

令和 2 年 11 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K12590

研究課題名(和文) 雪氷上に存在する不純物中の各成分が表面アルベドへ影響する割合の評価

研究課題名(英文) The effect of impurities for surface albedo on snow and ice

研究代表者

紺屋 恵子 (Konya, Keiko)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・技術研究員

研究者番号：70506419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：2017年にアラスカ山脈の3つの氷河上6地点にて採取した積雪サンプル中のブラックカーボン(BC)質量濃度を分析した。サンプル氷河表面0-2cm深と2-10cm深から採取し、分析計SP2 (Single-Particle Soot Photometer)を用いて、質量濃度の粒径分布を計測した。雪中BCは平均質量濃度が0-2cm深で1-6 $\mu\text{g/L}$ 、2-10cm深で0.5-3 $\mu\text{g/L}$ で、アラスカでのバックグラウンドレベルと考えられる。本研究では、標高や緯度経度などサンプル採取場所による系統的な違いは見られなかった。また、同積雪サンプル中に含まれる全不純物量のうちBCは約0.5%であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックカーボンは大気中では温暖化促進の効果を示す物質である。積雪上では太陽光を吸収し、融雪を促進する効果があると言われている。温暖化が進行している北極域の氷河上にてブラックカーボンの影響を見積もることは今後の地球環境変動の影響を推測する上で重要である。本研究では春のブラックカーボン濃度および全不純物量の分析を行った。アルベドへの影響は小さいことがわかり、本研究で対象とした2017年4月の値はアラスカ域のバックグラウンドレベルと考えることができ、また全不純物量に比べブラックカーボンの割合が小さいことが分かった。今後、他の年・季節等と比較する必要がある。

研究成果の概要(英文)：Black carbon (BC) is one of the light-absorbing particles, which reduce the albedo of snow surfaces. Snow samples were taken from the surface of three glaciers in the Alaska Range in mid-April 2017. The BC size distribution and concentration were analyzed with a laser-induced incandescence method. The BC concentration of the snow samples was 1-6  $\mu\text{g/L}$  and 0.5-3  $\mu\text{g/L}$  at a depth of 0-2 cm (surface) and 2-10 cm (subsurface), respectively. These values are comparable to other Arctic areas and are considered to be the Alaskan background level. The BC concentrations are 0.5% of those of insoluble solid particles (ISPs) measured using an electrical sensing zone method.

研究分野：雪氷学、気象学

キーワード：ブラックカーボン 氷河 積雪 アラスカ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 温暖化と雪氷面アルベドの関係

温暖化は現在進行中の最も重大な地球環境問題の一つである。北半球では温暖化の原因物質として挙げられる二酸化炭素のほか、ブラックカーボンの温暖化促進効果が問題視されている(e.g. Flanner et al., 2009)。なぜなら、ブラックカーボンは、周囲の大気を温める効果だけでなく雪氷面の反射率(アルベド)を下げる効果があるからである。雪氷面はアルベドが低下することにより日射を吸収しやすくなる典型的な場所である。過去には逆にアルベドが上がることで寒冷化が進んだ。このように、アルベドの変化は過去の気候変動を支配していた一因である。

### (2) 雪氷面上のアルベドに影響する不純物に関する研究動向

現在最も温暖化が進んでいる北極域では雪氷域が広範囲を占める。雪氷面は表面アルベドが高いため日射の吸収量が少ないが、表面アルベドが急激に低下すると急速に融解が進行する。太陽光のうち短波長域では、雪氷中不純物のアルベド低下効果が大きく、特に雪結晶の粒径が大きい場合には不純物の混入に起因するアルベド低下が大きい(Wiscombe and Warren, 1980)。雪氷面のアルベドの低下をもたらす主な物質として、ブラックカーボン・ダスト・微生物が挙げられる。これら物質の、存在量を考慮しての各物質の影響力の強さは未解明である。そこで、いずれの物質の効果がより強く現れているかを明らかにすることは、多くの地域で必要とされている。Kuchiki et al., (2015) では札幌の雪について実施したが、精度度について課題が残っている。

