

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：62611

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16120

研究課題名(和文)北極域の氷河の融解縮小を加速する氷河暗色化メカニズムの解明

研究課題名(英文)Understanding the process of dark ice expansion on glaciers in the Arctic region

研究代表者

永塚 尚子(Nagatsuka, Naoko)

国立極地研究所・研究教育系・研究員

研究者番号：30733208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では近年急速に拡大する北極域の氷河氷床表面の暗色化現象に注目し、その原因とされる暗色不純物(鉱物と微生物)および黒色炭素(煤)を分析した。その結果、グリーンランド北西部では周辺の堆積物に由来する鉱物が氷河表面の暗色化に大きく寄与しており、日射の吸収を通じて氷河の融解を促進している可能性を明らかにした。さらに、電子顕微鏡観察の結果から、北極広域積雪中の黒色炭素観察の形態情報はじめて明らかにし、その起源・輸送プロセスや光吸収特性が地域によって異なる可能性を示した。以上、本研究の成果から、氷河上の暗色物質の供給プロセスおよび暗色化拡大メカニズム解明の理解が進むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to better understand the dark ice expansion on glaciers in the Arctic, we analyzed dark-colored surface dust (minerals and glacial microbes) and black carbon. Based on our analysis, a major contributor to the dark ice surface of glaciers in northwestern Greenland is likely to be minerals derived from surrounding moraines and englacial dust that was deposited in the past in the accumulation area, traveled through the ice sheet, and outcropped again in the ablation zone, which can accelerate glacial melting by reducing the surface albedo. Furthermore, the Scanning Electron Microscope analysis revealed that there are spatial variations in the morphology of black carbon in the Arctic snow, which can effect on their light absorption, showed large variation among the region.

研究分野：雪氷学

キーワード：氷床・氷河の暗色化 氷床・氷河上の不純物 氷床・氷河融解 黒色炭素 北極 グリーンランド Sr-Nd同位体比

1. 研究開始当初の背景

近年、グリーンランドをはじめとする北極域の氷床・氷河において急速な表面の暗色化が報告されている。暗色化に伴う雪表面アルベドの低下は、氷床・氷河の融解を促進させ、質量収支に影響を及ぼす重要な要因の一つである。この暗色化の原因としては、黒色炭素による積雪汚染や、鉱物粒子と氷河上微生物に由来する不純物（クリオコナイト）の増加などが考えられる。とくに、近年の地球環境変動に伴うクリオコナイトの構成物（鉱物と有機物）の供給源や供給量の変化が氷河上のクリオコナイト量を増加させ、表面の暗色化を引き起こしている可能性があることが申請者のこれまでの研究から示唆されていたが、しかしながら、その具体的なプロセスについてはまだほとんど明らかになっていなかった。また、雪氷中の黒色炭素に関しても濃度の変動を明らかにした研究は行われているが、その起源や光学的特性を明らかにするうえで重要となる粒径や構造、表面成分について実際に観察された例はほとんどなかった。

2. 研究の目的

北極域の氷河暗色化に対するクリオコナイトと黒色炭素の影響を評価し、その原因と暗色化のメカニズムを解明するために、本研究では、北極域雪氷圏における暗色物質（クリオコナイト、黒色炭素）の物理化学的分析からその起源、動態、形成過程を明らかにすることを目的とした。そのため、(1) まず近年暗色化が顕著に起きているグリーンランド氷床沿岸域で採取されたクリオコナイトの重金属分析を行い、その起源や形成過程について明らかにすることとした。また、(2) 氷床内陸域の積雪から採取された不純物についても同様に分析を行い、氷床上の場所による起源の違いについても考察することとした。(3) さらに、氷河暗色化のもう一つの要因として考えられる黒色炭素の特性を理解するため、アラスカの積雪中の黒色炭素の物理化学的分析を行い、その起源や形成過程について明らかにすることとした。

3. 研究の方法

(1) グリーンランド北西部沿岸域の氷河表面暗色域で採取されたクリオコナイトに含まれる鉱物と有機物の Sr (ストロンチウム)-Nd (ネオジム) 同位体分析を行った。これらの同位体比の分析によって、鉱物成分の値からはその動態を、有機物成分の値からはその起源に加えて氷河上の微生物の栄養塩源となる鉱物の種類を推定した。

