

「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 (SIGMA プロジェクト)」によるグリーンランド観測

青木輝夫 (岡山大学, 気象研究所), 庭野匡思・谷川朋範・橋本明弘 (気象研究所), 的場澄人・杉山慎 (北海道大学低温科学研究所), 竹内望 (千葉大学), 本山秀明・永塚尚子 (国立極地研究所), 植竹淳 (情報・システム研究機構), 堀雅裕・島田利元 (JAXA), 山口悟 (防災科学技術研究所), 藤田耕史 (名古屋大学), 山崎哲秀 (アバンナット)

1. はじめに

グリーンランドでは 1990 年代後半から氷床質量の損失の割合が年々増加している (Shepherd *et al.*, 2012)。その原因として考えられるのは、主に夏季の氷床表面の融解量が増えることと、氷床から氷河を通じて海洋へ流出する氷山の量が増加することである (van den Broeke *et al.*, 2009)。それらの基本的な原因は気温の上昇、すなわち地球温暖化であると考えられるが、ブラックカーボン (煤) 等の光を吸収する性質のエアロゾル (大気中の微粒子) による積雪汚染や雪氷微生物の繁殖がもたらす雪氷面のアルベド (太陽光の反射能) の低下などの不確定要素が挙げられる。事実、衛星データ解析から 2000 年以降グリーンランド氷床全体のアルベド低下が確認されている (Box *et al.*, 2012)。

一般に気温の上昇に伴い、アルベドの高い雪氷面が融解して、アルベドの低い地面や海面が現れると、地面や海面が太陽光を吸収して気温の上昇が加速される、いわゆる「雪氷-アルベドフィードバック効果」がよく知られている。しかし、氷床上では雪氷面が融解しなくても、何らかの原因でアルベドが低下すると、やはり氷床表面の融解が強化されるメカニズムが働いている可能性がある。ここで、氷床を涵養域 (年間の質量収支が正の領域、すなわち年々積雪が堆積していく領域) と消耗域 (年間の質量収支が負の領域、一般に夏季に裸氷が現れる) に分けてアルベド低下の潜在的原因を考えてみよう。涵養域は通年積雪で覆われているため、アルベドは高く維持される。しかし、積雪のアルベドは、可視域では主に前述のブラックカーボンや鉱物性ダストなどの積雪不純物濃度に依存し、近赤外域では積雪粒子の大きさ (積雪粒径) に依存して変化する

(Wiscombe and Warren, 1980, Warren and Wiscombe, 1980)。このため涵養域のアルベド低下には、積雪不純物濃度の増加と積雪粒径の増加の 2 つの原因が考えられる。一方、消耗域は主に夏季の間、表面に裸氷が現れる。裸氷のアルベドは積雪のアルベドより低いため、裸氷面が拡大するとアルベドは低下する。さらに、裸氷域は雪氷微生物の繁殖により暗色化を起こすことが知られている (Wientjes *et al.*, 2011)。暗色化した裸氷面 (暗色裸氷域) のアルベドはさらに低く、暗色裸氷域の拡大は氷床全体のアルベドの低下に大きく寄与している可能性がある。

このような氷床表面融解に対する積雪汚染、積雪粒径などの表面状態の変化、裸氷域の変化や雪氷微生物の効果を明らかにするため、科研費 (基盤研究 (S)) による「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」(SIGMA プロジェクト: <http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/cl6/sigma/sigma-j.html>) が 2011 年より 5 年間実施された (Aoki *et al.*, 2014a)。SIGMA プロジェクトでは現在の氷床上における観測だけでなく、氷床コア掘削による過去の積雪不純物濃度の変化や衛星リモートセンシングによる表面状態の広域分布の監視、さらに気象・気候モデルによる氷床表面の質量収支、大気エアロゾル変動等の計算が行われた。このプロジェクトでは日本国内での積雪プロセス研究や観測装置開発も含むが、本稿では主にグリーンランド観測について述べる。以下、研究期間中の各年の現地観測及び研究成果の概要について述べる。

