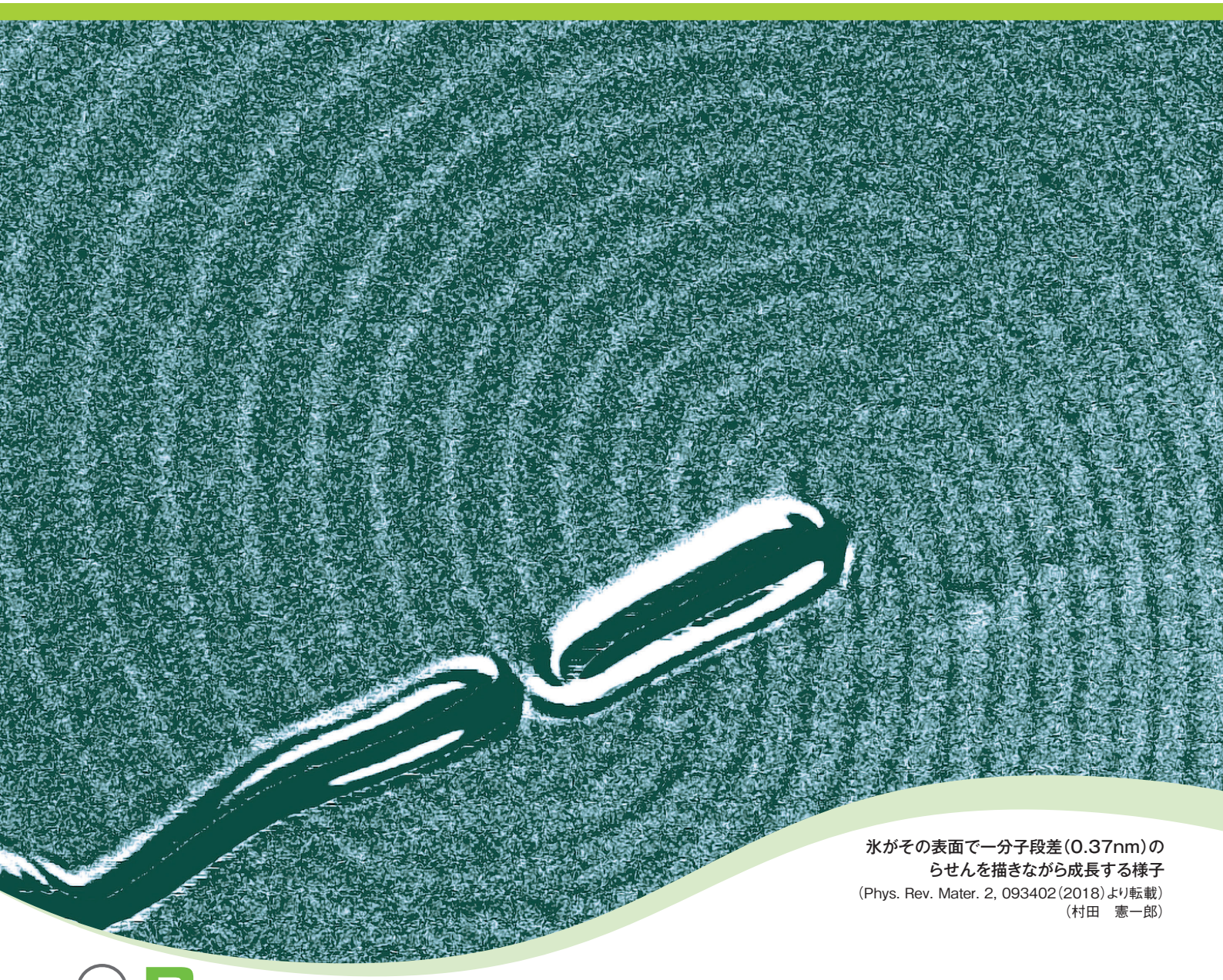
ILTS
低温研ニュース
2021年6月
No.51



氷がその表面で一分子段差(0.37nm)の
らせんを描きながら成長する様子
(Phys. Rev. Mater. 2, 093402(2018)より転載)
(村田　憲一郎)

Research

氷の島グリーンランド
――急激な環境変化とその社会影響――
(杉山　慎) …… 2

南極の海と氷を探る
――南極地域観測第9期重点研究観測がめざすもの――
(青木　茂) …… 5

高分解光学顕微鏡で見る氷結晶の一分子成長ダイナミクス
(村田　憲一郎) …… 8

Report

グリーンランド北西部カナック氷帽
(杉山　慎) …… 11

グリーンランド、シオラパルク村と周辺海氷上
(的場　澄人) …… 12

Publication

安定同位体を用いた
有機物・生物・生態系解析 第79巻… 13

Press Release／News

氷の島グリーンランド
――急激な環境変化とその社会影響――

共同研究推進部・氷河氷床グループ　杉山　慎

グリーンランド北西部カナック村

北極圏に位置するグリーンランドをご存じでしょうか？日本の約６倍にあたる面積を持ち、その 80％を氷に覆われたまさに「氷の島」です（図 1）。島を覆う氷は「グリーンランド氷床 *」と呼ばれ、その厚さは平均 1700 メートル。全て融けて海に入れば、海水準が７メートル上昇します。近年この氷床が急激に縮小しており、現在観測されている海水準上昇の 25％が、グリーンランド氷床とその周辺氷河の融解に起因しています。私たちはこの氷の融解を背景として、2012 年からグリーンランドにて研究を継続しています。

研究対象地はグリーンランド北西部に位置するカナック村（図 2）。広いグリーンランドでこの地を選んだ理由は、近年になって氷損失が加速していながら、アクセスの悪い北グリーンランドがデータの空白域になっていたからです。またそのような科学的背景に加えて、過去に日本人の冒険家や研究者がこの地で活動した歴史も私たちにとっては重要でした。例えば 1970 年代には、冒険家の植村直巳さんが同地域のシオラパルク村を拠点として、グリーンランド縦断や北極点到達に挑みました。また同じ頃に現地に渡った大島育雄さんは、そのままシオラパルク村で家族を持って定住し、犬ぞり、狩猟、毛皮細工など、グリーンランドの伝統文化を継承する暮らしを続けています。

大島さんは私たちに、北極域の急激な環境変化について語ってくれます。また、大島さんや、日本人冒険家・研究者と親しくする現地の人々が、私たちの研究活動をサポートしてくれます。ここで紹介するカナック村での研究活動には、そのような交流の基盤がとても重要な役割を果たしています。

氷河氷床の変化・海洋との相互作用

私たちにとって最初の研究対象は、氷河氷床の変動でした。例えばカナック村の背後に広がるカナック氷帽 * は（図 2）、毎年約１メートルの割合で氷が薄くなっています。温暖化がその主要因ですが、氷河縮小の原因は気温だけではありません。環境の変化によって氷河上の微生物が増殖し、黒く染まった氷がより多くの光エネルギーを吸収して融解しています（図３左）。また、グリーンランド氷床の末端部では多くの氷河が海に流入しており、「カービング氷河 *」と呼ばれています。カービング氷河は、気温だけでなく海洋の変化にも影響を受けて、陸上に末端を持つ氷河よりも急速に変化しています。私たちが調査を行ったボードイン氷河では（図 2）、海の近くで毎年５メートルに達する氷の減少が観測されました。低温研の建物と同じ高さの氷が、二年で消えてしまうのだから驚きます。

カービング氷河では、海に浸かった氷河の末端から、大量の氷山、融け水、土砂が流出する様子を目の当たりにしました（図３右）。これらが海にどのような影響を与えるのでしょうか？氷河と海との関係に興味を持った私たちは、氷河が流入する「フィヨルド *」での海洋観測を始めました。予想通り氷河と海洋の結びつきは強く、フィヨルドではたくさんの新しい発見がありました。そのひとつは、カービング氷河の前に形成される特殊な生態系です（図 4）。氷河の末端では、海水面より 200 ～ 300 メートルも深い氷河の底から、融け水がフィヨルドに排出されま

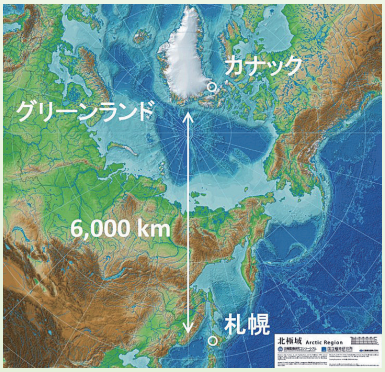


図 1　札幌からグリーンランドは約 6000 キロメートル。北米やヨーロッパよりも近い。

図 2　グリーンランド北西部カナック周辺。陸地はほとんど氷に覆われている。

図 3　（左）暗色化したカナック氷帽。（右）海に流入するボードイン氷河

図 4　カービング氷河の融解水がもたらす豊かな生態系（図は漢那直也氏による）。

す。この淡水は海水よりもずっと軽いので、激しい勢いで氷河前に浮き上がって「プルーム」と呼ばれる湧昇域をつくります（17 ページ Press Release 参照）。その際にフィヨルド深くから栄養塩やプランクトンが海面に運ばれ、魚、海鳥、海棲哺乳類が集まる採餌場となるのです。実際、氷河の前には無数の海鳥やアザラシが群がり、浮袋が破れた魚が岸辺に打ち上げられています。このような生態系の「ホットスポット」は、グリーンランド住民には昔から知られていましたが、私たち研究者には新しい知見であり、大きな研究成果となりました。

現地の人々との協働

海洋観測は、私たちの研究活動の転機となりました。なぜなら、観測に必要なボートを出してもらう現地住民との共同作業が始まったからです。すぐに研究を助けてくれたのは、大島育雄さんの長女である大島トクさんでした。彼女はカナック村の腕利きハンターで、狩猟はもちろん、ボートや犬ぞりの扱い、毛皮の処理やその加工など、グリーンランドの文化に関して高い技術と広い知識を持っています。研究者と共同で北極文化に関する書籍を出版し、子供たちに伝統文化を伝える活動を行うなど、父親と共に伝統文化を継承する役割を果たす人物です。彼女は私たちの海洋観測に興味を示し、他の住民にも声をかけて研究を助けてくれました。

大島トクさんをはじめとした村の人々との協働によって、様々な研究活動が可能となりました。例えば、イッカクという長い牙を持った鯨をご存じでしょうか。北極の固有種で、グリーンランド北西部では伝統的な狩猟の対象です。非常に敏感な性質を持つ動物で、その生態はほとんど分かっていません。そこでイッカクの行動を良く知る現地のハンターと共に調査に出たところ、彼らの経験を活かしてその声を録音することに成功しました（図 5）。イッカクは音波を使って仲間と交信し、餌を探していると考えられています。私たちのデータはその正確な理解に向けて大きな成果となりました。