(2) 鉱物起源の空間分布を明らかにするために、グリーンランド氷床東部内陸域の積雪に含まれる鉱物ダストの Sr-Nd 同位体比を分析し、北西部に堆積するダストの値と比較した。

(3) 黒色炭素についてはその形態と光学的特性について明らかにするために、走査型電

子顕微鏡 (SEM) を用いた構造観察、およびエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) を用いた表面成分の同定を行った。これまでに、SEM を用いて積雪試料中の黒色炭素が観察された例がほとんどなかったことから、まず、積雪試料中から黒色炭素を取り出すための手法を確立させ、さらに SEM 観察を行うための前処理の方法についても確立させた。

4. 研究成果

(1) 2012-2014 年にグリーンランド西部沿岸域の複数の氷河上で採取されたクリオコナイトに含まれる鉱物成分の Sr と Nd の同位体比を分析した結果、同位体比は各氷河周辺の堆積物に近い値を示し、先行研究において起源と示唆されるアジアの砂漠とは著しく異なる値を示した。さらに、北西部のカナック氷河では同位体比は氷河の標高によっても異なり、上流域では氷河周辺に堆積するモレーンに近い値を示したのに対し、中流域では氷体内から供給されたダスト（過去に氷河上流域表面に堆積したものが、氷の流動とともに氷体内部を通過して下流域へと運ばれ、表面融解によって露出したもの）に近くなった (図 1)。これらのことから、①各氷河上に堆積する鉱物は遠方の砂漠から供給された風成塵ではなく、②それぞれの氷河周辺の地質から供給されたものであること、③その供給源は複数存在し、それは氷河周辺のモレーンと氷体内部からのダストであることが明らかになった。さらに、カナック氷河では中流域で特に表面の暗色化が著しいことから、氷河表面の暗色域の形成には氷体内ダストの寄与が大きく影響していることがはじめて明らかになった (Nagatsuka et al., 2016)。以上の成果によって、まだその詳細がほとんど明らかになっていないクリオコナイトの暗色化拡大メカニズムの理解が進み、今後の氷河変動の予測精度向上のための大きな成果となることが期待される。

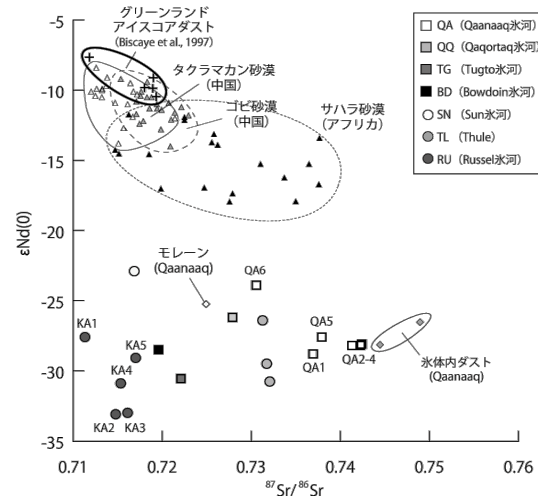


図 1. グリーンランド北西部の氷河上クリオコナイト、および氷河周辺モレーン、氷体内ダスト、アジアの砂漠の砂に含まれる鉱物の Sr-Nd 同位体比の比較

(2) 2015-2016年にグリーンランド北東部および南東部の標高約3000m地点の氷床内陸域表面で採取された積雪サンプルに含まれる鉱物粒子のSr-Nd同位体比を測定した。分析の結果、東部の鉱物ダストは北西部のものに比べて低いSrと高いNd同位体比を示し、また、先行研究で寄与の可能性が示されてきたアジアやアフリカの砂漠ではなく、グリーンランド東部沿岸域の土壌堆積物に近い値を示した。このことから、東部内陸域の氷床上ダストは北西部沿岸域とは異なる起源から供給されており、それは氷床末端周辺の堆積物であることが明らかになった。この結果から、今後さらなる温暖化の影響を受けて氷床の後退が進み、地表面の露出面積が拡大すれば、内陸域の氷床表面でも不純物によるアルbedo低下効果が大きくなる可能性があることが示唆された。