2. 観測と研究成果の概要

2.1. 2011 年予備観測

初年度の 2011 年は観測サイトを定めるための予備調査

を実施した。欧米の観測地点は中西部のカンゲルサク（Kangerlussuaq）やイルリサット（Ilulissat）付近の氷床上に既に展開されているため、我々は観測空白域である北西グリーンランドのカナック村（Qaanaaq）を拠点とした地域を第1の候補地とした（図1）。カナックまではカンゲルサクから週1便の航空機の定期便が運航されている。また、カナックの南方約130kmに位置するチュレ（Thule）から、ヘリコプターをチャーターすることができる。2011年7-8月にヘリコプターをチャーターし、図1の桃色の丸印で示す地点を調査した結果、本地域が自動気象観測装置（AWS）の設置と氷床コア掘削に適していることが分かった。この結果を受けて、カナック村を前線基地と決定し、以前この村に居住していたパニッパ&サキ・ダオラナ夫妻から家屋を借り、カナック・クラブ・ハウス（QCH）と命名した。サキ・ダオラナ氏は日本人である。また、カナックの近くのシオラパルク村（Siorapaluk）には現地で猟師として暮らす日本人の大島育雄氏も在住で、カナックには大島氏の親族も多いため、様々な観測のサポートが得られた。

2.2 2012年集中観測

(1) SIGMA-Aにおける観測

翌2012年は氷床上のSIGMA-A地点（標高1,490m）にヘリコプターで人員と物資を輸送し、6月下旬から約3週間のキャンプを行った。ここでは、AWSの設置（写真1）、気象観測、分光放射観測、積雪断面観測、雪尺観測、積雪不純物観測、19mフィルンコア掘削（写真2）等を実施した（Aoki *et al.*, 2014a, Yamaguchi *et al.*, 2014）。この年の夏のグリーンランドは記録的な高温で、6月から始

まった高温傾向は7月中旬にピークに達し、氷床表面のほとんどが融解を経験し、また西部を中心に標高2,000mを越える地点でも降雨が観測された（Nghiem *et al.*, 2012）。SIGMA-Aでは、7月10-13日の4日間、断続的な降雨があり、総降水量は60-100mmと推定された（Aoki *et al.*, 2014b）。このとき、SIGMA-Aでも顕著な表面融解が起こった。一方、このとき掘削した深さ19mのフィルンコアの上部2/3には、多くの氷板（融解の痕跡）が見られ、下部1/3（およそ1983年以前）にはほとんど見られなかった。このことはSIGMA-Aでも近年表面融解が頻発していることを示している。

SIGMA-Aで得られた積雪不純物濃度及びアルベドデータを解析した結果、積雪中のブラックカーボンやダスト粒子の積雪不純物よりも、気温の上昇に伴う積雪粒径の増加の方がアルベド低下に大きく寄与していることが明らかになった（Aoki *et al.*, 2014b）。さらに、気象データ及び積雪データから積雪の物理状態や熱収支を計算できる数値

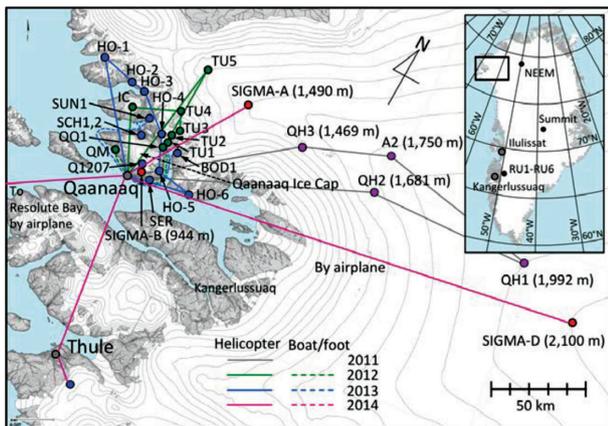


図1. グリーンランドにおけるSIGMAプロジェクトの観測地点。自動気象観測装置（AWS）はSIGMA-A, SIGMA-B, SIGMA-D地点（赤丸印）に設置した。桃色丸印は2011年の予備調査地点、緑丸印と青丸印はそれぞれ2012年と2013年の生物観測地点を示す（地点名はAoki *et al.* (2014a)を参照）。