## 2. 研究の目的

大気中を浮遊している物質は積雪面へ降下した場合、その量や色によりアルベドを大きく変えることが考えられる。アルベドに影響を与える物質には、黄砂などのダスト、微生物等のほか、近年注目されているブラックカーボンが含まれていると考えられる。ブラックカーボンは、幅広い波長域で高い光吸収効率を持ち、雪氷面のアルベドを大きく変えている可能性があると言われるが、実際に効果の大きさは不明である。アラスカではこれまで研究例が少なく、過去 10 年以上前の研究例では測定誤差が大きいと考えられている。また、ブラックカーボンは人為起源物質が多く、都市など人間活動に近い場所ほどその影響を受けると考えられる。アラスカでは都市から離れた場所が多く広域での影響を評価しにくい。そこで本研究では、各構成物質の量を同定し、効果の大きさを定量的に示すことを目的とする。また、人間活動から離れた場所での影響を評価するため、氷河上の積雪を対象とする。本研究により、気候変動の要因の一つである雪氷面アルベドがどのように変化するかが明らかになることで、より正確な将来予測へ寄与する。

## 3. 研究の方法

### (1) 積雪試料の採取

試料の採取はアラスカ山脈の3つの氷河(グルカナ、ブラックラピッズ、ジャービス)の合計6地点にて(図1)、2017年、融解の進んでいない試料が得られる4月に行った。サンプリングは、表面から深さ2cmまで(0-2 cm)の表層と、その下の層(深さ2-10cm)について行った。

全年の夏の層が見られた場所では、前年夏層表面からも同様のサンプルを取得した。平均データを取るため同場所・同深さについて3試料ずつ取得した。

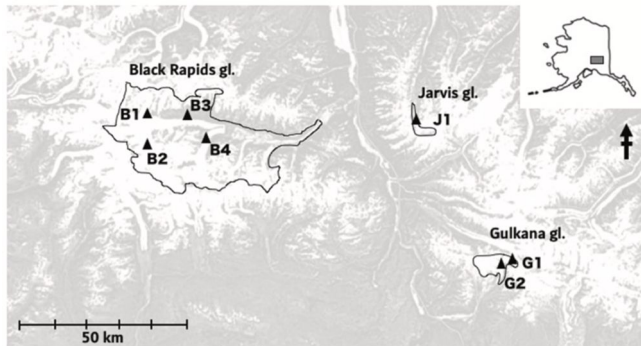


図1. 研究対象地域とサンプリングサイト (Konya et al., 2020)

また、季節変化と年による違いを明らかにするため、2019年春にブラックラピッズ氷河の3地点およびグルカナ氷河の1地点にてサンプリングを行った。ブラックラピッズ氷河では深さ3cmごとのサンプルを再び取得した。グルカナ氷河では鉛直方向に約50cmの連続したコアを複数取得し、それぞれ約3cmごとに分断した。各サンプルは不純物の混入がないように専用袋に分け、現地から冷凍状態を保って日本の実験室まで輸送した。分析の直前に常温にて融解させて分析に使用した。

#### (2) ブラックカーボンおよび不純物の計測

これまで類似の研究で行われてきたTOT法、LII法などは、精度が低いと指摘されている。本研究では海洋研究開発機構のSP2 (Single-Particle Soot Photometer) を利用した。0.08-1.2  $\mu\text{m}$  の粒子について、質量濃度と個数の粒径分布を計測した。はじめに、過去に採取された試料を分析し手法の確認を行った。その後、採取した国内試料(札幌、富山)およびアラスカで採取した試料の分析を行った。

ブラックカーボン以外の不純物の質量濃度を明らかにするため、ブラックカーボンの計測に使用するサンプルをあらかじめ取り分けておき、コールターカウンターにて粒径ごとの粒子数についても計測を行った。コールターカウンターでは、0.4-12.0  $\mu\text{m}$  の粒子について計測したが、バックグラウンドノイズが高かったため、0.8-5.0  $\mu\text{m}$  のデータについてのみ使用することとした。不純物密度を2.0  $\text{g}/\text{cm}^3$  と仮定して全不純物量の重量を見積もった。全不純物とブラックカーボンの重量から、ブラックカーボンの含まれる割合を推定した。

#### (3) 不純物によるアルベドの変化

ブラックカーボンおよびその他不純物の質量濃度データと仮定した積雪状況により、積雪表面アルベドを既存のモデルSNICAR-online (Flanner et al., 2007) にて計算した。積雪は、雪粒子の半径を250  $\mu\text{m}$ 、積雪密度を300  $\text{kg}/\text{m}^3$  と仮定した。

#### (4) 化学物質輸送モデルによる計算

2017年に採取したサンプルの計測結果と比較するため、化学物質輸送モデル(WRF-Chem)を使用して沈着量を計算した。ブラックカーボンの積雪面への沈着については、降雪による湿性沈着が計算されている。各氷河でのサンプル採取日から遡り、積雪が2cmになる期間の積算ブラックカーボン量を計算した。ブラックカーボンの人為起源・バイオマス燃焼起源のそれぞれについては、EDGAR (the Emissions Database for Global Atmospheric Research) version 4.2 for 2010およびFINN (the Fire Inventory from NCAR) version 1.5を利用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) ブラックカーボンおよび全不純物の質量濃度

