

平成21年 5月22日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18681005

研究課題名（和文）アジア高山域の氷河上雪氷微生物群集の季節変化とその環境要因

研究課題名（英文）Seasonal variation in microbial communities on glaciers in the Asian high mountains.

研究代表者

竹内 望 (Nozomu Takeuchi)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：30353452

研究成果の概要：

アジア内陸部天山山脈のウルムチ No.1 氷河の雪氷微生物の調査を行った。その結果、氷河表面には3種のシアノバクテリア、2種の緑藻の繁殖が明らかになった。上流部で採取したサンプル分析の結果、春から夏の融解期に緑藻が繁殖し、さらに融解が激しい年にはシアノバクテリアが繁殖することが明らかになった。この季節変化の要因は主に融解量で、大気降水物として供給される窒素も関与している可能性があることが示唆された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
平成19年度	3,000,000	900,000	3,900,000
平成20年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価、環境政策

キーワード：氷河、環境変動、極限環境、生態学、微生物

## 1. 研究開始当初の背景

氷河や雪渓といった雪や氷の世界には、雪氷藻類、昆虫、微小動物、バクテリアなどといった低温環境に適応した特殊な生物（雪氷生物）が生息している。雪氷生物に関する研究は、ここ数年間で急速に世界の研究者の注目を集め始めている。全球凍結仮説における生物の生存、低温極限環境における生体機構、雪氷藻類による二酸化炭素の吸収、火星など地球外での生物探査への応用などへの期待からである。さらにこの雪氷生物は、生物学的だけでなく地球物理学的にも重要な側面があることがわかってきた。たとえば、過去

環境の復元手段として用いられるアイスコア研究において氷中に含まれる雪氷微生物が環境指標として利用できる可能性があること、雪氷微生物の氷河上での大繁殖が表面のアルベド（日射の反射率）を下げ、氷河融解を加速する効果があることなどがわかってきた。しかし雪氷生物について、分類学的な研究は比較的多くおこなわれてきたが、生態的な研究はまだ少なく、わかっていないことが多い。

近年世界各地の氷河で表面の微生物相について報告されてきているが、たとえば氷河上の雪氷生物相の季節変動の情報はまだほ

とんどない。雪氷生物は普通、氷河表面の雪の融解が始まる春から、再び新雪に覆われて凍結する秋までの間に繁殖する。この間、氷河表面は雪から氷へ変化し、表面の雪氷に含まれる化学成分も変化する。表面の微生物相はこのような氷河上の環境によって変化していくと考えられる。しかし、氷河での長期間の常駐調査がむずかしいため、微生物の季節変化に関する研究はほとんど行われなかった。微生物相の季節変化は、雪氷生物と環境要因の明らかにする上で重要な情報である。とくにアイスコア分析において雪氷微生物を過去環境の指標として用いる場合、いっような種類の微生物がいつ繁殖するかという季節変動の情報はその解釈のために重要である。申請者は、これまでにヒマラヤやチベットの氷河にてアイスコアを掘削し雪氷生物の分析を行い微生物のバイオマスや群集構造が年変動していることを明らかにしてきた。この微生物相の年変動の要因を明らかにする上でも、アジア高山域の氷河表面の季節変動の情報が重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、アジア高山域の氷河において氷河表面の雪氷微生物群集の季節変化を定量的に明らかにし、氷河の物理化学環境要因の季節変化と比較することによって、雪氷微生物と環境要因の関係を求めることである。また、それらの微生物群集が氷河表面の不純物やアルベドに与える影響を評価する。

## 3. 研究の方法

本研究の対象氷河は中国新疆ウイグル自治区のウルムチ No.1 氷河である(図1)。この氷河はもっともアクセスがよい中国の氷河のひとつであり、古くから氷河変動のモニタリングが行われている。調査は、2006年7月、2007年6月、7月の計3回行った。調査は、氷河上の下流部から上流部までの標高の異なる5~6地点で、表面の積雪または氷のサンプリングを行った。サンプリングは、藻類定量用、クロロフィル測定用、細菌定量用、微小動物定量用、炭素窒素安定同位体比分析用、ダスト定量用、化学分析用、種同定用などにわけて行った。また同時に各地点で、融解水のpH、電気伝導度などの水質測定、積雪含水率の測定、表面の状態の記載を同時におこなった。また、広域的な氷河表面の物理特性、微生物分布を把握するために、衛星画像の解析をおこなった。

