低温研ニュース

ILTS

2020年12月
No.50

ケープダンレー沖での変わった氷山
（撮影：小野数也 2020年2月）

Research

顕微鏡でみる、ミクロな水中の世界
（木村　勇気）……2

気候状態と気候の安定性の理解
（関　宰）……5

培養による嫌気性ヒ素酸化細菌の探索
（小島　久弥）……9

People

隅田　明洋……12

Press Release／News

北海道大学低温科学研究所
http://www.lowtem.hokudai.ac.jp

顕微鏡でみる、ミクロな水中の世界

共同研究推進部（雪氷新領域部門）　木村　勇気

素朴な疑問

『誰も見たことのない現象を見たい』、『皆が無意識のうちに当たり前だと思っていることの真実を突き止めたい』、『世の中に新しい難題を突き付けたい』。このような思いで約 20 年の研究生活を送ってきました。例えば氷の入った冷たい水（お冷、図 1）。水に氷を入れると、氷はどんどんと融けていきます。融けていく氷の表面に思いを馳せてみて下さい。氷の中で規則正しく並んでいた水分子は、氷の表面から自由に動き回れる水中へと拡散していく様子を思い描けます。この時、氷と水の境界はどのようになっているのでしょうか。氷は常に融けるだけで、成長することはないのでしょうか？水と氷は明確に線引きでき、そのどちらでもない水分子は存在しないのでしょうか？やがて、水と氷の平衡温度である 0℃になると、氷はそれ以上融けることなく（外気温が 0℃であれば）安定に水上に浮かびます。一般的に、平衡状態では氷と水の界面で水分子はその間を行ったり来たりしていると考えられます。この時、どのくらいの水分子が行き来しているのでしょうか？氷の表面から離れた水中で、新しい氷ができることはないのでしょうか？食事を待つ間、お冷を飲みながら考えてみて下さい。疑問が次から次へと湧いてくることと思います。食後には、コーヒーや紅茶を飲みながらまた新たな疑問が湧いてきます。入れた砂糖は一方的に溶けていくだけだろうか？我々は顕微鏡を用いたその場観察を元に、このような素朴な疑問に迫っています。ここでは、我々が捉えたいくつかの例を紹介します。

図 1　お冷

新しい水を発見

一般的な物質では、その液体の密度は温度に対して線形に変化します。これに対して、水の密度は、温度の低下と共に大きくなっていき、4℃で最大となった後、0℃に向かってまた小さくなっていきます。4℃の水は 0℃の水よりも重いことは、氷水をストローで飲むときに、上の方から飲む方が下の方から飲むよりも冷たいことで実感できます。この密度の非線形性は、水には高密度の水と低密度の水があり、それらが混ざり合っていることで説明できますが、いまだに明確な証拠は得られていません。最近、東北大学の新家先生との共同研究で、高圧セル内で作った氷 III[1]* と周りを囲む水との界面に、高密度の水が存在することを発見しました（図 2；16 ページを参照）。この高密度の水は、氷 III が成長や融解する際にマイクロメートルスケールの厚さにまで達しました。これまで、分子動力学計算などから氷と水の界面にはナノメートルスケールの遷移層があると考えられていましたが、我々の観察結果は、その遷移層とは異なる水が従来の考えより三桁も大きな厚みで存在することが分かりました。さらに、混ざり合わない二種類の液体の共

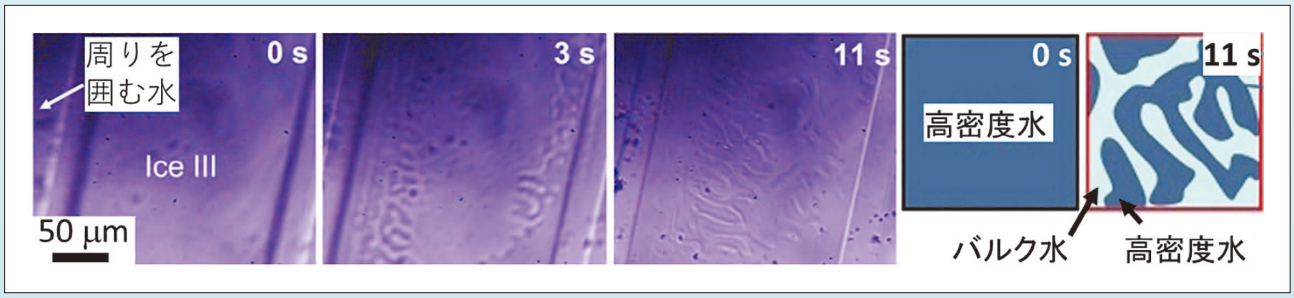


図 2　水 - 氷 III 界面において、混ざり合わない 2 種類の液体の共存を示す両連続的パターンの形成を捉えた光学顕微鏡像。氷 III の成長が止まると（0 秒）界面に存在した高密度水がバルク水へと戻り、その過程で両連続パターンが見られた（3-11 秒）。右は 0 秒と 11 秒の氷表面の一部を示した模式図。（Niinomi *et al. J. Phys. Chem. Lett*. 2020, 11, 6779 を改編）

存を示す両連続的パターンも見られました（図2）。つまり、高密度の水は、周りを囲む水とは明確に区別できる異なる液体でした。冒頭の疑問に挙げた、我々が知っている水や氷のどちらとも異なる新しい水は存在していたのです。今回観察した氷 III は密度が大きいために、水が凍ったり融けたりする際に高密度水を中間相として経由するのかもしれません。お冷に浮かぶ密度の小さな氷と水の界面にも、異なる密度の新しい水が存在しているかもしれません。

平衡状態の揺らぎを観る

我々は、誰も見たことのない現象を観察するために、透過型電子顕微鏡[2]*を駆使しています。特に、近年は液体試料の観察に取り組んでいます。この顕微鏡は、光の代わりに電子を使って観察するために、電子の通り道は高真空に保つ必要があります。そのために、真空中で蒸発してしまう水を含んだ試料は観察できませんでした。そこで、水の代わりに溶媒としてイオン液体[3]*を使って塩が溶ける様子を観察しました。イオン液体は、蒸気圧が非常に小さく、電気伝導性もあり、室温で液体であるなど、電子顕微鏡観察に適した特性を持っています。ここに 80℃で飽和するように塩（塩素酸ナトリウム）を溶解しました。室温に冷ました溶液を透過型電子顕微鏡で観察した所、イオン液体に浮かぶ塩の小さな結晶が観察できました。その表面では塩の分子が固体と液体の間を行ったり来たりしていると思いますが、残念ながらその現象を明確に捉えることはできませんでした。分子の動きを活発にしてやれば観察できるのではないかと考え、溶液を 60℃まで加熱して平衡状態を観察すると、結晶は溶解と析出を繰り返したり、大きさが変化したりとダイナミックな動きをしている様子が見られました（図3）。さらに、電子回折パターンを取得して結晶構造を調べると、室温の時に存在していた安定結晶だけでなく、準安定結晶[4]*も同時に生成していることが分かりました。この時、それぞれの成長速度は同程度でしたが、溶解速度は準安定結晶の方が大きく（緑の矢じり）、また準安定結晶は安定結晶に接触すると、瞬く間に取り込まれました。お冷に浮かぶ氷も大きくなったり、小さくなったりしているのかもしれません。

水溶液中の現象を透過型電子顕微鏡でみる

最近は、薄い非晶質窒化シリコンの膜で溶液を挟むことで、試料を真空に晒すことなく透過型電子顕微鏡観察を行える手法の開発と応用に取り組んでいます。この手法で、構成要素として水分子が無くてはならないタンパク質の結晶や、水和反応が鍵となるセメントの固化反応過程などを観察する中で、今までの常識を覆すことができるようになってきました。例えば、大阪大学の荻先生

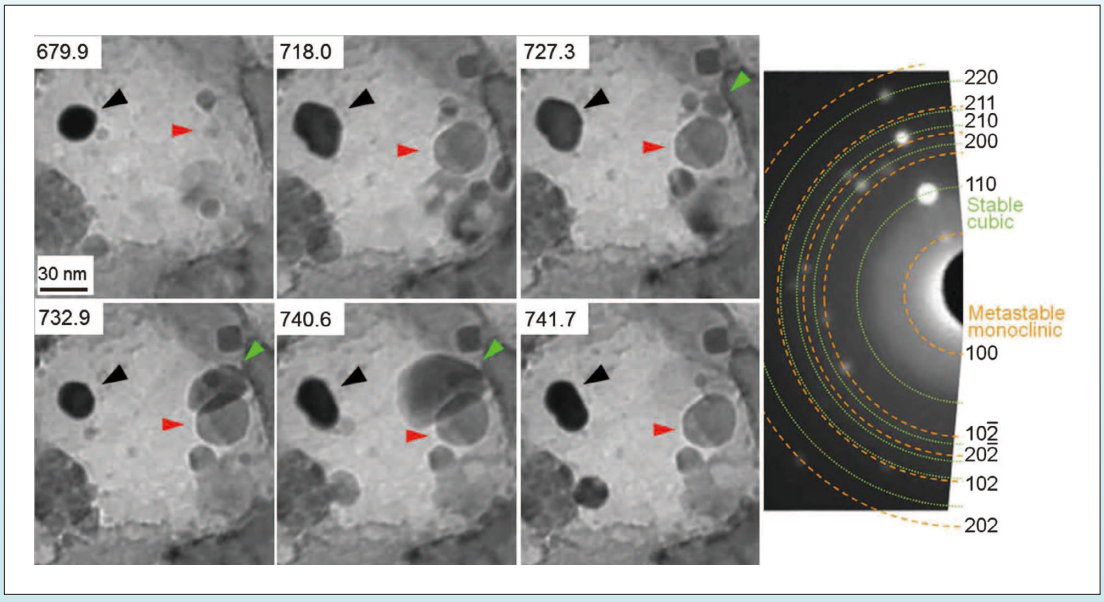


図3　イオン液体溶液中の塩素酸ナトリウム微結晶の核生成と溶解過程をその場観察した透過型電子顕微鏡像と電子回折パターン。60℃の平衡状態において、矢印で示すように、溶解と析出を繰り返したり、サイズの増減が起こったりした。回折パターンは、安定結晶だけでなく、準安定結晶の出現も示している。（Kimura *et al., J. Am. Chem. Soc*. 2014, 136, 1762 を改編）

と一緒に行った実験では、未飽和の水溶液中でも、イオン液体中で見られたのと同様に塩（塩化ナトリウム）の析出、溶解過程が見られました（図 4）。この研究の目的は、アルツハイマー病の原因となるアミロイドβタンパク質の凝集体が生成するメカニズムを突き止めることにありました。実は、析出した塩の表面にアミロイドβが集まり、溶解する時に 1 点に集まることで凝集体が作られることが分かりました（15 ページ図 1 を参照）。コーヒーや紅茶を飲みながら思いを巡らせていた溶解や、析出の揺らぎは、私たちの体の中でも頻繁に起こっているようです。

