ILTS
低温研ニュース
2021年12月
No.52

（上）雨竜研究林の（旧）フラックスタワーから母子里盆地を望む
（下）（旧）母子里融雪観測室と朝日に輝く周辺の森の風景
（撮影：渡辺　力）

Research

宇宙の氷微粒子は球状か?
——透過型電子顕微鏡による構造・形態の解明——
（香内　晃）……2

日本の衛星マイクロ波放射計AMSRシリーズによる海氷観測
（江淵　直人）……6

電線による効率化：メタン菌の巧みな電子管理術
（渡邉　友浩）……10

People……14

Report

利尻山ヤムナイ沢雪渓で調査を実施
（日下　稜）……21

Publication／Press Release／News

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

宇宙の氷微粒子は球状か？
――透過型電子顕微鏡による構造・形態の解明――

雪氷新領域部門　香内　晃

宇宙の氷微粒子は球状と仮定されてきた

極低温（-263℃）の星間分子雲[1]には、水（H_2O）、二酸化炭素（CO_2）、一酸化炭素（CO）などを含む直径1μmに満たない氷微粒子があります。これらの氷はすべて非晶質で、核となる有機物に覆われた珪酸塩のまわりを玉ねぎ状に（＝同心円状に）取り囲んでいると考えられてきました（図1）。また、原始惑星系円盤[2]ができた際には、COから順番に結晶化・昇華が起り、玉ねぎ構造は維持されると考えられてきました。このような仮定のもとに、多くの天文・惑星科学的現象が議論されてきました。

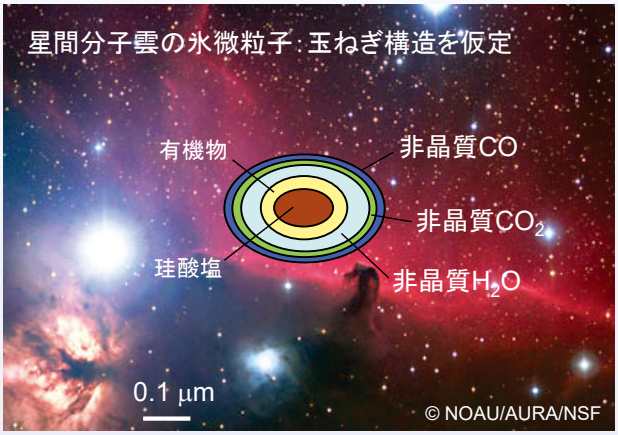


図1　これまで考えられてきた星間分子雲の氷微粒子の模式図。

一例として、原始惑星系円盤における微粒子の衝突過程を考えてみましょう。微粒子同士が衝突・付着して大きくなり、やがて惑星まで成長したという考えが通説となっています。したがって、微粒子同士が衝突したときに、それらが付着するか、それとも反発や破壊が起こるかは、惑星科学では非常に重要な根本的な課題です。これまで、微粒子の衝突・付着は、次のように考えられてきました（図2）。球状の微粒子が速度vで衝突すると、その運動エネルギーを微粒子同士の「ころがり」などで逃します。運動エネルギーをうまく逃すことができると、めでたく微粒子は付着し、微粒子は成長できます。ところが、衝突速度が大きくなり、ある衝突速度（「臨界衝突速度」と呼ばれています）を超えると、微粒子は反発し、付着しません。これが微粒子の成長が起こるかどうかを決める指導原理になります。このような考えのもと、球状の粒子（珪酸塩、氷など）を用いて多くの衝突実験がおこなわれ、「臨界衝突速度」が存在することが確かめられました。それ以降、ずっとこの指導原理に従った議論が続いています。

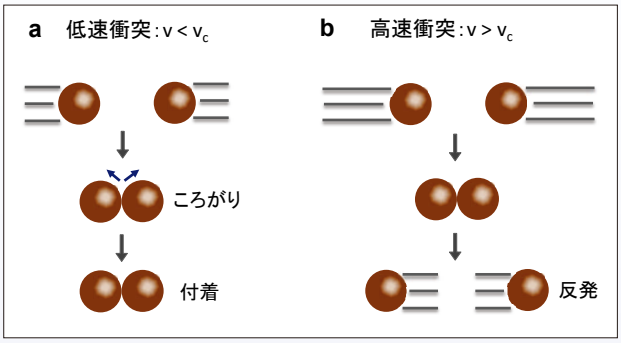


図2　球状の微粒子同士が衝突したときの挙動。衝突速度が臨界衝突速度Vc以下の場合（a）、運動エネルギーが粒子の「ころがり」などで散逸され、粒子同士が付着する。衝突速度が臨界衝突速度Vc以上の場合（b）、運動エネルギーを十分に散逸することができず、微粒子は反発する。

「微粒子は球状である」という仮定が妥当かどうかは、私たちの身の回りで起こる結晶の生成を考えてみると、ある程度類推することができます。たとえば、冷凍庫で製氷皿を用いて氷を作る場合は、結晶集合体の外形は製氷皿と同じになります。いっぽう、雪結晶ができる場合は、きれいな六方対称の結晶になります。宇宙でできる氷が、雪結晶と同じように、気相成長（気体が直接凝縮して固体になる）であることを考えると、これまで天文学・惑星科学で根拠もなく仮定されてきた「氷微粒子は球状である」は少なくとも氷が結晶の場合は疑わざるを得ません。私たちは、本当にこの仮定が正しいのかどうかを実験的に調べることにしました。

超高真空極低温透過型電子顕微鏡を用いた観察

星間分子雲の環境（極低温、超高真空）で種々の組成の氷を作り、それを観察することができる超高真空極低温透過型電子顕微鏡を開発しました。この透過型電子顕微鏡の詳細は昨年の低温研ニュース（2020年6月、No.49、P2）をご覧になってください。氷微粒子の形は結晶と非晶質で大きく異なる可能性がありますので、

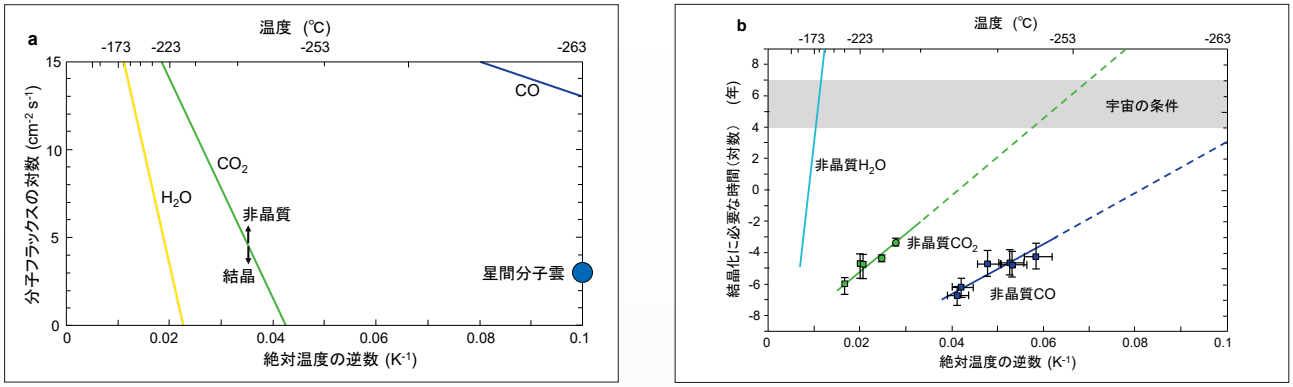


図３　(a) 宇宙で結晶ができるか非晶質氷ができるかを判別するダイヤグラム。それぞれの線より分子のフラックスが大きいと非晶質の氷ができ、フラックスが小さいと結晶ができる。星間分子雲における分子のフラックスは青丸なので、星間分子雲では、CO は結晶が、CO_2 と H_2O は非晶質氷ができる。(b) 非晶質氷が結晶化するために必要な時間。10^5 年の場合、非晶質 CO_2 と非晶質 H_2O の結晶化温度は、それぞれ、-256℃と -185℃である。

まず、星間分子雲で H_2O、CO_2、CO が固体（以下、氷）になったとき、できた氷が結晶か非晶質かを決めるダイヤグラムを作成しました（図３a)。基板へ入射する分子のフラックス（単位時間・単位面積あたりに入射する分子の数）が小さいと、基板表面上の分子は自由に拡散でき、結晶として安定な位置に動くことができます。いっぽう、分子のフラックスが大きいと、基板表面上の分子が安定位置を見つける前に次の分子が入射して邪魔をするため分子は動けなくなってしまい、結晶になることができずに非晶質となります。したがって、このダイヤグラムを作成するためには、分子の表面拡散係数を測定することが重要になります。この図から、星間分子雲の条件で氷ができるとき、H_2O と CO_2 は非晶質になり、CO は結晶になることが分かりました。次に、非晶質の氷が結晶化するために必要な時間を測定しました（図３b)。一般に、高温だと短時間で結晶化しますが、低温だと長時間を要します。逆に、この図から宇宙の時間スケール（たとえば、星間分子雲で氷ができる時間や原始惑星系円盤で加熱に要する時間。代表的には 10^5 年）でみたときの結晶化温度（ひいては氷微粒子の形状変化）がわかります。

さらに、できた氷の構造（結晶・非晶質）と形態（薄い膜状・島状）を透過型電子顕微鏡で直接観察しました（図４)。図３a から、星間分子雲の条件で固体 CO が生成されるときは、CO 結晶ができることが分かりましたので、その過程を観察しました。その結果、CO 結晶は３次元の（ごろっとした）島状になり、基板である非晶質 H_2O への「ぬれ[3)]」が悪いことが分かりました（図４a)。いっぽう、CO_2 と H_2O は非晶質氷が生成されることが分かりましたので（図３a)、まず、-263℃で非晶質の氷を作り（一様な薄膜になります)、それを加熱したときにどのように結晶化が起きるかを観察しました（図４

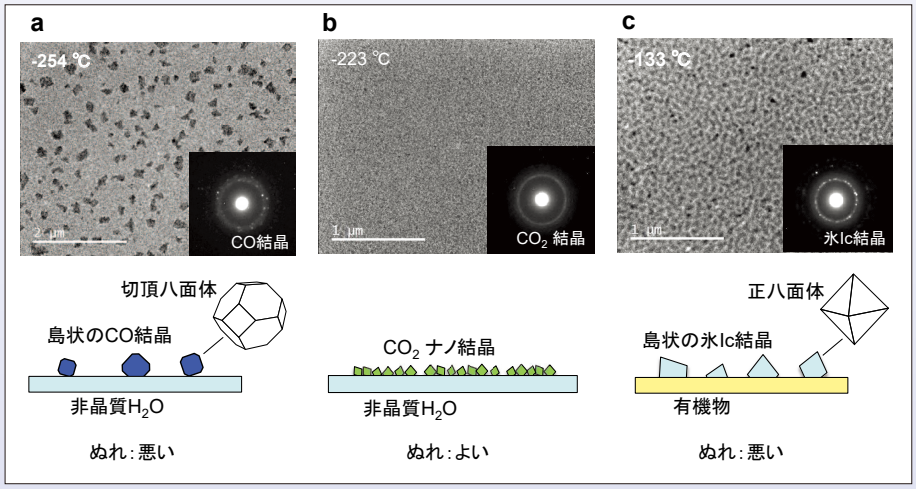


図４　蒸着した CO 結晶（a)、非晶質 H_2O・非晶質 CO_2 を加熱してできた氷 Ic 結晶（b)・CO_2 結晶（c）の透過型電子顕微鏡写真・電子回折像とその模式図。CO 結晶（a）と氷 Ic 結晶（c）は、３次元の島状になり（コントラストの強い（＝黒色部分）が結晶に相当し、グレー部分は非晶質の基板を示す)、それぞれの基板（非晶質 H_2O と有機物）に対する「ぬれ」が悪いことが分かる。いっぽう、CO_2 ナノ結晶（サイズが 10 nm 程度と小さいため、コントラストは弱く画像だけからは結晶の存在が分からないが、回折像から結晶の存在と結晶サイズが分かる）は、非晶質 H_2O に対する「ぬれ」がよいことが分かる。

b, c)。すると、CO_2 ではナノメートルサイズの結晶になり、基板である非晶質 H_2O への「ぬれ」が非常によいことがわかりました（図４b)。いっぽう、H_2O では、３次元の島状になり、基板である有機物への「ぬれ」が悪いことが分かりました（図４c)。次節以降では、これらの実験結果をもとに、星間分子雲と原始惑星円盤における氷微粒子の形状とその天文学・惑星科学的意義をみていきます。

星間分子雲の氷微粒子

星間分子雲でできる氷の組成（主成分）は、星間分子雲の形成時から時間とともに H_2O、CO_2、そして CO と変化することが知られています。そのため、図１に示したような微粒子の構造がしばしば仮定されてきました。このとき、それぞれの分子は極低温のため表面拡散できず、非晶質の氷になると暗黙に仮定されました。しかしながら、私たちの研究結果を考慮すると異なる描像となります。珪酸塩のコアはこれまで球状と仮定されてきましたが、惑星間塵や彗星の微粒子が不定形であることから、不定形（球形でない角ばった形）とするのが妥当でしょう。珪酸塩の表面にできる有機物は、その形状に沿うように珪酸塩の形に従ったものになるでしょう。そしてこの上に最初にできる非晶質 H_2O も下地の有機物の形に沿ったものでしょう。次にできる CO_2 は、できるときは非晶質ですが、10^5 年という、分子雲の年齢（$>10^6$ 年）に比べると短時間で結晶化しますので、すぐに結晶になると考えられます。また、CO_2 は非晶質 H_2O に対して「ぬれ」がよいので、非晶質 H_2O に取り込まれたナノ結晶になると考えることができます。最後に凝縮する CO は結晶になります（図３a)。CO 分子の非晶質 H_2O 上での表面拡散が非常に速く、かつ、CO 結晶は非晶質 H_2O に対する「ぬれ」が悪いので、１個の CO 結晶になるはずです。多数の CO 結晶ができるよりは、１個の CO 結晶になった方が系全体の自由エネルギーが小さくなるからです。このようにして、分子雲に存在する氷微粒子の形状は、図５左下に示すようなものになります。これまでの仮定とは大きく異なることが一目瞭然です。非晶質 H_2O と CO 結晶という異なる物質の表面が常に共存している状況になっています。

ここまで、氷微粒子自体の成長について説明をしてきましたが、ここからは氷微粒子の表面で起こる化学反応について、新たな描像を紹介します。従来の仮定（玉ねぎ構造）では説明できないことが、よりよく説明できるようになる例もあります。なお、微粒子表面での化学反応によって様々な分子・物質が作られますので、微粒子表面での化学反応は宇宙における分子・物質進化の議論

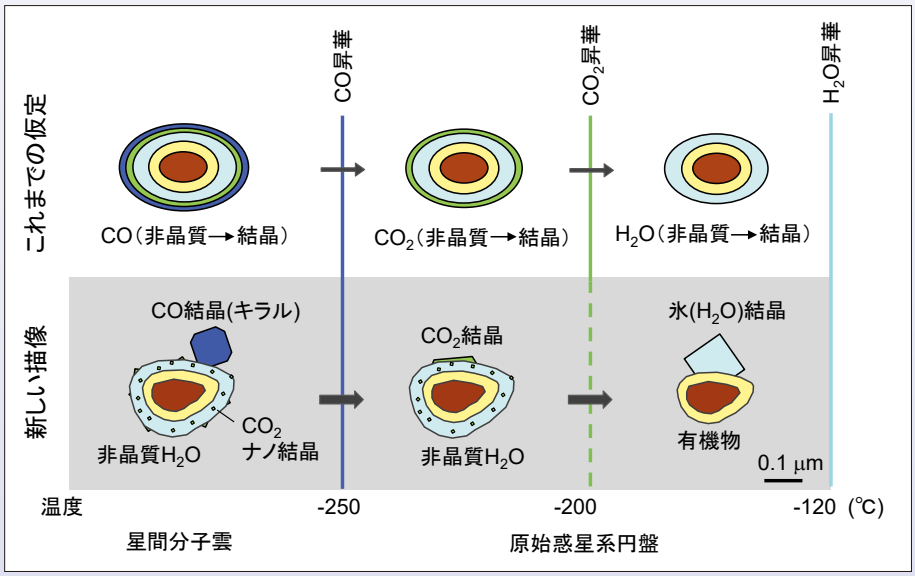


図５　星間分子雲の氷微粒子が原始惑星系円盤で加熱されるときの微粒子の形態変化。微粒子の最表面にある物質の名前が書いてある。これまでは、玉ねぎ構造が仮定され、非晶質氷の結晶化・昇華を順番に繰り返し、結晶・非晶質にかかわらず、すべて球状（玉ねぎ構造）であると仮定されてきた。しかし、本研究によってその描像は大きく異なることが分かった。非晶質 H_2O の表面にあったナノ CO_2 結晶は、温度上昇に伴い、薄い１個の CO_2 結晶になる。さらなる温度上昇で非晶質 H_2O は結晶化し、１個の氷 Ic 結晶になる。

において大変重要になります。

1）異なる表面化学反応が同時に、しかも長時間にわたって進行します。非晶質 H_2O と CO 結晶では、それらの表面に対する原子・分子・ラジカルの吸着・表面拡散が大きく異なるからです。前者では、水素原子の付加反応がメインとなる一方で、後者では水素原子の付加反応は起こらず C、N、O 原子の付加反応が進む可能性があります。

2）表面化学反応で発生したエネルギーや紫外線照射によって、原子・分子・ラジカルが極低温にもかかわらず蒸発する現象が知られています。これまでのように玉ねぎ構造を仮定すると、1種類の分子しか蒸発しないことになります。ところが、私たちのモデルに従うと、異なる種類の分子が同時に蒸発しても構いません。実際の天文観測によると、H_2O と CO の双方が同時に観測されていますので、私たちのモデルを支持する根拠の一つになると考えています。

