

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26241020

研究課題名(和文)地球規模環境変動が氷河生態系に及ぼす影響評価

研究課題名(英文)Effects of global environmental changes on glacier ecosystems

研究代表者

幸島 司郎 (Kohshima, Shiro)

京都大学・野生動物研究センター・教授

研究者番号：60183802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,200,000円

研究成果の概要(和文)：世界各地の氷河で採取した微生物の遺伝子分析と地域間比較により、氷河融解を加速する汚れ物質(クリオコナイト)形成に関係するバクテリアやシアノバクテリアの地理的分布や汚れ物質内での分布、氷河動物と共生するバクテリアの存在が初めて明らかになった。また、生物によるアルベド改変過程を組み込んだ氷河変動モデルを改良するために、クリオコナイトが氷河表面に形成する縦穴(クリオコナイトホール)の発達や崩壊を精度良く表現できる数値計算モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：We genetically analyzed microorganisms collected from the glaciers in various part of the world and found regional difference in species composition of bacteria and cyanobacteria in cryoconites, biogenic dark granules on the glacier that accelerate glacier melting. We could also identify symbiotic bacteria of glacier animals. We developed mathematical model simulating changes in cryoconite holes, melt holes on the glacier formed by cryoconite, to establish the mass valance model of the glacier including biological albedo reducing process.

研究分野：雪氷生物学

キーワード：氷河 氷床 微生物 藻類 バクテリア シアノバクテリア アルベド アイスコア

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化が原因と考えられる氷河の後退や縮小が世界各地で報告されており、海面上昇や水資源の減少、気候変動の原因となることが懸念されている。氷河表面のアルベド(反射率)は、氷河の融解に影響する重要な要因の一つであり、その変動プロセスの理解は温暖化による氷河変動を予測する上で非常に重要である。雪や氷は白くてアルベドが高いため、氷河に飛来する鉱物粒子、ススなどの暗色不純物が、氷河のアルベドを低下させ、氷河融解を加速する効果を持つことが知られていた。しかし従来、氷河上での生物活動の影響は考慮されてこなかった。申請者らは、氷河上で繁殖する微生物やその活動に由来する有機物が、氷河のアルベドを低下させて、その融解を加速している、つまり、雪氷微生物の活動が氷河融解に影響していることを世界に先駆けて明らかにしてきた。最近の調査では、温暖化の大きな影響が懸念されているグリーンランド氷床の北西部でも、雪氷微生物活動によるアルベド低下が生じていることを確認している。グリーンランド氷床では、一昨年、中西部の裸氷域に毎年融解期に南北 300km 東西 30km に及ぶ暗色域が現れ、2000 年以降、面積の拡大と更なる暗色化が進んでいることが報告されたことから、雪氷微生物活動によるアルベド低下作用の重要性が、海外でも急速に注目されるようになり、欧米を中心に多くの研究が始まりつつあった。しかし、生物活動によるアルベド低下過程を氷河生態系という観点から総合的に理解しようとする研究は、我々以外まだ行っていなかった。

### 2. 研究の目的

これまで我々が世界各地の氷河生態系で行った調査により、氷河微生物のアルベド低下効果には、氷河上の微生物相によって大きな差があることが明らかになった。例えばヒマラヤの氷河では、黒い有機物を形成するシアノバクテリアなどの微生物が大増殖して、夏には表面が黒くなるため融解が大きく加速されている(黒い氷河)。一方、アラスカの氷河では春から夏に緑藻類の大繁殖による赤雪と呼ばれる現象がおこり表面がピンクに染まるが、融解促進効果は低い(ピンクの氷河)。また、南米パタゴニアの氷河では、微生物量が少ないため氷河のアルベドは高く保たれている(白い氷河)。さらに、南極に次いで大きく、その融解が海面上昇に大きく影響するグリーンランド氷床では、地域によって黒い部分と白い部分に分かれていることが明らかになった。このような氷河の微生物相とアルベドは、温暖化などの環境変動によって今後大きく変動する可能性がある。しかし、現在の氷河変動モデルでは、このような生物学的プロセスはまだ考慮されていない。そこで、環境変動によって氷河微生物相とアルベドがどのように変化するかを予測

し、その影響を評価するために、(1)微生物活動による氷河アルベドの改変過程とその変動要因の解明、(2)氷河アルベドと氷河微生物活動の広域分布解析法の開発、(3)生物学的アルベド改変プロセスを考慮した氷河変動モデルの構築、を目的に研究を行った。

### 3. 研究の方法

環境変動が氷河生態系やアルベドに及ぼす影響を理解するために、これまで継続的に調査され、過去のデータと比較が可能なヒマラヤ、北米、パタゴニアなどの氷河で微生物相とアルベド、環境要素に関する調査を行ない、近年の変動を明らかにするとともに、アイスコアを採取し、アイスコア中に保存された過去の微生物と環境変動との関係や大気からの微生物移入過程の分析を行った。微生物によるアルベド改変過程とその変動要因を明らかにするために、地域や標高、年代によって、環境条件と微生物相、アルベドがどのように変化するかを比較した。また、南極半島、ブータンヒマラヤ、コロンビアアンデスの氷河など、未調査地域の氷河の調査を行い、既存データとあわせて地球規模の地域比較を行なった。現地調査では、最新のゲノム解析用のサンプルを高度別に採取し、氷河微生物の地球規模の地理的分布や生態、生物学的アルベド改変過程、微生物相と環境条件との関係を分析した。また、現地調査と衛星画像解析によって、氷河微生物とアルベドの広域分布を明らかにする手法の開発を行った。さらに以上の結果をもとに、生物学的プロセスを考慮した氷河変動モデルを構築し、観測データをどの程度再現できるか検討した。

### 4. 研究成果

(1) 氷河生態系の微生物相：微生物活動による氷河アルベドの改変過程とその変動要因を解明するために、世界各地で氷河生態系の微生物と生物起源汚れ物質の調査を行なった。氷河生態系の微生物相に関しては、形態による分類や同定が不可能だったバクテリアやシアノバクテリアを対象に、16S rRNA 遺伝子解析による分類と同定を行った結果、世界の広範囲の氷河に同種と見られるバクテリアやシアノバクテリアが存在すること、氷河上の微生物の高度分布には、ほぼ世界共通のパターンがあることなどが明らかになった。

また、氷河生態系のバクテリア群集の地理的分布を明らかにするために、北極やアジア域の多地点で採取した氷河試料に対して、次世代シーケンサーを用いた大規模な 16SrRNA 遺伝子によるバクテリア群集構造解析を実地した。その結果、地理的に近い地域ほど細菌群集構造が類似する傾向があることが分かった。さらに、各地域で優先しているバクテリアグループを調べた結果、北極では Alpha proteobacteria が優先していたのに対し、アジアでは Cyanobacteria や Chloroflexi

などが優占していることがわかり、アジアの氷河生態系では糸状シアノバクテリアが重要な一次生産者であることが明らかとなった。

消失が目前に迫っている熱帯地域にある2つの氷河、スタンレープラトー氷河（ウガンダ）、コネヘラス氷河（コロンビア）において、氷河上と近年氷河が後退したばかりの氷河後退域から採取された試料のバクテリアを対象に、16SrRNA 遺伝子解析を行った。その結果、いずれの氷河においても氷河上と氷河後退域のバクテリア相は異なっているものの、一部の種は共通して検出された。このため氷河と氷河後退域の微生物生態系が相互作用していることがわかった。一方、氷河にだけ見られる種もあり、今後の氷河消失は氷河上のみが存在するユニークな種の消失を引きおこす可能性があることが明らかとなった。また、ウガンダの氷河からは、これまで他の氷河から報告されていないバクテリアが多く見つかかり、この氷河のバクテリア相が他の氷河と比べて極めて特殊であることが示された。

これまで世界各地の氷河で採取したシアノバクテリア遺伝子の比較解析を行った結果、16SrRNA 遺伝子解析では6つの OTU が DNA ライブラリーの88%を占め、氷河上にはごく限られた種が生息していることが明らかとなった。さらに、16SrRNA 遺伝子より進化速度の早い16S-23S ITS領域の解析から、これらのOUTには、明瞭な地域差が見られエンデミックな分布を示すものと、地域差が見られずコスモポリタンの分布を示すものがあることがわかった。また、ITS領域の解析により、氷河上のシアノバクテリアは、地理的分布の異なる3グループに分かれることが初めて明らかになった。

アラスカの氷河に生息するコオリミミズおよびパタゴニア氷原の氷河カワゲラを対象に共生細菌群集構造解析を行った結果、コオリミミズ・氷河カワゲラ共に、共生細菌の群集構造が生息氷河表面の細菌群集構造と大きく異なることが判明した。また、氷河無脊椎動物の共生細菌群集は、氷河由来と推定される細菌系統に加えて、従来の氷河微生物研究ではほとんど検出されてこなかった、動物の腸内や細胞内に特異的に共生する細菌系統によって構成されることが明らかとなった。さらに、16S rRNA 配列を標的とした Fluorescence in situ hybridization (FISH) によって宿主内での細菌種の局在を特定することにより、動物腸内特異的に共生する細菌種に加え、一部の氷河由来細菌種も氷河無脊椎動物と強固な共生関係にある可能性が示された。また、培養分析から、氷河上にも窒素固定菌存在し物質循環に関与していることが示唆された。

(2) 微生物活動による氷河アルベドの改変過程：また、ITS領域の解析から、これまで同定困難だった「黒い氷河」の汚れ物質（ク

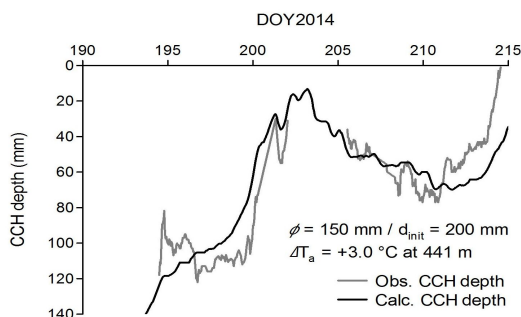
リオコナイト）を形成する糸状シアノバクテリアの地理的分布が初めて明らかになり、ヒマラヤとグリーンランドでは糸状シアノバクテリアの優占種が明らかに異なることなどが示された。

「黒い氷河」である中国 NO1 氷河から採取したサンプルを用いて、クリオコナイト粒（糸状シアノバクテリアが形成する氷河上の汚れ物質）の断面に見られる層構造と微生物群集との関連を調べるために、16SrRNA 遺伝子解析を実地した。クリーンベンチ内に設置した実体顕微鏡下で、クリオコナイト内部の内層と外層部分を別々に採取し、実際の微生物活動となる指標となる RNA を抽出し、逆転写反応で cDNA の作成をおこなった。16SrRNA 遺伝子領域を PCR で増幅し、イルミナ社の次世代シーケンサー（Miseq）で解読をおこなった。情報解析をおこなった結果、クリオコナイト内部の内層と外層部分では微生物群集構造が大きく異なる事がわかった。外層ではシアノバクテリアが優先していたのに対し、外層では Beta proteobacteria や Planctomycetes などが優先し、クリオコナイトの内層と外層にはそれぞれ異なる微生物群が生息していることが初めて明らかとなった。

立山で採取した赤雪（雪氷藻類の増殖により着色した積雪）の藻類を対象に、藻類が含む色素と 18SrRNA 遺伝子の分析を行った結果、赤雪は色素の種類・量によって4タイプに分類できること、どのタイプも複数の藻類種から構成されるが優占種が異なることが明らかになった。

(3) 生物学的プロセスを考慮した氷河変動モデルの構築：氷河上の生物学的汚れ物質（クリオコナイト）が日射で温められて氷河表面を融かすことにより形成される縦穴（クリオコナイトホール）の発達や崩壊は、氷河アルベドの変化に大きな影響を及ぼす。しかし、その発達や変動をうまく表現できるモデルがないことが、生物によるアルベド改変過程を組み込んだ氷河変動モデルの構築を困難にしてきた。クリオコナイトホールが小さく不安定で、その影響が小さいヒマラヤの「黒い氷河」では、生物によるアルベド改変過程を組み込んだ氷河の変動モデルを既に構築し、観測値をほぼ再現できることを確認している。そこで今回、このモデルをクリオコナイトホールの影響が大きい氷河に拡張するために、クリオコナイトホールの発達と衰退、崩壊を表現できる数値計算モデルを構築し、グリーンランド北西部カナック氷帽にて観測した観測データによって検証をおこなった。クリオコナイトホールについては、これまで発達については着目され、解析がおこなわれてきたが、風速が強まることによってクリオコナイトホールが浅くなることを明らかにしたのは本研究が初めてである。また、グリーンランド全域を対象に、気象研究所の領域気候モデルの計算結果を境界条件とし

てクリオコナイトホールが崩壊する時間を計算したところ、衛星データによるアルベドの年々変動と良い一致を示した。このことは、グリーンランド氷床の暗色化のプロセスにおいて、これまで考慮されてこなかった、「クリオコナイトホールの崩壊による、クリオコナイト物質の散逸」が影響していることを示唆している。



クリオコナイトホールの深さの変動  
実測値と計算値の比較

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 39 件)

Takumi Murakami, Takahiro Segawa, Roman Dial, Nozomu Takeuchi, Shiro Kohshima, Yuichi Hongoh, Bacterial microbiota associated with the glacier ice worm is dominated by both worm-specific and glacier-derived facultative lineages, *Microbes and Environments*, 2017, 32(1), 32-39, DOI:10.1264/j sme2.ME16158 査読有り

Uetake, J., Tanaka, S., Segawa, T., Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Motoyama, H., Aoki, T., Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 92 (9), DOI: 10.1093/femsec/fiw127, 査読有り

Gokul, J. K., Hodson, A. J., Saetnan, E. R., Irvine-Fynn, T. D. L., Westall, P. J., Detheridge, A. P., Takeuchi, N., Bussell, J., Mur, L. A. J. and Edwards, A., Taxon interactions control the distributions of cryoconite bacteria colonizing a High Arctic ice cap,

*Molecular Ecology*, 2016, 25, 3752-3767, DOI: 10.1111/mec.13715, 査読有り

Onuma, Y., Takeuchi, N., Takeuchi, Y., Temporal changes in snow algal abundance on surface snow in Tohkamachi, Japan, *Bulletin of Glaciological Research*, 2016, 34, 21-31, DOI:10.5331/bgr.16A02, 査読有り

Zhang, Y., Enomoto, H., Ohata, T., Kadota, T., Shirakawa, T., Takeuchi, N., Surface mass balance on Glacier No. 31 in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, from 1951 to 2014, *Journal of Mountain Science*, 2016, 14(3), 501-512, DOI: 0.1007/s11629-016-3967-6, 査読有り

Aizen EM, Aizen VB, Takeuchi N, Mayewski PA, Grigolm B, Joswiak DR, Nikitin SA, Fujita K, Nakawo M, Zapf A, Schwikowski M (11 authors), Abrupt and moderate climate changes in the mid-latitudes of Asia during the Holocene. *Journal of Glaciology*, 2016, 62(233), 411-439, DOI: 10.1017/jog.2016.34, 査読有り

Ojha S, Fujita K, Asahi K, Sakai A, Lamsal D, Nuimura T, Nagai H, Glacier area shrinkage in eastern Nepal Himalaya since 1992 using high-resolution inventories from aerial photographs and ALOS satellite images, *Journal of Glaciology*, 2016, 62(233), 512-524, DOI: 10.1017/jog.2016.61, 査読有り

Tshering P, Fujita K, First in situ record of decadal glacier mass balance (2003-2014) from the Bhutan Himalaya,

Annals of Glaciology, 2016, 57(71), 289-294, DOI: 10.3189/2016AoG71A036, 査読有り

Zhang Y, Hirabayashi Y, Fujita K, Liu SY, Liu Q, Heterogeneity in supraglacial debris thickness and its role in glacier mass changes of the Mount Gongga, Science China Earth Sciences, 2016, 59(1), 170-184, DOI: 10.1007/s11430-015-5118-2, 査読有り

Tsuji, M., Uetake, J., & Tanabe, Y., Changes in fungal community of Austre Breggerbreen deglaciation area, Ny-Alesund, Svalbard, High Arctic, Mycoscience, 2016, 57(6), 448-451, DOI: 10.1007/s00300-016-1983-1, 査読有り

Shcherbakova, V., Yoshimura, Y., Ryzhmanova, Y., Taguchi, Y., Segawa, T., Oshurkova, V., & Rivkina, rchaeal communities of Arctic methane-containing permafrost, FEMS Microbiology Ecology, 2016, 92(10), fiw135, DOI: 10.1093/femsec/fiw135, 査読有り

島田利元, 竹内望, 青木輝夫, グリーンランド氷床裸氷域および暗色域の衛星観測, 雪氷, 2016, 78(6), 57-64, 査読有り

瀬川高弘, 竹内望, 氷河・積雪上の微生物の生態, 日本微生物生態学会誌, 2016, 31(2), 57-64, 査読有り

Musilova, M., Tranter, M., Bamber, J.L., Takeuchi, N., Anesio, AM., Experimental evidence that microbial activity lowers the albedo of glaciers, Geochemical Perspective Letter, 2016,

2, 106-116, DOI: 10.7185/geochemlet.1611, 査読有り

Matoba S, Motoyama H, Fujita K, Yamasaki T, Minowa M, Onuma Y, Komuro Y, Aoki T, Yamaguchi S, Sugiyama S, Enomoto H., Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. Bulletin of Glaciological Research, 2015, 33, 7-14, DOI: 10.5331/bgr.33.7, 査読有り

Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N. and Irvine-Fynn, T., Cryoconite The dark biological secret of the cryosphere, Progress in Physical Geography, 2015, 40, 66-111, DOI: 10.1177/0309133315616574, 査読有り

Uetake J, Tanaka S, Hara K, Tanabe Y, Samyn D, Motoyama H, Imura S, Kohshima S, Novel Biogenic Aggregation of Moss Gemmae on a Disappearing African Glacier. PLoS ONE, 2014, 9(11), e112510, DOI: 10.1371/journal.pone.0112510, 査読有り

Fujita K, Sakai A. Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(7), 2679-2694, DOI: 10.5194/hess-18-2679-2014, 査読有り

Takeuchi N, Fujita K, Aizen VB, Narama C, Yokoyama Y, Okamoto S, Naoki K, Kubota J., The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene, Quaternary Science Reviews, 2014, 103, 26-33, DOI:

10.1016/j.quascirev.2014.09.006, 査読有り

〔学会発表〕(計 76 件)

Shiro Kohshima, Yoshitaka Yoshimura, Nozomu Takeuchi, Takahiro Segawa, Jun Uetake, Glacier ecosystems and the glaciological importance of glacier microorganisms, International Symposium on Cryosphere and Biosphere, 2018, Kyoto, Japan, Invited

Koji Fujita, Nozomu Takeuchi, Masashi Niwano, Teruo Aoki, Modelling development and decay of cryoconite holes on Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland, International Symposium on Cryosphere and Biosphere, 2018, Kyoto, Japan

Takumi Murakami, Takahiro Segawa, Nozomu Takeuchi, Gonzalo Barcaza Sepulveda, Shiro Kohshima, Yuichi Hongoh, Analysis of the community structure and metagenome of the bacterial consortium from the gut of the glacier stonefly, International Symposium on Cryosphere and Biosphere, 2018, Kyoto, Japan

Akane Watanabe, Nozomu Takeuchi, Jun Uetake, Environmental factors associated with snow algal bloom in the deciduous forest of Mt. Gassan, Yamagata prefecture, Japan, 7th International Conference on Polar & Alpine Microbiology, 2017, Nuuk, Greenland, DM

Takeuchi, N., N. OTE, T. SEGAWA, J. UETAKE, N. NAGATSUKA, Z. LI, Distinctive Nitrogen Cycles between Asian and Polar Glaciers, Goldschmidt conference, 2016, Yokohama, Japan

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

雪氷生物学のページ:

[https://www.wrc.kyoto-u.ac.jp/kohshima/Study/glacio\\_bio/G-biology.html](https://www.wrc.kyoto-u.ac.jp/kohshima/Study/glacio_bio/G-biology.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

幸島 司郎 (KOHSHIMA, Shiro)  
京都大学・野生動物研究センター・教授  
研究者番号: 60183802

(2) 研究分担者

本郷 裕一 (HONGO, Yuichi)  
東京工業大学・生命理工学院・教授  
研究者番号: 30353452

竹内 望 (TAKEUCHI, Nozomu)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 30353452

藤田 耕史 (FUJITA, Koji)  
名古屋大学・環境学研究科・教授  
研究者番号: 80303593

吉村 義隆 (YOSHIMURA, Yoshitaka)  
玉川大学・農学部・教授  
研究者番号: 90384718

瀬川 高弘 (SEGAWA, Takahiro)  
山梨大学・総合研究部・助教  
研究者番号: 90425835

植竹 淳 (UETAKE, Jun)  
国立極地研究所・国際北極環境研究センター・研究員  
研究者番号: 40455473

近藤 伸二 (KONDO, Shinji)  
国立極地研究所・新領域融合研究センター・准教授  
研究者番号: 30415161