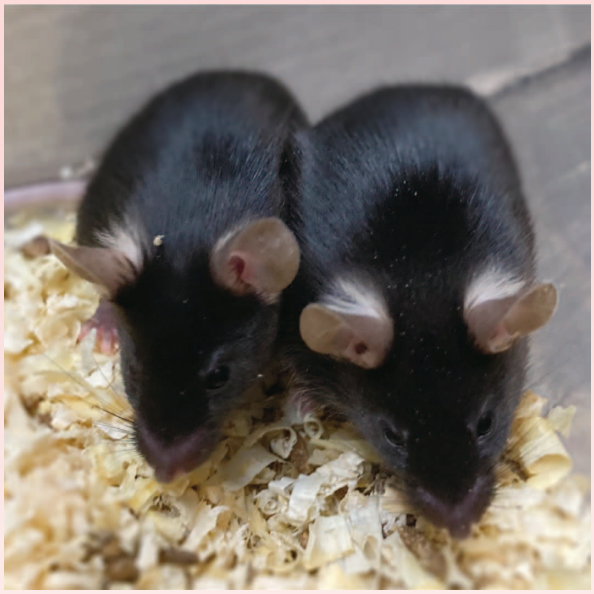
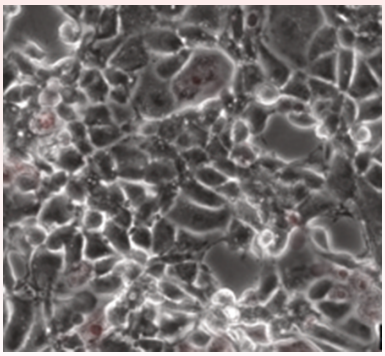
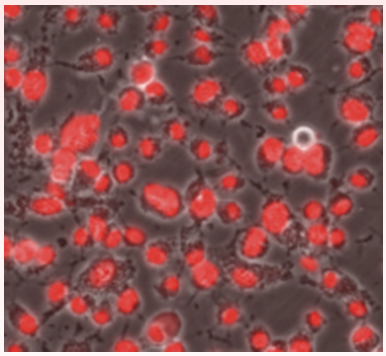
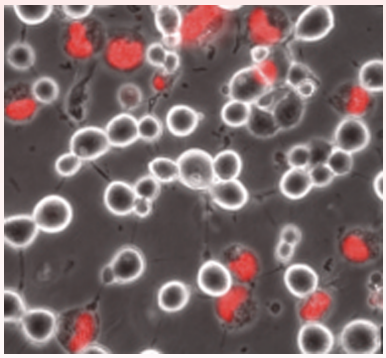
ILTS
低温研ニュース
2024年12月
No.58

上段：(左) 丸まって冬眠するシリアンハムスター。(右) 冬眠をしない哺乳類のマウス。
下段：低温下での培養した、(左) シリアンハムスターの細胞、(中央) ヒトの細胞、(右) シリアンハムスターのGPx4遺伝子を導入したヒトの細胞。赤く染まっているのは死んだ細胞の細胞核。

Research

赤く染まる雪の謎を探る
～低温環境で活躍する微生物～
(福井　学) …… 2

冬眠する哺乳類の細胞が低温で死なない仕組み
(曽根　正光) …… 8

People …… 14

Report

海外調査 (杉山　慎、日下　稜) …… 15
Hokkaidoサマー・インスティテュート
雪氷寒冷圏モデリングコースの開催
(杉山　慎、グレーベ　ラルフ) …… 16
海外調査 (波多　俊太郎) …… 17
海外調査 (渡邉　友浩、福井　学) … 18
「国際冬眠学会2024」への参加
(曽根　正光、山内　彩加林、山口　良文) 19
海外調査 (的場　澄人) …… 20
グリーンランド南東ドームアイスコアに
関する研究集会 (的場　澄人) …… 21
日・伊アイスコア研究会 (的場　澄人) 21
海外調査 (西野　沙織) …… 22

Press Release／News

赤く染まる雪の謎を探る
～低温環境で活躍する微生物～

生物環境部門　福井　学

雪が赤く染まる：古くて新しい科学的問い

雪国に暮らす人々にとって積雪は厄介なものと感じることも多い。長い冬を終えて心待ちにしていた春到来。雪解けの頃、たとえば北海道の最高峰旭岳を訪れてみよう。麓の旭岳温泉からロープウェーで姿見の池駅まで、その後軽トレッキングで姿見の池を目指す。日当たりの良い場所で赤く染まっている雪を容易に観察することができる（図１）。赤雪と呼ばれる現象である。古くは紀元前のアリストテレスの「動物誌」にも記述がある。

赤雪を手に取ってみて、その匂いを嗅いでみよう。スイカの香りがする。赤雪は、別名スイカ雪（watermelon snow）とも呼ばれる。赤雪に限らず、雪が赤、緑、黄、赤褐色を呈する現象を総じて「彩雪現象」と呼び、高山・亜高山帯や極域など高緯度の場所において融雪の時期に短期間に生じる。また、彩雪現象は、日光を吸収するため、雪氷融解を加速させる働きもある。

なぜ雪が赤く染まるのだろう？　その古くて新しい科学的問いは、解き明かすことが容易ではない。本稿では、彩雪現象、特に南極で観察される赤雪に注目して、生物にとって過酷な低温環境での生命活動について、最新の知見を含めて紹介する。

図１　雪が赤く染まるようす．北海道旭岳姿見の池周辺にて撮影
（2016 年 7 月 6 日）

南極の彩雪現象：過酷な環境を乗り切る

平均 2,500m の厚さの氷床に覆われている南極大陸であるが、約 2% 強は氷床から岩が露出している露岩域である。特に、短い夏の間、沿岸地帯に露岩域が広がる（図２）。こうした露岩域では、氷河融解水の沢に沿って特殊な生態系が存在する。たとえば、風衝地生態系である（図３）。しかし、生物にとっては過酷な環境である：乾燥、貧栄養、低温（凍結）、強光、強紫外線等。

図２　南境大陸氷河が迫り出す凍結湖沼
（ルンドボックスヘッタ・丸湾大池）（2005 年 12 月 20 日撮影）

図３　南極ラングホブデにおける風衝地生態系
（2006 年 1 月 24 日撮影）

昭和基地から数十 km 離れたところにラングホブデと呼ばれる大陸沿岸地域があり、特別保護地区にも指定されている（ASPA141）。雪鳥沢やつで沢沿いは彩雪現象が観察される（図４）。特に、やつで沢の雪田には緑雪および赤雪が広範囲に観察された（図５）。彩雪の主要因はクロロモナスを代表とする雪氷緑藻の大繁殖（ブルーム）によるものである（図６）。すなわち、光合成色素であるクロロフィルの割合が高い場合は緑雪、光合成の補助色素であるカロチノイドが卓越すれば雪が赤く染まることになる。緑藻細胞内に含まれている色素を詳細に分析してみると、アスタキサンチンであることが判明した。アスタキサンチンは、強紫外線から遺伝子（DNA）損傷を防御する作用があり、加えて抗酸化作用も知られている。したがって、南極沿岸地帯の雪氷表面において、緑藻が細胞内にアスタキサンチンを産生することで過酷な強紫外線環境下で生育を可能にしていると言える。

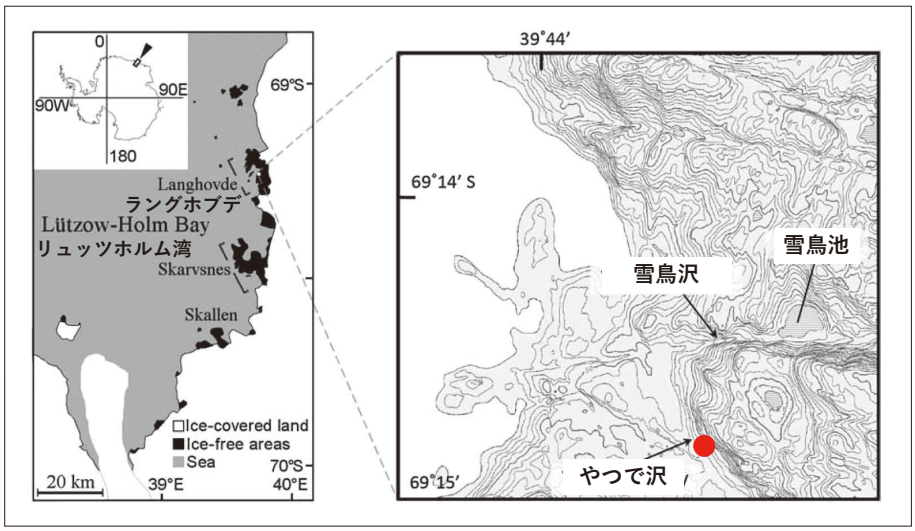


図４　南極宗谷海岸ラングホブデの地理的位置および調査地（赤い印）。文献１の図を改変。

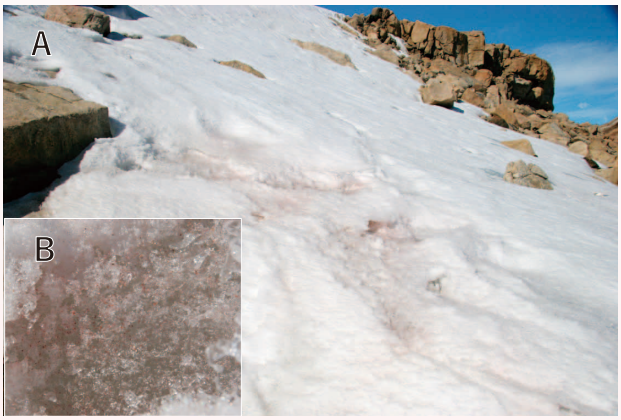


図５　南極ラングホブデ・やつで沢における彩雪現象（A）。赤雪表面の拡大写真（B）（2006 年 1 月 25 日撮影）

雪氷緑藻のブルームはいかに支えられているか？

酸素を発生する光合成反応は、光エネルギーで水と二酸化炭素から炭水化物を産する。これを光独立栄養性という。光独立栄養性を有する生物の生育には窒素やリンなどの栄養塩が必要であるものの、彩雪からも白雪からも栄養塩類は検出されなかった。栄養塩類はどこから供給されるのであろうか。

南極沿岸の雪氷という貧環境において、窒素供給の可能性は生物学的窒素固定である。大気からの窒素ガスがニトロゲナーゼの作用でアンモニアに変換される。植物に利用されるためには、アンモニアから硝化作用により

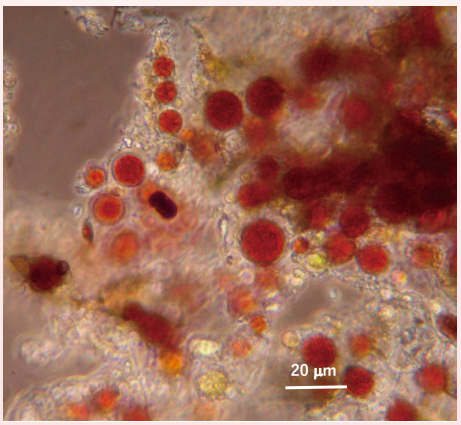


図６　南極宗谷海岸ラングホブデ・やつで沢で発生した赤雪の光学的顕微鏡写真（2006 年 1 月 25 日撮影）。直径約 5 から 20 μ m の球形の雪氷緑藻細胞内は赤いアスタキサンチンを含んでいた。視野内には緑色細胞も認められた。

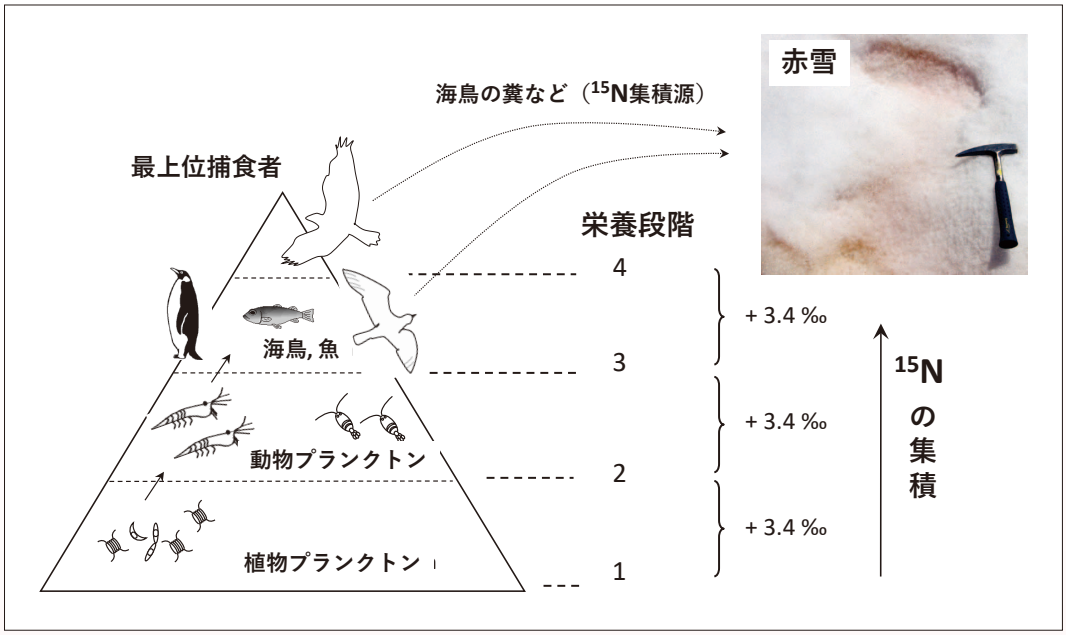


図７　南極宗谷海岸ラングホブデにおける栄養段階にそった ^{15}N の段階的集積。文献１の図を改変。

硝酸塩に変換される必要がある。彩雪からは窒素固定に関与する機能遺伝子（*nif*）は検出されず、さらに硝化細菌も検出されなかった。

彩雪現象の周辺でユキドリやオオトウゾクカモメが飛来していることから、海鳥の糞が雪氷藻類生育のための栄養塩類の起源となっているという仮説を立ててみた。そこで赤雪の窒素安定同位体（^{15}N）比を解析した。生態系の栄養段階が低次から高次へ進むにつれて ^{15}N が集積されることが知られている（栄養レベルが１段階高次になるにつれて +3.4‰上昇）。周辺海域の植物性プランクトンである珪藻の窒素安定同位体比（δ ^{15}N 値）は約 5.8‰であり、赤雪の値は 14.3 ～ 14.7‰と高い値を示したことから、雪氷藻類のブルームは沿岸海洋生態系によって支えられていた。すなわち、海洋中において増殖した植物プランクトン（栄養段階１）をオキアミなどの動物プランクトン（栄養段階２）が捕食する。魚、ペンギン、ユキドリ（栄養段階３）がその動物プランクトンを捕食し、最終的に最上位捕食者であるオオトウゾクカモメ（栄養段階４）の餌となる。こうした高次栄養段階の海鳥が飛来し、雪氷表面に糞を落とし、雪氷藻類ブルームのための栄養塩類として供給している（図７）。