3）図5左下に示す CO 結晶は、水晶のように右手系と左手系の両方の構造をとりうるキラル[4]な結晶であり、宇宙で最初にできたキラルな結晶であると言えます。もし、CO 結晶が最初にできるとき、右回りか左回りかのどちらかの円偏光[5]が星間分子雲に照射されると、片手系だけの CO 結晶ができる可能性があります。そうすると、CO 結晶表面で、不斉吸着[6]や不斉合成[7]が起きる可能性も出てきます。これまで、宇宙で最初にできるキラルな結晶は進化した天体でしかできない水晶（右水晶と左水晶がある）と思われてきましたので、不斉の起源に関する議論が星間分子雲の段階まで遡る可能性が出てきたと言えます。今後の研究の進展に期待しましょう。

原始惑星系円盤の氷微粒子

星間分子雲の氷微粒子が原始惑星系円盤で加熱されると、図5下のように形態が変化します。まず、CO 結晶が最初に昇華し、非晶質 H_2O の表面と内部に CO_2 ナノ結晶が存在する状態になります。もう少し温度が上がると、非晶質 H_2O の表面上の CO_2 分子が自由に拡散できるようになり、ナノ結晶がなくなり、1個の薄板状の CO_2 結晶になります。さらに温度が上がると、CO_2 結晶の昇華、非晶質 H_2O の結晶化が起こります。CO 結晶と同じように、H_2O 分子の有機物基板上での表面拡散が速く、かつ氷 Ic[8] 結晶の有機物基板に対する「ぬれ」が悪いので（図4c）、1個の氷 Ic 結晶が有機物に付着したような形状になります（図5右下）。このように、原始惑星系円盤の氷微粒子は、これまで仮定されてきた玉ねぎ構造とは大きく異なることが明らかになりました。

そうすると、図2に示したような球同士の衝突は全く起こらないことになります。つまり、臨界衝突速度以下では「ころがり」によって運動エネルギーを散逸して、微粒子同士が付着するという、これまでの惑星科学の指導原理が役に立たないことが明らかになったのです。衝突・付着現象の抜本的な見直しが必須であると言えます。今後の進展に期待しましょう。

語句説明

1）星間分子雲…星間ガスと固体微粒子からなる周囲よりガス密度が高く温度の低い（-260℃程度）星雲。ガスは水素分子が主成分であり、固体微粒子は珪酸塩、有機物、氷（H_2O、CO_2、CO などを含む）からできている。固体微粒子が背後の星の光をさえぎり、可視光で観測すると真っ黒に見えるので、暗黒星雲と呼ばれることもある。

2）原始惑星系円盤…星間分子雲が収縮し中心部に星（恒星）ができる際に、星の周囲にできるガスと固体微粒子からなる円盤。この中で、固体微粒子が衝突・付着成長して、最終的には惑星が形成される。

3）ぬれ…一般的には、液体が固体表面にあるときに、液体がどの程度固体表面になじむかを表す用語。ぬれが悪いと、液体は球状になり、ぬれがよいと薄い膜状になる。本稿ではこの概念を固体上の固体（非晶質 H_2O 上の CO 結晶など）に適用している。

4）キラル…ある物体の鏡像が重なり合わない性質のこと。右手・左手、L-アミノ酸・D-アミノ酸、右水晶・左水晶がその例。

5）円偏光…光の電場成分（および磁場成分）の振動が、光の進行方向に垂直な面内で回転し、その振幅が向きによらず一定である状態の光。回転方向によって右回りと左回りの円偏光がある。

6）不斉吸着…キラルな分子の片方だけが固体表面に吸着する現象。

7）不斉合成…キラルな分子の片方だけを選択的に合成すること。

8）氷 Ic…酸素原子の配列はダイヤモンドと同じで、水素原子の配列は乱れた状態にある立方晶系の結晶。熱力学的には準安定状態にある。

日本の衛星マイクロ波放射計AMSRシリーズによる海氷観測

江淵　直人

衛星マイクロ波放射計による海氷観測

人工衛星をプラットフォームとしたリモートセンシングによる地球観測は 1970 年代から本格的に始まり、これまで数多くの衛星・センサが利用されてきました。その観測原理は、衛星に搭載したセンサを用いて、地球から自然に放射される電磁波の信号を受信したり、センサから地球に向かって電磁波を発射し、センサへ戻ってくる信号を受信したりすることによって地球表面および大気の諸パラメータを推定するものです。宇宙空間にある衛星から、地球の大気を通して地球表面を観測するために、大気の透過率が高い（いわゆる「大気の窓」と呼ばれる）可視域、赤外域、マイクロ波域の電磁波を用います。極域・高緯度域に分布する海氷域は、温暖化などの気候変動の影響を受けて非常に大きく変動することが知られていますが、現場へのアクセスが難しく、観測条件も厳しいため、広範囲にわたる現場観測を行うことは非常に困難です。それに対し、衛星観測は、短時間に広範囲を長期にわたって繰り返し観測できるため、海氷域変動のモニタリングの重要な手段となっています。衛星リモートセンシングの原理や海氷域の衛星観測の詳細については、日本リモートセンシング学会（2011）や低温科学研究所（2015）などを参照ください。

衛星搭載マイクロ波放射計は、人工衛星に搭載されたセンサによって、地球の表面や大気からのマイクロ波放射を複数の周波数、偏波（電磁波が空間を伝搬するとき電界の振動する方向）で受信し、様々な物理量を観測するものです。可視域のセンサは、太陽光のない夜間や雲が存在する場合には地球表面を観測することができませんし、赤外域のセンサは、夜間は観測可能ですが、可視域同様、雲が存在する場合は観測できません。それに対して、マイクロ波放射計は、マイクロ波帯の電波を使うため、雲の影響を受けず、昼夜ともに観測が可能という利点があります。また、極夜や悪天候など観測条件の厳しい海氷域でも、広い範囲を繰り返し観測できますので、全球の海氷域の連続的な観測にとって非常に有効な手段です。

地球上の様々な物体から放射されるマイクロ波帯の放射強度は、その物体の温度や形状、電気的特性などに依存します。マイクロ波放射計によって観測された放射輝度温度（放射強度を温度の次元で表したもの）の海氷と海面による違いから、海氷域と海面とを識別することが可能です。しかしながら、マイクロ波放射計は空間分解能が粗い（～ 10km）ため、可視・赤外放射計（空間分解能 1km 程度以下）に比べて、細かい海氷の分布を捉えることはできません。そこで、海面の単位面積あたりに海氷が占める割合を「海氷密接度」と定義し、マイクロ波放射計の輝度温度観測から、周波数および偏波による輝度温度の違いを利用して海氷密接度を算出しています。マイクロ波放射計によって観測された海氷密接度により、全球、日単位での海氷分布変動の把握が可能になりました。海氷密接度の観測データは、海氷に関連する環境変動の研究のみならず、現業気象予報数値モデルへの入力データや船舶航行のための基礎情報としても利用されています。

本稿では、日本が開発した高性能マイクロ波放射計 AMSR（Advanced Microwave Scanning Radiometer）シリーズによる海氷観測とデータ利用について概説します。

日本のマイクロ波放射計 AMSR シリーズ

日本が開発したマイクロ波放射計の歴史は、1987 年打ち上げの海洋観測衛星 MOS-1（Marine Observation Satellite-1）に搭載されたマイクロ波放射計 MSR（Microwave Scanning Radiometer）にさかのぼります。その後、2002 年に AMSR を搭載した日本の「みどり-II」（ADEOS-II, Advanced Earth Observing Satellite-II）衛星、AMSR-E を搭載した NASA の Aqua 衛星が打ち上げられました。AMSR はアンテナ開口径 2m で、6.9 ～ 89GHz の 7 周波、2 偏波（鉛直、水平）のマイクロ波放射計で、毎分 40 回転のコニカルスキャン（アンテ

ナを回転させて衛星の飛行とともに地球表面を連続的に走査する方式）によって 1600㎞の観測幅を実現しました。マイクロ波放射計の空間分解能は、観測周波数とアンテナの口径に大きく依存し、アンテナが大きいほど高い空間分解能が得られます。それまでのマイクロ波放射計のアンテナ開口径は、ほとんどが 1m 以下だったのに対し、AMSR の開口径 2m は画期的でした。AMSR-E は AMSR とほぼ同じ設計で、衛星への搭載性のためアンテナ開口径は 1.6m でした。AMSR は、2m の大口径アンテナによる高分解能化と高精度校正の実現によって、当時「世界最高性能」のマイクロ波放射計と認識されていました。残念ながら AMSR は、衛星本体の故障のため、わずか 10 か月の短命に終わりましたが、AMSR-E は、9 年以上にわたって観測を続け、貴重なデータを取得しました。

AMSR および AMSR-E の後継機として、「世界最高性能」を引き継ぐマイクロ波放射計 AMSR2 を搭載した「しずく」（GCOM-W, Global Change Observation Mission - Water）衛星が 2012 年に打ち上げられました（図 1）。AMSR2 のアンテナ開口径は AMSR と同じ 2m で、周波数・偏波は AMSR-E と同じ 6 周波（6.9/7.3、10.65、18.7、23.8、36.5、89.0GHz）・2 偏波（鉛直、水平偏波）ですが、電波干渉対策として 7.3GHz が追加されました。AMSR2 の詳細については、Imaoka et al. (2010) を参照ください。

図 1　マイクロ波放射計 AMSR2（中央の円形のアンテナおよびその下の金色の部分）を搭載した日本の地球観測衛星 GCOM-W（©JAXA）。

AMSR2 の標準プロダクトとして、輝度温度、鉛直積算水蒸気量（可降水量）、鉛直積算雲水量、降水量、海面水温、海上風速、海氷密接度、積雪深、土壌水分量の 9 つのパラメータが JAXA の G- ポータル ウェブサイト（JAXA G-Portal: https://gportal.jaxa.jp/gpr/）から公開されています。また、気象予報や水産業のために準リアルタイムでのデータ配信も行われています。このプロジェクトの中で、筆者は、海上風速プロダクトの精度検証を担当するとともに（Ebuchi, 2017）、プロジェクト・サイエンティストとして、サイエンスチームのとりまとめを行っています。AMSR2 の観測データは、気象学、海洋学、気候学など広い研究分野、特に、気候変動と全球水循環に関する研究に加えて、気象予報、災害監視、水産業、海上交通などの現業分野でも幅広く利用されています。

AMSR シリーズの海氷観測に対する貢献

図 2 は AMSR2 によって捉えられたオホーツク海の海氷密接度（海面に占める海氷の面積の割合）の一例です。海氷域がオホーツク海北西部の陸棚域から、サハリン東岸、北海道周辺に分布している様子が分かります。図 3 は、AMSR2 で観測された南極・北極の海氷密接度の例です。10 月は、南極では最も海氷域が拡大し、逆に北極では最も縮小する時期にあたります。このように、衛星搭載マ

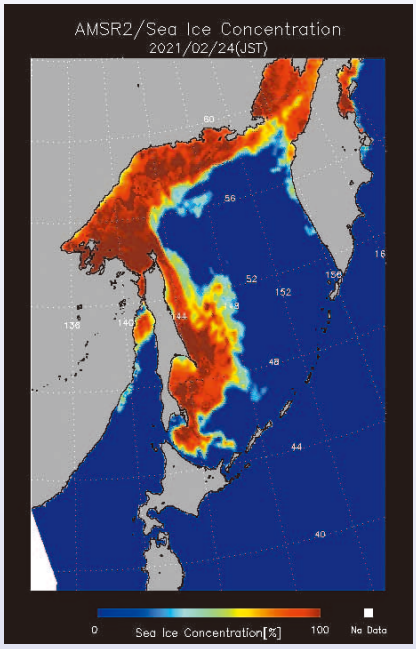


図 2　AMSR2 で観測されたオホーツク海の海氷密接度の分布の例（2021 年 2 月 24 日）。下のカラーバーで示した色が海氷密接度の値（単位 %）に対応する。（JAXA/EORC 提供、https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/adeos2/seaice/seaice_v2.cgi）。

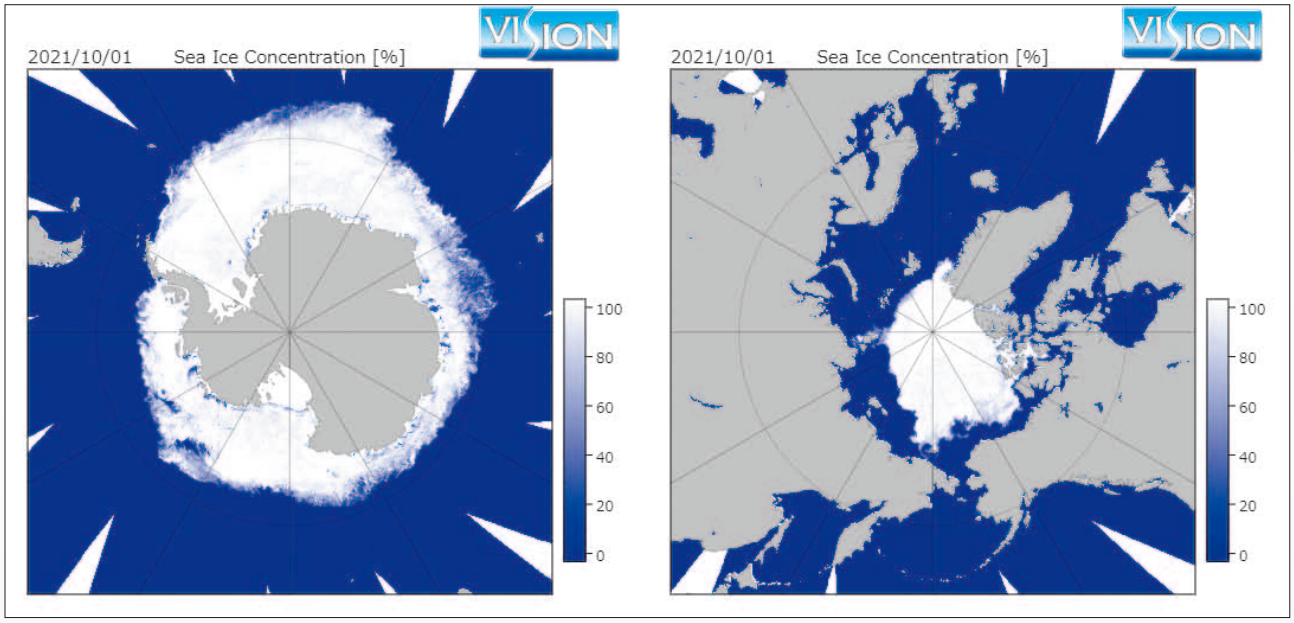


図 3　AMSR2 で観測された南極・北極の海氷密接度の例（2021 年 10 月 1 日）。右のカラーバーで示した色が海氷密接度の値（単位 %）に対応する。（国立極地研究所 Arctic Data archive System (ADS) で作成）。

イクロ波放射計の観測データを利用すれば、日ごとの海氷域の変動をモニターすることが可能です。図 4 は、AMSR シリーズを含む歴代のマイクロ波放射計の観測データを利用して作成された北極海の海氷域面積の経年変化です。1978 年にマイクロ波放射計による全球観測が始まって以来、北極海の海氷域面積の減少傾向が続いていることが示されています。2012 年 9 月には史上最少面積を記録し、近年の夏季もそれに近い値が観測されました。このように、マイクロ波放射計は、両極域の海氷の長期変動のモニタリングには不可欠な観測手段で、その歴史の中で、日本の AMSR シリーズは大きな貢献を果たしてきました。

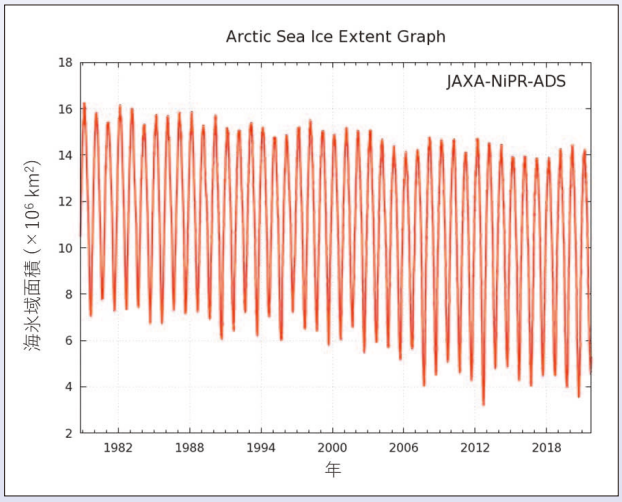


図 4　歴代のマイクロ波放射計の観測データから作成した北極海の海氷域面積の経年変化。（国立極地研究所 Arctic Data archive System (ADS) よりダウンロード、加筆）。

海氷密接度以外にも、AMSR シリーズを含むマイクロ波放射計の観測データから海氷の様々なパラメータを算出する試みも行われています。例えば、低温研･海洋･海氷動態分野では、AMSR シリーズの観測データを用いて薄氷域の氷厚を推定するアルゴリズムを開発し、推定された薄氷厚に基づく年間海氷生産量の見積もりを行っています（Nakata et al., 2021 など）。その一例を図 5 に示します。南極沿岸のポリニヤ域での海氷生産量が大きいことが分かります。薄氷域の海氷生産量は、海氷生産に伴って排出される高密度水を起点とする海洋循環のメカニズムを解明するための重要な情報をもたらします。

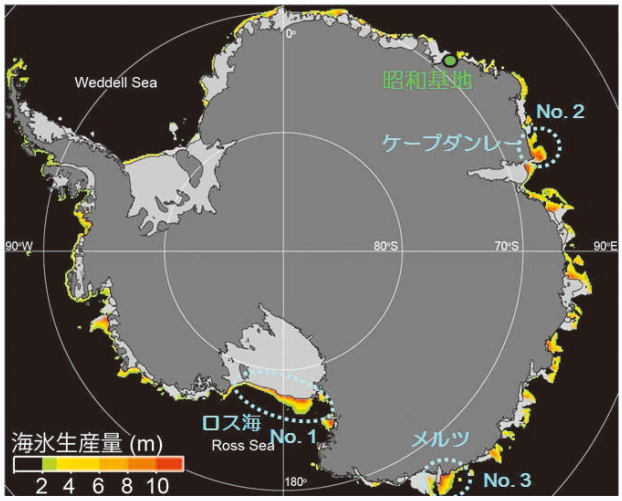


図5　マイクロ波放射計データをもとに見積もられた南極周辺の海氷生産量（大島慶一郎教授提供）

後継機 AMSR3 へ向けて

現在、AMSR2 は設計寿命の 5 年を超えて後期利用段階にあり、10 年目の運用に入っています。現時点で、衛星に搭載された燃料には十分余裕があり、また、衛星、センサとも大きな異常の兆候は見られませんが、観測継続の先行きは見通せない状況でもあります。そこで、JAXA は、後継機 AMSR3 の開発に着手しました。AMSR3 は、温室効果ガスを観測するセンサ TANSO-3（Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation）とともに、GOSAT-GW（Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle）衛星に搭載される予定です。2023 年度中の打ち上げを目指して開発が進められています。

AMSR3 は、基本的には、AMSR2 と同じアンテナ開口径、周波数、偏波を引き継ぐとともに、降雪量観測および水蒸気量の鉛直分布観測を目的とした G- 帯チャンネル（165.5GHz、183.3 ± 7GHz、183.3 ± 3GHz、いずれも鉛直偏波）および高分解能海面水温観測のための 10.25GHz、帯域幅 500MHz、鉛直・水平偏波チャンネルが新たに追加されました。これにより、観測の継続性を担保するとともに、新しいパラメータの観測にもチャレンジする設計になっています。2002 年打ち上げの AMSR、AMSR-E から始まり、2012 年打ち上げの AMSR2 と続く日本のマイクロ波放射計観測は、2023 年度打ち上げ予定の AMSR3 によって約 30 年間にわたると期待され、気候変動を含む長期のデータ解析に耐える貴重なデータセットをもたらすことになるでしょう。

引用文献

日本リモートセンシング学会編 , 2011: 基礎からわかるリモートセンシング . 理工図書 , 319 pp.