(3) 黒色炭素に関しては、まずデンマーク工科大学のRamona Mateiu氏との共同研究を通じて走査型電子顕微鏡を用いた積雪中の黒色炭素観察手法の開発および観察を行った。その結果、積雪中（融解済）の黒色炭素粒子の構造をより明瞭に観察するためには、網目状のカーボン支持膜で構成される顕微鏡観察用マイクログリッドを使用して試料台基盤上の汚れを排除し、その上にサンプルを乗せて蒸発させ、観察を行う方法が適していることがわかった。

その後、黒色炭素の粒径、面積、真円度など、その形態に注目してアラスカの広域積雪に含まれる微粒子を観察したところ、サンプル中にはいずれも直径30-40nmの同サイズの球形粒子で構成された鎖状体構造を持つ粒子と凝集体構造を持つ粒子が含まれており、それらは主にカーボンで構成されていた(図2)。これは、先行研究で報告されている黒色炭素粒子の構造に一致することから、本研究で観察されたこれらの粒子も黒色炭素であると考えられる(Adachi and Buseck, 2013)。しかしながら、その粒径や形態は地域によって大きく異なっていた。例えば北部のプルドーベイでは南部のフェアバンクスやアンカレッジに比べて粒径が小さく鎖状体の構造を持つ粒子が多く含まれていることがわかった。化石燃料燃焼由来の黒色炭素は、森林火災起源のものに比べて粒径が小さいこと、また排出直後のものは鎖状体構造をもつことがこれまでの研究で示されていることから、この北部の黒色炭素は、プルドーベイ近隣に位置する油田から排出されたものであると考えられる。さらに、北極域広域の黒色炭素の特性の違いを明らかにするため、グリーンランドの積雪中の黒色炭素についても同様に観察を行ったところ、グリーンランドの黒色炭素はアラスカに比べて鎖状体構造を持つ粒子が多く、硫酸塩などの他の大気エアロゾルの吸着や混合などのプロセスをほとんど受けていないことがわかった。

以上、本研究の成果から北極域各地の積雪に

含まれる黒色炭素の形態情報がはじめて明らかになり、その起源あるいは輸送プロセスが地域によって異なることが示唆された。このような黒色炭素の形態の違いはその光学特性に影響を与え、さらに氷河表面のアルbedo低下効果にも影響を及ぼす可能性があることから、クリオコナイトとともに今後の氷河暗色化を理解する上での重要な成果となり、その社会的意義は大きい。これらの成果は現在論文としてまとめており、投稿準備中である。

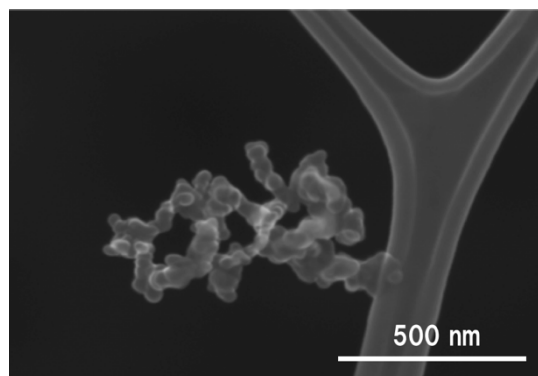


図2. アラスカの積雪サンプルの中で観察された鎖状体構造を持つ黒色炭素粒子

#### <引用文献>

- ① Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J., Shimada, R., Onuma, Y., Tanaka, S. and Nakano, T., Variations in Sr and Nd Isotopic Ratios of Mineral Particles in Cryoconite in Western Greenland, *Frontiers in Earth Science*, 査読有, 4 (93), 2016, 1-11.
- ② Adachi, K. and Buseck, P. R., Changes of ns-soot mixing states and shapes in an urban area during CalNex, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES*, 118, 3723-3730.

#### 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 4 件)

- ① Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M. and Aoki, T., Observations and modelling of algal growth on a snowpack in northwest Greenland, *The Cryosphere*, 査読有, 2018 (accepted)
- ② Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J., Shimada, R., Onuma, Y., Tanaka, S. and Nakano, T., Variations in Sr and Nd Isotopic Ratios of Mineral Particles in Cryoconite in Western Greenland, *Frontiers in Earth Science*, 査読有, 4 (93), 2016, 1-11

- DOI: 10.3389/feart.2016.00093
- ③ Uetake, J., Tanaka, S., Segawa, T., Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Hideaki, M., Aoki, T., Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland, FEMS microbiology ecology, 査読有, 92 (9), 2016, 1-10  
DOI: 10.1093/femsec/fiw127
- ④ 永塚尚子, 竹内望, 植竹淳, グリーンランド氷床の生物学的研究, 月刊地球, 査読無, 37(3), 2015, 72-82  
http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201502214889687532

[学会発表] (計 1 2 件)

- ① Naoko Nagatsuka, 他, Sr and Nd isotope ratios of cryoconite in western Greenland: identification of sources and the process of transportation of minerals on the dark-colored ice, International Symposium on Cryosphere and Biosphere (Kyoto), 2018
- ② 永塚尚子, 他, グリーンランド氷床北西部 SIGMA-D アイスコア中の鉱物組成変動, 雪氷研究大会 (十日町), 2017
- ③ 永塚尚子, 他, Sr-Nd 同位体比から明らかになったグリーンランド西部沿岸域の氷河上クリオコナイトに含まれる鉱物の起源, 日本地球惑星科学連合大会 (千葉), 2017
- ④ 永塚尚子, 他, グリーンランド氷床北西部 SIGMA-D アイスコア中の鉱物組成変動, 第 6 回極域科学シンポジウム (東京), 2016
- ⑤ 永塚尚子, 他, グリーンランド氷床北西部 SIGMA-D アイスコア中の鉱物組成変動, 雪氷研究大会 (名古屋), 2016
- ⑥ 永塚尚子, 他, 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた北極域の積雪に含まれる黒色炭素の形態観察, 日本地球惑星科学連合大会 (千葉), 2016
- ⑦ Naoko Nagatsuka, 他, Variations in Sr and Nd isotopic ratio of dust in Arctic snow, International partnerships in ice core sciences (Hobart, Australia), 2016
- ⑧ 永塚尚子, 他, Sr-Nd 同位体比を用いた北極域の積雪中ダストの供給源推定, 第 5 回同位体環境学シンポジウム (京都), 2015
- ⑨ 永塚尚子, 他, Sr-Nd 同位体比を用いた北極域の積雪中ダストの供給源推定, 第 5 回極域科学シンポジウム (東京), 2015
- ⑩ 永塚尚子, 他, 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた北極域の積雪に含まれる黒色炭素の形態観察, 日本雪氷学会雪氷研究大会 (松本), 2015
- ⑪ Naoko Nagatsuka, 他, Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis of

- black carbon in Arctic snow, IUGG General Assembly (Prague, Czech), 2015
- ⑫ Naoko Nagatsuka, 他, Geographical Variations in Sr - Nd isotopic ratios of mineral dust in Arctic Snow, ASSW2015/ISAR-4 (富山), 2015

[図書] (計 2 件)

- ① 永塚尚子, 他, 朝倉書店, 低温環境の科学事典, 2016, 293-294
- ② 永塚尚子, 他, 古今書院, 女も男もフィールドへ, 2016, 29-45

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

アウトリーチ活動

- ①立川市教育委員会 たちかわ市民交流大学 講師「黒く汚れる北極の氷河」2017年2月8日
- ②東京外国語大学若手研究者キャリア形成支援セミナー講師「フィールド研究者のライフイベントのあり方」2017年12月21日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永塚 尚子 (NAGATSUKA, Naoko)  
国立極地研究所・研究教育系・日本学術振興会特別研究員 PD  
研究者番号: 30733208

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

Mateiu Ramona (Mateiu Ramona)