赤く染まる雪のさらなる謎：環境微生物学の常識を覆す

赤雪の主要な微生物は雪氷緑藻であるが、採取した試料を注意深く顕微鏡観察するとバクテリアが緑藻細胞周辺に存在していた（図８）。バクテリアのほかにも南極

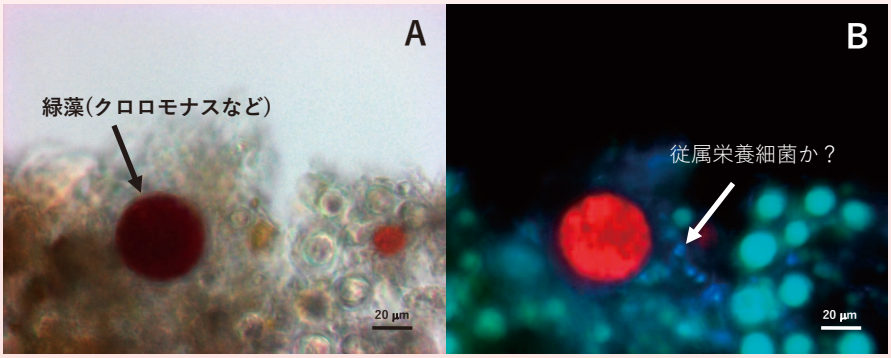


図８　ラングホブデ・やつで沢から採取された赤雪の光学顕微鏡写真（A）および DAPI 染色された落射蛍光顕微鏡写真（B）。蛍光色素 DAPI は DNA と特異的に結合し、励起光で青色蛍光を発する（B）

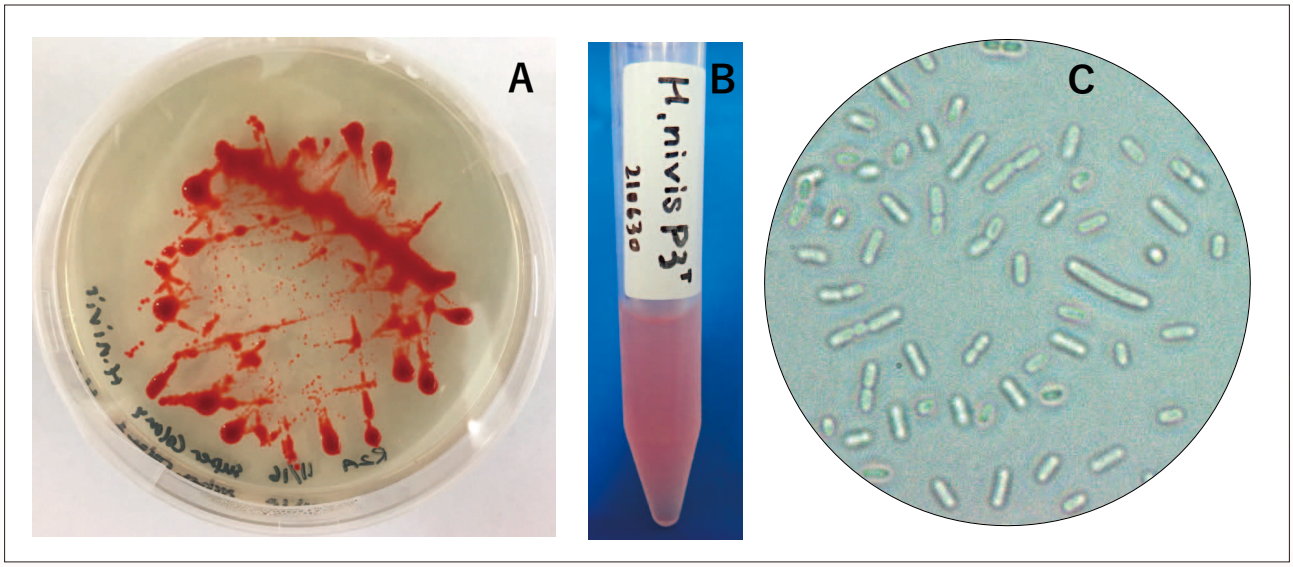


図９　南極ラングホブデ・やつで沢の赤雪から単離されたヒメノバクター・ニヴィス（*Hymenobacter nivis*）（原図：寺島美亜博士）。寒天培地上のコロニー（A）、液体培養（B）および光学顕微鏡写真（C）。

産担子菌酵母やカビ等も検出される。遺伝子解析から、優占バクテリアは、好気的従属栄養性のヒメノバクター（*Hymenobacter*）であることが判明した。詳細な生育特性の解明には、単離培養が重要である。しかし、自然環境に生息するバクテリアの 99% が培養不可能であり、しかも低温環境からの分離培養は極めて困難である。こうした環境微生物学の常識を覆し、幸運にも優占バクテリアの培養、さらには単離に成功した。

ラングホブデの赤雪より単離されたヒメノバクター・ニヴィス（*Hymenobacter nivis*）（図９）。属名ヒメノバクターは「薄膜中で増殖する桿菌」、種名ニヴィスは「雪」をそれぞれ意味し、バクテロイデス門に属している。これまでヒメノバクターは、南極・北極の雪氷、岩石や土壌などの高い放射照度環境から分離されてきているが、本菌は生育温度 0 ～ 25℃、至適温度 15℃、生育 pH5.3 ～ 7.8 で、耐冷性の非光合成の好気性従属栄養細菌である。低温培養条件（5℃）においても、光による増殖促進が観察されている。一方で、暗培養条件では細胞外高分子物質を生成し、南極雪氷環境における凍結―再融解ストレスに対して有利に働いていると考えられる。さらに、カロチノイド色素生産能を有していることから、強紫外線ストレスからの防御機構も有していた。ゲノム解析およびプロテオーム解析から、光で発現促進されるタンパク質としてプロテオロドプシン、クリプトクローム、ファイトクローム、デオキシリボジピリミジンフォトリアーゼなど、光の積極的利用、加えて紫外線によって損傷した DNA を修復する機構に関わるタンパク質を持っていることから、光回復の仕組みを有していると考えられた。

優占バクテリアであるヒメノバクター・ニヴィスは、南極彩雪中で生育のためのエネルギーをいかに獲得しているのであろうか。この疑問を解く鍵の一つは、プロテオロドプシンである。2000 年に海洋細菌からプロテオロドプシンが発見されて以来、光合成と並んで生態系のエネルギー獲得を担う生体分子として重要性が指摘されてきた。ヒメノバクター・ニヴィスは、雪氷緑藻の光合成産物を従属栄養利用可能である一方で、プロテオロドプシンを有している。このロドプシンは細胞膜を貫通するタンパク質部分と光を受容する補因子レチナールから構成されている。プロテオロドプシンに光が照射されると細胞内のプロトンが外側に排出され、プロトンの濃度勾配を利用して生体のエネルギー通貨とも呼ばれるアデ

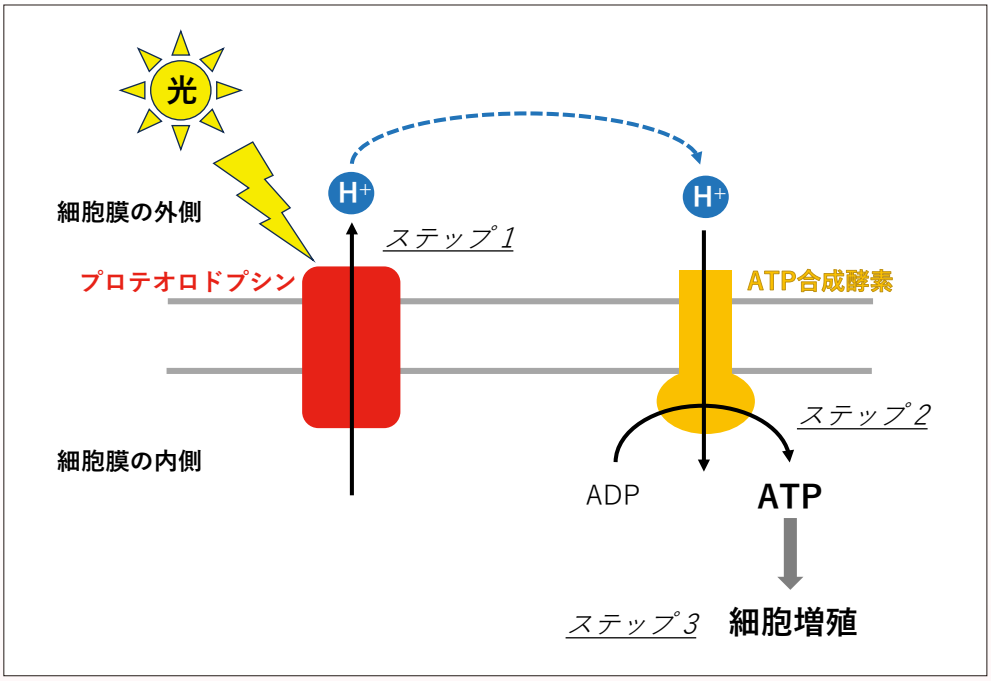


図 10　ヒメノバクター・ニヴィスの光依存的な生物応答に対するプロテオロドプシンの役割

ノシン三リン酸（ATP）が生成される（図 10）。生成された ATP はその後細胞増殖に用いられる。こうしたロドプシンの光反応は低温で遅くなることが知られているが、本菌は 5℃でも高い活性を示すことが明らかとなっている。このことは、南極の低温環境に適応してプロテオロドプシンの機能が発現されることを意味する。

特異的な低温微生物生態系の発見、そして新たな課題

南極ラングホブデの彩雪現象に関する一連の研究を通して、雪氷藻類とバクテリアから構成される低温微生物生態系が成立することが明らかになった（図 11）。特に、優占バクテリアの光に対する応答に関して多くの新発見が得られた。このことは、現場環境から幸運にも新規微生物の単離培養に成功したことがその後の研究を加速させたと言っても良い。一方で、優占バクテリアから藻類へのフィードバックに関しては未解明である。また、両者のパートナーシップがラングホブデの彩雪現象において特異的なものなのか、北極や高山・亜高山帯の現象との共通性に関しては今後研究を進めていく必要がある。さらに、雪氷藻類の増殖が先なのか、あるいはバクテリアが先なのか。藻類の種によってバクテリアの種も違うのか。このように新たな研究課題が多々湧いてくる。低温生態系に関する研究はそのアクセスの困難さや生物活動の低さから、より困難であり、時間と労力を要するが、気候変動の影響を受けやすいためその重要性は高まっている。

謝辞

彩雪現象に関する一連の研究は、海洋研究開発機構・高野淑識博士、ベルリン応用科学大学・寺島美亜博士、生物環境部門・田中亮一博士、および先端生命科学研究院・塚本卓博士との共同によるものです。ここに感謝の意を表します。

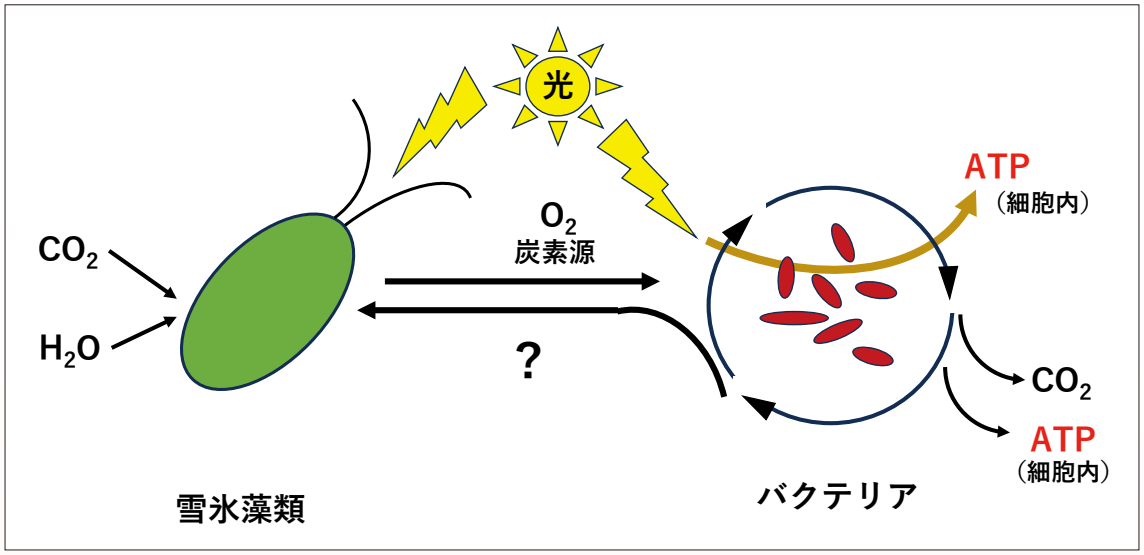


図 11　彩雪現象における低温微生物生態系および生物間相互作用の概念図

文献

1. Masanaori Fujii, Yoshinori Takano, Hisaya Kojima, Tamotsu Hoshino, Ryoichi Tanaka and Manabu Fukui. Microbial community structure, pigment composition, and nitrogen source of red snow in Antarctica. *Microbial Ecology* 59: 466-4775.2010.