写真1. グリーンランド氷床上SIGMA-A（標高1,490m）の自動気象観測装置（2012年6月29日）



写真2. SIGMA-Aにおけるハンドオーガーによる19mのフィルンコア掘削（2012年7月3日）

モデル SMAP (Niwano *et al.*, 2012) を用いて、2012 年 7 月中旬の顕著な表面融解状態を再現した結果、暖かな下層雲の流入に伴う下向き長波放射の増加が、下向き短波放射の減少を凌駕し、その結果、表面融解に対して大きな影響を与えたことが分かった (Niwano *et al.*, 2015)。

SIGMA プロジェクトでは、氷床上的キャンプやヘリコプターを使ったオペレーション時に、フィールド観測支援のための気象予測情報を日本国内から衛星携帯電話で提供した (橋本ほか, 2016)。この情報は気象庁の非静力学モデル (JMA-NHM) を用いて計算されたもので、グリーンランド全域を対象に水平方向の空間解像度 5 km で 42 時間予報を 12 時間毎に行った。現地観測では天気の変化傾向だけでなく、観測点における降水の有無、最大風速、最低気温などの情報は非常に重要である。一方、現地における観測データは予報値の検証に利用され、予報システムの改良に利用された。この予報システムが確立されたことにより、2012 年以降の野外活動では非常に利用度の高いシステムとなった。現在、このシステムはグリーンランドにおける他のプロジェクトや海外の野外オペレーションにも利用されている。また、その応用として、2016 年から南極を対象として同様の計算が開始された。

(2) SIGMA-B 及び広域雪氷微生物観測

SIGMA-A の観測終了後、カナック氷帽上 SIGMA-B 地点 (標高 944 m) に 2 機目の AWS を設置した (写真 3)。この地点にはカナックから徒歩 4-5 時間でアクセス可能である。AWS 設置時の SIGMA-B 周辺の表面は、裸氷の表面を堆積物で汚れたシャーベット状の積雪が約 10 cm 覆っており、融解水が表面を流れる状態であった。カナック氷帽は 2007 年の Uetake *et al.* (2010) による調査では、標高約 1,100 m の山頂部が通年積雪で覆われていたことが報告されているが、2012 年には山頂のごく一部を除いて暗色の堆積物で大部分が覆われていた (写真 4)。この年にはカナック氷河上をはじめ、図 1 の緑丸印地点、中西部のラッセル氷河において、ヘリコプター、小型ボート、徒歩による広域雪氷微生物調査を実施した。

上記の調査で採取された試料の分析の結果、氷河上の不純物 (クリオコナイト) は、北西部と南西部ともに、下流部よりも中流部に量が多く、さらにその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ることが分かった。このことからグリーンランドでも、微生物活動及び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 (Takeuchi *et al.*, 2014 ; Uetake *et al.*, 2016)。その結果、表面融解へ大きく寄与していることが明らかになった (Sugiyama *et al.*, 2014)。



写真 3. カナック氷帽上 SIGMA-B (標高 944 m) における自動気象観測装置の設置作業 (2012 年 7 月 22 日)



写真 4. 表面をクリオコナイトで覆われ暗色化したカナック氷帽 (2012 年 7 月 16 日)

2.3 2013 年集中観測

(1) SIGMA-A における観測

翌 2013 年は一転して寒い夏となり、SIGMA-A ではほとんど表面積雪の融解を経験しなかった。図 2 は SIGMA-A における 2012 年 7 月以降の気温と雪面高度の変化を表す。2012 年 7-8 月には気温の上昇に伴い、雪面高度の低下が見られたが、その後の涵養量が多かった上、翌 2013 年 6-8 月には気温が正の値になることは少なく、夏季の表面融解がほとんどなかった。その結果、2012 年 9 月 1 日から 1 年後までの雪面高度の変化は +117 cm と大きくなった。