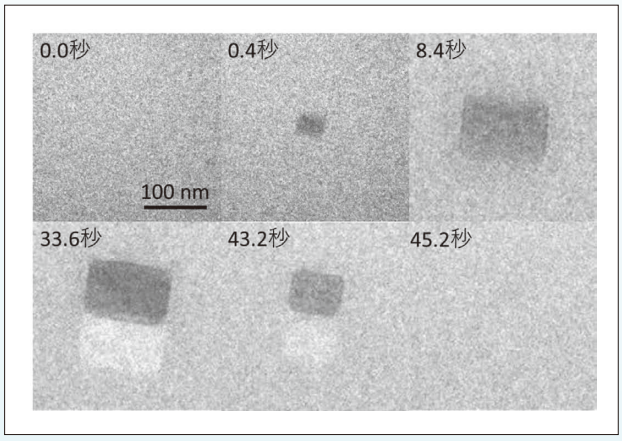


図 4　温度一定の定常状態で、未飽和水溶液から析出、溶解する塩の結晶の透過型電子顕微鏡像。33.6 秒と 43.2 秒に結晶に特有の白い影が見られる。（Nakajima *et al. J. Phys. Chem. Lett*. 2020, 11, 6176 を改編）

今後の期待

現在は、透過型電子顕微鏡中でお冷を観察するための準備を進めています。水の中に浮かぶナノメートルスケールの氷の振る舞いを明らかにしていくことで、冷凍技術や環境問題、寒冷地での生命の生存戦略、氷天体での化学進化など、多分野に貢献できると期待しています。

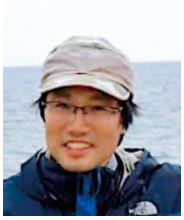
語句説明

1＊　氷 III：水分子の並び方の異なる 15 種類の氷のうちの一つ。お冷の氷は Ih。氷 III は高圧低温領域で安定。

2＊　透過型電子顕微鏡：光学顕微鏡が可視光（およそ 380-780 nm）を用いて観察するのに対して、波長の短い電子（～ 10^{-3} nm 程度）を用いて観察することで高い空間分解能を得られる顕微鏡。

3＊　イオン液体：塩（NaCl）と同様にカチオンとアニオンの組み合わせからなり、その組み合わせの違う 1,000 種類以上のイオン液体が知られている。ここでは、臭化 1,3 - ジアリルイミダゾリウム（$C_9H_{13}BrN_2$）を用いた。

4＊　準安定結晶：結晶が置かれた環境において、時間と共に安定結晶へと変化する結晶。例えば、チョコレートは口内で溶けやすくするために、準安定結晶として製品化している。一度溶けたり長期間保管したりすると、チョコレートは安定結晶になり、口溶けが悪くなることがある。



気候状態と気候の安定性の理解

水・物質循環部門　関　宰

私の研究テーマは地球の気候システム（脚注参照）をより深く理解することです。気候システムがどのようなからくりで動いており、全球的な気候変動をどのように制御しているのかを明らかにするために日々研究を行っています。特に近年は将来予測という観点から、今より温暖化した気候状態における気候システムの振る舞いを解明することに焦点を当てています。今回は、その研究の意義の説明にやや重点をおいて私の研究の話をしたいと思います。

温暖化という「完全問題」

人間活動に伴う温室効果ガス（二酸化炭素など）濃度の増大による気候変動（温暖化）の可能性が初めて叫ばれてから 30 年以上が経過し、今や温暖化による環境の変化（異常気象の発生頻度の増加など）は現実のものとして顕在化するまでに進行したように感じます。ここにきてようやく温暖化は若い世代を中心に人類が抱えるグローバルな問題におけるトップイシューの１つとして認識されるまでになったように思います。

現在の人類の繁栄は自然資源の収奪による温室効果ガス濃度の増大、そしてそれにともなう地球温暖化によって未来を犠牲にすることで成り立っているといえます。これは、地球温暖化が引き起こされるタイミングと、その原因となる行為がおこなわれるタイミングが大きく乖離しているため、地球温暖化が引き起こされる危機を回避するための対策を実行に移すのが難しいことに起因します。そのため、地球温暖化問題はしばしば「完全な問題」と言われます。これは解決するのが非常に困難な問題であるという意味です。人間は現在直面している危機に反応するようになっており、逆に具体的でなく、実際に直面するのがかなり先になるような危機には、例えそれがとてつもなく甚大なものであると認識していてもなかなか非常ベルが作動しないのです。

温暖化が引き起こす被害というと海水準の上昇や、生態系の撹乱、前述した異常気象（豪雨、干ばつ、台風やハリケーン）の多発などを多くの方はイメージされるのではないでしょうか。こうした現象が温暖化の進行とともにより深刻になっていき、それに伴う社会的混乱（食料・水をめぐる争いや移民の増加）が発生する可能性が高まるという話を、みなさんもどこかで聞いたことがあるかと思います。しかし、未来で起きることがこうした予測の範囲に留まるなら、まだ良い方かもしれません。温暖化によって気候が現在とは異なる状態に移行することで、現在の人類の繁栄を根本から揺るがす事態が起こる可能性があるからです。

「安定」というゆりかごの中で

では、現在地上の盟主として君臨するまでに至った人類の繁栄の基盤とはなんでしょうか？それは「農業革命」です。我々が有史以来の絶え間ない発展により高度な科学文明を築けたのは、農業革命による生産効率の飛躍的な向上で得た余剰時間を、他の活動に使えたことが決定的な要因と考えられています。現代の娯楽や高度な医療などは全て、生産効率の向上によってもたらされる余剰時間と、社会的分業によって生まれたのです。しかし、現代の高度に発達した農業は安定な気候に最も適応したシステムであるため、気候の不安定化に対して極めて脆弱です。有史以来の継続的な文明の発展という世代を超えて受けつがれてきた偉業は「比較的安定な気候」という条件の上に成り立ってきたのです。ここで、過去の気

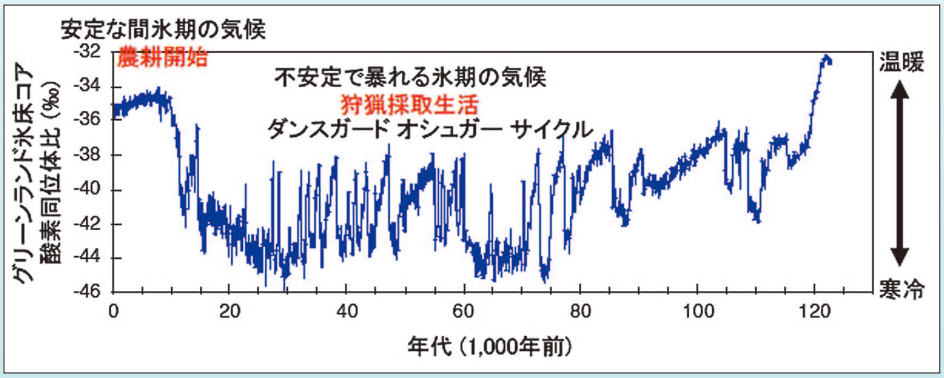


図 1　過去 12 万年間のグリーンランド氷床コアの酸素同位体比記録の変動（NGRIP members, 2004）。氷床コアの酸素同位体比は気温の変動を示している。

候変動を見てみましょう。図１にグリーンランド氷床コアの分析から得られた過去約 12 万年間の北半球高緯度の気候変動を示しています。人類が狩猟採取生活をしていた時期と、農耕が開始された時期も併せて示してあります。人類は長い間狩猟採取生活を営んできましたが、約１万年前あたりから農耕を開始しました。注目すべき点は、農耕が開始される以前の狩猟採取生活時代（氷期）は、気温が相対的に低かっただけでなく、気候が極めて不安定であったのに対し、農耕開始以降の気候は比較的温暖だっただけでなく、農耕に適した非常に安定した状態が維持されてきたことです。このように、我々の文明は、繰り返される氷期と間氷期（比較的温暖な時期）のサイクルの中の「例外的に温暖で安定な気候」というゆりかごの中で育まれてきたのです。

悪夢の氷期

氷期において見られる急激な気候変動の繰り返しは「ダンスガード・オシュガー・サイクル（DO サイクル）」と呼ばれ、その影響は全世界にわたっていたことが明らかになっています。寒冷な状態から温暖な状態への移行（ジャンプ）は、最速ではたったの数年で起こったとされており、それに伴うグリーンランドの気温変化は 10℃に及ぶと推定されています。産業革命以降の北極圏の温暖化に伴う気温変化が 150 年かけて 2.5℃程度であることを考えると、そのスピードと変動の大きさが、いかに桁違いであったのかがわかります。もしこのような気候の突然のジャンプがいま起こったら、安定な気候を前提とする我々の文明はひとたまりもないでしょう。我々は気候が安定であることから、計り知れない恩恵を受けてきたのです。

一瞬で世界を変えてしまうトリック

地球の気候は突然劇的に変わりうることを示した DO サイクルの発見は、気候変動の研究における最大の成果の１つといえます。また、この成果は「地球の気候システムは、条件さえ揃えばこのような変動を再び引き起こすことができる」ことを示していますが、果たしてそれはどのような条件、メカニズムで発動するのでしょう？DO サイクルは、大西洋の南北方向に存在する子午面循環（脚注参照）のオン／オフのスイッチが突然切り替わることで引き起こされると考えられています。現在はこの循環が比較的活発で、低緯度の熱が効率的に北大西洋高緯度まで輸送されているため、欧州は高緯度のわりに温暖湿潤な気候となっています。しかしこの循環が突然鈍化すると、低緯度からの熱の輸送が南半球にももたらされ、北半球では寒冷化が、南半球では温暖化が引き起こされます。では何が引き金となって子午面循環のスイッチが突然切り替わるのでしょう？それは海洋と氷床の相互作用が鍵を握ります。この子午面循環の原動力は表層海水の密度の変動ですので、淡水の供給によって表層水の密度の低下が閾値を超えると突然停止してしまいます。氷期には巨大な氷床が北米大陸に発達していましたが、その氷床の崩壊と大西洋への流出が繰り返し発生していたことが知られています。そのため、DO サイクルは氷床崩壊による淡水の供給が引き起こす子午面循環の停止と突然の回復（時が経つにつれて次第に表層塩分が上昇し、塩分の上昇が閾値を超えると子午面循環が突然回復する）というメカニズムで発生したという仮説が有力です。このように、一瞬で気候を塗り変えることのできる氷床は、気候システムにおいても極めて特異的な存在といえます。

安定と不安定を分かつ条件

「氷期に気候が不安定な状態に陥っていたのは、子午面循環を撹乱させる巨大氷床が北半球に存在していたから」という説が有力ですが、話はそう単純ではないこともわかってきました。子午面循環のスイッチが切り替わるかどうかは、ちょっとした条件の違いによることが最近の研究によって明らかになってきました。実は氷期でも最も寒い気候状態に達してしまえば、現在と同じように「比較的安定な状態」になります（図２）。実際に、DO サイクルは氷期の最寒期と現在の間氷期のちょうど中間状態のときにのみ発動していました（図２）。この中間的な気候状態であるからこそ、大西洋の子午面循環は海洋表層のわずかな塩分の撹乱に対して敏感に応答するようです。さらに、安定か不安定かを決める要因として、巨大な氷床の存在だけでなく、全球平均気温と二酸化炭素濃度のレベルが重要であることもわかってきました。つまり、気候の安定性は気候状態に依存するのです。