2. Hisaya Kojima, Miho Watanabe, Riho Tokizawa, Arisa Shinohara and Manabu Fukui. *Hymenobacter nivis* sp. nov., isolated from red snow in Antarctica. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 66: 4821-4825. 2016. DOI: 10.1099/ijsem.0.001435

3. Mia Terashima, Kazuhiro Umezawa, Shoichi Mori, Hisaya Kojima and Manabu Fukui. Microbial community structure analysis of colored snow from alpine snowfield in northern Japan reveals the prevalence of Betaproteobacteria with snow algae. *Frontiers in Microbiology* 8: 1481. 2017. DOI:10.3389/fmicb.2017.01481

4. Mia Terashima, Keisuke Ohashi, Taichi E. Takasuka, Hisaya Kojima and Manabu Fukui. Antarctic heterotrophic bacterium *Hymenobacter nivis* P3^T diplays light-enhanced growth and expresses putative proteins. *Environmental Microbiology Reports* 11:227-235. 2019. DOI: 10.1111/1758-2229.12702

5. Kaori Kondo, Ryouhei Ohtake, Shunsuke Nakano, Mia Terashima, Hisaya Kojima, Manabu Fukui, Makoto Demura, Takashi Kikukawa, and Takashi Tsukamoto. Contribution of proteorhodopsin to light-dependent biological responses in *Hymenobacter nivis* P3^T isolated from red snow in Antarctica. *Biochemistry*. 2024. DOI: 10.1021/acs.biochem.4c00286

冬眠する哺乳類の細胞が低温で死なない仕組み

生物環境部門　曽根　正光

冬眠する哺乳類の細胞は低温に耐えることができる

私たちヒトを含む哺乳類は通常37℃くらいの体温を保っています。真冬のような寒い季節でも体温は一定であり、恒温動物と言われるゆえんです。しかし、低い気温の中で高い体温を保つためには、多くのエネルギーを消費して熱を作り出さなければいけません。しかも、冬はそのエネルギーの元となる食料が少ないので、野生の哺乳類にとって生存することが困難です。そんななか、哺乳類にはこの過酷な季節を乗り越えるために冬眠を行うものがいます。冬眠中、これらの動物は巣穴などでじっとして動かなくなり、体内で熱を作り出す働き（熱産生）を極端に抑え、エネルギーを節約します。そのおかげで、夏や秋に体に蓄えた脂肪や、巣穴に貯めた餌だけで冬をやり過ごすことができます。そして、リスやヤマネ、コウモリなど小型の哺乳類で特に顕著なのですが、体内の熱産生を抑えた結果、冬眠中は体温が低下します。図1は、私たちの研究室で用いているシリアンハムスター（以下、ハムスターと呼びます）の冬眠期の体温の変化を表したものです。冬眠期には、深冬眠と呼ばれる10℃以下の体温が5日間ほど続く期間と、中途覚醒と呼ばれる通常の体温で過ごす1日以下の短い期間が交互に繰り返されます。ヒトに置き換えてこの体温変化を考えてみると驚異的で、ヒトがもし短時間であってもこのような低体温になれば脳や心臓など様々な臓器が機能しなくなり死んでしまいます。しかし、ハムスターは5℃にもなる低体温を5日間も維持し、それを何度も繰り返しても平気なのです。それでは、どうしてハムスターは低体温

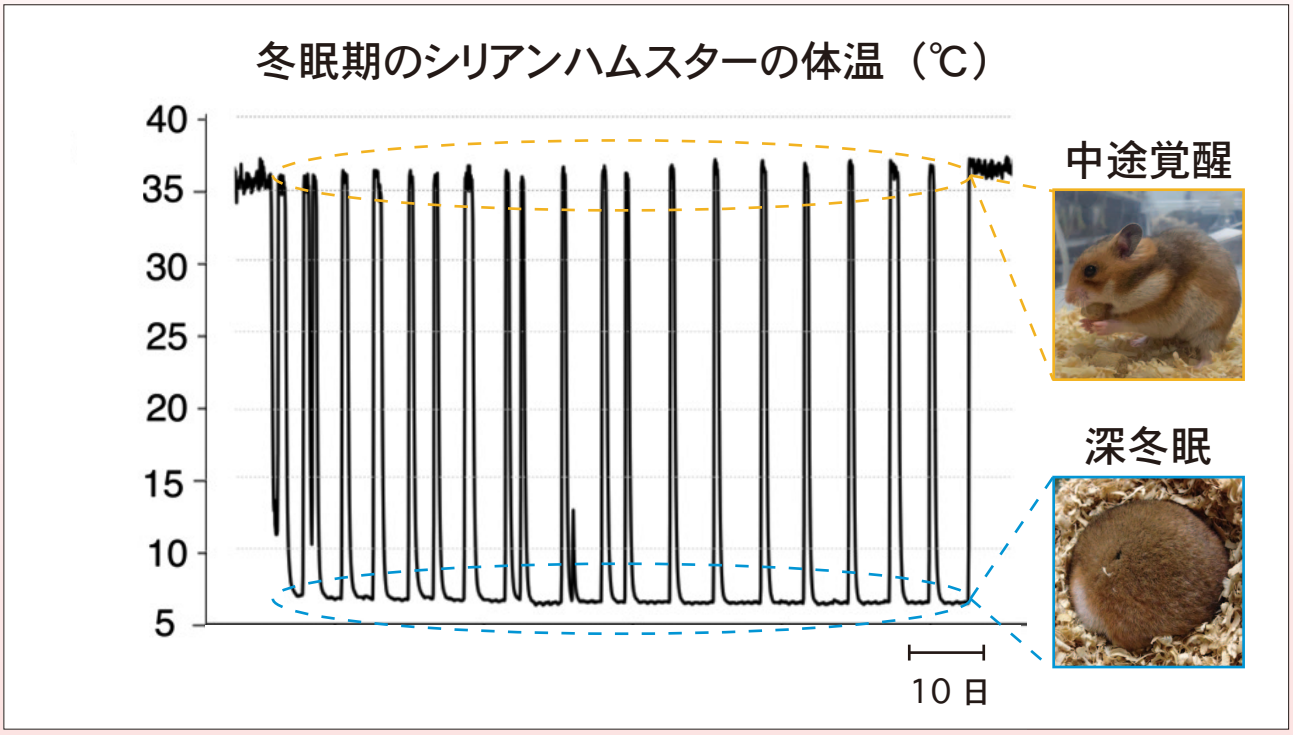


図1　短日寒冷の飼育環境下で冬眠を行うシリアンハムスターの体温変化。

でも体が傷つくことなく、耐えることができるのでしょうか。古くから、ハムスターやジリスのような冬眠する哺乳類から取り出して培養皿で培養した細胞は、ヒトやマウスのような冬眠しない哺乳類の細胞に比べて、低温に置いてもかなり長く生きられることが知られています。つまり、冬眠する哺乳類の体を構成する一つ一つの細胞が低温に対する耐性を備えていると考えられます。

ハムスターの細胞の低温耐性を支える遺伝子の探索

無限に増殖し扱いやすいがん細胞を用いて、実際に、ヒトのがん細胞とハムスターのがん細胞を同条件の培養液中で4℃に冷やしてみると、前者が1日程度で死滅するのに対し、後者は5日以上生存することができることが分かりました。これは、ヒトのがん細胞とは異なり、ハムスターのがん細胞に存在する遺伝子が、強力に低温耐性を支えていることを意味しています。私は、そのようなハムスターの遺伝子を、低温に弱いヒトのがん細胞で働かせれば、低温に耐えられるようになるのではないかと考えました。そこで遺伝子発現スクリーニングという手法を用いてこのアイデアを検証することにしました（図2）。この手法は、多種多様な遺伝子を個別に働かせて、その中から条件に合う作用を持つ遺伝子を選び出すというもので、分子生物学の分野でたびたび使用されます。そのための道具として、今回はプラスミドと呼ばれる環状のDNAを用いました。プラスミドを受け取った細胞の内部で、プラスミドに組み込まれている遺伝子を働かせることができます。そこで、通常温度で培養したハムスターのがん細胞で働いている多様な遺伝子を組み込んだ多様なプラスミド集団を作りました。これを遺伝子ライブラリーと呼びます。次にこの遺伝子ライブラリーを、低温に弱いヒトのがん細胞に取り込ませました。個々の細胞がどのプラスミドを受け取るかはランダムに決まりますので、それぞれ異なるハムスター遺伝子が働

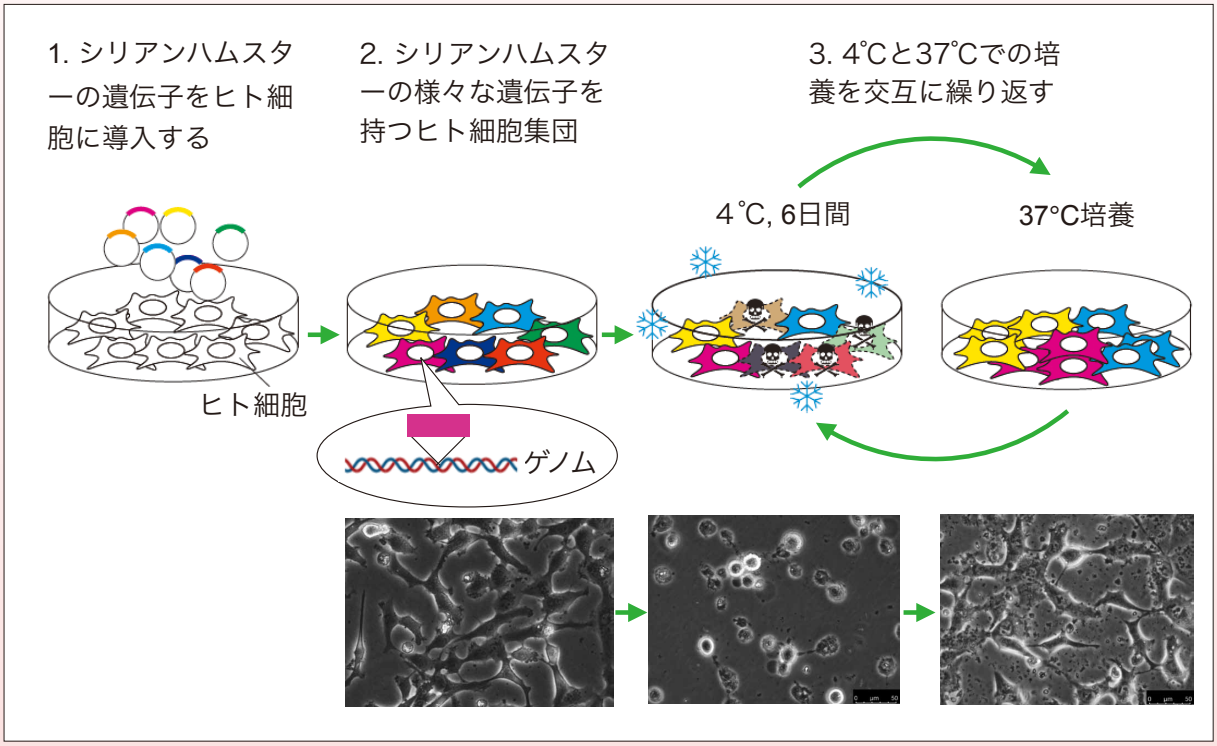


図2　ヒトがん細胞に低温・復温に対する耐性を与えるハムスターの遺伝子を探索するための遺伝子発現スクリーニングの方法。

く多様なヒトがん細胞の集団が得られます。この細胞集団を 4℃で 6 日間培養すると、ほとんどの細胞が死んでしまいました。しかし、次に 37℃に復温して培養するとごくわずかに生き残った細胞が増殖を再開し、細胞数が回復しました。以後このような低温と復温を繰り返し行って、これらのストレスに耐性を持つ細胞を得ました。元々のヒトがん細胞はこのような低温と復温によっては死んでしまうことから、生存した細胞はプラスミドによって導入されたハムスター遺伝子が働くことで低温と復温への耐性を得たのだろうと期待できました。

GPx4 がハムスターの細胞の低温耐性を支えている

複数回の低温 - 復温サイクルののち生存したヒトがん細胞がどのようなハムスターの遺伝子を受け取っていたのかを調べてみると、グルタチオンペルオキシダーゼ 4（GPx4）というタンパク質を作るための情報を担う遺伝子でした。改めてヒトがん細胞にハムスターの GPx4 を高レベルに働かせると低温での細胞の生存率が上がることが確認できました（図 3）。GPx4 は動物、植物を超えて生物界に広く存在するタンパク質で、細胞の中で抗酸化作用を発揮すること、特に脂質の酸化を抑えることが、GPx4 の持つ重要な役割であることが知られています。ヒトのがん研究などから、ある種のがん細胞では、薬剤などの作用で GPx4 の機能が失われると、細胞を構成している脂質が過酸化状態となります。そして、鉄イオンが媒介する反応によって過酸化状態となった脂質が細胞内に急速に広がり、最終的に細胞を包んでいる細胞膜が破れて細胞が死んでしまうことが知られています。このように鉄イオンに依存して、脂質の酸化が広がって細胞が死ぬことをフェロトーシスと呼びます。そこで、今度はハムスターのがん細胞が低温で生存することに GPx4 が重要であるかを調べることにしました。そのため、CRISPR/Cas9 と呼ばれるゲノム編集技術を用いてハムスターのゲノム上に存在する GPx4 遺伝子を破壊した GPx4 KO がん細胞を作り、低温で細胞が死ぬ割合を調べました。すると、GPx4 KO がん細胞は 4℃では 2 日間程度は生存できるのですが、その後次第に死に始め、5 日間でほとんど死滅してしまいました（図 4）。GPx4 が脂質の酸化を抑える働きがあることから、細胞内の酸化された脂質の量を調べることのできる蛍光指示薬を用いて、ヒトがん細胞、GPx4 を破壊していない野生型のハムスターがん細胞、ハムスター GPx4 KO がん細胞における酸化された脂質量の変化を 4℃の培養環境で観察しました（図 5）。その結果、ヒトがん細胞では非常に速やかに脂質が酸化されるのに対し、野生型のハ

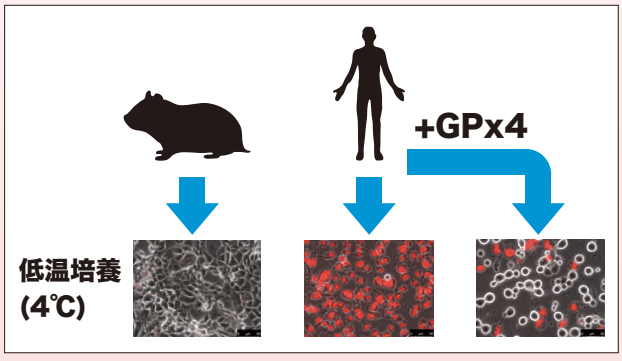


図 3　4℃で培養したハムスターがん細胞、ヒトがん細胞とハムスター GPx4 を導入したヒトがん細胞。赤く染まっているのは死んだ細胞の細胞核。

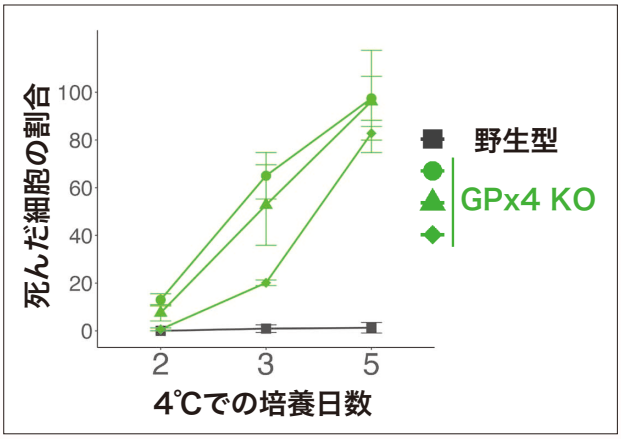


図 4　低温で培養したハムスターの野生型細胞と GPx4 KO 細胞が死ぬ割合の、低温での経過日数に対するプロット。

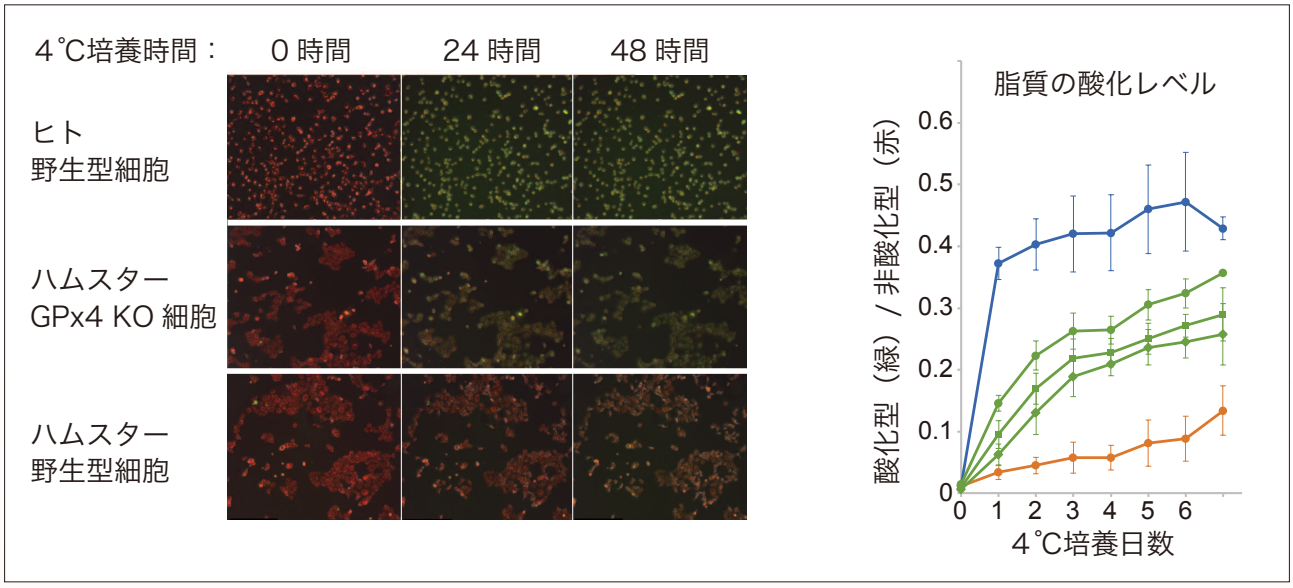


図５　蛍光指示薬を用い、低温で培養した細胞内部の脂質の酸化状態の変化を経時的に顕微鏡観察したもの。非酸化状態は赤く、酸化状態は緑で検出される。右はその比をプロットしたもの。

ムスターがん細胞では非常にゆっくりとしたペースでしか脂質の酸化が起こりませんでした。そして、ハムスターGPx4 KO がん細胞では、ヒトがん細胞ほどではないものの野生型に比べて速いペースで脂質の酸化が起こっていることが分かりました。こうした結果から、低温においてハムスターの細胞の内部で脂質が酸化するのをGPx4 が防ぐことで、細胞膜が破壊されて細胞が死ぬことを阻止していると考えられました。

ハムスターの低温耐性を支える GPx4 以外の遺伝子

実験を進める中で、元々ヒトがん細胞においてもヒトのゲノムに由来する GPx4 タンパク質がハムスターがん細胞と同程度存在すること、そして、低温で細胞が死ぬのを防ぐという作用はハムスターの GPx4 もヒトの GPx4 も同程度持っていることが分かってきました。したがって、最初の遺伝子スクリーニングでハムスター GPx4 が導入されたヒトがん細胞が低温で生存する能力を獲得したのは、元々持っているヒト GPx4 にハムスター GPx4 が加わって、細胞内に高レベルの GPx4 が存在した結果だと解釈できました。また、ハムスターの GPx4 KO がん細胞であっても 4℃で２日間は生存することができ、これは GPx4 が破壊されていなくてもヒトがん細胞が 4℃でほぼ１日以内に死ぬのとは対照的でした。これらの結果から、ハムスターがん細胞では GPx4 以外にも低温への耐性を支える遺伝子が働いていると考えられました。そこで、ヒトのがん研究から GPx4 と同様にフェロトーシスを抑える働きがあることが知られる、３つの遺伝子 FSP1, Dhodh, Gch1 に着目し、ハムスターがん細胞が低温で生存することにこれらの遺伝子が重要であるかどうかを調べました。CRISPR/Cas9 によりこれらの遺伝子をそれぞれ破壊したハムスターの KO がん細胞を作り、低温で細胞が死ぬ割合を調べると、これらの遺伝子をそれぞれ単独で破壊した KO 細胞は、何も遺伝子を破壊していない野生型細胞と変わらず低温でほとんど細胞死を起こしませんでした。しかし、GPx4 の働きを抑える薬剤を培養液に加えると、低温での培養２日目でこれらの KO 細胞は野生型細胞に比べ

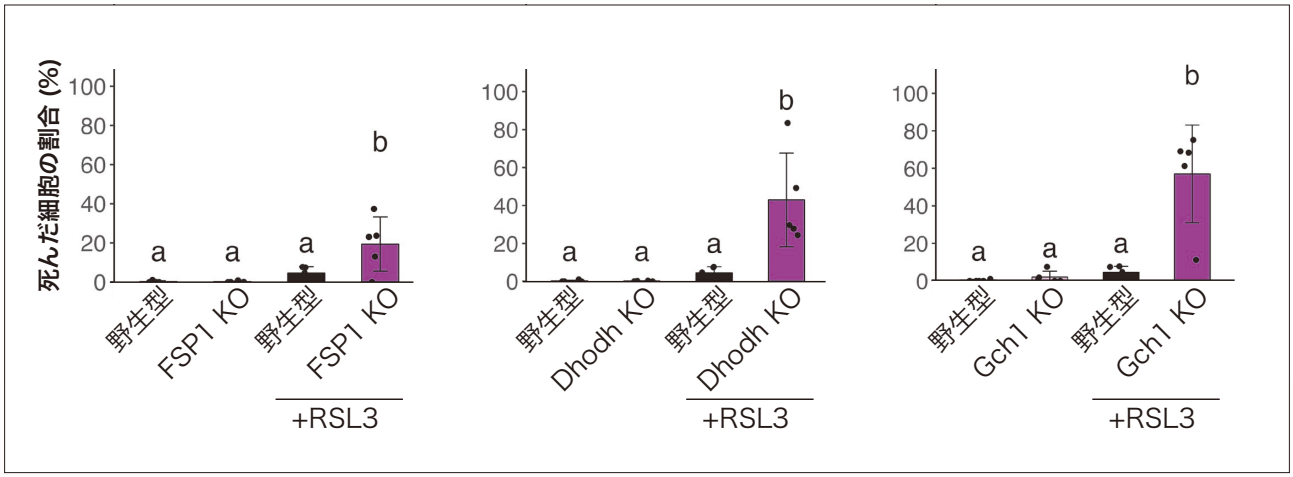


図6　ハムスターがん細胞について、FSP1、Dhodh、Gch1 をそれぞれ破壊した KO 細胞と野生型細胞が死んだ割合を、2 日間の 4 ℃培養で比較した結果。GPx4 の働きを抑える RSL3 という薬剤を添加すると KO 細胞が野生型細胞より死ぬ割合が増加する。

て高い割合で死ぬことが分かりました（図6）。従って、FSP1, Dhodh, Gch1 はいずれも GPx4 とは異なる働きでハムスター細胞の低温での生存をサポートしているものと考えられました。最後に、今回得た実験結果を元に、冬眠しない哺乳類であるマウスの肝臓の細胞を低温で長く生存させられるようになるか試みました。Gch1 がビオプテリンと呼ばれる抗酸化物質の合成に働く遺伝子であることから、培養液へのビオプテリンの添加と、マウスの肝臓の細胞へのハムスター GPx4 の導入、またはそれらの組み合わせについて、低温耐性への効果を調べました。結果、GPx4 の導入も、ビオプテリンの添加も、低温でマウス肝臓の細胞が死ぬことを抑えましたが、両方を組み合わせると更に効果が高まりました（図7）。従って、GPx4 とビオプテリンは低温で細胞を保護するのに相乗効果を持つと言えそうです。

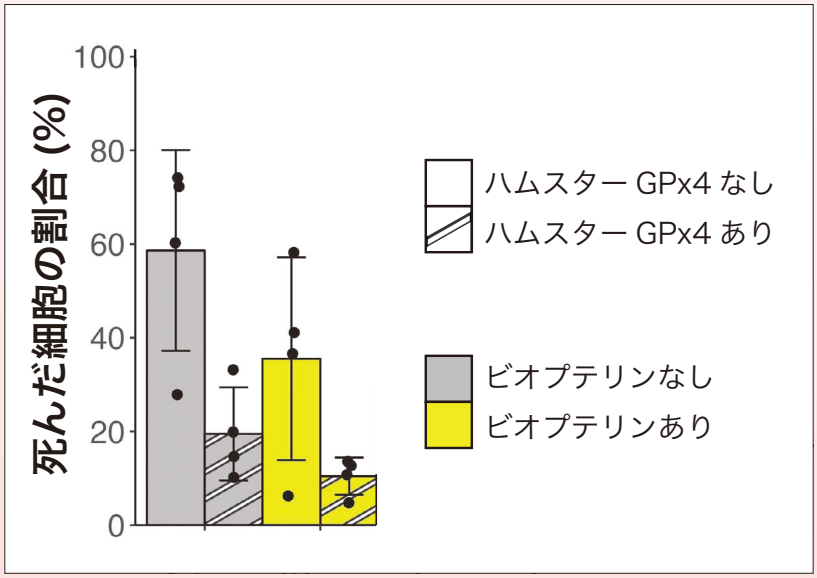


図7　4 ℃、24 時間の培養でマウスの肝臓の細胞が死ぬ割合について、ハムスター GPx4 の導入の有無と培養液中のビオプテリンの添加の有無の条件間で比較した結果。

おわりに

今回の研究で、GPx4 を始めとするハムスターの細胞が低温で生存するために重要な働きをする４つの遺伝子を見出すことができました。しかし、まだ明らかにはなっていない重要な問題があります。第一に、そもそも細胞を低温で培養したときにどうして脂質が酸化されるのか、その原因が分かっていません。第二に、今回見出したハムスターの細胞の低温耐性を支える遺伝子はどれもヒトなど冬眠しない哺乳類の細胞にも存在するのに、どうして後者の細胞は低温に耐えることができないのか不明です。今後、こうした疑問を解き明かすことができれば、その成果を、臓器移植の際の摘出された臓器を傷つけることなく低温で保存する方法を開発することなど、医療応用にも役立てられると期待できます。

参考文献

Identification of genes supporting cold resistance of mammalian cells: lessons from a hibernator. Masamitsu Sone , Nonoka Mitsuhashi, Yuki Sugiura, Yuta Matsuoka, Rae Maeda, Akari Yamauchi, Ryoto Okahashi, Junpei Yamashita, Kanako Sone, Sachiyo Enju, Daisuke Anegawa and Yoshifumi Yamaguchi. *Cell Death and Disease*, 9 (15),

退職のご挨拶

助教　中山　佳洋
（元　水・物質循環部門）

2024 年 11 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。2018 年 11 月末の採用から 6 年間様々な方から支えてもらい、とても恵まれた環境で研究ができました。ありがとうございました。

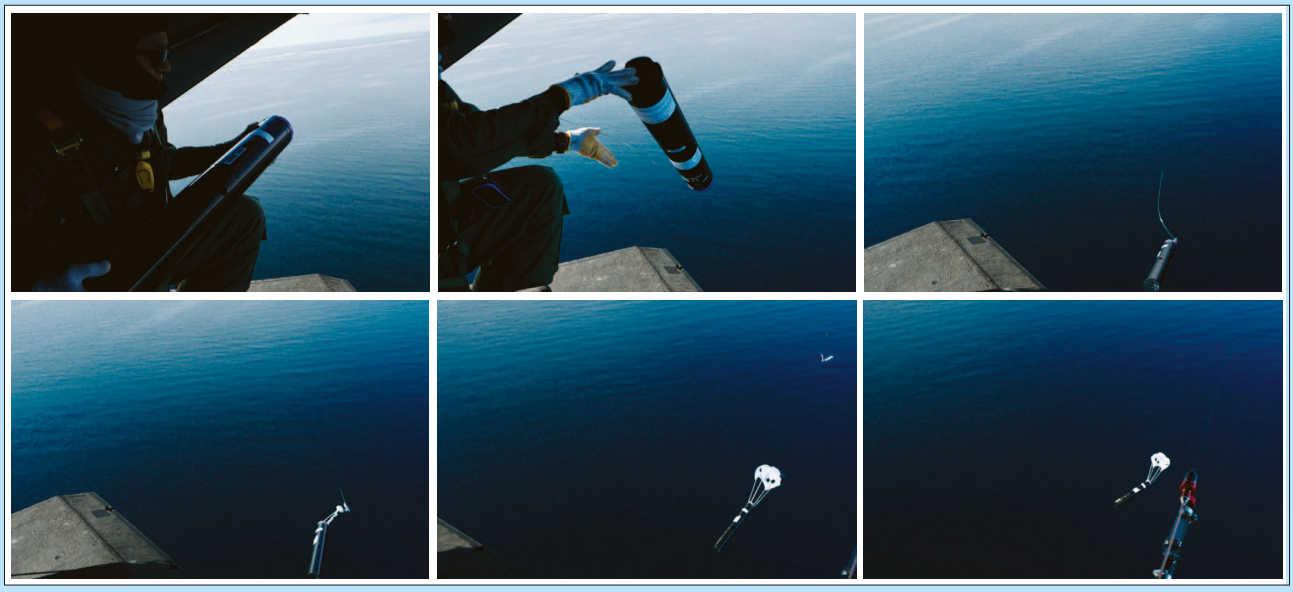
低温研での研究について

私は、低温研に着任し、観測 / モデル研究を実施してきました。着任 2 年目には、第 61 次南極地域観測隊に参加し、ヘリコプターを利用した当時は世界初であった南極域大規模海洋観測、係留計観測、などを実施しました。砕氷船しらせからヘリコプター（CH101）に乗り込み、観測点へと移動し、AXCTD/AXBT と呼ばれる 2 種類の海洋観測測器を投下し、これらのセンサーから送られてくるデータを取得することで、トッテン氷河・棚氷沖全 67 地点の海の中の温度、塩分を調査しました（写真 1）。この観測の結果は、東南極最大の棚氷融解加速域トッテン氷河を融解させる海流の発見に繋がりました。

また、観測とモデルを融合し、徹底的に（水塊分布 / 時間変動 / 重要な海洋物理プロセスなど）観測再現性を追求する領域モデル開発を実施してきました。南極の様々な領域に着目することで、棚氷融解、南極底層水形成、南極海氷の増減、などに関わる研究を実施してきました。例えば、観測モデル融合研究の一例としては、南極沿岸流の渦状循環と海底との相互作用が西南極棚氷融解を決定するという新仮説（Nature Communications 誌に掲載）の提唱が挙げられます。高い観測再現性を実現できたからこそ、これまで明らかになっていなかった棚氷融解プロセスを提唱することができました。また、日本が集中観測を実施しているトッテン氷河 / 棚氷域のモデル開発を実施し、トッテン棚氷の融解量が大陸棚に沿って流れる南極沿岸流の強度によってコントロールされるという仮説を示すこともできました。今後、これらのモデルからの示唆が、観測によって確かめられることが期待されます。

この先の研究について

2024 年 12 月より米国ダートマス大学、工学系大学院の Thayer School of Engineering に着任することとなりました。ダートマス大学はアメリカ合衆国ニューハンプシャー州ハノーバー町に本部を置くアメリカ合衆国の私立大学です。アイビーリーグに属する大学の一つで、日本ではあまり知られていませんが、研究大学としても評価の高い大学です。寒冷域研究で知られる Cold Regions Research and Engineering Laboratory（CRREL）も近くにあり、寒冷圏科学の研究を得意とする大学でもあります。今後とも、共同研究、学生間の交流などを含め、低温研とも強い関わりを作っていくことができればと思っています。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。



（写真 1）　ヘリコプターから実施した南極沿岸域の海洋観測（センサー投下）の様子

Report

海外調査

■杉山　慎、日下　稜

（1）調査・観測先：グリーンランド北西部カナック周辺
（2）期間：2024 年 7 月から 9 月
（3）参加者
杉山慎、日下稜（低温研）、今津拓郎、矢澤宏太郎（低温研･環境科学院大学院生）、その他、北大、北見工大、京都大学、英国リーズベケット大の研究者および大学院生、合計 15 名
（4）カウンターパートの機関名：カナック村研究協力者、グリーンランド天然資源研究所、リーズベケット大
（5）観測目的
私たちの研究グループでは、グリーンランド北西部カナック村の周辺で、氷河氷床・海洋・陸域・生態系の変動とその社会影響に関する研究を行っています。2024 年夏には村の背後に広がるカナック氷帽で積雪・融解測定を行い、2012 年から継続する長期モニタリングデータを取得しました。氷河から流出する河川では近年洪水災害が多発しており、災害対策に貢献するために流量観測を実施しています。また海洋では村人と協力して観測を実施し、氷河フィヨルドに設置した装置から一年間にわたる海水温・塩分・音響の長期データが得られました。さらに音響探査装置を使って､過去の氷河変動によって形成された海底地形を測量しました。これらの海洋観測データは、氷河変動と海洋との相互作用および海洋生態系の解明に役立つものです。
私たちが研究する自然環境の変化は、災害や水産資源といった観点でグリーンランド社会と強く結びついています。そこで毎年カナック村の住民を招いたワークショップを開催し、プロジェクトの概要と研究成果を紹介しています。今年のワークショップでは特に、狩猟の対象となるアザラシやイッカクの生態と、廃棄物の処理問題に大きな関心が寄せられ、今後の研究取組と対策について意見交換を行いました。
本研究は、低温研が主導する ArCS Ⅱ 北極域研究加速推進プロジェクトの研究課題「北極域における沿岸環境の変化とその社会影響」の下で、北大北極域研究センター、水産科学院、工学院、京都大学、北見工業大学との協力で実施しています。また観測の一部は、日英北極研究助成金制度の支援を得て、低温研とリーズ・ベケット大との共同研究として実施しました。

図 1　カナック氷帽におけるモニタリング観測。

図 2　イギリスの研究者と共同で実施した海洋調査。

図 3　観測地カナック村。

図 4　カナック村で開催した地元住民とのワークショップ。

Report

Hokkaido サマー・インスティテュート雪氷寒冷圏モデリングコースの開催

■杉山　慎、グレーベ　ラルフ

Hokkaido サマー・インスティテュートは、海外から研究者を招いて北大で実施する国際的な教育プログラムです。その 2024 年度科目のひとつとして、オスロ大学と共同で「雪氷寒冷圏モデリングコース」を開催しました。オスロ大学で毎年実施されるこのコースには、北大からも講師や大学院生が参加した実績があり、Hokkaido サマー・インスティテュートでの開催は 2018 年に続いて 2 回目になります。2024 年 6 月 2 日～ 14 日の二週間のプログラムに、世界 6 カ国 13 名の大学院生が参加しました。

プログラムをリードするのはオスロ大学トーマス・シュラー教授。北極域の氷河研究で名高いシュラー氏は、氷河の数値モデリングを指導します。理論を学んだ参加者は、自らプログラムを組んで数値実験を行います。北大からも教員 4 名が参加し、それぞれの専門分野で講義を担当しました。最終日には各受講者が成果を披露する発表会を実施。北大の大学院生も、世界有数の大学から集まった参加者と英語で議論を繰り広げました。

低温科学研究所とオスロ大学地球科学科は、部局間交流協定の下で氷河氷床に関する共同研究と教育事業を実施しています。2021 年からは ArCS II 海外交流研究力強化プログラムの支援を受けて、北極スヴァルバール諸島での共同観測の他、研究者と大学院生の交流を行っています。

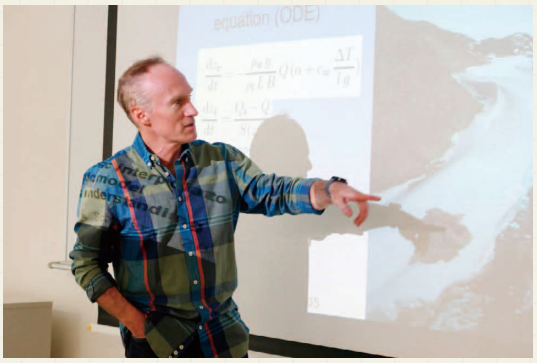


図 1　シュラー教授による氷河数値モデリングの講義。

図 2　プログラミングと数値実験を指導するシュラー教授。

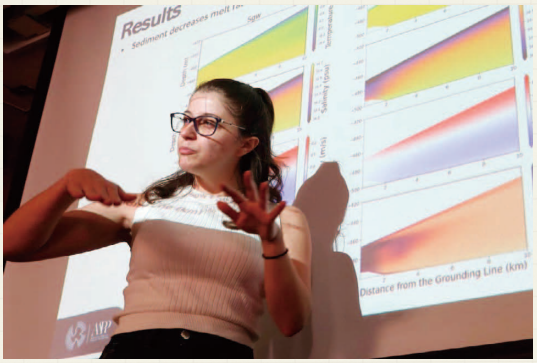


図 3　受講生による成果発表会。

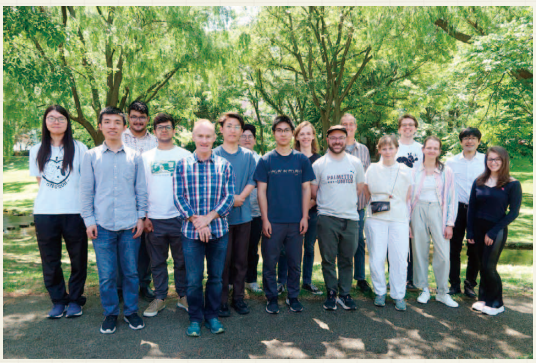


図 4　世界 6 か国から集まった受講生と講師。

Report

海外調査「スバールバル諸島コングスヴェゲン氷河の熱水掘削」

■波多　俊太郎

（1）調査・観測先：ノルウェー領スバールバル諸島

（2）期間：2024 年 8 月 8 ～ 20 日

（3）参加者

杉山慎、波多俊太郎（低温研）、トーマス・シュラー、ジョン・ホルト、マイケン・レヴハイム、サトゥ・イナネン（オスロ大）

（4）カウンターパートの機関名：ノルウェー・オスロ大学

（5）観測目的

氷河底面環境は氷河流動の大部分を占める底面滑りに大きな役割を果たすが、数 100 m もの氷の底面はアクセス困難で理解が不十分である。今回の観測では、ノルウェー領・スバールバル諸島にあるコングスヴェゲン氷河で調査を行った。現地では約 8 時間かけて氷河全層 361m を掘削し、360° 撮影可能な掘削孔カメラを用いた掘削孔壁の撮影、音響装置を用いた試験、氷河底面への機材の設置を実施した。得られたデータの解析から、氷河の内部層構造や、氷河底面における流動メカニズムの理解に成果が期待される。本研究は科研費プロジェクト「南極氷床質量変動の定量化と支配メカニズムの解明」、ArCS II 北極域研究加速推進プロジェクトの海外交流研究力強化プログラム「多様なスケールと手法で明らかにする急激な北極域氷河氷床変動」の下、ノルウェー・オスロ大学との共同で実施した。

図 1　熱水掘削の様子（撮影：杉山慎）

図 2　掘削孔へ掘削孔カメラを入れる様子（撮影：波多俊太郎）

図 3　観測メンバー（撮影：Satu Innanen）

Report

海外調査「ポーカーフラット永久凍土とキャスナー氷河調査」

■渡邉　友浩、福井　学

（1）調査・観測先：アラスカ・ポーカーフラット永久凍土とキャスナー氷河

（2）期間：2024 年 8 月

（3）参加者：福井学、渡邉友浩

（4）報告

永久凍土および氷河末端の流出水中から放出されるメタンガスと微生物の関係を解明するために、現地における調査と試料採取を行った。

（5）カウンターパートの機関名：アラスカ大学フェアバンクス校

図 1　ポーカーフラットで永久凍土から放出されるメタンを測定する様子
（アラスカ大学フェアバンクス校岩花剛氏撮影）

図 2　キャスナー氷河末端で流出水から放出されるメタンを測定する様子

Report

「国際冬眠学会 2024」への参加

■曽根　正光、山内　彩加林、山口　良文

（1）場所：カナダ、モン・トランブラン

（2）期間：2024 年 7 月 22 ～ 26 日

（3）参加者

山口良文、曽根正光、山内彩加林、中川 哲、大塚玲桜（環境科学院 D3）、松岡七々香（環境科学院 D2）、Shao Chengru（環境科学院 D2）

（4）報告

カナダのケベック州にあるモン･トランブランで 2024 年 7 月 22 日（月）～ 7 月 26 日（金）の 5 日間にわたり、国際冬眠学会 2024（17th International Hibernation Symposium）が開催された。本学会は 4 年に一度、冬眠に関連した研究テーマについて世界各国の冬眠研究者が成果を発表する場となっている。本年は 80 名以上が集い、低体温耐性・熱産生能・代謝状態・免疫、冬眠 / 休眠と睡眠の関係、生態生理や進化など、多様な冬眠する哺乳類にまつわる幅広い話題について活発な議論が行われた。冬眠代謝生理発達分野からは、スタッフ・ポスドク・大学院博士課程学生合わせて 7 名が参加した（口頭発表 2 名、ポスター発表 5 名）。

（5）参考：学会 Web サイト（https://conference.hibsoc.com/）

学会参加者の集合写真

Report

海外調査

■的場　澄人

（1）調査、観測先：グリーンランド・シオラパルク村

（2）期間：2024 年 4 ～ 5 月

（3）参加者：的場澄人（低温研・環オホーツク観測研究センター）、原圭一郎（福岡大）

（4）北極域の特徴は、大陸と海洋が複雑に配置し、冬季には海洋の開水域やポリニアが高緯度まで広がることである。これらの開水域は冬季に熱源、水蒸気起源となり周辺の降雪等の気象システムに影響を与える。また、長い極夜、白夜が続く高緯度地域特有の光環境と広範囲に広がる季節海氷の消長は、北極域特有の大気ー雪氷ー海洋間の物質循環を駆動する重要な要素である。我々は、グリーンランド沿岸域における観測から、季節海氷域における水・物質循環に関わる諸プロセスを明らかにすることを目的とし、2021 年 3 月から観測を行ってきた。今回は、気象観測装置や定点カメラからのデータ回収、気象観測装置の移設、観測装置類の撤収と日本への発送を行い、4 冬季にわたる観測を終了した。

シオラパルク村近くに設置した気象観測装置のメンテナンスの様子

Report

グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会

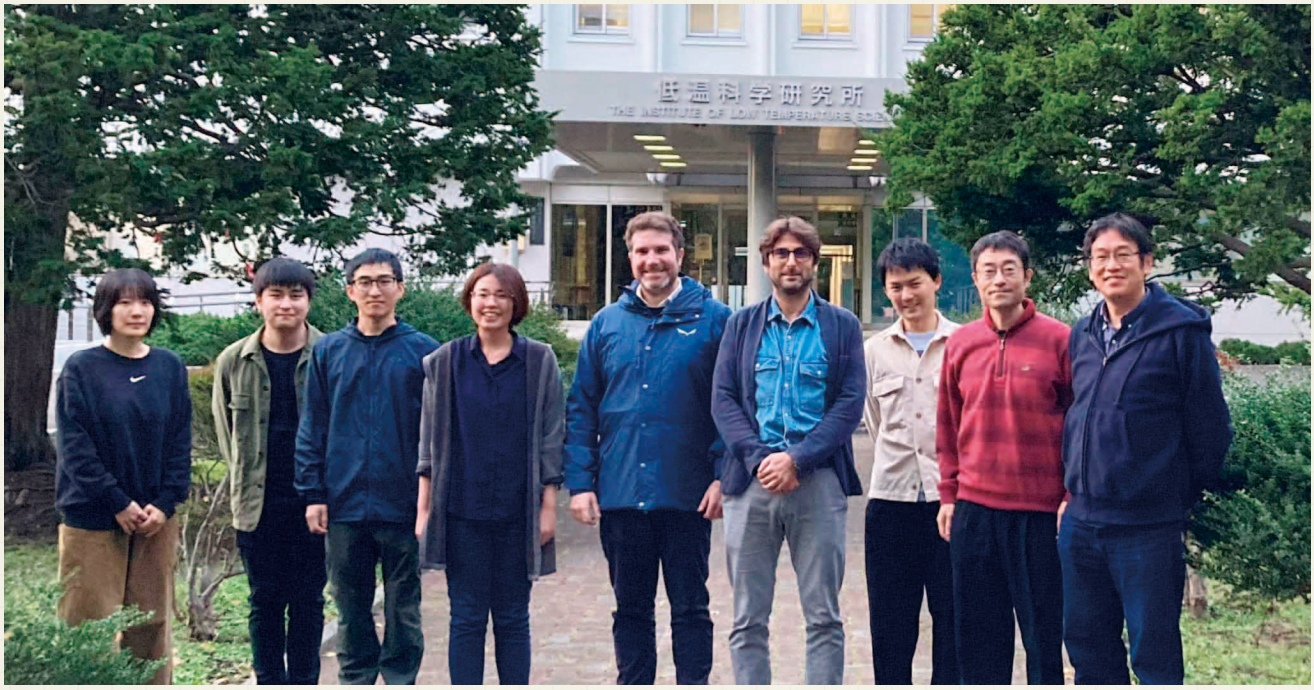
■的場　澄人

日時：2024 年 9 月 24 ～ 26 日
場所：低温研講堂、オンライン
主催：低温科学研究所共同研究集会：代表：石野咲子（金沢大）、飯塚芳徳（低温研）
報告：2015 年、21 年に掘削されたグリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究を中心に、北極域の気候モデル、ヒマラヤ山岳氷河のアイスコア研究など、20 件の発表がなされた。また 25 日の午後には、Python を用いたデータ解析の講習会を開催した。

日・伊アイスコア研究会

■的場　澄人

日時：2024 年 10 月 11 日
場所：低温研交流ラウンジ、オンライン
報告：イタリア極域科学研究所（Instituto di Scienze Polari）の Andrea Spolaor 博士、ベニス大学（Ca' Foscari University of Venice）の Federico Scoto 博士をお招きし、アイスコア及び大気化学に関する研究会を行った。



Report

海外調査

■西野　沙織

（1）調査・観測先：モンゴル・ポターニン氷河観測

（2）期間：2024 年 7 ～ 8 月

（3）参加者

坂井亜規子（名古屋大学）、西野沙織（環境科学院博士課程 1 年／環オホーツク観測研究センター）、近藤研、鬼頭茉由（名古屋大学）

（4）観測目的

急激な縮小が進むモンゴル西部の氷河の融解プロセスを明らかにすることを目的に、ポターニン氷河にて積雪の表面質量収支、不純物濃度、微生物観測などの氷河観測を行った。

（5）カウンターパートの機関名：モンゴル気象水文環境研究所 /Purevdagva Kalzan

図 1　観測地点への移動の様子

図 2　観測メンバー

Press Release

(2024/5/9)

1970年代の北半球中高緯度の雲量はエアロゾルにより増加していた ～長期間のエアロゾルと雲の関係解明による、地球温暖化メカニズム研究の進展に期待～

発表者：准教授　飯塚　芳徳

【研究成果の概要】

北海道大学大学院環境科学院修士課程の渡利晃久（研究当時）、北海道大学低温科学研究所の飯塚芳徳准教授、名古屋大学大学院環境学研究科の藤田耕史教授、名古屋大学宇宙地球環境研究所の増永浩彦准教授、長崎大学大学院総合生産科学研究科（水産・環境科学総合研究科）の河本和明教授らの研究グループは、グリーンランドのアイスコアに保存されている硫酸エアロゾルと衛星観測による周辺海域の雲量や雲粒の数密度に関係があることを発見し、人為硫黄酸化物の排出最盛期である1970年代は硫酸エアロゾルが雲粒を多く作ることにより雲量が増加していたことを解明しました。

硫酸エアロゾルは、地球の放射収支を考える上で重要な要素です。とくに極域では硫酸エアロゾルは凝結核となり雲を形成し、雲が地球表層の大気を冷却する役割があります。過去の硫酸エアロゾルの量はアイスコアから、雲の量は衛星観測から調べることができます。今回、研究グループは、グリーンランドのアイスコアに保存されている硫酸エアロゾルの量と、周辺海域の雲量との間に有意な正の相関があることを明らかにしました。しかしながら、衛星観測は1980年代から本格的に始まっており、1970年代よりも古い時代の雲量を直接調べることはできません。そこで本研究では、1980年代から2010年代のエアロゾル量と雲量の関係（下図）を用いて、1970年代の雲量を復元しました。その結果、人為硫黄酸化物の排出最盛期である1970年代は硫酸エアロゾルが雲粒を多く作り、雲量の増加が地球表面を寒冷化させていたことが示唆されました。過去のエアロゾルと雲の関係解明は地球温暖化のメカニズムの理解向上につながり、将来予測の精度を高めることが期待されます。

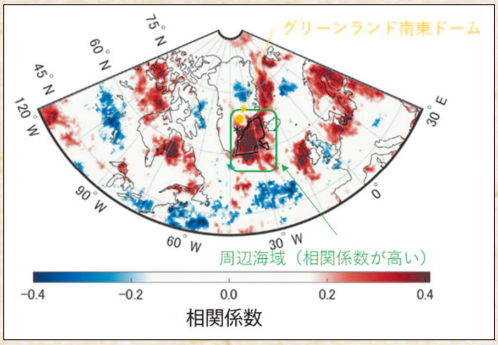
なお、本研究成果は、2024年4月21日（日）公開のScientific Reports誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Long-term relationships between summer clouds and aerosols over mid-high latitudes of the Northern Hemisphere（北半球中高緯度における夏の雲とエアロゾルの長期的関係）

著者名：渡利晃久[1,2]、飯塚芳徳[2]、藤田耕史[3]、増永浩彦[4]、河本和明[5]（1北海道大学大学院環境科学院、2北海道大学低温科学研究所、3名古屋大学大学院環境学研究科、4名古屋大学宇宙地球 環境研究所、5長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科）

雑誌名：Scientific Reports
ＤＯＩ：10.1038/s41598-024-59817-7
公表日：2024年4月21日（日）（オンライン公開）



グリーンランド周辺海域における 1982 年から 2014 年までの夏の硫酸エアロゾル濃度と雲量の相関分布図。
周辺海域に濃い赤で表示された硫酸エアロゾルと雲量の相関の高い海域がある。

Press Release

(2024/5/13)

伸びが止まっても綺麗な爪を保つ冬眠

発表者：教授　山口　良文

【研究成果の概要】

北海道大学獣医学部(研究当時)の石本太我氏、同大学低温科学研究所の山口良文教授、同大学大学院医学研究院の夏賀　健准教授らは、冬眠中は爪の伸びが止まるにも関わらず爪自体に異常は生じないことを、冬眠する哺乳類のシリアンハムスターにおいて見出しました。

爪は、指先の保護だけでなく、物を掴んだり、指先の細かい作業に重要な組織です。野生動物では巣穴を掘ったり、自身を守る武器としての役割も持っています。ヒトでは爪は健康のバロメーターとも言われるように、過剰なストレスや栄養不足・内臓疾患などで爪に異常が現れることがあります。こうした異常は、爪の成長を支える爪幹細胞の細胞分裂異常が原因となる場合が知られています。

ところで、哺乳類の中には、食糧が不足する冬を、必要なエネルギーを節約した低体温状態の冬眠により乗り切る動物がいます。こうした低体温状態は深冬眠と呼ばれ、酵素反応により媒介される多くの生命活動は抑えられます。からだの維持や成長に関わる細胞分裂も、深冬眠状態では停止することが、腸の上皮細胞などいくつかの臓器で報告されています。

では、冬眠の際は、爪はどうなっているのでしょうか。もし細胞分裂が止まるのならば、ヒトで見られるような爪の異常が生じるのでしょうか。この素朴な疑問に答えるため、研究グループは、低温・短日の冬条件での長期飼育で冬眠するシリアンハムスターの爪を詳細に調べました。その結果、冬眠を経験した個体でも、その爪は異常もなく綺麗に保たれることが分かりました。さらにいくつかの解析から、シリアンハムスターの爪は、低体温となる深冬眠中にはその伸びが大幅に抑えられますが、冬眠期間のなかで体温が正常体温に戻る中途覚醒と呼ばれる際には伸びることが分かりました。低体温で爪の伸びが止まるにも関わらず、なぜ爪に異常が出ないのか、その仕組みはまだ不明ですが、中途覚醒の際に巣穴の中に蓄えた餌を食べるといった活動のために、正常な爪を維持する利点がありそうです。

なお、本研究成果は、2024年4月27日(土)公開のJournal of Physiological Science誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

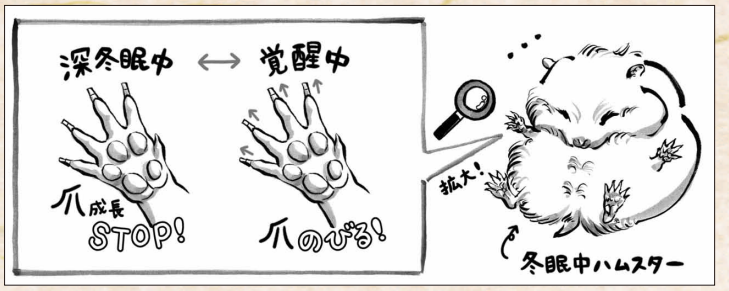
論文名：Nail growth arrest under low body temperature during hibernation（冬眠に伴う低体温で の爪伸長の停止）

著者名：石本太我[1]（研究当時）、[4]、小住英之[2]、夏賀 健[2]、山口良文[3]（1 北海道大学獣医学部、2 北海道大学大学院医学研究院、3 北海道大学低温科学研究所、4 熊本大学大学院医学研究科）

雑誌名：Journal of Physiological Sciences（生理学の専門誌）

ＤＯＩ：10.1186/s12576-024-00919-2

公表日：2024年4月27日(土)（オンライン公開）



爪の伸びは低体温となる深冬眠中は止まっているが、覚醒すると再開する。

(2024/6/12)

中性子線とナノテクノロジーを武器に「悪魔のつくった表面」を制御する
～セラミックスの製造技術の課題を克服し、排ガス浄化触媒に新しい未来を!～

発表者：教授　佐﨑　元

【研究成果の概要】

セラミックスのナノ粒子は、シリコンやアルミニウムなどの酸化物や窒化物です。セラミックスには、金属ナノ粒子に比べて腐食が起こりにくく、耐熱・耐放射線に優れ、安定に使用できるという特性があるため、機能材料として注目を集めています。例えば、排ガス浄化触媒、光触媒、化粧品、塗料、半導体センサー材料、色素増感材料、ナノ多孔膜など、私達の生活の様々な場面で利用されています。今回、排ガス浄化触媒の材料製造プロセスを調べたところ、反応の初期段階には液体だけしか存在しないと思われていましたが、小さなナノ粒子（1次粒子）もできることを発見しました。さらに1次粒子は時間を置くことで規則的に集まり、少し大きな粒子（2次粒子）となることを発見しました。この発見は、機能性材料を構成する高次構造（2次粒子が規則的に配列したもの）に繋がる粒子の結合様式や配列方法を制御する集積ナノテクノロジーにかかわる知見として、新しい触媒や光学材料の製造技術の進歩に寄与することが期待されます。

なお、本研究は国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（理事長 小口正範）の青柳登研究副主幹、池田篤史研究主幹、上田祐生研究員、元川竜平研究主幹、奥村雅彦研究主幹、蓬田匠研究員、東京大学の斉藤拓巳教授、山形大学の西辻祥太郎准教授、北海道大学の佐﨑元教授らによる共同研究チームによるものです。

自動車の排ガス浄化触媒は、セリウム塩やジルコニウム塩を硝酸溶液に溶解することで作製します。本研究ではその際に、これまでに見たことのない性質を示す集積ナノテクノロジーに関する現象を発見しました。通常、金属イオンであるセリウムイオンは、濃度が高くなると固体が沈殿として析出するのに対して、濃度が低くなると液体に全て溶けます。ところが今回、正イオンが粒子に集まってくることで、セリウムイオン濃度が高い場合では1次粒子ができ、低い濃度では2次粒子が生成する「自己組織化」が起きていることが分かりました。

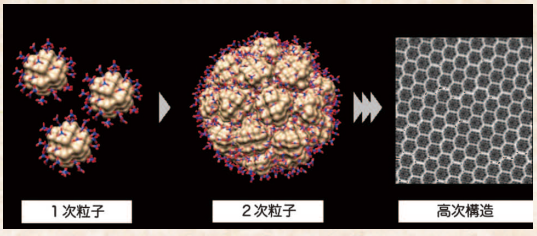
研究チームは、水溶液中の微粒子が集まってできる「自己組織化」に注目し、2次粒子がどのようにして形成されるかを詳細に調べました。X線小角散乱測定（SAXS）と中性子小角散乱測定（SANS）、さらに最先端の顕微鏡技術を用いて分析を進めた結果、2次粒子がさらに緩やかに集まる、高次構造を発見しました（図1右）。この高次構造は2次粒子表面でのイオンの濃度差によってもたらされるということが分かりました。

この発見は、自己組織化構造に表面相互作用が重要であることを明示的に示した初めての例です。今後、自己組織化構造の特性を考慮に入れたセラミックスのナノ粒子を用いて、新しい視点による機能材料開発に繋がる可能性があり、我が国の環境負荷の軽減技術に貢献することが期待されます。

本成果は、英国Springer Nature社が出版する国際学術誌「Communications Chemistry」のオンライン公開版（6月12日（現地時間））に掲載されました。

【論文発表の概要】

雑誌名：Communications Chemistry
タイトル：Globular pattern formation of hierarchical ceria nanoarchitecture
著者名：Noboru Aoyagi[1], Ryuhei Motokawa[1], Masahiko Okumura[1], Yuki Ueda[1], Takumi Saito[1,2], Shotaro Nishitsuji[3], Tomitsugu Taguchi[4], Takumi Yomogida[1], Gen Sazaki[5] and Atsushi Ikeda Ohno[1]
所　属：1 日本原子力研究開発機構（原子力機構）、2 東京大学大学院工学系研究科、3 山形大学工学部、4 量子科学技術研究開発機構、5 北海道大学低温科学研究所



(2024/7/9)

データと数学で迫る冬眠の謎
～冬眠の仕組みの一端を数理モデルで解明～

発表者：教授　山口　良文

【研究成果の概要】

理化学研究所（理研）数理創造プログラムの儀保伸吾特別研究員、黒澤元専任研究員、北海道大学低温科学研究所の山口良文教授らの国際共同研究グループは、冬眠を行う哺乳類に見られる大きな体温変動の背後に、信号の周波数を変化させて伝えるFMラジオのように周波数（体温の周期変動）を変化させる仕組みが存在することを発見しました。

哺乳類の中には、食料が限られ気温低下に見舞われる冬を生き延びるために、冬眠を行う種がいます。冬眠中の体温は、環境温度近くまで低下しますが、この低温状態が冬眠中ずっと継続するわけではなく、環境温度に近い低温と通常の体温の間を何度も変動します。この大きな体温変動は冬眠の重要な部分ですが、その生理学的な意味や制御のメカニズムは十分に理解されていません。

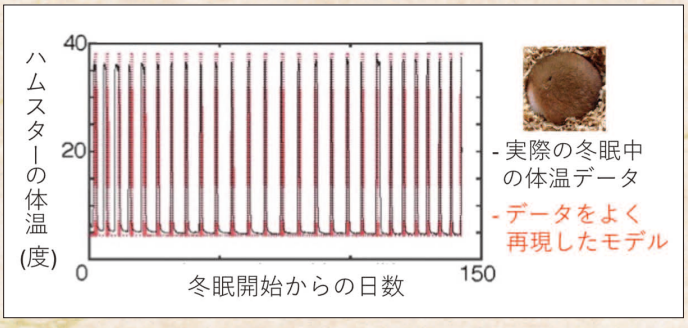
国際共同研究グループは、長期かつ高解像度の体温データセットに対応する数理モデルを探索することによって、冬眠中の大きな体温変動が短い周期（数日）と予想外に長い周期（数百日）の相互作用によって支配されており、そうした周期の変動（周波数）が徐々に変化していくこと（周波数変調[1]）を発見しました。この結論はシリアンハムスターとジュウサンセンジリスという異なる2種類の冬眠動物について導かれました。これは複数の冬眠動物において、冬眠中の大きな体温変動の背後に「周波数変調」というシンプルで共通の原理が存在することを初めて示した成果です。

本研究成果は、英国の*Nature Portfolio*が新しく発行した科学雑誌『*npj Biological Timing and Sleep*』オンライン版（7月2日付）に掲載されました。

[1] 周波数変調
周波数変調とは、送信したい信号を、周波数を変化させることで伝送する方式のこと。
FMラジオ放送などに使われている。今回、FMラジオのように徐々に周波数が変化していくことを仮定した数式が冬眠中のシリアンハムスターとジュウサンセンジリスの体温データを再現することが分かり、「周波数変調モデル」として提唱した。

【論文発表の概要】

タイトル：Frequency-modulated timer regulates torpor–arousal cycles during hibernation in distinct small mammalian hibernators
著者名：Shingo Gibo, Yoshifumi Yamaguchi, Elena O. Gracheva, Sviatoslav N. Bagriantsev, Isao T. Tokuda, and Gen Kurosawa
雑誌名：*npj Biological Timing and Sleep*
ＤＯＩ：10.1038/s44323-024-00002-4



冬眠中のシリアンハムスター（右上写真）の体温変動とそれを再現した数理モデルの時系列

(2024/7/11)

小惑星リュウグウの水に満ちた化学進化の源流と水質変成の証拠 ～アミノ酸や核酸酸塩基にいたる原材料を発見～

発表者：准教授　大場　康弘

【研究成果の概要】

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 大和 裕幸、以下「JAMSTEC」という。）海洋機能利用部門 生物地球化学センターの高野 淑識（よしのり）上席研究員（慶應義塾大学先端生命科学研究所特任准教授）、国立大学法人九州大学大学院理学研究院の奈良岡 浩 教授、アメリカ航空宇宙局（NASA）のジェイソン・ドワーキン主幹研究員らの国際共同研究グループは、慶應義塾大学先端生命科学研究所、ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、国立大学法人広島大学、国立大学法人名古屋大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人東京大学大学院理学系研究科の研究者らとともに、小惑星リュウグウのサンプルに含まれる可溶性成分を抽出し、精密な化学分析を行いました。水と親和性に富む有機酸群（新たに発見されたモノカルボン酸、ジカルボン酸、トリカルボン酸、ヒドロキシ酸など）や含窒素化合物など総計84種の多種多様な化学進化の現況と水質変成（＊1）の決定的な証拠を明らかにしました（図1）。その中には、シュウ酸、クエン酸、リンゴ酸、ピルビン酸、乳酸、メバロン酸などのほか、有機―無機複合体であるアルキル尿素分子群を含んでおり、物理因子と化学因子のみが支配する化学進化の源流が明らかになりました。次に、二つのタッチダウンサンプリングサイトの有機物を構成する軽元素組成（炭素、窒素、水素、酸素、硫黄）および安定同位体組成、分子組成、含有量などの有機的な物質科学性状を総括しました。

本成果は、初期太陽系の化学進化の一次情報を提供するとともに、非生命的な有機分子群が最終的に生命誕生に繋がる進化の過程をどのように導いたかという大きな科学探究を理解する上で、重要な知見となります。

本研究は、科研費国際共同研究加速基金（国際共同研究強化，課題番号：21KK0062）、北海道大学低温科学研究所共同プロジェクトほか、研究助成の支援を受けて実施されました。

本成果は、2024年7月10日付（日本時間18時）で科学誌「Nature Communications」に掲載されました。

【用語解説】

＊1　リュウグウの水質変成：リュウグウは、太陽系全体の化学組成を保持した最も始原的な天体の一つです。そこでは、「水質変成」と呼ばれる水―鉱物―有機物の相互作用によって、初期物質である元素や分子の進化の過程が考えられていました。本報告では、水質変成の分子履歴を復元するために、可溶性成分の親水性分子群の定性的かつ定量的な評価を行いました。

【論文発表の概要】

タイトル：Primordial aqueous alteration recorded in water-soluble organic molecules from the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu

著者名：高野 淑識[1,2*]、奈良岡 浩[3]、Jason P. Dworkin[4]、古賀 俊貴[1]、佐々木 一謹[2,5]、佐藤 基[5]、大場 康弘[6]、小川 奈々子[1]、吉村 寿紘[1]、濵瀬 健司[3]、大河内 直彦[1]、Eric T. Parker[4]、José C. Aponte[4]、Daniel P. Glavin[4]、古川 善博[7]、青木 淳賢[8]、可野 邦行[8]、野村 慎一郎[7]、Francois-Regis Orthous-Daunay[9]、Philippe Schmitt-Kopplin[10,11,4]、Hayabusa2-initial analysis SOM team*、坏本 尚義[6]、中村 智樹[7]、野口 高明[12]、岡崎 隆司[3]、薮田 ひかる[13]、坂本 佳奈子[14]、矢田 達[14]、西村 征洋[14]、中藤 亜衣子[14]、宮崎 明子[14]、与賀田 佳澄[14]、安 部 正真[14]、岡田 達明[14]、臼井 寛裕[14]、吉川 真[14]、佐伯 孝尚[14]、田中 智[14]、照井 冬人[15]、中澤 暁[14]、渡邊 誠一郎[16]、津田 雄一[14]、橘 省吾[14,8]

＊責任著者

所　属：1. 海洋研究開発機構、2. 慶應義塾大学、3. 九州大学、4. NASA Goddard Space Flight Center、5. ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社、6. 北海道大学、7. 東北 大学、8. 東京大学、9. Université Grenoble Alpes、10. Technische Universität München、11. Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics、12. 京都大学、13. 広島大学、14. 宇宙航空研究開発機構、15. 神奈川工科大学、16. 名古屋大学

雑誌名：Nature Communications

ＤＯＩ：10.1038/s41467-024-49237-6

図１　小惑星リュウグウの水に満ちた化学進化の源流と水質変成の証拠を伝える巻物：アミノ酸や核酸塩基の原材料を含む多種多様な進化の様子を示した

小惑星リュウグウは、かつて、水（H_2O）を豊かにたたえる母天体であり、太陽系内での進化の過程で凍結／融解を繰り返してきた。可溶性成分を高精度に分析することで、親水性の有機分子に記録された「水質変成」の決定的な証拠を見いだした。水と親和性に富む有機酸群（シュウ酸、マロン酸、クエン酸、リンゴ酸、ピルビン酸、乳酸、メバロン酸など 65 種を新たに同定）および含窒素分子群（アルキル尿素など有機―無機複合体を新たに 19 種）の総計 84 種（構造異性体を含む）を新たに発見した。水―有機物―鉱物相互作用を伴う初生的な分子進化が、現在も進行中であると考えられる。

(2024/7/30)

氷河融解水の流入がフィヨルドの生物生産に与える影響を評価

発表者：教授　杉山　慎

【研究成果の概要】

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 大和裕幸、以下「JAMSTEC」という。）地球環境部門 地球表層システム研究センターの干場康博 特任研究員は、東京大学 松村義正助教、漢那直也助教、国立極地研究所 大橋良彦特任研究員、北海道大学 杉山慎教授らと共同で新たに開発した海洋低次栄養段階生態系モデルを用いて、氷河融解水が海洋表層の植物プランクトンの増殖に影響を与えるプロセスを定量的に評価することに成功しました。さらに温暖化の進行に伴う氷河融解水の流出量の変化、氷河後退による融解水の流出深度の変化に対する感度実験を実施しました。温暖化が進行した場合、フィヨルド域の氷河融解水が増大し、氷河が大きく後退した条件において、当該海域の生物生産が激減する可能性があることを明らかにしました。

現在、世界の多くの氷河が縮小傾向にあり、今後数十年の間にさらなる変化が起こりうることが予測されています。本研究で得られた知見を基に、継続的な現地調査観測と数値モデルによる統合的な研究を発展させ、陸域と海洋間の生物地球化学的な物質循環への理解を深めていく必要があります。

本成果は、「Scientific Reports」に7月30日付け（日本時間）で掲載されました。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業（JP21K17875、JP22H05204、JP23H05411）、北極域研究推進プロジェクト（ArCS）、北極域研究加速プロジェクト（ArCS II）の支援を受けて実施しました。

【論文発表の概要】

タイトル：Impacts of glacial discharge on the primary production in a Greenlandic fjord

著者名：干場康博[1]、松村義正[2]、漢那直也[2]、大橋良彦[3]、杉山 慎[4]

（1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学大気海洋研究所、3. 国立極地研究所、4. 北海道大学低温科学研究所/北極域研究センター）

雑誌名：Scientific Reports

ＤＯＩ：10.1038/s41598-024-64529-z

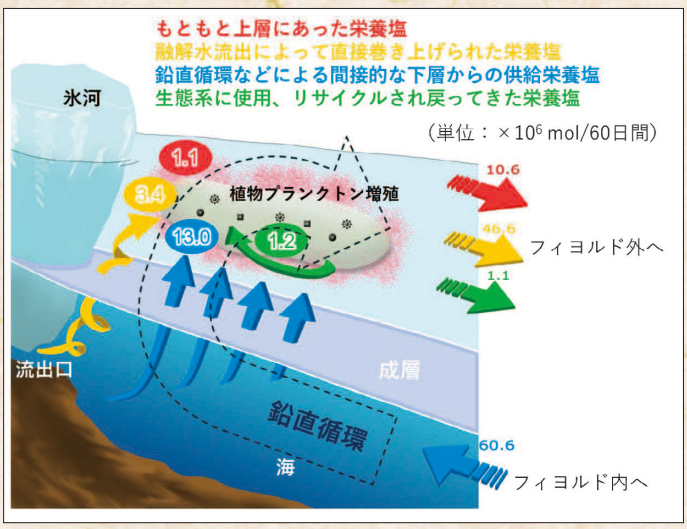


図１　夏季フィヨルド内栄養塩収支の模式図
融解水流入あり / なしの差を示したもので、丸で囲まれた数字は植物プランクトンに使用（基礎生産）される栄養塩量。

Press Release

(2024/8/22)

親潮・磯口ジェット合流域が混合水域に栄養塩を供給することを発見
サンマなどの幼魚の育成場に栄養が供給されるシステムを解明

発表者：教授　西岡　純

【研究成果の概要】

国立大学法人東京海洋大学（学長：井関 俊夫、以下「東京海洋大学」）で受け入れている日本学術振興会特別研究員の矢部いつか博士、東京海洋大学学術研究院の長井健容准教授、東京大学大気海洋研究所の伊藤進一教授らの研究グループは、北西太平洋の親潮と磯口ジェット注2）の合流域で発生する湧昇注3）が栄養塩豊富な海水を表層付近へ供給する引き金となることを明らかにしました。

磯口ジェットと隣接する親潮との間には亜寒帯フロント注4）が存在し、フロントとその下流域は小型浮魚類注5）の好漁場として知られています。特にフロントの南に位置する磯口ジェットは黒潮を起源とし高水温なため、多くの小型浮魚類の幼魚たちの生育場となっています。しかし磯口ジェットは黒潮を起源とするため栄養塩が乏しく、ジェット周辺の幼魚たちの餌を含む生物生産を支える栄養塩がどのように供給されているのか不明でした。

本研究グループは、磯口ジェットを横断する観測を複数年にわたり実施し、親潮と磯口ジェットの合流域にどの年でも強い湧昇流が発生することを示しました。また、合流域では磯口ジェットの高温・高塩な海水の下に栄養塩豊富な亜寒帯水が流れ込み、湧昇によってジェット内部に栄養塩が供給されることを明らかにしました。

今回の発見は、磯口ジェット周辺が多くの小型浮魚類の幼魚の生育場となっている要因を解明しただけでなく、世界中に分布する同様な海流の合流点の重要性を示すもので、海洋保護区の選定などに必要な科学的知見となることが期待されます。

本研究は、水産研究・教育機構の筧茂穂主任研究員、北海道大学低温科学研究所の西岡純教授と共同で行いました。

本研究成果は、2024年7月30日（英国時間）に科学誌「Scientific Reports」のオンライン版で公開されました。

【用語解説】

注1）
有光層：植物プランクトンが光合成可能な層で、一般的に海表面の光が1%となる水深までといわれています。
注2）
磯口ジェット：黒潮続流の分岐流であり、高温・高塩な水塊を北に運びます。小さな海底地形に起因する流れのため、準定常的に存在します。
注3）
湧昇：海洋の深い層から表層へと上昇する流れを指します。深い層の海水は水温が低く、栄養塩が豊富なため、湧昇によって低温・高栄養な海水が表層に供給され、生物生産を盛んにします。
注4）
亜寒帯フロント：磯口ジェットと親潮の間に形成される水温・塩分フロントです。フロントを挟む南北では水温や塩分などが急激に変化します。
注5）
小型浮魚類：表層付近に生息する小型の魚類の総称です。日本付近では、マイワシ、カタクチイワシ、マサバ、ゴマサバ、サンマなどが含まれます。

【論文発表の概要】

タイトル：“Steady nutrient upwelling around a biological hotspot of the confluence between the quasi-stationary jet and the Oyashio in the western North Pacific”

著者名：Itsuka Yabe, Shin-ichi Ito, Shigeho Kakehi, Takeyoshi Nagai & Jun Nishioka

雑誌名：Scientific Reports

ＵＲＬ：https://doi.org/10.1038/s41598-024-68214-z

ＤＯＩ：10.1038/s41598-024-68214-z

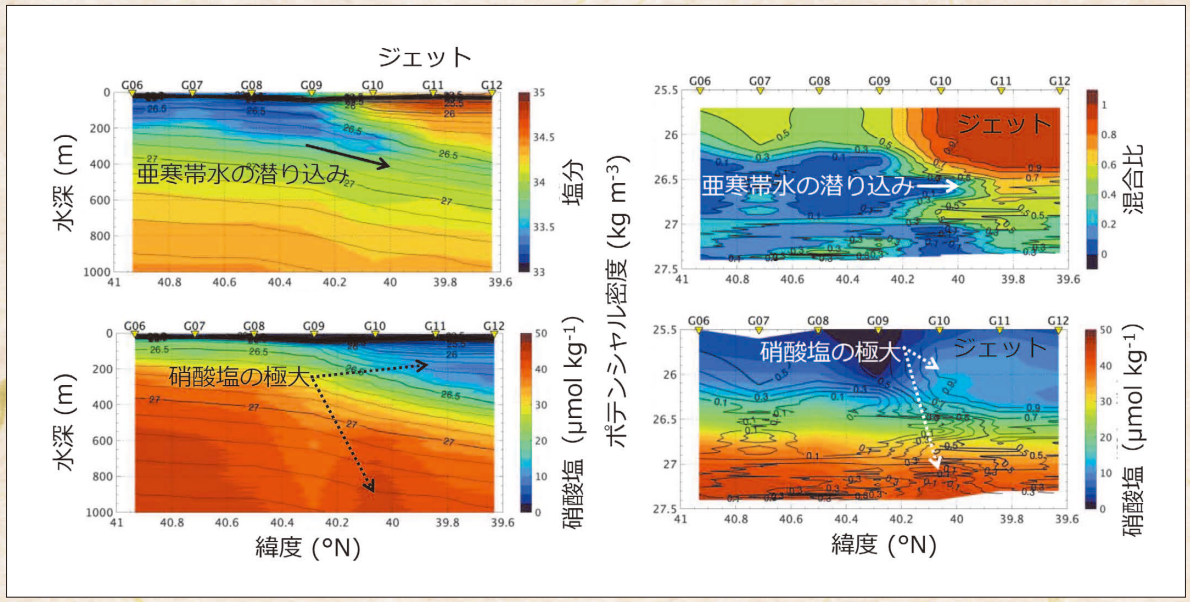


図１　磯口ジェットを横断する塩分・混合比と硝酸塩の構造
断面の右上には磯口ジェットに伴う高塩分・低栄養塩の水塊（亜熱帯水）が分布します。亜熱帯水の下には低塩分な水塊（亜寒帯水）が潜り込みます（実線の矢印）。ジェット内部の 40° N、密度 26.2 σθ付近に硝酸塩濃度の極大が見られます（破線の矢印）

(2024/9/12)

未知の水“同素不混和水”の圧力に対する2種類の応答を発見
～水/氷間の相転移過程解明に一歩前進～

発表者：教授　木村　勇気

【研究成果の概要】

水は、人類を含むすべての生物の生命活動にとって最も重要であり、氷への相転移を介し氷河形成など様々な自然現象に大きな影響を与える液体です。

東北大学多元物質科学研究所の新家寛正助教と北海道大学低温科学研究所の木村勇気教授、鳥取大学工学部機械物理系学科の灘浩樹教授、東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻／附属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これまで、圧力印加により成長・融解する氷と水の界面に、水と混ざり合わない未知の水である同素不混和水が現れることを発見しています。しかし、その系統的な調査は行われていません。今回、その動力学の過加圧依存性を調査したところ、過加圧の大きさに応じ、(i) 液滴状の同素不混和水が収縮した後に液膜状のものが収縮し消滅する2段階の過程と(ii) 液膜状のものが収縮し消滅する1段階の過程があることを発見しました。さらに、その厚みは過加圧に比例し、相転移駆動力に対しある決まった応答を示すことを発見しました。本成果は、水/氷間の相転移過程解明や水が関わる広範な科学領域に貢献します。

本成果は9月10日（米国太平洋標準時間）付、国際科学誌The Journal of Physical Chemistry C の特集号に招待論文としてオンライン掲載されました。

【論文発表の概要】

タイトル：Dependence of Homoimmiscible Water Dynamics on Overpressure at the Interface between Water and the Basal Plane of Single-Crystal Ice Ih

著者名：Hiromasa Niinomi*, Hiroki Nada, Tomoya Yamazaki, Tetsuya Hama, Akira Kouchi, Tomoya Oshikiri, Masaru Nakagawa, and Yuki Kimura

*責任著者：東北大学多元物質科学研究所
助教　新家寛正

掲載誌：The Journal of Physical Chemistry C

ＤＯＩ：10.1021/acs.jpcc.4c04187

ＵＲＬ：https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c04187

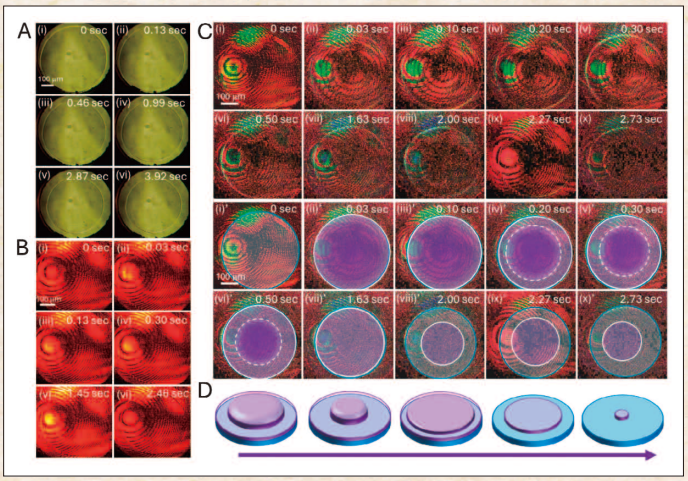


図 1. 2.3 GPa の過加圧を印加した後の水と氷の界面における同素不混和水のダイナミクスを捉えた明視野顕微鏡・レーザー干渉顕微鏡その場観察像と観察されたダイナミクスの模式図。A：過加圧印加により融解し収縮する氷単結晶ベーサル面の明視野顕微鏡その場観察像。B：対応するレーザー干渉顕微鏡像。C：(i)-(x) 図 B に示したレーザー干渉顕微鏡像の時間フレーム間の差分像。同素不混和水の生成によって生じた円環状の干渉縞が強調されている。(i)′-(x)′ (i)-(x) の顕微鏡像に対し、氷単結晶、液膜状同素不混和水および液滴状同素不混和水の位置を示した画像。青と白の実線で示された領域はそれぞれ氷単結晶と液膜状同素不混和水の領域を示しており、白の破線で示された紫のグラデーションを伴う領域は液滴状同素不混和水の領域を示している。D：観察された同素不混和水のダイナミクスを示す模式図。青と紫の円板は単結晶と液膜状同素不混和水をそれぞれ示しており、紫の半球は液滴状同素不混和水を示している。紫の矢印は時間経過を示している。

Press Release

(2024/9/20)

冷やしても死なない細胞の秘密
～冬眠する哺乳類の細胞に学ぶ低温耐性の仕組み～

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曽根正光助教、山口良文教授らは、冬眠する哺乳類であるシリアンハムスターの細胞が長時間の低温に耐えられる仕組みの一端を明らかにしました。

哺乳類の中には、食糧が不足する冬を乗り切れるよう、エネルギーを節約するために冬眠を行う種がいます。シリアンハムスターは冬眠の際、10℃以下にもなる低体温状態を何日も持続させます。ヒトはこのような長期間の低体温状態では、脳、心臓、肺など様々な臓器の機能が不全となり死んでしまいます。

では、冬眠する哺乳類はどのような仕組みで長期間の低温状態に耐えられるのでしょうか。これまでの研究から、冬眠する哺乳類から取り出して培養皿で培養した細胞を冷やすと、ヒトのような冬眠をしない哺乳類の細胞を冷やした場合に比べ、長く生存することが分かっていました。つまり、冬眠する哺乳類の体を形作る一つ一つの細胞に、もともと低温への耐性が備わっているのだと考えられます。しかし、こうした細胞レベルでの低温への耐性が、どのような仕組みで発揮されているのかは不明でした。

そこで研究グループは、まず遺伝子工学の手法を用いて、シリアンハムスターの細胞で働く様々な遺伝子をヒトの細胞で働かせました。次に、それらのヒト細胞の集団の中で、長時間冷やした際に生存できる細胞を選別することで、低温への耐性を与えるシリアンハムスターの遺伝子を探しました。その結果、グルタチオンペルオキシダーゼ4（Gpx4）と呼ばれる遺伝子を働かせると、ヒトの細胞を冷やした際の生存率が上がりました。反対に、シリアンハムスターの細胞でGpx4の働きを止めると、低温で生存できなくなりました。また研究グループは他にも、シリアンハムスターの低温での生存を支えている遺伝子を複数見出しました。Gpx4を含めこれらの遺伝子は、どれもヒトにおいてもゲノム上に備わっています。もしこれらの遺伝子の働きを、低温におかれた際のヒト細胞で引き出すことができれば、臓器移植の際、臓器の低温保存期間延長などへの応用が期待できます。

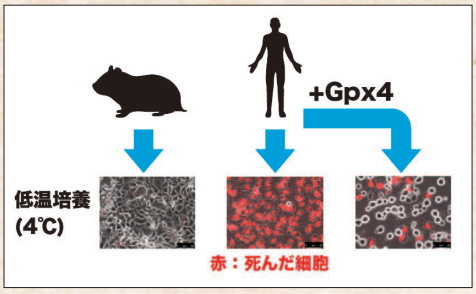
なお本研究成果は、日本時間2024年9月19日（木）公開のCell Death and Disease誌に掲載されました。

【論文発表の概要】

論文名：Identification of genes supporting cold resistance of mammalian cells: lessons from a hibernator
（哺乳類細胞の低温耐性を支える遺伝子の同定：冬眠動物から学ぶ）

著者名：曽根正光[1]、三橋ののか[1,2]、杉浦悠毅[3]、松岡悠太[3]、前田 黎[3]、山内彩加林[1]、岡橋良仁[1,2]、山下純平[1]、曽根加菜子[1]、延寿祥代[1]、姉川大輔[1]、山口良文[1]
（1 北海道大学低温科学研究所、2 北海道大学大学院環境科学院、3 京都大学大学院医学研究科附属がん免疫総合研究センター）

雑誌名：Cell Death and Disease（細胞死の専門誌）
ＤＯＩ：10.1038/s41419-024-07059-w
公表日：2024年９月19日（木）（オンライン公開）



Gpx4 を働かせるとヒトの細胞が低温で生存できるようになる。

■低温科学研究所がオホーツク生活文化振興財団と連携協定を締結

令和６年8月22日（木）、低温科学研究所は、紋別市の道立オホーツク流氷科学センターなどを運営する公益財団法人オホーツク生活文化振興財団と連携協定を締結しました。本協定は、これまでの協力関係をさらに深めることにより、研究成果の発信及び低温科学の啓発や地域振興等、互いの発展に寄与することを目的としています。

公益財団法人オホーツク生活文化振興財団が運営する道立オホーツク流氷科学センターは、流氷及び海洋に関する科学的知識の普及を図るとともに、流氷に象徴されるオホーツク圏の自然と生活文化に対する理解を深めることを目指し、1991年に設置され、流氷及び海洋並びに生活文化に関する資料の収集、保管、展示、調査研究、普及啓発を中心とした取り組みを行っております。

本研究所は、昭和40年に「北海道大学低温科学研究所附属流氷研究施設」（平成16年4月に低温科学研究所附属環オホーツク観測研究センターに転換）を紋別市に設置して以来、流氷が地球環境や海洋生物に及ぼす影響などをテーマに研究を行っており、昭和61年から紋別市にて毎年行われている北方圏国際シンポジウムに参画するなど、道立オホーツク流氷科学センターとはこれまでも深い繋がりがありました。

本協定により、両者の交流がますます活発に行われることが期待されます。

図１　締結式の様子

図２　超定書を取り交わす渡部所長（左）と大塚理事長（右）

AWARD

渡邉　友浩

北海道大学ディスティングイッシュトリサーチャーの称号を授与

（令和6年4月1日 - 令和9年3月31日）

中山　佳洋

アメリカ地球物理学連合 Cryosphere Early Career Award を受賞

（令和6年9月18日）

Yuan　Nan

2024年度日本海洋学会奨励論文賞を受賞

（令和6年9月18日）

西岡　純

2024年度 日本海洋学会賞を受賞

（令和6年9月18日）

NEWS

■人事異動（令和６年５月２日から令和６年 11 月 30 日まで）

異動日	異動内容	氏　名	職　名	備　考
R6.7.1	転出	永　井　　潤	係長	監査室監査担当係長へ
R6.7.1	転入	王　生　晶　子	係長	病院経営企画課経営戦略担当係長から
R6.7.1	採用	橋　場　しのぶ	事務補佐員	
R6.7.1	配置換	篠　原　琴　乃	学術研究員	事務補佐員から
R6.8.1	退職	小　島　久　弥	助教	
R6.9.1	採用	三　浦　　彩	博士研究員	
R6.9.30	任期満了	北　川　暁　子	事務補佐員	
R6.9.30	任期満了	平　川　　靜	技術補助員	
R6.9.30	任期満了	吉　成　浩　志	学術研究員	
R6.9.30	退職	YUAN NAN	学術研究員	
R6.10.1	採用	松　本　真　依	技術補佐員	
R6.10.1	採用	岩　崎　桃　子	技術補助員	
R6.10.1	採用	延　寿　祥　代	技術補助員	
R6.10.7	採用	竹　原　景　子	博士研究員	
R6.10.31	退職	佐　伯　　立	非常勤研究員	
R6.11.1	採用	斉　藤　　潤	博士研究員	
R6.11.1	配置換	岸　本　純　子	学術研究員	技術補佐員から
R6.11.30	退職	中　山　佳　洋	助教	

編❄集❄後❄記

▶Reportでは海外で行われた調査や研究会の様子が主に扱われていますが、低温研の中で日々行われている実験や分析にまつわる苦闘の様子、また研究・教育活動を支えてくれている技術部や事務部の紹介もいつかやってみたいです。（白岩）

▶2024年も飛ぶように過ぎて行きました。基礎研究をできる平和と社会に感謝する一方で、不透明感を増す世界情勢の中で我々は一体何ができるのか、年の瀬に改めて考えつつ新しい年を迎えたいと思います。（山口）

▶今号も低温科学の最前線をお届けします。哺乳類の冬眠と彩雪現象に思考を巡らせながら、いよいよ厳冬期を迎えます。（渡邉）

▶微生物も哺乳類も独自の戦略で低温環境を生き抜いています。でもまだ分からないことだらけですね。（曽根）

低温研ニュース第58号

（北海道大学低温科学研究所広報誌）

発行人：低温科学研究所長

編　集：低温研広報委員会

（白岩　孝行、山口　良文、渡邉　友浩、曽根　正光、事務部総務担当）

ご意見、お問い合わせ、投稿は下記まで

〒060-0819　北海道札幌市北区北19条西8丁目

TEL：011-706-5445　　FAX：011-706-7142

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