

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247078

研究課題名(和文) 氷河・氷床の暗色化のプロセスの解明

研究課題名(英文) Investigation of darkening process of glaciers and ice sheets

研究代表者

竹内 望 (Takeuchi, Nozomu)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：30353452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,500,000円

研究成果の概要(和文)：氷河や氷床の縮小の要因となる表面暗色化のプロセスを解明するための研究を行った。グリーンランド氷床の他、世界各地の氷河で採取した暗色物質の分析の結果、主に暗色の色素をもつ緑藻類と、鉱物粒子と微生物からなるクリオコナイトであることがわかった。氷河表面の微生物活動が関与する暗色化には、暗色の色素をもつ緑藻類の繁殖による場合と、クリオコナイト形成による場合の2種類があることが明らかになった。緑藻類による暗色化は、窒素供給および融解期間の長期化によって引き起こされているのに対し、クリオコナイトによる暗色化は、氷体内部からの鉱物粒子の供給とシアノバクテリアの繁殖が寄与している可能性が高いことがわかった。

研究成果の概要(英文)：We investigated the darkening processes of glaciers and ice sheets caused by light absorbing impurities on various glaciers in the Arctic and Asian high mountains, including Alaska, Suntar-Khayata (eastern Siberia), Svalbard, Greenland, Tianshan, and Pamir. Comparison of the algal communities and their darkening effect revealed that there are two processes to darken the glacial ice surface associated with algae. One is the darkening by the bloom of green algae with dark-colored pigments. Another is darkening by the cyanobacteria forming dark-colored cryoconite granules. The darkening observed on the studied glaciers was due to either one. For future work on the bio-albedo studies, we need to determine the environmental factors controlling the algal growth, to create a numerical model to reconstruct the algal temporal change, and to evaluate their quantitative impact on the melting based on a physical model of snow and ice albedo.

研究分野：雪氷生物学

キーワード：氷河 氷床 クリオコナイト 雪氷藻類 窒素循環 シアノバクテリア アルベド 地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

世界各地で氷河や氷床の縮小が観測されている。氷河や氷床は地球の水循環システムにおいて淡水の巨大なストックとしての役割をもち、その質量の減少は海水準の上昇や水資源の枯渇、気候温暖化の加速を引き起こし、人間社会へ大きな影響を及ぼす。氷河氷床の縮小の原因は、全球的な気温上昇いわゆる地球温暖化であると考えられている。

一方、近年になって氷河氷床の縮小の原因としてもう一つの要因が指摘されるようになった。それは、氷河表面の暗色化である。氷河表面が暗色化しアルベドが低下すると、日射の吸収が増加し融解が加速されるのである。

このような氷河表面の暗色化の原因は、雪氷中に含まれる不純物量の増加と考えられている。その不純物として一般に考えられているのは、氷河周辺や遠方の乾燥域から飛来する鉱物粒子、また化石燃料の燃焼や森林火災を起源とする黒色炭素である。しかしそれらだけではなく、氷河表面には雪氷表面に生息する雪氷微生物に由来する有機物が堆積していることも、明らかになってきた。雪氷微生物とは、雪氷環境に生息し低温環境に適応した微生物の総称で、シアノバクテリアや藻類などの光合成微生物や、有機物を分解する従属性のバクテリア等を含んでいる。これらの微生物は、氷河表面で自ら生成した有機物や鉱物粒子とともに暗色のクリオコナイトと呼ばれる集合体を形成する。このクリオコナイトが氷河表面に蓄積することによって氷河が暗色化し、融解を加速するのである。

これらの微生物活動に由来するクリオコナイトは、世界各地の氷河に共通に見られること、その量は微生物活動に関わる物理的、化学的条件によって決まること、さらに一般的地理分布として、低緯度のアジアの氷河で微生物バイオマスおよびクリオコナイト量が多く、アルベド低下が顕著であるのに対し、極域の氷河では微生物およびクリオコナイト量がともに少なく、アルベドへの影響は小さい。この観測事実をもとに前述のグリーンランド氷床の暗色化を考えると、従来アジアのような低緯度帯の氷河で見られていた現象が、近年になって急激に極域でも起きはじめたと見るができる。つまり、なんらかの地球環境の変化によって極域の氷河の生態系に変化が起き、その結果として有機物が大量に蓄積し暗色化しているのではないかと考えることができる。