調査で得られたサンプルは、冷凍のままもしくは薬品にて固定したのち、日本へ輸送し各分析をおこなった。日本での分析は、まず顕微鏡をもちいて、直接カウントによる藻類の同定と定量をおこなった。微鏡による各種

藻類の定量のほかに、クロロフィルおよびシアノバクテリア色素の定量を、クロロフィル測定装置をもちいておこなった。細菌の定量は、蛍光染色によるカウントによっておこなった。藻類、細菌の種の同定のため、DNA シークエンスの分析をおこなった。サンプリングした氷河表面の懸濁有機物の炭素、窒素安定同位体比を測定した。表面ダスト量の定量、燃焼法による有機物量の測定をおこなった。

2008年8月には、ネパールヒマラヤの氷河の調査をおこなった。ヒマラヤの氷河でも同様なサンプリング、分析をおこなった。また微生物の季節変動の理解のため、日本の立山の雪渓での補助的な調査もおこなった。

## 4. 研究成果

### (1) ウルムチ No.1 氷河の微生物群集とその季節変化

ウルムチ No.1 氷河の現地調査で得た氷河表面のサンプルの顕微鏡分析の結果、この氷河表面には3種のシアノバクテリア、2種の緑藻の繁殖が明らかになった(図2)。シアノバクテリアは主に氷河下流部に分布し、緑藻は上流部に分布していることがわかった。各サンプルのシアノバクテリア DNA シークエンスを分析した結果、観察結果と同様おもに3種のシークエンスが含まれていた。公開データベースでの検索の結果、同種のものではなく、未記載種であることがわかった。



図1 ウルムチ No.1 氷河 (中国新疆ウイグル自治区)

下流部に分布するシアノバクテリアは、直径1ミリほどの粒状の集合体をつくっていることがわかった(図3)。糸状のシアノバクテリアは粒状の集合体の表面を覆い、内部には細菌が存在し、また最大7層の層構造があることが明らかになった。

2007年と2008年での調査の結果を比較した所、2008年の氷河表面には2007年に全く見られなかった緑藻 (*Cylindrocapsa* sp.) が繁殖していた。このことは、年によって氷河表面の微生物群集が大きく変化することを示している。その要因については、現時点で

は不明である。

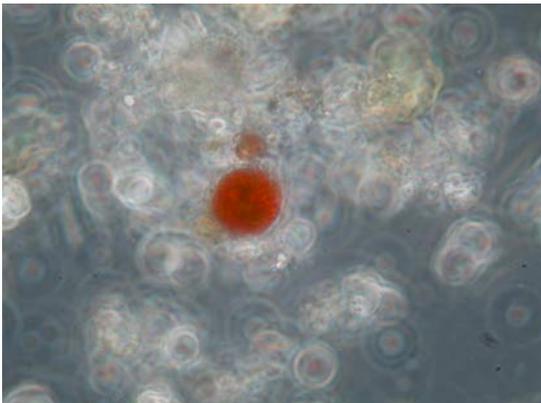


図2 ウルムチ No.1 氷河上でみられたシアノバクテリアと緑藻

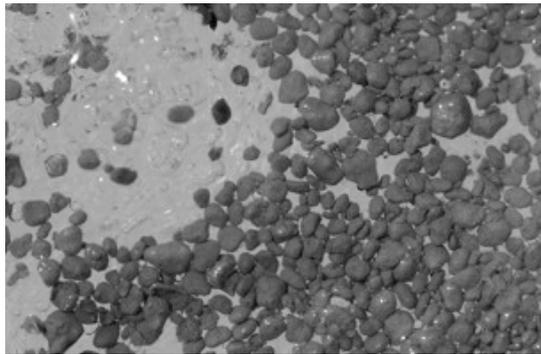


図3 シアノバクテリアが形成する粒状の構造体

氷河上流部積雪域での春から冬にかけての積雪断面サンプルの分析の結果、夏の層にシアノバクテリアと緑藻が存在することが明らかになった。その季節変動の分析の結果、春から夏にかけて積雪面の融解が進むにともない藻類の繁殖が始まることが明らかになった。また、分析の結果、2002年の積雪層に非常に比較的大量のシアノバクテリアが含まれていた。この年の積雪層の分析の結果、硝酸およびアンモニア体の窒素濃度が

高いことが明らかになった。この窒素の起源は、おそらく森林火災が原因で大気からの供給が増えたためと思われるがまだはっきりとはわからない。しかし、この結果は藻類の栄養塩となる大気からの窒素の供給が季節変動や年変動に影響している可能性を示している。

以上のウルムチ No.1 氷河の微生物群集は、天山山脈の氷河の微生物群集として今回はじめて明らかになった事実である。この氷河は、アラスカや北極圏など世界の他の地域の氷河とはことなり、シアノバクテリアが優占する藻類群集であった。今後、このような藻類群集の地理的な違いの要因や、年変動の要因などを明らかにすることが、微生物群集のための理解に重要である。

## (2) 微生物群集の氷河表面反射率への影響

ウルムチ No.1 氷河の表面には大量の不純物が存在していた。調査の結果、氷河表面の不純物量は、乾燥重量で平均  $335 \text{ g m}^{-2}$  であり、そのうち重量で平均 9.4%は有機物であった。

氷河表面のスペクトルアルベドの観測の結果、これらの不純物は氷河表面のアルベドに大きく影響していることが明らかになった。氷河裸氷域のアルベドは平均 0.14 で、上流部積雪域で平均 0.56 であった (図4)。いずれも、不純物のない純粋な裸氷面や積雪面に比べて顕著に低い。したがって、不純物が、氷河表面のアルベドを低下させているといえる。

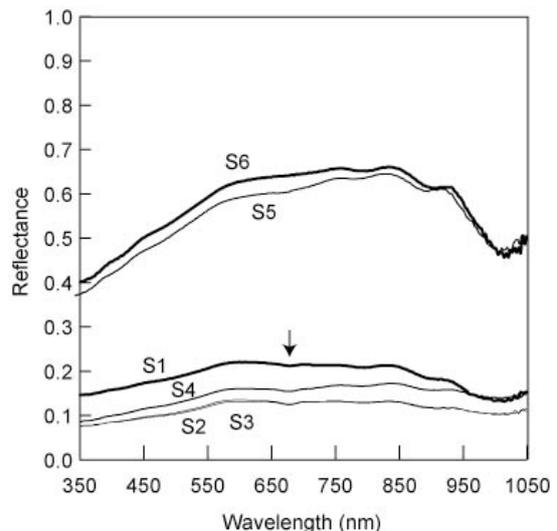


図4 ウルムチ No.1 氷河でのスペクトルアルベドの測定結果。S1 が最も下流部、S6 が上流部。

各調査地のスペクトルには、波長 645nm 付近に吸収があることがわかった。これはクロロフィルの吸収に対応することから、氷河

表面のアルベドには藻類の影響もあることを示している。したがって、微生物の存在もアルベドの低下に大きく影響している。

この様な微生物の特有の反射特性をつかって衛星画像から雪氷藻類の分布の定量方法を開発した。赤いカロチノイド色素をもつ雪氷藻類に対しては、氷河上の分布を可視域センサーの衛星画像で求めることができることが明らかになった。

### (3) 他の氷河での微生物群集の調査

2008年の8月にネパールヒマラヤのヤラ氷河で調査を行った。ヤラ氷河は、1990年代に雪氷生物群集についての調査が行われ、藻類群集構造やその高度分布等が明らかになっている。本調査の結果、まずヤラ氷河は1990年代に比べ末端が約200mも後退していることが明らかになった。これは地球温暖化等によって、氷河が顕著に縮小していることを示している。ヤラ氷河表面の雪氷藻類群集の調査の結果、1990年代に見られた藻類種がおおむねこの調査でも観察された。しかし藻類群集の高度分布は1990年代と比較すると、上流方向にずれていることが明らかになった。これは氷河の縮小に伴い、平衡線高度が高くなったため、藻類の生息場所としての氷河表面の条件が変化したためと考えられる。この結果から、近年の気候変動による氷河の変動は、氷河上の雪氷藻類群集にも影響を及ぼしていることが初めて明らかになった。

### 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6件)

1. Takeuchi, N. (2009) Temporal and spatial variations in spectral reflectance and characteristics of surface dust on Gulkana Glacier, Alaska Range. *Journal of Glaciology*, accepted. (査読有)
2. Takeuchi, N., Nakawo, M., Narita, H., and Han, J. (2008) Miaoergou Glaciers in the Kalik Mountains, western China: Report of a reconnaissance for future ice core drilling and biological study. *Bulletin of Glaciological Research*, 26, 33-40. (査読有)
3. Takeuchi, N., and Li, Z. (2008) Characteristics of surface dust on Ürümqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(4), 744-750 (査読有)

4. Bhatt, M. P., Masuzawa, T., Yamamoto, M., Takeuchi, N. (2007) Chemical characteristics of pond waters within the debris area of Lirung Glacier in Nepal Himalaya. *Journal of Limnology*, 66(2), 71-80. (査読有)
5. Kohshima, S., Takeuchi, N., Uetake, J., Shiraiwa, T., Uemura, R., Yoshida, N., Matoba, S., and Godoie., M. A. (2007) Estimation of net accumulation rate at a Patagonian glacier by ice core analyses using snow algae. *Global and Planetary Change*, 59, 236-244. (査読有)
6. Takeuchi, N., Dial, R., Kohshima, S., Segawa, T., Uetake J. (2006) Spatial distribution and abundance of red snow algae on the Harding Icefield, Alaska derived from a satellite image. *Geophysical Research Letter*, 33, L21502, doi:10.1029/2006GL027819. (査読有)

[学会発表] (計16件)

1. Takeuchi, N., et al., 2009/1/31 Reconstruction of Climate and River Discharge in the Last 1000 Years Based on Mountain Ice Core Data in the Central Asia Nozomu Takeuchi, Reconceptualizing Cultural and Environmental Change in Central Asia: An Historical Perspective on the Future, RIHN, Kyoto, Japan.
2. Takeuchi, N., et al., 2008/12/3 Changes of biological community from the 1990s to 2008 on the Yala Glacier, Nepali Himalayas, NIPR Int. Symposium, Tokyo, Japan.
3. 竹内望, ほか, 2008/9/26 キルギスタン・グリゴレア氷帽から掘削した87m アイスコア, 日本雪氷学会, 東京
4. 竹内望, ほか, 2008/5 中国祁連山およびロシアアルタイ山脈のアイスコアから復元した過去100年の風送ダストの年変動, 日本地球惑星科学連合同大会, 幕張
5. Takeuchi, N., et al., 2007/7/12 A distinctive snow algal community on a glacier in the Tianshan Mountains, China., IUGG, Perugia, Italy.
6. Takeuchi, N., et al., 2007/7/9 Significant Effect of Biogenic Material (cryoconite) on Surface Albedo of Asian Glaciers: -Geographical Comparison of the Amounts of Cryoconite and Surface

- Albedo of Glaciers. IUGG, Perugia, Italy.
7. 角川咲江, 竹内望, 2007/9/28 雪氷研究者と共同で行う博物館における子どもたちのフィールド活動－伊吹山で赤雪を探そう!, 日本雪氷学会, 富山
  8. 古川隆朗, 西山大陸, 竹内望, 2007/9/28 富山県・立山の融雪期の積雪面における不純物の特性と積雪面アルベド, 日本雪氷学会, 富山
  9. 竹内望, 角川咲江, 2007/9/27 伊吹山頂上付近の雪溪の雪氷藻類, 日本雪氷学会, 富山
  10. 永塚尚子, 中野孝教, 竹内望, 2007/9/27 アジアの氷河表面の汚れ物質のストロンチウム同位体比, 日本雪氷学会, 富山
  11. 石田依子, 竹内望, 2007/9/27 中国・天山山脈ウルムチ No. 1 氷河のアイスコア中の不純物の特性, 日本雪氷学会, 富山
  12. 竹内望, 李忠勤, 2007/9/26 中国天山ウルムチ NO. 1 氷河の表面汚れ物質の特性, 日本雪氷学会, 富山
  13. 竹内望, ほか, 2007/5/22 中国祁連山のアイスコアの分析から明らかになった中国乾燥域の近年の環境変動, 日本地球惑星科学連合同大会, 幕張
  14. Takeuchi, N., et al., 2006/11/21 Spatial distribution and abundance of snow algae on glaciers derived from a satellite image, 第29回極域気水圏・生物合同シンポジウム, 東京
  15. 竹内望, ほか, 2006/11/ 中国祁連山七一氷河の特殊な雪氷藻類群集と高い pH, 日本雪氷学会, 秋田
  16. 竹内望, 幸島司郎, 2006/5/17 氷河を解かす雪氷微生物: 生物的雪氷面アルベド低下効果の地域比較, 日本地球惑星科学連合同大会, 幕張

[図書] (計1件)

1. ヒマラヤと地球温暖化 消えゆく氷河 (2007), 共著, 昭和堂, 21-36, 109-130

[その他]

1. 博物館・西堀栄三郎記念探検の殿堂で, 雪氷生物についての子供向け講演, 実習 (滋賀県) 2008/4
2. ホームページにおける成果の公開 <http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/~takeuchi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 望 (Takeuchi Nozomu)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 30353452

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし