

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月17日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21681003

研究課題名（和文）近年の氷河変動が雪氷微生物群集に与える影響評価

研究課題名（英文）Effect of recent glacier change on microbial community on snow and ice

研究代表者

竹内 望（NOZOMU TAKEUCHI）

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30353452

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、近年世界各地で起きている氷河の縮小などの変化が、氷河上に生息する雪氷微生物群集に与える影響を評価することである。調査の結果、氷河上の微生物群集には様々な変化が表れていることがわかった。ヒマラヤやアラスカ、天山山脈の氷河では、氷河の後退に伴い微生物群集の高度分布が上流部へ移動していた。パタゴニアの氷河では大きな変化は見られなかった。北極圏の氷河では微生物相の変化にともなう表面の暗色化が起きていることが明らかになった。以上の結果は、今後の地球温暖化による雪氷圏の変化が、氷河生態系に大きな影響を与えることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：

This project aimed to evaluate the effect of recent changes of glaciers on microbial community on glacial surface worldwide. Field investigations revealed that the microbial community showed various changes depending on geographical regions. In Himalayas, Tianshan, and Alaskas, the altitudinal patterns of microbial distribution were shifted upward of glaciers probably due to retreat of terminus and equilibrium line by recent warming. In Patagonia, in the contrast, no significant change was observed. In Arctic region, the glacier surface has been revealed to be darkened due to increase of organic carbon derived from microbes. The continuous changes of glaciers and icesheets due to climate warming is likely to be a big impact on glacial ecosystems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

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：生態系影響評価

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、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。たとえば、雪氷上で光合成をおこなう雪氷藻類、その生産に支えられた昆虫、微小動物、バクテリアなどといった従属

栄養生物などである。これらの生物は、氷河上で食物連鎖を完結しており、氷河は一つの閉鎖的な生態系としてみる事ができる。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科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水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、雪氷融解を加速する効果があることなどである（e.g. Takeuchi et al. 2001）。

一方、近年雪氷圏は地球温暖化の影響と考えられる大きな変化が現れている。たとえば、世界各地で氷河の縮小が報告されている。とくに山岳氷河では縮小が顕著で、末端の後退、平衡線高度の上昇、氷厚の減少などが報告されている。これらの山岳氷河の質量の変化は、氷河の存在する地域の年平均気温や降水量の変化、またはそれらの季節の振幅やパターンの変化によるものと考えられている。その詳しいプロセスは実際には複雑であるが、地球温暖化等の地球規模の気候変動が各地域の気候条件に影響し氷河の縮小を引き起こしていると考えられている（IPCC,2007）。

また、氷河では質量収支のような物理的な条件だけでなく、雪氷の化学的な条件にも変化が起きていることが報告されている。工場排出物などの酸性物質が、大気を経由して氷河上に沈着し雪氷が酸性化している地域があることが報告されている。反対にアジアの山岳域などでは、人間の土地開発や気候変動による乾燥化が風送ダストの増加をまねき、その結果氷河表面へのダストの沈着量が増加し、雪氷のアルカリ化が進んでいることがわかっている（e.g. Lee et al. 2003）。

研究代表者は1990年代から、アジア、北米、南米の氷河で、雪氷微生物群集とくに雪氷藻類を中心に調査を行ってきた（研究業績参照）。各氷河には、数種から十数種の雪氷藻類が生息し、それらの群集構造は氷河上の物理条件によって異なることなどが明らかになっている。現在これらの調査からわずか数年から十数年しか経過していないが、各氷河ではすでに顕著な変化が起きていることが報告されている。たとえば、ネパールヒマラヤのヤラ氷河では、衛星画像による解析によると1997年から2008年の11年間で、100-200mも末端位置が後退している。