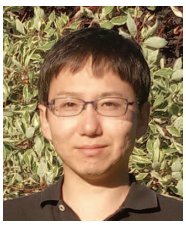
低温科学研究所編 , 2015: 低温科学便覧 . 丸善出版 , 383 pp.

Ebuchi, N., 2017: Evaluation of marine surface wind speed observed by AMSR2 on GCOM-W. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 10(9), 3955-3962, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2685432.

Imaoka, K., M. Kachi, H. Fujii, H. Murakami, M. Hori, A. Ono, T. Igarashi, K. Nakagawa, T. Oki, Y. Honda, and H. Shimoda, 2010: Global Change Observation Mission (GCOM) for Monitoring Carbon, Water Cycles, and Climate Change, *Proc. IEEE*, 98(5), pp. 717-734, doi: 10.1109/JPROC.2009.2036869.

Nakata, K., K. I. Ohshima, and S. Nihashi, 2021: Mapping of active frazil for Antarctic coastal polynyas, with an estimation of sea-ice production. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091393, doi:10.1029/2020GL091393.

電線による効率化：メタン菌の巧みな電子管理術



渡邉　友浩

メタンを生じる微生物「メタン菌」

2021 年 9 月下旬、私は山梨県北杜市のダム湖の湖上にいました。調査地点の水深は約 40 メートル。採水器具を深部に向かって投入。ほどなくして、湖の底から多数の泡が浮上してきました。沼気として知られるこのガスの主成分はメタンです。深部の水温は 5℃。暗黒の低温水塊には酸素分子がありません。無酸素環境では、腐敗した物質に微生物が作用することでメタンが生じます。この微生物は、メタン生成古細菌（以下、メタン菌）と呼ばれる古細菌の一種です。メタン菌の代謝から年間 10 億トンのメタンが地球上で生じていると推定されています。メタンは再生可能なエネルギー源として魅力的なバイオ燃料です。一方で、メタンは大気中において温室効果ガスとしての性質を持つため、地球環境への影響が懸念されます。この様に、メタン生成代謝を正しく理解することは、持続可能な社会を構築する上で重要です。本稿では、メタン菌の自然環境中での生態から分子レベルでのメタン生成機構までを解説します。

メタン菌の生態

メタン菌は有機物分解の最後の段階に関わる微生物として生態系の根幹を支えています。ここでは、湖を例に有機物の分解過程を解説します。湖の表面の水には大気や光合成から供給される酸素分子（O_2）が溶存しています。有酸素環境において、有機物は O_2 を使った呼吸によって分解（酸化）されます。呼吸は、生物がエネルギーを合成するために行います。O_2 を呼吸に使うと水分子が生じます。O_2 と水分子の酸化還元電位（E_0'）[用語説明 1] は非常に高いので、有機物を還元剤とする反応から多くのエネルギーを生じます。例えば、1 分子の酢酸（CH_3COO^-）を O_2 で完全に酸化すると約－850 kJ の自由エネルギーを発生します。この時の、自由エネルギーの変化を $\Delta G^{0\prime}$ [用語説明 2] といいます。この値がマイナスの反応は自由エネルギーを発生し（発エルゴン反応）、プラスの反応はエネルギーを消費します（吸エルゴン反応）。さて、O_2 は熱力学の観点から生物によって魅力的な呼吸基質であるといえますが、水に溶存しにくい分子です。湖の深部に向かって O_2 の濃度は徐々に下がり、やがて枯渇します。すると、O_2 を使わない呼吸や発酵をする微生物を中心とする生態系が現れます。この生態系における有機物分解はとても複雑な過程ですが、有機物は最終的に酢酸、二酸化炭素、ギ酸、メチル化合物、そして水素ガスなどへと分解されていきます。この還元的な環境において、これらをエネルギー源として生育する微生物がメタン菌です。

メタン菌はどのようにメタンを生じるのでしょうか。現在までに培養されているほとんどのメタン菌は、水素ガス（H_2）と CO_2 からメタン（CH_4）を生じます。すなわち、メタンは H_2 を還元剤、CO_2 を酸化剤とする CO_2 呼吸の副産物として放出されます。メタン菌の生息環境において、4 分子の H_2 と 1 分子の CO_2 から CH_4 を生じる際の ΔG は－17 ～－40 kJ 程度です。メタン菌はこのわずかなエネルギーから細胞膜を介した電気化学的ポテンシャルを形成し、これを利用して ATP（アデノシン三リン酸）を合成して生育しています。無機リン酸と ADP（アデノシン二リン酸）から 1 分子の ATP を生じる反応の $\Delta G^{0\prime}$ が＋30 kJ 程度なので、1 ～2 分子のメタンを生じて 1 分子の ATP を合成できると考えられます。ここで、酢酸を O_2 で完全に燃焼すると－850 kJ の自由エネルギーが生じることを考えると、メタン菌の代謝が生じるエネルギーがいかに少ないかをご理解いただけるかもしれません。水素ガスと CO_2 からメタンを生じるメタン生成代謝は、生態系において極めて重要です。例えば、ある種の細菌は $\Delta G^{0\prime}$ がプラス（吸エルゴン反応）の水素ガス発生型の発酵を行います。この際、同所的に生息するメタン菌が水素ガスを消費し、その濃度をゼロ近くに保つことで発酵細菌の反応の $\Delta G^{0\prime}$ がマイナスに変わることが知られています。

メタン生成代謝

メタン菌はいかにしてエネルギーを合成しているのでしょうか。図１に CO_2 からメタンを生じる代謝機構を示しました。この代謝は CO_2 がホルミル基（–CHO）としてメタン菌の C_1 キャリア―であるメタノフランに固定されることではじまります。ホルミル基は、別の C_1 キャリア―に結合した状態で脱水と２段階の還元反応を経てメチル基（–CH_3）になります。メチル基は、ナトリウムイオンの汲み出しによるエネルギー保存反応と共役して補酵素M（CoM-SH）に転移します。メチル化された補酵素M（CH_3-S-CoM）は補酵素B（CoB-SH）で還元されてメタン（CH_4）とヘテロジスルフィド（CoM-S-S-CoB）を生じます。最後に、ヘテロジスルフィドを還元して補酵素Mと補酵素Bを再生してメタン生成代謝が完結します。この最終反応では、同時に高エネルギー（酸化還元電位が低い）電子が生じ、CO_2 の還元等の反応に使われます。

メタン菌に独自な CO_2 還元固定酵素系

メタン菌は CO_2 を還元固定するために精巧な酵素機構を使います。最初の CO_2 の還元と固定は、ホルミルメタノフラン脱水素酵素（Formylmethanofuran dehydrogenase, Fmd）が触媒します（図１A青色領域）。本酵素にはトンネルで繋がれた２つの活性部位があり、独自の CO_2 還元固定機構が提案されています（Wagner et al., 2016, Science）。CO_2 は第一の活性部位で高エネルギー電子と反応してギ酸（$HCOO^-$）に還元されます。ギ酸はトンネルを通じて第二の活性部位へと導かれ、ホルミル基（－CHO）として固定されます。トンネル内でギ酸が濃縮されることにより、吸エルゴン的な第二の触媒反応（$\Delta G^{0\prime}$ = +15 kJ）を推進すると考えられています。

CO_2 を還元する高エネルギー電子は、メタン生成代謝の最終反応であるヘテロジスルフィド還元反応と共役して生じます。この反応は、フラビン型電子分岐反応（以下、電子分岐反応）と呼ばれ、ヘテロジスルフィド還元酵素（Heterodisulfide reductase, Hdr）複合体が触媒します（図１Aオレンジ色領域）。この反応では、還元剤からの電子のエネルギーが、フラビンにおいて高エネルギー状態と低エネルギー状態に振り分けられます（図２）。この高エネルギー電子は、電子伝達体のフェレドキシンに蓄えられて、メタン生成代謝の最初の反応である CO_2 還元に利用されると考えられていました。

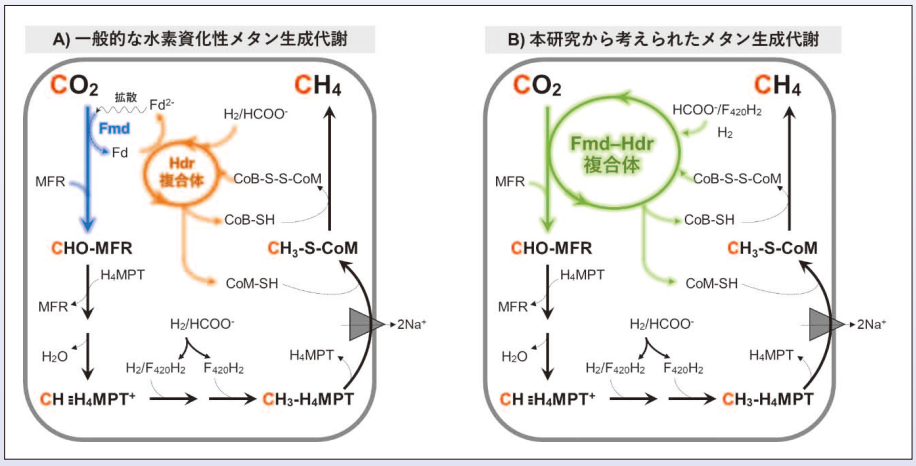


図１　水素ガスと CO_2 からのメタン生成代謝の概略図。A）メタン生成代謝はホルミルメタノフラン脱水素酵素（Fmd）による CO_2 の還元と固定反応で始まる。この反応に必要な高エネルギー電子は、メタン生成代謝の最終反応であるヘテロジスルフィド還元酵素複合体（Hdr 複合体）の電子分岐反応で生じると考えられていた（図２参照）。高エネルギー電子は電子伝達体のフェレドキシン（Fd）に蓄えられた状態（Fd^{2-}）で、細胞内を拡散し、Fmd 反応に使われると考えられていた。B）最新の研究成果から、Fmd と Hdr は電導性タンパク質を介して高次複合体を形成することが分かった。すなわち、細胞内を拡散する電子伝達体のフェレドキシンが無くても、電子分岐反応で生じた高エネルギー電子を直接 CO_2 還元に利用することができる。このことから、水素資化性メタン生成代謝モデルは図１Bのように考えられる。

メタン生成代謝の最初と最後の反応は電導性タンパク質で繋がっていた

私がマックスプランク陸生微生物学研究所で行った研究成果から、メタン生成代謝の最初の反応を触媒する Fmd と最後の反応を触媒する Hdr が、ひとつの巨大な酵素複合体を形成していることが分かりました。*Methanospirillum hungatei* というメタン菌から Hdr を精製すると、ギ酸脱水素酵素（Fdh）と Fmd が一緒に精製されました。この複合体は、電子分岐反応が生じた高エネルギー電子を直接 CO_2 還元に利用することができます（図１Ｂ）。重要なことは、この一連の反応が電子伝達体のフェレドキシンを加えなくても触媒されることです。マックスプランク生物物理学研究所との共同研究で、Fdh-Hdr-Fmd 複合体の立体構造をクライオ電子顕微鏡法で解析しました。得られた構造モデルと生化学実験の結果を総合することで、本複合体の酵素反応機構の一部が分かりました（図３）。先ず、Fdh がギ酸を CO_2 へ酸化して電子を生じます（E_0' ＝ − 430 mV）。この電子は、鉄硫黄クラスター[用語説明３]を介してフラビンへと伝達され（図３青矢印）、フラビンにおいて高エネルギー電子と低エネルギー電子に振り分けられます（図２）。低エネルギー電子はヘテロジスルフィドの還元反応（E_0' ＝ − 140 mV）に用いられます（図３水色矢印）。高エネルギー電子はシャトル鉄硫黄クラスター（図３黒矢印）に伝達されます。本複合体の可動性領域が大きく動くことで、シャトル鉄硫黄クラスターは次の鉄硫黄クラスターの近傍（電子伝達距離）に移動します。ここから電子は Hdr と Fmd を繋ぐ電導性タンパク質の鉄硫黄クラスター通じて CO_2 還元部位に到達します（図３赤矢印）。すなわち、細胞内を拡散する電子伝達体ではなく、電導性タンパク質が高エネルギー電子を運搬しているのです。

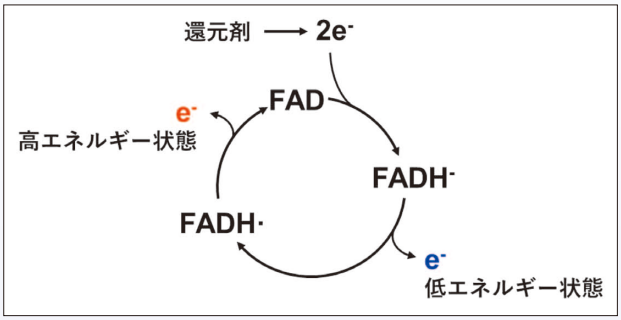


図２　フラビン型電子分岐反応。FAD はフラビンアデニンジヌクレオチド。提案されている反応機構では、FAD が酸化還元電位のより低いセミキノンラジカル（FADH・）を経由することで、高エネルギー状態にある電子を生じる。メタン菌の場合、還元剤は水素ガス（E_0' ＝ − 400 mV）あるいはギ酸（E_0' ＝ − 430 mV）である。低エネルギー電子はヘテロジスルフィドの還元反応（E_0' ＝ − 140 mV）、高エネルギー電子は電子伝達体のフェレドキシンの還元反応（E_0' ＝ − 500 mV）に使われる（Kaster et al., 2011, Proc. Nat. Acad. Sci. USA.）。

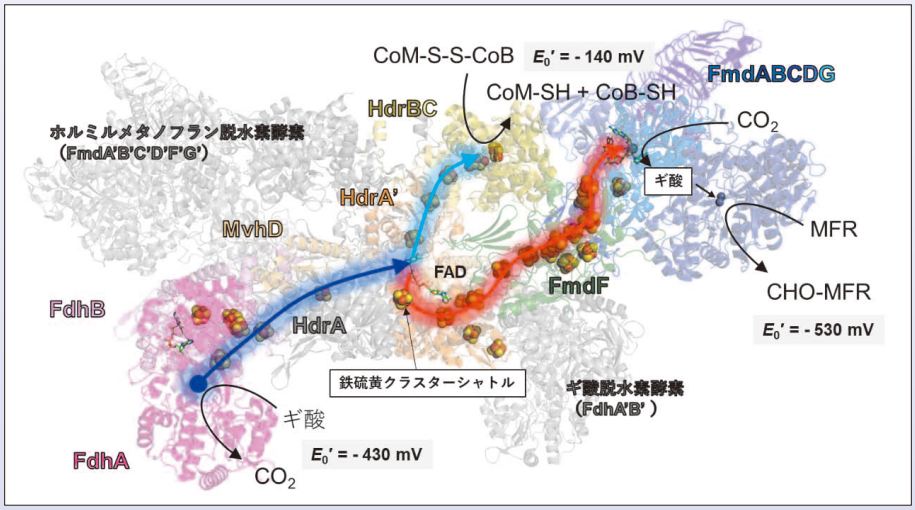


図３　Fdh-Hdr-Fmd 酵素複合体の２量体モデルと本研究で提案する酵素反応機構。青色、水色、赤色の矢印はエネルギー準位の異なる電子の流れを示す。茶色と黄色で示されたボールモデルは鉄硫黄クラスターを示す。

６量体の超巨大構造

クライオ電子顕微鏡画像を詳細に解析すると、Fdh-Hdr-Fmd 複合体には２量体と６量体が存在することが判明しました。２量体の大きさは１メガダルトン[用語説明 4]と巨大です。これが３つ連結した６量体では３メガダルトンに及びます（図４左）。これは細胞質に存在する生体分子としては圧倒的に巨大です。この超巨大複合体において、活性部位は鉄硫黄クラスターで繋がっています（図４右）。６量体では、全ての酵素サブユニットが安定した環状構造をとるため、生体中に存在する形態だと考えられます。Fdh-Hdr-Fmd 複合体の６量体は *Methanospirillum hungatei* というメタン菌から見つかりました。このメタン菌とは系統学的には目レベルで異なる分類群のメタン菌の Hdr 複合体とホルミルメタノフラン脱水素酵素の X 線結晶構造を使って６量体モデルを擬似した結果、６量体環状構造が無理なく得られることが分かりました。このことは、Hdr と Fmd から成る６量体構造は、水素資化性メタン菌に共通するものであると考えられます。

