

水蒸気(気相)中で成長する氷(雪)結晶表面の水1分子高さの階段模様(詳細についてはP9、図6、7を参照)



## Research



季節海氷域の振る舞いの理解に向けて(2)  
(豊田 威信) ..... 2



氷結晶表面の水1分子段差を可視化する光学顕微鏡の開発  
(佐崎 元) ..... 6

People ..... 12

### Report

海外調査(杉山 慎) ..... 13  
未来の女性研究者のための  
最先端研究体験プログラム ..... 14

Press Release / News



## 季節海水域の振る舞いの理解に向けて（2）

水・物質循環部門 豊田 威信

### はじめに

極域・亜極域に分布する海水域は地球の全海洋面積の約1割を占め、地球の気候システムに大変重要な役割を果たしています。このうち、冬季にのみ海水に覆われる海域のことを季節海水域と言います。前回（2019年12月号 No.48）の低温研ニュースでは季節海水域に関するトピックとして、氷盤分布の特性と海水レオロジーを取り上げましたが、今回はその続編として、海水の融解過程について最近の研究成果を紹介したいと思います。ここ数十年間、北極海全体の海水域面積は減少傾向にあります。冬季に比べて夏季の減少傾向が特に著しく多年氷域が徐々に季節海水域へと移行しているために、季節海水域の割合は増加傾向にあります。北半球全体でみると1980年ころには約半分の割合でしたが、昨年（2024年）の時点で約70%にまで増加しました。一方、南半球では恒常的に約80%を占めていますので、気候変動予測にとって季節海水域の融解過程を理解することは益々重要になりつつあります。

### 研究背景

海水の融解には大きく分けて二通りのプロセスがあります。春先になって日射量が増大するにつれて表面からじわじわと融けてゆくプロセス①と、波や氷盤同士の衝突によって小さく砕けた海水が日射によって暖められた海水の熱を海水の側面や底面から吸収して一気に解けてゆくプロセス②です。前者は陸に囲まれて波の影響が比較的少なく氷盤サイズが大きな北極域で卓越する一方、後者は外洋に囲まれて波の影響を受けやすい南極域で卓越すると考えられています。このことが融解期の北極と南極の海水域の振る舞いに違いを生み出しています。たとえば、春先の海水域の縮小の仕方は全般的に南極のほうが北極に比べて顕著に早い特徴が見られます。

南極域に限らず、一般にオホーツク海などの季節海水域では波の影響を受けやすいため、プロセス②の物理過程を正しく理解することが重要になっています。季節海水域の中でも特に波の影響が大きい氷縁域（氷縁からおよそ100km）が重要な役割を担います。そこでは氷盤が波によって小さな氷盤に破碎されて融解がすすみ、さらに波が侵入して氷盤を破碎、といったプロセスを繰り返しながら氷縁が急速に後退してゆくのです。しかしながら、これまで現場観測データが不足していたため未だに十分に理解されておらず、最新の気候モデルにおいても融解期の海水域の再現性は低い状況にありました。

このプロセスを理解するにあたって鍵となるのは、氷縁域での氷盤の破碎過程、またそれによって生じた氷盤の形状や大きさ分布を定量的に把握することです。同じ海水面積であっても氷盤が小さいほど温かな海水に接する面積が大きく周囲の海水から熱を効率的に吸収するためです。従って氷縁域の氷盤分布は融解速度を制御するとも言えましょう。氷盤の破碎過程については今なお計測手法や理論の試行錯誤が続いていますので、本研究では氷縁域における氷盤分布の計測と解釈に焦点をあてます。

海水域の振る舞いに関わる氷盤分布の重要性がRothrock博士ら（1984）によって提唱されて以来、氷盤分布を計測するために様々な観測が極域やオホーツク海などでなされてきました。しかしながら、その多くの場合、分解能の限界から氷盤の大きさは約10m以上に限られ、融解の最終段階にあたる直径数m以下の氷盤の分布特性を計測するには新たな計測手段が待望されていました。



## ドローンの活用

そのような状況下、近年あらたに登場したツールがドローンです。高分解能の画像を取得するには、無人で低高度の飛行が可能なドローンが格好のツールであるわけです。本研究では砕氷型巡視船「そうや」を用いて第一管区海上保安本部と共同で2020年2月にオホーツク海南部の海水域で観測を実施し、この海域で初めてドローン（DJI社、PHANTOM4）を氷盤計測に応用することに成功しました（図1）。

過去（2003年）に我々が同じ海域でヘリや衛星で取得した画像を用いて行った解析から、数m以上の氷盤は基本的には自己相似性（数学用語でフラクタル）の特性をもつこと、大きさ約40mを境に氷盤分布の特性が変化することが見出されました。しかしながら、当時は分解能の問題から、数m以下の氷盤は対象外でした。今回、海面高50mを飛行するドローンから直下の氷況をビデオカメラ（水平分解能：2cm）に収録し、海面と海水の輝度の違いから氷盤を抽出して画像解析を行うことにより、数m以下の小さな氷盤の特徴を調べることが可能となりました（図2）。

## 観測から見えてきたこと

オホーツク海南部を航海中に計6か所でドローン観測を行いました。ここでは北海道沿岸氷縁域の比較的小さな氷盤が卓越した海水域（総面積2万m<sup>2</sup>）に焦点



図1. オホーツク海南部海水域におけるドローン観測の写真。矢印が操縦者（筆者）。右上隅は観測に用いたドローン本体の写真。（2020年2月13日、巡視船「そうや」で実施）

を絞ります。この海域から0.2～10mの大きさ<sup>(1)</sup>をもつ12,100個の氷盤を注意深く抽出して統計解析を行った結果、(1) 大きさが0.9m以上の氷盤には大きさ分布にも形状にも自己相似性の特性があり、(2) それ以下の氷盤は熱力学的な破碎が作用して融解を促進する仕組みが見えてきました。どちらも海水固有の特性に由来する点が興味深いです。それぞれの特性についてもう少し詳しく見てゆきましょう。

(1) の特性について、図2から個々の氷盤は実に様々な形態を呈しており大変複雑な印象を受けますが、一般に海水域をマクロな視点で見ると自己相似性（フラクタル）という特徴をもつことが知られています。すなわち、スケールによらず同じように見える特性があります。たとえば、図2bは図2a中赤枠の領域を4倍に拡大した

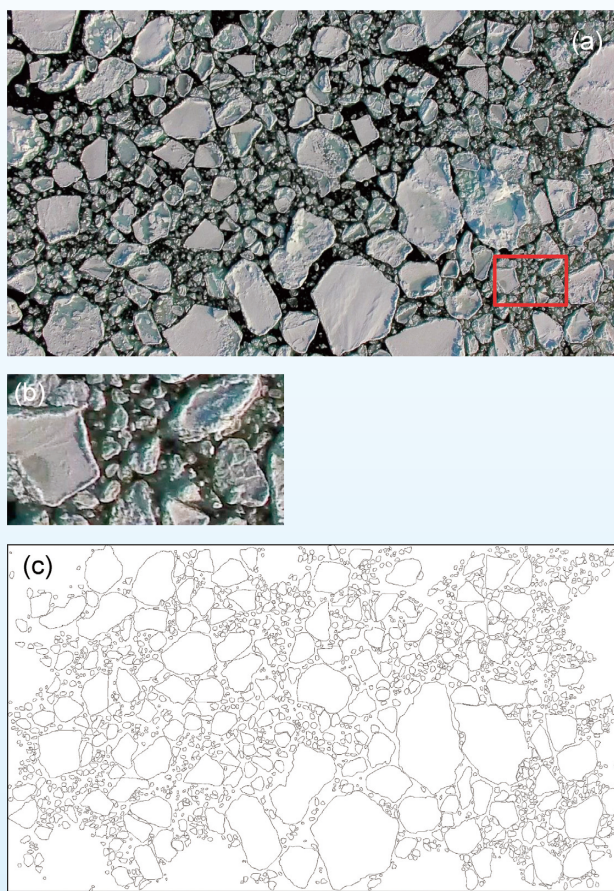


図2. オホーツク海南部氷縁域の (a) ドローンによる氷況写真（84×47m）、(b) 図2a内赤枠の領域を4倍に拡大した写真、(c) 画像解析により図2aを基に抽出した氷盤分布

画像ですが、氷盤の分布状況は図 2a とさしたる違いがないように見えるのではないのでしょうか。

自己相似性をもつ幾何学図形の形状の複雑さは図形によって様々ですが、見た目に複雑さの度合いが同じであれば、その図形の生成過程には何らかの共通点があるように感じられます。フラクタル図形の複雑さの指標となるのがフラクタル次元です。数学的な定義の詳細は省きますが、氷盤分布から見積られたフラクタル次元は氷盤の形成過程に関して何らかの示唆を与えるはずです。数学的には、積算個数  $N(x)$ （直径が  $x$  よりも大きな氷盤の個数）が  $A \cdot x^{-a}$  と表わされる関数（べき乗関数）で記述できれば統計的に自己相似性があると言えます。ここで指数の  $a$  がフラクタル次元に相当します。観測されたデータがどの範囲でこの関数に適合するかを調べ、適合する範囲に対してフラクタル次元を計算します。このような手法をこれまでオホーツク海や南極海などの海氷域に適用した結果、氷縁近くの波による破碎作用が大きいところほどフラクタル次元が高いことが報告されています。

この手法を本観測データに適用しますと、0.9 m 以上の大きさをもつ氷盤分布のフラクタル次元は 1.51 と見積もられ、過去に南極氷縁付近で見積られた値 (1.52) とほぼ合致しました。すなわち、観測された海域では基

本的には波による力学的な破碎作用で氷盤分布が形成されたと考えられます。

一方、(2) に関連して大きさ 0.9 m 以下で氷盤の分布特性が明らかに変わることを示すのが図 3、図 4 です。これらの図は大きさ 0.9 m 以下の氷盤はべき乗関数で予想される個数より多く、他の要因で氷盤の破碎作用が促進されたことを示唆します。加えて、氷盤の形状もおおよそ 0.9 m 以下で大きく変化していることが図 5 から分かります。

では、小さな氷盤で何故このような変化が生じたのでしょうか？ あくまで推測ですが、次のように考えるのが妥当だと思います。重要な要因は、小さい氷盤ほど氷盤の全表面積に対する側面積の寄与が大きくなり、周囲の海洋から熱を格段に効率的に吸収しやすくなるためです。氷盤の厚さにもよりますが、観測海域の場合には底面積に対する側面積の比率が上回るのが約 1 m と見積もられました。

ここで融点（ $\sim 0^{\circ}\text{C}$ ）に近い海水が熱をたくさん吸収すればどのようになるか見てみましょう。海氷内部にはブラインと呼ばれる無数の小さな液相領域（ $\sim 1\text{ mm}$ ）が存在します。海水に熱が与えられると、純氷やブラインの昇温だけではなく、その一部は純氷を融解してブラインの体積を増大させるために用いられます。この内

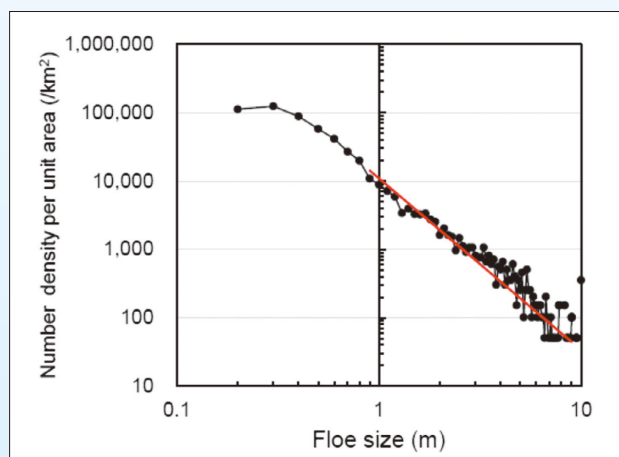


図 3. 氷盤の大きさの数密度分布  
赤線はべき乗関数を表し、この線上にあれば自己相似性があることを示す。大きさ 0.9 ~ 9 m の範囲でほぼ直線上に乗っていることに注目。

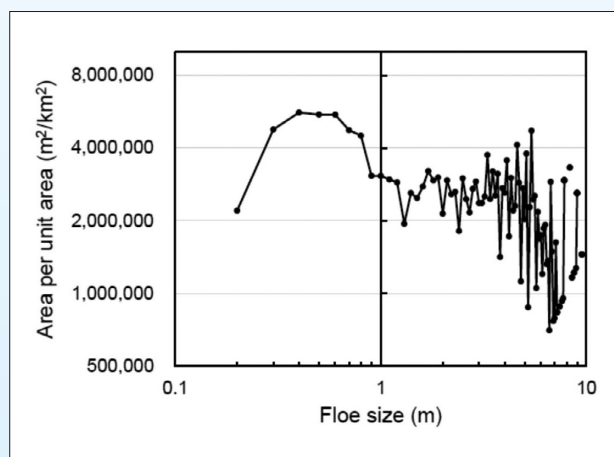


図 4. 各々の氷盤の大きさが占める表面積  
大きさ 0.9 m 以下で急激に面積が増えていることに注目。

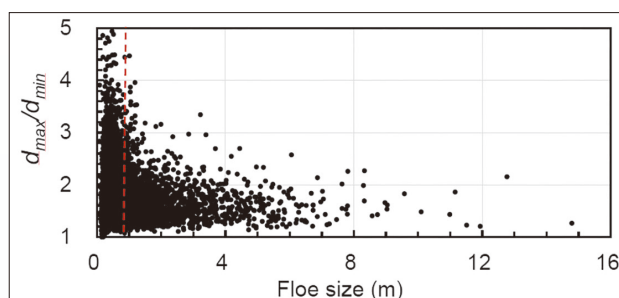


図5. 個々の氷盤のアスペクト比を氷盤の大きさの関数としてプロットしたもの。大きさ 0.9 m (破線) 以下の氷盤でアスペクト比のばらつきが大きくなっていることに注目。

部融解の割合は 0°C に近づくと著しく大きくなるため、ブラインの体積比は急激に増加して海水の崩壊を誘引します (図6)。波とは異なる破碎作用ですから、図5で氷盤の形状が変化すること

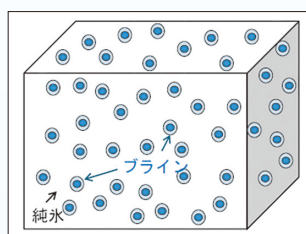


図6. 海水内部の液相 (ブライン) が昇温により体積が青色→水色に拡大する様子を示す。

とも頷けます。気象再解析データを用いた熱収支の解析からは、海水面で吸収した熱の約9割は海水の内部融解に使われたと見積もられ、我々の推測を裏付けています。これは内部に数多くの液体相を含有する海水のユニークな特性といえましょう。

このような熱力学的な氷盤の破碎作用はこれまでも Perovich 博士 (2014) や Hwang 博士 (2017) らにより北極海の 100 m を超える大きな海水を対象に指摘されてきましたが、我々の観測により小さな氷盤の融解の最終段階でも生じている様子が見出されました。海水の融解プロセスはどのように力学的効果と熱力学的効果の相乗効果により効率的に生じていることは注目に値すると思います。

## 今後の展望

本研究を通して、オホーツク海南部の氷縁域における融解過程には氷盤の大きさに応じて波による破碎作用、それに小さな氷盤の最終段階では熱力学的な破碎作用の

二段階があることが見出されました。この結果は海水の基本的な特性に基づくものですから、この海域に限らず広く世界の季節海水域に適用できそうです。従って、これらの特徴を数値モデルに組み入れることにより、季節海水域における融解期の海水面積の変動予測に資することが期待されます。また同時に、春先の海水融解により生じる春季ブルームの予測、それに伴う生態系の変化の将来予測の進展も期待されます。海水融解は船舶航行にとっても重要な情報であるため、海難防止にもつながりそうです。

極域・亜極域の海水域の変動が著しい現在、季節海水域の中でも特に氷縁域の果たす役割の重要性が高まっています。季節海水域の面積変動の鍵を握ると同時に、環境変動の影響を大きく受ける海域であるためです。現在、氷縁域に関するプロジェクトがいくつか実施されており、今後、物理、地球生物化学など様々な側面から理解が進むことを願っています。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 (JP19K12304, JP22K12341) などの助成を受け、北海道大学と第一管区海上保安本部との業務協力のもとで実施されました。

## 参考論文

Toyota, T., Y. Arihara, T. Waseda, M. Ito, J. Nishioka (2025):

Melting processes of the marginal ice zone inferred from floe size distributions measured with a drone in the southern Sea of Okhotsk. *Polar Science*. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2025.101215>

(注釈)

<sup>(1)</sup> 氷盤の大きさはここでは氷盤と同じ面積をもつ円盤の直径と定義します。





雪氷新領域部門 佐崎 元

## 氷結晶表面の水 1 分子段差を可視化する 光学顕微鏡の開発

### 結晶とは

私が所属する研究グループでは、雪や氷の表面での分子高さスケールのさまざまな現象（ステップの前進や擬似液体層の生成など：詳細は後述）を研究しています。本稿では、それを可能にしている光学顕微鏡の開発にまつわる昔話をさせていただきます。

皆さんもよくご存知のように、雪や氷は水分子からなる結晶です（図1）。それでは結晶はどのような特徴を持っているのでしょうか？極めて多数の分子（もしくは原子、イオンなど）が周期的に一定の決められた配置で整列した固体のことを結晶と呼びます。いわば、美しく積み上げられた積み木細工（図2）のようなものです。それでは、どうすればこのような積み木細工を作ることができるのでしょうか？たくさんの積み木を一箇所にただ集めてくるだけで、美しい積み木細工を作ることができるのでしょうか？答えは「ノー」です。積み木細工を作り上げるには、愚直に1つずつ積み木を並べてゆくしかありません。まず、1層目を作るべく、1つずつ積み木を平面状に並べてゆきます。1層目が終了した後は、2層目を作るべくまた1つずつ積み木を平面状に並べてゆきます。図2に示した模式図では、3層目の上で4層目を作っている所です。何が言いたいかと言いますと、分

子や原子の種類によらず、全ての結晶は1層ずつ層状に成長してゆかざるを得ません（結晶がとても速く成長する場合にはもう1つ異なる成長機構もありますが、本稿では割愛します）。このような成長は「層状成長」と呼ばれています。この分子（原子）層の成長端を「ステップ」と呼びます（図2）。また、ステップ上で積み木が凹んでいる部分は「キンク」と呼ばれます（図2）。このキンク部位に分子（原子）が取り込まれると、その分子（原子）は結晶の一員になります。このようにして、分子（原子）層は平面方向に層状に成長します。そのため、結晶が成長する素過程を理解するには、分子（原子）層がどのように広がってゆくのか、すなわちステップがどのように平面方向へ成長するかを直接観察する必要があります。

### 氷結晶表面上でのステップの可視化

これまで多くの材料で、気相中や溶液中で結晶が成長する際に、ステップの平面方向への成長が直接観察されてきました。しかしながら、雪・氷結晶の場合には、ステップの直接観察は長らく誰にもできませんでした。その理由としては、固体の表面を分子レベルで直接観察するために用いられるさまざまな顕微鏡の利用が、融点直

