

## 氷河生態系の謎に迫る ～世界各地の氷河に生息する微生物をメタゲノム解析～

### ■ 概要

氷河には寒冷な環境にもかかわらず様々な微生物が生息しています。すなわち、氷河は雪と氷に囲まれた生物のいない世界ではなく、微生物群集を含む一つの「生態系」とみなすことができます。しかしながら、氷河に生育する微生物の情報は断片的で、氷河上での微生物群集の活動の様子はあまりわかっていませんでした。

情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所の村上匠特任研究員と森宙史准教授、山梨大学の瀬川高弘講師、千葉大学の竹内望教授、豊橋技術科学大学の広瀬侑助教らによる共同研究チームは、極域やアジア山岳域などの氷河から、「クリオコナイト<sup>(1)</sup>」とよばれる微生物集合体を採集し、クリオコナイトに含まれる細菌の遺伝情報を「メタゲノム解析<sup>(2)</sup>」により探索しました。その結果、クリオコナイト内部には多様な細菌種が共存していて、様々な代謝方法で栄養やエネルギーを得ていることがわかりました。さらに世界中のクリオコナイトの細菌群集を比較したところ、地域によって含まれる細菌種やその代謝能が大きく違っていたのです(図1)。

こうした「構成員の異なるクリオコナイト」は、地域ごとの氷河環境の違いを反映していると考えられ、氷河生態系の地球規模での多様性に迫る手掛かりになります。氷河は気候変動の影響を最も受けやすい環境の一つで、氷河生態系の存続も危惧されています。今後、得られた知見をもとに環境変動が氷河微生物の活動や多様性に与える影響を継続的に調査していくことが重要です。

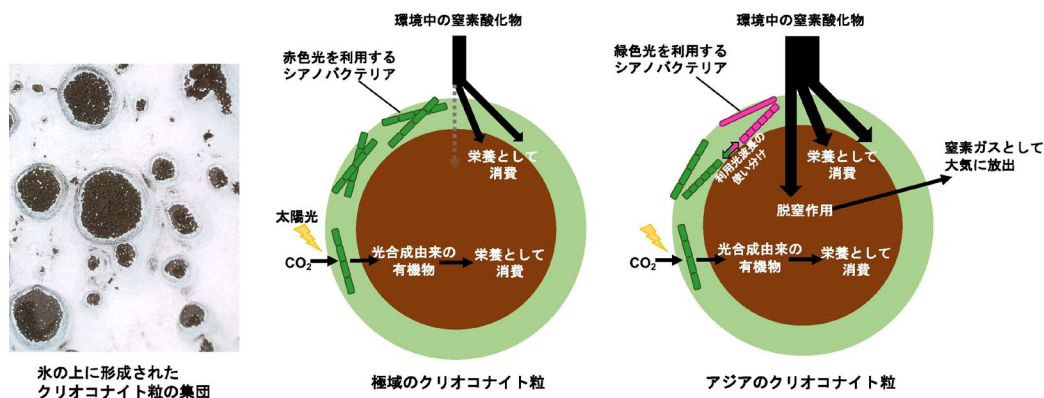


図1:メタゲノム解析から推測された極域とアジアのクリオコナイトの違い

クリオコナイト外層(緑色部分)をシアノバクテリアが占めており、活発に光合成を行う点は極域とアジアで共通している。一方で、外層を構成するシアノバクテリアの種類や利用できる光の幅は極域とアジアで異なる。アジアのクリオコナイトの内部(茶色部分)では、豊富な窒素酸化物の供給を受けて細菌による脱窒が行われるが、窒素酸化物の供給が限られる極域では脱窒はほとんど起こらないと見られる。

## ■ 成果掲載誌

本研究成果は英国科学雑誌「Microbiome」に 2022 年 3 月 23 日(日本時間)に掲載されました。

論文タイトル: Metagenomics reveals global-scale contrasts in nitrogen cycling and cyanobacterial light harvesting mechanisms in glacier cryoconite

(氷河微生物群集「クリオコナイト」における窒素代謝様式やシアノバクテリアの集光機構が広域間で異なることをメタゲノム解析によって解明)

著者: T. Murakami, N. Takeuchi, H. Mori, Y. Hirose, A. Edwards, T. Irvine-Fynn, Z. Li, S. Ishii, T. Segawa

(村上匠, 竹内望, 森宙史, 広瀬侑, Arwyn Edwards, Tristram Irvine-Fynn, Zhongqin Li, 石井聡, 瀬川高弘)

## ■ 研究の詳細

### ● 研究の背景

氷河は雪と氷に閉ざされた極限環境ですが、低温に適応した微生物群集からなる独自の生態系が存在します。その微生物群集が形成する「クリオコナイト」と呼ばれる粒状の集合体は、氷河上の生化学反応が集中するホットスポットで、氷河生態系の物質循環を駆動する中心的存在です(図 2)。クリオコナイトは光合成細菌のシアノバクテリアを中心とする雪氷微生物と鉱物が凝集することで形成されるもので、世界中の氷河に共通してみられる構造体です。クリオコナイトは、その量が増えると氷河表面を覆い、太陽光を吸収することで氷河の融解を加速させることが知られています。

このように物質循環や氷河融解の観点から注目されてきたクリオコナイトですが、これまでの研究では一部の微生物やその微生物の生理機能しか調査されておらず、特に微生物群集のゲノムに関する情報はほとんどありませんでした。したがって、クリオコナイト内でどのような微生物種がどのような活動をしているのか、その実態はあまりわかっていませんでした。



図 2:(左)グリーンランドのクリオコナイト  
(中央)天山山脈のクリオコナイト  
(右)増殖したクリオコナイトが氷河表面を覆う様子

### ● 本研究の成果

本研究グループは、グリーンランドや南極半島といった極域氷河に加え、アジア山岳域(ヒマラヤや天山山脈など)の氷河から広くクリオコナイト試料を収集し、メタゲノム解析を駆使することで、世界に先駆けてクリオコナイト細菌叢の網羅的な遺伝子解析をおこないました。

その結果、クリオコナイトに含まれる細菌の種類とそれらが保有する様々な遺伝子を群集総体レベルで把握

することに成功し、各々の細菌がどのようにして栄養やエネルギーを獲得しているのかを明らかにしました。さらに、クリオコナイトを構成する細菌の種類や保有している遺伝子の組成を各々の氷河間で比較することで、地域によって、特に極域とアジア山岳域の間で細菌種や有する代謝能が大きく異なることが初めてわかったのです(図1)。

顕著な例として、自然界における窒素循環の重要な経路の一つである脱窒<sup>(3)</sup>を司る遺伝子の分布が挙げられます。脱窒遺伝子はアジアのクリオコナイトから豊富に検出された一方で、極域からはほとんど検出されず、地域によって極端な分布を示しました。このような脱窒遺伝子分布の差異が生じた要因の一つとして、アジア山岳氷河が都市部や内陸乾燥地帯からの降着物の影響を強く受けている点が考えられます。こうした降着物には脱窒の基質となる窒素酸化物が豊富に含まれているため、アジアのクリオコナイトでは脱窒能を持つ細菌が定着しやすいのではないかと推測されます。

一方で、シアノバクテリアにも大きな地域差が認められました。極域では単一のシアノバクテリア種(*Phormidesmis priestleyi*)がクリオコナイトの形成に関与しているのに対し、アジアではそれとは全く別の複数のシアノバクテリア種がクリオコナイトの形成に関与していたのです。光エネルギーを用いて二酸化炭素から有機物を合成するシアノバクテリアは、クリオコナイトにおける一次生産者として重要な役割を果たしています。さらに、シアノバクテリアの光エネルギーの捕集に関する地域差が遺伝子情報から判明しました。極域のシアノバクテリア *P. priestleyi* は、光合成に主に赤色光を利用します。一方、アジアのクリオコナイトには赤色光に加えて緑色光も利用するシアノバクテリアや、赤色光と緑色光を光環境変化に応じて使い分ける能力を有するシアノバクテリアが多く存在しました。アジアのクリオコナイトで複数のシアノバクテリア種が共存できる背景として、降着物による比較的豊富な栄養供給に加えて、利用する光の選択肢を種間で広げることによって、光の奪い合いを避ける戦略があるのではないかと考えられます。

## ● 今後の期待

氷河生態系はその過酷な環境ゆえに、構成する生物種が少なく多様性の低い系であると考えられてきました。しかし、本研究成果により、単一のクリオコナイト内にも様々な代謝能を有する多様な細菌種が共存しており、また地域によって細菌種が大きく異なることがわかりました。

このように多様な細菌種を育む氷河ですが、一方で、現在世界各地で氷河の縮小が報告されており、氷河生態系が安定的に存続できるかは不透明な状況です。氷河が消滅する前に、氷河生態系の実態をより詳細に解明し、今後の寒冷環境の将来予測をおこなうことが急務です。本研究で得られた成果は、氷河生態研究をさらに推し進めていく上での重要な基盤となります。

## ■ 用語解説

### (1) クリオコナイト

氷河表面に形成される粒状の構造体のこと。「クリオ」が「氷」、「コナイト(コニーデ)」が「汚れ」を意味する。糸状のシアノバクテリアが周囲の鉱物や有機物を巻き込むことで粒が成長していく。

### (2) メタゲノム解析

微生物群集総体の遺伝情報を網羅的に解析する手法。

### (3) 脱窒

微生物が呼吸のために窒素酸化物(硝酸イオンや亜硝酸イオン)を窒素ガスへと代謝する作用のこと。一般的に、基質となる窒素酸化物や有機物が豊富で、なおかつ酸素が欠乏している環境で起こる。

## ■ 研究体制と支援

本研究は情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所の村上匠特任研究員と森宙史准教授、山梨大学の瀬川高弘講師、千葉大学の竹内望教授、豊橋技術科学大学の広瀬侑助教、ミネソタ大学の石井聡准教授、アベリストウイス大学の Arwyn Edwards 准教授と Tristram Irvine-Fynn 上級講師、および中国科学院の Zhongqin Li 教授の国際共同研究チームによっておこなわれました。

本研究は日本学術振興会科研費(課題番号: 19K23766, 19H01143, 20K21840, 21H03588)、北極域研究加速プロジェクト(ArCS II, 課題番号: JPMXD1420318865)、および公益財団法人発酵研究所 一般研究助成(課題番号: G-2020-2-133)の支援を受けました。

## ■ 問い合わせ先

千葉大学広報室

TEL: 043-290-2018 メール: [koho-press@chiba-u.jp](mailto:koho-press@chiba-u.jp)