この年の 7 月には再びヘリコプターで SIGMA-A に移動し、約 1 週間のキャンプを行い、期間中、AWS 保守、分光放射観測、積雪観測、積雪不純物観測等を実施した。SIGMA-A のような涵養域における AWS 保守では、毎年積雪表面の高度が上昇し、AWS が積雪に埋もれていくため、定期的に AWS 全体をかさ上げする必要がある。また、

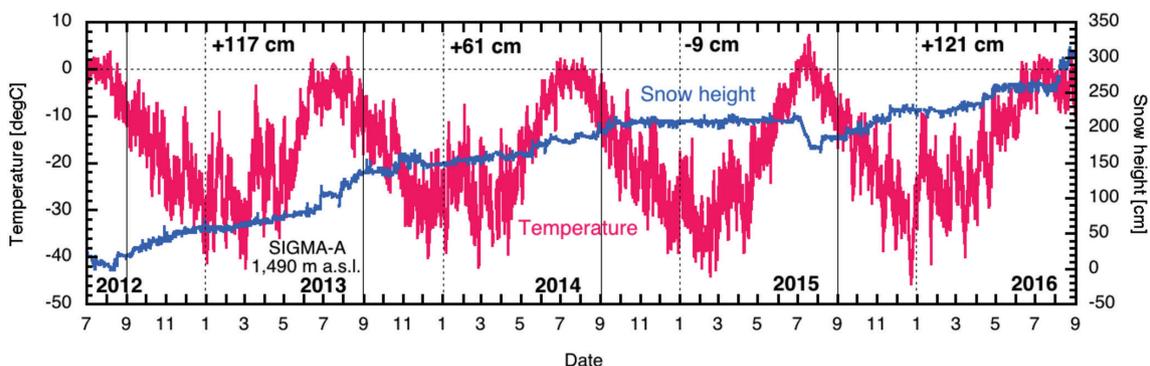


図2. SIGMA-A における 2012 年 7 月から 2016 年 8 月までの気温 (赤線, 左軸) と積雪深計による雪面高度 (青線, 右軸) の観測値の変化。積雪表面高度は 2012 年の最小値をゼロとした場合の相対的变化, 図上部に示す数字は年間 (各年の 9 月 1 日から翌年 8 月 31 日まで) の高度変化を表す。

埋まったケーブル類の掘り出しや雪温計の追加などの作業が必要のため, これらの作業を実施した。積雪断面観測の結果, 2012 年夏季の表面融解層がその後凍結し, 厚い氷板を形成していた。凍り付けになったケーブル類の掘り出しには大きな困難を伴った。

(2) SIGMA-B 及び広域雪氷微生物観測

7-8 月には SIGMA-B の AWS 保守, カナック氷帽上での分光放射観測等を実施した。上述のように 2013 年の夏季は低温で, カナック氷帽の標高 700 m 以上の領域が積雪で覆われた状態で夏を終えた。このため, SIGMA-B 周辺には裸氷が出現せず, 一年を通して高いアルベドが持続した。しかし, 積雪内部には数十センチメートルの上積氷 (浸透した積雪の融解水が下層の低温の氷に接し, 再凍結し形成された氷) が発達し, 寒冷な夏には裸氷の上に氷として涵養していることを示していた。

7-8 月には 2012 年と同様, ヘリコプター及び小型船舶による広域雪氷微生物調査を実施した (カナック氷河及び図 1 の青丸印地点)。写真 5 はその調査の様子を表す。この年の夏季は低温, 多雪のため, 裸氷の現れた標高の低い地点を重点的に調査した。

