

## 北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究

Effects of snow impurities and glacial microbes on abrupt warming in the Arctic

青木 輝夫 (AOKI TERUO)

気象庁気象研究所・気候研究部・室長



### 研究の概要

多くの気候モデルで北極圏における近年の急激な雪氷の融解を再現できていない原因の一つとして考えられる、黒色炭素等光吸収性エアロゾルによる積雪汚染と雪氷微生物による雪氷面アルベド低下効果を、グリーンランドにおける観測から定式化し、気候モデル、衛星リモートセンシング、氷床コア掘削等の手法によって雪氷融解に対する定量的寄与を明らかにする。

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：極域環境監視、雪氷圏変動、地球温暖化、雪氷微生物、アルベド

### 1. 研究開始当初の背景

近年の北極圏において、気候モデルの予測を大きく超える速度で急激な雪氷の融解が進行している。雪氷面にはアルベド・フィードバック効果が存在するため気候モデルによる温暖化予測には、精度の高い雪氷面アルベドモデルが必要不可欠である。ところが、北極圏における近年の急激な雪氷の融解を多くの気候モデルが再現できていない。その原因の一つとして、黒色炭素等光吸収性エアロゾルによる積雪汚染と雪氷微生物による雪氷面アルベド低下の効果が挙げられる。融解が顕著なグリーンランドにおいて、これらの物理過程を解明し、雪氷融解に対する寄与を明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

グリーンランドと国内観測から、積雪不純物濃度の実態解明、雪氷微生物の種類や濃度、それらによるアルベド低下量を明らかにする。それらの効果を考慮した積雪変質モデル及び雪氷微生物モデルを開発し、地球システムモデルに組み込むことにより、近年の雪氷融解を再現し、北極域の雪氷融解に与える定量的効果を評価する。同時に、グリーンランドの氷床コア掘削から産業革命以降の雪氷中エアロゾル変動を再現すると共に、衛星リモートセンシングによりグリーンランドにおける積雪粒径、積雪不純物濃度、アルベド、雪氷微生物の時空間変動を見積もる。

### 3. 研究の方法

- (1) グリーンランド地上観測：北西部の氷床上及びカナック氷帽上に自動気象観測装置を設置し、気象・雪氷・雪氷微生物観測から、積雪中の光吸収性エアロゾル濃度、雪氷微生物、アルベドへの効果について実態把握を行う。
- (2) 国内観測：雪質の異なった札幌、芽室、長岡において詳細な放射・積雪等連続観測を実施し、(1)の結果と合わせて積雪変質モデル及び微生物モデルを開発する。
- (3) 気候モデリング：(2)で開発したモデルを地球システムモデルに組み込み、気候再現実験と感度実験から積雪汚染及び雪氷微生物が雪氷融解に与える効果を定量的に評価する。
- (4) 氷床コア掘削：2014年にグリーンランドで浅層掘削を実施し、産業革命以降の雪氷中エアロゾル変動を明らかにする。
- (5) 衛星リモートセンシング：MODISデータを利用し、北極域における積雪粒径、積雪不純物濃度、表面温度、アルベド、雪氷微生物の長期変動及び空間分布を求める。

### 4. これまでの成果

- (1) グリーンランド地上観測：2011年と2013年の黒色炭素とダスト濃度は先行研究の範囲でアルベド低下量は無視できる程度であった。大規模な氷床表面融解の起った2012年7月は、観測期間中に表面融解と昇華・蒸発によって不純物の表面濃縮過程が確認されたが、アルベド低下量は最大0.03と見積もられた。さらに、長距離輸送されにくい粒径5 $\mu$ m以上の粗

大ダストが多く見付き、これが消耗域における雪氷微生物の栄養塩の供給源の可能性がある。

雪氷微生物試料分析の結果、裸氷域の不純物（クリオコナイト）は、北西部、南西部共に、下流よりも中流部に多く、アルベド低下量も大きいことが分かった。さらに不純物にはシアノバクテリアなどの微生物が大量に含まれていた。このことから、微生物活動とその生産物によるアルベド低下が顕著であることが示された。不純物中に含まれる鉱物成分の分析の結果、消耗域表面に堆積している鉱物粒子は、グリーンランド周辺部の裸地から供給されたものであることが明らかになった。