環境変化の社会影響

2012 年以来、カナック村で長い時間を過ごしました。北緯 77 度、人口たった 600 人の村（図 6 左）。人々の生活は、気候と自然環境に強く影響を受けており、特に近年の気候変動は、社会に大きなインパクトを与えています。中でも深刻なのが自然災害です。2015 年と 2016 年の夏には、現地滞在中に氷河河川が氾濫し、重要な道路や橋が破壊される様子を目撃しました。そこで、河川流量を観測して数値解析を行ったところ、高温による氷河融解と、稀に見る豪雨という、ふたつの洪水要因が明らかになりました（15 ページ Press Release 参照）。

図 5　（左）カナック村の協力者と海中マイクを使ってイッカク（右）の声を聴く。

図 6　（左）カナック村。7 月に入ってまだ海氷に覆われている。（右）シオラパルク村の背後で発生した地すべり。

2100 年までに予想されている気温上昇で、河川流量が 3 倍に増加することも判明しました。さらに洪水の原因となった豪雨は、近隣のシオラパルク村に地すべり災害をもたらしました（図 6 右）。豪雨に加えて、永久凍土融解による斜面の不安定化も懸念されます。

私たちが研究する自然環境の変化が、人々の暮らしに強く関わっていることを強く感じました。そこで 2016 年以降、村人に研究成果を説明し、彼らと意見交換を行うワークショップを開催しています。私たちが氷河や海での変化を伝えると、「あの氷河が融けている」「海の魚が変化した」など、私たちの知らない環境変化を村人から教えられました。在来知（indigenous knowledge）とも呼ばれる、地域に適応した生活の中で生み出された知識です。やがて私たちは測定データを住民と共有すると共に、経験に基づいた彼らの知識とアイデアを学ぶようになりました。このような活動の成果として、COVID-19 の影響で渡航がかなわなかった 2020 年には、住民に委託する形で氷河の長期観測を継続することができたのは嬉しいことでした（11 ページ Report 参照）。

おわりに

2021 年 5 月 8 ～ 9 日、東京で第 3 回北極科学大臣会合が開催されました。2 年に一度開催されるこの会議では、気候変動が北極域社会に与える影響と、先住民を含む北極社会の持続可能な将来が、主要な課題として取り上げられました。この会合で基調講演を行う機会を得て、本稿に記したグリーンランドでの取り組みを紹介しました（図 7）。北極には、先住民を含む人々が暮らす「社会」が存在します。そのような場で研究を行う上で、「住民への説明と協力関係の構築」および「成果の共有と現地社会への貢献」が重要であることを、各国の大臣にアピールできたのは感慨深いことでした。

気候変動の正確な理解から、社会影響の解明、さらには対応緩和策の検討など、北極科学の研究者に期待される役割は広がっています。低温研を中心とした研究コミュニティーで、今後ますます重要性を増す北極気候変動に取り組んでいきたいと考えています。

謝辞

本研究は、低温科学研究所・共同研究推進部のプログラムとして、文部科学省による GRENE 北極気候変動研究事業、ArCS 北極域研究推進プロジェクト、ArCS II 北極域研究加速プロジェクトの支援を受けて実施しています。研究プロジェクトのメンバー、国内外の共同研究者、グリーンランドの研究協力者に心から謝意を表します。

図 7　第 3 回北極科学大臣会合での基調講演（写真は ASM3 事務局提供）。グリーンランドでの研究取り組みを紹介した。

語句説明

グリーンランドと南極に発達した巨大な氷河を「氷床」と呼びます。また海や湖に流れ込む氷河を「カービング氷河」と呼び、グリーンランド氷床の周縁には無数のカービング氷河があります。カービング氷河が後退すると、氷河が削った細く深い谷に海水が流入して、「フィヨルド」と呼ばれる入江地形が形成されます。一方で陸上に末端を持つ氷河もあり、そのうち、山頂部を帽子のように覆うものは「氷帽」と呼ばれています。

南極の海と氷を探る
――南極地域観測第9期重点研究観測がめざすもの――

青木　茂

生まれも育ちも違う氷

観測のため船で南極に向かう道すがら、海を漂う氷に出会うと南極に近づく実感がわいてきます。まず見つかるのは、背の高い「氷山」です（図1）。これは、もとは大陸の上に降りつもった雪が押し固められてできた陸の上の氷（「陸氷」）の塊である「氷床」です。その一部が「氷河」となって流れ、海のうえに押し出されて「棚氷」となった後、大陸と縁が切れたものが氷山となります。そろそろ大陸、というところで見えてくるのが比較的薄い「海氷」です。これは冬に海の水が凍ってできた氷で、大陸沿岸には夏でも生き残っているものがたくさんあります。海氷と陸氷、素性の違うこの二つの氷は、背景となる海や大地の影響を受けながら南極を循環していきます。

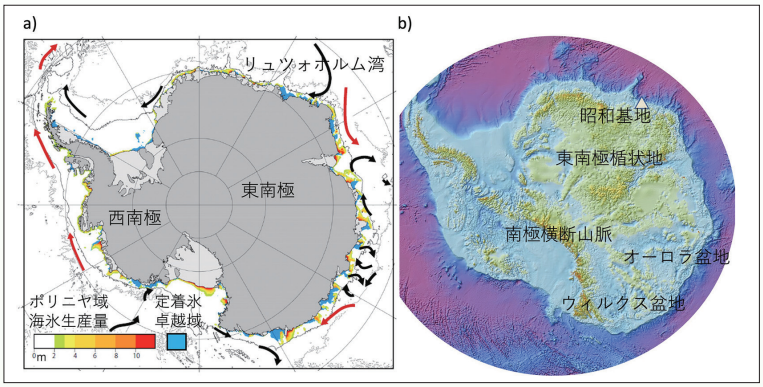


図2　南極大陸と周辺海洋の環境。(a) 沿岸の海流・氷の状況。赤矢印は南極周極流の南限の流れ、黒矢印は亜寒帯循環系の流れを示す。暖色系の色はポリニヤ域での海氷生産量、シアンは定着氷卓越域をそれぞれ示す。Nihashi and Ohshima(2015) をもとに作成。(b) 南極大陸の基盤地形。Bedmap2 のデータを Qantarctica によって作成。

海氷の動きに着目した場合、岸や座礁した氷山などにくっついてほとんど動かず成長するものを「定着氷」、漂い動き回っているものを「流氷」と区別します。つねに海氷が流れることで、厚さの薄い海氷がつぎつぎ生じる場所を「ポリニヤ」と呼びます。ポリニヤの中でも特に大量の海氷が生じる場所では、海氷ができる際に海中にとり残される塩のために塩分が高くなり、非常に密度の高い海水が生まれます。この水は、世界の海洋底層を占める最も重い水、南極底層水のもとになります。

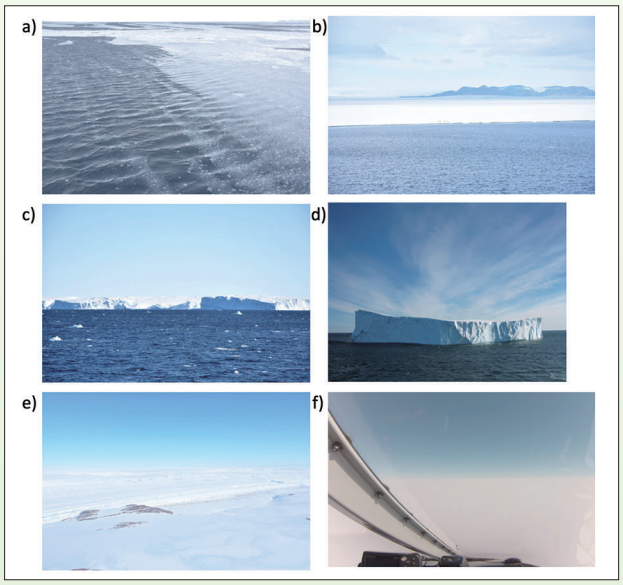


図1　南極の海氷と陸氷。a) 流氷・薄氷域・ポリニヤ、b) 定着氷域、c) 棚氷、d) 氷山、e) 白瀬氷河と f) トッテン氷河。

なぜいま南極なのか？

近年南極が注目を集めている大きな理由の一つは、大陸の上にあった陸氷の海への流出がスピードアップして、地球の平均海面が上昇しつつあるという現実です。二十年くらい前までは、温暖化すると海からの蒸発が盛んになり、雪となって大陸の上に降りつもる量が増えるので海面は下がる、という見かたが支配的でした。ところが、近年の人工衛星による観測などから、大陸の上に降り積もる雪が増加して海面が下がる分を、海へ流れ出す氷の量が増えることで海面が上がる分が上回っており、全体として平均海面は上がっている、とみられるようになってきました。しかし、氷の出入りは場所によって大きく特性が異なっています。そこで、南極氷床の氷が、いつ、どこから、どのくらい流出しているのか、その流出量はどのように決まるのか、将来はどうなっていくのか、そうした疑問に答えるため多くの科学者が研究を行っています。

南極大陸は、その面積が日本の面積の約37倍ととても大きく、場所によって事情が大きく違います（図2）。大雑把にはグリニッジ子午線をはさんで西南極と東南極とに分けますが、氷床の下の基盤地形にも、高地と低

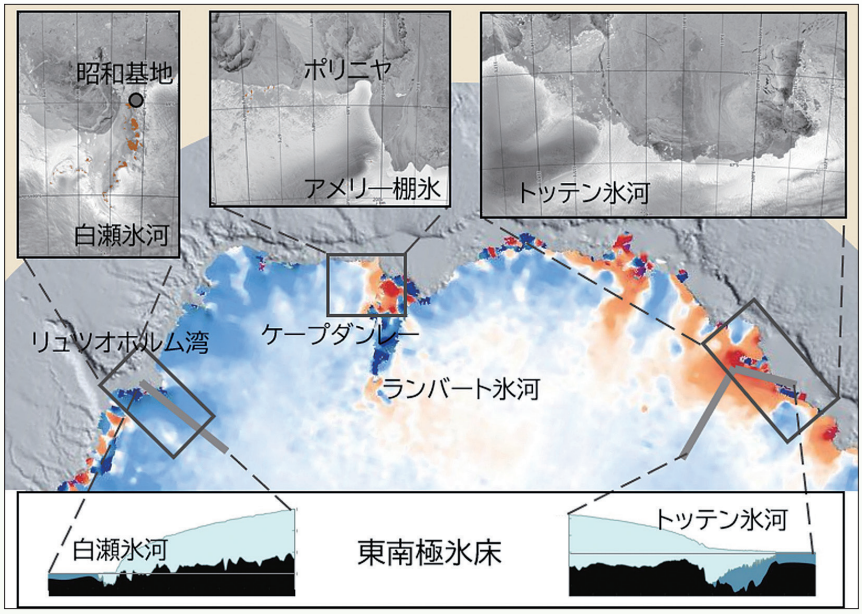


図 3　ROBOTICA プロジェクトがターゲットとした三領域。大陸上のカラーは、氷床の表面高度の変化 (Smith et al., 2020 をもとに Qantarctica で作成) を表現しており、赤が低下、青が上昇を示している。