SP2で分析した雪中ブラックカーボン質量濃度の粒径分布を示す(図2)。平均質量濃度は、0-2cm深で1-6 μg/L、2-10cm深で0.5-3 μg/Lだった。前年の夏層については、やや高い質量濃度が検出された。ほぼ全サンプルについて粒径0.3 μm程度の粒子の頻度が高かった。本研究では、標高や緯度経度など採取場所による系統的な違いは見られなかった(表1)。

全不純物量は、表面から0-2 cm深の層について0.3-1.2 mg/m<sup>3</sup>だった。同積雪サンプル中に含まれる全不純物量のうちブラックカーボンは約0.5%であった(表1中のBC[%]参照)。過去の研究では、グルカナ氷河では微生物等の物質がダストの10%程度と報告されているため、残りのほとんどがダストであると考えられる。このような特徴は過去にアラスカ山脈の道路沿いおよびアラスカ南部の氷河での研究例と近い値を示す。

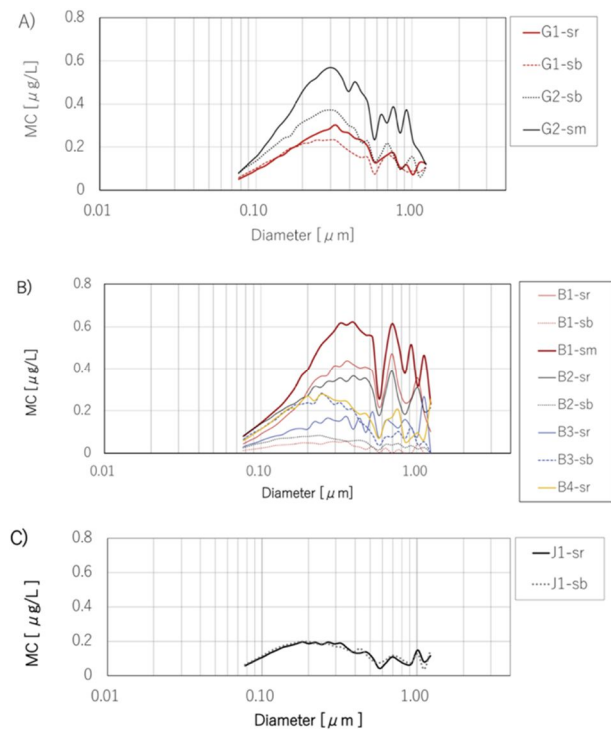


図2. SP2で計測した雪中ブラックカーボンの質量濃度の粒径分布 (Konya et al., 2020)

##### (2) 積雪表面アルベドへの影響

本研究で得られたブラックカーボン質量濃度および他の不純物沈着による氷河表面アルベド変化は0.07程度であった(表2)。この時期のアラスカはほぼ全域が積雪で覆われているため、周辺地域でも同様の変化がみられると考えられる。ブラックカーボンによるアルベド変化での氷河の質量収支への影響は小さいと考えられる。ただし、本研究は春につい

表1. 各サイトでのBC濃度 (Konya et al., 2020)

Glacier	Black Rapids				Gulkana	Jarvis	mean
	B1	B2	B3	B4	G1	J1	
BC [μg L <sup>-1</sup> ]							
Surface	5.33	4.00	1.57	2.46	2.54	1.53	2.91
Subsurface	0.53	0.71	2.07	-	2.09	1.82	1.44
Summer surface	6.03	-	-	-	4.80	-	-
ISP [mg L <sup>-1</sup> ]							
Surface	1.2	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5
Subsurface	0.2	0.3	-	-	-	-	-
BC [%]							
Surface	0.6	0.8	0.3	0.7	0.6	0.4	0.5
Subsurface	0.3	0.3	-	-	-	-	-

の場合であり、ブラックカーボンの量はバックグラウンドレベルと考えられる。季節による違いが考えられ、アラスカの他地域における研究でも指摘されている。また、近隣の森林火災や火山噴火などの大規模イベントがある場合は、より大きくなる可能性がある。

### (3) ブラックカーボンの起源

大気化学輸送モデル(WRF-Chem)での計算値はサンプル計測結果とほぼ一致した。その結果をもとに、ブラックカーボンの起源について解析し、本研究で採取したブラックカーボンは主に中国から輸送されており、人為起源よりもバイオマス燃焼起源が多いと推定した。また、この時期はアラスカのほぼ全域で地表面が積雪で覆われているため、アラスカの他の地域でも同様の影響が考えられる。