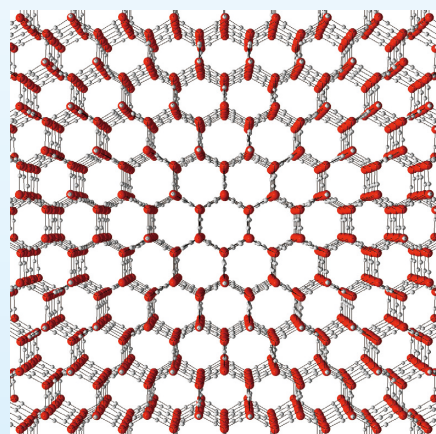


図1. 氷 $I_h$ 結晶の構造。赤丸は酸素原子、灰丸は水素原子を示します。図は、鳥取大学の瀬浩樹教授のご厚意によりです。

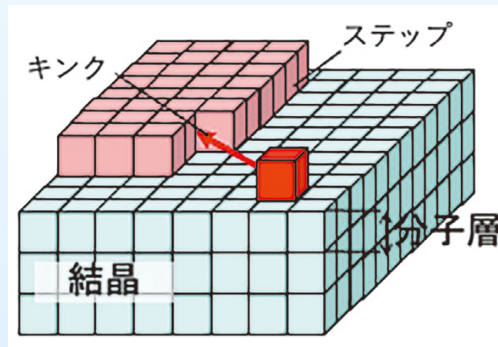


図2. 結晶とは、あたかも美しく積み上げられた積み木細工のようなものです。分子や原子の種類を問わず、結晶は1層ずつ層状に成長しなければなりません。図は、3層目（青色）の上に4層目（ピンク色）が出来上がってゆく様子を示します。結晶表面に現れた分子層の成長端をステップと呼び、ステップ上の分子が欠けている部分をキンクと呼びます。

下の雪・氷結晶の場合には困難であることが挙げられます。例えば、電子顕微鏡は1気圧の大気中では、電子線を飛ばせないため、動作しません。また、カンチレバーと呼ばれる微小な針で試料表面を走査し、試料とカンチレバーの間に生じる原子間力を計測・調整することで、試料表面の微小構造を観察することができる原子間力顕微鏡という装置があります。しかし、原子間力顕微鏡の場合には、後ほど紹介する擬似液体層と呼ばれる薄い液層のため、カンチレバーを上手く横方向に走査することが困難です。

このような状況を打開するためには、試料表面に完全に非接触・非破壊であり、かつ環境を問わない光学顕微鏡の高さ方向の検出感度を極限まで向上させる必要があると考えました。幸い、前職（東北大学金属材料研究所）に在籍中に、レーザー共焦点微分干涉顕微鏡（Laser Confocal Microscopy combined with Differential Interference contrast Microscopy: LCM-DIM）と呼んでいる光学顕微鏡を、株式会社オリンパスエンジニアリングと共同で開発することができていました<sup>[1]</sup>。レーザー共焦点顕微鏡は、ピンホールと呼ばれる光学フィルターを用いて、試料表面以外から発せられる光（迷光と呼ばれる、画質を劣化させる要因の一つ）を効率的に除去するため、像の品質を格段に向上させることができます<sup>[2]</sup>（図3）。また、微分干涉顕微鏡は、特殊なプリズムを用いて入射光を平行な2つの入射光に分割し、試料に照射します（図4）。試料表面に段差（ステップ）があり、2つの入射光がそれぞれステップの上段と下段で反射した場合、2つの反射光には段差に応じた位相のずれ（位相差）が生じます。この2つの反射光を干渉させる（引き算を行う）ことで、その強度に変化（明暗）を生じさせます。つまり、試料表面のわずかな高さの差を、光の強度差に置き換えることができます。これら2つの既存の顕微法を組み合わせることで、東北大に在職時には、水溶液中で成長するタンパク質結晶表面のステップ（3～6 nm 高さ）を可視化する研究を行っていました。

私が2008年に北大低温研に赴任した際に、研究対象がタンパク質結晶から雪・氷結晶へと変わりました。そ

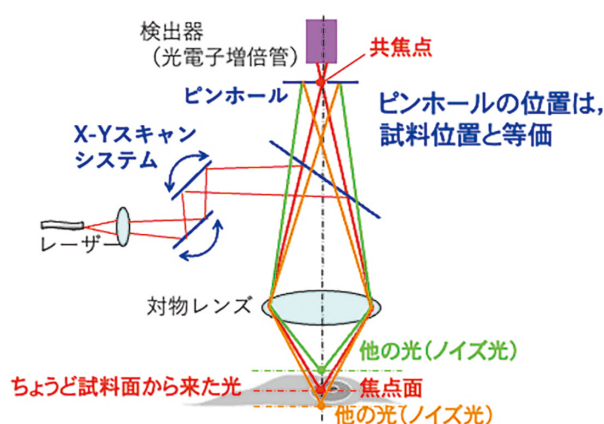


図3. レーザー共焦点顕微鏡の原理図。試料と等価な位置にピンホールを置くことで、試料以外の面から出た迷光（ノイズ光）を効率よく除去できます。そのため、像の品質を格段に向上させることができます。

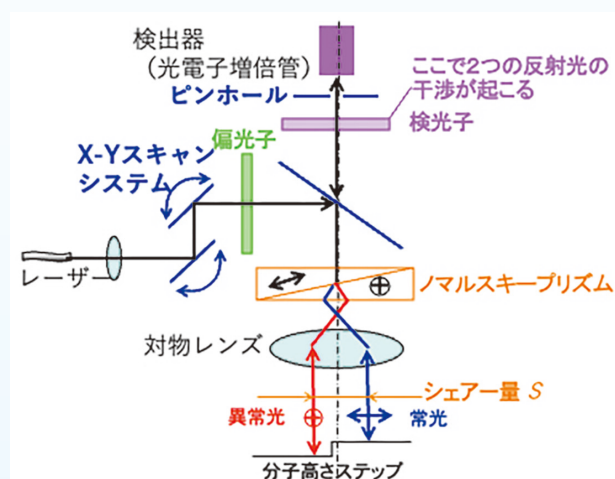


図4. 微分干涉顕微鏡の原理図。入射光をノルマスキープリズムを用いて互いに平行な2つの光線に分割し、分子高さステップを有する試料表面の上段と下段を照明すると、2つの反射光はステップ高さの2倍の位相差を持ちます。この2つの光を干渉（引き算）させることで、試料表面のわずかな高さの差をコントラスト（強度の差）に変えることができます。

のため、これまで可視化していた3～6 nm高さのステップに替わって、高さ0.37 nmの雪・氷結晶のステップを可視化する必要が生じました。すなわち、LCM-DIMの高さ方向の検出感度を10倍引き上げなければなりませんでした。ここでポイントになったのは、高さ方向の検出感度を増大させるためには、それを阻害する物理法則が何もないことでした。光学顕微鏡の横方向の分解能は光の回折現象によって決まるため、光の波長の半分よりも小さい物体を捉えることができません（一般に、回



折限界と呼ばれます)。しかし、高さ方向にはそのような物理法則による制約がないため、nm 以下の高さのステップの検出は、できる保証もないができない理由もない状態でした。私の場合、幸にこのタイミングで科学技術振興機構のさきがけ研究に採択していただいたため、株式会社オリンパスエンジニアリングの斎藤良治氏および小林茂氏とともにさまざまな改良に取り組みました。結果的に大きな効果が得られたのは、次の2点の改良でした。(1) レーザー共焦点顕微鏡では、試料からの反射光を光源からの入射光と切り分けて検出する必要があります。そのためには入射光と反射光を2:8の割合で切り分けるビームスプリッターを使うのが通常ですが、そうではなく偏光ビームスプリッターと呼ばれる特殊な光学素子を用いることで、像のシグナル・ノイズ比を劇的に改善することができました。(2) また、レーザーを光源に用いると、干渉性に優れている(可干渉長が長い)ために、顕微鏡の光路中の様々な光学素子からのわずかな反射光が互いに干渉してしまい、不必要な干渉縞やスペックル・パターンと呼ばれるノイズを生成してしまいます。そのため、スーパー・ルミネッセント・ダイオードと呼ばれる干渉性が悪い光源(可干渉長 15  $\mu\text{m}$ )を意図的に使用することで、試料表面からの反射光のみを干渉させることに成功しました(ただしこれは、結晶表面の分子レベル高さの段差を検出し得たとしても、15  $\mu\text{m}$  よりも高い段差は検出できないことを意味します)。

そして、2010年に氷結晶表面のステップ(水1分子高さ: 0.37 nm 高さ)を可視化することについて成功しました<sup>[3]</sup>。これにより、雪・氷結晶においても分子ステップのレベルでの研究がようやく可能となりました。図5に、過飽和な水蒸気中で成長する氷結晶(すなわち

雪結晶)のベーサル面(底面とも呼ばれる六角形の結晶面)のLCM-DIM像を示します。ベーサル面の表面に丸い形状の分子層(図2ではピンク色で示されている最外表面の分子層)が次々と生成する様子を示しています<sup>§</sup>。丸い分子層のフチ(すなわちステップ)に水分子が次々と取り込まれることで、ステップが平面方向に成長してゆく様子がわかります。このようにして、氷結晶は1分子層ずつ、層状に成長することがわかります<sup>¶</sup>。これらの丸い分子層は、図2のように同じ大きさの積み木(図5

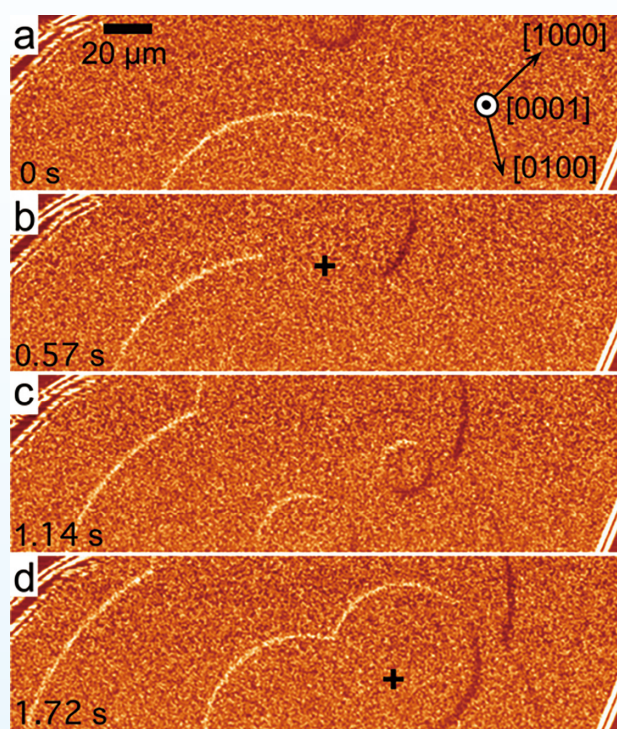


図5 過飽和な水蒸気中で成長している氷結晶ベーサル面のLCM-DIM像<sup>[3]</sup>。時間とともに、ベーサル面上で丸い分子層(図2のピンク色で示した最外表面の分子層)が生成します。丸い分子層のフチ(ステップ)に次々と水分子が取り込まれることで、ステップは平面方向に成長します。ステップの高さ(水1分子高さ: 0.37 nm)は常に同じであるため、隣り合う分子層同士が衝突・合体すると、ステップのコントラストが完全に消滅します(+印)。

§ あたかも画面左上から右下方向に向けて傾けた光で結晶表面を照明しているかのように、丸い分子層のステップの左上半分は明るく、そしてステップの右下半分は暗いコントラストで示されています。このように微分干渉顕微鏡は、試料表面のわずかな凹凸に3次元的なコントラストを擬似的に与えます。

¶ 時間の経過とともに、平らな結晶表面上のランダムな位置で分子層は生成します。このような生成の仕方は「核形成した」と表現されます。平らな結晶表面上に1分子高さの薄い2次元的な分子層が生成しますので、図5に示された成長機構は、「2次元核成長」と呼ばれます。



では同じ大きさの水分子)でできているため、丸い分子層のフチ(ステップ)は全て同じ高さ(水1分子サイズの0.37 nm)を持ちます。そのため、隣り合った2つの分子層が合体すると、分子層と分子層の間に存在していたステップが常に完全に消滅します(図5中の+印)。

## その後の展開

過飽和な水蒸気中で成長する氷結晶の表面を、分子レベルの高さ感度で直接観察できる光学顕微鏡が開発できましたので、その後、下記のような分野に研究の裾野を広げて行っています。

### 1) 氷の結晶面による成長挙動の違いについて

LCM-DIMを開発する以前は、氷結晶がどのようなメカニズムで成長するかを調べるには、「氷結晶の大きさ」が時間とともにどのように増大するかを計測し、「結晶面の垂直方向への成長速度(面成長速度)」と過飽和の関係を、いくつかの仮定を含んだモデル式を用いてカーブフィッティングし、どのモデル式が実験結果を一番上手く説明し得るかを検討するしか方法がありませんでした(多くの仮定を含む、極めて間接的な方法でした)。しかし、結晶表面上の個々のステップを直接可視化することができれば、成長メカニズムは一目瞭然にわかりますし、「ステップの平面方向への成長」という成長素過程を直接計測することが可能になります。そのため、以前より格段に根源的な研究を行うことが可能となります。その手始めとして、過飽和な水蒸気中で成長している氷結晶のベーサル面(底面)とプリズム面(側面)上のステップの挙動を、LCM-DIMを用いて直接観察しました。ステップが結晶表面に現れる機構は、図5に示したものの以外にも存在します。その代表例が「渦巻き成長」と呼ばれる成長機構です(詳しくは図6とそのキャプションを参照してください)。プリズム面上では図6に示したような渦巻き状のステップが形成されますが、ベーサル面上では渦巻きの中心点(らせん転位の露頭点)は常に結晶の端に位置しており(図7の白矢印頭)、通常の渦巻き成長理論では説明できないことがわかりまし

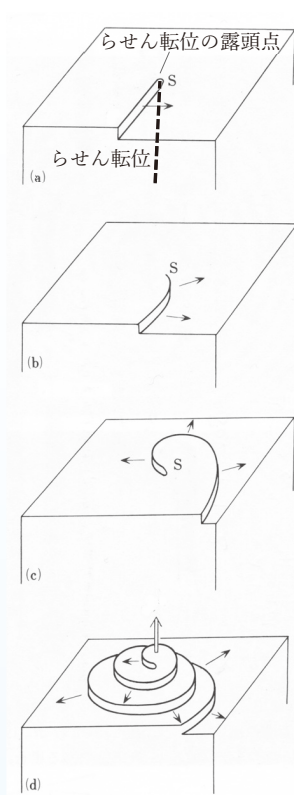


図6. 渦巻き成長機構(図は[12]のものを改変)。結晶に応力がかかると(例えば、結晶の左側には下から、そして右側には上から押す力が加わると)、図aに示したように、結晶表面に「分子高さの凸凹」ができることがよくあります。このような場合には、結晶の中には点線で示した「らせん転位」と呼ばれる直線状の格子欠陥(上下方向への結合の手の掛け違い)が存在します(詳しくは書籍<sup>[12]</sup>のp.136以降を参照)。このようにして生成した結晶表面の分子高さの凸凹は、ステップとして機能します。ステップが等速度で平面方向に成長すると(図b~d)、らせん転位からの距離が短くなるにつれて、ステップが回転する角速度が大きくなるため、ステップは徐々に渦巻き状の形状を示すようになります。らせん転位の位置が動かなければ、渦巻きの中心の位置は変わりません。ステップが渦巻きの中心から常に生成されるため、結晶面は常に渦巻き状のステップに覆われ続けている点が、図5の成長機構とは大きく異なります。

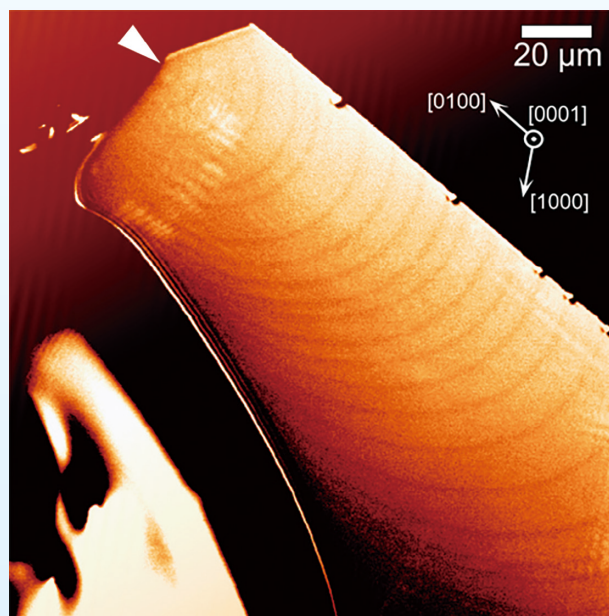


図7. 過飽和な水蒸気中で成長している氷結晶ベーサル面のLCM-DIM像<sup>[3]</sup>。らせん転位は常にベーサル面の端に露頭しており(白矢印頭)、そこから同心円状のステップが生成され、右下方方向に成長してゆく様子。渦巻きの中心が結晶の端に位置するため、ステップは図6のような渦巻き状には見えません。

た<sup>[4, 5]</sup>。このベーサル面上での渦巻き成長の挙動は大変珍しく、私が知る限り氷結晶のベーサル面でのみ見られます。近い将来にその原因を解明できればと思います。また、プリズム面上のステップの前進速度は温度の低下とともにアレニウス則に従い単調に減少するのに対し、ベーサル面上のステップの前進速度は温度の低下とともに複雑な挙動を示すことなども明らかにしています。この結果は、ベーサル面では温度によって最外表面の分子層の「構造」が変化することを示唆しています。

## 2) 表面融解に伴う擬似液体層の生成

融点 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) 以下の温度であっても、雪や氷の表面はわずかに「液体の水の薄い膜」で覆われて濡れています。これが、両手で雪を押し固めると、雪玉を作ることができる原理です（濡れた砂を用いると砂のお城を作ることができるのと同じですね）。また、我々がアイススケートを楽しむことができる原因です。この現象は「表面融解」と呼ばれています。また、氷結晶上で生成される液膜は、本来は液体の水が存在できない融点以下の温度領域で存在することから、ガラスコップの中の通常の水とは異なるという意味をこめて、「擬似液体層」と呼ばれています。擬似液体層の存在は、電磁気学の創始者であるマイケル・ファラデーによって初めて提唱され<sup>[6]</sup>、当研究室の前任の古川義純先生ら<sup>[7]</sup>によって初めて実験的に（エリプソメトリーと呼ばれる分光法を使って）証明されました。しかし、これまでは氷結晶表面の擬似液体層を直接可視化することができなかったため、1種類の擬似液体層が氷結晶表面を均一に覆っているものと長らく考えられてきました。ところが、LCM-DIMを用いて擬似液体層を初めて可視化したところ、液滴状および薄液層状の「形状が異なる2種類の擬似液体層」が存在することを見出しました（図8）<sup>[8]</sup>。また、これら2種類の擬似液体層は、氷結晶表面で極めて不均一に生成し、氷結晶表面で動き回ることもわかりました。「百聞は一見にしかず」の良い例だと思います。その後、2種類の擬似液体層の存在は、「濡れ転移」という水蒸気圧や温度の変化に伴う氷表面での「水の濡れ性」の変化で

説明できる<sup>[9]</sup>ことや、液滴状および薄液層状の擬似液体層はコップの中の通常の水に比べてそれぞれ20倍および200倍粘度が高いことを見出す<sup>[10]</sup>などの、一連の成果につながっています。これほど粘度の高い水は通常の水とは性質が大きく異なり、氷結晶表面という特殊な環境下でのみ生成しうる、まさに「擬似液体層」と呼ぶべき存在であることがわかります。

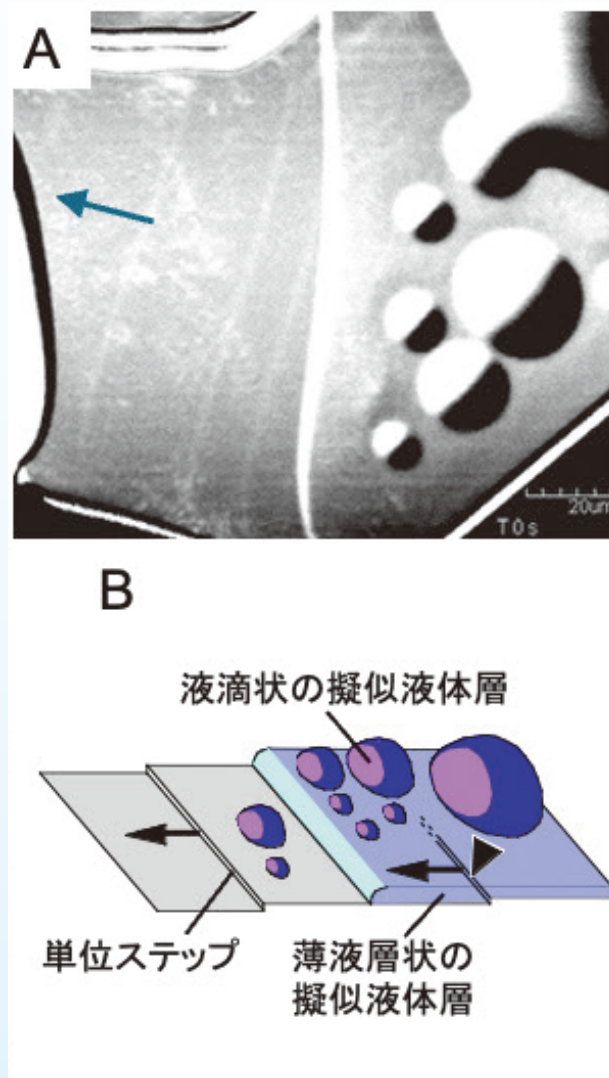


図8. 融点以下の温度 ( $-0.1^{\circ}\text{C}$ ) の氷結晶ベーサル面上に現れる擬似液体層のLCM-DIM像 (A) と模式図 (B)<sup>[8]</sup>。図 (A) (B) のそれぞれ左半分では、過飽和な水蒸気中でベーサル面表面のステップが左方向に成長している。それに対し、図 (A) (B) のそれぞれ右半分では、ベーサル面上に形状が異なる2種類の擬似液体層（液滴状と薄液層状）が生成している。

### 3) HCl などの酸性ガスと氷結晶表面の相互作用

氷の存在は地球上の様々な自然現象と深い関連があります。その一つとして、我々は「オゾンホール」に着目しています。皆さんはオゾンホールがなぜ南極大陸の上空で生成するか、ご存知でしょうか？オゾン層が存在する成層圏（高度約 10-50 km）では、重力による浮力対流が発生しないため、気象現象は通常おこりません。しかし、南極上空は極めて寒いため、極成層圏雲と呼ばれる氷結晶でできた雲が、オゾン層と同じ高度に生成します。この氷結晶の表面に、人間起源のクロロフルオロカーボンが分解して生成した HCl ガスが吸着し、太陽からの紫外線をエネルギー源として、オゾンを一連の不均一光化学反応が進行します。この化学反応自体はすでに解明されており、1995 年にノーベル化学賞が授与されています。しかしながら、この化学反応が進行するためには、南極上空で大量の HCl ガスが貯蔵されておらねばならず、そのメカニズムはこれまで不明でした。そこで我々は、HCl ガス存在下で氷結晶表面を LCM-DIM を用いて直接観察しました。その結果、気相中に HCl ガスが存在すると、氷結晶表面に HCl 水溶液の液滴が生成すること、および HCl 水溶液の液滴は氷結晶の成長とともに氷結晶内部に取り込まれることを見出しました<sup>[11]</sup>。この結果より、HCl 水溶液の液滴が極成層圏雲の氷結晶中に取り込まれることで、大量の HCl が南極上空に貯蔵されていることが強く示唆されます。これらの研究は、その後、HCl 水滴が氷結晶のステップの前進を妨げて、複数のステップが集合する「束化」と呼ばれる現象を起こすなど、氷結晶の成長との相関に関する一連の成果につながっています。

### 4) 新たな光学顕微鏡の開発

以上、本稿で紹介しましたように、これまででない「新しい研究道具を自ら作り出す」ことができれば、様々な新しい物理現象を発見することができます。他にも新しく作り出したい顕微鏡のアイデアはまだありますので、定年まで頑張って顕微鏡づくりに取り組んでゆければと思います。

### 引用文献

- [1] G. Sazaki, et al., J. Cryst. Growth, 262 (2004) 536-542.
- [2] T. Takamatsu, and S. Fujita, Journal of Microscopy-Oxford, 149 (1988) 167-174.
- [3] G. Sazaki, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 107 (2010) 19702-19707.
- [4] M. Inomata, et al., Cryst. Growth Des., 18 (2018) 786-793.
- [5] G. Miyamoto, et al., Crystal Growth & Design, 22 (2022) 6639-6646.
- [6] M. Faraday, Lecture given at Royal Institution, June 7, 1850, in: reported in Athenaeum, London, 1850, pp. 640.
- [7] Y. Furukawa, et al., J. Cryst. Growth, 82 (1987) 665-677.
- [8] G. Sazaki, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 109 (2012) 1052-1055.
- [9] K. Murata, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 113 (2016) E6741-E6748.
- [10] K. Murata, et al., Phys. Rev. Lett., 115 (2015) 256103-256101-256105.
- [11] K. Nagashima, et al., Crystal Growth & Design, 18 (2018) 4117-4122.
- [12] 黒田登志雄, 結晶は生きている, 株式会社サイエンス社, 東京, 1984.



## 着任のご挨拶

特任助教 黒崎 豊  
(雪氷新領域部門)



2025年7月から特任助教として雪氷新領域部門の雪氷古環境グループに着任しました黒崎 豊（くろさき ゆたか）と申します。低温科学研究所には修士・博士課程の5年間在籍し、降雪、積雪や、雪氷を円柱状に掘削したアイスコア

を用いて大気中の水・物質循環に関する研究を行っていました。その後、名古屋大学でエアロゾル・気候モデルを用いて自然起源エアロゾルの雲放射収支への影響に関する研究に従事しました。現在は今年の10月に新設された雪氷古環境グループにおいて、アイスコア中の水安定同位体比、溶存化学成分や微粒子の分析・解析を行い過去の大気環境の復元に取り組んでいます。本稿では、これまでの私の研究テーマについて、大きく二つに分けて紹介します。

一つ目は、水安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ ）による大気中の水循環過程の解明です。グリーンランド氷床で採取した降雪、積雪やアイスコア中の水安定同位体比を分析し、北極域の季節海水域の海水変動や大気循環場、気温変動の解明に取り組んできました。降水や降雪の水安定同位体比は、海水面からの水蒸気の蒸発や降水粒子の形成に伴う凝結などの、水の相変化の時の同位体分別によって値が変化します。そのため、降水をもたらす水蒸気の起源域や輸送中の大気環境を反映していることが考えられています。また、積雪の水安定同位体比は、積雪の融解や昇華によっても値が変化します。そして、アイスコア中の水安定同位体比は、海洋からの水蒸気の蒸発から雪氷上への降雪の堆積後にかけてのすべての水の相変化を反映しています。一方、 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta\text{D}$ から算出される過剰重水素（ $d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ ）は、主に降水をもたらす水蒸気の起源域の環境によって値が大きく変化します。私が行った研究では、グリーンランド氷床北西部において掘削されたアイスコア中の過剰重水素が近傍の季節海水域の海水密度と逆相関を示し、それが過去100年間の海水変動の復元につながりました。最近では、観測事例がほとんどない大気上空の降雪粒子の形成時の水安定同位体比の変化を紐解くために、降雪中の水安定同位体比と降雪粒子の形状の関係に着目した研究も行っています。

二つ目は、海洋生物活動を起源として海洋から大気に放出される硫化ジメチル（DMS）に関する研究です。DMSは、大気中で酸化した後、硫酸塩エアロゾルとなり、雲凝結核に成長することで、雲の形成を促進し、地球を

冷やす効果を持つとされています。私は、グリーンランド氷床のアイスコア中のメタンスルホン酸（MSA）を用いた過去50年間の北極季節海水域のDMS放出量の復元を行いました。MSAは、DMSの酸化生成物であるため、過去の海洋生物活動やそれに関連する海水変動を復元するための有力なプロキシとして考えられてきました。私は、溶存化学成分や水安定同位体比などが季節分解能で保存されているグリーンランド氷床南東部のアイスコアのMSAの解析を行いました。このアイスコア中のMSAは、2000年代以降の夏に急激に増加しました。空気塊の輸送経路や海洋生物活動、海水変動などを複合的に考慮した結果、近年の夏のMSAの急激な増加は、季節海水域における海水後退の早期化に起因するDMS放出量の増加を反映していることが分かりました。昨年から、このような北極域におけるDMS放出量の変化がエアロゾル・雲相互作用に与える影響にも注目しています。

低温科学研究所では、アイスコアを用いて過去の様々な気候システムの変化を解読していきたいと思っています。そのために、水蒸気やエアロゾルの放出・輸送過程、雲・降水過程、雪氷内部の物理・化学過程などのそれぞれのプロセスに焦点を当てた研究も行っていきたいです。アイスコアは、水安定同位体比や化学成分、微粒子、物理的特性、気泡などの多くの分析項目に対応して多くの古環境変動が復元の対象になります。私は、アイスコアを研究の発端に過去の海水変動や海洋生物活動、エアロゾル・雲相互作用などに着手していますが、いずれはそれらを一つの気候システムとして統合させた研究を行いたいと思っています。そのために、低温科学研究所の一員として一つ一つの研究に真摯に取り組み、成果を残していきたいと思っています。研究者としての経験も浅く、研究所や大学の皆様には多くのことでお世話になるかと思いますが、どうぞよろしくお願いいたします。



図 グリーンランド氷床におけるハンドオーガーを用いたアイスコア掘削の様子（左、右上）とその時に掘削されたアイスコア（右下）。



## 海外調査

### ■杉山 慎

- (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：2025 年 7 月から 8 月
- (3) 参加者：  
杉山慎（低温研）、今津拓郎、矢澤宏太郎、見米富視（低温研・環境科学院・博士および修士課程大学院生）
- (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：

私たちの研究グループでは氷河氷床の変動に着目して、2012 年からグリーンランド北西部カナック村周辺で研究を行っています。2025 年 7～8 月には 13 回目となる現地調査を実施しました。村の背後に広がるカナック氷河では、質量収支の長期モニタリングデータを取得しました。また氷河流出河川では流量の測定を行い、近年頻発する洪水災害の対策に資する調査を実施しています。さらに現地協力者の助けを得て、氷床から海に流入するボードイン氷河で 6 年ぶりの観測を実施。無人航空機を使った新しい測定で、氷河変動のメカニズムに迫ります。

カナック村では日本人研究者を中心に、氷河氷床、海洋、生態系、凍土、海洋汚染など、多彩な研究が実施されています。特に水産資源や災害、公害に関わる研究は、現地社会とも深い関連があります。そこで研究成果を現地に還元するため、毎年研究者が連携して住民とのワークショップを開催しています。調査内容を紹介して住民と意見を交換することは、彼らの土地で研究を行う私たちの義務ともいえます。研究成果を現地の人々と共有して共に研究活動を進めることが、今北極域で求められているのです。

本研究は、ArCS-3 北極域研究強化プロジェクト研究課題「沿岸コミュニティ」、および科研費基盤研究 (S) 「カービング氷河の末端プロセスー氷・海／湖・大気・陸の境界に直接観測で迫るー」の支援を得て実施しました。



図 1. カナック氷帽におけるモニタリング観測。



図 2. 地元猟師の協力を得てボートで氷河にアプローチ。



図 3. 海に流入するボードイン氷河での観測。



図 4. カナック村で開催した地元住民とのワークショップ。



## 未来の女性研究者のための最先端研究体験プログラム

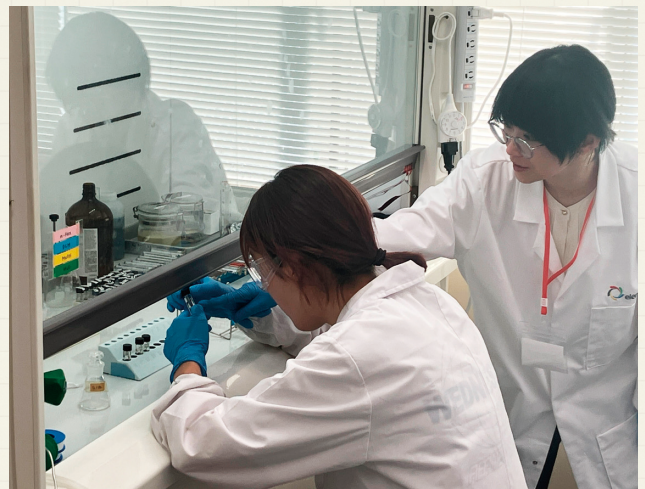
### 1. 「安定同位体比でひも解く生物の共生システム」

(1) 期間：9月16日～9月19日

(2) 参加者：学部3年生4名、学部4年生2名。所属は北海道大学、お茶の水女子大学、信州大学

(3) 報告：

プログラムは、安定同位体に関する基礎知識と生態学への応用研究を学んでいただく座学パートと、生物を構成するアミノ酸の安定窒素同位体比を測定するための化学実験および測定パートで構成された。6人で1班とし、試料として「シライトイソギンチャクと共生するクマノミ」と、「サンゴイソギンチャクと共生するミツボシクロズメダイ」の2種について、共生した状態で飼育した個体と非共生の状態で飼育した個体を用い、アミノ酸の抽出（加水分解、脱脂、アミノ酸分子の誘導体化など）をおこない、ガスクロマトグラフ-同位体比質量分析計（GC-IRMS）でのアミノ酸の窒素同位体比測定をおこなった。得られた結果に関して、参加者同士で積極的に議論・考察をおこない、最終日に20分間のプレゼンテーションをおこなった。





## 2. 「実験から迫る宇宙の分子進化」

- (1) 期間：9月8日～9月12日
- (2) 参加者：学部3年生8名、学部4年生1名。所属はお茶の水女子大学、京都産業大学、東京理科大学、奈良女子大学、日本女子大学
- (3) 報告：

参加者の所属学科は化学、物理、地球科学とバラバラであったため、初日には研究テーマに関する学際的な基礎知識を習得してもらった。実習では3つの班に分かれ、「飛行時間型質量分析器の構築と未知のガスの同定」、「赤外吸収分光計を用いた極低温氷表面反応の観測」、「イオンピックアップ法による氷表面分析」の3つのテーマについて、実際に最先端の研究で用いている装置を使って実験を行った。それぞれのテーマに1日、各班が3日間ですべての実験に取り組めるよう工夫した。事前に実験原理について予習するよう課題を出していたこともあり、十分に理解しながら取り組めたと考えている。最終日はそれぞれの班ごとに実験結果と考察を発表してもらった。



## 3. 「分子生物学から迫る哺乳類の冬眠の謎」

- (1) 期間：9月8日～9月12日
- (2) 参加者：学部3年生4名、学部4年生3名、学部5年生（薬学部）1名。所属は大阪大学、富山大学、奈良女子大学、名古屋市立大学、北海道大学。
- (3) 報告：

参加者にはまず講義を受けてもらい、哺乳類の冬眠の基礎知識を習得してもらった。実習では2つの班に分かれ、「ガス質量分析装置を用いた冬眠哺乳類の覚醒時の代謝測定」、「冬眠に伴う遺伝子発現変化の解析」、「低温耐性に関わる代謝経路の遺伝的解析」の3つのテーマについて、実際の研究装置を用いた実験とグループディスカッションにより理解を深めてもらった。最終日はそれぞれの班ごとに実験結果と考察を発表してもらった。それぞれのテーマについて課題を設定して取り組むことで、実際の研究に近い体験ができたのではないかと考えられる。また、冬眠代謝生理発達分野の研究室メンバーと研究生活や進路選択などについて討論を行った。





(2025/05/20)

## 産業革命から現在までの大気硝酸量の変遷を北極アイスコーから復元 ～人為窒素酸化物の排出量と大気中の硝酸の存在形態が北極の大気硝酸量を制御することを解明～

発表者：准教授（発表時点） 飯塚 芳徳  
助教 的場 澄人

（金沢大学、気象庁気象研究所、名古屋大学との共同）

### 【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、的場澄人助教、金沢大学の石野咲子助教、中国南京大学の服部祥平准教授、名古屋大学大学院環境学研究科の藤田耕史教授らの研究グループは、グリーンランドのアイスコーに記録された産業革命から現在までの大気硝酸濃度と、人為窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の排出量の変化との間にタイムラグがあり、そのタイムラグが大気酸性度に依存した大気硝酸の長距離輸送のされやすさの変化に起因することを解明しました。

北極のアイスコーは大気質や気候に影響を及ぼす大気硝酸量を過去から現在まで連続して記録しています。これまで分析されたグリーンランド中央部のアイスコーでは、日射による硝酸の光分解損失の影響が大きく、不確実な記録しか提示できていませんでした。研究グループは、グリーンランド氷床南東部ドームで採取したアイスコーが硝酸塩の復元に適していることを見出し、産業革命から現在まで（1800年から2020年にかけて）の連続した硝酸塩量を復元しました。220年間のアイスコーの硝酸塩量はNO<sub>x</sub>の排出量の変動と概ね一致していました。しかし詳細に解析すると、アイスコーの硝酸塩濃度のピーク期の出現はNO<sub>x</sub>排出汚染のピーク期（1970年代）よりも遅く、またNO<sub>x</sub>排出制限が導入された1990年代以降にも高濃度を維持するというように、NO<sub>x</sub>排出量とアイスコー硝酸塩濃度の変化にタイムラグがあることが分かりました。全球大気化学輸送モデルを用いた解析により、1970年代以降の大気酸性度の中和に応じて、硝酸の形態が沈着しやすいガス状から輸送されやすい粒子状へと部分的に変化したことで、長距離輸送に有利になり、この観測されたタイムラグが生じていることをつきとめました。本研究成果は、今後の大気質の緩和策の策定や気候変動予測の精度向上に貢献することが期待されます。

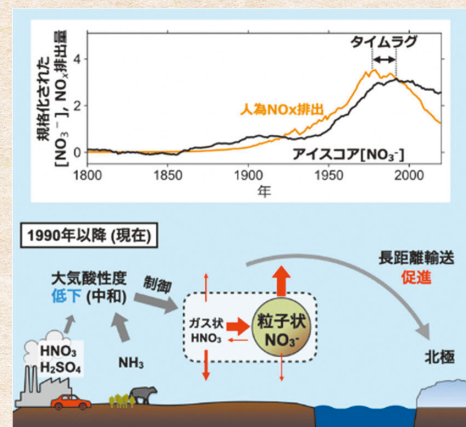
なお、本研究成果は、日本時間2025年5月19日（月）公開のNature Communications誌に掲載されました。

### 【論文発表の概要】

論文名：Acidity-driven gas-particle partitioning of nitrate regulates its transport to Arctic through the industrial era（大気酸性度により駆動される硝酸塩のガス-粒子分配は産業時代を通じて北極への硝酸塩輸送を制御している）

URL：https://doi.org/10.1038/s41467-025-59208-0

アイスコーから復元した硝酸塩量（黒）と周辺国の人為窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）排出量（オレンジ）の1800-2020年の経年変化（1800-1850年を基準に規格化した値）。タイムラグは、大気酸性度に応じた大気硝酸の輸送されやすさによって説明される。





(2025/05/26)

## 太陽系の「石のタイムカプセル」の“模様”を数値計算で再現！ ～小惑星や隕石に含まれる不思議な形をした鉱物の結晶成長過程の解明へ～

発表者：教授 木村 勇気

(名古屋市立大学、東北大学、立命館大学との共同)

### 【研究成果の概要】

名古屋市立大学 三浦均准教授、東北大学 中村智樹教授、森田朋代大学院生、渡邊華奈大学院生、中国科学院・立命館大学 土山明教授、北海道大学 木村勇氣教授、宇宙航空研究開発機構 小山千尋研究開発員らの共同研究グループは、小惑星や彗星、隕石などの地球外物質に含まれるミリメートルサイズの球状粒子「コンドリュール」が溶融状態から急冷凝固する過程の数値シミュレーションを行い、特異な形の鉱物「棒状カンラン石」の結晶成長過程を世界で初めて理論的に再現しました。本研究成果により、今後、国際宇宙ステーションにおける微小重力環境下でのコンドリュール再現実験と合わせて、初期太陽系における物質進化過程や惑星形成過程の理解が飛躍的に進むことが期待されます。

本研究成果はScienceの姉妹誌である「Science Advances」(令和7年5月24日付)に掲載されました。

### 【研究のポイント】

- ・ 太陽系の「石のタイムカプセル」であるコンドリュールの特異な“模様”を、世界で初めて数値シミュレーションによって再現した。
- ・ 本研究成果は、初期太陽系における物質進化過程や惑星形成過程の解明に繋がることが期待できる。

### 【論文発表の概要】

論文名：Decoding the formation of barred olivine chondrules: Realization of numerical replication

著者名：三浦 均<sup>1\*</sup>、森田 朋代<sup>2</sup>、中村 智樹<sup>2\*</sup>、渡邊 華奈<sup>2</sup>、土山 明<sup>3, 4</sup>、木村 勇氣<sup>5</sup>、小山 千尋<sup>6</sup>

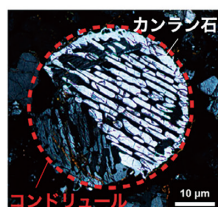
所属 1) 名古屋市立大学 大学院理学研究科、2) 東北大学 大学院理学研究科、3) 中国科学院広州地球科学研究所、4) 立命館大学 総合科学技術研究機構、5) 北海道大学 低温科学研究所、6) 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門

・ 掲載学術誌

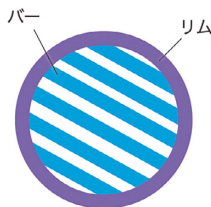
学術誌名：Science Advances

DOI番号：10.1126/sciadv.adw1187

(a) 実際の“模様”



(b) 模式図



(c) 数値計算結果

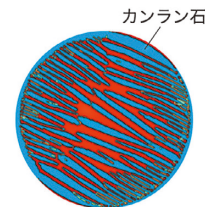


図1：(a)コンドリュールに含まれる棒状カンラン石。白い部分がカンラン石の結晶である。(b)棒状カンラン石の模式図。コンドリュール周囲を取り巻くリムと、その内部にほぼ平行に並ぶ多数のバーで特徴付けられる。リムとバーは別々の結晶ではなく、単一の結晶である。(c)数値シミュレーションによって再現された棒状カンラン石に類似した結晶成長パターン（模様）。



(2025/06/16)

## オホーツク海南部氷縁域の氷盤分布観測にはじめて成功 ～季節海水域の融解過程の理解と変動予測への貢献に期待～

発表者：助教 豊田 威信  
教授 西岡 純

### 【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の豊田威信助教、西岡 純教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科の早稲田卓爾教授、国立極地研究所の伊藤優人研究員らの研究グループは、オホーツク海南部海水域氷縁域の氷盤分布の特徴を明らかにして氷縁域における融解過程の仕組みを解明しました。

現在、オホーツク海を含む世界の海水域は減少傾向にあります。気候変動予測を行うためには、気候モデルの中で海水融解を正しく再現する必要があるのですが、海水の融解過程は未だに十分理解されておらず、最新の気候モデルでも融解期の海水域の再現性は低い状況にありました。

オホーツク海のような季節海水域の後退を制御するのは氷縁域の融解速度です。氷縁域には波によって破碎された氷盤が数多く存在し、これらの氷盤が春先の日射により温められた氷盤間の海水から熱を効率よく吸収して一気に消失します。同じ海水面積に対して氷盤が小さいほど海水に接する面積が大きいので、氷縁域の融解過程を理解するうえで氷盤の大きさや形状の実態把握が鍵となります。

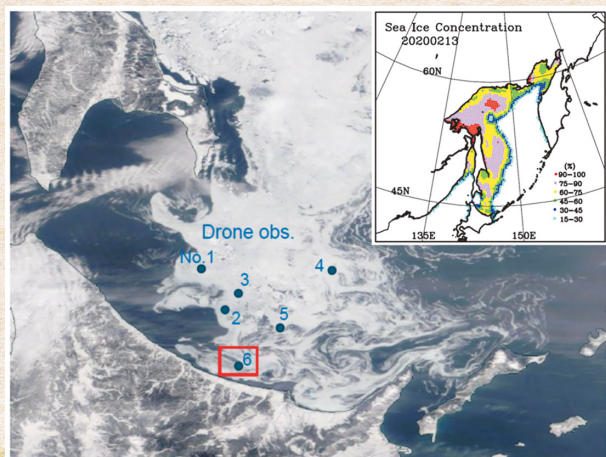
本研究では、ドローンを用いてオホーツク海南部氷縁域の氷盤の統計的な性質を調べることで、大きさ約1m以上の氷盤には自己相似性の特性があること、それ以下の氷盤は熱力学的な破碎効果が融解を促進する様子などの実態を明らかにしました。これらの結果は汎用性があり、数値モデル化することにより融解期の季節海水域の変動予測の改善に貢献することが期待されます。

なお、本研究成果は、2025年5月31日(土)公開のPolar Science誌にオンライン掲載されました。

### 【論文発表の概要】

論文名：Melting processes of the marginal ice zone inferred from floe size distributions measured with a drone in the southern Sea of Okhotsk (オホーツク海南部のドローン観測により得られた氷盤サイズ分布から推測される氷縁域の融解過程)

URL：https://doi.org/10.1016/j.polar.2025.101215



オホーツク海南部で観測を実施した海域  
(挿入図は No.6 のドローン観測当日の海水氷密度分布図)



(2025/06/25)

## 油を0.5%で固める単結晶を特定! ～新技術で安定な油のゲルの作製へ～

発表者：教授 木村 勇気

准教授 山崎 智也

(広島大学、ミヨシ油脂との共同)

### 【研究成果の概要】

広島大学大学院統合生命科学研究科 中野郁也 氏(博士課程前期)、小泉晴比古 准教授、上野聡 教授、ミヨシ油脂株式会社 大石憲孝 博士、津田信治 氏、北海道大学 低温科学研究所 木村勇気 教授、山崎智也 准教授の共同研究グループは、植物性油脂をゲル化したオレオゲルに含まれる結晶が「脂質ウィスカー結晶」と呼ばれる単結晶であること、そしてこれがオレオゲルの高い強度と安定性に大きく貢献することを実証しました。先行研究において我々は、特定の油脂(トリアシルグリセロール)を低濃度(0.5 wt%)で添加することで、油がゲル化し、一般的なものとは異なるユニークな繊維状結晶が形成されることを見出していました。(Oishi et al., Food Structure (2023).) 今回の研究では、この繊維状結晶が、材料科学分野で機械的特性に優れることで知られる「ウィスカー結晶」という単結晶であることを、透過型電子顕微鏡(TEM)観察と電子回折パターン解析により世界で初めて特定しました。さらに、脂質ウィスカー結晶の存在により、オレオゲルが非常に低い濃度でも高い機械的強度と優れた安定性(4ヶ月間油漏れなし)を示すことを実験的に確認しました。本研究成果はFood Research Internationalのオンライン版に2025年5月13日付で掲載されました。

### 【論文発表の概要】

タイトル: "Creation of Lipid Whisker Crystals for Stable Oleogel Preparation"

著者名: Haruhiko Koizumi<sup>1\*</sup>, Fumiya Nakano<sup>1</sup>, Noritaka Oishi<sup>2</sup>, Tomoya Yamazaki<sup>3</sup>, Yuki Kimura<sup>3</sup>, Shinji Tsuda<sup>2</sup>, Satoru Ueno<sup>1</sup>

著者所属: 広島大学 大学院統合生命科学研究科<sup>1</sup>, ミヨシ油脂<sup>2</sup>, 北海道大学 低温科学研究所<sup>3</sup>

掲載誌: Food Research International

掲載日: 2025年5月13日

DOI: 10.1016/j.foodres.2025.116451

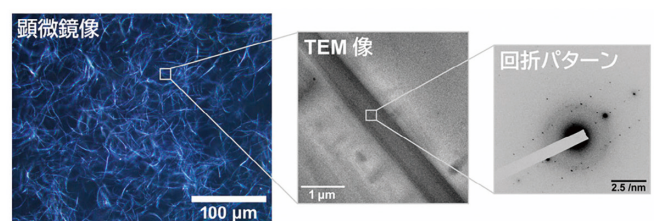


図1: オレオゲル中の脂質ウィスカー結晶。

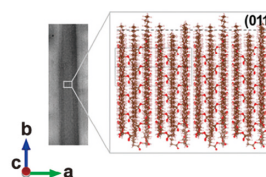


図2: 011 方向から見た脂質ウィスカー結晶



(2025/09/12)

## キタオットセイの北上回遊行動を衛星追跡で解明 ～海洋環境要因と北上回遊行動の関係～

発表者：名誉教授 三寺 史夫  
(京都大学との共同)

### 【研究成果の概要】

京都大学野生動物研究センターの李何萍博士後期課程学生、三谷曜子教授、ハワイ大学マノア校の土橋稜氏、北海道大学の三寺史夫名誉教授(元・北海道大学低温科学研究所教授)らによる研究グループは、衛星発信器を用いてキタオットセイの北上回遊と海洋環境との関係を明らかにしました。キタオットセイは、繁殖地と越冬地のあいだを季節的に長距離回遊する鰭脚類であり、日本近海は非繁殖期に豊富な餌資源を提供する主要な越冬海域のひとつです。これまで、繁殖地からの南下回遊についてはよく知られていましたが、春に越冬海域から繁殖地へと戻る北上回遊については、タグの脱落や電池寿命、海上での捕獲といった技術的な制約により、詳細な情報が不足していました。本研究では、衛星発信器を用いて若齢のオス個体(亜成獣および未成熟個体)の北上移動を追跡し、移動経路や行動の特徴を記録しました。その結果、餌となる生物が集まりやすい大陸棚縁辺部や、水温8～13℃の海域で採餌行動が集中していることが明らかになりました。さらに、キタオットセイは高気圧性渦の縁辺部を利用して移動する傾向も確認され、長距離移動におけるエネルギー消費を抑えるために、渦の縁辺部を利用している可能性が示唆されました。本研究の成果は、キタオットセイの北上回遊行動と海洋環境への応答を明らかにし、北海道日本海沿岸域におけるその生態的役割を解明するうえでも重要な知見となります。本研究成果は、2025年7月30日に国際学術誌「Deep-Sea Research Part I」にオンライン掲載されました。

### 【論文発表の概要】

タイトル：Northbound Movement of Northern Fur Seal (*Callorhinus ursinus*) and their Response to the Oceanographic Features

著 者：Heping Li, Ryo Dobashi, Humio Mitsudera, Yoko Mitani

掲載誌：Deep-Sea Research Part I

D O I：10.1016/j.dsr.2025.104558



図1. 衛星発信器を装着したキタオットセイ



## ■低温科学研究所が自然科学研究機構生命創成探究センターと連携協定を締結

令和7年10月9日（木）、低温科学研究所は、愛知県岡崎市にある自然科学研究機構生命創成探究センター（ExCELLs）と連携協定を締結しました。本協定は、両者の研究能力と人材を活かし、連携・協力を推進することによって、我が国と世界の学術及び科学技術の振興並びに有為な人材の育成に資することを目的としています。

自然科学研究機構生命創成探究センター（ExCELLs）は、愛知県岡崎市で歴史ある活動を行ってきた旧岡崎国立共同研究機構以来の学際的な研究活動の伝統を受け継ぎつつ、2018年に設置された新しい研究組織です。「生命とは何か」という人類共通の問いを追求し、我が国と世界の学術及び科学技術の振興、並びに有為な人材の育成に取り組むことを目的に活動しています。

低温科学研究所で行っている哺乳類の冬眠研究をはじめ、低温や極限環境下における生物の生存機構に関する研究とはこれまでも交流がありましたが、生命にとって欠かせない存在である水・氷の動態や地球の歴史に関する研究、物質と生命の起源にもかかわる結晶や宇宙での分子進化など、両者の交流が期待できる分野は多岐にわたります。今後は、これらの分野に加え、両機関の強みを活かした分野横断的な連携・協力の推進により、さらなる研究成果の創出が期待されます。



写真1 連携協定締結後の渡部所長（右）と根本センター長（左）



写真2 締結式における関係者集合写真

## ■「未来の女性研究者のための最先端研究体験プログラム」を実施

低温科学研究所では、令和6年度部局評価配分事業「各部局の強み・特色に対する評価」において、「若手・女性研究者獲得に向けた最先端かつ学際的な研究体験プログラムの提供」が採択されました。

この事業の一環として、9月8日（月）～12日（金）及び9月16日（火）～19日（金）の日程で、大学院進学を検討している全国的女子学生（学部3・4年生）を対象に、研究体験プログラム「未来の女性研究者のための最先端研究体験プログラム」を開催しました。

本プログラムでは、当研究所の世界をリードする研究の現場で、実験・実習を通して最先端の学際的研究を体験してもらうことを目的としています。

今回は、「安定同位体比でひも解く生物の共生システム」、「実験から迫る宇宙の分子進化」、「分子生物学から迫る哺乳類の冬眠の謎」の3つのテーマで実施され、全国から23名的女子学生が参加しました。各テーマにおける報告については、本ニュース Report 欄に掲載しておりますので、ご覧ください。

参加者からは、「新しい知識や視点を得ることができた」、「研究への興味が深まった」、「北海道大学大学院への進学意欲が高まった」、「最先端の研究を体験できて貴重な経験となった」、「異なるバックグラウンドを持つ仲間と議論でき、新しい観点とモチベーションを得られた」、「将来研究者として歩むことに魅力を感じ、普段の学生生活へのモチベーションも高まった」など、多くの前向きな感想が寄せられました。

本プログラムは、次世代の女性研究者の育成に向けた取り組みとして非常に意義深いものであり、参加者にとっても貴重な学びと刺激のある体験となりました。当研究所は、今後もこうした機会を継続的に提供し、女性研究者の裾野を広げるとともに、多様な視点を持つ人材の育成を進めていきたいと考えています。

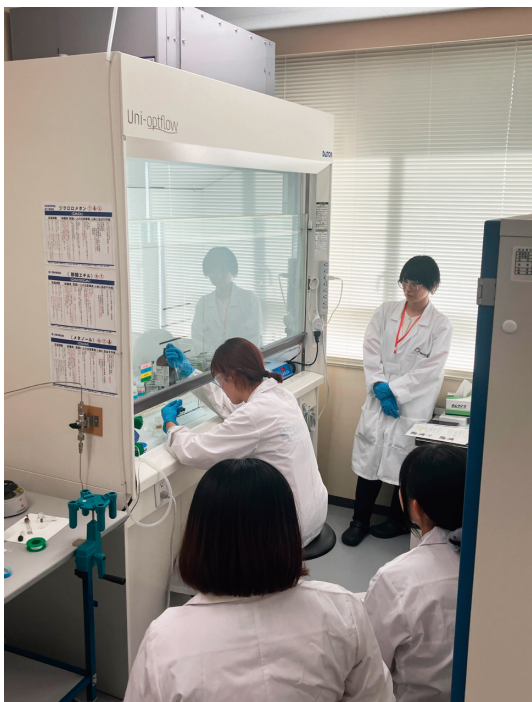


写真1 テーマ「安定同位体比でひも解く生物の共生システム」の実験の様子

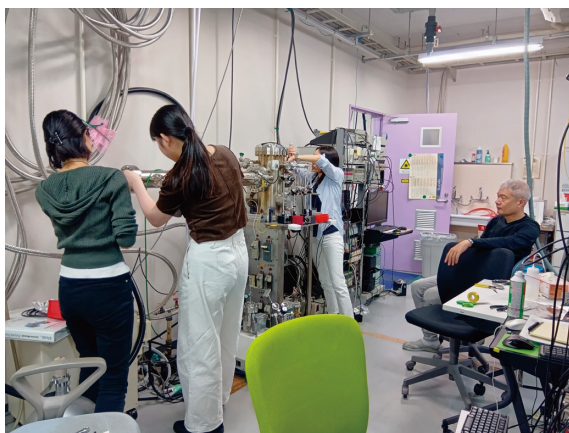


写真2 テーマ「実験から迫る宇宙の分子進化」の実験の様子



写真3 テーマ「分子生物学から迫る哺乳類の冬眠の謎」のレクチャーの様子



## ■青木茂教授を隊長とする第67次南極地域観測隊が12月に日本を出発

低温科学研究所青木茂教授は、第67次南極地域観測隊長に就任しました。同教授は第61次に続き、2回目の隊長就任となります。

南極観測船「しらせ」は11月19日に日本を出発し、青木教授を隊長とする観測隊は、12月4日に空路で出発し、豪州フリーマントルにて「しらせ」に乗船し、南極昭和基地へ向かいます。

低温科学研究所からは、青木教授のほか、西岡純教授、小野数也技術専門職員、西野沙織技術補佐員、村山愛子研究員の4名が南極地域観測隊として、現地で観測等を行います。

11月14日(金)には、東京明治記念館にて、「南極地域観測隊員及び「しらせ」乗組員の壮行会」が開催され、青木教授からは、「難しいミッションになりますが観測隊としらせ乗員がワンチームで成功に導きます」という挨拶がありました。

青木教授率いる第67次南極地域観測隊の活躍に、どうぞご注目ください。



写真1 壮行会にて挨拶をする青木教授



写真2 低温科学研究所関係の南極地域観測隊メンバー

## AWARD

**浅井 勇志**

日本結晶成長学会 第44回 結晶成長討論賞  
(令和7年9月20日)

**今津 拓郎**

雪氷研究大会(2025・津)学生優秀発表賞 口頭発表部門 優秀賞  
(令和7年9月24日)



## ■人事異動（令和7年5月1日から令和7年11月30日まで）

| 異動日      | 異動内容 | 氏 名     | 職 名      | 備 考                  |
|----------|------|---------|----------|----------------------|
| R7. 5.31 | 任期満了 | 澁 谷 未 央 | 学術研究員    |                      |
| R7. 7. 1 | 転出   | 伊 藤 萌 可 | 係員（会計担当） | 理学・生命科学事務部事務課（会計担当）へ |
| R7. 7. 1 | 転入   | 平 井 正 仁 | 主任（会計担当） | 総務企画部人事課共済担当主任から     |
| R7. 7. 1 | 採用   | 黒 崎 豊   | 特任助教     |                      |
| R7. 7. 1 | 採用   | 李 謹 岑   | 学術研究員    |                      |
| R7. 8. 1 | 昇任   | 飯 塚 芳 徳 | 教授       |                      |
| R7. 9. 1 | 採用   | 曾 根 加菜子 | 技術補助員    |                      |
| R7. 9. 1 | 採用   | 大 塚 玲 桜 | 学術研究員    |                      |
| R7. 9.30 | 任期満了 | 大 西 晴 夏 | 学術研究員    |                      |
| R7. 9.30 | 任期満了 | 崔 羽 皓   | 学術研究員    |                      |
| R7.10. 1 | 採用   | 大 西 晴 夏 | 博士研究員    |                      |
| R7.10. 1 | 採用   | 西 野 沙 織 | 技術補佐員    |                      |
| R7.10.31 | 任期満了 | 村 山 愛 子 | 学術研究員    |                      |

## 編\*集\*後\*記

- ▶ 今回のリサーチ記事は、海水の融解と氷結晶の形成という異なるスケールの氷のお話です。どちらにも不思議な法則が隠れていてとても興味深いですね。（曾根）
- ▶ 氷の世界といえば「こごえてしまふよ 毎日吹雪吹雪 氷の世界」の井上陽水が思い浮かぶのですが、見方を変えると氷の世界もこんなに違って見えるのです。サイエンスは面白いですね。（山口）
- ▶ 多様な視点から氷を捉える取り組みが、低温科学の幅を一步ずつ広げているように思います。（滝沢）
- ▶ 本号も皆さまのご協力により充実した内容となりました。氷の世界の奥行きと低温研のアクティビティの幅広さを感じていただければ幸いです。（村田）

## 低温研ニュース第60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

（曾根 正光、山口 良文、滝沢 侑子、村田 憲一郎、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>