地があります。西南極はほとんど低地が占めています。東南極では大規模な楯状地が高地を形成していますが、オーロラ盆地やウィルクス盆地といった、標高が海面下 1000 メートルを下回るような大きな低地もあります。高地にある氷床は海の影響は受けにくいですが、低地にある氷床は海の影響を受けやすい、という違いがあります。海が運んでくる熱も、氷床の融解に大きな影響を及ぼします。海の循環の様子も場所によってずいぶん違います。氷床がどのように変動するのかを理解するためには、海の水温や循環、海や氷床下の地形の状況などを正しく理解することが必要です。

人工衛星によって明らかになってきた氷床の変動ですが、そのメカニズムを理解し将来を予測できるようにするためには、氷床の構造やその下の基盤が実際どうなっているのか、氷床と接する海の中やその地形がどうなっているのかといった、人工衛星では分からない情報もまた現場で詳しく知る必要があります。海の中は船で観測するわけですが、特に海氷に覆われた南極の沿岸域については、情報がほとんどありません。

一方で、季節的には冬にでき夏に融ける傾向にある海氷についてですが、海氷の特性は場所や年によって大きく変化し、これについてもまだ分からないことが数多くあります。定着氷ができるところでも常に同じ場所が同じような成長と融解を繰り返すわけでなく、気候条件によって数年間安定して存在したかと思えば毎年のように崩壊して不安定になる時期もあったりしますが、そうした挙動の違いを生み出す原因はまだよく分かりません。棚氷の末端部に定着氷がある場合には棚氷が流出してしまうのを防ぐ役割をもつと考えられるので、定着氷の有無が氷河の流出にも関係してきます。

こうした研究は海と氷が接する場所、文字通り境界領域の研究で、未開拓な分野です。いままで他人の守備範囲だと思っていたところがはっきりすれば自分の研究も進むのですが、その他人も実はよく分からない、そうした壁に直面します。一方で通信技術や計測技術が発達してきて、観測技術も日々更新されています。海洋、氷河、海氷、固体地球、測地、リモートセンシングなど、さまざまな分野の研究者がお互いにその強みを持ち寄って取り組むことで、その壁を乗り越えようということになってきました。

日本の南極地域観測での現場観測

氷床の流出が激しいと考えられる西南極では、ここ十数年程で現場観測も進み、多くのことが分かってきています。一方で、広大な東南極の大部分は、まだあまり調べられていません。日本の南極地域観測は、歴史的な経緯もあって、昭和基地を設置した東南極を観測してきましたが、東南極といっても広すぎて、全海域をくまなく探索するのはとても無理です。そこで、南極地域観測事業の 2016 年からの第 9 期 6 か年計画として始まった重点研究観測「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」(研究代表者：青木茂、略称“ROBOTICA”) では、東南極の大事なツボである三つの領域に焦点を絞りました (図 3)。うち二つは、暖かい水の循環があるだろうと考えられるトッテン氷河沖海域と白瀬氷河のあるリュツオホルム湾です。オーロラ盆地のトッテン氷河は近年氷床流出が加速しているともいわれ、世界的に注目を集めています。一方で、この二領域は大局的に見た氷河底の地形が対照的ですし、白瀬氷河付近の氷床は増大中とみられている、という違いがあります。そしてもう一つは、上流にある東南極で最も

大きな氷河の影響を受けつつも、全南極でも海氷が二番目に多くできて南極底層水が生まれているケープダンレー沖です。このプロジェクト全体としては幅広いテーマを掲げていますが、これまで新しく分かってきたことの中から、幾つかご紹介させていただきます。

暖かい水が氷を融かす

白瀬氷河が注ぐリュツオホルム湾は、厚い定着氷に覆われたままのことが多く、「インアクセシブル（接近不可能）」な場所といわれてきました。そうした氷の奥に基地をつくった日本は、毎年砕氷船「しらせ」で氷に体当たりして割りながら昭和基地まで往復します。ただ、私自身が基地を訪れた約 20 年前（1997/98 年）も今回（2019/20 年）も、それに先立って定着氷が大きく割れだしたためあまり氷がなく、ほとんど体当たり無しで到着することができました。定着氷の張り方は、十数年の時間スケールで変わるようです。こうした定着氷の変動には、どうやら海の表面近くの熱のたまり具合が関係していることが分かってきました。そして、海のより深いところにある熱は、湾の奥まで入ってきて氷河末端を底面から融かし、深層にあった水がポンプでくみ上げられるように表層へ湧き上がっていることも我々のプロジェクトで明らかになりました（図 4a）。この湧き上がりが同時に栄養分も運び上げて、生物生産も増やしているようです。

ケープダンレー沖のポリニヤ域では、真冬に盛んになる海氷生産をとらえるため、海の中に観測機材を係留して海洋の中の状況を調べてきました。ここでは昔から実績のある測器に加え、新しく開発した測器も使用しました（図 4b）。これによって、年によって海の中の様子がずいぶん違い、上流にある氷河の棚氷の融け水の影響をうけることも分かってきています。

このプロジェクトのハイライトは、いままでほとんど観測が行われていないトッテン氷河沖での観測でした。ほとんど行われていないことをするということは、研究面では大きなモチベーションになりますが、現実に行動するうえでは大きなリスクをともないます。誰も通ったことがないので正確な水深が分からない「海図なき航海」となるわけですが、万が一、氷に閉ざされた極寒の海に予測不可能な浅瀬があってそこにぶちあたって座礁でもしようものなら、助けにくることができる船などほぼありません。そんな中、風雪に耐え、「しらせ」でトッテン氷河の周辺で海図を作り、大規模に調査することに成功しました。「しらせ」の航路上で、海底に向けて超音波を発信して水深を測ることによって、氷床の近辺のやや浅い大陸棚には氷河の傷あとが縦横無尽に刻まれる一方、その沖には深いお盆状の地形が広がり、大陸棚の端ぎりぎりにはけっこう深目の土手があるという、海底地形の全体像が明らかになりました。船の上から海中にセンサーを降ろして水温の構造を調べることで、こうした地形を越えて、海の深い部分にはことごとく沖側から暖かい海水がアクセスしている状況も分かりました。

観測プロジェクトも終盤にきてその成果がでてきつつあります。これからさらに研究成果がでてきます。海底地形が分かれば、それにもとづいて数値実験をするなどして、海水の詳細な流れの様子が推測できます。今回の観測で棚氷の上に置いてきたレーダーを数年後に回収して調べれば、棚氷の融解の具合も分かります。また今回取ってきた海底堆積物の柱状サンプルを詳細に調べれば、昔の海洋の状態がどうであったかが分かります。こうした過去の知見は、将来どのような状況が起こりうるのか、可能なシナリオを考える上で大きな助けになります。こうして、変化しつつある海と氷のダイナミクスの理解に一歩ずつ近づいています。しかし、一回の観測だけでは時間的な変化を正しく理解するには不十分ですし、まだまだ将来予測にはほど遠いのが現状です。これからも観測を続け、南極の海と氷の監視を怠らないことが大切だと考えています。

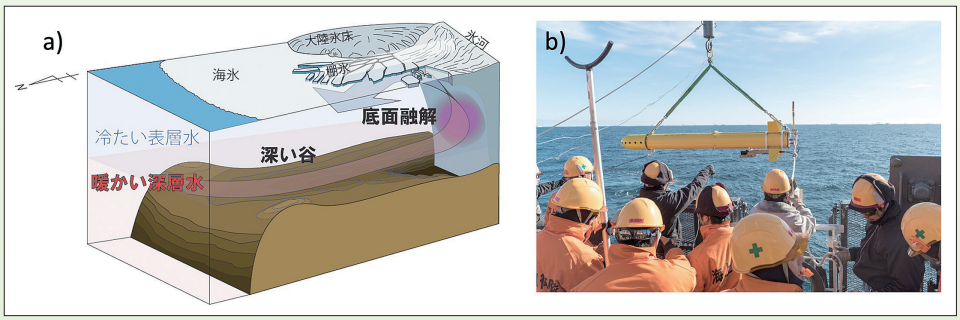


図 4　ROBOTICA プロジェクトの成果の例。a) 白瀬氷河の底面を、沖側から進入する暖水が融かす状況の模式図。b) 新たに開発したロボット技術でケープダンレーポリニヤを観測している状況。

高分解光学顕微鏡で見る 氷結晶の一分子成長ダイナミクス

村田　憲一郎

氷は水の中でどのように成長するのか？

水が凍ったり氷が溶けたりするような結晶の成長・融解は、あらゆる物質群に見られる普遍的な相転移現象です。とりわけ水と氷は地球上にあまねく存在するため、その成長と融解は私たちにとって最もなじみ深い相転移現象（注１）の一つであると同時に、寒冷圏の生活や自然現象に深く関わっています。実はこの相転移の過程は、二相（水と氷）の領域のせめぎあいとして肉眼で簡単に見ることができます。例えば0℃以下に冷やしたシャボン膜を観察すると（図１）、過冷却状態の水から氷結晶の核が偶発的に生成して、母相である水の中で成長し、最終的に氷がシャボン膜（水）を覆い尽くす様子を見ることができます（この過程を一般に「核生成・成長」と呼びます）。

さて、実際に観察してみると、相転移の途中で水と氷の二つの相が共存している、つまり「二つの相を区別できる」ことに気がつきます。普段からコップに氷を入れて水を飲む私たちにはごく自然のことと感じますが、物性物理学の観点からは必ずしも当たり前ではなく、界面があるからこそ水と氷を区別することができるといえます。ではなぜ二つの間には界面（境界）が存在するのでしょうか？それには水と氷、それぞれの相の性質の違いが関係しています。水は構造が乱雑な無秩序相であり、氷は対称性のある結晶構造を持つ秩序相です。対称性のある秩序と無秩序の中間状態は定義できないので、その二つの相の間を連続的に行き来することはできません。つまり、それぞれを分かつ不連続な界面は存在しなければならないのです（注２）。その意味で、相転移という現象と界面という存在は切っても切れない関係にあり、その時間発展プロセスも界面の運動によって規定されます。例えば、一見説明の難しそうな雪や氷の複雑かつ精緻な結晶外形も、相転移中の界面の運動と周囲の熱力学的環境との競合として概ね理解することができます。