2012-2013 年の調査で採取した氷河上の不純物中に含まれる鉱物成分を分析した結果, グリーンランド消耗域表面に堆積している鉱物粒子は, アジアなどの遠方から飛来したものではなく, 氷床周辺部に由来するもので, さらに氷体内から融解とともに表面に蓄積するものが最も多いことが明らかになった (Nagatsuka *et al.*, 2014 ; 2016)。

2.4 2014 年集中観測

(1) SIGMA-D における氷床コア掘削

2014 年 5-6 月には本研究の重要な野外オペレーションの一つである氷床コア掘削を, SIGMA-D (標高 2,100 m) において実施した (Matoba *et al.*, 2015)。カナックが



写真 5. Sun 氷河 (図 1 の SUN1) 上における雪氷微生物調査の様子 (2013 年 7 月 20 日)

ら SIGMA-D までヘリコプターを使用した場合, 航続距離が不足するため, 事前に途中で燃料補給するための貯蔵地の設営を行わないと, 直接飛ぶことができない。掘削用の大量の物資や掘削したアイスコアの輸送効率を考慮した結果, カナダのレソリュートベイからツインオッター機をチャーターすることにした。SIGMA-D におけるキャンプは 5 月上旬から約 1 ヶ月行い, 氷床コア掘削, 3 機目の AWS の設置, 流動測量, 積雪断面観測, 積雪不純物観測等を実施した。氷床コア掘削 (写真 6) では最終的に深さ 223 m (A.D. 1200 年頃) のコア試料が得られた。現地ではアイスコアの密度, 層位 (層の構造), 近赤外反射率測定等を行ったのち, 上部の深さ 113 m のコア試料を 40% と 60% の断面積比で縦方向に分割し, 40% の試料を化学分析用の融解試料とし, 残りの 60% を冷凍試料としてそれぞれ日本まで輸送した。また, 深さ 113-176 m の試料は縦方向に半割にし, 一方を融解試料, もう一方を冷凍試料としてそれぞれ輸送した。さらに, 深さ 176 m より下部の試料は冷凍して輸送した。

2014 年度に SIGMA-D において掘削したアイスコア試

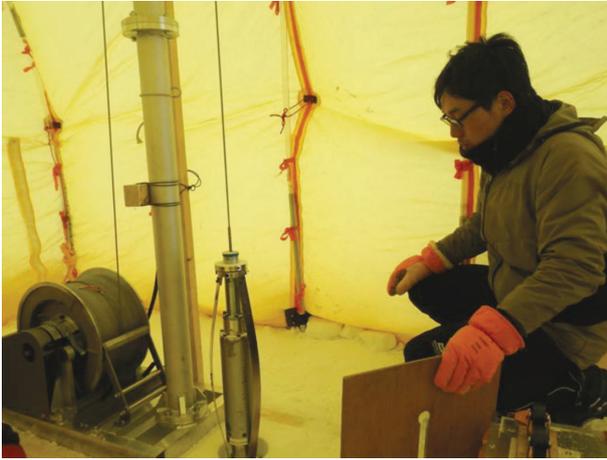


写真6. SIGMA-Dにおける氷床コア掘削の様子(2014年5月9日)

料は現在研究参加者によって分析が行われている。試料のうち、現地で融解した水試料から水同位体比、溶存イオン主成分、年間涵養量の分析が行われ、氷試料からはブラックカーボンやダスト濃度、金属成分の分析が行われている。

(2) SIGMA-Aにおける観測及び雪氷微生物観測

6月からは掘削メンバーの一部と後発隊メンバーがカナックで合流し、ヘリコプターでSIGMA-Aに移動した。ここでは、2013年と同様、約1週間のキャンプを行い、AWS保守、分光放射観測、積雪観測、積雪不純物観測等を実施した。2014年夏季のカナック周辺の気象条件は、2012年と2013年のほぼ中間の気温で、7-8月にかけて、短期間の気温の上昇に伴い、SIGMA-Aでも積雪表面高度の低下が観測された(図2)。涵養量は前年より少なく、結果的に2013年9月1日からの1年間における雪面高度の変化は+61cmと前年の約半分程度であった。なお、この年の雪氷微生物調査はカナック氷河とチューレを起点として、氷床に繋がる周辺の氷河上で実施した。