眠れる獅子の目覚め

気候の安定性は気候状態に依存するという発見は、未来の気候変動の予測において深刻な懸念を突きつけます。なぜならば、現在よりも温暖化した未来で安定した

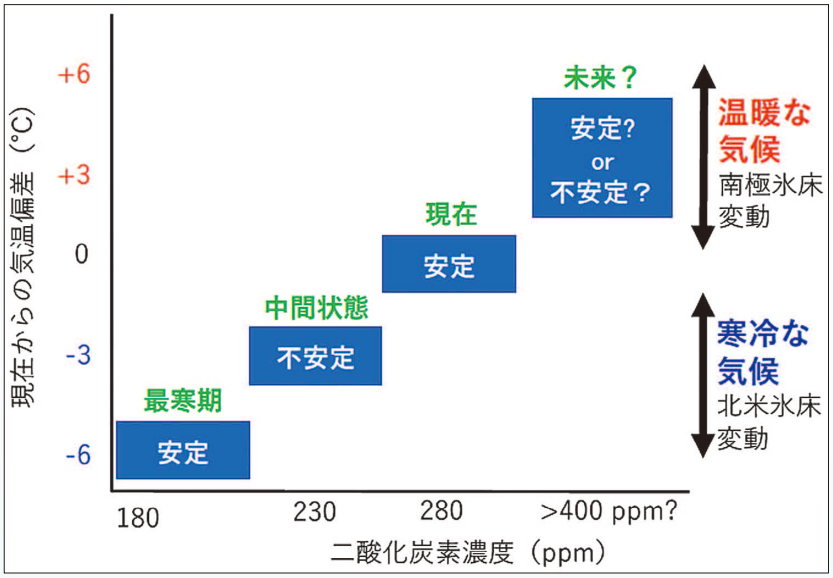


図２　現在より寒冷な気候状態（氷期など）からより温暖な気候状態にかけての全球平均気温（現在からの偏差）と二酸化炭素濃度、地球の気候の安定性との対応関係。図の右側には氷期とより温暖な気候状態で変動する氷床を示してある。

気候が訪れることが約束されないからです（図２）。ここでみなさんは「氷期の DO サイクルの要因となった北米大陸の巨大氷床が今は存在しないので、気温や二酸化炭素濃度が現在より上昇したとしても、氷期の悪夢が再び引き起こされる可能性は低い」と思うかもしれません。しかしながら、それは楽観的な考えといわざるを得ません。なぜなら、海洋表層の塩分を撹乱できるほどの巨大な淡水の塊（氷床）は、南極にも存在しているからです。そしてこの南極氷床は、現在よりも温暖な気候状態でいよいよ大規模な融解をはじめる可能性が高いのです。事実、現在よりもたった1℃温暖と言われている１つ前の間氷期（最終間氷期：12-13 万年前）では、西南極氷床の大部分が融解していたとされています（図３）。さらに、現在よりも３℃温暖であった鮮新世（300-450 万年前）には、東南極氷床の一部も著しく後退し、現在よりも５℃温暖な中期中新世（1500-1700 万年前）では東南極氷床がさらに著しく後退していたと考えられています（図３）。現在よりも寒冷な氷期は、北半球氷床がダイナミックに変動する世界でしたが、現在よりも温暖な気候状態に突入すると、今度は南極氷床がダイナミックに変動する世界に移行するのです。まさに眠れる獅子の目覚めです。

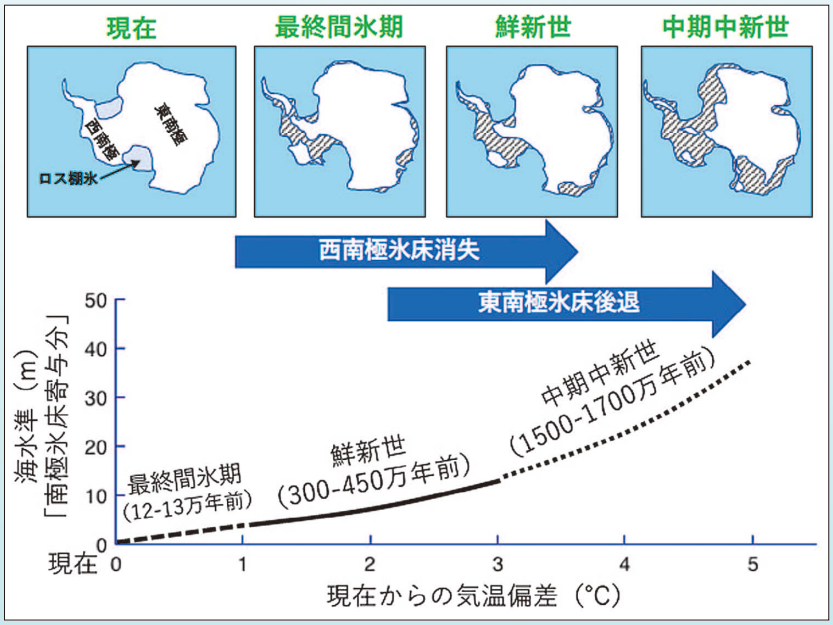


図３　過去の温暖期の南極氷床分布と全球平均気温（現在からの偏差）、海面上昇（南極氷床寄与分）の対応関係。

たったひとつの方法

実際に、現在、南極氷床の融解が加速していることが近年の観測によって明らかにされています。もしこのまま温暖化が進行した場合、南極氷床の融解がさらに加速して、やがて海洋循環を撹乱させるほどの影響を及ぼす規模の氷床の崩壊が起きるのでしょうか？その結果、かつて氷期を席巻した DO サイクルのような世界規模の急激な気候ジャンプが引き起こされるのでしょうか？また、もし引き起こされるとしたら、その発動条件となる気温、二酸化炭素濃度レベルの臨界点はどこなのでしょうか？

こうした問いに答えることは、今という時代に生き、温室効果ガス濃度の増大を引き起こしてしまった我々の責務だと私は考えています。ではどのような方法であれば、答えに迫ることができるのでしょうか？残念ながら現在の観測を突き詰めていっても、答えに辿り着けそうにありません。なぜなら現在の観測からでは現在起こっている現象に関する知見しか得られないからです。また、

気候変動に対する氷床の応答の本質を理解するには、少なくとも千年以上の長期的な振る舞いを理解する必要があり、これは現在の観測で扱える時間スケールを遥かに超えています。温暖な気候状態で起こり得ることに関する知見を得るには、結局、現在よりも温暖であった気候状態を調べるしかないのです。つまり、たったひとつの方法とは過去の温暖期の研究をすることです。

過去へのタイムマシン

幸運なことに、地球の歴史を振り返ると、現在よりも温暖な時代がいくつも存在していたことがわかっています。当時の短周期の気候変動を詳細に調べれば、温暖な気候状態で劇的な気候ジャンプが発動しうるかどうかを検証することができると期待されます。過去の気候変動は、海底や湖沼堆積物、氷床などに記録されています。いわばこれらは地球の過去を覗くことのできるタイムマシンといえます。私の研究はそれらの柱状試料を採取し、その物性や化学的特徴を分析し、過去の環境変動を復元することからはじまります。これまでの研究によって、過去の環境を間接的に復元する手法（代理指標）が提案されており、気候システムを構成する要素や温度・降水量・二酸化炭素濃度などの変動を復元することができるようになってきました。こうして世界各地から得た時系列データを統合的に解析することで、気候システムがどのように働き、地球の気候が制御されているのかを調べます。このような方法で、今までに、氷期が現在よりも寒かったことや、その原因、また DO サイクルの存在とその駆動メカニズムなどが多くの研究者によって明らかにされてきました。私も同様に、世界各地から得られた試料を用いて、現在の間氷期や氷期、鮮新世など様々な時代における気候変動を研究してきました。例えば、海底堆積物から氷期における海水温度変動を高解像度で復元して、北大西洋が発信源とされる DO サイクルの影響が、遠く北東太平洋にも及んでいたことを突き止めました。また、現在よりも温暖な気候状態に関する研究では、二酸化炭素濃度を代理指標とした分析から、鮮新世において二酸化炭素濃度が産業革命前よりもわずかに高かったことなどを明らかにし、気温と二酸化炭素濃度の密接な関係を示しました。

過去の温暖期へ

しかしながら、DO サイクルに類する急激かつ短期間の気候変動を捉えることができるほど十分な時間解像度の気候変動の復元は、現在よりも温暖な時代では全くなされていません。つまり、我々は現時点では温暖な気候状態における気候の安定性に関する知見をほとんど持ち合わせていないのです。私はこれまで、様々な時代の気候変動の研究をしてきましたが、ここにきて、現在より温暖な気候状態における短周期の気候変動の研究に全力を注ぐべきであるという結論にようやくたどり着きました。そこは全く未開の領域であり、ほぼゼロからのスタートとなります。今より温暖な気候状態における気候の安定性を検証するうえで真っ先に取り組むべきは、気候ジャンプの起爆剤となりうる南極氷床のダイナミクスの理解だと考えられます。私は現在、最終間氷期（＋１℃）から始まり、鮮新世（～＋３℃）や中期中新世（～＋５℃）における南極氷床や表層温度、二酸化炭素濃度の変動などを、DO サイクルに類似した短周期の気候変動を捉えることのできる時間解像度で海底堆積物から復元し、解析を行っているところです。まだ解析中ではありますが、鮮新世と中新世の温暖期において DO サイクルとほぼ同じ周期で氷床の融解が何度も繰り返されていたことを示す証拠が得られつつあります。はたして温暖な気候状態で気候システムは安定性を保つのか？それともその凶暴な一面を現すことで激しく荒れ狂うのか？その答えを導くための研究は始まったばかりです。

最後になりますが、本稿に対して適切なコメントを頂いた広報委員の皆様（山口教授、大場准教授、滝沢助教）に深く感謝いたします。

気候システム：気候を決める要素の総称。地球の気候システムは大気、海洋、氷、地表、植生などによって構成されていると考えられている。この気候システムに強制力（二酸化炭素濃度や日射量の変化など）が加えられるとこれらの要素が複雑に相互作用し、それぞれの要素が変化することで気候が別の状態に移行します。

大西洋子午面循環：大西洋における緯度方向の海洋大循環のことで、この循環により温度や塩分が異なる海水が南北に移動している。現在、表層では北向きに流れているが高緯度で沈みこみ、深層では南向きの流れになっている。