2. 研究の目的

本研究では、まず現在極域の氷河を中心に現れている暗色化現象の実態を把握し、さらにその暗色化原因が氷河生態系の変化による有機物(クリオコナイト)の堆積量の増加であるという仮説をたて、それを氷河上の微生物過程および物質循環の分析によって検証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、近年暗色化が顕著に起きているグリーンランド氷床について、野外調査とサンプル分析から、その暗色化を定量的評価し、不純物の実態を明らかにする。さらに比較研究として、以前より暗色化しているアジア山岳域の天山・パミール山脈の氷河、暗色化がまだ起きていないアラスカの氷河についても同様に調査を行う。暗色化の原因については、地球温暖化による融解期間の長期化及び栄養塩類の供給量の変化が氷河生態系の変化を引き起こし、微生物活動が活発化したためという作業仮説を実証する形で進める。生態系評価のために各氷河上における炭素、窒素等の物質循環およびそれに関わる氷河上の微生物群集にどのような変化が起きているのかを、調査およびサンプルの微生物分析、化学分析、安定同位体分析から明らかにする。さらに防災科学技術研究所の低温実験室で、融解する際の氷表面の微構造、特に微生物にとって重要なクリオコナイトホルの維持機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) グリーンランド氷床の暗色化

2014, 2017年の夏季にグリーンランド氷床北西部および中西部の調査を行った。北西部の調査では、カナック氷河表面の暗色物質の電子顕微鏡等による解析の結果、鉱物粒子と微生物からなるクリオコナイトであることが明らかになった(図1)。不純物濃度の空間分布から、微生物活動だけでなく氷体内部から供給される鉱物粒子が暗色化に寄与していることが示唆された。鉱物粒子の供給量によって、クリオコナイトによって暗色化する表面と、緑藻類によって暗色化する表面があることが明らかになった。

氷河上の微生物の栄養塩となる窒素の循環を明らかにするために、融解水中の溶存硝酸の安定同位体比を分析した結果、氷河上の硝酸の供給源には人為起源と自然起源の2種類があり、季節によってそれぞれの供給が変動することが示唆された。

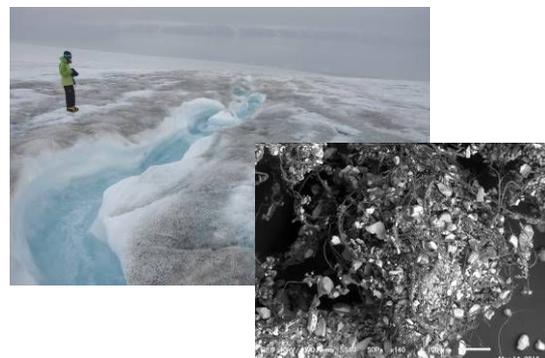


図1 グリーンランド氷床の暗色化した表面と暗色物質の電子顕微鏡写真

カナック氷河上の暗色バンドの成因を明

らかにするため、1m のアイスコア掘削を消耗域で行い、合計 39 本のコアを採取した。コアの分析の結果、表体内に含まれる不純物は平均で 2.6g/L で、その空間分布は暗色バンドと必ずしも一致しなかった。このことは、氷河の暗色域の形成には、単に氷体内の不純物の露出だけでなく、表面の微生物による濃縮プロセスが重要であることを示している。

(2) アラスカの氷河

2015年8月に米国アラスカのグルカナ氷河およびハーディング氷原の調査を行った。氷河表面のアルベド測定、表面不純物および雪氷のサンプリング等と予定通り行うことができた。調査の結果、グルカナ氷河は5年前の調査に比べて末端位置が約100m後退しており、どの氷河も目視で明らかなほど縮小していることがわかった。アルベド測定の結果は、5年前の調査に比べて顕著な暗色化が起きているわけでないことがわかった。一方、氷河上の雪氷藻類群集は、末端付近で群集構造が以前と異なっていた。これは近年の環境変化による氷河微生物への影響と考えられる。

(3) アジア山岳域天山・パミールの氷河

中国天山山脈ウルムチの氷河の調査について、2014-2017年8月から9月にかけて行った。毎年継続的に氷河不純物および生物、化学成分のデータを得ることができた。暗色物質のクリオコナイト粒の形成に關与するシアノバクテリアの群集の氷河上の空間分布を調べた結果、シアノバクテリアの種類によって分布に偏りがあり、暗色物質の空間分布に影響していることがわかった。さらに氷河サンプルの化学分析および安定同位体比分析の結果、特に窒素の供給源および循環過程がグリーンランドとは大きく異なり、氷河上で微生物による活発な硝化、脱窒が起きていることが明らかになった。このような氷河上の窒素循環がアジアと極域の暗色化の違いの要因となっている可能性が示唆された。

2016年7月から8月にかけては、パミール高原レーニン氷河の調査を行なった。レーニン氷河はキルギス共和国の7000m級の山が連なるパミールアライ山系に位置し、比較的大きな山岳氷河が発達している。レーニン氷河消耗域の4000m付近の裸氷域で雪氷サンプルを採取し、表面不純物の定量、構成物の分析を行った。その結果、表面不純物量は平均380g/m²に達し、先行研究で明らかになっているアジア山岳域の天山やヒマラヤに匹敵する量であることが明らかになった。不純物構成の分析の結果、鉱物粒子の他、有機物が乾燥重量で8%含まれていることがわかった。さらに氷河表面には、特徴的な赤い氷がパッチ上に分布しており、これは赤い色素をもった緑藻類によるものであることがわかった。パミール山域の気候は、アジアモンスーンよりも偏西風の影響が強いアジアの中でも特

有の特徴をもつが、氷河は他のアジア地域同様に、鉱物粒子と微生物生産物による暗色化が強く進行していることが明らかになった。

(4) 氷融解の低温室実験

雪氷防災研究所の低温実験室にて2015年から2017年にかけて3回にわたって氷河表面構造に關わる実験を行った(図2)。市販氷とグリーンランドで採取した不純物を用いて融解実験を行った結果、細かい不純物粒子はすぐに融解水によって氷表面から流出してしまうのに対し、微生物による不純物の集合体が形成している場合は、流出しないで留まることができたことから、この集合体の形成が氷河の暗色化のために重要な条件あることがわかった。

さらに氷河の消耗域表面で形成されるクリオコナイトホールの作成実験を行った。温度条件、日射条件、風速条件を変えて、クリオコナイトホールの変化についてのデータを得ることができた。その結果、条件に応じてホールの発達に変化したものの、実験開始後2時間ほどでホール内の水が流出し、実際の氷河上でみられるようなホールが維持されなかった。そこで、従来用いていた市販の氷ではなく、南極の氷山氷を用いた結果、ホール内の水が流出することなく20時間以上にわたって形が維持された。実験結果の解析を進めた結果、ホールの形成、維持には氷の結晶構造が強く關与していることがわかった。これは氷河の暗色化には氷の結晶の大きさや形といった要因も考慮する必要があることを示している。



図2 低温実験室でのクリオコナイトホール形成実験と形成したホール。

(5) その他の観測と分析

暗色化の原因となる雪氷微生物の詳細な生態を理解するため、日本国内の立山、苗場山および月山で、赤雪、緑雪現象の調査をおこなった。2015年には立山で例年にない大規模な赤雪現象がみられた。これは融解期初期(5月)の急激な温度上昇による融解が原因であることが示唆された。月山の調査では、雪氷藻類の繁殖量や繁殖開始のタイミングは積雪へ供給されるリン濃度と強い關連があることが明らかになった。

各地の氷河で得られた微生物のDNA分析によって、暗色物質の形成に關わる氷河上のシアノバクテリアの分類、系統が明らかになった。さらに緑藻類のDNA分析の結果、全球的

に分散している種と地域内に分散が限られる種が存在することが明らかになった。

以上の調査、分析から、氷河暗色化に関わる不純物の起源、濃縮、それに関与する微生物の繁殖過程が明らかになった。一方、微生物繁殖の定量的理解のためには、栄養塩となる窒素循環の把握、氷河水の物理構造の理解が重要であることがわかった。以上の成果は、下記の論文、学会で発表するとともに、2018年3月に京都で開催された雪氷圏と生物圏の国際シンポジウム(国際雪氷学会)を主催し、各国の氷河微生物と暗色化に関わる研究者と情報交換、議論を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計35件)すべて査読有

1. Zawierucha, K., Stec, D., Lachowska-Cierlik, D., Takeuchi, N., Li, Z. and Michalczyk, L., (2018) High Mitochondrial Diversity in a New Water Bear Species (Tardigrada: Eutardigrada) from Mountain Glaciers in Central Asia, with the Erection of a New Genus *Cryoconicus*. *Ann. Zoolog.*, 68(1), 179-201, doi:10.3161/00034541ANZ2018.68.1.007
2. Segawa, T., Takeuchi, N., 他4名 (2018) Demographic analysis of cyanobacteria based on the mutation rates estimated from an ancient ice core. *Heredity*, 1, doi:10.1038/s41437-017-0040-3
3. Segawa, T., 他9名 Takeuchi, N. (10番目) (2017) Biogeography of cryoconite forming cyanobacteria on polar and Asian glaciers. *J. Biogeography*, 44(12), 2849-2861, doi:10.1111/jbi.13089
4. Zhang, X., Wang, S., Zhang, X., Zhou, P., Jin, S., Li, Z. and Takeuchi, N. (2017) Chemistry and environmental significance of aerosols collected in the eastern Tianshan. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 9(5), 455-466. doi:10.3724/SP.J.1226.2017.00455
5. Zhang, X., Li, Z., Takeuchi, N., Wang, F., Wang, S., You, X. and Zhou, P. (2017) Heavy metal-polluted aerosols collected at a rural site, Northwest China. *Journal of Earth Science*, 28(3), 535-544. doi:10.1007/s12583-017-0728-6
6. Murakami, T., Segawa, T., Dial, R., Takeuchi, N., Kohshima, S. and Hongoh, Y., (2017) Bacterial Microbiota Associated with the Glacier Ice Worm Is Dominated by Both Worm-Specific and Glacier-Derived Facultative Lineages. *Microbes and environments*, 32(1), 32-39. doi: 10.1264/jsme2.ME16158
7. Zhang, Y., 他5名, Takeuchi, N. (6番目) (2017) Surface mass balance on Glacier No. 31 in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, from 1951 to 2014. *J. Mount. Sci*, 14(3):501-512, doi:0.1007/s11629-016-3967-6
8. Iizuka, Y., 他11名 Yamaguchi, S. (10番目), Takeuchi, N. (12番目) (2017) A Firn Densification Process in the High Accumulation Dome of Southeastern Greenland. *Arc. Antarc. Alp. Res.* 49(1):13-27. doi: 10.1657/AAAR0016-034
9. 中島智美, 竹内望 (2017) 富山県立山の融雪期に現れる雪氷藻類による赤雪の多様な色素構成, 79(6), 549-563
10. 竹内望 (2017) 北極域氷河の雪氷藻類群集と暗色化, *低温科学*, 75, 53-65
11. Nagatsuka N, Takeuchi N., Uetake J, Shimada R, Onuma Y, Tanaka S and Nakano T (2016) Variations in Sr and Nd isotopic ratios of mineral particles in cryoconite in western Greenland. *Front. Earth Sci.* 4:93. doi: 10.3389/feart.2016.00093
12. Onuma, Y., Takeuchi, N., Takeuchi, Y. (2016) Temporal changes in snow algal abundance on surface snow in Tohkamachi, Japan, *Bulletin of Glaciological Research*, 34, 21-31, doi: 10.5331/bgr.16A02
13. Shirakawa, T., 他15名, Takeuchi, N. (11番目) (2016) Meteorological and glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, east Siberia, from 2012-2014, *Bull. Glaciol. Res.*, 34, 33-40, doi: 10.5331/bgr.16R01
14. Gokul, J. K., 他9名, Takeuchi, N. (7番目) (2016) Taxon interactions control the distributions of cryoconite bacteria colonizing a High Arctic ice cap. *Mol Ecol*, 25: 3752-3767, doi:10.1111/mec.13715
15. Uetake, J., Tanaka, S., Segawa, T., Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Motoyama, H., Aoki, T. (2016) Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland, *FEMS Microbiol. Ecol.* Sep 2016, 92 (9) fiw127, doi: 10.1093/femsec/fiw127
16. Shimada, R., Takeuchi, N. and Aoki,