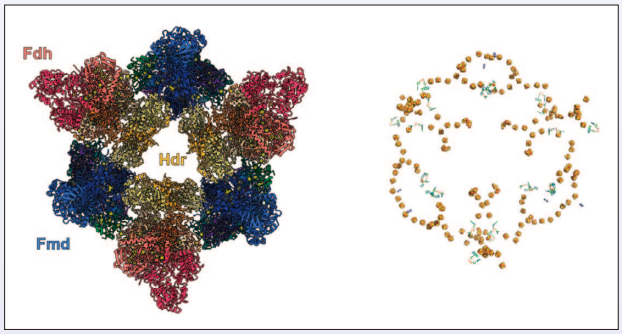


図４　Fdh-Hdr-Fmd 複合体の６量体モデル。右には、鉄硫黄クラスター等の補因子のみを表示した。

超巨大複合体の生理学的意義

今回の私たちの研究により、Hdr と Fmd の複合体構造が詳らかになりました。この複合体では、電子分岐反応で活性化された電子が電導性タンパク質を通じて直接 CO_2 還元部位に導かれます。細胞内を拡散する電子伝達体を使う場合、反応性に富む高エネルギー電子が他の物質と反応し酸化されてしまうという潜在的なリスクがあります。これを回避して貴重な電子を目的とする CO_2 還元部位まで効率的に伝達するために、電導性タンパク質を使って高次複合体を形成すると考えられます。

また、６量体構造には何らかの重要な生理学的意義があると考えています。例えば、高エネルギー電子を複合体内部に蓄える生体電池の様な機能があるのかもしれません。６量体、すなわち同じ酵素サブユニットが６つ存在するので、複合体の一部が損傷してもその機能を維持して酵素の寿命を長くできるのかもしれません。その真の生理学的意義には不明な点が残されていますが、メタン菌が利用可能なエネルギー源に乏しい環境を生き抜く術として進化させた機構であることは確かだと考えています。

用語説明

[1] 酸化還元電位（E_0'）：電気化学反応の電極電位。生物学では pH 7 における半反応として、基準である水素ガスの値と比較した値を使う。電子は負電荷をもつ。よって、より負の値をもつ酸化還元系（還元剤）からより正の値をもつ酸化還元系（酸化剤）へと電子が移る。

[2] $\Delta G^{0\prime}$：G は自由エネルギーを意味する。生物において、自由エネルギーはアデノシン三リン酸（ATP）などとして保存される。Δ は変化を意味する。$^{0\prime}$ は、標準条件下を意味する。よって、標準条件下における自由エネルギー変化を意味する。

[3] 鉄硫黄クラスター：ある種のタンパク質に含まれるもので、その多くは電子伝達機能をもつ。

[4] ダルトン：分子や原子の質量の単位。その値の大きさは、原子量または分子量にほぼ等しい。たとえば、O_2 の質量はおおよそ 32 ダルトンになる。

退職のご挨拶

石井　吉之
（元　水・物質循環部門）

2021 年 3 月をもって北海道大学低温科学研究所を退職いたしました。低温研には 1990 年 1 月 1 日に着任して以来 31 年余の長きにわたりお世話になりました。ひと昔もふた昔も前なら、「大過なく職責を全うすることができたのも皆様のご支援ご協力があっての‥‥」とご挨拶させて頂くところですが、現在のように研究者のモビリティが当たり前のこととして推奨される中では、同じ職場や職責に長期にわたり座り続けること自体が大過だったのかもしれません。しかし、創立 80 周年を迎えようとする低温研の後半 30 年間の遷り変わりを肌で感じることができたのも貴重な経験だったように思います。

赴任当初は研究室の周囲は日本雪氷学会の重鎮ばかりで、研究所イコール雪氷学会と言っても過言ではない程でした。老壮青のバランスも良く、部門をまたいだ研究や新プロジェクトの立ち上げも盛んでした。当時は物理系の融雪科学部門の所属でしたが、その後の改革・改組の荒波にもまれ、寒冷陸域科学部門雪氷循環分野、水・物質循環部門水文気象分野と所属組織が変遷しました。研究内容も時流に逆らうことなく少しずつ変わりましたが、北大雨龍研究林内の 1 km^2 程度の小流域（母子里試験地）を野外研究における実験室と位置づけ、ここでの研究成果を足掛かりとして気候・地形地質・植生の異なる道内、国内、海外での研究を進めるという方針にブレはありませんでした。特に、積雪底面から流出する融雪水の実態や特性については、雪氷学的な注目度はあまり高くなかったのですが、水文学的には融雪期の河川流出機構を決める重要な現象であるにもかかわらず研究実績の少ないテーマでした。母子里試験地では、技術部装置開発室の援助を受けて様々な型式の積雪ライシメーター（写真１）を用いて底面流出量の実測研究を進めました。特に、1990 年代は元職員の松本慎一さんに熱心な支援を頂き、その努力は底面流出の遅れ特性や積雪内浸透速度の雪質依存性についての新しい知見となって実を結びました。2010 年以降は同じく技術部装置開発室元職員の中坪俊一さん、現職員の森章一さん・藤田和之さん達の支援を頂き、積雪表面への模擬降雨散水実験（写真２）を続けました。一筋縄では行かぬ結果ゆえに未完のまま

写真１　更新したての積雪ライシメーター

定年退職になってしまいましたが、我々の研究はその後の他研究機関での同様な実験の呼び水にもなっており、今後も成果を見守って行きたいと思います。また、母子里での気象観測は長らく同僚だった兒玉裕二さんが担当していたのですが、彼が国立極地研究所に異動後は、技術部先端技術支援室の高塚徹さん、千貝健さん、小野数也さん達の援助により厳しい低温・高湿度環境でも欠測なくデータ収録と送受信ができる観測システムや web カメラによるほぼリアルタイム監視体制などを構築して頂きました。このように、母子里試験地での研究推進は技術部の援助あってのもので、母子里での研究支援実績が評価されて技術部の皆さんに北大総長表彰がなされたことは私にとっても大きな喜びでした。また、技術部のみならず、母子里試験地のロジスティクス面では事務部の須藤正季さんの少なからぬご協力を頂きました。多くの皆様のご支援ご協力を頂き、母子里での研究成果は国内外での学会発表や論文発表につながり、一緒に活動した学生達にとっては日本水文科学会の研究奨励賞２件、日本雪氷学会の論文賞１件という成果につながりました。この場をお借りして改めて御礼申し上げます。

コロナ禍に見舞われて早２年が過ぎようとしており、行動制限や活動自粛という混迷状態の中での退職となってしまいました。若い頃、退職を迎える先生方から「研究が楽しくて仕方がなかった」「夜を徹しての実験も苦ではなく反って楽しかった」などと聞いていましたが、現在では、研究体制の規模や予算が大きくなるとともに、必ずしも楽しいだけでは研究を続けにくい一面も出てきました。今後ますます学問分野の離合集散や組織のスクラップアンドビルドが盛んになると思われ、低温研も変わり続けて行かねばならないことでしょう。所内を見回すと、あれほど多かった雪氷学会員も僅か５～６名となり、北海道支部活動や全国大会招致でもマンパワー不足に頭を抱える状態になっています。こうした状況は雪氷学会に限らず、国内の中小の学会に共通する問題です。くしくもコロナ禍によって、学会活動やプロジェクト協議、キックオフ会議・講演会などのオンライン化が一気に進み、国内・海外を問わず、日程確保や予算の心配なしにこれらの会合に参加できる機会が増えました。こうなると学会というものの存在を根底から見つめ直すことも必要となり、コロナ禍で生じた良い面での副産物なのかも知れません。文教政策や研究組織・活動の見直しという荒波の中で、今後も低温研が力強く泳ぎ切って行けることを願っております。長い間たいへんお世話になりました。

写真２　模擬降雨散水実験のようす

低温科学研究所を退任するにあたって

原　登志彦
（元　生物環境部門）

2021 年 3 月 31 日をもちまして無事に低温科学研究所を定年退職いたしました。1996 年 3 月 16 日に着任して以来、25 年 2 週間という長きにわたり低温科学研究所にお世話になり、寒冷圏の植物生態学に関する研究を思う存分行うことができました。これも低温科学研究所にかかわるすべてのみなさまのおかげであり心より感謝申し上げます。

北海道の寒冷圏の植物（赤平市イルムケップ山のダケカバ林）に関する研究を始めたのは、私が東京都立大学理学部に助手として就職したちょうど 2 年後の 1990 年 10 月でした。それ以来 1995 年までは毎年 10 月に北海道に通ってダケカバ林の研究を続けてきましたが、幸いなことに 1996 年からは低温研の教授に着任し地元になった北海道の植物を中心に研究を続けることができました。これまで、北海道大学・雨龍研究林の森林（北方針広混交林やダケカバ林など）、大雪の亜寒帯針葉樹林、ロシア・カムチャツカの北方林、チェコの山地草原など主に植物を中心に寒冷圏の陸域生態系の研究を進めてきました。また、対馬の暖温帯常緑広葉樹林や大山の冷温帯落葉広葉樹林などの大面積長期森林調査の共同研究にもかかわってきました。分析棟が新設されたときには DNA 分析室を、実験棟が改修されたときには世界的にも大変ユニークで寒冷圏の植物が晒される冬の自然環境をほぼ再現できる高照度低温バイオトロンを設計して新設していただくことができました。また、雨龍研究林には 10 年以上長期観測した高さ 30m のフラックスタワーを 2 基設置することもできました。これらの施設を活用し、北海道やカムチャツカの北方林の環境科学に関するプロジェクトを推し進めることができたのも低温研という世界的にもユニークな研究所に在籍させていただいたおかげであると思います。これらのプロジェクトでは低温研の植物生理生化学、微生物生態、氷河、大気化学、水文気象、凍土・自然地理などの研究グループのみなさまとも共同研究が行え新しい研究の幅を広げることができました。

これらの研究の根底には、大学学部生のころより続けてきた「植物個体間の競争」に関する理論の構築がありました（現在も続けています）。「植物個体間の競争」とは、植物の生育にとって必要な資源である光、水、養分などの環境因子をめぐる競争のことで、特に寒冷圏では低温や乾燥で光ストレス（光合成系に対する強い光による傷害）が増幅され北方森林生態系で重要な役割を演じていることを示してきました。

思い起こせば大学 2 年生の頃、信州への旅行で見たシラカバ林の美しさに感動しました（シラカバは低温研の周りやモデルバーン横の並木道にも多くあります）。そのとき、将来はこのような森の研究ができればいいなと漠然と思ったものでした。その 15、20 年後に北海道のイルムケップ山、そして北大・雨龍研究林でダケカバ林（シラカバと同じ *Betula* 属で標高がより高い場所に生育し、見た目はほぼ同じ）の研究を始め、定年まで続けることができ結果的にその思いを叶えることができました（イルムケップ山には今後も毎年継続調査に行く予定です）。

雨龍研究林の調査地の一つに林齢 300 年の北方針広混交林（主要な樹種はミズナラ（落葉広葉樹）とトドマツ（常緑針葉樹）などで、ダケカバ（落葉広葉樹）も交じる）があります。一方、30 年間毎年継続調査してきたイルムケップ山のダケカバ林は、30 年前の調査初年はほぼダケカバのみの純林でした。そこでは最近になってようやくトドマツの実生（芽生え）をちらほら見るようになってきました。しばらく前から所々に見られるようになったミズナラの稚樹も順調に生育しています。ダケカバ林の 30 年の継続調査の結果、雨龍研究林で現在

見られるような林齢 300 年の北方針広混交林の始まりの一端をようやく見られるようになってきました。このような数百年にわたるダケカバ純林から北方針広混交林への変化を生態学では「植生の遷移」と言いますが、その長期間のプロセスはほとんどが状況証拠をつなぎ合わせた推測でした。その長い森林の変化、「植生の遷移」のひとときの変化の期間でも確実に自分の目で見られたことは、低温研で落ち着いて調査研究を長期に渡り続けられたおかげであると思います。この「植生の遷移」は大学院の講義でもよく実例の写真を見せて話したものでした。

低温科学研究所としては今後も目先のことにとらわれず、長い目で見た研究をじっくり腰を落ち着けて続けていただきたいと思っています。今後の低温研のみなさまの研究の進展をお祈りしております。

先に述べたように低温研内の研究グループはもとより、北大・雨龍研究林、北大・地球環境科学、北大・農、茨城大、北九州市大、九州大、群馬大、神戸大、滋賀大、静岡大、信州大、玉川大、筑波大、東京都立大、東大、東北大、徳島大、名古屋大、広島大、明治大、山口県立大、早稲田大、国環研、JAMSTEC、森林総研、道林試、農環研、環境科学研（六ケ所村）、アメリカ・アラスカ大、同・コロラド州立大、同・プリンストン大、イギリス・イーストアングリア大、インド・バナラスヒンドゥー大、オランダ・ユトレヒト大、同・生態研、韓国・慶北大、スイス・ベルン大、チェコ科学アカデミー、チェコ・南ボヘミア大、同・ブルノ大、中国・復旦大、デンマーク・王立獣医農大、ドイツ・ゲッティンゲン大、フィンランド・森林研、ブラジル・国立宇宙空間研、ポーランド・ワルシャワ大、ロシア科学アカデミー、など（記載漏れがあればご容赦願います）の共同研究者のみなさまと多様な共同研究が行えました。また海外からの客員研究員や留学生（イギリス、インド、韓国、スイス、中国、チェコ、ドイツ、ブラジルなど）も多く受け入れて多様な共同研究を行うことができました。このような共同研究が行えたのも、低温研・一般共同研究や外国人客員研究員招聘制度、ポスドク研究員制度、研究支援推進員制度など低温研の充実した研究体制のおかげです。

紙面の都合上、それぞれお名前を挙げることはできませんが、これまで研究室に在籍した大学院生のみなさん、准教授、講師、助教（助手）、秘書、研究支援推進員、客員教授、客員准教授、ポスドク研究員など研究室スタッフのみなさま、国内外の共同研究者のみなさま、低温研のこれまでのすべての研究グループのみなさま、観測・調査や実験用のどんな器具でも作成していただいた技術部のみなさま、そして定年退職後も引き続きお世話になっております低温研事務室のみなさま方に心より感謝申し上げます。どうもありがとうございました。

退職のご挨拶「変わらずこれからも」

平野　大輔
（元　水・物質循環部門）

みなさま、お久しぶりです。2021 年 3 月 31 日付で北海道大学低温科学研究所を退職し、4 月 1 日より情報・システム研究機構国立極地研究所（極地研、東京都立川市）に異動いたしました。異動後のバタバタ続きでご挨拶が遅くなってしまいましたが、今号の低温研ニュースが発行される頃はすっかり雪景色なんだろうなと想像しながら、そして札幌の冬を初めて迎えた当時を思い出しながら原稿を書いております。

低温研には 2016 年 10 月に着任し、4 年半の間、実に多くの方々にお世話になりました。着任当時は、公私ともに右も左も分からぬ状態で、まずは最初の冬を無事に越せるのだろうか…と不安だらけでスタートした札幌生活でした。ですが、子供たちも妻もあっという間に札幌の地に馴染み、たくさんの友達とかけがえのない思い出ができたようです。今でも「札幌にいきたいね〜、雪で遊びたいね〜」と子供たちがことある毎に言っています。誰一人としてゆかりのなかった札幌でしたが、家族共々、大切な時間を過ごすことができました。

さて、低温研在籍時には、水・物質循環部門 海洋・海氷動態分野のメンバーとして、南大洋や北極海の海洋と海氷、海洋と氷床との関わり（相互作用）に関する観測研究を進めてきました。その間、南の方へは 2 度、第 59 次日本南極地域観測隊（JARE、2017 年 11 月〜2018 年 3 月）と水産庁「開洋丸」の南極調査航海（2019 年 1 月〜2 月）、そして北の方へも 2 度、アラスカ州最北バローの沖合北極海（2017 年と 2019 年の 8 月）へと出掛け、様々な観測を実施してきました。思い返すと、観測の準備をし、現場に出かけ、帰ってきて片付け＆次の準備、といったサイクルの中で、あっという間に月日が過ぎ去った気がします。その過程で、伝統ある海洋・海氷動態分野の観測技術や御作法を受け継ぎ、観測研究者としての基盤を固めることができたことは大きな財産となりました。

このように労多くして取得した観測データにはなるべく素直に語らせ、北極バロー沿岸ポリニヤの特殊な動態や、南極氷床と海洋の相互作用などに関する論文を世に出すことができました。どの分野にも共通することと思いますが、観測研究も、論文誌面には決して見ることのできない、たくさんの苦労の上に成り立っています。そして、どんなに偉大な研究者であったとしても、観測研究は決して 1 人ではできません。研究者、技術者、学生、後方支援者、現地カウンターパート、船の乗組員など、いろんな立場の方々との協調なしに観測の成功はあり得ないからです。言葉にすると「あたりまえやん」のことなのですが、これまでの様々な観測経験を通じて、まさに身をもって学んだ大切なことの 1 つです。

さて、案の定、まとまりのないまま折り返しを迎えてしまいました。現在、私は極地研の南極観測センター（兼務で気水圏研究グループ）に所属し、エフォートの半分は南観センターの業務に充てられています。ここでは、JARE の観測オペレーション支援や調整に関わる業務を担当していますが、観測のことをよく理解していることはもちろんのこと、種々の調整の過程では協調（信頼）関係の構築が何より重要です。業務に慣れたとはまだまだ言い難く、日々追われ続けている感じですが、低温研での経験がここでも大いに活かされています。残り半分の時間は、変わらず観測準備しつつ、論文書きつつ、観測研究の活動を行なっています。そして、変わらず多くの低温研の方々と、引き続き一緒に研究をさせていただいております。

最後になりますが、長いようであっという間の低温研での日々は、私にとってかけがえのないものでした。与えられた誌面を埋め尽くすほどの勢いなので、お一人お一人のお名前を挙げることはできませんが、海洋・海氷動態分野、大気海洋相互作用分野、環オホーツク観測研究センター、氷河・氷床分野や、技術部、事務部の皆さんをはじめ、低温研の皆さまには大変お世話になりました。分野や立場を越えて、多くの方々に仲良くしていただき、楽しく充実した低温研生活を送ることができました。とても嬉しかったです。