2.5 2015年以降の観測

最終年の2015年には集中観測は実施せず、7-8月に主にSIGMA-Bの保守と、カナック氷河周辺域での分光放射観測、ハンドオーガーによる氷河表面氷床コア掘削などを行った。

この年の7月は非常に気温が高く、SIGMA-Aでは図2に示すように大幅な雪面高度の低下が観測された。これに加え、前年冬期からの涵養量が非常に少なかったために、2014年9月1日からの1年間における雪面高度の変化は-9cmという異常に小さい値となった。

さらに、2016年9月までのSIGMA-Aの観測値を見ると、2016年の夏季は、やや気温が高かったものの前年の8月以降の涵養量が多く、また、2016年8月の大量の降雪が加わった結果、2015年9月1日からの1年間にお

ける雪面高度の変化は+121cmという過去4年間で最も大きな値となった。2016年8月の大量降雪時にカナックでは大雨による洪水が発生し、街の中の橋が流され、空港と街を結ぶ道路が寸断された。

3. 衛星リモートセンシングによる観測

米国NASAの衛星センサー中分解能撮像分光放射計(MODIS)の2000-2014年のデータから、グリーンランド氷床における裸氷域の変化とその中の暗色裸氷域のそれぞれの面積の変化を調べた結果、共に年々増加傾向にあり、2000年に比べ氷床表面の融解が最も顕著であった2012年には、裸氷域が3.1倍、暗色裸氷域が7.5倍拡大していることが分かった(Shimada *et al.*, 2016)。裸氷域のアルベドは積雪のそれよりも低いため、その拡大は氷床全体のアルベド低下に寄与し、その中の暗色裸氷域はさらにアルベドが低いため、この領域の拡大も氷床全体のアルベド低下に寄与していると言える。

一方、氷床表面の積雪域(裸氷域を除く)における積雪粒径を2000-2015年のMODISデータから抽出し、長期変動を解析した。その結果、標高3,000m以上の低温領域を除いて、7月に有意な増加トレンドがあることが明らかになった。積雪粒径の増加は、主に近赤外域におけるアルベド低下に寄与するため、内陸涵養域では標高の高い領域を除き、積雪粒径の増加によってアルベド低下が進行していることを意味する。この結果は、2.2(1)章で述べた積雪不純物観測の結果と整合的である。

その他、衛星データからの積雪物理量抽出精度向上に資する情報として、可視-短波長赤外域における偏光放射輝度および熱赤外域の射出率の積雪粒径・雪質に対する依存性について調査した結果、短波長赤外域における雪面放射輝度の偏光度が積雪粒径に依存して変動することが明らかになった(Tanikawa *et al.*, 2014)。また、MODISがグリーンランド氷床域を観測して得られた熱赤外域輝度温度の変動を、地上の積雪断面観測結果と比較したところ、表面雪質を捉える情報を含んでいることが実証された(Hori *et al.*, 2013; 2014)。

まとめ

近年の北極域における急激な雪氷の融解に対する積雪汚染及び雪氷微生物の効果을明らかにするため、SIGMAプロジェクトが2011年より5年間実施された。その研究の中心となったのは北西グリーンランドのカナック地域で、カナック氷帽とグリーンランド氷床表面の異なる標高域の

SIGMA-A, B, D に3機のAWSを設置した。SIGMA-Aでは2012-2014年の3年間、集中観測を実施し、涵養域のアルベド低下に積雪不純物効果よりも積雪粒径の増加効果が効いていることが明らかになった。2012年7月には、暖気移流に伴い、グリーンランドの広い範囲で記録的な氷床表面融解イベントが発生した。このときのSIGMA-Aにおける観測データを解析した結果、下層雲からの下向き長波放射が表面融解に寄与していることが明らかになった。