#### 参考文献：

- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). Present day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11).
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Hess, P. G., Mahowald, N. M., Painter, T. H., Ramanathan, V., & Rasch, P. J. (2009). Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(7), 2481-2497.
- Konya, K., Yamaguchi, M., Takigawa, M., Miyakawa, T., & O'Neel, S. (2020). Mass concentration and origin of black carbon in spring snow on glaciers in the Alaska Range. *Polar Science*, 100572 (in press).
- Kuchiki, K., Aoki, T., Niwano, M., Matoba, S., Kodama, Y., & Adachi, K. (2015). Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical and gravimetric methods: Variations during the 2007–2013 winters at Sapporo, Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(2), 868-882.
- Warren, S. G., & Wiscombe, W. J. (1980). A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), 2734-2745.

表 2. SNICAR-online によるアルベド変化  
(Konya et al., 2020)

site	Albedo (SNICAR)		
	clean	BC	BC + dust
Black Rapids			
B1	0.783	0.780	0.777
B2	0.783	0.780	0.776
B3	0.783	0.781	0.779
B4	0.783	0.781	0.777
B1_ss16	0.783	0.780	0.777
Gulkana			
G1	0.783	0.781	0.777
G1_ss16	0.783	0.781	0.777
Jarvis			
J1	0.783	0.781	0.776

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1 . 発表者名 Keiko Konya, Takuma Miyakawa, Masayuki Takigawa, Masahiro Yamaguchi, Shad O' Neel, Martin Truffer, Ian R. Lee and David Clemens-Sewall
2 . 発表標題 Mass concentration and particle number of black carbon on glaciers in the eastern Alaskan Range, Alaska USA
3 . 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Keiko Konya, Takuma Miyakawa, Masayuki Takigawa, Masahiro Yamaguchi, Shad O' Neel, Martin Truffer, David Clemens-Sewall and Ian R. Lee
2 . 発表標題 Mass concentration and origin of black carbon in spring snow on Alaskan glaciers
3 . 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 紺屋 恵子, 宮川 拓真, 滝川 雅之, 山口 将大
2 . 発表標題 アラスカ山脈における氷河上ブラックカーボンの質量濃度と粒子数
3 . 学会等名 雪氷研究大会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Masayuki Takigawa, Takuma Miyakawa, Masahiro Yamaguchi, Yugo Kanaya
2 . 発表標題 Evaluation of wet deposition process of black carbon using WRF-Chem and WRF-FLEXPART
3 . 学会等名 3rd PACES (Air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies) Open Science Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名	Masayuki Takigawa, Takuma Miyakawa, Fumikazu Taketani, Masahiro Yamaguchi, Yugo Kanaya
2. 発表標題	Evaluation of wet deposition process of black carbon in WRF/Chem model during MIRAI Arctic research cruise over high-latitude regions in 2016,
3. 学会等名	2018 joint 14th iCACGP (the international Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution) Symposium and 15th IGAC (the International Global Atmospheric Chemistry) Science Conference (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	滝川雅之・竹谷文一・宮川拓真・山口将大・金谷有剛
2. 発表標題	領域化学輸送モデルにおける北極海上でのブラックカーボンの湿性沈着過程の評価
3. 学会等名	ブルーアース2019
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Keiko Konya, Takuma Miyakawa, Masayuki Takigawa, Masahiro Yamaguchi, Shad O' Neel, Martin Truffer, David Clemens-Sewall and Ian R. Lee
2. 発表標題	Spatial variability of black carbon on glaciers in the eastern Alaskan Range, Alaska USA
3. 学会等名	AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	M. Takigawa, Takuma Miyakawa, F. Taketani, Masahiro Yamaguchi, Y. Kanaya
2. 発表標題	Evaluation of wet deposition process of black carbon in WRF/Chem model during MIRAI Arctic research cruise over high-latitude regions in 2016
3. 学会等名	2018 joint 14th iCACGP Symposium and 15th IGAC Science Conference (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 滝川雅之, 竹谷文一, 宮川拓真, 山口将大, 金谷有剛
2. 発表標題 領域化学輸送モデルにおける北極海上でのブックカーボンの湿性沈着過程の評価
3. 学会等名 ブルーアース2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮川 拓真 (Miyakawa Takuma)  (30707568)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・研究員  (82706)	
研究協力者	O'neel Shad  (O'Neel Shad)		