コロナ禍で自由な往来が困難な昨今の状況ですが、もう少し自由な世界へと戻れた際は、足繁く低温研にお邪魔したいと思っています。変わらず、新棟 1F の海洋動態研究室の前の廊下をウロウロして観測準備をしているかもしれませんが、みなさんにまたお会いできる日を楽しみにしています。5 年前に寄稿した着任のご挨拶（低温研ニュース No.42）を見返すと、その最後には「これまでの、そしてこれからの様々なご縁を大切に、研究・教育活動に精進して参りたいと思います」とありました。これも変わらず、同じ心境です。それでは、今後ともよろしくお願いいたします。

ブイの設置に成功した際の記念写真。白瀬氷河のすぐ目の前の海氷上で。
（JARE59 次隊、チーム ROBOTICA）

着任のご挨拶

箕輪　昌紘
（雪氷新領域部門）

2021 年 8 月より氷河・氷床グループに助教として着任を致しました箕輪昌紘と申します。北海道大学において 2017 年に学位取得後、チリ・アウストラル大学や名古屋大学において研究員として活動をしてきました。数年毎に変わる職場、野外観測など目まぐるしい日々を過ごしていましたが、学生時代を過ごした愛着のある北海道に腰を据えて活動することとなり嬉しく思います。

これまでの研究

世界各地で氷河の縮小が報告され、海面上昇や大気海洋の循環に与える影響が懸念されています。さて「氷河」というとどんな想像をされるでしょうか。アルプスなど山岳地帯にある氷河を想われるでしょうか。実は氷河の中でも、氷河の先端が海や湖に流れ込む氷河「カービング氷河」が大量の氷を保有する南極氷床やグリーンランド氷床を中心に、世界各地に無数に分布しており、顕著な変動を示しています（写真）。私はこれまで、カービング氷河が複数分布する南米パタゴニアを活動の中心に、カービング氷河の変動機構の解明に取り組んできました。

カービング氷河の理解の難しさは、氷河表面での降雪や氷融解による氷質量の変化に、氷河末端での氷山崩壊や末端の端面が海や湖によって融かされる末端消耗プロセスが加わるからです。ですが、氷河末端で失われる氷山の崩壊量はどのくらいか、端面がどれくらい融けているのか、といった基本的な物理量の定量化されていないことに加え、これらのプロセスがどの様に外部の環境（例えば気温や水温など）と関係するのか、そして、気候変動に伴ってどのように変動するのかなど理解が遅れています。氷河氷床変動の将来予測する上でもこの末端プロセスの不確実性が問題視されています。

例えばこれまで、パタゴニアにある全ての主要なカービング氷河において末端からの消耗量を人工衛星データなどを駆使し推定しました。大きな氷損失を示す氷河では末端消耗量が非常に大きく、末端プロセスが氷河変動を制御していることが見えてきました。その他にも、個々の氷山崩壊現象をインターバルカメラ画像や氷山崩壊により発生する津波を手掛かりに、いつ氷山が崩壊するのか、どの様な発生形態があるのか、どこで発生するのか、どのくらいの規模か、そして外部環境とどの様に関係するのかを研究してきました。

今後の研究

これまで世界地域でカービング氷河の末端プロセスに関わるデータを蓄積してきました。これらのデータを読み解き、末端プロセスのモデル化に取り組み、氷河氷床変動モデリングの高精度化に貢献をしたいと考えています。また、私が熱意を持っているのは、現地でデータを取得し、自然現象を理解することです。雄大な自然の中での活動は本当に素晴らしいです。今後も極地を巡りながら、激変する氷河や氷床の観測を行い、研究を推進していく所存です。今後皆様にはお世話になりますが、どうぞよろしくお願い致します。

写真：南米パタゴニアのペリート・モレノ氷河。氷河の先端は湖に流れ込む。

Report

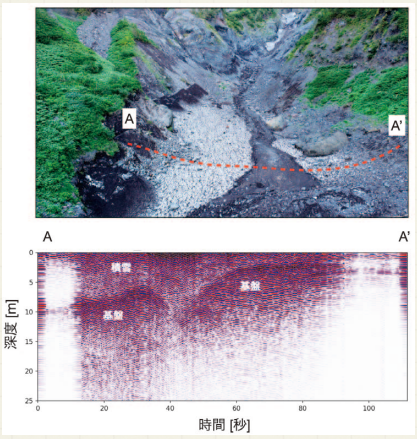
利尻山ヤムナイ沢雪渓で調査を実施

雪氷新領域部門　日下　稜・杉山　慎

2021 年 7 月 29 日～ 30 日、9 月 19 日～ 20 日の計 4 日間にわたり、氷河・氷床グループでは、利尻山南東斜面に存在する万年雪、ヤムナイ沢雪渓で、観測を行いました。ヤム・ナイはアイヌ語で冷たい・沢を意味し、雪渓の全長は約 800m、幅は 40m ほどあります。過去にはこの地に氷河が存在した痕跡もあり、低標高に位置する典型的な越年雪渓です。今回の調査の主な目的は、日本の最北端に位置する雪渓の雪氷学的な特徴の理解と、ArCS II 北極域研究加速プロジェクトのもとで実施するグリーンランドにおける氷河調査で使用する機器のテストです。GPR（地中レーダー）による雪渓の厚さの測定、GNSS（全地球航法衛星システム）による雪氷移動量の測定、さらに精密な標高測定を目的としたドローンによる空撮などを行いました。特に、7 月は猛暑の中での調査となりましたが、雪渓上は涼しく無事に予定の調査を終えることができました。来年は利尻山での調査を活かして、グリーンランドでの活動が実現することを期待しています。

ヤムナイ沢雪渓

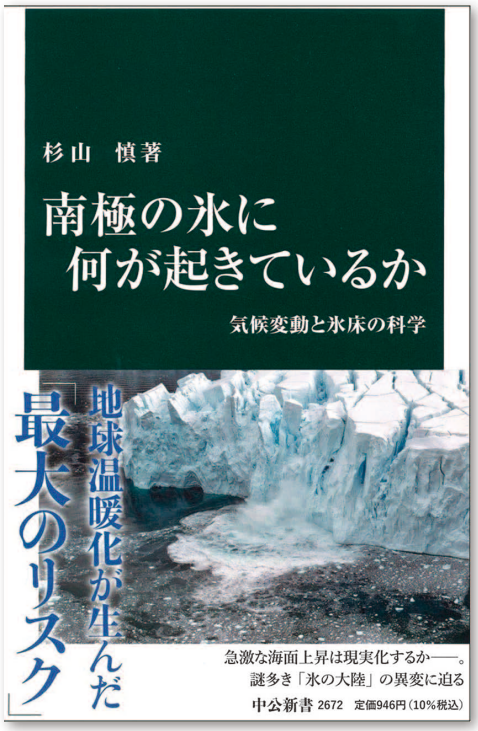
ドローンの飛行テスト



レーダーによる計測結果

集合写真

Publication



南極の氷に何が起きているか
―気候変動と氷床の科学―（中公新書）

杉山慎（著）
中央公論新社
2021 年 11 月 18 日発行
ISBN: 978-4121026729

「南極氷床」をご存じでしょうか？南極大陸を覆う巨大な氷河のことです。面積は日本国土の 38 倍、平均厚さ 2000 メートル、地球で最も大きな氷のかたまりです。この南極氷床が、気候変動の影響を受けて急速に変化しています。特に氷床が海と接する沿岸部では、これまでの理解を超えたスピードで氷が失われていることが判明しました。その結果、南極から流れ出た融け水によって海水準が上昇しているのです。

南極の氷が減っているとはっきりわかったのはまだ最近、10 年ほど前のことです。それ以前は、温暖化によって雪の量が増えて、氷床が大きくなる可能性が指摘されていました。それではなぜ、最近になって氷の変化が明らかになったのでしょうか？特に沿岸部で氷が失われている理由は？氷はどのくらい減っているのか？そもそも南極氷床の変化が、地球環境と私たちの生活に与える影響とは？そして、この先南極氷床はどのように変化していくのでしょうか？

本書では、様々な研究成果と最新のデータに基づいて、南極氷床の現在と将来の変動について解説します。また、私自身が実施する南極観測の様子にも触れて、極地研究とフィールドワークの魅力を伝えました。本書を通じて南極と氷床に興味を抱いた若者が南極と氷床に興味を持ち、わたしたちの研究分野に飛び込んでくれたらとても嬉しいです。

（杉山　慎）

目次

第１章　「地球最大の氷」の実像　―南極氷床の基礎知識―
第２章　南極の氷の変化をどう知るか　―IPCC 報告書から最新の観測手法まで―
第３章　崩壊する棚氷、加速する氷河　―いま「氷の大陸」で何が起きているか―
第４章　南極の異変は私たちに何をもたらすか　―氷床融解が地球環境に与えるインパクト―
第５章　気候変動と地球の未来　―100 年後の氷床変動シミュレーション―
終章　　そして、私たちは何をすべきか　―" 最悪のシナリオ " vs. 科学と社会の力―

Publication

現場で育むフィールドワーク教育
（FENICS 100 万人のフィールドワーカー 4）

増田研・椎野若菜（編集）
古今書院
2021 年 8 月 10 日発行
ISBN: 978-4772271257

現場に出向いて調査や測定を行う「フィールドワーク」は、自然科学から人文社会科学まで、研究にとって重要な手段のひとつです。フィールドワークを武器とする研究者は、どんな経験をもとに必要な技術を身につけてきたのでしょうか。また大学や大学院では、フィールドワークを学ぶためにどのような実習・コースが開講されているのでしょうか。本書では、文理様々な分野の研究者・教育者が、フィールドワークに関する自身の経験や、実践する教育プログラムについて報告しています。

11 章からなる事例集のひとつとして、低温科学研究所が環境科学院と協力して取り組む「南極学カリキュラム」について紹介しています。南極学カリキュラムは、次世代の極地研究者を養成するための大学院教育プログラムです。2006 年の開講以来、サロマ湖、母子里などで野外実習を実施する他、南極での野外活動や自然災害の専門家を講師に招いて「野外行動技術」に関するコースを開催しています。2020 年度までに 91 名がプログラムを修了し、うち 15 名が南極観測の夢をかなえるなど、それぞれの分野で活躍しています。本文では、15 年間のカリキュラムの歩みと成果を、写真やデータも交えながら紹介しました。

極地から社会まで、現場で物事を解決するスキルは欠かせません。フィールドワーカーを目指す大学生や大学院生はもちろん、隣の研究分野のフィールドワークを覗いてみたい研究者にもお勧めです。

（杉山　慎）

目次

PART1　自然を読む実習のかたち
第 1 章　海洋で多彩なフィールドワーク研究をするために（梅澤有）
第 2 章　自然を記載する「マニュアル化できない」フィールドワークの重要性（宮本真二）
第 3 章　サルと学ぶフィールドワーク実習（井上英治）
第 4 章　フィールドワークで気づいた「なぜ？」から問いを立てる ― 中学校・高等学校におけるフィールドワークのすすめ（吉崎亜由美）

PART2　カリキュラムの海外展開
第 5 章　教室も教科書もない南極から授業する（澤柿教淳）
第 6 章　北海道大学 南極学カリキュラム―極地研究を次の世代につなぐために（杉山慎）
第 7 章　文系学部生のフィールドワーク研修―国際協力に関心をもつ学生のゼミの研修の事例（杉田映理）
第 8 章　インターンをしながら調査する国際保健（増田研）

PART3　実践：教室を飛び出す
第 9 章　授業で野宿者と出会う―学生と教員はどのようにアプローチしたか（山北輝裕）
第 10 章　一般の人も巻き込むフィールド実習形（中村一樹・山中康裕）
第 11 章　学生と歩んできたフェアトレード活動（子島進）

(2021/6/8)

新たな陸-海結合システムを発見
～オホーツク海のオーバーターニングに与える河川水の影響～

発表者：准教授　白岩　孝行
教授　三寺　史夫

【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史　穆清氏と同大低温科学研究所環オホーツク観測研究センターの白岩孝行准教授及び三寺史夫教授の研究グループは、ロシア科学アカデミー極東支部火山・地震研究所のヤロスラブ・ムラビヨフ博士と共同で、ロシア連邦水文気象環境監視局が管理する河川流量データを用いてカムチャツカ半島から周辺海域に流出する河川の全流量を推定し、河川流量とオホーツク海の高密度陸棚水形成海域の表層塩分に関係があることを見出しました。

海洋に対する河川水の割合はわずか0.003%に過ぎず、河口域や沿岸を除くと、海洋に対する河川の影響はこれまで限定的と考えられていました。本研究は、限られた地域の河川流量が半球規模の海洋循環に影響を与える可能性を示した貴重な成果です。オホーツク海のオーバーターニング（鉛直循環）は、北太平洋の海洋循環を通じて気候に影響だけでなく、栄養塩の循環をも駆動し、オホーツク海や親潮海域の生物生産にも大きく関わっています。そのため、本研究は、オホーツク海のオーバーターニングの機構解明や予測に新たな視点を与えたものと評価されます。

本研究成果は、2021年5月24日（月）公開のJournal of Hydrology: Regional Studies誌にオンライン公開されました。

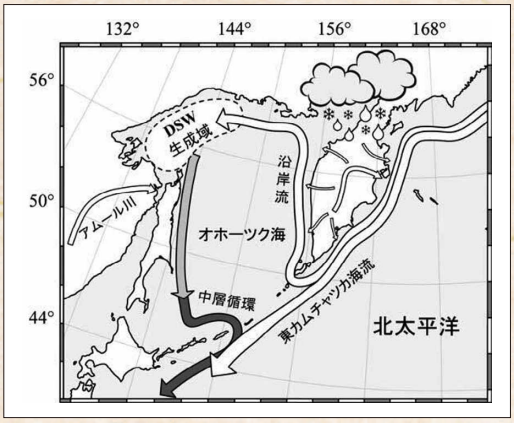
なお、本研究は、科学研究費補助金・基盤研究A（課題番号：17H01156）の助成を受けて実施されました。

【論文発表の概要】

論文名：Estimation of freshwater discharge from the Kamchatka Peninsula to its surrounding oceans
（カムチャツカ半島から周辺海域への淡水流出量の見積もり）

著者名：史　穆清[1]、白岩孝行[2]、三寺史夫[2]、ヤロスラブ・ムラビヨフ[3]（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 ロシア科学アカデミー極東支部火山・地震研究所）

雑誌名：Journal of Hydrology: Regional Studies（水文学の専門誌）
ＤＯＩ：10.1016/j.ejrh.2021.100836
公表日：2021年5月24日（月）（オンライン公開）



オホーツク海の表層塩分に与えるカムチャツカ半島の河川水の役割

(2021/6/14)

南極大陸に向かって海流が接近中
～南極海の深層が暖まるメカニズムを発見～

発表者：准教授　青木　茂

【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山崎開平氏と、同低温科学研究所の青木　茂准教授、平野大輔助教（当時。現所属：国立極地研究所）、中山佳洋助教、海洋研究開発機構の勝又勝郎主任研究員らの研究グループは、地球上で最大の海流である「南極周極流」が、南極大陸に向かって拡大することで、南極海の深層が暖まっていることを発見しました。

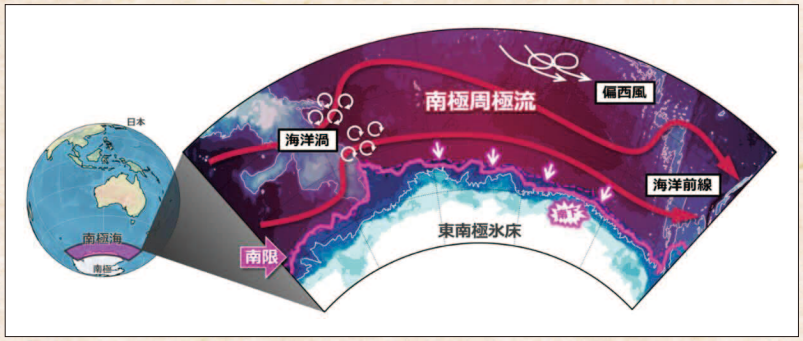
この研究では、東南極沖を対象とし、海洋現場観測データの時空間解析と数値シミュレーションを組み合わせて解析することで、南極周極流の「南限」が、過去30年間に50km以上南下したことを突き止めました。さらに、海の力学的な分厚さを調べることによって、海洋前線の南下と南北深層循環の強化が、南限の移動を引き起こしていることがわかりました。今回発見された南極周極流の極向き拡大は、海洋の持つ熱が南極氷床へ近づきつつあることを示しています。地球温暖化などによって南極海に吹き付ける偏西風が強くなったことが、その原因である可能性があります。南極海の深層水は南極沿岸付近では最も暖かい水で、南極の氷を融かす主な熱源であると考えられます。暖かい深層水が氷床に向かって流れ込めば、より多くの融け水が海に放出されることで、海面上昇と気候システムに影響することが懸念されます。

本研究は水産庁「開洋丸」による観測航海で取得されたデータを使用しており、科学研究費補助金（課題番号17H01615、17H06317、19K23447、21H04918、21K13989）の助成を受けて実施されました。

なお、本研究成果は、日本時間2021年6月12日（土）午前4時公開のScience Advances誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Multidecadal poleward shift of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica（東南極沖における南極周極流の南限の数十年規模の極向きシフト）
著者名：山崎開平[1,2]、青木　茂[2]、勝又勝郎[3]、平野大輔[2]（当時）、中山佳洋[2]（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 国立研究開発法人海洋研究開発機構）
ＤＯＩ：10.1126/sciadv.abf8755
雑誌名：Science Advances
公表日：2021年6月11日（金）



東南極沖の海洋構造。背景の青系色は海底地形で、明るい色ほど浅い。
南極周極流の南限（ピンク色の線）について、2010 年代を実線、1990 年代を点線で示す。

Press Release

(2021/6/28)

冬眠哺乳類の低温耐性にビタミンEが関わることを発見
～臓器移植・臓器保存への貢献に期待～

発表者：教授　山口　良文

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の山口良文教授、東京大学大学院薬学系研究科博士後期課程（当時）の姉川大輔氏、三浦正幸教授らの研究グループは、冬眠する小型哺乳類シリアンハムスターが冬眠の際の低体温に耐えるためにビタミンEを肝臓に高い濃度で保持することを明らかにしました。

シリアンハムスター、シマリス、ジリス、ヤマネなどの小型冬眠哺乳類は、数ヶ月に渡る冬季のあいだ、体温が10°C以下に低下した深冬眠と呼ばれる低温状態で何日間も過ごします。またこの深冬眠から目覚める際には、体内で熱を多量に作り出すことで体温を37°C付近まで急激に復温させます。こうした長時間の低温や急激な復温は、私たちヒトを含む冬眠しない哺乳類には致命的なストレスとなります。なぜ冬眠する哺乳類が低温や急激な復温に耐えることができるのか、その仕組みの殆どは未だに不明ですが、これらの動物は細胞レベルでも低温耐性を示すことが幾つかの事例から知られています。そこで研究グループはまず、シリアンハムスターの肝臓の細胞（肝細胞）も、低温培養下で長期生存可能な低温耐性を有することを確認しました。さらに、ビタミンEの少ない餌で飼育されたシリアンハムスターの肝細胞は低温誘導性の細胞死を生じ、この現象はビタミンE投与で回復すること、つまりシリアンハムスターの低温耐性は餌中に含まれるビタミンE量に依存することを発見しました。また低温耐性の異なるシリアンハムスターとマウスの間で、餌由来のビタミンEの保持能力に差があることを見出しました。本研究成果は、ヒトにおける臓器移植や再生医療の際の臓器低温保存や、低体温に伴う障害の予防法の開発にもつながると期待されます。

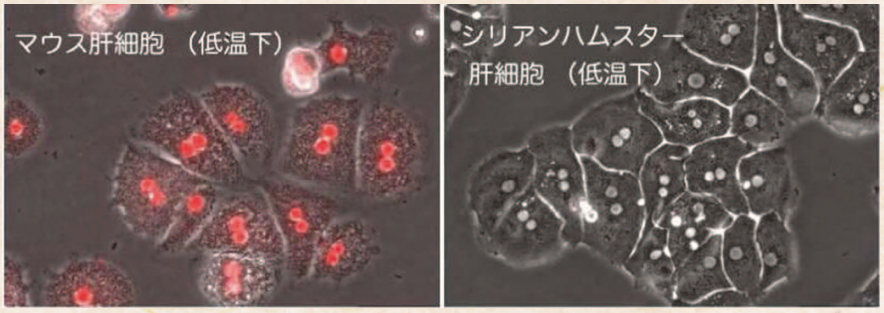
本研究成果は、2021年6月25日（金）公開のCommunications Biology誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論 文 名：Hepatic resistance to cold ferroptosis in a mammalian hibernator Syrian hamster depends on effective storage of diet-derived α-tocopherol（冬眠する哺乳類シリアンハムスターの肝臓が示す低温細胞死への耐性は肝臓での効率的なα-トコフェロール保持に依存する）

著者名：Daisuke Anegawa[1,2], Yuki Sugiura[3], Yuta Matsuoka[4], Masamitsu Sone[1], Mototada Shichiri[5], Reo Otsuka[1], Noriko Ishida[5], Ken-ichi Yamada[4], Makoto Suematsu[3], MasayukiMiura[2], Yoshifumi Yamaguchi[1]（1 北海道大学低温科学研究所、2 東京大学大学院薬学系研究科、3 慶応義塾大学医学部、4 九州大学大学院薬学系研究科、5 産業技術総合研究所）

雑誌名：Communications Biology（生物学の専門誌）
ＤＯＩ：10.1038/s42003-021-02297-6
公表日：2021年6月25日（金）（オンライン公開）



低温下における違い
左：マウス肝細胞は死亡（赤色）、右：シリアンハムスター肝細胞は生存可能

Press Release

(2021/7/8)

世界初！海底地震計を使い、氷河流動の検出に成功
～微動を使った新しい氷河観測手法を提案～

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エヴゲニ・ポドリスキ助教(現 准教授)、同大学大学院理学研究院の村井芳夫准教授、同大学北極域研究センターの漢那直也研究員(現東京大学大気海洋研究所助教)、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・ボードイン氷河の直前で、海底地震計を使った観測に世界で初めて成功しました。観測された地震波ノイズの時間変化から、氷河の流動変化が推定できることを初めて明らかにしました。

氷河末端から約640mの海底に海底地震計を、氷河と陸上にGPS（全地球測位システム）受信機と地震計を設置して、地震波ノイズと氷河の流動速度を比較したところ、特に海底の地震波ノイズ振幅と流動速度の間に高い相関があることを発見しました。このことから、地震波ノイズが、氷河がすべる時に生じる微動であることが明らかになりました。

氷河の末端付近はアクセスと機材の設置が困難で、氷の破壊や強風によるノイズの影響を受けるため、流動の測定が困難です。これに対して、海底での観測によって、これらの弱点を克服することが可能になります。

本研究が提案する新しい手法により、グリーンランドにおける氷河から海に流入する氷と融け水のモニタリングが可能となり、その変動要因の解明が期待されます。

本研究成果は、2021年6月24日(木)公開のNature Communications誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Ocean-bottom and surface seismometers reveal continuous glacial tremor and slip（海底及び陸上での地震観測より明らかとなった微動と氷河すべり）

著者名：Evgeny A. Podolskiy[1]、村井芳夫[2]、漢那直也[1,3]、杉山　慎[1,4]（1 北海道大学北極域研究センター、2 北海道大学大学院理学研究院、3 東京大学大気海洋研究所、4 北海道大学低温科学研究所）

掲載誌：Nature Communications（英科学誌）

公開日：2021年6月24日(木)（オンライン公開）

ＤＯＩ：10.1038/s41467-021-24142-4

グリーンランド・ボードインフィヨルドにおける海底地震計設置の様子
(2019 年 7 月 21 日。撮影：浅地　泉)

Press Release

(2021/7/9)

原子膜とかけて熱帯魚と解く。そのココロは･･･？
ーナノ物理学と生物学を繋ぐチューリング・パターンの新理論ー

発表者：研究員　勝野　弘康

【研究成果の概要】

電気通信大学の伏屋雄紀准教授と北海道大学の勝野弘康研究員およびPSL研究大学・Kamran Behnia 教授、スタンフォード大学・Aharon Kapitulnik 教授からなる国際共同研究チームは、原子間に働く三種類の力を取り入れた新しい理論模型を構築することで、ビスマス単原子膜（原子1個分の厚み）に現れるナノスケールの奇妙な模様が、熱帯魚の模様など生物のパターン形成と同じ「チューリング・パターン※1」であることを明らかにしました。

これまで生物学や化学分野で見られたチューリング・パターンは数cmから0.1mm程度がほとんどでした。今回の研究により、従来のものより圧倒的に小さい1nm（10億分の１m）幅の極微小なチューリング・パターンが見つかった上、その発生メカニズムまで明らかになりました。これにより、生物学、化学からナノ物理学までがチューリング理論により繋がったことになります。

国際チームはさらに、ビスマス単原子膜のように硬い結晶が、生物と同じように自分で勝手にキズを治してしまうことを発見しました。このメカニズムを応用すれば、従来とは全く異なる非線形な反応拡散方程式※2を用いて、完璧に平坦な超薄膜や新しい量子デバイスを作製できる可能性があり、学術分野のみならず、ナノエレクトロニクス分野への貢献が期待されます。

本研究成果は、“Nature Physics”に2021年7月9日掲載されます。

【用語解説】

※1　チューリング・パターン：コーヒーにミルクを注ぐと次第に均一なカフェオレができるように、常識的には、拡散することで状態は均一になる。しかし数学者のアラン・チューリングは、時間的・空間的に不均一な状態が拡散によって誘起されることを、「形態形成の化学的基礎」（1952）と題した論文中で示した。そうしてできる模様をチューリング・パターンとよぶ。

※2　反応拡散方程式：化学反応における各種化学物質の濃度と時間変化を、それらの拡散も含めて記述する連立偏微分方程式。化学反応だけでなく、物理学、生物学に現れる非線形現象を広範囲に記述することができる。上記チューリングの論文（1952）中に現れる方程式も、本質的に反応拡散方程式である。

【論文発表の概要】

タイトル：Nanoscale Turing patterns in a bismuth monolayer
著者名：Yuki Fuseya, Hiroyasu Katsuno, Kamran Behnia, Aharon Kapitulnik
掲載誌：Nature Physics
公開日：2021年7月9日
本誌リンク：https://www.nature.com/articles/s41567-021-01288-y
ＤＯＩ：10.1038/s41567-021-01288-y

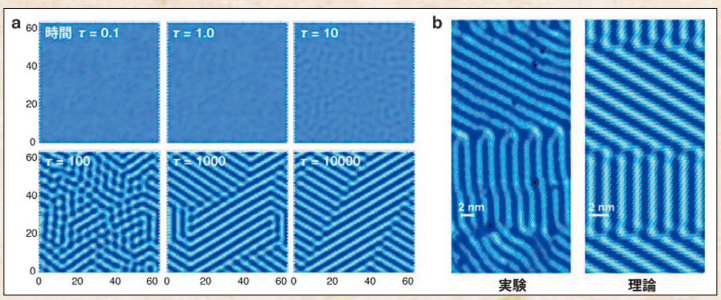


図１　(a) ビスマス単原子膜で時間と共にチューリング・パターンが形成される様子
(b) 実験と理論の比較

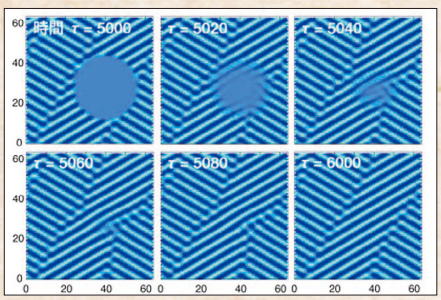


図２　原子膜につけた円形のキズが勝手に修復される

Press Release

(2021/7/12)

南極の氷河の下で海と氷を直接観測
～熱水掘削によって氷床融解のメカニズムを解明～

発表者：教授　杉山　慎
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杉山　慎教授、青木　茂准教授、箕輪昌紘研究員（現 助教）らの研究チームは南極ラングホブデ氷河を掘削し、厚さ234 ～ 412mの棚氷の下に広がる海を直接観測しました。その結果、棚氷底面での氷融解とそのメカニズムを明らかにしました。

近年、南極氷床が氷を失っており、海水準の上昇につながる地球環境変動として注目されています。氷床の周縁では氷が海に張り出して棚氷を形成し、その底面が海の熱で融けるプロセスが氷床変動の引き金と考えられています。しかし、厚い棚氷の下へ海水がどのように流入し、どれだけ氷を融かしているのか、その測定は非常に困難で理解が遅れています。本研究では、研究チームが開発した熱水掘削システムを用いて、ラングホブデ氷河の棚氷を4地点で掘削し、棚氷下の海水温、塩分、循環を直接観測しました。その結果、海水は結氷温度よりも最大1℃ほど暖かく、棚氷の全域で氷の融解が示されました。また棚氷の全域における測定によって、これまで予想されていた海洋循環の確認に成功しました。測定された貴重なデータは、棚氷下の海洋循環と底面融解の物理プロセスを検証し、氷床数値モデルの精緻化に貢献するものです。

本研究成果は、2021年7月9日（金）公開のNature Communications誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica
（東南極ラングホブデ氷河棚氷下の熱塩構造と海洋循環）

著者名：箕輪昌紘[1]、杉山　慎[1]、伊藤優人[1,2]、山根志織[1]、青木　茂[1]（1 北海道大学低温科学研究所、2 海洋研究開発機構）

掲載誌：Nature Communications（英科学誌）
公開日：2021年7月9日（金）（オンライン公開）
ＤＯＩ：10.1038/s41467-021-23534-w

観測を行ったラングホブデ氷河と熱水掘削の様子

Press Release

(2021/7/16)

海の恵みをもたらす親潮中層水の経年変動機構を解明
～2020年代中盤からの10年間に大きな変化があると予測～

発表者：教授　　大島　慶一郎
特任助教　メンサ・ビガン

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所のメンサ　ビガン特任助教と大島慶一郎教授の研究グループは、西部北太平洋の高い生物生産を支えている親潮中層水が、温暖化と18.6年周期潮汐変動の両方に強く影響を受けることを明らかにしました。これらの変動の大きな要因は、親潮中層水を作る2つの水塊、西部亜寒帯水とオホーツク海中層水の混合の割合の変化によります。長期的には低温のオホーツク中層水の占める割合が40年で30%も減少して親潮中層水は高温化しており、これは温暖化による海氷生成の減少によりオホーツク海を起点とするオーバーターンが弱化したことによると考えられます。潮汐が強い年代は、より低温のオホーツク海中層水の流出が増加し、潮汐の強さは温暖化と逆に作用（低温化）することもわかりました。

本研究によって、潮汐が弱くなる2020年代中盤からの10年間は弱化する潮汐の効果と温暖化の効果が相乗して一気に大きな変化（親潮中層水におけるオホーツク海中層水の割合が減り、水温が高くなる）が起こりうることも予想されます。

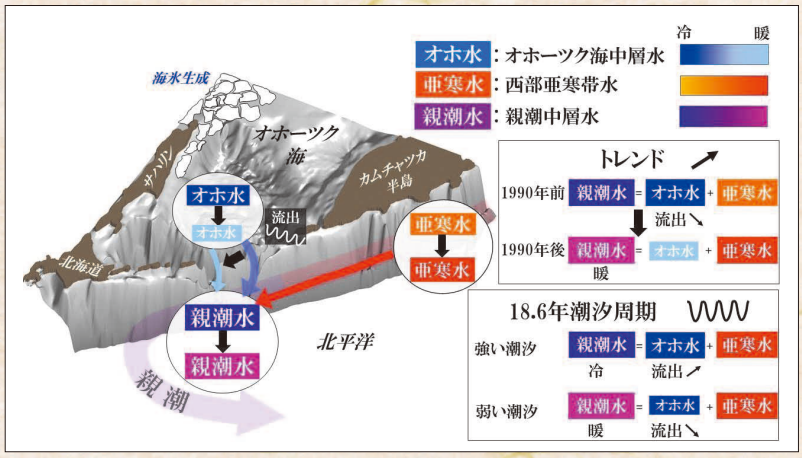
なお、本研究成果は、2021年7月15日（木）公開のScientific Reports誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Weakened overturning and tide control the properties of Oyashio Intermediate Water, a key water mass in the North Pacific.（北太平洋の重要な水塊である親潮中層水はオーバーターンの弱化と潮汐変動によってコントロールされている）

著者名：Mensah Vigan[1]、大島慶一郎[1,2]（1 北海道大学低温科学研究所、2 北海道大学北極域研究センター）

雑誌名：Scientific Reports（総合科学雑誌）
ＤＯＩ：10.1038/s41598-021-93901-6
公表日：2021年7月15日（木）



親潮中層水の形成とその経年変動の模式図。親潮中層水は西部亜寒帯水（図では暖色系）とオホーツク海中層水（寒色系）の混合により形成される。混合の割合（図では色の違いで示す）が変わることで親潮中層水の性質（温度等）が変わる。

(2021/7/16)

北海道大雪山の永久凍土を維持する環境が将来大幅に減少する

発表者：助教　曽根　敏雄

【研究成果の概要】

地中の温度が年間を通して0℃を下回る領域は「永久凍土」と呼ばれ、北半球陸域の25%もの広い領域に存在します。日本では北海道大雪山・富士山・立山などに存在することが報告されています。

私たちは現在から将来にわたる気象データを用いることにより、大雪山地域において「永久凍土を維持する気温環境」にある領域の現状評価と将来予測を行いました。その結果、現在は大雪山において「永久凍土を維持する気温環境」にある地域が150km^{2}程度存在すると推定されますが、将来はそのほとんどが消失すると予測されました（成り行きシナリオでは2070年頃に完全に消失、2℃安定化シナリオでも2100年時点で2000年代の1/10程度に減少）。

山岳域における永久凍土の融解は、斜面の不安化や生態系の変化を引き起こす可能性があります。現在の山岳環境の変化を正確に監視するとともに、将来大きく変化する環境に適応するための方策を提供することが重要であることを、私たちの結果は示しています。

本研究の成果は2021年7月30日にScientific Reportsよりオンライン出版されます。

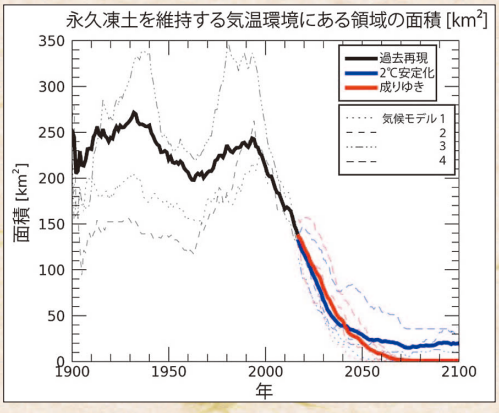
【論文発表の概要】

タイトル：Projections of surface air temperature required to sustain permafrost andimportance of adaptation to climate change in the Daisetsu Mountains, Japan（日本の大雪山において永久凍土を維持する気温の将来予測と気候変動に対する適応策の重要性）

著者名：T.Yokohata[1], G.Iwahana[2], T.Sone[3], K.Saito[4], N.N.Ishizaki[1], T.Kubo[1], H.Oguma[1], M.Uchida[1]（1 国立環境研究所、2 北海道大学北極域研究センター、3 北海道大学低温科学研究所、4 海洋研究開発機構）

ＤＯＩ：10.1038/s41598-021-94222-4

公表日：2021年7月30日（金）（オンライン公開）



永久凍土を維持する気温環境にある領域の面積 [km^2]

Press Release

(2021/8/11)

太陽系初期の磁場情報から天体大移動の時期に迫る
～電子線ホログラフィーを用いたナノスケール隕石磁気学の新手法を提唱～

発表者：准教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の木村勇気准教授、一般財団法人ファインセラミックスセンターの山本和生主席研究員、パデュー大学の脇田　茂研究員は、磁場を可視化できる特殊な電子顕微鏡（ホログラフィー電子顕微鏡）を用いて、個々の隕石ナノ粒子の残留磁化を読み解く新手法を提唱しました。この新手法を、国立天文台が運用する「計算サーバ」を用いた数値シミュレーションの結果と合わせることで、木星は太陽系誕生後、数百万年から6億5千万年までの幅広い説の中で最も早い時期に誕生した可能性が非常に高いことを明らかにしました。

本研究では、太陽系の形成史を知るために、太陽系の初期に天体内で水と反応することで作られる磁鉄鉱ナノ粒子に注目しました。磁鉄鉱ナノ粒子は、これまでに経験してきた環境の情報を磁場の形で保存しています。タギシュレイク隕石から取り出した個々の磁鉄鉱ナノ粒子の磁束密度を、ホログラフィー電子顕微鏡内で加熱しながらその場観察することで、その粒子は250℃から150℃まで急冷される間に形成したことを明らかにしました。数値シミュレーションの結果と合わせることで、次のような太陽系の形成初期の出来事の詳細が浮かび上がってきました：『太陽系が誕生してから約300万年後に、太陽から遠く離れた低温のカイパーベルト領域で直径160km以上の大きな彗星が形成。同400-500万年後に、同様に効率よく形成した木星の重力の影響で彗星の軌道が太陽系の内側領域へ変化。移動の過程で、直径10kmの小天体が秒速5kmで彗星に衝突。』

本研究は、隕石の構成鉱物の生成温度の決定に新しい温度計を与える成果で、当該分野に新たな研究手法を提唱する点からも意義があります。

なお、本研究成果は日本時間2021年8月11日（水）公開のThe Astrophysical Journal Letters誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

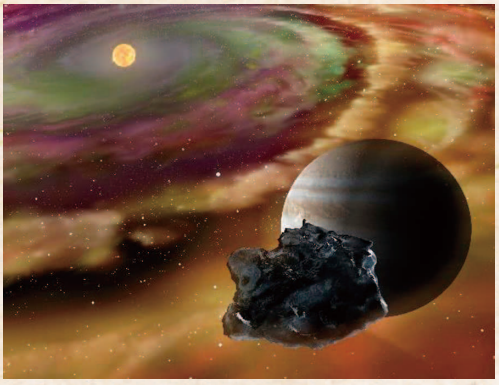
論文名：Electron holography details the Tagish Lake parent body and implies early planetary dynamics of the Solar System（電子線ホログラフィーによるタギシュレイク隕石母天体の詳述と太陽系初期の惑星ダイナミクスへの示唆）

著者名：木村勇気[1]、山本和生[2]、脇田　茂[3,4]（1 北海道大学低温科学研究所、2 ファインセラミックスセンター、3 パデュー大学、4 マサチューセッツ工科大学）

雑誌名：The Astrophysical Journal Letters

ＤＯＩ：10.3847/2041-8213/ac13a8

公表日：日本時間 2021年8月11日（水）（オンライン公開）



太陽系初期に形成した木星と彗星の想像図

Press Release

(2021/8/26)

新星爆発で生まれる有機物の塵の合成に成功

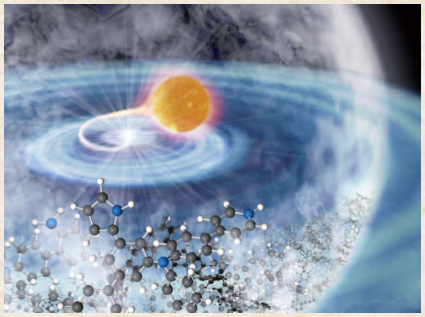
発表者：准教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

宇宙にどのような有機物がどこでどのように生まれ、我々の身近な有機物と関連するかを知ることは天文学そしてアストロバイオロジーにおける重要な研究課題である。赤外線天文観測技術（注１）の進歩によって、星間物質中に多環式芳香族炭化水素（注２）のような有機物の分子や塵が普遍的に存在することが示唆されるようになったが、星間有機物の物質同定や形成過程の理解は依然として不十分であった。

東京大学大学院理学系研究科博士課程２年の遠藤いずみ、東京大学大学院理学系研究科の左近樹 助教らを中心とする、東京大学・明星大学・北海道大学・電気通信大学・宇宙航空研究開発機構（JAXA）・横浜国立大学・海洋研究開発機構（JAMSTEC）・兵庫県立大学・日本大学・The University of British Columbia などの研究グループは、新星が有機物の塵を生み出す過程を定性的に模擬して有機物の塵の室内合成実験を行い、新星に観測される赤外線スペクトルの特徴が、アミンを含有する有機物の塵である急冷窒素含有炭素質物質（Quenched Nitrogen-included Carbonaceous Composite：QNCC）によって再現されることを示した。

この研究結果は、宇宙における星間有機物の一生を理解する上で、その誕生の過程に焦点を当てたものである。宇宙の有機物は、我々の起源を知る上で鍵となる物質である。地球上に起源を持つのか、それとも宇宙から飛来したものに起源を持つのかは、現代のアストロバイオロジー研究における重要な問いである。本研究は、新星が生み出す有機物の塵の姿を特定することを通じて、後者の起源の可能性を探るための重要な第一歩を与えた。



画像１：新星爆発が有機物の塵を生み出す様子のイラストレーション。分子模型中の白球は水素、黒球は炭素、青球は窒素を表す。

画像２：星間有機物の一生と太陽系の始原的有機物の起源の描像。従来、太陽系の始原的な有機物の起源としては、分子雲から太陽系の元となる原始惑星系円盤ができ太陽系が生まれる過程で化学反応による有機物の形成過程が考えられてきたが、大型の有機物を生み出す過程を十分には説明できていなかった。一方、終焉期の恒星の周囲で生まれる有機物の塵が星間空間を旅して生き残り太陽系の始原的有機物の材料となる道筋があれば、大型の有機物の誕生過程も説明できる可能性がある。今回の研究は、後者の過程を考える上で、第一歩となる終焉期の恒星が有機物の塵を生み出す過程を再現する実験研究である。

【用語解説】

（注１）　天体からやってくる赤外線のうち、大気の吸収によって地上から観測できる赤外線は限られており、1980年代以降衛星による赤外線天文観測が可能になって、ようやく赤外線の全波長帯域での観測データが得られるようになった。日本では1995年に打ち上げられた小型の赤外宇宙望遠鏡 Infrared Telescope in Space（IRTS）に続き、口径68.5cmの赤外線天文衛星「あかり」は2006年に運用を開始し、1995年に打ち上げられた欧州の赤外線宇宙天文台ISOや、2003年から運用を開始した米国の Spitzer 宇宙望遠鏡とともに、星間物質および星間塵の理解に重要な貢献を果たした。

（注２）　炭素および水素によって構成され、芳香環が縮合した炭化水素の総称。多環式芳香族炭化水素の英語名称 Polycyclic Aromatic Hydrocarbon を略してPAHと呼ばれることが多い。防虫剤のナフタレンや、有機ELディスプレイの材料物質など馴染みのある物質も多い。これまで、フランスの A. Leger および J.L.Puget や米国 NASA Ames の L.Alamandola らによって未同定赤外バンド放射の担い手の候補物質であることが提案され研究が続けられてきた。

【論文発表の概要】

論文タイトル：On the Nature of Organic Dust in Novae

著者名：Izumi Endo, Itsuki Sakon, Takashi Onaka, Yuki Kimura, Seiji Kimura, Setsuko Wada, L.Andrew Helton, Ryan M. Lau, Yoko Kebukawa, Yasuji Muramatsu, Nanako O.Ogawa, Naohiko Ohkouchi、Masato Nakamura, Sun Kwok

雑誌名：The Astrophysical Journal
公表日：2021年8月26日（木）

Press Release

(2021/9/3)

電線による効率化：メタン菌の巧みな電子管理術
～エネルギーが乏しい環境で生存するために特化した酵素機構～

発表者：助教　渡邉　友浩

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の渡邉友浩助教(研究当時：マックスプランク陸生微生物学研究所)、マックスプランク陸生微生物学研究所、マックスプランク生物物理学研究所の研究グループは、メタン菌から精製した超巨大な酵素複合体の機能と構造を解明しました。

メタン菌は、エネルギーに乏しい無酸素環境に生息しています。このような極限環境でエネルギーを生み出すために重要な反応の一つが、フラビン型電子分岐反応(以下、FBEB反応)です。本反応は、電子対の一つの電子を消費して、もう一つの電子を高エネルギー状態にするものです。本研究では、メタン菌から精製した超巨大な酵素複合体が、FBEB反応が生じた高エネルギー電子を二酸化炭素の還元と固定に直接利用することを発見しました。

この効率的なエネルギー変換プロセスは、環境と調和した新しいバイオテクノロジーの開発に繋がる可能性を持ちます。

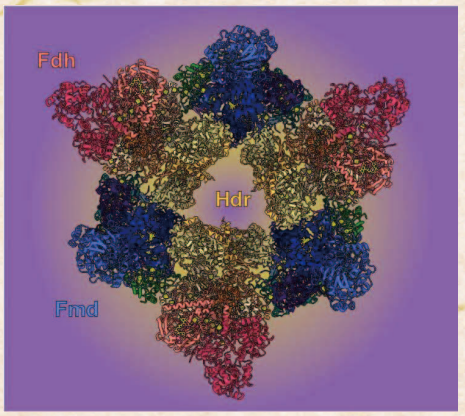
なお、本研究成果は2021年9月3日(金)公開のScience誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Three-megadalton complex of methanogenic electron-bifurcating and CO_2-fixing enzymes（メタン菌の３メガダルトンの電子分岐CO_2還元酵素複合体）

著者名：Tomohiro Watanabe[1]（研究当時）†, Olivia Pfeil-Gardiner[2†], Jörg Kahnt[3], Jürgen Koch[1], Seigo Shima[1*], Bonnie J. Murphy[2*]（1 Microbial Protein Structure Group, Max Planck Institute for Terrestrial Microbiology, 2 Redox and Metalloprotein Research Group, Max Planck Institute of Biophysics, 3 Core Facility for Mass spectrometry & Proteomics, Max Planck Institute forTerrestrial Microbiology）（† equal contribution、*corresponding authors）

雑誌名：Science
ＤＯＩ：10.1126/science.abg5550
公表日：2021年9月3日(金)（オンライン公開）



電子分岐反応を使って二酸化炭素を固定する分子量３メガダルトンの超巨大酵素複合体
Reprinted with permission from Watanabe & Pfeil-Gardiner et al., Science (2021)

(2021/9/8)

星間氷微粒子の構造・形態を解明！
～氷微粒子が関与する多くの現象の見直しを迫る成果～

発表者：教授　香内　晃

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の香内　晃教授らの研究グループは、新たに開発した超高真空極低温透過型電子顕微鏡を用いた実験を行い、星間分子雲で生成されるH_2O、CO_2、COを含む氷微粒子が、これまで仮定されてきたような同心円状の玉ねぎ構造ではなく、CO_2ナノ結晶を含む非晶質H_2OにキラルなCO結晶が局所的に付着した形態であることを明らかにしました。さらに、氷微粒子が原始惑星系円盤で加熱される際もこれまでの仮定と大きく異なる形態変化を示すことを見出しました。

本研究の成果は、氷微粒子上での分子生成プロセスや惑星形成論など、これまで玉ねぎ構造を仮定して議論されてきた多くの現象の見直しを迫るものです。また、氷微粒子上のキラルCO結晶の形成は、生命の起源に関わる宇宙における片方の光学異性体過剰の発現のメカニズムに繋がる発見です。

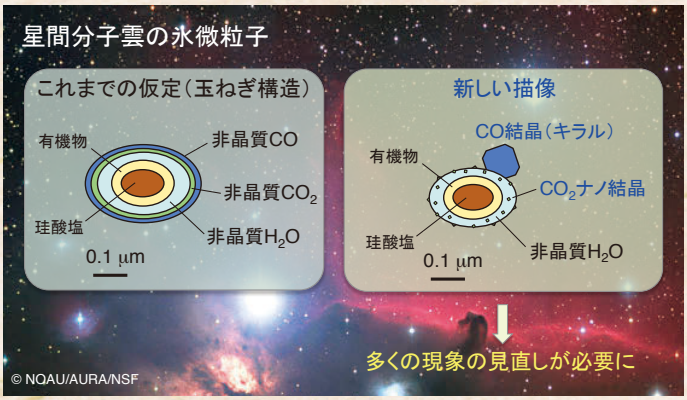
なお、本研究成果は、2021年9月6日（月）公開のThe Astrophysical Journal誌にオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Transmission Electron Microscopy Study of the Morphology of Ices Composed of H_2O, CO_2, and CO on Refractory Grains（星間微粒子上のH_2O, CO_2, COからなる氷の形態の透過型電子顕微鏡観察）

著者名：香内　晃[1]、柘植雅士[1]、羽馬哲也[2]、大場康弘[1]、奥住　聡[3]、城野信一[4]、百瀬宗武[5]、中谷直輝[6]、古家健二[7]、下西　隆[8]、山﨑智也[1]、日髙　宏[1]、木村勇気[1]、村田憲一郎[1]、藤田和之[1]、中坪俊一[9]、橘　省吾[10]、渡部直樹[1]（1 北海道大学低温科学研究所、2 東京大学大学院総合文化研究科附属先進科学研究機構、3 東京工業大学大学院理学院、4 名古屋大学大学院環境学研究科、5 茨城大学理学部、6 東京都立大学大学院理学研究科、7 国立天文台科学研究部、8 新潟大学研究推進機構超域学術院、9 宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所、10 東京大学大学院理学系研究科）

雑誌名：The Astrophysical Journal（天文学の専門誌）
ＤＯＩ：10.3847/1538-4357/ac0ae6
公表日：2021年9月6日（月）（オンライン公開）



星間分子雲の氷微粒子の模式図。
左：これまで仮定されてきた玉ねぎ構造モデル。右：本研究で明らかにした描像。

Press Release

(2021/9/28)

グリーンランド氷床に飛来するダストの起源
～アイスコア中の微量なダストから過去100年の変化が明らかに～

発表者：助教　的場　澄人
助教　箕輪　昌紘

【研究成果の概要】

国立極地研究所の永塚尚子特任研究員を中心とする研究グループは、グリーンランド氷床北西部の「SIGMA-Dアイスコア」に含まれる鉱物ダスト（岩石由来の微粒子、図1）の分析を行い、過去100年の間にグリーンランド氷床上に降下したダストの起源について、その連続的な変化を初めて明らかにしました。

アイスコアに含まれる鉱物ダストの濃度や粒径は地球環境変動の歴史を読み解くための指標となっています。さらに、鉱物ダストがどこから飛来したか、つまり、ダストの起源を明らかにすることは、過去の大気循環や供給源となる場所の環境変動を知るための重要な手がかりです。しかし、極域のアイスコアに含まれる鉱物ダストは、量が少ないためにその起源を推定することが難しく、近年の温暖期のダストの起源についてはこれまでほとんど明らかにされていませんでした。

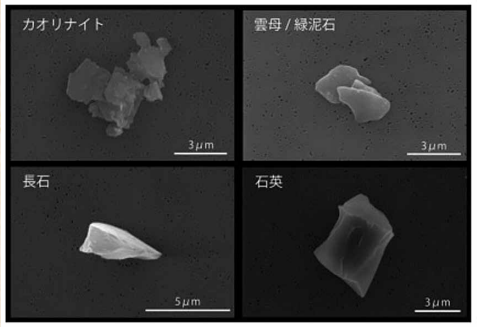
本研究では、電子顕微鏡を用いて鉱物ダストのサイズや組成を一粒ずつ解析することで、濃度が低い時期でもアイスコア中の鉱物ダストの起源推定を可能としました。本成果により、SIGMA-Dアイスコアの鉱物ダスト起源はグリーンランドの気温変化の影響を受けて変動しており、温暖な時期には雪や氷の融解によって露出した氷床周辺の堆積物に由来する鉱物ダストが多く飛来していたことが分かりました。この成果は、Climate of the Past 誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

タイトル：Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years

著者名：永塚尚子（国立極地研究所 気水圏研究グループ）、東久美子（国立極地研究所気水圏研究グループ／総合研究大学院大学）、對馬あかね（千葉大学理学研究院）、藤田耕史（名古屋大学環境学研究科）、的場澄人（北海道大学低温科学研究所）、大沼友貴彦（東京大学生産技術研究所）、Remi Dallmayr（アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所）、門田萌（研究当時：北海道大学低温科学研究所／大学院環境科学院修士課程）平林幹啓（国立極地研究所気水圏研究グループ）、尾形純（国立極地研究所、気水圏研究グループ）、塚川佳美（国立極地研究所気水圏研究グループ）、北村享太郎（国立極地研究所気水圏研究グループ）、箕輪昌紘（研究当時：名古屋大学環境学研究科、現在：北海道大学低温科学研究所）、小室悠紀（国立極地研究所気水圏研究グループ）、本山秀明（国立極地研究所気水圏研究グループ／総合研究大学院大学）、青木輝夫（国立極地研究所気水圏研究グループ／総合研究大学院大学）

掲載誌：Climate of the Past
ＤＯＩ：10.5194/cp-17-1341-2021
ＵＲＬ：https://cp.copernicus.org/articles/17/1341/2021/
公表日：2021年6月21日



SIGMA-D アイスコアに含まれる鉱物ダストのうち、ケイ酸塩鉱物の SEM 画像。多数の黒い丸はフィルターの孔。

Press Release

(2021/10/26)

札幌の積雪中に存在する光吸収性粒子が融雪に与える影響を国内・国外由来に分離して推定しました

発表者：助教　的場　澄人

【研究成果の概要】

気象研究所は、積雪地域における気象・放射・雪氷物理状態を詳細に観測するために、北海道大学低温科学研究所と共同で札幌に観測拠点を設置しています。本研究グループが札幌で実施した先行研究によると、札幌における消雪の時期は、積雪中のブラックカーボンや鉱物性ダストといった太陽光を吸収する不溶性粒子（元々は大気中にエーロゾルとして存在し、様々なプロセスを経て積雪中に取り込まれたもの）の存在によって早められることが分かっています。しかし、それらの積雪中光吸収性粒子の由来については十分理解されていませんでした。そこで、本研究では、気象研究所で開発している世界的に見ても詳細な積雪変質モデルと領域気象化学モデルを組み合わせて活用し、2011-2012冬期（11 ～ 4月）の札幌に到達して積雪に沈着した国内・国外由来の光吸収性粒子量をシミュレートし、融雪に対する両者の相対的影響を評価しました。積雪中光吸収性粒子の由来を正確に把握することは、効果的な環境保護対策（排出量規制など）を考えるうえで有効な情報となり得ます。

研究の結果、研究対象期間に札幌に到達して積雪に沈着したブラックカーボンと鉱物性ダストに国外由来の粒子が占める割合は、それぞれ約82%と約94%に達することが分かりました。また、札幌における全積雪中光吸収性粒子は融雪を15日早める効果を持っており、そのうち国外由来の積雪中光吸収性粒子の寄与が約7割（10日）に達したことが明らかになりました。さらに、積雪中光吸収性粒子による雪面での放射強制力を評価したところ、12 ～ 2月の厳冬期の全放射強制力は約12Wm^{-2}であり、そのうち約60%が国外由来の積雪中光吸収性粒子によることが分かりました。一方3月の融雪期になると、全放射強制力は約30Wm^{-2}に急増し、国外由来の積雪中光吸収性粒子の寄与も約80%にまで上昇することが明らかになりました。この寄与率の明瞭な変化は、我が国周辺における厳冬期と融雪期の気象条件の違いによって説明することが出来ます。

本研究は1冬期分の成果ではありますが、今後は、札幌における知見を積み重ねると同時に国内他地点にも本手法を適用することを通して、我が国の効果的な環境保護対策に資する基礎情報の蓄積に貢献していくとともに、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書に反映する等、国際社会にも知見を共有することを目指します。

また、気象庁の発表する解析積雪深・解析降雪量といった雪に関する情報の高度化にも繋げていきます。

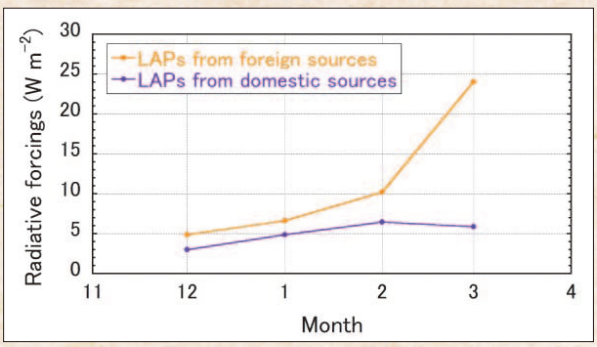
この研究成果は、2021年8月21日付けでアメリカ地球物理学連合が発行する科学誌「Geophysical Research Letters」に公開されました。

【論文発表の概要】

タイトル：Quantifying Relative Contributions of Light-Absorbing Particles from Domestic and Foreign Sources on Snow Melt at Sapporo, Japan during the 2011–2012 Winter

著者名：M.Niwano[1,2], M.Kajino[1,3], T.Kajikawa[4], T.Aoki[2], Y.Kodama[5], T.Tanikawa[1], S.Matoba[6]（1 気象庁気象研究所、2 国立極地研究所、3 筑波大学生命環境系、4 筑波大学理工情報生命学術院、5 北海道大学北極域研究センター、6 北海道大学低温科学研究所）

掲載誌：Geophysical Research Letters
ＤＯＩ：10.1029/2021GL093940
ＵＲＬ：https://doi.org/10.1029/2021GL093940
公表日：2021年8月21日



2011-2012 冬期の札幌において積雪中に存在した光吸収性粒子による雪面における月平均放射強制力の変化

(2021/10/26)

巨大な海洋渦が暖かい海水を南極大陸方向へ運ぶ
～東南極トッテン氷河を下から融かす主要な熱源～

発表者：准教授　青木　茂

【研究成果の概要】

東南極で最大級の規模を有するトッテン氷河（注１）の周辺域では、近年、氷床（注２）質量の減少が報告され、また、将来の大規模な氷床流出も懸念されています。国立極地研究所の平野大輔助教、東京海洋大学の溝端浩平助教、水産研究・教育機構の佐々木裕子研究員、北海道大学低温科学研究所の青木茂准教授らの研究グループは、水産庁漁業調査船「開洋丸」および南極観測船「しらせ」により実施された大規模な海洋観測で取得した現場観測データと衛星観測データを統合的に解析し、トッテン氷河の沖合に定在する巨大な海洋渦が、比較的温度の高い海水を効率的に南極大陸方向へと輸送していることを明らかにしました。氷河末端に流れ込む暖かい海水は、氷床を下から融解することで氷床流出の引き金となるため、本成果は、氷床の質量損失が加速するトッテン氷河域での質量損失プロセスの包括的理解につながると期待されます。

【用語解説】

（注１）　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と呼ぶ。図２（右）も参照。なお、海水が凍った海氷とはいずれも異なる。

（注２）　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。

【論文発表の概要】

タイトル：Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica

著者名：平野大輔（国立極地研究所南極観測センター／気水圏研究グループ・助教）、溝端浩平（東京海洋大学・助教）、佐々木裕子（水産研究・教育機構・研究員）、村瀬弘人（東京海洋大学・准教授）、田村岳史（国立極地研究所気水圏研究グループ・准教授）、青木茂（北海道大学低温科学研究所・准教授）

雑誌名：Communications Earth & Environment
ＤＯＩ：10.1038/s43247-021-00217-4
ＵＲＬ：https://www.nature.com/articles/s43247-021-00217-4
公表日：2021年8月6日

図１：東南極のトッテン氷河末端域。左側の青い部分は海。

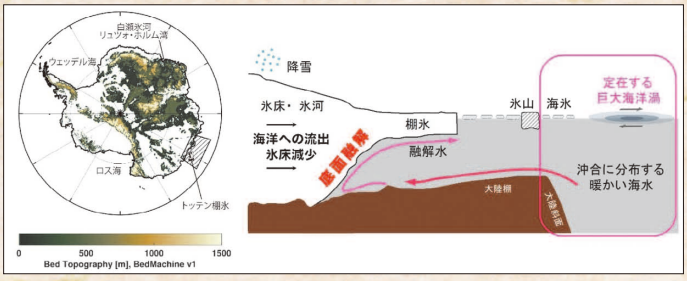


図２：（左）海面に対する南極氷床底面の標高。白抜きの領域は、氷床基盤が海面よりも下に位置する領域を示す（Morlighem et al., 2020）。（右）海洋による氷床末端部・棚氷の融解プロセスを示す模式図。

Press Release

(2021/11/4)

夏に最も冷える、パタゴニアの湖
～氷河が流れ込む湖で水温の季節変化を世界で初めて解明～

発表者：教授　杉山　慎
助教　箕輪　昌紘

【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、箕輪昌紘助教、北極域研究センターの深町　康教授らの研究グループは、南米パタゴニアの氷河が流入する湖で20ヶ月にわたる長期観測に成功し、水温と流速の季節変化を世界で初めて明らかにしました。

夏になると氷河が盛んに融解して、冷たい融け水が湖に流れ込む様子が観測されました。この水は土砂を含んで密度が高いため、湖の底深くに沈み込んで蓄積されます。その結果、湖の深い部分では真夏に水温が最も低くなり（約2℃）、逆に表面近くでは年間最高水温（約5℃）が記録されました。湖水の流速、気温・風速のデータからも、夏に湖底付近が氷河の融け水で冷やされる一方で、大気の熱と日射で暖まった水が強い風で表層付近を循環する様子が確認されました。

本研究で明らかになった水温とその季節変化は、氷河の変動メカニズムを考える上で重要です。例えば湖の中で上記の温度分布が生まれると、水温が高い表層付近で氷がよく融けますが、水温が低い中層以深では氷が融けないので氷河が水中に突き出てきます。すると水に浸かった氷に浮力が働き、大規模な氷の崩壊が起きると考えられます。また、氷河が激しく融解すると融け水が湖を冷やすので、氷河の末端部では逆に氷の融解が抑制される効果も予想されます。氷河湖の季節的な水温変化は、過去に報告されたことがなく、湖の生態系を考える上でも重要な知見になると考えられます。

本研究成果は、2021年11月2日（火）にNature Communications誌にオンライン掲載されました。本研究は、科研費基盤研究（A）（20H00186）の助成を受けて実施されました。

【論文発表の概要】

論文名：Subglacial discharge controls seasonal variations in the thermal structure of a glacial lake in Patagonia（パタゴニアの氷河湖では氷河の融け水が湖水温度をコントロールする）

著者名：杉山　慎[1,2,3]、箕輪昌紘[1,3]、深町　康[2]、波多俊太郎[1,3]、山本淳博[1,3]、トビアス・サウター[4,5]、クリストフ・シュナイダー[5]、マリウス・シェーファー[5,6]（1 北海道大学低温科学研究所、2 北海道大学北極域研究センター、3 北海道大学大学院環境科学院、4 フリードリヒ・アレクサンダー大学、5 ベルリン・フンボルト大学、6 アウストラル大学）

掲載誌：Nature Communications（英科学誌）
公開日：2021年11月2日（火）（オンライン公開）
ＤＯＩ：10.1038/s41467-021-26578-0

南米パタゴニアのグレイ氷河。氷河前の湖で観測を行った。

(2021/11/4)

宇宙の氷微粒子における原始有機分子合成のレシピが明らかに
～宇宙における分子の進化解明に大きな前進～

発表者：教授　渡部　直樹
助教　日高　　宏

【研究成果の概要】

北海道大学低温科学研究所の渡部直樹教授、日高 宏助教、同大学院理学院博士後期課程の石橋篤季氏らの研究グループは、新たに開発した極低温氷表面の非破壊・超高感度分析装置を用い、星や惑星誕生以前の宇宙空間に浮遊する極低温の氷微粒子上で生じる、原始的な有機分子合成の様子を詳細に観測することに成功しました。

極低温の宇宙空間には生命の起源にも繋がる多くの有機分子が見つかっていますが、それらがどのような材料でどのような過程を経て合成されたのか、その詳細はわかっていませんでした。研究グループはこれまでの研究から、有機分子合成には氷微粒子表面の化学反応が鍵を握ることを突き止めていましたが、今回の研究では、宇宙の様々な場所で観測されており、より複雑な有機分子の前駆体と考えられている代表的な原始的有機分子ギ酸メチル（HCOOCH3）について、氷表面で生成される際の材料物質と合成の順序を世界に先駆けて明らかにしました。本研究の手法を用いることによって、今後、宇宙の極端環境下におけるより多くの有機分子合成のレシピが明らかになり、宇宙における分子進化の全容に迫ることが期待されます。

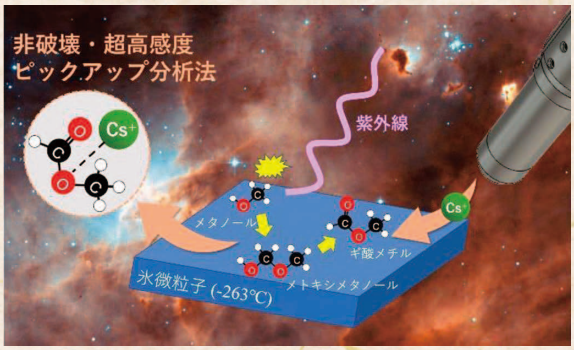
なお、本研究成果は、2021年10月29日（金）公開のAstrophysical Journal Letters誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Efficient formation pathway of methyl formate: the role of OH radicals on ice dust（氷微粒子表面におけるギ酸メチルの効率的な生成過程：OH ラジカルの役割）

著者名：石橋篤季[1,2]、日高　宏[1]、大場康弘[1]、香内　晃[1]、渡部直樹[1]（1 北海道大学低温科学研究所、2 北海道大学大学院理学院）

雑誌名：Astrophysical Journal Letters（天文学の専門誌）
ＤＯＩ：10.3847/2041-8213/ac3005
公表日：2021年10月29日（金）（オンライン公開）



新たに開発した、非破壊・超高感度分析装置による氷表面分析のイメージ図。本手法を用いることで、宇宙に浮遊する極低温氷微粒子上での原始有機分子（ギ酸メチル）合成のレシピが明らかになった。背景は実際の暗黒星雲の写真。

Press Release

(2021/11/11)

グリーンランドの氷河融解は21世紀から始まった
～1980年代の航空写真と最新の人工衛星データから氷河の縮小を解析～

発表者：教授　杉山　慎

【研究成果の概要】

北海道大学大学院環境科学院博士後期課程の王　鄴凡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、1980年代の航空写真と最新の人工衛星データの解析から、グリーンランド北西部における氷河変動を33年間にわたって解明しました。

1985年から2018年における氷河の表面標高の測定から、全氷河の平均で氷が毎年0.6m薄くなっていることが明らかになりました。この変化を詳しく調べたところ、2001年まではほとんど変化が見られない一方で、2001年以降には毎年1.3mの割合で急速に氷が失われていました。つまり、氷河融解が21世紀に入って急激に加速したことが明らかになりました。さらに融解加速の原因を解析したところ、1990年代後半に顕著となった気温上昇に加えて、海水温の上昇、氷河の流動加速が氷河に強く影響していることが示されました。

この研究結果は、グリーンランドにおける氷の融解を正確に把握し、その原因を理解する上で重要です。特に氷河変動が始まったタイミングとその原因が特定されたことで、氷河の将来変動予測に重要な示唆が得られました。グリーンランド北西部は、日本の研究者が集中的に研究を行っている地域であり、この地域における環境変動を世界に先駆けて解明し報告したものです。

本研究成果は、2021年10月20日（水）公開のJournal of Geophysical Research: Earth Surface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及びArCS II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：Surface Elevation Change of Glaciers Along the Coast of Prudhoe Land, Northwestern Greenland from 1985 to 2018（グリーンランド北西部の沿岸域における1985年から2018年の氷河表面標高変化）

著者名：王　鄴凡[1,2]、杉山 慎[1,2,3]、アンダース・ビョーク[4]（1 北海道大学低温科学研究所、2 北海道大学大学院環境科学院、3 北海道大学北極域研究センター、4 コペンハーゲン大学）

掲載誌：Journal of Geophysical Research：Earth Surface（地球物理学の専門誌）

公開日：2021年10月20日（水）（オンライン公開）

ＤＯＩ：10.1029/2020JF006038

解析した中で最大の氷河であるグリーンランド・ハイルプリン氷河。最大幅は約10km。

AWARD

前野　紀一

日本雪氷学会 北海道支部 2020年度 北海道雪氷賞（北の蛍雪賞）

（令和3年5月28日受賞）

下山　宏

日本雪氷学会 北海道支部 2020年度 北海道雪氷賞（北の六華賞）

（令和3年5月28日受賞）

山﨑　智也

第9回東北大学金属材料研究所 研究部共同利用・共同研究 若手萌芽研究最優秀賞

（令和3年7月7日受賞）

滝沢　侑子

2021年度 日本有機地球化学会 研究奨励賞（田口賞）

（令和3年8月17日受賞）

近藤　研

社団法人日本雪氷学会・日本雪工学会 雪氷研究大会2021・千葉-オンライン

学生優秀発表賞 口頭発表部門 優秀発表賞

（令和3年9月15日受賞）

江淵　直人

日本海洋学会賞

（令和3年9月15日受賞）

■人事異動（令和3年4月2日から令和3年10月1日まで）

異動日	異動内容	氏　名	職　名	備　考
R3. 4.19	採用	南須原　麻　希	技術補助員	
R3. 4.30	辞職	柘　植　雅　士	特任助教	
R3. 5. 1	採用	柘　植　雅　士	助　教	
R3. 6. 8	辞職	友　田　理　恵	事務補助員	
R3. 6.30	辞職	CHAMBERS CHRISTOPHER ROBERT SCOTT	学術研究員	
R3. 7. 1	転出	瀬　崎　修　一	係　長	財務部資産運用課不動産管理担当係長へ
R3. 7. 1	転入	永　井　　潤	係　長	北方生物圏フィールド科学センター事務部静内研究牧場事務担当係長から
R3. 7. 1	採用	伊　藤　　薫	学術研究員	
R3. 8. 1	採用	箕　輪　昌　紘	助　教	
R3. 8.10	採用	澁　谷　未　央	学術研究員	
R3. 9. 1	採用	近　藤　　研	技術補佐員	
R3. 9.21	採用	後藤田　京　子	技術補助員	
R3. 9.30	任期満了	緒　方　英　明	特任准教授	
R3. 9.30	辞職	梅　澤　和　寛	博士研究員	
R3. 9.30	辞職	高　田　由起子	事務補助員	
R3.10. 1	転出	村　岡　英　明	係　長	附属図書館事務部総務課庶務担当係長へ
R3.10. 1	転入	伊　東　武　志	係　長	法学研究科・法学事務部庶務担当係長から
R3.10. 1	採用	CHEN DAN	技術補助員	
R3.10. 1	採用	小　林　美　穂	事務補助員	
R3.10. 1	採用	山　内　彩加林	学術研究員	

編❄集❄後❄記

▶今号も執筆者の皆様のおかげで豊富な記事となりました。来年も低温研から沢山の熱い情報をお届けできますように!（山口）

▶今号も執筆者の熱意がこもった記事が満載です。来年も低温科学の熱い研究をお届けします。（渡辺）

▶コロナ禍であるにも関わらず研究で全く後れを取ることがない低温研の底力のようなものを感じました。来年はフィールドに行ったり学会に行ったりもっとアクティブな年になりますように!（滝沢）

▶Research 記事や Press Release 記事を編集していて、改めて低温研の研究領域の広さに驚愕しました!今号の発刊で、この驚きを皆様にもお届けします!（日髙）

低温研ニュース第52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