広域の雪氷微生物調査からは、氷河表面がクリオコナイトによって覆われ、微生物活動及び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。また、北西グリーンランドの消耗域表面に堆積している鉱物粒子は氷床周辺部に由来するもので、氷体内から融解とともに表面に蓄積するものが多いことが分かった。

2014年にはSIGMA-Dにおいて、氷床コア掘削を実施し、深さ223m(A.D.1200年頃)のコア試料が得られた。これを融解した水試料と冷凍試料に分けて日本に輸送し、現在、水同位体比、溶存イオン主成分、年間涵養量、ブラックカーボン及びダスト濃度、金属成分の分析等が行われている。

衛星観測からは消耗域では裸氷域と雪氷微生物によって覆われた暗色裸氷域の拡大が2000年以降顕著で、アルベド低下に大きく寄与していることが分かった。一方、涵養域では2000年以降、標高の高い流域を除いて、アルベド低下に対して積雪粒径の増加効果が効いていることなどが明らかになった。

謝 辞

本研究はJSPS科研費(基盤研究(S):23221004)の助成を受けた。本研究の実施にあたり、下記の研究参加者に深く感謝する:田中泰宙、朽木勝幸、保坂征宏(気象研究所)、大沼友貴彦(東京大学生産技術研究所)、箕輪昌紘(北海道大学)、對馬あかね(総合地球環境学研究所)、田中聡太(千葉大学)、八久保晶弘(北見工業大学)、兒玉裕二・東久美子(国立極地研究所)、鈴木利孝・小室悠紀(山形大学)、岩田幸良・下田星児(農業・食品産業技術総合研究機構)、杉浦幸之助(富山大学)、本吉弘岐(防災科学技術研究所)、本谷研(秋田大学)。SIGMA AWS 観測データは北極域データアーカイブ(<https://ads.nipr.ac.jp/kiwa/Summary.action?selectFile=A20140714-002>)から公開されている。

参 考 文 献

Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi, and H.

Motoyama (2014a) Field activities of "Snow Impurities and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic" (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 3-20, doi: 10.5331/bgr.32.3.

Aoki, T., S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, M. Niwano, K. Kuchiki, K. Adachi, J. Uetake, H. Motoyama, and M. Horii (2014b) Light-absorbing snow impurity concentrations measured on Northwest Greenland ice sheet in 2011 and 2012. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 21-31, doi: 10.5331/bgr.32.21.

Box, J.E., X. Fettweis, J.C. Stroeve, M. Tedesco, D.K. Hall, and K. Steffen (2012) Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *The Cryosphere*, 6, 821-839, doi: 10.5194/tc-6-821-2012.

橋本明弘, 庭野匡思, 青木輝夫 (2016) グリーンランド雪氷フィールド観測支援のための気象予測実験. 雪氷, 78(4), 205-214.

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.

Hori, M., T. Aoki, T. Tanikawa, K. Kuchiki, M. Niwano, S. Yamaguchi, and S. Matoba (2014) Dependence of thermal infrared emissive behaviors of snow cover on the surface snow type. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 33-45, doi: 10.5331/bgr.32.33.

Matoba, S., H. Motoyama, K. Fujita, T. Yamasaki, M. Minowa, Y. Onuma, Y. Komuro, T. Aoki, S. Yamaguchi, S. Sugiyama, and H. Enomoto (2015) Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, 33, 7-14, doi: 10.5331/bgr.33.7.

Nagatsuka, N., N. Takeuchi, J. Uetake, and R. Shimada (2014) Mineralogical composition of cryoconite on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 107-114, doi: 10.5331/bgr.32.107.

Nagatsuka N., N. Takeuchi, J. Uetake, R. Shimada, Y. Onuma, S. Tanaka, and T. Nakano (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.

Nghiem, S.V., D.K. Hall, T.L. Mote, M. Tedesco, M.R.