図１　シャボン膜を冷凍庫に入れて凍らせた時の様子。

今は「界面」というマクロな概念に注目していますが、このようなマクロな視座から現象を理解する方法は、（その名の通り）「現象論」と呼ばれ、現象の本質をあぶり出します。一方で、「現象論」はよりミクロな素過程に関する情報を扱うことはできません。しかし、水から氷への成長であれば、界面の運動自体を駆動するのはあくまで「過冷却水中の水分子が氷結晶に取り込まれる」というミクロな素過程です。氷に限らずあらゆる結晶の成長メカニズムは、成長源となる周囲の環境相・母相（気体、溶液、融液）中の原子・分子を取り込む場となる結晶界面の構造（例えば結晶の表面は平坦か、荒れているか、欠陥はあるか、など）に支配されています。では、過冷却水中の水分子はどのように氷の結晶に取り込まれるのでしょうか？そもそも氷と水はその界面でどのように区別されているのでしょうか？これらはとても素朴な疑問のように思われますが、実はこのような氷の成長におけるミクロな素過程については未だ十分な理解に達しておらず、実験に基づく研究が待たれていました。

これまで私たちはサブナノメートルの高さ分解能を持つ独自の高分解光学顕微鏡ーレーザー共焦点微分干渉顕微鏡ーを駆使して氷結晶の１分子段差を可視化し、「水蒸気から氷」へのミクロな成長過程を明らかにしてきました。現在は上述の疑問に答えるべく「水から氷へ」の成長過程の解明に力を入れています。本稿では、今まさに明らかになりつつある過冷却水中での氷結晶のミクロな成長機構の一端を紹介します。

注目したのは擬似液体層の中の氷

一口に水から氷への成長を観察するといっても、顕微鏡による高分解観察は容易ではありません。先に「肉眼で見える」と指摘しましたが、換言すればそれほど水からの氷の成長は速いのです。顕微鏡観察をすると観察面である成長中の界面はたちまち焦点から外れてしまいます。そこで私たちはこれまで精力的に研究してきた擬似液体層（注３）の中の氷の成長に着目しました。以下で見るように、擬似液体層の内部では氷の成長が遅くなり

ます。そこで私たちは、この系を水から氷への結晶成長の一つのモデルケースと捉え、その様子をレーザー共焦点微分干渉顕微鏡で実時間・実空間観察しました。

百聞は一見に如かず
――見てみなければ分からない――

はじめに、上空での雪の成長に対応する水蒸気から氷への成長を見てみましょう（図２）。島状の氷結晶面内（オレンジ部分）で同心円状に広がる線状コントラストが高さ 0.37 nm の氷１分子段差（単位ステップ）です。この単位ステップが水分子の取り込みサイトとなり、過飽和状態になった水蒸気を餌にして一層ずつ秩序を形成しながらミルフィーユ状に成長します。一方で、今回観察したのは擬似液体層内部での氷の成長です（図３）。驚くべきことに、氷は擬似液体層という自身の融液で覆われていても、水蒸気からの成長と全く同様に１分子ずつ層状に成長しています。この結果は、融点直下かつ過冷却融液に接しながらも、氷の最表層が結晶的な層状秩序を維持していることを意味します。気体（水蒸気）と結晶（氷）の界面が分子レベルで明確であることはその密度差からも自明ですが、結晶と融液の密度差はそれに比べて非常に小さく、水と氷のケースでも 10％に達しません。そのため、結晶と融液の境目はマクロには定義されるが分子レベルでは明確ではない－つまり界面での結晶秩序は液体側に向けて連続的に失われる－と従来考えられてきました。今回の観察結果は、この従来の理解とは異なるものであり、氷と水の界面であっても１分子レベルではっきりと区別された界面構造が存在することを示しています。

また意外なことに、擬似液体層内部での氷の成長が水蒸気からの成長と同程度に「ゆっくりと」進むこともわかりました。過冷却水からの成長では、既に多数の水分子がステップに隣接にしており、希薄相である水蒸気からよりも素早くステップに取り込まれるため、成長もより速いはずです。この謎を解明するためには、単位ステップでの水分子の取り込み過程を検討する必要があります。過冷却水中の水分子が氷結晶の最表層のステップに取り込まれるためには、水分子間の水素結合ネットワークを切断しなければなりません（図４）。これは過冷却水中の局所的なネットワーク構造が氷の結晶構造（氷 Ih（注１））とは相容れないためです。１つの水分子が水素結合の切断に要する時間は構造緩和時間と呼ばれます。観察した単位ステップの前進速度から、取り込まれる水分子の構造緩和時間を見積もると、その時間はバルク水（表面・界面の影響を受けていない通常の水）と比較して 90 倍程度長くなっており、氷最表層に接する水分子の運動性が著しく低下していることがわかりました。なお、私たちは先行研究において可視化された擬似液体層の変形挙動からその粘性係数を見積もっており、バルク水との比較で最大 200 倍程度増加することを発見しています。今回得られた構造緩和時間はこの結果と定性的に一致しており、擬似液体層内部での氷の成長の遅さに関係していると考えられます。

さて、今回のケースのような自身の融液からの結晶成

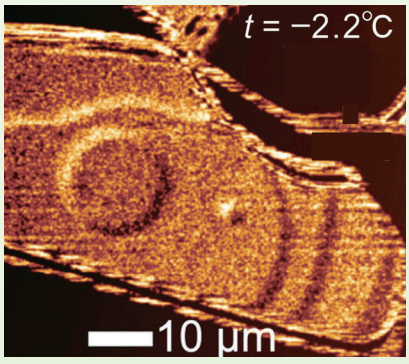


図２　レーザー共焦点微分干渉顕微鏡により可視化された過飽和水蒸気下における氷の成長表面の様子。（Sazaki et al.、Proc. Natl. Acad. Sci. USA.、107、19702-19707 (2010)）

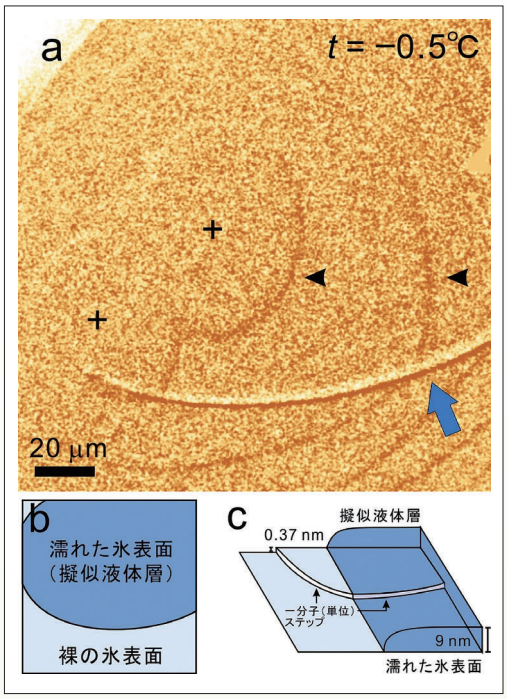


図３　(a) 擬似液体層内部での氷の成長の様子（スケールバー：20 μ m）。擬似液体層内部で氷一分子層が＋の位置から生成し、同心円状に層状成長する瞬間を捉えている。黒矢印は単位ステップに対応する。(b) 上から見た模式図。(c) 青矢印方向から見た模式図。

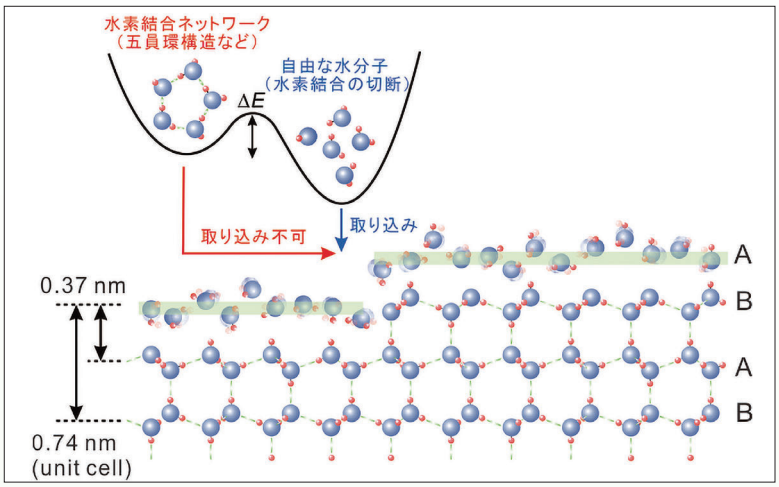


図 3　(a) 擬似液体層内部での氷の成長の様子（スケールバー：20 μ m)。擬似液体層内部で氷一分子層が＋の位置から生成し、同心円状に層状成長する瞬間を捉えている。黒矢印は単位ステップに対応する。(b) 上から見た模式図。(c) 青矢印方向から見た模式図。

長を一般に融液成長と呼びますが、気体や溶液からの結晶成長に比べ、ミクロな理解が進んでいません。その大きな理由として、母相となる液体自体の理論的記述が難しいことが挙げられます。結晶に近い密度でありながら構造が乱雑である液体をモデル化することは至難の業です。このような液体特有の難しさに加え、水では水素結合の存在によりその取扱いは一層複雑化します（注４）。本研究はあくまで結晶成長過程からのアプローチではありますが、分子動力学法などの数値シミュレーションと組み合わせることで、界面における水分子の振る舞いの分子論的描像をつかむ足掛かりになると考えられます。

今後の展望

今回の研究では、過冷却水中での氷の結晶成長のモデルとして擬似液体層内部の氷に焦点を当て、界面のミクロな構造とその成長機構に迫りました。結晶成長機構の普遍的性質から、今回明らかになった界面描像とステップでの分子・原子の取り込みプロセス自体は、氷以外の物質の融液成長においても共通であると考えられます。

一方で、上で指摘した通り、擬似液体層とバルク水ではその物性が異なることから、私たちにとってより身近なバルク水中での氷の成長においても全く同じ成長ダイナミクスが観察されるかは気になるところです。私たちはごく最近、バルク水中での氷の成長のその場観察に成功し、氷結晶の成長による潜熱の拡散と単位ステップのダイナミクスが競合し、擬似液体層中では見られない複雑なステップダイナミクス（単位ステップ同士が自発的に合体し、より高い段差のステップを形成する自己組織化現象）が現われることを発見しました。擬似液体層内部ではその薄さゆえに無視できた潜熱の効果がバルク水中では顕在化し、単位ステップの自己組織化に寄与すると考えられます。現在はこの現象の機構解明に取り組んでいます。

今回の研究および今後の研究で得られる知見は、結晶の融液成長という最も素朴な相転移ダイナミクスの基礎的理解を深めると同時に、細胞・臓器等の冷凍保存で鍵となる氷の結晶成長制御や、さらに広く半導体結晶を始めとする高品質・高機能の結晶性材料の開発、設計に向けた新たな指針となることが期待されます。

語句説明

注1: 物質の性質が巨視的に一様な状態を相と呼び、温度・圧力などの変化により、その相が別の相に移行する現象を相転移と呼びます。例えば、氷（固体もしくは結晶）、水（液体）、水蒸気（気体）は、水という一つの物質がとる個別の相です。また、氷自体も結晶構造のことなる複数の相（最新の報告では 20種類）を有します。なお、普段私たちが目にする氷は六方晶系に属する氷で、氷 Ihと呼ばれます。その他にも、電気を流す /流さない、磁石にくっつく /くっつかない、溶ける /溶けない、など、相転移の例は枚挙に暇がありません。

注2: 水と水蒸気の関係と対比するとより分かりやすいかもしれません。両者に界面があることは、沸騰して勢いよく泡立つお湯を想像するまでもなく自明です。しかし、水蒸気は氷とは異なり水と同じく無秩序相です。無秩序相同士であれば、二相間を連続的に行き来することに物理的制約はありません（体積は連続的に変えられます）。実際に、ある温度・圧力（臨界点、水の場合は 371℃、22.1MPa）以上ではいわゆる超臨界状態となり、水と水蒸気の区別（界面）がなくなります（超臨界流体）。このような臨界点を経由した連続的な相転移現象は「二次相転移」と呼ばれ、結晶の成長・融解に代表される「一次相転移」と明確に区別されます。例えば磁性体の相転移（磁石にくっつく /くっつかない）は代表的な二次相転移です。二次相転移では一次相転移のような潜熱は発生しません。また、連続的な相転移であるため、過冷却・過熱などの準安定状態も存在しません。一方で、臨界点近傍では臨界現象と呼ばれる各種物理量の発散などの異常挙動が観測されます。なお、構造の対称性が異なる氷と水（広義には結晶と液体）の間には臨界点は存在しません。

注3: 表面融解により生じた氷表面を覆う厚さ数ナノメートルの極薄の水膜。この水膜は、より氷に近い構造を持つ水であると考えられているため、通常の水と区別するために「擬似液体層」と呼ばれています。

注 4:むしろ水は我々の身近にある最も複雑な液体といえます。4℃での密度極大をはじめ、熱容量や体積圧縮率などの物理量も他の液体には見られない異常な温度変化を示します。これらは「水の熱力学的異常」として古くから知られる水にまつわる未解決問題の一つです。

Report

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氷帽
（2）期間：2020 年 6 月～ 10 月
（3）参加者：Kirsty Langley（グリーンランド調査所）、カナック村住民数名
（4）カウンターパートの機関名：グリーンランド調査所（グリーンランド・ヌーク）
（5）観測目的：

グリーンランド北西部カナック氷帽において、2012年から継続する質量収支と氷流動速度モニタリングを実施した。COVID-19の影響で現地への渡航が困難となったため、グリーンランド・ヌークの研究機関、グリーンランド調査所の研究者に観測活動を委託した。カナック村住民の協力を得て、6月から10月にかけて複数回の調査を実施し、質量収支と流動速度の測定、測定機器のメンテナンスを完了した。本研究はArCS II北極域研究加速プロジェクトのもとで実施した。

カナック村住民（上）とグリーンランド調査所の研究者による氷帽観測（下）。

Report

海外調査

■的場　澄人

（1）調査・観測先：グリーンランドシオラパルク村と周辺海氷上
（2）期間：2021 年 3 月～ 4 月
（3）参加者：的場澄人
（4）カウンターパートの機関名：一般社団法人　アバンナット北極プロジェクト　山崎　哲秀
（5）観測目的：
冬期の季節海氷域において海氷崩壊時に海水面から放出される水・物質の挙動を明らかにすることを目的に、シオラパルク村において、住民から住居を借り受け、観測拠点を設置し、気象観測とエアエロゾル採取を開始した。 また海氷上に おいて海氷下のCTD観測を行った。 本観測は、北極域研究加速プロジェクト（ArCS II）のもとで実施された。

海氷上における観測の様子

Publication

安定同位体を用いた
有機物・生物・生態系解析

北海道大学低温科学研究所
低温科学　第79巻　67P
令和3年3月20日発行
ISSN 1880-7593

地球惑星科学、とくに地球生命科学は、大気・陸・海洋と生物の間でおこる物質・エネルギー収支を定量し、その変遷と生命の進化・多様化や、人間活動（化石燃料の消費・森林破壊など）が自然界へ与える影響を評価する学問分野である。例えば、植物や藻類による二酸化炭素の吸収と、その結果としての土壌・海洋への炭素の貯蔵に関する研究は、大気二酸化炭素の増減とも密接に関係しているため、将来の地球の姿や、人間社会の持続可能性を考えるうえで重要な意義を持つ。また、宇宙空間や初期地球における有機物生成に関する研究は、地球における生命の起源や、地球外生命の可能性など、生命誕生の根幹（生命分子の起源や生命のホモキラリティの謎）に関わる制約条件を与える。

これらの研究に共通する有効な解析手段の1つに、安定同位体がある。安定同位体とは、陽子の数が等しく中性子の数が異なる原子のことであり、生物を構成する水素・炭素・窒素・酸素などには、必ず安定同位体が存在する（例えば、炭素では98.9%の^{12}Cと1.1%の^{13}Cなど）。そして、その比率（安定同位体比: 例えば^{13}C/^{12}Cなど）は、（1）地球上の物理化学・生化学反応の基質・経路・フラックスに対して定量的に変化するため、（2）この基本原理が個々の反応スケールの研究から地球化学・地質学スケールの研究まで共通の一般則として広く適用できるため、古くから多くの研究で、反応素過程の5W2H（Who、What、When、Where、Why、How、How many）を読み解くツールとして用いられてきた。

また、同位体比の自然界での変化率を用いる研究に加え、安定同位体を標識として用いるトレーサー研究も盛んに行われている。実際に、基質（例えば、ブドウ糖など）の特定の部位を人工的に同位体標識し、その移動を単一の生物体内、生物群集内、あるいは海底の堆積場などにおいて、分子レベルもしくは分子内の個々の元素レベルで追う手法（Stable Isotope Probing、SIP法）は、生物の代謝合成経路の可視化、生物群集の機能・構造解析、生物地球化学的プロセスの解明といった研究で利用が期待されている。

本特集は、生物学、生態学、宇宙地球化学などの分野で、最新の同位体技術を研究されている、もしくは、それらの技術を用いて研究を展開されている方々に、論文を執筆していただき、解説集として取りまとめたものである。これらの論文が、今後の研究の発展に資することになれば幸いである。

最後に、本巻の刊行にあたり、論文を執筆して下さった全ての著者と論文の査読を引き受けて頂いた全ての査読者に、この場をお借りして御礼申し上げる。

目次

・安定同位体の天然存在量および安定同位体標識の検出法—1: ガスクロマトグラフ-同位体比質量分析計
・アミノ酸の安定同位体比を用いた生態系解析
・安定同位体の天然存在量および安定同位体標識の検出法—2: ガスクロマトグラフ-質量分析計とMass Works
・マルチオミクス解析による好熱性水素酸化細菌からの可逆的TCA回路の発見
・オービトラップ質量分析計を用いたアミノ酸解析の可能性
・Orbitrap Fusionを用いたCE-MSと四重極GC-MSでのアミノ酸分析の比較
・宇宙における安定窒素同位体比の多様性とその起源解明に向けた実験的アプローチ
・炭素安定同位体組成で探る隕石有機物の生成反応と地球への運搬

「低温科学」第79巻編集委員
力石　嘉人（北海道大学・低温科学研究所）
布浦　拓郎（海洋研究開発機構）
古川　善博（東北大学・理学研究科）

(2020/12/8)

太陽系形成より古い有機分子を炭素質隕石から検出
～ただ古いだけじゃない!太陽系に存在する有機物生成に不可欠な分子～

発表者：准教授　大場　康弘

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の大場康弘准教授、海洋研究開発機構の高野淑識主任研究員、九州大学大学院理学研究院の奈良岡浩教授、東北大学大学院理学研究科の古川善博准教授、東京大学大学院理学系研究科の橘省吾教授らの研究グループは、世界で初めて炭素質隕石からヘキサメチレンテトラミン（HMT）という有機分子の検出に成功しました。

星・惑星系誕生の場である星間分子雲に存在する水やアンモニア、メタノールなど比較的単純な構造を持つ分子は、極低温（-263℃）環境での光化学反応によってより複雑な構造を持つ分子へと変化し、その一部は惑星系形成時に星の材料として取り込まれます。そのため、小惑星のかけらである隕石に含まれる有機物は星間分子の寄与があると考えられています。HMTは星間分子雲で起こりうる光化学反応の主要生成物のため、太陽系形成の材料になったとしても不思議ではありませんが、これまでにHMTが隕石など地球外物質の分析で検出されたことはありませんでした。

本研究グループは、マーチソン隕石をはじめとする3種の炭素質隕石から世界で初めて隕石固有のHMT検出に成功しました。隕石中HMTは主に太陽系形成（約46億年前）以前に星間分子雲で生成したと考えられ、これまで隕石から確認された中で最古の有機分子であるだけでなく、隕石に存在するアミノ酸や糖など種々の有機化合物生成に不可欠な分子です。探査機「はやぶさ2」によって採取され、まもなく地球に帰還予定の小惑星リュウグウのサンプルにも同様にHMTが存在することが予想されるため、本研究成果は宇宙における分子進化解明の糸口になると期待されます。なお、本研究成果は、2020年12月7日（月）公開のNature Communications誌に掲載されました。

【用語解説】

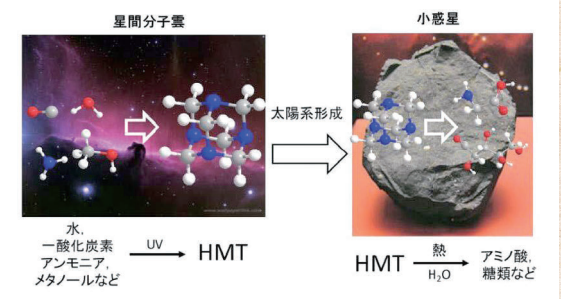
＊1　高い重水素濃集 … 隕石中有機物は地球上に存在する分子に比べて、分子内の重水素（水素の安定同位体のこと。質量数は2）の存在度が高く、同様に重水素存在度の高い星間分子の寄与が示唆されている。

【論文発表の概要】

論文名：Extraterrestrial hexamethylenetetramine in meteorites – a precursor of prebiotic chemistry in the inner solar system（隕石中地球外ヘキサメチレンテトラミン－太陽系内部における生命誕生前の化学反応の材料物質）

著者名：大場康弘[1]、高野淑識[2]、奈良岡浩[3]、古川善博[4]、ダニエル グラビン[5]、ジェイソン ドワーキン[5]、橘　省吾[6,7]（1 北海道大学低温科学研究所、2 海洋研究開発機構、3 九州大学大学院理学研究院、4 東北大学大学院理学研究科、5 アメリカ航空宇宙局（NASA）ゴダード宇宙飛行センター、6 東京大学大学院理学系研究科、7宇宙航空研究開発機構（JAXA））

雑誌名：Nature Communications
ＤＯＩ：10.1038/s41467-020-20038-x
公表日：2020年12月7日（月）
午後7時（オンライン公開）



星間分子雲から太陽系形成に至るまでの分子進化

Press Release

(2021/2/24)

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～

発表者：大学院生　近藤　研
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近藤　研氏と同大学低温科学研究所の杉山　慎教授（同大学北極域研究センター兼務）らの研究グループは、現地観測データと数値モデルによって、グリーンランドで氷河から流出する河川が引き起こした洪水のメカニズムを明らかにしました。

北極域では気温上昇に伴って氷河の融解が増加しています。氷河の融解は海水準の上昇や海洋環境の変化だけでなく、洪水災害などによって現地で暮らす人々にも影響を与えます。本研究を実施したグリーンランド極北の集落カナック村でも、2015年と2016年に村を流れる氷河流出河川が増水して、道路決壊や橋の流失などの被害が生じました。

そこで研究グループでは、氷河と河川の現地観測で得たデータに、日本における雪氷研究で培われた数値モデルを適用し、カナック村で洪水が発生した際の気象条件から河川流量を再現しました。その結果、2回の洪水は氷河の激しい融解と数年に一度の豪雨が原因と判明しました。また、2100年までに予測される4℃の気温上昇によって、河川への流出水量が現在の3倍に達することが明らかになりました。

以上の結果は、今後さらなる気温上昇や雨量増加が予測される北極域において、洪水のリスクがより深刻化する可能性を示しています。本研究成果によって、近年の気候変動が北極域の人間社会に及ぼす影響の理解が進み、極域に暮らす人々の安全な将来設計に貢献することが期待されます。

本研究成果は、2021年2月17日（水）公開のJournal of Glaciology誌にオンライン掲載されました。なお、本研究は、ArCS北極域研究推進プロジェクト、ArCSII北極域研究加速プロジェクトの助成を受けて実施されました。

【論文発表の概要】

論文名：Flood events caused by discharge from Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland（グリーンランド北西部カナック氷河の流出河川が引き起こした洪水災害）
著者名：近藤　研[1,2]、杉山　慎[1]、榊原大貴[3]、福本俊吾[1,2]（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 北海道大学北極域研究センター）
雑誌名：Journal of Glaciology（雪氷学の専門誌）
ＤＯＩ：10.1017/jog.2021.3
公表日：2021年2月17日(水)
（オンライン公開）

カナック村

氷河上で行った観測の様子

Press Release

(2021/3/12)

水田は、周辺地域の気温の上昇を緩和しているが、その効果は大気CO_2の増加により低下する

発表者：教授　渡辺　力

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の渡辺　力教授、農研機構 農業環境変動研究センターの伊川浩樹博士らの研究グループは、水稲の気孔応答などを反映させた領域気象モデルにより、水田の持つ気象緩和効果の大きさを見積もることに成功しました。

日本をはじめ、アジア各国の典型的な景観の一部として親しまれる水田には、周辺地域の気温上昇を緩和する効果があることが知られています。一般に、盛んに蒸散している植物は気化冷却により植物体温が低くなることから、特に晴天の日中に周辺の気温上昇を抑えます。しかし大気中のCO_2濃度が上昇すると、植物体があまり気孔を開かなくなるために蒸散が減り、気温上昇を抑制する効果が弱まると考えられます。このため「水田の気象緩和効果」は将来的に低下するのではないかと懸念されています。そこで、農研機構と北海道大学低温科学研究所は、水稲の気孔応答による温度の変化と上空の大気層との相互作用を考慮した、領域大気-水田生態系結合モデルを開発し、関東付近の市街地を含む水田が広がる地域を対象にシミュレーションを行いました。その結果、現在の夏季の典型的な晴天日における水田の日中の最高気温は、対象とした地域の市街地と比べて2℃ほど低くなることが示されました。しかし、大気CO_2濃度が倍増した条件では、水稲の蒸散が減って気温上昇抑制効果が弱まり、水田の気温が0.2～0.7℃（平均で0.44℃）ほど現在よりも上昇することが分かりました。市街地では水田の気温上昇の影響を受けて平均で0.07℃上昇しますが、中でも水田地帯に隣接する場所では最大で0.3℃ほど気温が上昇すると推定されました。これらの結果より、今後、大気中のCO_2濃度がさらに上昇すると、「水田の気象緩和効果」が低下し、水田およびその周辺地域の日中の最高気温が上昇することが分かりました。また、温暖化による気温上昇と相まって、水田では夏季の高温によるお米の品質低下や不稔などの障害リスクが増加する可能性が懸念されます。

【論文発表の概要】

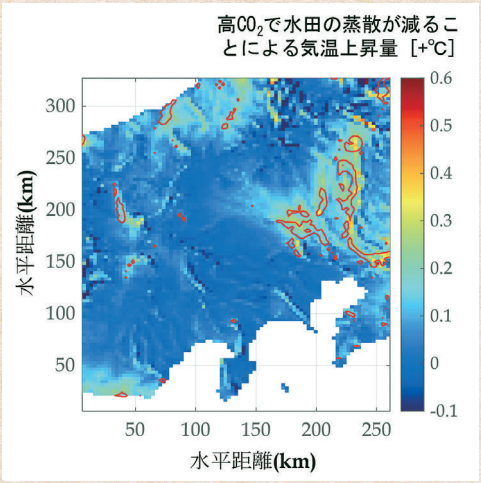
論文名：Heat-Mitigation Effects of Irrigated Rice-Paddy Fields under Changing Atmospheric Carbon Dioxide based on a Coupled Atmosphere and Crop Energy-Balance Model.

著者名：伊川浩樹、桑形恒男、小野圭介、丸山篤志、酒井英光、福岡峰彦、吉本真由美（農研機構 農業環境変動研究センター）、萩野谷成徳（農研機構 農業環境変動研究センター、気象研究所）、石郷岡康史（農研機構 北海道農業研究センター）、石田祐宣（弘前大学 理工学研究科）、Charles P. Chen(Azusa Pacific University)、長谷川利拡（農研機構 東北農業研究センター）、渡辺力（北海道大学 低温科学研究所）

雑誌名：Boundary-Layer Meteorology

ＤＯＩ：10.1007/s10546-021-00604-6

公表日：2021年3月5日（金）（オンライン公開）



大気CO_2濃度が倍増した条件で、水稲の気孔開度が低下して蒸散が減ることに伴う、日中の最高気温の上昇量（現在のCO_2濃度条件での日中最高気温との差）
利根川水系付近など、水田が多い地域（赤線で囲まれた領域）で気温の上昇が顕著（緑色～黄色）です。本研究では、大気CO_2濃度の変化が植物の光合成や蒸散活動に及ぼす影響は、水稲のみに反映させているため、水田以外の土地利用が多い地点では、日中の最高気温の変化は小さくなっています（青色）。

(2021/3/25)

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～

発表者：教授　杉山　慎

【研究成果の概要】

北海道大学北極域研究センターのEvgeny A. Podolskiy助教、漢那直也研究員（現東京大学大気海洋研究所）、同大学低温科学研究所の杉山　慎教授らの研究グループは、グリーンランドの氷河と海洋の境界で見られるプルーム中での直接観測に成功し、これまで主に数値シミュレーションから予想されていたプルームの動態を、観測によって初めて明らかにしました。

水温、塩分、深度センサーを氷河前のプルームに直接投入して、海水特性の変化を高頻度でモニタリングした結果、氷河の融解や氷河湖の決壊に伴う淡水の流出、潮汐変動、フィヨルド内外の海水交換などにより、従来考えられていたよりもダイナミックに海水特性が変化することが明らかになりました。プルームはフィヨルドのポンプとして海水をかき混ぜ、氷河末端の水中融解とカービング*1の促進、栄養豊富な海水の循環など、氷河変動と海洋環境に大きな役割を果たします。本研究により、フィヨルドの海水循環モデルの高度化や氷河・海洋境界現象の理解が進み、グリーンランドにおける氷河変動と海洋生態系の理解への貢献が期待されます。

本研究成果は、2021年3月25日（木）公開のCommunications Earth & Environment誌にオンライン掲載されました。

なお、本研究は、科学研究費助成事業、ArCS北極域研究推進プロジェクト、ArCSII北極域研究加速プロジェクトの助成を受けて実施されました。

【用語解説】

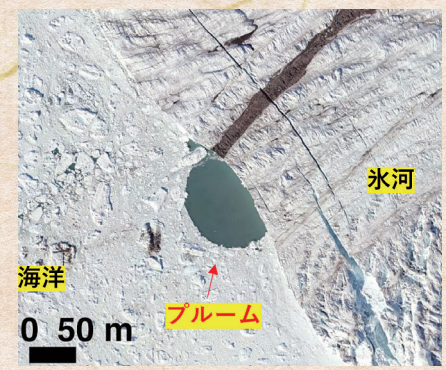
*1 カービング … 氷河から氷が切り離されて氷山ができること。

【論文発表の概要】

論文名：Co-seismic eruption and intermittent turbulence of a subglacial discharge plume revealed by continuous subsurface observations in Greenland（グリーンランドにおける時系列観測より明らかとなった氷河底流出プルームの噴出、断続的に発生する乱流および氷河地震）

著者名：Evgeny A. Podolskiy[1]、漢那直也[1,2]、杉山 慎[1,3]（1 北海道大学北極域研究センター、2 東京大学大気海洋研究所、3 北海道大学低温科学研究所）

雑誌名：Communications Earth & Environment（英科学誌）
ＤＯＩ：10.1038/s43247-021-00132-8
公表日：2021年3月25日（木）（オンライン公開）



氷河と海洋の境界をドローンで上空から撮影。
プルームが氷山を押し流して海面に広がる様子。

Press Release

(2021/3/29)

オホーツク海の高い生物生産は海氷の融解によることを解明
～フロート観測による初の融解期の正味生物生産量の推定～

発表者：教授　大島　慶一郎
准教授　西岡　純

【研究成果の概要】

北海道大学大学院環境科学院修士課程2年の岸紗智子氏と、同低温科学研究所の大島慶一郎教授、西岡　純准教授らの研究グループは、自動昇降する酸素センサー付きプロファイリングフロート*1により、オホーツク海の広範囲を13年間にわたって連続観測を行い、海水中に溶けている酸素量の変動から、初めて正味の生物生産量（純群集生産量*2）を見積もることに成功しました。その見積もりによると、純群集生産量は春、直前に海氷が存在していた海域で圧倒的に大きい値になることが示され、春の植物プランクトンの顕著な大増殖（春季ブルーム）は海氷融解によってもたらされていることを初めて定量的指標をもって明らかにしました。この原因として、密度（塩分）の低い海氷融解水によって作られる強い成層（密度差）の他に、海氷が融解することで放出される物質（鉄分であることが有力）が重要であることも示唆されました。今回見積もられた海氷融解域での純群集生産量の値は、世界で最も顕著な春季ブルームが起こる南大洋氷縁域にも匹敵するもので、オホーツク海の高い生物生産を定量的な指標で示した結果でもあります。

本研究は科学研究費補助金・基盤研究S等（課題番号 17H01157; 20H05707）の助成を受けて実施されました。なお、本研究成果は、2021年3月26日（金）公開のGeophysical Research Letters誌にオンライン掲載されました。

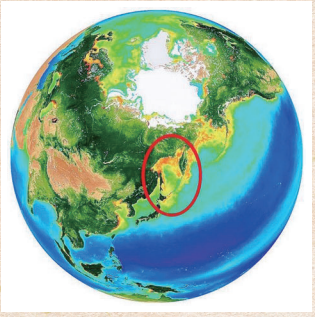
【用語解説】

＊1　プロファイリングフロート … 船舶から投下された後、中層（今回の場合は水深1650m）を漂流し、5-10日サイクルで海面まで自動昇降する漂流型計測器。浮上の際に、水温・塩分・酸素の鉛直プロファイルを計測し、浮上時に位置情報とともに衛星経由でデータを送信する。今回用いたフロートには海氷検知機能が装備され、表層近くの水温が結氷点に近い場合は海氷があると認識し、フロートが海面まで浮上せずに（海氷との衝突による破損を回避し）データを保持したまま再び降下し、次に海面まで浮上した際に保持していたデータをまとめて送信する。

＊2　純群集生産量 … 植物プランクトン増殖などに伴う正味の生物生産量を定量的に見積もる有用な指標。NCPは、総基礎生産量(植物プランクトンが光合成で生産した総有機炭素量)から植物プランクトンとそれ以外の生物（細菌、動物プランクトン等）の呼吸量を引いた「正味の生物生産量」。NCPは一般に有機炭素の増加率（もしくは増加量）[molC/m^{2}day]で示され、酸素増加率から有機炭素の増加率へと変換を行って見積もっている。

【論文発表の概要】

論 文 名：The prominent spring bloom and its relation to sea-ice melt in the Sea of Okhotsk, revealed by profiling floats.（プロファイリングフロートによって明らかになった、オホーツク海での顕著な春季ブルームとその海氷融解との関係）
著者名：岸紗智子[1]、大島慶一郎[1,2]、西岡　純[1,2]、一色倫聡[1,3]、二橋創平[4]、Stephen C. Riser[5]（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 広尾町役場、4 苫小牧工業高等専門学校、5 ワシントン大学）
雑誌名：Geophysical Research Letters（地球物理学の専門誌）
ＤＯＩ：10.1029/2020GL091394
公表日：2021年3月26日（金）（オンライン公開）



北半球の春の海面クロロフィルａ濃度分布。暖色になるほどクロロフィルａ濃度が高い。SeaWiFS より

Press Release

(2021/4/30)

模擬実験で隕石アミノ酸の同位体組成を再現
――小惑星有機物の主要生成反応のひとつが明らかに――

発表者：教授　力石　義人

【研究成果の概要】

隕石に含まれるアミノ酸や糖、核酸塩基などの低分子有機物は、その特異的な炭素同位体組成（^{13}Cの濃縮）から、太陽系外縁部や太陽集積前の極低温環境でできた分子から作られたと考えられてきました。

東北大学大学院理学研究科の古川善博准教授、岩佐義成さん(当時博士課程前期2年)、北海道大学低温科学研究所の力石嘉人教授の研究グループは、隕石に含まれる主要な有機物である不溶性有機物とアミノ酸や糖などの低分子有機物との間に存在する大きな炭素同位体組成の差が、隕石有機物の生成反応の一つとして提案されてきたホルモース型反応によって再現できることを明らかにしました。

本研究の成果によって、小惑星に含まれるアミノ酸や糖などの低分子有機物は、これまで考えられていたよりもはるかに広範囲に分布した一般的な材料から生成されていたことが示されました。

本研究成果は、2021年4月29日に米国科学振興協会（AAAS）が発行する『Science Advances』で公開されます。

【用語解説】

（注）ホルモース型反応アルカリ溶液中でホルムアルデヒドから多種類の糖を合成する反応として1860年代に発見されたホルモース反応を主体とする反応。近年、隕石有機物の生成反応の一つとして、提案された反応。

【論文発表の概要】

論文名：Science Advances

論文タイトル：Synthesis of ^{13}C-enriched amino acids with ^{13}C-depleted insoluble organic matter in a formose-type reaction in the early solar system

著者名：Yoshihiro Furukawa, Yoshinari Iwasa, and Yoshito Chikaraishi

雑誌名：Scientific Reports

ＤＯＩ：10.1126/sciadv.abd3575

はやぶさ２が試料を回収した小惑星
Ryugu©JAXA/ 東大 / 他

(2021/5/6)

SO_2排出削減にもかかわらず硫酸エアロゾル減少が鈍化する 要因を特定
――硫酸の三酸素同位体組成に基づいたフィードバック機構の解明――

発表者：准教授　飯塚　芳徳
助教　的場　澄人

【研究成果の概要】

東京工業大学 物質理工学院応用化学系の服部祥平助教らを中心とする東京工業大学、北海道大学、国立極地研究所、名古屋大学、気象研究所などの研究グループは、北極グリーンランドアイスコア（用語1）の分析から硫酸エアロゾルの生成過程を復元し、1980年以降の二酸化硫黄（SO_2）排出削減にもかかわらず、硫酸エアロゾルの減少が鈍化している要因を解明した。

大気中でSO_2から生成される硫酸エアロゾルは、気候変動や健康影響との関連から重要な物質とされている。SO_2排出量は排出規制の導入により、1980年以降の30年間で約7割削減されたものの、硫酸エアロゾルの減少は5割程度にとどまっている。この減少鈍化のメカニズムが特定されていないことが、効果的な削減策の策定や正確な気候変動予測の足かせとなってきた。

本研究では、北極グリーンランドアイスコア試料を使った硫酸の三酸素同位体組成（$\Delta^{17}O$値）（^{17}Oの異常濃縮、用語2）の分析により過去60年間の大気中の硫酸エアロゾルの生成過程を復元した。その結果、この期間に大気中の酸性度が減少したため、排出されたSO_2から硫酸への酸化反応が促進される「フィードバック機構」が作用していたことがわかった。酸性度の減少は、SO_2削減による酸性物質の減少に加え、施肥などによるアンモニアなどのアルカリ性物質の排出増加によると考えられる。規制対象ではなかったアルカリ性物質の排出が、硫酸エアロゾルの減少鈍化の原因であったという本研究の結果は、今後の効果的な大気汚染の緩和策の策定や、正しい将来の気候変動予測に役立つことが期待される。

本研究成果は、5月5日（米国東部時間）にアメリカ科学振興会（AAAS）のオンライン誌「サイエンスアドバンシズ（Science Advances）」に掲載された。

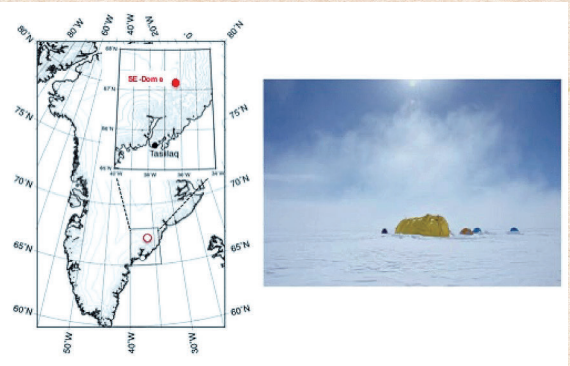
【用語解説】

(1) アイスコア：氷床コアとも呼ばれ、氷河や氷床から取り出された氷の試料のことを指す。一般に地下に向かうにつれて古くなるため、古気候や古環境の研究に用いられる。本研究では、北海道大学低温科学研究所の飯塚芳徳准教授及び的場澄人助教らが2015年に掘削したグリーンランド南東ドームコア（SE-Domeコア）を用いた。このアイスコアは、過去60年間の北米と西ヨーロッパを主な起源とする人為由来エアロゾルの歴史を、世界中のアイスコアの中で最高の年代精度で保存している。

(2) $\Delta^{17}O$ 値：酸素安定同位体組成は一般的に、最も存在量の多い^{16}Oに対する^{17}O、^{18}Oの比率をδ^{17},^{18}O 値（$= {}^{17,18}O/{}^{16}O - 1$）と定義して評価する。さらに大気中のオゾンのように特異的な^{17}Oの濃縮は、質量依存則（$\delta^{17}O = 0.52\times\delta^{18}O$）からのずれとして評価するため、$\Delta^{17}O = \delta^{17}O - 0.52 \times \delta^{18}O$と定義されている。大気中のオゾン（$O_3$）は生成時に$^{17}O$を特異的に濃縮し、$O_3$は$\Delta^{17}O$ = 約25‰という特徴的な値を有する。他方、O_2やH_2Oは^{17}Oを異常濃縮せず、$\Delta^{17}O$ = 0 ‰である。

【論文発表の概要】

雑誌名：Science Advances
論文タイトル：Isotopic evidence for acidity-driven enhancement of sulfate formation after SO_2 emission control
著　者：服部祥平（東京工業大学 物質理工学院応用化学系 助教）飯塚芳徳（北海道大学 低温科学研究所 准教授）Becky Alexander（ワシントン大学 大気科学科 教授）石野咲子（国立極地研究所 日本学術振興会特別研究員 PD）藤田耕史（名古屋大学 環境学研究科 教授）Shuting Zhai（ワシントン大学 大気科学科 博士課程学生）Tomás Sherwen（ヨーク大学 研究員）大島　長（気象庁気象研究所 主任研究官）植村　立（名古屋大学 環境学研究科 准教授）山田明憲（豊島電気製作所）的場澄人（北海道大学 低温科学研究所 助教）鈴木希実（東京工業大学 物質理工学院応用化学系 研究員（研究当時））鶴田明日香（東京工業大学 物質理工学院応用化学系 修士課程学生（研究当時））Joel Savarino（グルノーブルアルプス大学 主任研究員）吉田尚弘（東京工業大学 物質理工学院 教授（研究当時）、地球生命研究所 特任教授）
掲載巻・号・年：Vol.7, Issue 19, 2021
ＤＯＩ：10.1126/sciadv.abd4610



アイスコア掘削地点と現地の写真

AWARD

波多　俊太郎

雪氷研究大会2020オンライン 学生優秀発表賞 ポスター発表部門 優秀発表賞
（令和2年11月18日受賞）

装置開発室及び先端技術支援室

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
（令和3年2月19日受賞）

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
（令和3年2月19日受賞）

木村　勇気

風戸研究奨励会「風戸賞」
（令和3年3月6日受賞）

飯塚　芳徳

令和3年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門
（令和3年4月14日受賞）

宮崎　彩音

北海道大学大学院理学院 優秀研究奨励賞
（令和3年4月30日）

石橋　篤季

第76回年次大会 (2021年) 日本物理学会学生優秀発表賞
（令和3年5月7日受賞）

北島　謙生

第22回原子衝突学会若手奨励賞
（令和3年5月8日受賞）

■共同研究・研究集会採択課題

令和3年度北海道低温科学研究所共同研究・研究集会は、令和2年12月1日から令和3年1月15日まで公募を行い、審査の結果、下記の課題を採択いたしました。

なお、研究代表者の職名は原則として申請時のものといたしましたことをご容赦願います。

Ⅰ．開拓型研究（採択件数 3 件）

氏名	所属	職名	タイトル
砂川玄志郎	理化学研究所 生命機能科学研究センター	上級研究員	哺乳類の冬眠と休眠に共通する機構の探索
渡邉　友浩	北大低温研	助　教	低温水層における真の微生物機能の追究
長尾　誠也	金沢大学環日本海域研究センター	教　授	陸海結合システム: 沿岸域の生物生産特性を制御する栄養物質のストイキオメトリー

Ⅱ．研究集会（採択件数 11 件）

氏名	所属	職名	タイトル
植田　宏昭	筑波大学生命環境系	教　授	熱帯・中高緯度結合系の視座に立った環オホーツク大気・海洋システム研究の新たな展開
内田　　努	北海道大学大学院工学研究院	准教授	氷・水・クラスレートの物理化学に関する研究集会
遠藤　貴洋	九州大学応用力学研究所	准教授	縁辺海と外洋とを繋ぐ対馬暖流系の物理・化学・生物過程
佐崎　　元	北大低温研	教　授	結晶表面・界面での成長カイネティクスの理論とその場観察
志水　泰武	岐阜大学応用生物科学部	教　授	哺乳類の冬眠・休眠現象の理解
隅田　明洋	京都府立大学生命環境科学研究科	教　授	「樹木の生態に対するシンクベースの生理的機序からの探求 III」
田村　岳史	国立極地研究所	准教授	南極海洋 - 海氷 - 氷床システムの相互作用と変動
力石　嘉人	北大低温研	教　授	海洋生物の低温での実験飼育法に関する研究集会
野原　精一	国立環境研究所	シニア 研究員	雪氷の生態学(15)高地・寒冷地生態系への温暖化影響
服部　祥平	東京工業大学物質理工学院	助　教	グリーンランド南東ドーム第2期アイスコアに関する研究集会
渡部　直樹	北大低温研	教　授	星間物質ワークショップ2021

Ⅲ．一般共同研究（採択件数 37 件）

氏名	所属	職名	タイトル
伊川　浩樹	農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター	主任研究員	耕地生態系と大気環境の相互作用の解明
石川　雅也	東京大学大学院農学生命科学研究科	特任研究員	植物由来の新規氷核活性物質の氷晶形成機構の解析
泉　　洋平	島根大学生物資源科学部	准教授	凍結耐性鱗翅目昆虫における体液の氷結晶成長抑制に関する研究
伊藤　優人	海洋研究開発機構	ポストドクトラル研究員	海氷による藻類の取り込み過程に着目した海氷試料の分析および解析
大久保祐作	データサイエンス共同利用基盤研究施設 データ同化研究支援センター	特任研究員	小標本種間系統比較法による小型哺乳類の寒冷地適応機構の解明
大島　　泰	国立天文台	助　教	グリーンランド氷床からの超広視野サブミリ波宇宙探査観測の実現

大野　浩	北見工業大学	准教授	世界自然遺産知床山岳域における地温測定による永久凍土探査
大場　康弘	北大低温研	准教授	超微量有機物の化学分析拠点の構築
梶田　展人	国立極地研究所	JSPS特別研究員	「千葉セクション」から始める房総半島のバイオマーカー古環境研究
金子　文俊	大阪大学理学研究科	准教授	昆虫体表脂質構造の温度依存性と物性に関する研究
金子　雅紀	産学技術総合研究所 地圏資源環境研究部門	主任研究員	Black Seaから採取した嫌気的メタン酸化アーキアの膜脂質水素同位体組成
北島　謙生	北大低温研	博士研究員	低温アモルファスH2S固体における陽子空孔移動の解明
木田新一郎	九州大学応用力学研究所	准教授	ドローン空撮と船舶を用いた河川フロントの海面・海中の同時観測
久保　響子	鶴岡工業高等専門学校	助　教	寒冷地における石油系炭化水素分解光合成細菌の探索
斉藤　和之	海洋研究開発機構	主任研究員	南半球陸域における凍土状況と気候の変動
佐藤壮一郎	京都府立大学生命環境科学研究科	講　師	冬季の常緑樹における光合成関連遺伝子の発現制御機構の解明に向けて
澤田　結基	福山市立大学	准教授	山岳永久凍土の下限高度付近に発達する地下氷の観測手法の確立
重信　秀治	基礎生物学研究所	教　授	昆虫休眠と哺乳類冬眠の統合的理解
下西　隆	新潟大学研究推進機構	助　教	ホスフィンと有機分子を含む星間氷の光化学反応実験
杉本　敏樹	分子科学研究所	准教授	星間塵表面におけるオルソ / パラ比の決定機構の解明
鈴木　良尚	徳島大学大学院 社会産業理工学研究部	准教授	異種分子存在下での結晶成長界面の分子取り込みメカニズムの解明
高崎　和之	東京都立産業技術高等専門学校	准教授	民生用重量計を利用した積雪重量自動計測システムの機能向上に関する検討
高橋　庸哉	北海道教育大学札幌校	名誉教授	大気中で適用し得る雪結晶の形と成長条件ダイアグラムの確立（鉛直過冷却雲風洞実験）
竹腰　達哉	北見工業大学	助　教	ミリ波サブミリ波分光撮像観測に基づく星間物質進化の研究
中川　達功	日本大学生物資源科学部	准教授	寒冷域アマモ根圏における窒素硫黄循環系マイクロバイオーム解析
中野渡拓也	水産研究・教育機構 水産資源研究所	主任研究員	オホーツク海における高解像度海氷・海洋低次生態系モデル開発研究
中村　和樹	日本大学工学部	准教授	東南極における定着氷・棚氷による氷河流動の抑制
西村　尚之	群馬大学社会情報学部	教　授	北方林の更新維持機構の生態学的・遺伝学的解析
庭野　匡思	気象庁気象研究所	主任研究官	札幌の積雪中に含まれる光吸収性不純物の起源と融雪への寄与の定量化
布浦　拓郎	海洋研究開発機構	センター長代理	環境微生物における新規炭素中央代謝・アミノ酸生合成経路の探索
野口　航	東京薬科大学生命科学部	教　授	落葉樹林の林床の常緑草本の葉における低温ストレスへの光合成系の保護機構の解明
野村　大樹	北大北方生物圏フィールド科学センター	准教授	南極の海氷および氷河の融解が海洋炭酸系に与える影響の評価
濱田　篤	富山大学学術研究部	准教授	雪崩災害予測のための降雪粒子自動観測および気象モデルとの比較
藤田　耕史	名古屋大学環境学研究科	教　授	ヒマラヤのアイスコア分析による鉱物粒子沈着量と大気循環の変動復元
堀　彰	北見工業大学	准教授	グリーンランド南東ドーム浅層コアの密度プロファイルに基づく年代推定
本同　宏成	静岡県立大学食品栄養学部	准教授	油脂結晶の水および液状油に対する濡れ性制御
八島　未和	千葉大学園芸学研究科	講　師	寒冷湿地泥炭土壌中の温室効果ガス発生と関連微生物活性

NEWS

■人事異動（令和2年10月2日から令和3年4月1日まで）

異動日	異動内容	氏　名	職　名	備　考
R2.12. 1	昇　任	大場　康弘	准教授	
R3. 1. 1	採　用	山下　純平	技術職員	
R3. 2.15	退　職	鷹野　真也	学術研究員	
R3. 3.12	退　職	田原佑衣子	技術補助員	
R3. 3.31	任期満了	原　登志彦	特任教授	
R3. 3.31	任期満了	平野　大輔	助　教	
R3. 3.31	任期満了	石井　吉之	特任助教	
R3. 3.31	任期満了	三浦　　彩	博士研究員	
R3. 3.31	任期満了	湯原　綾子	事務補助員	
R3. 4. 1	昇　任	田中　亮一	教　授	
R3. 4. 1	採　用	山﨑　智也	特任助教	
R3. 4. 1	採　用	久賀みづき	博士研究員	
R3. 4. 1	採　用	新家　寛正	非常勤研究員	
R3. 4. 1	採　用	立花　英里	技術補助員	
R3. 4. 1	転　出	中田　雄二	事務長	北キャンパス合同事務部へ
R3. 4. 1	転　出	安藤　優記	一般職員	国際部国際連携課へ （日本学術振興会研修生）
R3. 4. 1	転　入	伊藤　美香	事務長	医学系事務部総務課から
R3. 4. 1	採　用	石田　萌可	一般職員	
R3. 4. 1	採　用	菅原　路子	事務補助員	

編❄集❄後❄記

▶低温研ニュースでは、一般の方や分野外の方が各分野の最先端研究の内容を少しでも理解する助けになる記事を載せようと、皆さんにご協力頂いています。引き続きよろしくお願いいたします。（山口）

▶制約の多い日々が続きますが、職員一同、地道に研鑽に励んでいます。今号も最新の成果をお届けすることができました。（渡辺）

▶表紙の写真は、氷が螺旋状に一分子ステップずつ成長している様子をとらえたものだそうです。自然の中に見られる幾何学的な美しさをお楽しみください。（日高）

▶詳しく知っている人にとってもそうでない人にとっても、読むと新たな発見があるようなものを目指しました。どうぞお楽しみ下さい！（滝沢）

▶「北」から「南」まで寒冷圏での研究が広く紹介されております。是非ご覧ください。（総務担当）

低温研ニュース第51号

（北海道大学低温科学研究所広報誌）

発行人：低温科学研究所所長

編　集：低温研広報委員会

（山口　良文、渡辺　力、滝沢　侑子、日髙　宏、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。
http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/newsletter.html