- T. (2016) Inter-annual and geographical variations in the extent of bare ice and dark ice on the Greenland ice sheet derived from MODIS satellite images, *Front. Earth Sci.* doi: 10.3389/feart.2016.00043
17. Aizen, E. M., Aizen, V.B., Takeuchi, N., 他 8 名 (2016) Abrupt and moderate climate changes in the mid-latitudes of Asia during the Holocene. *J. Glaciol.*, doi:10.1017/jog.2016.34
18. Tanaka, S., Takeuchi, N., 他 12 名 (2016) Snow algal communities on glaciers in the Suntar-Khayata Mountain Range in eastern Siberia, Russia. *Pol. Sci.* doi:10.1016/j.polar.2016.03.004
19. Musilova, M., Tranter, M., Bamber, J.L., Takeuchi, N., Anesio, AM. (2016) Experimental evidence that microbial activity lowers the albedo of glaciers. *Geochem. Pers. Lett.*, 2, 106-116, doi: 10.7185/geochemlet.1611
20. 島田利元, 竹内望, 青木輝夫 (2016) 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*, 78(6), 391-399
21. 瀬川高弘, 竹内望 (2016) 氷河・積雪上の微生物の生態, *日本微生物生態学会誌*, 31(2), 57-64
22. Takeuchi, N., 他 9 名 (2015) The Effect of Impurities on the Surface Melt of a Glacier in the Suntar-Khayata Mountain Range, Russian Siberia. *Front. Earth Sci.*, 3:82. doi:10.3389/feart.2015.00082
23. Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N. and Irvine-Fynn, T. (2015) Cryoconite The dark biological secret of the cryosphere. *Prog. Phys. Geograph.*, 40(1), 66-111. doi:10.1177/0309133315616574
24. Bültmann, H., 他 10 名, Takeuchi, N. (11 番目) (2015) Validations and descriptions of European syntaxa of vegetation dominated by lichens, bryophytes and algae. *Lazaroa*, 36, 107-129, doi:10.5209/rev_LAZA.2015.v36.51255
25. Murakami, T., Segawa, T., Bodington, D., Dial, R., Takeuchi, N., Kohshima, S., and Hongoh, Y. (2015) Census of bacterial microbiota associated with the glacier ice worm *Mesenchytraeus solifugus*. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 91, fiv003, doi:10.1093/femsec/fiv003
26. Grigholm, B., 他 11 名, N. Takeuchi (9 番目) (2015) 20th Century Dust Lows and the Weakening of the Westerly Winds over the Tibetan Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, 42(7), 2434-2441. doi: 10.1002/2015GL063217
27. 永塚尚子, 竹内望, 植竹淳 (2015) グリーンランド氷床の生物学的研究, *月刊地球*, 37(3), 72-82
28. Zawierucha, K., Kolicka, M., Takeuchi, N., and Kaczmarek, L. (2014) What animals can live in cryoconite holes? A faunal review. *J. Zoology*, 295(3), 159-169. DOI: 10.1111/jzo.12195
29. Takeuchi, N., 他 7 名 (2014) Disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene. *Quat. Sci. Rev.*, 103, 26-33. doi:10.1016/j.quascirev.2014.09.006
30. Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J., and Shimada, R. (2014) Mineralogical composition of cryoconite on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32(0), 107-114. doi:10.5331/bgr.32.107
31. Aoki, T., Matoba, S., Uetake, J., Takeuchi, N., and Motoyama, H. (2014) Field activities of the "Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic" (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bull. Glaciol. Res.*, 32(0), 3-20, doi: 10.5331/bgr.32.3
32. Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., and Shimada, R. (2014) Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32(0), 85-94, doi: 10.5331/bgr.32.85
33. Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Nakano, T., Shin, K., and Kokado, E. (2014) Geographical variations in Sr and Nd isotopic ratios of cryoconite on Asian glaciers. *Env. Res. Lett.*, 9(4), 045007, doi:10.1088/1748-9326/9/4/045007
34. Segawa, T., Ishii, S., Ohte, N., Akiyoshi, A., Yamada, A., Maruyama, F., Li, Z., Hongoh, Y. and Takeuchi, N. (2014) The nitrogen cycle in cryoconites: naturally occurring nitrification-denitrification granules on a glacier. *Env. Microbiol.* doi: 10.1111/1462-2920.12543

35. 竹内望 (2014) アジア山岳域の氷河生態系, 雪氷, 76(1), 91-103.

〔学会発表〕(計 13 件)

1. Takeuchi, N. et al, Artificial cryoconite holes created in a cryospheric environmental simulator, International Symposium on Cryosphere and Biosphere, 2018.3, Kyoto

2. 竹内望, 他 3 名, アラスカ中部・グルカナ氷河の雪氷藻類群集の近年の変化, 雪氷研究大会, 2017.9.20-5.25, 十日町市

3. 竹内望, 他 7 名, 2016 年中央アジア・パミール山域レーニン峰アイスコア掘削報告, 日本地球惑星連合大会, 2017.5, 千葉市

4. 竹内望, 榊龍太郎, 岡本智夏, 山口悟, 伊藤陽一, 望月重人, 雪氷防災実験棟におけるクリオコナイトホルの作成実験 その 2, 雪氷研究大会, 2016.9, 名古屋市

5. Takeuchi, N., N. Ote, T. Segawa, J. Uetake, N. Nagatsuka, Z. LI, Distinctive Nitrogen Cycles between Asian and Polar Glaciers, Goldschmid conf., 2016.6, Yokohama

6. 竹内望, 大手信人, 他 4 名, グリーンランド北西部の氷河雪氷中の窒素の起源と表面微生物への影響, 日本地球惑星連合大会, 2016.5, 千葉市

7. Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Nakano, T., Ohte, N., Onuma, Y., Tanaka, S., Uetake, J. Multi isotope approach to dynamics of impurities in snow and ice on the Greenland Ice Sheet IUGG, 2015.6.25, Prague

8. 竹内望, 永塚尚子, 植竹淳, 田中聡太, 大沼友貴彦, 島田利元, グリーンランド氷床クリオコナイトの構成物および形態の空間分布, 雪氷研究大会, 2015.9, 松本市

9. 中島智美, 竹内望, 植竹淳, 瀬川高弘, 他 3 名, 富山県立山における雪氷藻類の色素の時間的空間的多様性, 雪氷研究大会, 2015.9, 松本市

10. 大沼友貴彦, 竹内望, 他 5 名, 北極圏グリーンランドカナック氷帽の積雪観測に基づいた雪氷藻類の繁殖条件の推定, 日本地球惑星連合大会, 2015.5, 千葉市

11. 竹内望, 大手信人, 藤田耕史, Aizen Vladimir, 天山山脈グリゴレア氷帽アイスコア中の硝酸体窒素および酸素の安定同位体

比, 日本地球惑星連合大会, 2015.5, 千葉市

12. 竹内望, 他 3 名, 三次元トモグラフィーによる赤雪中の藻類細胞分布の観察, 雪氷研究大会, 2014.9, 八戸市

13. 竹内望, 氷河・氷床の生物地球化学 - 雪氷微生物による氷河の暗色化と物質循環, 日本地球惑星連合大会, 2014.4, 千葉市

〔図書〕(計 2 件)

1. 竹内望ほか (2016) 日本雪氷学会編, みんなが知りたいシリーズ 2, 雪と氷の疑問 60, 成山堂書店, 193 (11-15)

2. 竹内望ほか, 河村公隆他編 (2016) 低温環境の科学辞典, 朝倉書店, 411 (41-44)

〔その他〕

ホームページ等

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

竹内望 (2016) 赤雪 (不思議な自然現象), 岳人, 3 月号, 48-49.

竹内望 (2016) 地球温暖化とグリーンランド北極圏氷河の融解, 善隣, 11 月号, 473, 11-19.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

大手 信人 (Ohte, Nobuhito)
京都大学・情報学研究科・助教授
研究者番号: 10233199

(3) 研究分担者

中野 孝教 (NAKANO, Takanori)
早稲田大学・理工学術院・客員教授
研究者番号: 20155782

(4) 研究分担者

山口 悟 (YAMAGUCHI, Satoru)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・
観測予測研究領域 雪氷防災研究センター・
主任研究員
研究者番号: 70425510

(5) 研究分担者

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