このような氷河の物理的・化学的条件の変化は、氷河上の生物群集に影響を与えている

にちがいない。氷河は地球温暖化等の気候変動の影響がもっとも顕著に現れる場所であり、氷河上の微生物群集は、もしかしたら地球上で気候変動の影響を最も受けやすい生物群集かもしれない。しかしながら、氷河環境の変化が、氷河表面の生物群集にどのような影響を与えているのかという情報はまだほとんどない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、近年世界各地で報告されている山岳氷河の縮小などの氷河の変化が、氷河上に生息する特殊な生物群集（雪氷生物）にどんな影響を与えているのかを明らかにすることである。そのために、申請者が過去15年の間に調査を行った世界各地の山岳氷河において、氷河表面の雪氷微生物の群集構造の再調査を行い、数年から十数年の氷河表面の微生物相の変化を明らかにする。さらにそれらの氷河の近年の質量収支の変化、雪氷中の化学成分の変化と比較し、まだほとんど情報のない氷河条件の変化が雪氷微生物に与えている影響を明らかにすることが最終目的である。

3. 研究の方法

本研究では、まずヒマラヤ、アラスカ、パタゴニア、中国の各氷河の野外調査を行い、微生物群集を含む氷河表面の雪または氷を採取し日本へ持ち帰る。採取した氷は、実験室で顕微鏡分析および分子生物学的手法による微生物の群集構造の分析、さらに雪氷中に含まれる溶存化学成分、有機物の分析などをおこなう。得られた結果は、申請者の過去に分析したデータおよび文献等と比較し、ここ十数年の微生物群集、氷河上の化学条件、物理条件の変化を詳細に記載し、氷河条件の変化が雪氷微生物に与えている影響を明らかにする。特に本研究では、地理的に離れた数カ所の氷河で調査をおこなうことにより、各地域の氷河変動と微生物変動の違いについても議論する。

4. 研究成果

本研究では、まずネパールヒマラヤの氷河の微生物群集の分析から行った。ネパールヒマラヤのヤラ氷河では1990年代以降調査が行われていなかったが、2008年に11年ぶりに調査が行われた。その調査で得られたサンプルの分析を行った。顕微鏡分析の結果、1990年代に報告された雪氷藻類はほぼ確認されたが、その高度分布は上流側へ約100m移動していた。これは、温暖化に伴う氷河の平衡線の上昇によって、氷河の氷環境に分布していた藻類が上流側に分布を広げたためと考えられる。さらに、氷河表面雪氷サンプル中の動物群集の分析を行い1996年との

比較を行った結果、クマムシ、ヒョウガユスリカ、ヒョウガソコミジンコの体長、個体数にも、氷河の場所によって変化があることが明らかになった。この動物群集の変化も、その餌となる藻類群集の変化の影響と考えられる。

次にアラスカの氷河の微生物群集の分析を行った。アラスカ山脈のグルカナ氷河では、2000年、2001年に引き続き、2008年に調査が行われた。さらに本研究では、2010年の夏に調査を行った。2008年および2010年の調査で得られたサンプルについて、まず顕微鏡による雪氷藻類群集の定量、表面不純物量の定量およびサンプルの溶存化学成分の分析を行った。得られた結果は、2000年および2001年の結果と比較し、近年の変化を明らかにすることを試みた。

2008年の藻類群集の分析の結果、バイオマス等の大きな変化は見られなかったが、末端域および上流域の群集構造の変化が見られた(図1)。化学成分には大きな変化はみられなかった。グルカナ氷河は質量収支がマイナスで縮小傾向が続いていることから、この藻類群集の変化は、氷河の末端の後退や雪線高度の上昇によるものであると考えられる。

2010年のグルカナ氷河の調査では、10年前に比べて氷河の縮小が目に見えて顕著であった。氷河表面の不純物量や有機物量の測定の結果、特に末端付近と中流部雪線付近で不純物量が増加していることが明らかになった。表面の藻類の分析の結果、末端付近と中流から上流部の群集構造の変化、およびバイオマスの変化がみられた(図1)。これは、氷河変動の影響が微生物群集に現れていることを示している。さらに、炭素窒素安定同位体比にも変化がみられた。これらの結果から、氷河上の生物化学的条件が過去10年で大きく変化していることが明らかになった。

2010年のアラスカの氷河の調査では、グルカナ氷河の他、南部のワーシントン氷河およびハーディング氷原でも調査を行った。両氷河とも同様に2000年から2001年にかけて調査を行った氷河である。調査の結果、両氷河とも末端および平衡線の後退が顕著であった。微生物群集の変化についても、グルカナ氷河同様、種構成には大きな変化はなかったが、分布域の変化が見られた。したがって、氷河の縮小とそれに伴う藻類群集の分布域の変化はアラスカ全体に見られる現象であると考えられる。

グルカナ氷河の試料では、氷河上の鉱物粒子の起源や微生物の栄養塩源を明らかにするためにSr-Nd安定同位体比の分析を行った。

その結果、氷河上に堆積した風送鉱物粒子も過去10年にわたって種類が変化していることが示唆された。また、氷河上の微生物も鉱物粒子からの物質を栄養塩として取り込んでいることが明らかとなり、このような風送物質の変化も氷河微生物群集に影響を与えていることが示唆された。

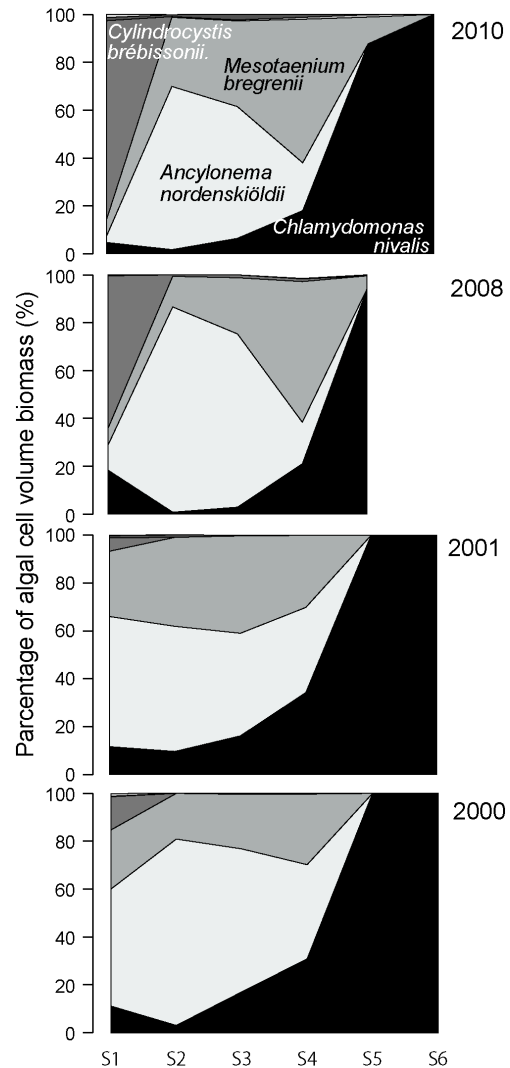


図1 アラスカ、グルカナ氷河の雪氷藻類群集構造の変化。横軸はサンプルを採取した6サイト。S1からS6にかけて標高が高くなる。

中央アジアの氷河の調査は、中国の天山山脈のウルムチ No. 1 氷河を中心におこなった。この氷河では、2006年より生物の調査を開始し、2007年にも調査を行っている。しかし、2008年および2009年は、中国の国内事情によって調査は行わなかった。本研究では、その後の2010年、11年、12年で調査を行った。調査では、標高別に6カ所で、微生物群集、クロロフィル、総汚染量、有機物量、溶存成分、炭素窒素安定同

位体比、遺伝子分析用の各サンプルの採取を行った。氷河の変化はそれほど大きくはないが、2006年から2012年にかけて徐々に末端や雪線が後退していることが確認できた。中でも2011年度は、例年になく融解が進んでおり、雪線が今までの中で最も高い位置にあった。

本研究での調査を含む過去6年間の氷河表面サンプルの分析の結果、クロロフィル濃度や表面アルベドには大きな変化はみられなかった。藻類群集は他の氷河とは異なりシアノバクテリアが優占し、緑藻が少ないのが天山山脈の氷河の特徴である。分析の結果、6年間で藻類群集に大きな変化はなく、氷河裸氷域ではどの年もシアノバクテリアが優占していた。ただし、末端付近および中流部雪線付近に、種構成の変化がみられた。これは、近年の気温上昇による雪線高度の後退および末端からの風送物質の変化によるものと考えられる。さらに、末端付近および中流部雪線付近の群集構造の変化は、アラスカやヒマラヤの氷河の変化とも共通しており、温暖化に伴う微生物群集の変化は、一般的に氷河の末端付近および中流部雪線付近にまず現れることが示唆された。

藻類群集の解析では、さらにシアノバクテリアが形成するクリオコナイト粒の分析も行った。ウルムチ No.1 氷河では、比較的サイズの大きなクリオコナイト粒が形成される。断面構造の解析の結果、クリオコナイト粒の内部には、はっきりとした成長の年層が見られ、その数から粒の寿命は3～7年であることがわかった。さらに粒は融合と崩壊を繰り返していることがわかった。粒構造そのものの経年変化は見られなかったが、藻類群集の変化はクリオコナイト粒の形成過程に影響を与え、その結果表面アルベドを大きく変化させる可能性があることがわかった。

融解水中の化学成分の分析の結果、年によって大きな違いはなかった。しかしながら、ウルムチ No.1 氷河では、カルシウムイオンが最も多く、さらに全化学主成分はどれも他の地域よりも非常に濃度が高いことが明らかになった。特に藻類の栄養塩となるアンモニウムイオンや硝酸イオンも濃度が高いことが明らかになった。このような化学条件がこの氷河の大きな藻類バイオマスさらにシアノバクテリアが優占する原因であると考えられる。このことは、風成塵等の氷河へ供給される物質の変化が、氷河上の微生物群集に大きく影響を与える可能性を示唆している。

2012年の3月に、南米パタゴニア氷床のチンダル氷河の調査が行われた。チンダル氷河は1999年の調査によって藻類群集の分布が明らかになっている。本研究では2

012年の調査で得られたサンプルの分析を行った。分析の結果、氷河表面には1999年同様の藻類が見られた。しかし、バイオマスやその分布には大きな変化は見られなかった。チンダル氷河でも他の地域同様に氷河の後退が明らかになっているが、流動速度が大きく、もともとのバイオマスも小さいことから、藻類群集や有機物量には大きな変化は見られなかったものと考えられる。

2011年および2012年には、氷河の微生物群集の地理的な比較を明らかにすることを目的に北極圏の氷河の調査を行った。ノルウェーのスバルバードの氷河は、英国 Aberystwyth 大学との共同研究で行った。この氷河は英国の研究者によって氷河の化学的データが測定されており、今回この科研費の枠組みでの微生物に関する調査を行った。スバルバードのロングヤビン氷河およびフォクスフォンナ氷河のニカ所で調査を行った。藻類群集の調査の結果、両氷河とも裸氷域には2種の緑藻類、積雪域には1種の緑藻類が優占していることが明らかになった。これらの藻類群集は、アラスカには近いがアジアのものとは全く異なるものであった。今後、スバルバードの氷河も定期的に調査を行い、微生物相の経年変動を見ていく計画である。

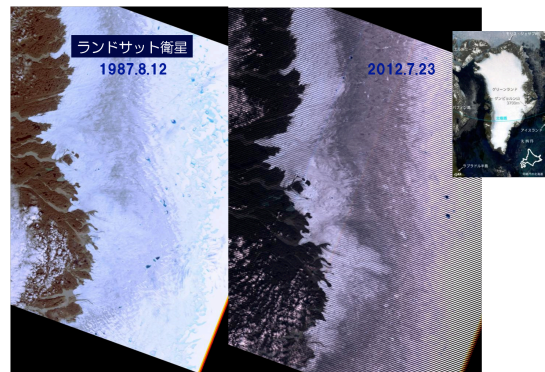


図2 グリーンランド氷床中西部の衛星画像の1987年と2012年の比較。表面が暗色化していることがわかった。この暗色化の原因は表面の微生物に由来する物質である。

2012年7月から8月にかけては、グリーンランド氷床の調査を行った。衛星画像の分析では、過去10年にわたってグリーンランド氷床の表面の反射率が大きく変化していることが明らかになった(図2)。今回の調査で得られた試料の分析の結果、反射率の変化の原因は雪氷微生物由来の有機物であることがわかった。この結果からとくにグリーンランド氷床では近年の氷河生態系の変化が大きく、反射率を介して融解にも影響している可能性が強く示唆された。今後とくにグリーンランド氷床の変化を監視し、その原

因を明らかにすることは特に重要な課題であると考えられる。

本研究の成果を広く公開するために、滋賀県の博物館、探検の殿堂の企画展として、本研究の成果を含めた氷河生物に関わる展示を2011年および2012年に行った。さらに2012年には広島県福山市でおこなわれた雪氷学会の一般向けイベントで、研究成果の紹介を行った。さらに研究成果は、日本惑星惑星連合大会、日本雪氷学会ほか AGU ほかの国際学会、シンポジウムでの発表を行った。成果は、学術論文として発表し、現在も一部投稿中である。

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11件)

①Takeuchi, N., Sakai, A., Kohshima, S., Fujita, K., and Nakawo, M. Variation in suspended sediment concentration of supraglacial lakes on debris-covered area of Lirung Glacier in Nepali Himalayas, *Global Environmental Research*, 査読有, 2012, 16, 96-104.

②Segawa, T., Takeuchi, N., Rivera, A., Yamada, A., Yoshimura, Y., Barcaza, G., Shinbori, K., Motoyama, H., Kohshima, S., Ushida, K., Distribution of antibiotic resistance genes in glacier environments, *Environmental Microbiology Reports*, 査読有, 2012, 5, 127-134, DOI: 10.1111/1758-2229.12011.

③Fujita, K., Takeuchi, N.ほか Favorable climatic regime for maintaining the present-day geometry of the Gregoriev Glacier, Inner Tien Shan, *The Cryosphere*, 査読有, 2011, 5, 539-549.

④ Takeuchi, N. Ushida, Y., Li, Z. Microscopic Analyses of Insoluble Particles in an Ice Core of Urumqi Glacier No. 1: Quantification of Mineral and Organic Particles, *Journal of Earth Science*, 査読有, 2011, 22, 431-440.

⑤ Takeuchi, N., Nishiyama, H., Li, Z. structure and formation process of cryoconite granules on Ürümqi glacier No. 1, Tien Shan, China. *Annals of Glaciology* 査読有, 2010, 51, 9-14

⑥Segawa, T., Takeuchi, N., Ushida, K., Kanda, H., Kohshima, S. Altitudinal Changes in a Bacterial Community on Gulkana Glacier in Alaska. *Microbes and Environments*, 査読有, 2010, 25, 171-182.

⑦Segawa, T., Takeuchi, N. Cyanobacterial communities on Qiyi Glacier in the Qilian Mountains of China. *Annals of Glaciology*, 査読有, 2010, 51, 153-162.

⑧Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Nakano, T., Kokado, E., Li, Z. Sr, Nd and Pb stable isotopes of surface dust on Ürümqi glacier No. 1 in western China. *Annals of Glaciology*, 査読有, 2010, 51, 95-105.

⑨Takeuchi, N., Miyake, T., Nakazawa, F., Narita, H., Fujita, K., Sakai, A., Nakawo, M., Fujii, Y., Duan, K., and Yao, T. A shallow ice core re-drilled on the Dunde Ice Cap, western China: recent changes in the Asian high mountains. *Environmental Research Letters*, 査読有, 2009, 4, 045207

⑩ Ushida, K., Inoue, R., Segawa, T., Kohshima, S., Takeuchi, N., Fukui, K., Li, Zhongqin, Kanda, H. Application of real-time PCR array to the multiple detection of antibiotic-resistant genes in glacier ice samples. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 査読有, 2009, 56, 43-52

⑪Takeuchi, N., Fujita, K., Nakazawa, F., Nakawo, M., and Rana, B. A snow algal community on the surface and in an ice core of Rikha-Samba Glacier in Western Nepali Himalayas. *Bulletin of Glaciological Research*, 査読有, 2009, 27, 25-35.

[学会発表] (計13件)

①竹内望, BIOGENIC IMPURITIES DARKENING THE GREENLAND ICESHEET, Third International Symposium on the Arctic Research (ISAR-3) (招待講演), 2013年01月14日~2013年01月15日, 東京都

②竹内望, Variations in carbon and nitrogen stable isotopes of cryoconite, American Geophysical Union fall meeting, 2012年12月02日~2012年12月06日, San Francisco, USA.

③竹内望, Tristrsm Irvine-Fynn, Arwyn Edwards, Andy Hodson, 北極圏スバルバード, ロングヤービン氷河およびフォックスフオンナ氷河の雪氷微生物群集と表面スペクトルアルベドへの影響, 雪氷研究大会, 2012年09月23日~2012年09月27日, 広島県福山市.

④竹内望, Color of glaciers observed from satellites, 日本惑星地球科学連合大会 (招待講演), 2012年05月20日~2012年05月25日, 千葉県千葉市.

⑤竹内望, アジア山岳氷河のマルチ安定同位体研究~環境変動と氷河生態系, 環境同位体シンポジウム (招待講演), 2011.9.30, 京都市.

⑥竹内望, ほか, アラスカ, グルカナ氷河の表面アルベドと不純物, 雪氷藻類群集の過去10年間の变化, 雪氷研究大会, 2011.9.20, 新潟県長岡市.

⑦Takeuchi, N., Asian glacier ecosystems: Biological study on Urumqi Glacier No.1, The Celebrations of 50th Anniversary of Tianshan Glaciological Station & Symposium on Science and Monitoring of Glaciers (invited), 2011.8.8, 中国新疆ウルムチ市.

⑧竹内望, ほか, 中央アジア天山グリゴレア氷帽アイスコアに記録された12,500年間の酸素安定同位体比の変動, 日本地球惑星連合大会, 2011.5.26, 千葉県千葉市

⑨竹内望, 藤田耕史, 的場澄人, 岡本祥子, Evgeny Podolskiy, Dylan Bodington, Vladimir Aizen, バミール・フェドチェンコ氷河, 2009年アイスコア掘削調査, 日本雪氷学会全国大会, 2010.9.29, 仙台市

⑩Takeuchi, N., Biogenic impurities in snow and ice and their effect on melting, Impurities in snow and ice workshop, 2010.6.21, Colorado, USA.

⑪竹内望, 石田依子, 兵藤不二夫, 中沢文男, 三宅隆之, 中国祁連山の山岳アイスコア中の有機物粒子と炭素安定同位体比, 日本地球惑星科学連合大会, 2010.5.28, 千葉市幕張

⑫竹内望, 石田依子, ネパールヒマラヤ, ヤラ氷河の1990年代から2008年代の雪氷生物群集の変化, 日本雪氷学会全国大会, 2009.10.1, 北海道札幌市

⑬竹内望, ほか, キルギスタングリコレア帽から掘削した87mアイスコア, 日本地球惑星科学連合2009大会, 2009.5.20, 千葉県千葉市

[図書] (計2件)

①中尾正義, 竹内望, ほか, 勉誠出版, オアシス地域の歴史と環境, 2011, 49-62.

②奈良間千之編, 竹内望, ほか, 臨川書店, 中央ユーラシア環境史, 2011, 15-85, 63-136.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

①博物館, 探検の殿堂での企画展, 「雪氷圏から見た地球環境」, 展示期間: 2012年4月28日~7月24日, 滋賀県

②博物館, 探検の殿堂での企画展, 「COP10 関連巡回展 滋賀発・生物多様性」, 展示期間: 2010年6月15日~7月11日, 滋賀県

③ホームページ,

<http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/~takeuchi>

/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 望 (NOZOMU TAKEUCHI)

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 30353452

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし