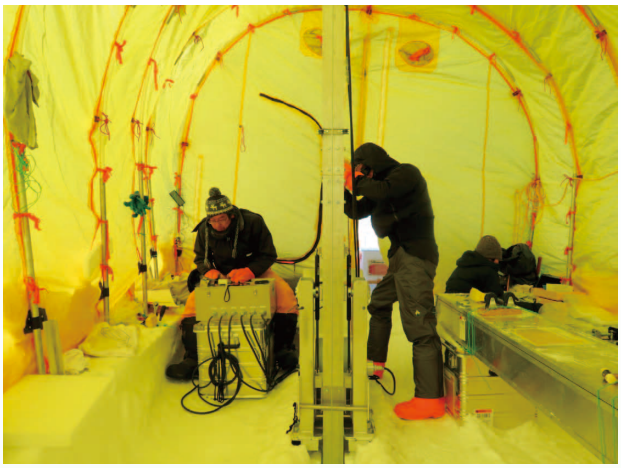


図 2　北極グリーンランド南東部でのアイスコア掘削

図 3　ー 50℃低温室に保管されているグリーンランド南東ドームアイスコア

グリーンランドアイスコアの低温室での解析

去年運ばれてきたアイスコアを例として、低温室処理を紹介させていただきたいと思います。先ずは円柱状の氷のまま、目視による観察や密度の測定が行われます

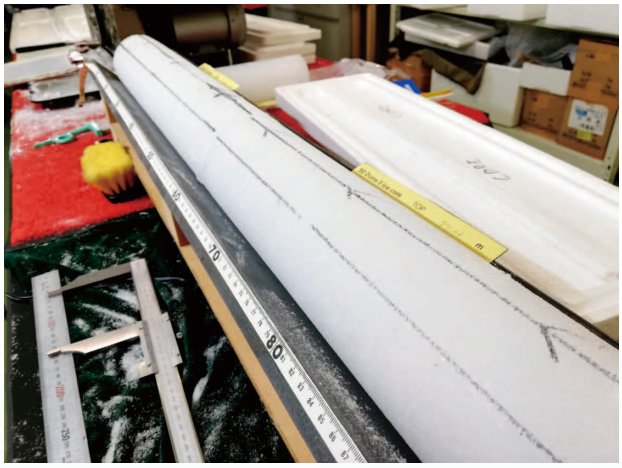


図 4　アイスコアの目視観測

（図 4）。目視観察では雪や氷の状態、夏季融解層の識別などを行います。また、「しりあわせ」とよんでいますが、アイスコア円柱の底面の方角を上下のアイスコアと整合させる作業もあります。－ 50℃に保管している氷を－ 20℃の温度緩和室に移動してすぐに観察すると、－ 20℃でもアイスコアに霜がつきますので、観察の前日に温度緩和室に移動しておきます。

次に、円柱状のままですと氷表面の掘削痕などで氷を定量的に観察しにくいので、バンドソーを用いて氷柱を縦に 3 分割します（図 5）。その後、バンドソーの切断面は荒いのでミクロトームという切削機で厚さを均質にするとともに表面を平らに磨きます。この切断作業も－ 50℃の氷のまま切削すると、アイスコアが割れます。1 日間くらい氷を－ 20℃に馴染ませてから切削する必要があります。

両面を平滑化されたアイスコアを用いて、X 線による透過率を利用した密度の測定や、LCR メータを応用した誘電率の測定、可視や近赤外波長を用いた反射率の測定などを 50㎝単位で行います（図 6）。これらの測定をいわゆる低温室内での初期解析と我々は呼んでいます。初期解析はアイスコアの古環境復元そのものにはあまり直結しませんが、試料を使うすべての研究が必要となるアイスコアの年代や涵養量などの基本情報を構築できます。ほぼすべて低温室内での作業で、2021 年のアイスコアは 250m ありますので、50㎝単位だと約 500 本のアイスコアを測定する必要があります。こういったコアの解析に必須だけれども最前線ではないので成果に直結しにくい初期分析を誰がどう処理し、どのように将来へ継承していくのかという課題はどの分野も共通の問題だと思います。

初期解析が終了したアイスコアはより細かく切断されて、必要があれば氷の表面の汚れをセラミックナイフなどで削る作業が待っています（図 7）。この作業も低温室で行う必要があり、2022 年 10 月現在、アイスコアに含まれる可溶成分のイオン濃度を分析するために深さ

図 5　アイスコアの切断作業（撮影者の松本真依さん（修士 2 年）が 2021 年度の環境科学院の写真コンテストで優秀賞を受賞した写真）

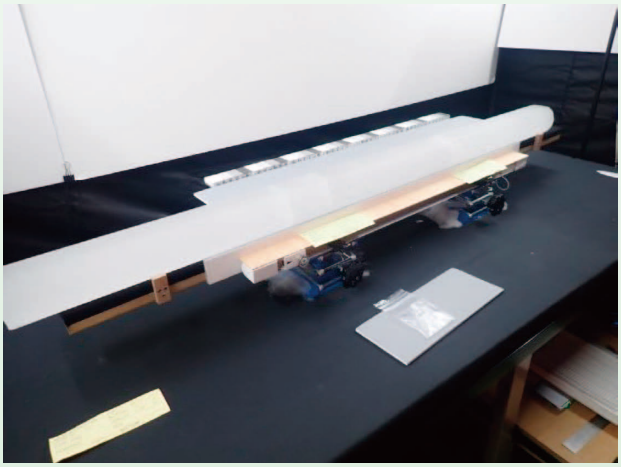


図 6　アイスコアの可視光反射率測定

図 7　アイスコアの表面切削作業

50㎜ごと、約 5000 試料の氷の表面を削る作業をしています。2021 年 11 月から始まったこのアイスコアの低温室内での初期解析ですが、まだまだ終わりが見えず、毎日のルーチンワークとして関係者で作業を続けています。こういった処理を経てから、アイスコアは必要とする国内外の研究室に輸送され、共同研究者による最新の分析機器で分析されます。分析結果を解読することで新しい古環境情報が明らかとなり、成果として学会発表や論文へとつながります。

グリーンランドアイスコアの研究成果

低温実験室を利用した研究ができるという恵まれた環境を生かし、低温室が存在したからこそ得られた独創的で学術的な成果も出ています。－ 50℃低温室は長時間の作業には向かないので本来は氷の保管目的の施設ですが、10 年前の改修工事のときに小さい実験ブースを作りました。そこでは、－ 50℃でアイスコアを昇華して氷に含まれる不揮発性不純物を抽出することができます。この不純物は過去のエアロゾルで、抽出処理をすることで過去のエアロゾルの粒径や組成を解析することができます。グリーンランドアイスコアに含まれる過去の硫酸エアロゾルを分析したところ、現在の雪に含まれる硫酸エアロゾルに比べて、1970 年代の硫酸エアロゾルはそのサイズが小さいことがわかりました。サイズが小さいと同じ量の硫酸エアロゾルが含まれていても多数の雲凝結核をもたらし、これはこの時代に雲をより作りやすかったことを示唆します。1970 年代は人為起源由来の硫黄化合物の排出が盛んだった時代で、人間活動の影響で雲が効果的に作られていた可能性があります（Iizuka et al., 2022）。過去の大気環境を連続的に記録しているのはアイスコア以外にはほぼなく、－ 50℃で実験できる環境を整備している研究機関は世界的にみてもほとんどありません。したがって、良質のアイスコアという研究試料と低温室という分析環境がそろっている低温研ならではの成果といえます。詳しくは同号のプレスリリースを参考にしてください。

最後に、低温室の日々の運用は共通機器管理室の堤さん、東海林さん（令和４年度）による日々の温度管理や冷凍機の稼働、低温室内での霜とりなどの多くの作業があって成り立っています。また、アイスコアの低温室作業では様々な治具が必要で技術部の皆様には多岐にわたりお世話になっています。低温室とアイスコア解析を日々支えてくださっている皆様に深く感謝いたします。

引用文献

Iizuka,Y., R. Uemura, H. Matsui, N. Oshima, K. Kawakami, S. Hattori, H. Ohno, S. Matoba (2022). High Flux of Small Sulfate Aerosols During the 1970s Reconstructed From the SE-Dome Ice Core in Greenland. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol.127, doi://10.1029/2022JD036880.

タンパク質複合体としての光化学系とその単離法としてのNative電気泳動法

生物環境部門　高林　厚史

はじめに―タンパク質複合体としての光化学系とその単離法としての Native 電気泳動法

生物はエネルギーを外界から取り入れ、さまざまな代謝を行い、増殖する。その過程で、周囲の環境の変化に柔軟に応答して、代謝や増殖を調節している。これらの生命活動の中心となるのは「タンパク質」である。細胞の中には数千種類から数万種類のタンパク質が存在しており、これらのタンパク質が「適材適所」で細胞内のさまざまな反応を行っている。特筆すべきは、多くの反応が複数のタンパク質からなる「タンパク質複合体」によって行われている、ということである。一昔前の分子生物学では「単体の」タンパク質がどのような機能をもつのか、という研究が主流であったが、現在の分子生物学ではタンパク質「複合体」がどのように機能をするか、という研究を行う研究者が多い。

しかし、タンパク質複合体の研究には本質的に難しい点がある。一般的にタンパク質の研究には、タンパク質を細胞から抽出し、数千種類のタンパク質から自分の研究対象となるタンパク質を分離することが必要である。タンパク質複合体は複数のタンパク質同士の弱い相互作用によって形成されているため、多くの場合、細胞からタンパク質複合体を抽出する際にすぐにばらばらになってしまう。そうなってしまうと複合体としての機能を研究することが難しいため、いかにして、細胞内での本来の構造を保ったまま細胞からタンパク質複合体を抽出し、他のタンパク質から分離するか、という点が重要である。

私たちの研究グループではおもに光合成について研究している。そして、光合成を担う光合成装置である光化学系（光化学系 I と光化学系 II）はいずれも 10 種類以上のタンパク質が結合してできた巨大な複合体である（図 1）。私たちは、陸上植物の祖先である緑藻の進化初期に分岐した「古い」淡水性、もしくは「古い」海洋性緑藻、または寒冷圏の代表的な針葉常緑樹のイチイや寒冷圏では珍しい双子葉常緑植物のツルマサキ、などの光化学系の解析を行っている（図 2）。これら生物種の光化学系を調べることで、その進化や寒冷圏の厳冬期に対する環境適応機構について明らかにすることが目的である。

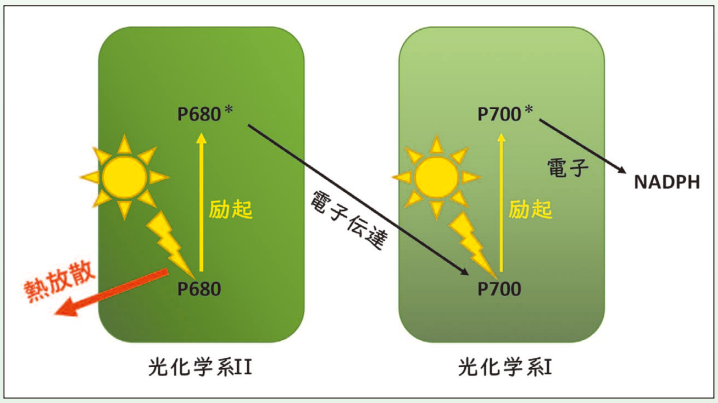


図 1　光合成における光化学系 I と光化学系 II の働き

光合成は大きく 3 つのステップに分けることができる。1）集光と励起エネルギー移動、2）電荷分離と電子伝達、3）炭酸固定である。光化学系はその 1）と 2）において重要な役割を担っている。

まず、光化学系は集光アンテナを含むタンパク質複合体であり、光のエネルギーを光化学系に結合する緑色のクロロフィル色素（もしくはカロテノイド色素）が吸収し、その励起エネルギーを反応中心クロロフィルの P680（光化学系 II）もしくは P700（光化学系 I）まで移動させる機能を持つ。次に、励起した反応中心クロロフィルである P680 や P700 が電荷分離することで、光合成電子伝達経路が駆動する。最終的にこの電子は還元型化合物である NADPH の合成に利用される。なお、図には記載していないが、この電子伝達に伴って光化学系が局在するチラコイド膜内外にプロトン勾配が形成され、ATP 合成酵素により ATP 合成反応に利用され、最終的にこの ATP と NADPH を利用して、炭酸固定反応が行われ糖が合成される。

低温などの環境ストレス条件下では光合成活性が低下し、クロロフィルの励起寿命が長くなることで活性酸素の生成を誘発することから、光合成生物は光化学系に「熱放散」機構を備えており、クロロフィルの励起エネルギーを熱として放散することで活性酸素の生成を抑制する。この機構には多様性が見られ、その機構にも謎が多いことから、私たちも精力的に研究を行っている。

図２　光合成の環境適応機構について私たちが解析している研究材料
　私たちはまた緑藻から陸上植物への進化に伴う光合成の変化を明らかにするため、「古い」緑藻であるメソスティグマなどを材料として研究をおこなっている。また、寒冷圏の常緑樹の厳冬期の光合成適応機構について明らかにするために、針葉樹のイチイと広葉樹のツルマサキなどを材料として研究を行っている。緑藻に関しては過去の氷河期、もしくは全球凍結期を生き延びており、また現在でも氷雪藻として見出される緑藻もあり、維管束植物とは異なるであろうその低温適応機構も興味深い。

　これら光化学系を研究するためには、この巨大な複合体を壊さないように単離する必要がある。しかし、光化学系複合体を単離しようと試みると、その過程で光化学系が容易に解離してしまうため、利用できる手法は限られている。その中でよく用いられる手法がショ糖密度勾配遠心法と Native 電気泳動法である。ショ糖密度勾配遠心法では、ショ糖を利用して溶液の密度を連続的に変化させ、超遠心を行うことで、分子量に依存してタンパク質複合体などの生体高分子を分離する手法である。一方、Native 電気泳動法は電気泳動の手法の１つで、文字通り、タンパク質複合体を“Native（生体内の構造や機能そのまま）”に保ったまま分離するための手法である。ショ糖密度勾配遠心法と比べると分離できるサンプルの量が少ない一方で、分離能に優れ、多サンプルを同時に解析できるという利点がある。

　私たちは両方の手法を使い分けて光化学系を単離して解析しているが、特に Native 電気泳動法に関しては分離法やその後の解析手法の改良を長年に渡って続けてきた。ここ数年で分離法の改良が進み、その成果を報告できた。この改良した Native 電気泳動法は光化学系の分離のみならず、様々なタンパク質複合体に応用が可能である。Native 電気泳動はそのような多様な非モデル生物の光化学系を解析するための強力なツールであり、今後このツールを生かして、光化学系の制御機構の進化や多様性について明らかにしていきたい。本稿ではその内容と将来展望について解説する。

Native 電気泳動法の原理とその課題

　電気泳動法とは、1）荷電した生体分子を、2）電場のもとで、3）ゲルの中を移動させることで、4）分子の大きさに依存して、5）生体分子を分離する技術である（図３）。

　まず、ゲルと「分子ふるい分け効果」について説明したい。電気泳動に用いるゲルとしては寒天（アガロース）、もしくは、アクリルアミドがよく用いられている。ゲル

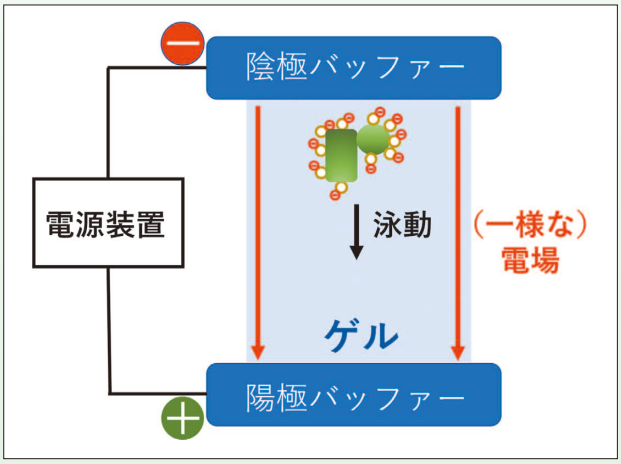


図３　電気泳動の原理
　典型的な電気泳動では陰極バッファーと陽極バッファー（とゲルバッファー）の異なる緩衝液系を組み合わせる。そして、電圧をかけることでゲル内に電場を形成し、負電荷を持つ化合物を結合させたタンパク質（複合体）を陰極側から陽極側に移動させる。その際、ゲルの網目場を通過させることで「分子ふるい分け効果」によりタンパク質（複合体）をその大きさで分離する。つまり、大きいタンパク質（複合体）はゲルの中をゆっくりと移動し、小さいタンパク質（複合体）はゲルの中を速く移動することを利用して、分離する。

は網目状の構造をしており、その網目のサイズをポアサイズとよぶ。生体高分子がその網目を移動する際には小さな分子は早く移動する一方で、大きな分子はゆっくりと移動する。これを「分子ふるい分け効果」という。そして、電気泳動とはこの効果を利用して生体高分子を分子の大きさに依存して分離する手法である。アクリルアミドゲルの方がアガロースゲルの方よりもポアサイズが小さいため、タンパク質の分離にはほぼアクリルアミドゲルを用いる。なお、アガロースゲルは DNA や RNA などの分離によく用いられる。

次に、生体分子を荷電させるためには、負電荷を持ち、タンパク質に対する結合能がある化合物を利用する。また、ゲル内に一様な電場をかけるためには、適切な緩衝液系が重要である。これらについては後述する。

光化学系の分離のための Native 電気泳動の課題

多くのタンパク質複合体は中性付近で最も安定であるため、Native 電気泳動では中性の緩衝液中で分離を行う。そして、電気泳動を行うためには、タンパク質の表面の電荷は「負」である必要がある（図 2）。一般的にアミノ酸は双性イオンであり、その分子内で正電荷と負電荷を持つことができる。そして中性では正電荷と負電荷が釣り合っているものが多い。そのため、中性では、多くのタンパク質の表面電荷は負に偏ってはおらず、そのままでは電気泳動できない。そのため、タンパク質の表面に負電荷を持つ化合物を結合させてから電気泳動を行う必要がある。

主な Native 電気泳動法としては Blue-Native(BN)-PAGE と Clear-Native(CN)-PAGE がよく用いられているが、BN-PAGE と CN-PAGE ではタンパク質複合体に結合し負電荷を付与するための化合物が異なっている。具体的には、BN-PAGE では Coomassie Brilliant Blue（CBB）という青色色素が、CN-PAGE では sodium deoxycholate（DOC）とよばれる胆汁酸の成分である界面活性剤が、タンパク質複合体に結合し負電荷を付与する。なお、CBB が青色であるため“Blue”-Native-PAGE という名前がつけられ、それに対して DOC が無色透明であるため“Clear”-Native-PAGE という名前がつけられた。

一方で、BN-PAGE でも CN-PAGE でも緩衝液システムは同一であり、pH 調整に BisTris、trailing ion（語句説明 1）として Tricine、を用いたシステムである。そして、緩衝液システムは中性といっても弱アルカリ性（泳動中の pH は 7.5）であるが、実は光化学系は弱酸性（例えば pH 6.5）の方が安定であると考えられている。実際、Native 電気泳動法で分離した光化学系 II は完全なものではなく一部が剥がれたものであることが知られていた。私たちは、その理由を弱アルカリ性での分離にあるのではないかと考え、弱酸性での泳動のための緩衝液システムの開発が必要ではないかと考えていた。

また、前述の通り、BN-PAGE では CBB とよばれる青色色素、CN-PAGE では DOC とよばれる胆汁酸の成分である界面活性剤が用いられてきたものの、結合時に光化学系の安定性が下がるのではないかと考えられてきた。そこで、私たちは、より結合時の光化学系の安定性を向上させる化合物の探索も行ってきた。

Native 電気泳動の改良 ver. 1.0 ―Amphipol A8-35 の利用

まず、私たちは、光化学系への結合能があり負電荷を持つ化合物の中で光化学系への変性作用が小さい化合物を求めて探索した結果、両親媒性ポリマーの Amphipol A8-35 にたどり着いた。きっかけはタンパク質の構造解析の総説を読んでその存在を知ったことだった。光化学系の Native 電気泳動法では、まず 1）膜に埋もれた光化学系をマイルドな（変性作用の小さい）界面活性剤で可溶化し、さらに 2）負電荷を付与した後、3）電気泳動で分離する。そして、一般的に、光化学系は界面活性剤がマイルドであってもそのミセル（語句説明 2）の中では比較的不安定であり、可溶化後の光化学系の不安定さはこれに起因する。しかし、興味深いことに、光化学系を可溶化した後に Amphipol A8-35 を添加すると、光化学系は界面活性剤ミセルから離れて、Amphipol A8-35 と複合体を形成する。そして、その複合体は安定である。さらに都合の良いことに、Amphipol A8-35 は中性の水溶液中では酸として振る舞い電離するため、分子全体として負に荷電している。つまり、Amphipol A8-35 と光化学系の複合体はそのまま電気泳動が可能なのである。

実際にこの Amphipol A8-35 を用いた電気泳動システムを従来のシステムと比較すると、光化学系 II からの集

光アンテナの解離を効率的に抑制できることが明らかになった。つまり、より生体内の状況を反映した構造の光化学系 II を得ることができるようになった。Amphipol A8-35 の安定化効果は光化学系に限定されるものではなく、これまでに気づいた範囲では従来のシステムと比べてデメリットもないため、この手法は従来法よりも良い手法であると考えている。

Native 電気泳動の改良 ver. 2.0 ―弱酸性泳動システムの開発

先ほどの改変 Native 電気泳動法 ver. 1.0 により集光アンテナがより多く結合した光化学系が得られるようになったが、1 つ残念なこととして、どの Native 電気泳動系においても泳動中に光化学系 II から酸素発生複合体が解離することが明らかになっていた。この点について論文の査読者からコメントされることが続いたため、次はこの改良を行おうと決意して取り組んだ。先行研究のデータから、問題は弱アルカリ性（pH 7.5）で泳動していることではないかと考えた。逆に言えば、弱酸性（pH 6.5）で泳動できればその解離が抑えられるのではないかと考えて、弱酸性で泳動するための緩衝液システムの開発に取り組んだ。

専門的な内容ではあるが、電気泳動において一様な電場を作るためには、trailing ion が必要である。しかし、従来の trailing ion である Tricine は弱酸性ではほとんど負に荷電せず、trailing ion として機能しない。そこで、私たちは Tricine の代わりに弱酸性で trailing ion として機能し得る化合物として MES（語句説明 3）に着目した。Tricine も MES も緩衝液の作成によく用いられる化合物ではあるものの、pKa は MES の方がかなり酸性にシフトしていて、pH 6.5 でも負に荷電するフォームが十分に存在すると予想されたためである。また、泳動中のゲル内の pH の調整には従来法の BisTris に加えて（より酸性側の pKa を持つ）Histidine を試した（図 4）。

その結果、ゲル内の pH の調製のために BisTris を用いても Histidine を用いても、trailing ion として MES を用いれば光化学系が分離できることが明らかになった（図 5）。そして、うれしいことに、分離した光化学系 II には酸素発生系タンパク質も結合していた。これは Native 電気泳動において酸素発生系のタンパク質を保持したまま光化学系 II を分離した初めての例であると思われる。つまり、私たちの Native 電気泳動法は光化学系 II を生体内の構造や機能を保ったまま分離することに成功している可能性が高く、今後、様々な光合成生物の

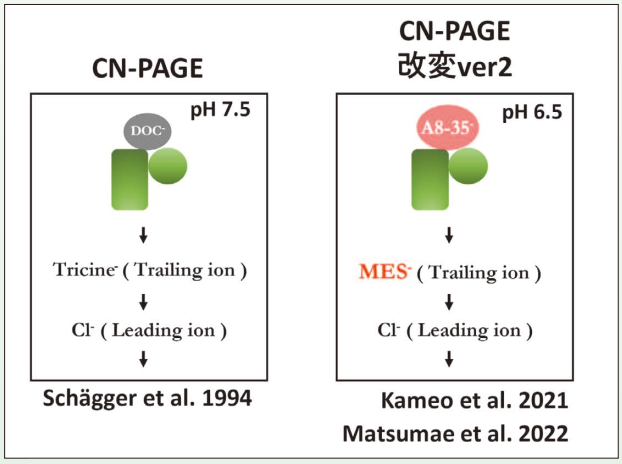


図 4　従来の CN-PAGE と CN-PAGE（改変 ver. 2.0）の違い
私たちが開発した CN-PAGE では、オリジナルの手法と比べて、主に 2 点について改変した。1 つ目は界面活性剤の sodium deoxycholate（DOC）を両親媒性ポリマーの amphipol A8-35 に代えたことである。そして 2 つ目は泳動中の pH を弱酸性にし、それに伴い trailing ion を Tricine から MES に代えたことである。これら改良により、光化学系 II からの集光アンテナの解離や酸素発生複合体の解離を効果的に抑制できるようになった。

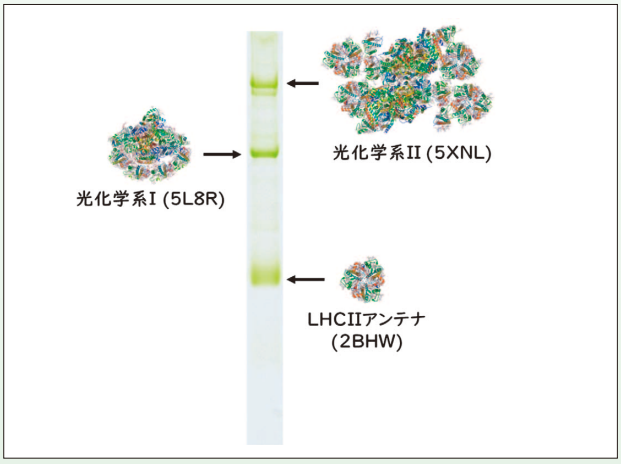


図 5　CN-PAGE（改変 ver. 2.0）による光化学系の分離
アブラナ科のシロイヌナズナの光化学系を本研究で開発した CN-PAGE（改変 ver2）で分離した結果。最も大きな緑色のバンドが光化学系 II で、次の大きなバンドが光化学系 I、そして光化学系 II や光化学系 I に結合する集光アンテナの LHCII アンテナが分離できた。この手法で分離した光化学系は機能や構造を維持しているため、「光合成」活性を持ち、様々な解析を行うことができる。なお、光化学系の立体構造の画像は PDBj に登録されているものを用いた（© 日本蛋白質構造データバンク（PDBj）licensed under CC 表示 4.0 国際）。5XNL、5L8R、2 BHW は光化学系それぞれの PDB エントリー番号を示す。

光化学系 II の構造や機能を比較・解析する上で有用な解析系になると期待している。また予想していなかったことに、光合成に必須である ATP（語句説明 4）合成酵素の複合体の安定化にも成功した。これらの結果は、この Native 電気泳動法 ver. 2.0 が光化学系 II 以外のタンパク質複合体の分離にもメリットがあることを示唆している。

なお、Amphipol A8-35 の代わりに DOC を用いると泳動できなかった。これは DOC の大部分が弱酸性では荷電していないことによる。また、CBB を用いると泳動はできたものの酸素発生系のタンパク質は解離した。これは CBB が Amphipol A8-35 ほどの光化学系の安定化効果を持たないからであろうと考えている。つまり、光化学系 II の安定化には Amphipol A8-35 と弱酸性緩衝液システムの両方が必要であったことになる。もしも、ver. 1.0 なしで弱酸性緩衝液システムだけを開発してもメリットがなかったことになる。この点は幸運だった。

まとめと今後の展望

この ver. 2.0 はこれまでの Native 電気泳動システムの中で最良のものではないかと自負している。今後はこの電気泳動系を利用して、寒冷圏の光合成生物の多様性について調べていきたい。

本稿の最後に私達が上記の Native 電気泳動システムを用いて進めている研究について簡単に紹介したい。自分の大きな興味は海洋性緑藻から淡水性緑藻を経て陸上植物へと進化する過程で、光化学系がどのように変遷したのか、を調べることにある。淡水や陸上環境は低温、乾燥、など様々な環境ストレスに曝される過酷な環境である。しかも、光化学系は環境ストレス下で活性酸素障害を引き起こす､非常に危険な装置でもある。そのため、光合成生物は光化学系にそれを防ぐための多様な機構を進化的に獲得したと考えられている。

私たちはその機構の進化的な、もしくは適応的な変化を調べるために、研究者がよく利用する研究材料（モデル生物）以外の非モデル生物の光化学系の解析にも挑戦している。モデル生物は例えばゲノム情報が入手できる、培養が容易である、遺伝子欠損株や解析系が整備されている、など実験材料として使いやすい様々な利点を持つため、多くの研究者が研究材料として利用している。一方で、非モデル生物は他の研究者がほとんど実験材料として利用していない生物種であるため、培養系や解析系を 1 から立ち上げる必要があり、しかもその過程で苦労が多いことも珍しくなく、モデル生物よりも解析の苦労は多い。しかし、その一方で、これまでに知られていなかった多様性に気づかせてくれるという点で、とても興味深い材料であり得る。今回確立した Native 電気泳動系は、非モデル生物であっても光化学系を分離することが比較的容易であるため、自分たちにとって重要な解析ツールである。この実験系を利用して、緑藻から陸上植物への進化や寒冷圏の光合成生物の環境適応能についての研究を進めていきたい。

語句説明

1. Trailing ion
電気泳動条件においてタンパク質よりも少し移動度の大きい（負電荷の）イオンで、電気泳動の際にこのイオンがゲル内を移動し続けることで、ゲル内に一様な電場を形成することができる。

2.（界面活性剤）ミセル
界面活性剤は親水基と疎水基の両方を持つ分子で、界面活性剤ミセルは疎水基同士が（内側で）相互作用し、親水基は水側（外側）を向くことで形成される分子集合体である。光化学系などの膜（疎水性）タンパク質が可溶化される際には、その疎水性領域がミセルの内側に取り囲まれる形で存在し、親水性領域はミセルの外側に露出することで、構造が安定に保たれる。そのため、界面活性剤ミセルの大きさや形状は膜タンパク質の可溶化の際に重要である。

3. MES:
生物学実験における pH 調整のためによく用いられる代表的な Good's buffer であり、弱酸性領域で緩衝能を有する。正式名称は、2- モルホリノエタンスルホン酸であるが、略して MES と呼ばれることが多い。本研究ではこの化合物を pH 調整のためではなく、trailing ion として用いた。

4. ATP:
アデノシン三リン酸の略で、生物が細胞内での様々な代謝のエネルギー源として共通に用いる化合物。光合成ではまずこの ATP と還元型化合物である NADPH（ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリン酸）が生産され、さらにその ATP のエネルギーと還元力を用いて炭酸固定（糖合成）などが行われる。

Report

■「同位体物質循環 国際シンポジウム 2022」の開催

水・物質循環部門　滝沢　侑子・力石　嘉人

2022 年 8 月 26 日（金）から 9 月 2 日（金）にわたり「2nd International Symposium on Isotope Physiology, Ecology, and Geochemistry（邦題：同位体物質循環 国際シンポジウム 2022）」が開催されました。本シンポジウムの目的は、有機化合物の安定同位体比を用いた研究とそれに関連する研究を実際に進めている（あるいは導入を検討している）研究者たちが集い、各々が明らかにした最先端の知見やアイデア、興味深いデータ、疑問等を持ち寄り、それを共有することによって、当該技術の今後の新たな応用先やその可能性を検討すること、そしてコミュニティとして歩むべき方向性を模索・議論することでした。今回は 2 つのテーマ「Development/improvement of method and methodology」 と「Application of Compound-Specific Isotope Analysis」が設けられ、それぞれ活発な議論がおこなわれました。

今回は、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から、現地参加およびオンライン参加の双方に対応したハイブリッド形式となりました。また、参加者各国の時差を考慮し、日本時間 7:45 ー 12:00 の Morning Session と、22:00 ー 25:00 の Midnight Session が設けられました。本シンポジウムには、国内外から 46 名の学生・研究者・企業が参加し、また、優秀発表賞として、３名の学生と、２名の若手研究者に、賞状と記念品が贈呈されました。

主　催：北海道大学、Hanyang University（韓国）、University of Wisconsin-Madison（アメリカ合衆国）

開催地：２会場（北海道大学、Hanyang University）、オンライン会場（Zoom）

協　賛：シリコーン工業会・Elementar・GERSTEL K. K.・日本学術振興会（科研費）

参　考：Web サイト：IsoPEG'22（https://sites.google.com/view/isopeg22/home）

Morning Session 閉会式での集合写真

Midnight Session での集合写真

Report

海外調査

■杉山　慎、箕輪昌紘、日下　稜

（1）調査・観測先：グリーンランド北西部カナック周辺

（2）期間：2022 年 7 月から 8 月

（3）参加者：

杉山慎、箕輪昌紘、日下稜（低温研）、近藤研、渡邊果歩、佐藤健、今津拓郎、鵜飼真汰（低温研･環境科学院･博士および修士課程大学院生）、北大、北見工大、京都大学の研究者および大学院生、合計 18 名

（4）カウンターパートの機関名：

カナック村研究協力者、グリーンランド天然資源研究所

（5）観測目的：

グリーンランド北西部カナック村を拠点として、氷河氷床・海洋・陸域・生態系の変動と、その社会影響の解明を目的に調査を実施した。低温研では同地域において長期間にわたる研究活動を続けているが、過去 2 年間は COVID-19 の影響で渡航できず、3 年ぶりの現地調査となった。カナック氷帽では、2012 年より継続する質量収支のモニタリングを実施し、氷レーダ、ドローン測量、流出河川流量の測定などを行った。氷河が流入するフィヨルドでは、氷河と海洋の相互作用および海洋生態系の調査を目的に、水温・塩分・音響を長期的に測定するセンサーを設置した。また、北大水産科学研究院、京都大学と協力して、海棲哺乳類や魚類の生態系調査を実施した。さらに、カナック村と近隣の小村において村民を招いた研究ワークショップを開催し、プロジェクトとこれまでの研究成果を紹介し、環境変化とその社会影響に関する議論を行った。本研究は ArCS II 北極域研究加速推進プロジェクトのもとで実施した。

図 1　カナック氷帽での氷レーダー観測

図 2　ボードイン氷河前のフィヨルドで測定装置を設置

図 3　研究ワークショップに集まったカナック村の住民

図 4　観測地カナック村。7 月に入って海氷が開いて今年初めての補給船が到着。

Report

海外実習

■杉山　慎、白岩孝行

（1）調査・観測先：スイス

（2）期間：2022 年 8 月 29 日から 9 月 9 日

（3）参加者：

杉山慎、白岩孝行（低温研）、渡邊果歩、捧茉優、石井花菜、今津拓郎（低温研･環境科学院修士課程大学院生）、環境科学院修士課程大学院生 2 名

（4）カウンターパートの機関名：

スイス連邦工科大学

（5）観測目的：

低温研では、環境科学院と連携した大学院向け教育プログラム「南極学カリキュラム」を開講しています。その一環として、2022 年度スイスアルプス氷河実習（南極学特別実習 I）を実施しました。2006 年から継続するこの実習は、COVID-19 の影響を受けて過去 2 年間は中止となりましたが、今年 3 年振りに 15 回目の開催が実現したものです。不透明な状況を勘案して通常よりも参加者を絞り、修士課程大学院生 6 名と引率教員 2 名での渡航となりました。スイスでは、大学間交流の協定を結ぶスイス連邦工科大学の協力を得て、氷河と雪氷圏に関する現地研究者の講義を受講。その後山岳地域に入って、アレッチ氷河やゴルナー氷河などスイスを代表する氷河を訪れ、ユングフラウヨッホでは標高 3600 メートルの高地観測所を見学しました。実習のハイライトはローヌ氷河での野外観測プログラムです。3 日間にわたって、10 年以上継続する氷河変動のモニタリングや、河川流量の測定などを行いました。実習の最後はスイス連邦工科大学に戻り、氷河観測のデータ解析と発表会で二週間のプログラムを締め括りました。今夏のスイスは観測史上最大の氷河融解を記録したとのこと。3 年振りに訪れた氷河の急激な変化には驚かされました。今後も実習を継続し、雪氷圏の変動を現場で学ぶ機会を提供したいと考えています。

図 1　スイス連邦工科大学で現地の研究者による講義を受講

図 2　氷河とその周辺地形の解説を受ける受講生

図 3　ローヌ氷河での観測プログラム

図 4　ゴルナー氷河が削りだした地形を歩く

Report

海外調査

■的場　澄人

（1）調査、観測先：ポターニン氷河調査、モンゴル、バヤン・ウルギー県
（2）期間：2022 年 8 月～9 月
（3）参加者：坂井亜規子（名古屋大学）、的場澄人
（4）カウンターパートの機関名：モンゴル気象水文環境研究所（Purevdagva Kalzan）
（5）観測目的：
急激な縮小が進むモンゴル西部の氷河の融解プロセスを明らかにすることを目的に、ポターニン氷河において 4 m のアイスコアの 2 本採取し、氷体内の不純物濃度を測定した。また、氷河脇に設置した自動気象観測装置のメンテナンスを行った。本観測は科研費基盤研究（A）「氷河融解を加速する 3 大光吸収性不純物の定量評価」において実施された。

モンゴル・ポターニン氷河

Press Release

(2022/7/6)

南極海の表層にたまった熱が氷河を底から融かす
～海氷の生成を遅らせて深層大循環に影響する可能性も～

発表者：准教授　青木　茂

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の青木 茂准教授、国立極地研究所の平野大輔助教、海洋研究開発機構の草原和弥研究員らの共同研究グループは、インド洋区にあるアメリー棚氷[*1]とケープダンレーポリニヤ[*2]付近の南極海沿岸において、海氷の少なかった2016/17年の夏季は海面水温が例年より0.5 ～ 1℃も高く、ポリニヤ域表層海水中の棚氷融解成分が約30%高かったことを観測しました。融解成分の高い状態は冬まで継続しました。

人工衛星データや数値実験結果の解析から、夏季に海氷が少ないときには海面付近に通常より多く熱がたまり、風により表層の暖水が棚氷の下に押し込まれ、棚氷を底面から融解させるメカニズムが働くことを見出しました。その後、アメリー棚氷方面から低塩分の暖水が流れてくることでポリニヤでの秋季の海氷形成が遅れ、深層大循環に関わる高密度水の形成が遅れることもわかりました。これまで棚氷の融解には水深数百メートルにある暖水が主要な役割を果たしていると考えられてきましたが、今回の研究は高温になった夏季表層水の沈み込みも大きく寄与することを示しています。

今後、地球温暖化が進行すると南極の海氷も減少すると予想されていますが、海氷減少に伴って海洋表面の貯熱量も加速度的に増大し、棚氷の融解を通じて南極氷床に影響を与えると同時に、海氷の生産が遅れることを通じて深層大循環にも影響する可能性を示しています。

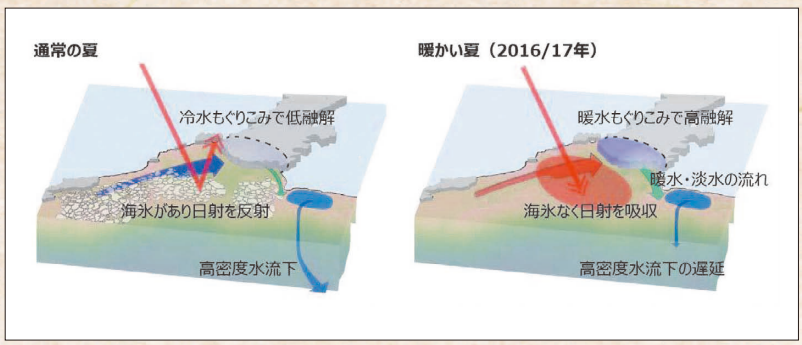
本研究成果は、2022年6月22日（水）公開の Communications Earth & Environment 誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Warm surface waters increase Antarctic ice shelf melt and delay dense water formation（暖かい海洋表層水が南極の棚氷を融かし高密度水の形成を遅らせる）

著者名：青木 茂[1]、髙橋智樹[2（当時）]、山崎開平[1（当時）、2（当時）、3]、平野大輔[3]、小野数也[1]、草原和弥[4]、田村岳史[3]、ウィリアムス・ガイ[5]（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 国立極地研究所、4 海洋研究開発機構、5 タスマニア大学）

雑誌名：Communications Earth & Environment
ＵＲＬ：https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.11914
ＤＯＩ：10.1038/s43247-022-00456-z
公表日：2022年6月22日（水）（オンライン公開）



南極棚氷近傍での通常の夏と暑い夏での海洋状況の違い。

Press Release

(2022/7/7)

ロシア・カムチャッカ半島で最新の氷河変動を解き明かす
～近くて遠い、極東ロシアに見る気候変動～

発表者：教授　杉山　慎
教授　三寺　史夫
准教授　白岩　孝行

【研究成果の概要】

北海道大学大学院環境科学院博士前期課程（研究当時）の福本峻吾氏と同大学低温科学研究所の杉山 慎教授、三寺史夫教授、白岩孝行准教授らの研究グループは、人工衛星データによって、ロシア・カムチャッカ半島における氷河の質量変動を明らかにしました。

現在、世界各地の山岳地域で氷河の急激な衰退が報告されています。山岳域の氷河は地球上の氷総量の1％に過ぎませんが、その氷損失量は南極やグリーンランドの氷床よりもずっと大きく、21世紀の氷河氷床全融解量の80％を占めています。しかしながら、ロシア・カムチャッカ半島の氷河については研究例が少なく、氷河変動の正確な理解が求められていました。

そこで研究グループは、人工衛星データを使ってカムチャッカ半島全域で氷河の表面標高変化を解析し、2000～2016年の氷量変化を測定しました。その結果、21世紀に入って半島全域で4.9Gtの氷が失われ、0.013mmの海水準上昇に相当する融解水が流出したことが明らかになりました。また2010年以降は氷河の縮小が特に激しく、毎年１mを超える世界的にも顕著な質量減少が確認されました。また、気候変動の経年変化（太平洋十年規模振動）を解析した結果、同半島における氷減少が今後も加速することが示唆されました。以上の結果は、温暖化とそれに伴う気候変動に対して、カムチャッカ半島の氷河が敏感に反応していることを示します。本研究成果によって、海水準上昇の正確な把握と予測が実現し、カムチャッカ周辺の水文環境の理解が進むことが期待されます。

本研究成果は、2022年7月4日（月）公開のJournal of Glaciology誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Glacier mass change on the Kamchatka Peninsula, Russia, from 2000 to 2016（ロシア・カムチャッカ半島における2000年から2016年の氷河質量変化）

著者名：福本峻吾[1（当時）、2（当時）]、杉山 慎[1]、波多俊太郎[1,2]、斉藤 潤[1（当時）、3]、白岩孝行[1]、三寺史夫[1]（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 Department of Geosciences、University of Montana）

雑誌名：Journal of Glaciology（雪氷学の専門誌）
ＤＯＩ：https://doi.org/10.1017/jog.2022.50
公表日：2022年7月4日（月）（オンライン公開）

（左）北部中央山脈のフフホイトゥン山（写真中央）とその山麓を流れるフフホイトゥン氷河。
（右）北部中央山脈ナチキンスキー氷河。いずれも 2016 年 4 月に北大山岳部遠征隊にて筆頭著者が撮影。

Press Release

(2022/7/29)

半導体洗浄時におけるナノ構造物の倒壊メカニズムを解明
～倒壊挙動の解明により、半導体のさらなる微細化・高集積化に寄与～

発表者：准教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の木村勇気准教授らの研究グループと、株式会社SCREENホールディングスは、半導体洗浄時のナノ構造物の倒壊挙動を明らかにしました。

半導体洗浄時のナノ構造物の倒壊は、液体の表面張力により引き起こされることが分かっていましたが、液体によるナノ構造物の倒壊挙動を断面方向から観察した例はありませんでした。

本研究では、集積イオンビーム装置により半導体表面に加工したナノ構造物を切り出して、洗浄工程で主に使用される2-プロパノール（IPA）とともに液体観察用試料ホルダー内に封入する手法を開発しました。これにより、透過型電子顕微鏡によるナノ構造物の倒壊挙動を観察することに成功しました。これは、半導体のナノ構造物の倒壊挙動を評価する手法を確立するとともに、半導体のさらなる微細化につながると期待される成果です。

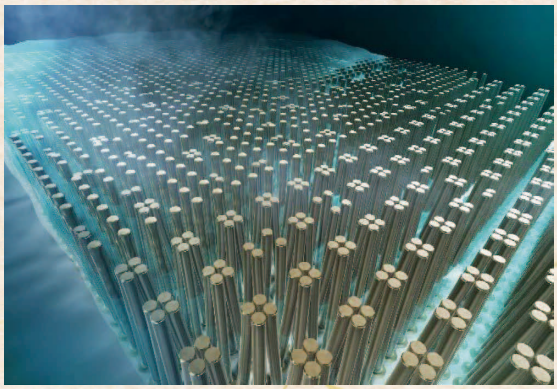
なお、本研究成果は、2022年6月22日（水）公開の ACS Applied Nano Materials 誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Liquid-Cell Transmission Electron Microscopy Observation of Two-Step Collapse Dynamics of Silicon Nanopillars on Evaporation of Propan-2-ol: Implications for Semiconductor Integration Density（溶液セルを用いた透過型電子顕微鏡による 2-プロパノール蒸発時のシリコンナノピラーの2ステップ倒壊挙動の観察）

著者名：佐々木悠太[1]、山崎智也[2]、木村勇気[2]（1 株式会社SCREENホールディングス、2 北海道大学低温科学研究所）

雑誌名：ACS Applied Nano Materials（ナノマテリアルに関する専門誌）
ＤＯＩ：10.1021/acsanm.2c01744
公表日：2022年6月22日（水）（オンライン公開）



洗浄後の乾燥過程で倒壊するナノ構造物（シリコンナノピラー）のイメージ図。
奥のピラーの多くは独立しているのに対して、手前のピラーは表面張力でくっついて四本一組になり、倒壊している。

Press Release

(2022/9/1)

世界最大規模の氷河湖決壊を宇宙から発見！
～南米パタゴニアで起きた氷河湖の決壊洪水を世界に先駆けて衛星データで解明～

発表者：教授　杉山　慎

【研究成果の概要】

北海道大学大学院環境科学院博士後期課程の波多俊太郎氏と同大学低温科学研究所の杉山 慎教授、同大学の日置幸介名誉教授（元理学研究院教授）の研究グループは、人工衛星データ解析から南米チリ・パタゴニアで発生した氷河湖決壊洪水を発見し、その規模とメカニズムを明らかにしました。

人工衛星データを用いて同地域の氷河変動を解析中に、氷河が流れ込む湖としては世界で4番目に大きなグレーベ湖で、2020年4月に水位が約20メートル急激に低下したことが判明しました。さらなる解析から、同年7月までに3.7km^{3}の湖水が流出したことが示されました。この氷河湖決壊洪水は、人工衛星によって地球が観測されるようになって以来、世界最大規模のものです。高解像度の人工衛星画像などを駆使して決壊原因を調査したところ、地形の崩壊によって湖から流出する河川の流れが移動し、河床の侵食が進んで排水が起きたことが確認されました。さらに、GRACEと呼ばれる地球重力を測定する人工衛星のデータを解析した結果、排水による重力場の変化を捉えました。氷河湖決壊洪水に伴う質量変化が、GRACE 衛星で観測されたのは初めてのことです。

パタゴニアでは急速に氷河が後退して氷河湖が拡大していますが、アクセスが困難で研究が十分に行われていません。研究グループは同地域での長い研究実績を活かして、稀に見る規模の氷河湖決壊を世界に先駆けて発見することに成功しました。この結果は、氷河湖の決壊による災害、氷河の将来変動、重力衛星による地球観測の可能性について、貴重なデータを提供するものです。

本研究成果は、2022年8月26日（金）公開の*Communications Earth & Environment*誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

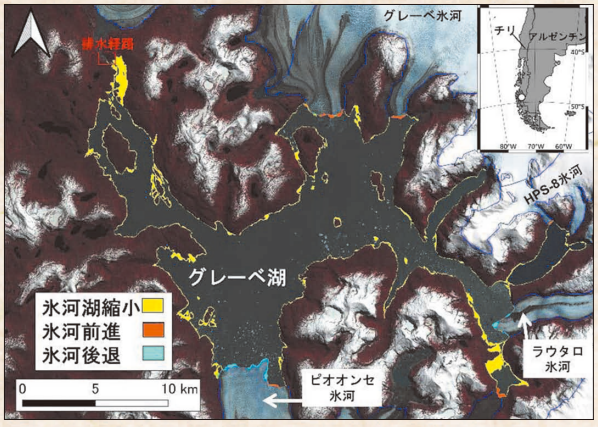
論文名：Abrupt drainage of Lago Greve, a large proglacial lake in Chilean Patagonia, observed by satellite in 2020（人工衛星によって観測された2020年チリ・パタゴニアの巨大氷河湖Greve湖の突発的な排水）

著者名：波多俊太郎[1,2]、杉山 慎[1]、日置幸介[3,4]（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 北海道大学大学院理学研究院、4 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China）

雑誌名：Communications Earth & Environment（英科学誌）

ＤＯＩ：10.1038/s43247-022-00531-5

公表日：2022年8月26日（金）（オンライン公開）



決壊洪水が起きた南米チリ・パタゴニアのグレーベ湖。黄色は決壊によって減少した湖の面積。赤と水色は氷河変動による湖面積の変化。

Press Release

(2022/9/20)

1970年代の硫酸エアロゾルの粒径復元にはじめて成功 ～硫酸エアロゾルが雲をつくる作用の解明による、地球温暖化メカニズム研究の進展に期待～

発表者：准教授　飯塚　芳徳

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の飯塚芳徳准教授らの研究グループはグリーンランドのアイスコア[*1]に保存されている硫酸エアロゾル[*2]の粒径分布の復元にはじめて成功し、人為硫黄酸化物の排出最盛期である1970年代の硫酸エアロゾルは主に0.4μmより小さかったことを解明しました（図）。

硫酸エアロゾルの組成や粒径分布は、地球の放射収支を考える上で重要な要素です。しかし、過去の硫酸エアロゾルの組成や粒径分布については、信頼できる観測がないためほとんど情報がなく、過去のエアロゾルの組成と輸送をモデル化することに不確実性が大きいのが現状です。今回、研究グループは、グリーンランドのアイスコアに保存されている硫酸エアロゾルの粒径分布の復元に成功し、1970年代に北極で小さな硫酸塩粒子が増加したことを示す最初の観測的証拠を提示しました。今回の研究結果はエアロゾルと雲の相互作用の理解を深めるとともに、モデルにおけるパラメータ設定に新たな制約を与えるものです。これは、地球温暖化のメカニズムの理解向上につながり、将来予測の精度を高めることが期待されます。

なお、本研究成果は、2022年8月25日（木）公開のJournal of Geophysical Research, Atmospheres誌に掲載されました。

【用語解説】

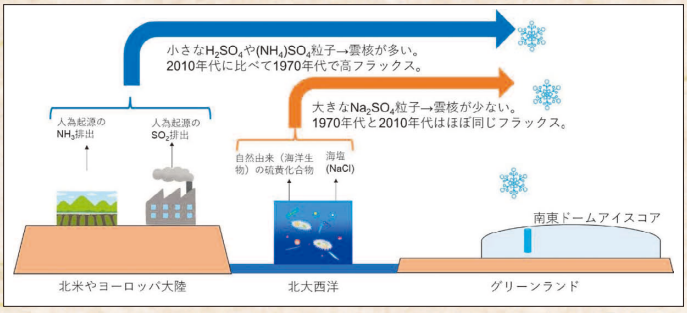
*1　アイスコア … 極地氷床などで鉛直方向にくり貫かれる円柱状の氷試料のこと。
*2　エアロゾル … 気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子と周囲の気体の混合体。

【論文発表の概要】

論文名：High flux of small sulfate aerosols during the 1970s reconstructed from the SE-Dome ice core in Greenland（グリーンランド南東ドームアイスコアから復元された1970年代の小粒径硫酸エアロゾルの高フラックス）

著者名：飯塚芳徳[1]、植村 立[2]、松井仁志[2]、大島 長[3]、川上 薫[1,4]、服部祥平[5,6]、大野 浩[7]、的場澄人[1]（1 北海道大学低温科学研究所、2 名古屋大学環境学研究科、3 気象庁気象研究所、4 北海道大学環境科学院、5 東京工業大学、6 南京大学、7 北見工業大学地球環境工学科）

雑誌名：Journal of Geophysical Research, Atmospheres（地球物理学の専門誌）
ＤＯＩ：10.1029/2022JD036880
公表日：2022年8月25日（木）
（オンライン公開）



1970 年代と 2010 年代の硫酸エアロゾルの輸送経路・組成と粒径。

(2022/9/26)

小惑星探査機「はやぶさ2」初期分析石の物質分析チーム研究成果の科学誌「Science」論文掲載について

発表者：准教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

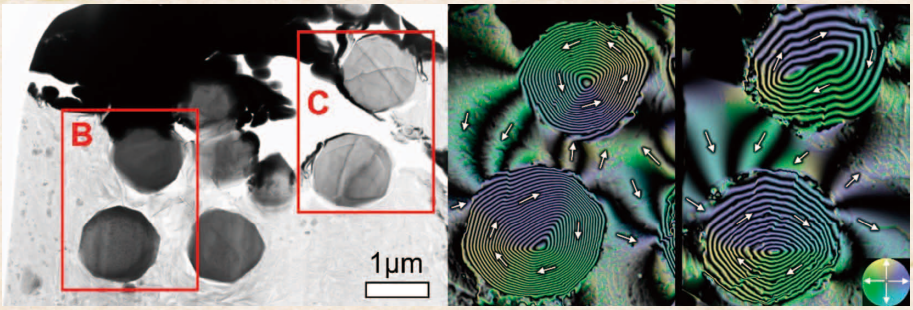
東北大学理学研究科中村智樹教授らの研究グループは、小惑星探査機「はやぶさ２」が回収した小惑星リュウグウのサンプル（探査機が回収した3番目に大きなサンプル（図）を含む17粒子）を日米欧の放射光施設５か所、ミュオン施設などを利用し宇宙化学的・物理学的手法による解析を行いました。その結果、リュウグウの形成から衝突破壊までの歴史（太陽系内での形成とその位置、天体材料物質の情報、含まれていた氷の種類、天体表層及び内部での水との反応による化学進化、天体衝突の影響など）が判明しました。また、リュウグウサンプルには、衝突破壊前の母天体の表層付近の物質と天体内部の物質が混在していることが判明しました。さらに、リュウグウサンプルの硬さ、熱の伝わり方、比熱、密度などを実測し、この実測値を使って、リュウグウ母天体形成後の天体内部の加熱による温度変化、および衝突破壊プロセスの数値シミュレーションを行い、リュウグウの形成進化をコンピュータ上で再現しました。

なお、「はやぶさ２初期分析チーム」のうち「石の物質分析チーム」の研究成果をまとめた論文が、アメリカの科学誌「Science」に2022年9月23日付（日本時間）で掲載されました。

本研究の一部は文部科学省先端研究基盤共用促進事業（先端研究設備プラットフォームプログラム）JPMXS0450200421、JPMXS0450200521で共用された機器を利用した成果です。

【論文発表の概要】

論文名：Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples（炭素質小惑星リュウグウの形成と進化：リターンサンプルから得た証拠）
雑誌名：Science
ＤＯＩ：10.1126/science.abn8671
公表日：2022年9月23日（金）（オンライン公開）



球状の磁鉄鉱（Fe3O4）結晶に刻まれた古地磁気の記録。リュウグウ試料から切り出した磁鉄鉱の透過型電子顕微鏡像（A）と電子線ホログラフィー法により得られた磁束分布像（B、C）。矢印と色は磁化の方位。粒子の内部に見られる同心円状の縞模様は、磁力線が矢印の方向に巻いていることを示している（渦状磁区構造と呼ばれる）。粒子の外側に見られる磁力線は粒子からの漏れ磁場で、リュウグウ母天体の内部が温まり、水と鉱物の反応が起こった時のリュウグウの磁場環境を反映している。（©Science）

Press Release

(2022/10/17)

氷結晶の主軸方位分布を深さ2400mにわたり詳細に分析
～南極ドームふじアイスコアで計測、氷床流動の理解に貢献～

発表者：准教授　飯塚　芳徳

【研究成果の概要】

国立極地研究所の猿谷友孝特任研究員を中心とする研究グループは、南極ドームふじ基地で掘削された深層アイスコアに含まれる氷の結晶の主軸方位分布を高精度で計測し、気候変動に伴った変化や含有不純物との関係性を明らかにしました。

これまでに掘削された様々なアイスコアでも結晶主軸方位分布の解析は行われてきましたが、測定方法の制約から細かい変動の検出は困難でした。研究グループは結晶主軸方位分布を解析する新たな手法として「誘電異方性計測法」を世界で初めて開発し（図）、これまでに類を見ない水準の高空間分解能かつ統計的信頼性をもった結晶主軸方位分布データが取得可能となりました。

氷の結晶の軸の方位は、氷床の浅い部分のアイスコアではばらつきが大きく、深くなるほどばらつきが小さくなって鉛直方向に揃っていくことが知られています。本研究では、高分解能での計測が可能な「誘電異方性計測法」を用いることにより、結晶主軸方位分布の深さ方向の変化は直線的ではなく、ばらつきが大きくなったり小さくなったりという“ゆらぎ”を繰り返しながら変化することを明らかにしました。さらに、深い部分のアイスコアほど“ゆらぎ”が大きいことや、今からおよそ13万年前や24万年前の間氷期から氷期へ移り変わる時期に、結晶の方位のばらつきが大きくなること、また、アイスコアの中に含まれる塩化物イオンの濃度や固体微粒子の数もばらつきの変化に関与していることが分かりました。

結晶主軸方位分布は、南極氷床の流動のしやすさに直接影響します。本成果は、将来の海面上昇予測に不可欠な、今後の氷床流動の予測に重要な知見です。

【論文発表の概要】

タイトル：Development of crystal orientation fabric in the Dome Fuji ice core in East Antarctica: implications for the deformation regime in ice sheets（東南極ドームふじアイスコアのファブリックの発達：氷床変形機構への推察）

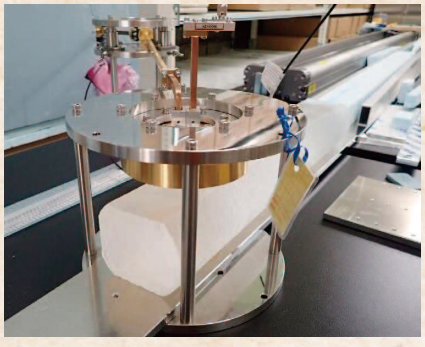
著者名：猿谷友孝（国立極地研究所気水圏研究グループ特任研究員）、藤田秀二（国立極地研究所気水圏研究グループ教授）、飯塚芳徳（北海道大学低温科学研究所准教授）、宮本 淳（北海道大学大学院教育推進機構特任准教授）、大野 浩（北見工業大学准教授）、堀 彰（北見工業大学准教授）、繁山 航（総合研究大学院大学、現所属：日本電子株式会社）、平林幹啓（国立極地研究所アイスコア研究センター特任助手）、東久美子（国立極地研究所気水圏研究グループ教授）

雑誌名：The Cryosphere

ＤＯＩ：10.5194/tc-16-2985-2022

ＵＲＬ：https://tc.copernicus.org/articles/16/2985/2022/

公表日：2022年7月27日（水）



誘電異方性計測法によるアイスコアの結晶主軸方位分布測定の様子。

(2022/10/21)

全海洋の深層に広がる南極底層水の起源水形成機構を発見
～海中深く大量に生成される海氷が海洋大循環を駆動する～

発表者：教授　大島　慶一郎

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の大島慶一郎教授、国立極地研究所の伊藤優人研究員らの研究グループは、南極地域観測隊によるケープダンレー沖での観測から、海中で大量に海氷が生成されるメカニズムを発見し、それによって南極底層水の起源水となる重い水が作られることを明らかにしました。

世界で一番重い海水は南極海で作られ、南極底層水として沈み込み、海洋の大循環が駆動されます。 研究グループは10年ほど前に、南極底層水の生成域として、それまで知られていた3ヶ所に加え、新たに南極昭和基地の東方1,200kmのケープダンレー沖が南極底層水生成域であることを発見しました。 しかし、なぜここで底層水が生成されるのかはよくわかっていませんでした。

本研究では、底層水起源水が生成されると推定される沿岸ポリニヤ内において、通年の連続観測を行い、海中100m深近くまで海氷（フラジルアイス）が生成される、極めて効率的な海氷生成メカニズムの存在を発見しました。 さらに衛星観測から、このケープダンレー沖が全南極で最もこのメカニズムが働く海域であることも明らかにしました。 大量に海氷が生成されると、塩分の大半が氷からはき出されることで低温・高塩の重い水が作られ、この海域が底層水を形成する海域となるわけです。

海洋大循環の起点となる南極底層水の形成過程の一つを明らかにした本研究は、気候変動の理解や予測にも繋がります。 また、フラジルアイスが海中深くまで達すると、生物生産を誘起する物質を海底から取り込むことができ、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ます。

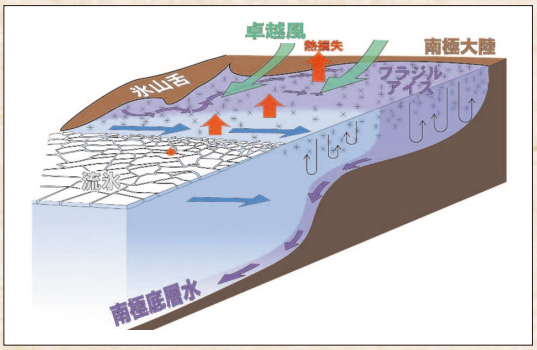
本研究は科学研究費補助金・基盤研究S（課題番号20221001；20H05707）等の助成を受け、現場観測は南極地域観測の公開利用研究として実施されました。 なお、本研究成果は、日本時間2022年10月21日（金）公開のScience Advances誌にFOCUS論文としてオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Dominant frazil ice production in the Cape Darnley polynya leading to Antarctic Bottom Water formation（ケープダンレーポリニヤでの大量のフラジルアイス生成が南極底層水を形成する）

著者名：大島慶一郎[1,2]、深町 康[2]、伊藤優人[3]、中田和輝[4]、清水大輔[3]、小野数也[1]、野村大樹[5]、橋田 元[3]、田村岳史[3]
（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 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター）

雑誌名：Science Advances
ＤＯＩ：10.1126/sciadv.adc9174
公表日：日本時間2022年10月21日（金）
（オンライン公開）



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。

AWARD

小松　瑞紀

日本地球惑星科学連合 2022年大会 学生優秀発表賞

（令和4年6月4日受賞）

杉山　慎

第38回「講談社科学出版賞」

（令和4年9月15日受賞）

近藤　研

日本雪氷学会雪氷研究大会（2022・札幌）学生優秀発表賞（口頭発表部門）

（令和4年10月4日受賞）

NEWS

■人事異動（令和4年4月2日から令和4年10月1日まで）

異動日	異動内容	氏　名	職　名	備　考
R4. 5. 1	採用	中　埜　夕　希	博士研究員	
R4. 6. 1	昇任	滝　沢　侑　子	准教授	
R4. 8. 1	採用	小　泉　淑　子	技術補助員	
R4. 8.18	採用	吉　成　浩　志	学術研究員	
R4. 9.30	辞職	橋　場　しのぶ	事務補助員	
R4. 9.30	任期満了	北　川　　恵	技術補佐員	
R4. 9.30	任期満了	SIMU SHARMINE AKTER	学術研究員	
R4.10. 1	採用	波　多　俊太郎	博士研究員	
R4.10. 1	採用	WANG YEFAN	博士研究員	
R4.10. 1	採用	田　中　　梓	事務補助員	

編❄集❄後❄記

▶地道なグラウンドワークと方法論開発、両方あって科学は進展します。どちらも重要ですね。（山口）

▶低温室は天からの手紙がたくさん詰まった氷の図書館。過去のことが記された秘密の宝庫なんですね。（渡辺）

▶みなさんは、たまにでも普段と違う行動をしてみたりしていますか?小さなことでも日常を変える刺激になって良いですよ。（日髙）

▶低温科学の最先端の研究から共同利用施設の運用まで、本号も魅力的な記事が掲載されましたのでお楽しみください。（宮﨑）

低温研ニュース第54号

（北海道大学低温科学研究所広報誌）

発行人：低温科学研究所長

編　集：低温研広報委員会

（山口　良文、渡辺　力、日髙　宏、宮﨑　雄三、事務部総務担当）

ご意見、お問い合わせ、投稿は下記まで

〒060-0819　北海道札幌市北区北19条西8丁目

TEL：011-706-5445　　FAX：011-706-7142

●低温研ニュースは本研究所ウェブサイトでも公開しております。
https://www2.lowtem.hokudai.ac.jp/research.html#6