図 1 雪氷微生物を含む不純物で覆われたグリーンランド北西部のカナック氷河

(2)国内地上観測：積雪変質モデルを用い、札幌における 2007-2009 年の 2 冬期間の積雪層再現実験の結果、積雪不純物によるアルベド低下効果により積雪期間が 16-19 日短くなっていることが分かった。しかし、過去 6 冬期間中に顕著な不純物のトレンドは見られなかった。積雪粒径を客観的に測定する近赤外カメラ画像解析法とガス吸着法を開発した。

(3)気候モデリング：グリーンランド氷床表面が全面融解した 2012 年 7 月中旬の広域降水事例について、気象庁非静力学モデルを用いて再現実験を行った結果、観測された地上気象要素および衛星観測から得られた雲・降水粒子の分布を精度良く再現できることを確認した。計算結果から氷床全域にわたる降水分布を調べると、降雨域は主に氷床南部および西部の比較的標高が低い地域に集中し、標高の高い内陸部は降雪域が占めていた。

(4)氷床コア掘削：氷床上標高 1,500m 地点でのハンドオーガーによる予備観測で得られたフィルンコア解析から、過去約 30 年間の年間涵養量の減少トレンドが示唆された。

(5)衛星リモートセンシング：2000-2013 年の MODIS データを用いて、グリーンランド全域における積雪粒径、積雪不純物濃度を抽出し長期変動を解析した結果、積雪粒径は最近（2009-2012 年）増加が顕著で、特に表面融解を記録した 2012 年にはグリーンランド全域で大きな値を記録した。裸氷域とその上の雪氷微生物による暗色域の変化を調べたところ、共に約 2 倍に拡大していることが分かった。

## 5. 今後の計画

2014 年 4-5 月にグリーンランド北西部の標高 2,100m 地点において、深さ 200m の氷床コア掘削を実施し、過去 500-1,000 年間の雪氷中の光吸収性エアロゾル等成分の濃度変化を求める。また、2014 年夏季にグリーンランドで雪氷、気象、微生物観測を実施するとともに、微生物モデルを開発し、気候モデルによる数値実験から雪氷融解への寄与を見積もる。さらに衛星リモートセンシングによって積雪粒径、不純物濃度、微生物活動域等の長期時空間変動を明らかにする。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

Aoki, T., S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, M. Niwano, K. Kuchiki, K. Adachi, J. Uetake, H. Motoyama, and M. Hori. 2014: Light-absorbing snow impurity concentrations measured on Northwest Greenland ice sheet in 2011 and 2012, *Bull. Glaciol. Res.*, (in press).

Hori, M., T. Aoki, T. Tanikawa, A. Hachikubo, K. Sugiura, K. Kuchiki, and M. Niwano. 2013: Modeling angular-dependent spectral emissivity of snow and ice in the thermal infrared atmospheric window, *Appl. Opt.* **52**, 7243-7255.

Iwata, Y., et al., 2013: Water and nitrate movements in an agricultural field having different soil frost depth: field experiments and numerical simulation, *Ann. Glaciol.*, **54(62)**, 157-165.

Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, and Y. Kodama. 2012: Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan, *J. Geophys. Res.*, **117**, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.

Sugiyama, D. Sakakibara, S. Matsuno, S. Yamaguchi, S. Matoba, and T. Aoki. 2014: Initial field observations on Qaanaaq ice cap in northwestern Greenland, *Ann. Glaciol.*, **55**, 25-33, doi: 10.3189/2013AoG66A102.

Takeuchi, N., 2013: Seasonal and altitudinal variations in snow algal communities on an Alaskan glacier (Gulkana glacier in the Alaska range), *Environ. Res. Lett.*, **8**, 035002, doi:10.1088/1748-9326/8/3/035002.

ホームページ等

<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/cl6/sigma/sigma-j.html>