- Albert, K. Keegan, C.A. Shuman, N.E. DiGirolamo and G. Neumann (2012) The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20502, doi: 10.1029/2012GL053611.
- 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.
- Niwano, M., T. Aoki, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Kuchiki, and H. Motoyama (2015) Numerical simulation of extreme snowmelt observed at the SIGMA-A site, northwest Greenland, during summer 2012. *The Cryosphere*, 9, 971-988, doi: 10.5194/tc-9-971-2015.
- Shepherd A., E.R. Ivins, A. Geruo, V.R. Barletta, M.J. Bentley, S. Bettadpur, K.H. Briggs, D.H. Bromwich, R. Forsberg, N. Galin, M. Horwath, S. Jacobs, I. Joughin, M.A. King, J.T.M. Lenaerts, J. Li, S.R.M. Ligtenberg, A. Luckman, S.B. Luthcke, M. McMillan, R. Meister, G. Milne, J. Mouginot, A. Muir, J.P. Nicolas, J. Paden, A.J. Payne, H. Pritchard, E. Rignot, H. Rott, L.S. Sørensen, T.A. Scambos, B. Scheuchl, E.J.O. Schrama, B. Smith, A.V. Sundal, J.H. van Angelen, W.J. van de Berg, M.R. van den Broeke, D.G. Vaughan, I. Velicogna, J. Wahr, P.L. Whitehouse, D.J. Wingham, D. Yi, D. Young, H.J. Zwally (2012) A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 338, 1183-1189, doi: 10.1126/science.1228102.
- Shimada, R., N. Takeuchi, and T. Aoki (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.*, 4: 43, doi: 10.3389/feart.2016.00043.
- 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:10.3189/2014AoG66A102.
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., and Shimada, R., 2014: Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 85-94, doi: 10.5331/bgr.32.85.
- Tanikawa, T., M. Hori, T. Aoki, A. Hachikubo, K. Kuchiki, M. Niwano, S. Matoba, S. Yamaguchi, and K. Stamnes (2014) In situ measurements of polarization properties of snow surface under the Brewster geometry in Hokkaido, Japan, and northwest Greenland ice sheet. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, doi: 10.1002/2014JD022325.
- Uetake, J., T. Naganuma, M.B. Hebsgaard, H. Kanda, and S. Kohshima (2010) Communities of algae and cyanobacteria on glaciers in west Greenland. *Polar Science*, 4, 71-80, doi: 10.1016/j.polar.2010.03.002.
- Uetake, J., S. Tanaka, T. Segawa, N. Takeuchi, N. Nagatsuka, H. Motoyama, and T. Aoki (2016) Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland. *FEMS Microbiology Ecology*, 92 (9), doi: 10.1093/femsec/fiw127.
- van den Broeke, M.R., J. Bamber, J. Ettema, E. Rignot, E. Schrama, W.J. van de Berg, E. van Meijgaard, I. Velicogna, and B. Wouters (2009) Partitioning Recent Greenland Mass Loss. *Science*, 326, 984-986, doi: 10.1126/science.1178176.
- Warren, S.G. and W.J. Wiscombe (1980) A model for the spectral albedo of snow, II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2734-2745, doi: 10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2.
- Wientjes, I.G.M., R.S.W. Van de Wal, G.J. Reichert, A. Sluijs, and J. Oerlemans (2011) Dust from the dark region in the western ablation zone of the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, 5, 589-601, doi: 10.5194/tc-5-589-2011.
- Wiscombe, W.J. and S.G. Warren (1980) A model for the spectral albedo of snow, I: Pure snow. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2712-2733, doi: 10.1175/1520-0469(1980)037<2712:AMFTSA>2.0.CO;2.
- Yamaguchi, S., S. Matoba, T. Yamazaki, A. Tsushima, M. Niwano, T. Tanikawa and T. Aoki (2014) Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, 32, 95-105, doi: 10.5331/bgr.32.95.

(2016年11月1日受付)