培養による嫌気性ヒ素酸化細菌の探索

生物環境部門　小島　久弥

ヒ素を利用する微生物たち

ヒ素は地球表層付近に広く分布する元素で、主に土壌や岩石中に含まれています。単体のヒ素ならびにヒ素化合物の大半は、生物に対する高い毒性を有しています。ヒ素化合物は自然条件下において局所的に高濃度で分布することがあり、飲料用地下水や農業用水などの汚染を通して世界各地で大きな健康問題を引き起こしています。環境中でのヒ素の存在形態は主に＋３価の As（Ⅲ）と＋５価の As（V）であるとされ、毒性は前者の方がより高いものの As（V）やそれ以外の形態であっても有毒です。ヒ素の毒性はあらゆる生物に及びますが、As（Ⅲ）から As（V）への酸化や、As（V）から As（Ⅲ）への還元によってエネルギーを取り出し、生育に利用する微生物も存在します。エネルギー獲得のために As（V）を As（Ⅲ）へと還元する反応は、無酸素環境にいる微生物によって進行します。また As（Ⅲ）を As（V）へ酸化する場合は、酸素存在下でより効率的にエネルギーを取り出すことができます。こうしたことから、無酸素環境では As（Ⅲ）、有酸素環境では As（V）の存在比が高くなることが知られています。一方で、無酸素条件下で As（Ⅲ）を酸化する微生物も知られており、これらは嫌気性ヒ素酸化細菌と呼ばれます（図 1）。ここに挙げたような微生物の活動が、環境中でのヒ素の分布や存在形態に影響を与えていると考えられますが、その詳細については未解明な点が多く残されています。環境中でのヒ素の動態に関わる微生物の中において、嫌気性ヒ素酸化細菌は特に知見が乏しい機能群です。本稿では、嫌気性ヒ素酸化細菌に関連する我々の研究成果を紹介します。

探索のきっかけと方針

嫌気性ヒ素酸化細菌に着目したきっかけは、*Sulfuricella denitrificans* skB26（以下、skB26 株）という微生物にあります。この微生物は、年間を通じて約 5℃に保たれたダム湖の深層水から得られました。低温環境における硫黄循環過程の解明を目指す過程で発見したもので、無機硫黄化合物を酸化してエネルギーを獲得する硫黄酸化細菌の一種です。skB26 株のゲノムを解析している際に、この微生物が Arx と呼ばれるヒ素酸化酵素の遺伝子（*arx* 遺伝子）を有していることに気付きました。この解析を行っていた当時、*arx* 遺伝子はわずか数種の微生物からしか見つかっておらず、嫌気性ヒ素酸化細菌に特異的なものであると考えられていました。また、その時点で知られていた全ての嫌気性ヒ素酸化細菌は高い塩濃度と高い pH で特徴づけられる環境に生育するものでした。skB26 株はこれらとは系統的に大きく離れており、低い塩濃度と中性付近の pH を好むという性質を有しています。この予期せぬ発見を受け、硫黄酸化細菌である skB26 株がヒ素酸化能を持つかどうかを検証しましたが、実験した条件下では As（Ⅲ）の酸化は認められませんでした。その一方で、skB26 株が発見されたダム湖の深層水中には As（V）を還元する別の微生物が生息しており、As（Ⅲ）を供給していることを示唆する研究結果が得られました。skB26 株が *arx* 遺伝子を有していることには、やはり何らかの意義があるものと考え、嫌気性ヒ素酸化細菌の探索を進めることにしました。

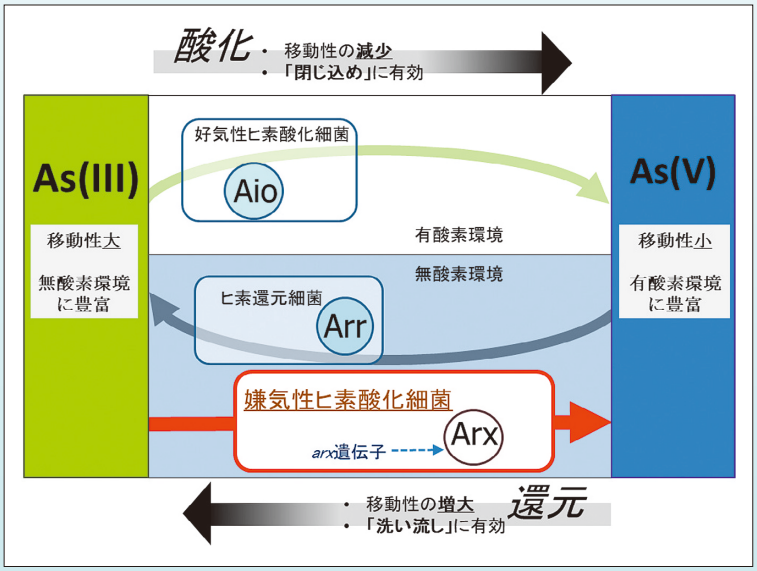


図 1　環境中でのヒ素の存在形態と微生物機能、およびヒ素汚染対策における微生物利用の概念図。円で示してあるのは、各微生物のヒ素代謝に関わる主要な酵素。微生物によるヒ素化合物の変換には、毒性に対処するためにエネルギーを費やして行われるものもあるが、ここでは省略してある。

嫌気性ヒ素酸化細菌は、それまでは高アルカリの塩湖からしか見つかっていませんでした。しかし「無酸素条件下で As（Ⅲ）を酸化する」という機能が、こうした極限環境に生息する微生物に限定されるべき理由は思い当たりません。*arx* 遺伝子を持つ skB26 株がダム湖から発見されたことと合わせて、「淡水環境には未知の嫌気性ヒ素酸化細菌が生息している」と考えるに至りました。そのような微生物を見つけ出すには、どのような方策を採ればよいでしょうか。まず微生物を探し出す大元として、一定量以上のヒ素が存在する環境が想定されます。また研究開始当時に *arx* 遺伝子を持つことが判明していた微生物には、硫黄酸化細菌あるいはその近縁種であるという共通点がありました。これらのことから、「嫌気性ヒ素酸化細菌を発見するには、ヒ素に富んだ環境に生息する硫黄酸化細菌の中から探索するのが効率的である」という仮説を立てました。この仮説に沿う形で、まず硫黄化合物を与えて培養を行い、得られた硫黄酸化細菌について *arx* 遺伝子の有無を調べ、その存在が認められたものについて As（Ⅲ）酸化能を評価する、という方針を策定しました。As（Ⅲ）を酸化する微生物を培養したいのであれば、最初から As（Ⅲ）を供給すればよいようにも思えます。しかしながら、無酸素条件下での As(Ⅲ)酸化はエネルギー獲得効率の低い反応であり、これに依存した増殖は低速であることが予想されます。さらに、As（Ⅲ）はこれを利用するものにとってすら毒性が高く、低濃度でしか供給できないという制限があります。実際に研究を遂行するにあたっては、危険性のある As（Ⅲ）を使用した実験をできるだけ減らしたいという事情もあります。実験従事者の手間や健康リスク、安全管理の諸コスト、廃液処理等に伴う環境負荷は軽視できるものではなく、やみくもに As（Ⅲ）を使った実験をするのは好ましくありません。As（Ⅲ）を使わずに候補となる微生物を絞り込むことができれば、As（Ⅲ）を用いた実験は必要最小限に抑えることができます。

これまでに見つけたもの

こうした方針を基本に据えつつも、様々な試行錯誤や偶然がもたらした紆余曲折を経て、*arx* 遺伝子を有する新たな硫黄酸化細菌を３種類ほど得ることに成功しました。そのいずれもが、同じ温泉に由来する試料から得られたものです。これらは既知のいかなる微生物種とも明確に異なっており、それぞれが独立した新種に相当するものであることが分かりました。

これら３つの微生物の中で最初に得られた J1A 株は、培養実験によって無酸素条件下で As（Ⅲ）を酸化する能力を有していることが確認できました。J1A 株のゲノムを解析したところ、Arx とは別のヒ素酸化酵素である Aio の遺伝子も有していることが分かりました。Aio は、有酸素環境でのヒ素酸化に関わる酵素として知られているものです（図１）。これら２タイプのヒ素酸化酵素の遺伝子を併せ持つ生物が発見されたのは、これが初めての例となります。観察された無酸素条件下での As（Ⅲ）酸化に関わっているのがどちらの酵素なのかは、まだ特定できていません。この点を解明することが当面の課題と言えますが、その先の展開として、酸素の有無によるヒ素酸化酵素の使い分けなども興味深い研究対象となりそうです。J1A 株については、ヒ素関連以外の様々な特性を明らかにしたうえで、*Sulfuritortus calidifontis* という学名をつけました。

残りの２株、M52 株と J5B 株は互いに近縁で、同じ新属の別種と考えられます（いずれも分類は未確定）。これら２株のうち、As（Ⅲ）を酸化する能力は M52 株でのみ確認されました。M52 株による As(Ⅲ)の酸化は、無酸素条件下のみならず、低濃度の酸素存在下で酸素を利用する形でも進行することが分かりました。M52 株は Aio の遺伝子を持たないことから、観測された As(Ⅲ)酸化には酸素の有無によらず Arx が関わっていると予想されます。Arx が酸素を利用したヒ素酸化に関与することはこれまで示されておらず、この点についてこれから実験によって証明する必要があります。また、M52 株と同じ実験条件下において J5B 株が As（Ⅲ）を酸化できない理由についても未解明です。同じく As（Ⅲ）酸化の確認できていない skB26 株の場合と異なり、J5B 株では近縁種である M52 株との比較解析が可能です。M52 株と J5B 株の間での詳細な比較は、嫌気性ヒ素酸化細菌への理解を深めるための様々な手掛かりを提供してくれるかもしれません。

まだ見つけられていないもの

培養を中心とした手法で研究を進めている間に、他の研究者の活動によっても *arx* 遺伝子に関する情報が徐々に集まってゆきました。知見の蓄積に大きく貢献したのは、近年急速に発展したメタゲノム解析です。この手法では、環境中の多様な微生物のゲノムを直接解析するこ

とにより、培養を経ることなく一度に大量のゲノム情報が得られます。研究開始当初はほとんど情報がなかった *arx* 遺伝子ですが、培養されていない未知の微生物のゲノムからも発見されるようになりました。こうして蓄積されてきた情報に、我々の研究成果も加えて改めて整理すると、Arx が大きく３つのグループに分けられることが判明しました。そのうちのひとつは、淡水環境に生息する微生物に特有でした。このグループには、我々の発見した４株（skB26 株・J1A 株・M52 株・J5B 株）の Arx が含まれますが、それ以外は全て未培養の微生物に由来するものでした。培養と並行する形で、我々も環境中から直接 *arx* 遺伝子を検出することを試みてきました。この際に用いたのは、*arx* 遺伝子だけを特異的に検出する方法で、全遺伝子を対象としたメタゲノム解析ではありません。ダム湖や温泉の試料を解析してみると、そこに様々な嫌気性ヒ素酸化細菌が生息していることを示唆する結果が得られました。この解析では、検出された *arx* 遺伝子の持ち主である微生物は特定できず、そのヒ素酸化能も証明はできません。しかし、淡水に特異的なタイプの Arx を持つ様々な種類の微生物が、未発見のまま環境中に潜んでいるということは言えそうです。遺伝子配列としてだけ検出された正体不明の微生物の実体を捉えるためには、結局のところ培養によって“発見”することが必要になります。これらを培養する試みにおいては、メタゲノムの情報が何らかのヒントをもたらすかもしれません。「*arx* 遺伝子を持つ微生物」が、他にどんな遺伝子を有しているかを知ることができるからです。その観点から検証してみると、硫黄酸化細菌を狙うと効率的、という仮説は依然として有効そうです。

見つけたことの意義

改めて、「淡水性の嫌気性ヒ素酸化細菌」を見つけだす意義について考えてみたいと思います。微生物に関する基礎科学の観点からは、こうした生物の発見それ自体に少なからぬ意義があります。この点についての専門的な議論はさておき、ここでは別の観点として、環境浄化への応用の可能性に言及しておこうと思います。ヒ素化合物はそのほとんどが有毒です。このことは、ヒ素汚染への対応においては分解によって無毒化するという方策が機能せず、毒性の低い形態に変換するというアプローチも有効性に乏しいことを意味します。このためヒ素汚染への対策においては、「その場に留める・閉じ込める」あるいは「その場から追い出す・洗い流す」ための措置を通じて、ヒ素の局在をコントロールすることが重要となります。As（Ⅲ）は水への可溶性が As（Ⅴ）よりも高いため、環境中での移動性も高いことが知られています。ヒ素の空間的分布をコントロールするには、As（Ⅲ）と As（Ⅴ）の間での変換、つまり酸化と還元を状況に応じて適切に促進したり抑制したりする必要があります（図 1）。例えば「ヒ素をその場から洗い流す」ことが求められる局面では、酸化を抑制して還元を促進すればよいことになります。一方で「ヒ素をその場に留める」ことを目指すのであれば、酸化を促進して As（Ⅲ）を As（Ⅴ）に変換することが求められます。しかし先述の通り、As（Ⅲ）は無酸素環境に豊富に存在する傾向にあります。よって As（Ⅲ）を酸化することが求められる局面には、しばしば無酸素という条件が付随することになります。無酸素環境への酸素の供給は、一般に高コストで技術的困難が伴うことが少なくありません。酸素を必要とせずに As（Ⅲ）を酸化できる嫌気性ヒ素酸化細菌は、微生物を利用したヒ素汚染対策における重要なツールのひとつとなる可能性があります。そして、ヒ素汚染への早急な対応が切実に求められているのは、飲料水や農業用水といった淡水資源に他なりません。

基礎と応用のいずれの観点から見ても、本研究はほんの出発点とも言うべき段階のものです。自然界におけるヒ素循環の全体像の把握も、微生物機能を利用したヒ素汚染対策の実用化も、実現にはまだ程遠い状態です。しかし、その鍵となりうる微生物を発見し、純粋培養として様々な実験に利用できる状態にしたことには、大きな意義があると考えています。これを足掛かりとして、嫌気性ヒ素酸化細菌に関する研究が大きな展開を見せることを期待しています。そして、我々ものその一端を担うべく探求を続けていきたいと考えています。

謝辞：ここで紹介した成果の多くは、Melody Cabrera Ospino 博士をはじめとする共同研究者の方々のご尽力により得られたものです。本研究は科研費（15K07209 および 20K12215）の助成を受けています。研究の立ち上げ期には、低温科学研究所からの支援（低温科学研究所　平成 26 年度研究助成）を頂きました。篤く御礼申し上げます。

退職のご挨拶

隅田　明洋
（元　生物環境部門）

2020年3月31日をもちまして北海道大学低温科学研究所を退職し、同4月1日より京都府立大学生命環境科学研究科に異動しました。北大低温研に赴任した1999年10月から20年以上にわたってお世話になりました。ありがとうございました。

赴任当時はまず札幌の自然に次々に驚かされました。私は高校卒業まで長崎に生まれ育ち、低温研に来るまでは森林の研究を暖温帯域（中部・近畿地方）で行っていたので、雪の結晶が肉眼で見えること、ゴキブリやイノシシがいなくてそのかわりに野良ギツネが住宅街をうろうろしていること、スキー場がアフターファイブに楽しめる距離にあること、冬のツルツル路面（1年目は何度か背中からひっくり返りました）、住宅にクーラーも雨戸も無いのが普通なことなど、それまでの私の常識が何度も覆されました。

赴任当時の2000年代初めは科学技術分野におけるインフラが大きく進化した時期でした。特に、アカデミア全体が、日々向上するコンピュータの性能や劇的に進化しつつあるインターネット環境の恩恵にあずかって進展しました。それまで大型計算機に頼っていたような計算がパソコンでできるほどまでになり、大量データ処理能力の向上とともに、遺伝子やタンパクなどのミクロな分野から航空機や衛星による植生観測などのマクロな分野に至るまでの分析技術が、私の専門である森林生態学の分野にも入りこんできました。低温研に赴任した当時は、Eメールはすでにありましたが、生態学関連のジャーナルでは論文原稿の投稿や査読はまだ郵送で行われていました。インターネット環境の整備とともにEメールの添付書類による原稿送付にかわり、間もなくウェッブ上のオンラインシステム上で査読作業が行われるようになり、査読に要する時間は大幅に短縮されました。おかげで楽になったかというとそうでもありません。赴任後すぐに「楽だよ」と言われたので引き受けたはず（今にして思えば単にだまされていただけ）の某ジャーナルの編集委員の仕事がオンライン化による投稿数の増加によってしだいに研究の時間を圧迫するようになっていきました。とは言え、科学ジャーナルの紙媒体からのpdf化が進み、図書館に行く必要が激減したばかりでなく、異分野の論文もキーワードで簡単に検索し入手することができるようになったことはすばらしいことです。

赴任当時の低温研では、気候変動予測研究に資するための複数の大型研究プロジェクトが走りはじめていました。私の所属研究室であった寒冷生物圏変動分野（現寒冷域植物生理生態分野）でも、原登志彦教授のもと、分子生物学・植物生理学・森林生態学・水文学・気象学・雪氷学など広い研究分野を取り込んだ、北東ユーラシア地域を対象とするプロジェクトが始まりました。その一環で、2000年および2001年の夏にはカムチャツカ半島においてロシア科学アカデミー極東支部の研究者らとの共同の森林調査に同行させていただきました（写真1）。日本に居るだけでは到底理解できなかったであろう北方域の自然環境を、身をもって体験する貴重な機会となりました。

私の研究内容もこのような状況下で自ずから変わりましたが、上述の異分野との共同研究の成果を出すことができたのは、赴任後の最初の10年のうちの後半になってからの事でした。特に、低温研の水文気象グループの兒玉裕二さん（現 国立極地研究所 国際北極環境研究センター 特任教授）、中井太郎さん（現 国立台湾大学生

写真1　2000年のカムチャツカ森林調査での夕食。

物資源及農学院 助理教授）らとの共同研究では、自分の専門である森林の構造に関する知見を森林～大気間の熱・水収支の研究に生かすことができました。このような異分野間の共同研究の最初の１年程は彼らの言葉（専門用語）をほとんど理解することができませんでした。しかしお互い全く違う分野で教え合うことを通して、データ解析や論文作成の段階ではとても楽しくディスカッションができたことが印象に残っています。低温研赴任前のただの森林生態学の研究者だった私は、次第に森林研究と他のサイエンスとの結びつきを意識するようになりました。

プロジェクト研究が終息した後の残り 10 年間は森林生態学プロパーの研究に戻り、寒冷域に優占する常緑針葉樹林を対象とした研究を行いました。なかでも、長期にわたる樹木個体間の競争や森林の発達・維持への気象要因の影響に関する研究では低温研の渡辺力教授にもご協力いただき、我ながら非常に興味深い成果を得ることができました。樹木の個体間競争による個体の成長の優劣の違いは個体の保持する葉の量の 10 年以上にわたる変化パターンの違いに起因すること、そのことが幹の形の個体間の違いにも影響すること、森林全体の葉の量や幹の成長量は毎年変動する夏季の気象要因の影響をうけること、森林全体の葉の量の年変動に対して数年前の気象の状態が残存効果となって影響を及ぼすことなど、どれもそれまで未知であり想像もできていなかった現象を明らかにすることができました。

実はこの研究に使用したデータは、低温研に来る以前に 20 年間かけて記録された常緑針葉樹林の詳細な調査データなのですが、これらをうまく統計的にハンドリングするソフトウエア環境と、コンピュータの性能向上とが同時に整ったことではじめて上述の解析をほどこすことができるようになったのです（ただし時間はかかりました）。さらに、これらの論文を書くにあたり、低温研に赴任以来の様々な経験が大いに役立つこととなりました。最初は解析結果を査読者に受け入れてもらえず投稿論文をリジェクトされたこともあったのですが、植物生理学や木材科学などの異分野の最新の知見が解析結果と整合することをイントロやディスカッションに盛り込んだことで査読者を納得させることができました。それができたのは、低温研での 20 年間に幅広い分野の研究者と知り合いになることができ、異分野の研究情報に対する壁が低くなったことに起因します。例えば年に何度か開かれる低温研セミナーでは、宇宙での分子生成、氷の性質、気象、海洋循環、植物や動物の生理、同位体の科学など、多様な話を聞けておおいに楽しませていただきましたが、同時に視野を広げる絶好のきっかけとなりました。

低温研以外の研究機関の異分野の研究者とも情報交換を行う機会をつくるようになりました。2019 年９月には異分野の研究者を招待した低温研共同研究集会を開催し（写真２）、その第２弾である 2020 年９月の低温研共同研究集会では、北大農学部の斎藤秀之さん、低温研の小野清美さんと滝沢侑子さんのご協力を得て、オンラインでありながら 100 名以上方々から視聴いただくとともに、そのうち 60 名ほどの方々から想像を超えた非常に高い評価の声をいただきました。また、低温研内の懇親会では研究者間の交流ばかりでなく、技術部スタッフとも交流でき、おかげで普通ではないレベルの技術部スタッフの技術に完全におんぶされた面白い研究も始めることができました（まだ継続中ですが）。

現在の私があるのは間違いなく低温研の皆さまのおかげです。深く感謝しています。今後も低温研にはお世話になる予定ですのでどうぞよろしくお願いします。また、低温研のさらなる発展と皆様のご健康を心よりお祈りいたします。

写真２　2019 年９月の低温研共同研究集会の発表者とスタッフ

Press Release

(2020/5/26)

海洋コンベアベルトの終着点における栄養物質循環の解明
～縁辺海が海を混ぜ、栄養分を湧き上がらせる～

発表者：准教授　西岡　純

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の西岡 純准教授と同大学院地球環境科学研究院の山下洋平准教授、東京大学大気海洋研究所の小畑 元教授、小川浩史教授、安田一郎教授、長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科の武田重信教授らの研究グループは、これまで明確には理解されていなかった、グローバルスケールの海洋循環（海洋コンベアベルト）の終着点に位置する北太平洋の栄養物質循環像を明らかにしました。

これまで北太平洋では、どのようなメカニズムを経て海洋表層に窒素やリンなどの栄養塩が供給され、生物活動が維持されているのかは良くわかっていませんでした。本研究では、これまでに予想されていた、深層に蓄積されている栄養塩が直接表層の高緯度海域を肥沃にしているという考えを覆し、ベーリング海で形成される中層水の栄養塩プールの形成と海峡部で起こる混合が、深層と表層の栄養塩を繋ぐ重要な役割を果たしていることを明らかにしました。この中層水由来の栄養塩とオホーツク海から流出する鉄分が混合することで、西部北太平洋の生物生産が高い状態で維持されていることが解明されました。本研究で見えてきた北太平洋の栄養物質循環像は、地球規模の海洋物質循環を解明する上で鍵となるエリアの理解を大きく進めます。今後、海洋における炭素循環、栄養物質循環、生態系の気候変動に起因する変化を理解する上で欠かせない知見となります。

本研究は、新学術領域研究「海洋混合学の創設」及び「新海洋像」、その他の科学研究費補助金、低温科学研究所共同利用開拓型研究の助成を受けて実施されました。

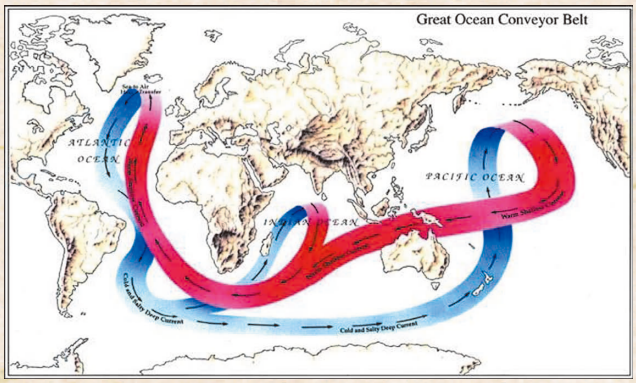
なお、本研究成果は2020年5月27日（水）公開のProceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America誌にオンライン掲載されます。

【論文発表の概要】

論文名：Sub-polar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation（海洋コンベアベルト終着点における中層水を介した縁辺海による北太平洋の肥沃化）

著者名：西岡 純[1]、小畑 元[2]、小川浩史[2]、小野数也[1]、山下洋平[3]、Keun Jong Lee[2]、武田重信[4]、安田一郎[2]
（1北海道大学低温科学研究所、2東京大学大気海洋研究所、3北海道大学大学院地球環境科学研究院、4長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科）

雑誌名：Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America（総合 科学雑誌）
ＤＯＩ：10.1073/pnas.2000658117
公表日：2020年5月27日（水）



海洋コンベアベルトの概念図
W.S. Broecker, Oceanography, vol4, No.2, 1991

Press Release

(2020/7/29)

アルツハイマー病の原因物質を「毒性」に変貌させる新しいメカニズムを発見
～溶けているはずの塩がナノレベルでは析出と溶解を繰り返すことが原因～

発表者：准教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

大阪大学国際医工情報センターの中島吉太郎特任研究員（常勤）、工学研究科の荻博次教授らの研究グループは、北海道大学低温科学研究所の木村勇気准教授らとの共同研究により、溶液に溶けているはずの塩が局所的に析出※1と溶解※2を繰り返す現象を特殊な電子顕微鏡により直接観測することに成功し、この現象がアルツハイマー病の原因と考えられるタンパク質凝集体の生成を加速する様子を世界で初めて直接観察することに成功しました。

今回の発見は、溶質が溶媒に「溶けている」という現象が、析出と溶解の動的平衡により成り立っていることを直接立証した成果であると同時に、タンパク質が溶けている溶液に塩を加えるとタンパク質が析出する「塩析」という現象の理解に新たな概念が加わることになります。アルツハイマー病の原因タンパク質が塩とともに溶解しているとき、塩が一時的に析出し成長すると、その表面に多くのタンパク質分子が吸着し、その後、その塩が再び溶ける時、吸着したタンパク質分子が塩の消滅点に集められ、局所濃縮され、通常では起こり得ない反応が起き、結果、タンパク質の凝集核を形成することがわかりました（図１）。この凝集核こそがアルツハイマー病の原因物質の起点となるものであり、こうした塩のナノレベルでの析出と溶解によって、タンパク質の凝集を加速することが明らかとなりました。これはタンパク質の凝集現象における全く新しいメカニズムであり、このメカニズムこそが、凝集反応を支配する可能性もあります。

本研究成果は、米国科学誌「The Journal of Physical Chemistry Letters」に、７月20日（月）に公開されました。

【用語解説】

※１　析出 … 溶解している溶質が固体として現れる現象。

※２　溶液TEM … 通常の透過型電子顕微鏡は、試料を高真空環境内に設置して電子線を照射し、試料を透過した電子線を利用することにより、試料を観察する。Transmission Electron Microscopeという英語名から、図3超音波が作る気泡の成長と圧壊によるタンパク質の凝集加速現象TEMと呼ばれている。液中TEMでは、溶液状態の試料を、上下に窒化ケイ素の微小窓を有する200nm程度の薄さの微小容器に閉じ込めてシールし、この微小容器ごと高真空環境に設置して、微小窓に電子線を透過させることにより、溶液状態のまま透過画像を得ることができる電子顕微鏡である。

【論文発表の概要】

タイトル：“Time-Resolved Observation of Evolution of Amyloid-β Oligomer with Temporary Salt Crystals”

著者名：Kichitaro Nakajima, Tomoya, Yamazaki, Yuki Kimura, Masatomo So, Yuji Goto, and Hirotsugu Ogi

本研究成果は、2020年7月20日（月）に米国科学誌「The Journal of Physical Chemistry Letters」（オンライン）に掲載されました。

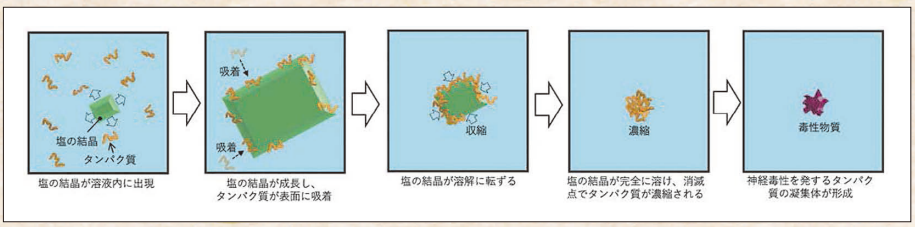


図１　塩の結晶が析出し、成長し、溶解する過程で、タンパク質が局所的に濃縮され、毒性の凝集体が出現する

(2020/8/7)

水/高圧氷の界面に〝新しい水〟を発見！
水の奇妙な物性の謎に迫る画期的な成果

発表者：准教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

水は、ありふれた存在ですが、特異な物性を示す奇妙な液体であり、多くの自然現象を支配しています。東北大学金属材料研究所の新家寛正助教、宇田聡教授と北海道大学低温科学研究所、木村勇気准教授、産業技術総合研究所環境創生研究部門の灘浩樹主任研究員と東京大学大学院総合文化研究科先進科学研究機構の羽馬哲也准教授を中心とする研究グループは、室温－20℃に保たれた低温室内で水に高圧を加えることで結晶化する氷 III を観察し、成長・融解する氷と水の界面に通常の水とは異なる未発見の新しい水の層が形成されることを見出しました（図１）。さらに、氷表面を濡らす新しい水の濡れ性と表面パターンから、新しい水の密度は通常の水よりも大きい上に、通常の水とは混ざり合わず、構造が異なることが示唆されました（図２）。この成果は、長年に渡る大きな謎である水の特異な物性を説明する“構造の異なる二種類の水の存在”仮説の検証に道を拓くものです。

本成果は、アメリカ化学会が発行するThe Journal of Physical Chemistry Lettersに7月24日（金）付でオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

雑誌名：The Journal of Physical Chemistry Letters

英文タイトル：High-Density Liquid Water at a Water–Ice Interface

全著者：H. Niinomi, T. Yamazaki, H. Nada, T. Hama, A. Kouchi, J. T. Okada, J. Nozawa, S. Uda, and Y. Kimura

ＤＯＩ：https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c01907

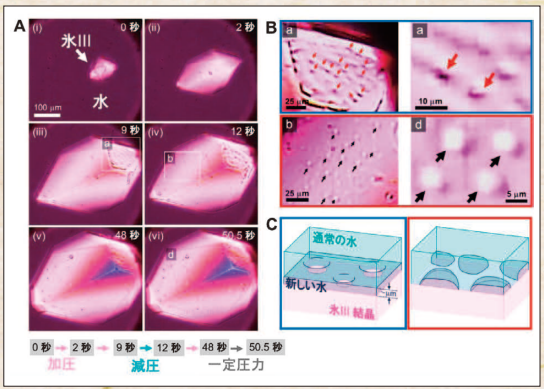


図１　水 / 氷 III 界面に形成する新しい水の偏光顕微鏡その場観察像。A：加圧・減圧により水中で成長・融解する氷 III 結晶。B：氷 III 表面の拡大像。画像 a,b,d は図 A 中の四角 a,b, 及び記号 d 近傍の拡大像。C：観察された新しい液体の形状の模式図。図中の青及び赤の四角で示された模式図はそれぞれ、図 B 中青及び赤の四角で示された観察像の液体形状に対応している。

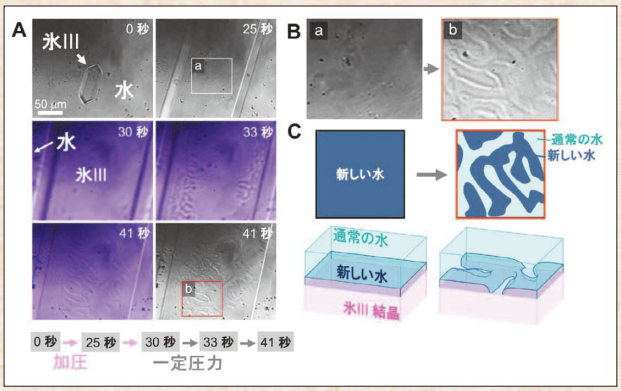


図２　水 / 氷 III 界面に形成する新しい水の層の均質な形態から両連続的な形態への発展。A：水中で成長する氷 III の顕微鏡像。B：水 / 氷 III 界面の拡大像。画像 a,b は図 A 中の四角 a,b に対応している。C：新しい水の形態の模式図。左右の図は、図 B 中の画像 a と b に対応している。

Press Release

(2020/8/25)

暖かい海水が白瀬氷河を底面から融かすプロセスを解明
～海洋観測と数値モデル、測地・雪氷学分野との融合研究～

発表者：助教　平野　大輔

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の平野大輔助教、国立極地研究所の田村岳史准教授、海洋研究開発機構の草原和弥研究員らの研究グループは、現場観測と数値モデルの手法を融合し、暖かい海水の流入によって生じる白瀬氷河の顕著な融解プロセスを解明しました。

近年、西南極[*1]では氷床[*2]の融解が加速していることが観測され、地球の海水準上昇への影響が危惧されています。一方、東南極[*1]ではその実態は未だよく分かっていません。南極・昭和基地のあるリュツォ・ホルム湾の奥には、南極で最大級の流動速度を持つ白瀬氷河が存在しますが、氷河[*3]融解の鍵となる海洋の観測は、厚い海氷に阻まれてほとんど行われていませんでした。しかし、第58次南極地域観測隊(2016-17年)では、過去約60年にわたる日本の南極観測で初めて、湾口から白瀬氷河の前面海域にいたるエリアでの大規模な海洋観測に成功しました。本研究では、この海洋観測データの解析を軸に、数値モデルや測地・雪氷学分野との融合研究を行い「白瀬氷河の下（底面）に、沖合起源の暖かい海水が流入することで顕著な融解が生じていること、また、その融解強度は卓越風の季節変動によってコントロールされる」という一連のプロセスを提唱しました。これは、西南極と比べて圧倒的に知見が乏しい東南極における氷床質量変動の理解向上に貢献すると期待されます。

本研究は、平野助教が中心となり、南極地域観測の第Ⅸ期重点研究観測プロジェクト「氷床・海氷縁辺域の総合観測から迫る大気ー氷床ー海洋の相互作用」（2016 ～ 2021年度）のもとで、国立極地研究所、海洋研究開発機構、英国南極観測局との共同研究として実施されました。なお、本研究成果は、2020年8月24日（月）公開のNature Communications誌に掲載されました。

【用語解説】

＊1　西南極、東南極 … 南極大陸の西経領域および東経領域のこと。

＊2　氷床 … 降り積もった雪が、長い年月をかけて押し固められて形成された氷の塊のこと。南極大陸上の氷床を南極氷床と呼び、地球最大の氷の塊である。

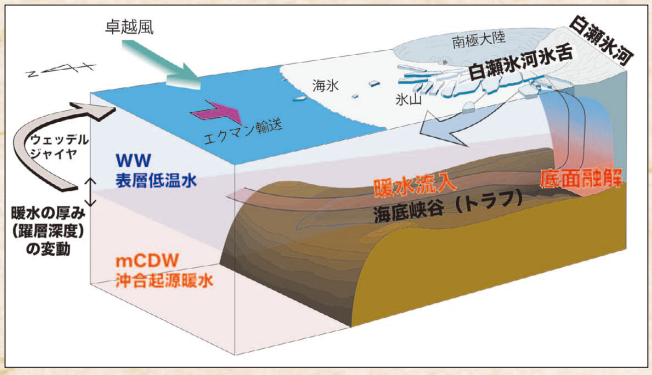
＊3　氷河 … 南極やグリーンランド、山岳地では陸上に降り積もった雪が自身の重みで氷塊となり、重力によってゆっくりと流動する。この流れを氷河という。最終的に海へと流れ出して浮いている領域を棚氷や氷舌と呼ぶ。図も参照。なお、海水が凍った海氷とはいずれも異なる。

【論文発表の概要】

論文名：Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica（東南極・白瀬氷河氷舌での海洋による顕著な底面融解）

著者名：平野大輔[1]、田村岳史[2]、草原和弥[3]、大島慶一郎[1]、Keith W. Nicholls[4]、牛尾収輝[2]、清水大輔[2]、小野数也[1]、藤井昌和[2]、野木義史[2]、青木 茂[1]（1北海道大学低温科学研究所、2国立極地研究所、3海洋研究開発機構、4英国南極観測局）

雑誌名：Nature Communications
ＤＯＩ：10.1038/s41467-020-17527-4.
公表日：2020年8月24日（月）午後6時（オンライン公開）



沖合の暖かい海水の流入によって生じる、白瀬氷河の底面融解プロセス

(2020/9/8)

超高真空・極低温のアモルファス亜酸化窒素(N_2O)の構造を解明：機能性有機薄膜や氷星間塵の研究への応用も

発表者：准教授　羽馬　哲也（東京大学）、教授　渡部　直樹、教授　香内　晃

【研究成果の概要】

東京大学大学院総合文化研究科附属先進科学研究機構の羽馬哲也准教授、京都大学化学研究所の長谷川健教授、北海道大学低温科学研究所の渡部直樹教授、香内晃教授らは、「赤外多角入射分解分光法（Infrared Multiple-Angle Incidence Resolution Spectrometry、以降は赤外MAIRS法とする）」という新規赤外分光法(注1)を用いて、これまで研究が困難であった「超高真空・極低温で作製したアモルファス薄膜」の分子構造を調べる方法を開発しました。開発した装置を用いて6 K（-267℃）のアモルファス亜酸化窒素（N_2O）薄膜について分析を行ったところ、薄膜内でN_2O分子は基板法線(注2)から平均して65°傾いて配向していることがわかりました。N_2O薄膜は、真空蒸着法(注3)で作製すると10^7−10^8 Vm^{-1}（N_2O一分子層あたり+3 mVから+32 mV）という巨大な電場が形成されることが知られており、本研究によってN_2O薄膜の電気的性質と分子構造とを結び付けて理解できるようになりました。

真空蒸着法は有機半導体などの機能性有機薄膜の作製にも用いられています。また極低温基板に真空蒸着法で作製したアモルファスな分子性固体（H_2O、CO、CO_2、NH_3など）の薄膜は、宇宙を漂う氷星間塵の模擬物質としてよく研究されています。今後、これらの物質について赤外MAIRS法を用いた分析を行うことで研究が大きく発展することが期待できます。

【用語解説】

（注１）赤外分光法：物質に赤外光を照射し、透過または反射した光を測定することで、試料の構造解析や定量を行う分析手法。波長が2.5 ～ 20 μm（波数にして4000 ～ 500cm^{-1}）ほどの赤外光を物質に照射すると、分子の振動による物質固有の吸収パターン（スペクトル）が現れ、分子の構造に関する情報が得られる。

（注２）基板法線：基板に対して垂直に伸びた線。

（注３）真空蒸着法：真空中の基板に、蒸着材料のガスを付着させ薄膜を形成する方法。

【論文発表の概要】

論 文 名：“Quantitative Anisotropic Analysis of Molecular Orientation in Amorphous N_2O at 6 K by Infrared Multiple-Angle Incidence Resolution Spectrometry”

著者名：Tetsuya Hama*, Atsuki Ishibashi, Akira Kouchi, Naoki Watanabe, Nobutaka Shioya, Takafumi Shimoaka, and Takeshi Hasegawa

雑誌名：The Journal of Physical Chemistry Letters
ＤＯＩ：http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c01585
公表：2020年9月28日（月）（オンライン公開）

【参考】

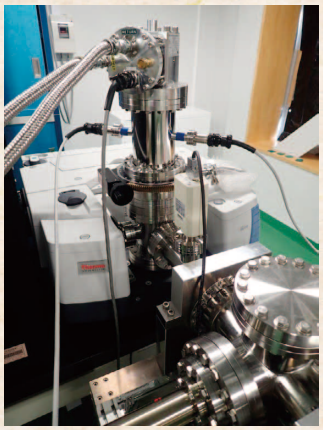


図１　本研究で開発した「超高真空・極低温赤外 MAIRS 法」のための実験装置。

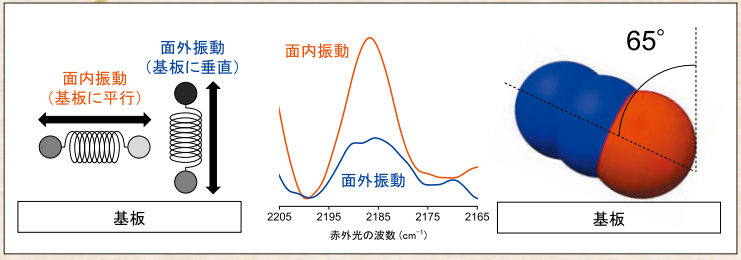


図２　（左図）面内振動と面外振動のイメージ図。（中図）赤外 MAIRS 法で得られた 6 K のアモルファス N_2O 薄膜の面内振動スペクトルと面外振動スペクトル。（右図）面内振動スペクトルと面外振動スペクトルの強度比から明らかになったアモルファス N_2O 薄膜内の N_2O 分子の平均配向角（基板法線から 65°）。

Press Release

(2020/9/16)

南極の海の底、もう甘くするのは止めました!?
～数十年続いた淡水化傾向が逆転。南極海観測網の継続に期待～

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、海洋研究開発機構の勝又 勝郎主任研究員、東京海洋大学、水産研究・教育機構らによる共同研究グループは、オーストラリア南方の南極海の海底付近において、これまで加速度的に低くなってきているとされてきた塩分*1が、2010年代に反転して急激に高くなりつつあることを見出しました。これまで減ってきていた重い水の量も増えています。こうした海の変化の実態は、水産庁の開洋丸による広域海洋調査や東京海洋大学の海鷹丸による観測航海といった近年の日本による観測を、世界の過去の観測も含めて比較することで判明しました。この変化は、南極深海の海洋循環が強まりつつある可能性も提示しています。変化の原因は、この海域の上流側に位置する南極の棚氷*2の融解が、ここ何十年か加速してきていたものの、2010年代の前半に弱まったことにある可能性があり、南極氷床*3と深海との連動性を示すものです。今後の動向を見極めるためには、南極海モニタリング観測網の整備により、変化の傾向を引き続き注視していく必要があります。

本研究成果は、2020年9月15日（火）公開のScientific Reports誌に掲載されました。

【用語解説】

＊1　塩分 … 海水の中に含まれる塩の量のこと。海水１kgのなかに溶けている量のグラム数で定義する。
＊2　棚氷 … 氷床から流れ出して周辺の海の上に浮かんだ部分のこと。
＊3　氷床 … 長い年月をかけて降り積もった雪が押し固められてできた、巨大な氷の塊のこと。

【論文発表の概要】

論文名：Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin during 2010s（2010年代におけるオーストラリア-南極海盆の南極底層水の淡水化傾向の反転）

著者名：青木 茂[1]、山崎開平[2]、平野大輔[1]、勝又勝郎[3]、嶋田啓資[4]、北出裕二郎[4]、佐々木裕子[5]、村瀬弘人[4]
（1北海道大学低温科学研究所、2北海道大学大学院環境科学院、3海洋研究開発機 構、4東京海洋大学、5水産研究・教育機構）

雑誌名：Scientific Reports
ＤＯＩ：10.1038/s41598-020-71290-6
公表日：日本時間 2020年9月15日（火）午後6時（英国時間 2020年9月15日（火）午前10時）（オンライン公開）

2018-19 年に南極海の観測を行った開洋丸

(2020/9/18)

北極海の冷水の起源はシベリアにあった！
シベリア沿岸に冷水湧昇帯を発見し、その物理メカニズムを解明

発表者：准教授　西岡　純

【研究成果の概要】

東京大学、北海道大学、海洋研究開発機構の合同研究チームは、シベリアとアラスカの間に位置する“アナディル海峡”で海洋調査を行い、北極海に流れこむ冷たい『湧き水』の存在を明らかにした。この観測は、ロシア極東海洋気象学研究所の「マルタノフスキー号」と海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」を用いて2017年と2018年の夏に行われた。それ以前の観測では、ロシア排他的経済水域（EEZ）内の観測が制限されているためにアメリカEEZ内であるアラスカ沿岸の調査結果が中心に報告されてきた。これによると、夏に北極海に流入する海水は極めて高温で、その温暖な海水が北極海の海氷分布を主体的に決定すると言われてきた。しかしながら、アナディル海峡の西側（ベーリング海北西部シベリア沿岸）海域を「マルタノフスキー号」で詳しく調査し「みらい」の広域調査（アラスカ沿岸）とあわせることで、冷たい水が下層から湧き出すポイントが存在し、その水が海峡を北上することで北極海の低水温と海氷の維持につながっていることが明らかになった。この発見によって今後、以前より高い精度での北極海の海氷予測の実現が期待される。また今後はアナディル海峡の冷水の起源を特定し、詳しい調査を行うことで北極海の海氷とベーリング海北西海域の気候変動との因果関係を明らかにしていく。

【論文発表の概要】

雑誌名：「Journal of Geophysical Research – Oceans」

論文タイトル：Cold Water Upwelling near the Anadyr Strait: Observations and Simulations

著者：Yusuke Kawaguchi*, Jun Nishioka, Shigeto Nishino, Shinzou Fujio, Keunjong Lee, Amane Fujiwara, Daigo Yanagimoto, Humio Mitsudera, Ichiro Yasuda

DOI番号：10.1029/2020JC016238

アブストラクトURL：https://doi.org/10.1029/2020JC016238

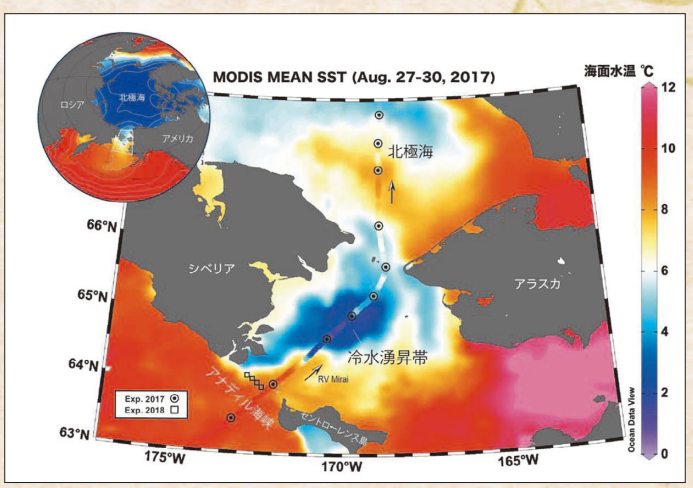


図　人工衛星による観測海域の海面水温。ロシア船「マルタノフスキー号」と海洋地球研究船「みらい」を用いて“冷水湧昇帯”の詳細な調査を行なった。

Press Release

(2020/9/30)

氷河ポンプがフィヨルドの豊かな海洋生態系を支える
～海の栄養分が補給・撹拌・移送されるしくみを解明～

発表者：教授　杉山　慎

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の杉山 慎教授、西岡 純准教授、同大学北極域研究センターの深町 康教授、同大学北方生物圏フィールド科学センターの野村大樹准教授らの研究グループは、東京大学大気海洋研究所の漢那直也研究員（日本学術振興会特別研究員・元北海道大学北極域研究センター）と共同で、グリーンランドのカービング氷河*1から流出する、鉄分に富んだ融け水が、窒素、リンなどの栄養塩*2に富む海水と混ざって海面へ湧き上がり、夏の間のフィヨルド*3の生物生産に大きく貢献することを明らかにしました。

氷の融け水は、水深200mにある氷河の底からフィヨルドに流出し、その場の海水を巻き込んで湧昇します。ポンプを使ったように海面へ汲み上げられた融け水と海水は、周囲の海水に比べ鉄分と栄養塩を豊富に含んでおり、フィヨルドの広域に広がり植物プランクトンの増殖を促します。

カービング氷河が流入するグリーンランドのフィヨルドには、氷河の恵みを受けた豊かな生態系が広がっています。今後、北極域の温暖化が進行してカービング氷河が消失すれば、氷河の融け水による汲み上げポンプの機能が失われて生態系に大きな影響が予想されます。

本研究は、グリーンランドで加速している氷河の融解が、フィヨルドの生態系に与える影響の理解への貢献が期待されます。本研究成果は、2020年9月28日（月）公開のGlobal Biogeochemical Cycles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、ArCS II 北極域研究加速プロジェクト、日本科学協会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 ･･･ 海に流れ込む氷河のこと。

＊2　栄養塩 ･･･ 硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩などの植物プランクトンが増殖するために必要な塩類のこと。硝酸塩の利用に鉄が必要となる。

＊3　フィヨルド ･･･ 氷河によって削られた入江のこと。

【論文発表の概要】

論文名：Iron supply by subglacial discharge into a fjord near the front of a marine-terminating glacier in northwestern Greenland（グリーンランド北西部における海洋性溢流氷河近傍のフィヨルドへ底面排水による鉄供給）

著者名：漢那直也[1]、杉山 慎[2]、深町 康[3]、野村大樹[4]、西岡 純[2]（1東京大学大気海洋研究所、2北海道大学低温科学研究所、3北海道大学北極域研究センター、4北海道大学北方生物圏フィールド科学センター）

雑誌名：Global Biogeochemical Cycles（米国地球物理学連合学会誌）
ＤＯＩ：10.1029/2020GB006567
公表日：2020年9月28日（月）
（オンライン公開）

左：フィヨルドでの観測の様子。奥に見えるのがカービング氷河。
右：観測中に遭遇したアザラシ。現地の重要な水産資源の一つ。

（2020/10/14）

海洋微生物の「老い」が雲の生成を抑える
～雲の生成を制御する大気中の有機物量の指標として、海洋微生物の老化度を新たに提唱～

発表者：助教　宮﨑　雄三

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の宮﨑雄三助教、同大学院地球環境科学研究院の鈴木光次教授らの研究グループは、亜寒帯西部北太平洋での船舶による大気と海水の同時観測から、海洋植物プランクトンの細胞老化が進むほど、海しぶきによって大気へ移行する有機物の量が増えることを明らかにし、大気微粒子（エアロゾル）がもつ雲粒の生成能力を抑制する可能性を初めて示しました。

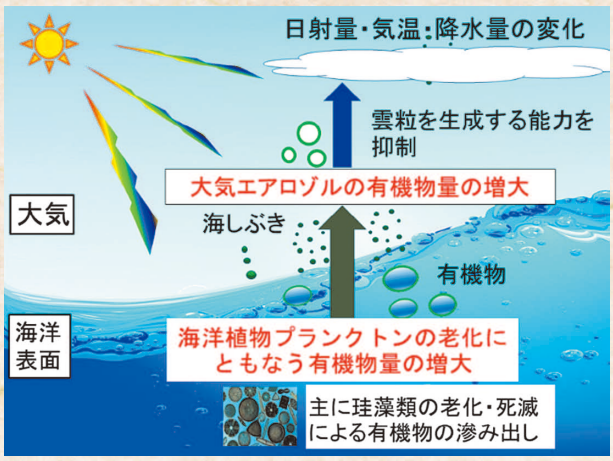
大気エアロゾルは太陽光を散乱・吸収するほか、雲の量や降水過程に影響を与えるなど、気候変動に重要な役割を果たします。エアロゾルに最大80 ～ 90%含まれる有機物は雲生成の促進・抑制を決定づけると考えられています。地球の表面積の約7割を占める海洋の表面では、微生物の活動に伴う有機物が海しぶきにより大気へ放出されますが、海洋大気中の有機物量を支配する要因は明らかではありません。研究グループは海洋植物プランクトンの細胞「老化」に着目した指標を新たに用い、細胞老化が進むほど、海水中及び海しぶきとして大気へ放出される有機物の量が増えることを明らかにしました。さらにこの細胞老化に伴う大気エアロゾルの有機物量の増加は、雲の生成を「抑制」する可能性があることを見出しました。本成果は、温暖化等による海洋表層の植物プランクトンの活動度の変化が、大気への有機物の放出を通して雲の生成に影響することで起こる、将来的な気候影響を評価・予測する上で重要な知見となることが期待されます。なお、本研究成果は、2020年10月12日（月）公開の*Scientific Reports*誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：New index of organic mass enrichment in sea spray aerosols linked with senescent status in marine phytoplankton（海洋植物プランクトンの細胞老化に関係付けた海飛沫大気エアロゾル中の有機物量を表す新しい指標）

著者名：宮﨑雄三[1]、鈴木光次[2]、立花英里[1]、山下洋平[2]、Astrid Müller[3]、川名華織[4]、西岡 純[1]（1北海道大学低温科学研究所、2北海道大学大学院地球環境科学研究院、3国立環境研究所、4海洋研究開発機構）

雑誌名：Scientific Reports
ＤＯＩ：10.1038/s41598-020-73718-5
公表日：2020年10月12日（月）（オンライン公開）



NEWS

■低温科学研究所がスミ州立大学と部局間交流協定を締結

低温科学研究所は、７月13日にスミ州立大学と部局間交流協定を締結しました。本協定の締結はコロナ禍による海外との交流が著しく制限されるなか、先方からの積極的な研究交流の依頼が受け、締結に至りました。

スミ州立大学は８学部からなるウクライナ北東部の大学で、多くの技術的専門分野を置く大学でもあります。今後は共同研究の実施等、積極的な研究交流の連携が期待されます。

■令和３年度共同研究・研究集会の公募について

令和３年度共同利用・研究集会は、令和２年12月１日から募集を開始しています。
詳しくは、当研究所ホームページの「共同研究」のページでご確認願います。
http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/kyoudou.html

■人事異動（令和2年4月2日から令和2年10月1日まで）

異動日	異動内容	氏　名	職　名	備　考
R2. 4.15	任期満了	川　俣　大　志	学術研究員	
R2. 4.30	辞職	FAN RONG	博士研究員	
R2. 5. 1	採用	谷　口　玲　子	事務補助員	
R2. 6. 1	採用	三　浦　　彩	博士研究員	
R2. 6. 1	採用	K.W.P.BETHMINI SENEVIRATHNE	技術補助員	
R2. 6.15	採用	CHAMBERS CHRISTOPHER ROBERT SCOTT	学術研究員	
R2. 7. 1	採用	勝　野　弘　康	博士研究員	
R2. 9. 1	採用	小　野　かおり	技術補佐員	
R2. 9.30	任期満了	立　花　英　里	技術補助員	
R2.10. 1	採用	鷹　野　真　也	学術研究員	
R2.10. 1	転出	土　田　とも峰	主　任	工学系事務部情報科学研究院へ
R2.10. 1	転入	菊　地　修　平	一般職員	病院経営企画課から

編❄集❄後❄記

▶本号も幅広い低温研の研究内容をお届けできました。お楽しみいただけますと幸いです。2021年が明るい展望が拓ける一年となりますように！（山口）

▶記念すべき50号の発行に携わることができたこと、大変喜ばしく思います。寒さにもコロナにも負けず、すがすがしい気持ちで新年を迎えたいですね！（大場）

▶言いたいことは山口先生と大場先生が言ってくださったのでありません。2021年、良い年になりますように！（滝沢）

▶コロナ禍の中、宇宙、海洋など多くの研究が紹介されております。是非ご覧ください。（事務部総務担当）

低温研ニュース第50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、大場　康弘、滝沢　侑子、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