

総説

SIGMA 及び関連プロジェクトによる グリーンランド氷床上の大気・雪氷・雪氷微生物研究 — ArCS II プロジェクトへのつながり —

青木輝夫^{1*,2}, 的場澄人³, 庭野匡思², 朽木勝幸², 谷川朋範²,
竹内 望⁴, 山口 悟⁵, 本山秀明¹, 藤田耕史⁶, 山崎哲秀⁷,
飯塚芳徳³, 堀 雅裕⁸, 島田利元⁹, 植竹 淳¹⁰, 永塚尚子¹,
大沼友貴彦¹¹, 橋本明弘², 石元裕史², 田中泰宙², 大島 長²,
梶野瑞王², 足立光司², 黒崎 豊¹², 杉山 慎³, 津滝 俊¹,
東久美子¹, 八久保晶弘¹³, 川上 薫¹⁴, 木名瀬健²

要 旨

北極域で現在急激に進行している温暖化は、海面上昇や大気の遠隔影響を通じて地球規模の環境変動をもたらすと考えられる。グリーンランド氷床の表面融解は様々な不確定性を含み、正確な将来予測を行う上で解明すべき課題となっている。地球温暖化のもとでグリーンランド氷床の大気、雪氷、雪氷微生物がどのように氷床変動に影響するかを明らかにするため、2011年度から2019年度にかけてSIGMA及びSIGMA-IIプロジェクトが実施された。また、平行してGRENE, ArCSといった大型の北極研究プロジェクトも実施され、日本のグリーンランド研究が一気に加速される状況になった。本稿ではSIGMA・SIGMA-IIプロジェクト及び関連研究課題の成果について(1)大気・雪氷・雪氷微生物の現地観測、(2)アイスコア掘削、(3)衛星観測、(4)数値モデリングのカテゴリーに分けて解説する。さらに、これらの分野における現状の課題、最近開始されたArCS II雪氷課題へのつながり及び人材育成の重要性について述べる。

キーワード：グリーンランド氷床、アルベド、光吸収性エアロゾル、雪氷微生物、SIGMA、表面質量収支

Key words: Greenland Ice Sheet, albedo, light absorbing aerosols, glacial microbes, SIGMA, surface mass balance

1 国立極地研究所

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

2 気象庁気象研究所

〒305-0052 つくば市長峰 1-1

3 北海道大学低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

4 千葉大学大学院理学研究院

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

5 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

〒940-0821 長岡市栖吉町前山 187-16

6 名古屋大学大学院環境学研究所

〒464-8601 名古屋市中千種区不老町 F3-1 (200)

7 アバンナット北極プロジェクト

〒596-0094 大阪府高槻市

8 富山大学学術研究部都市デザイン学系

〒930-8555 富山市五福 3190

9 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター

〒305-8505 つくば市千現 2-1-1

10 Colorado State University, Department of Atmospheric Science, 200 West Lake Street, 1371 Campus Delivery, Fort Collins, CO 80523-1371, USA

11 東京大学生産技術研究所

〒277-8574 柏市柏の葉 5-1-5

12 リモート・センシング技術センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-17-1

13 北見工業大学

〒090-8507 北見市公園町 165

14 北海道大学大学院環境科学院

〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 5 丁目

* 問合せ先: aoki.teruo@nipr.ac.jp

1. はじめに

近年、グリーンランド氷床では顕著な質量損失が確認され (Shepherd *et al.*, 2012, The IMBIE Team, 2020), 海面上昇への寄与が懸念されている (Oppenheimer *et al.*, 2019). 氷床における質量損失の原因として考えられる要素は, 主に夏季に氷床表面融解量が増加することと, 氷床から氷河を通じて海洋へ流出する水の量が増加することである (van den Broeke *et al.*, 2009). それらの根本的な原因は全球平均の 2 倍とも言われる北極域の大幅な昇温, すなわち地球温暖化の影響であると考えられるが, ブラックカーボン (BC) 等の光吸収性エアロゾル (light absorbing aerosols) による積雪汚染 (歴史的には snow impurity: 積雪不純物と呼ばれる) や同じく光吸収性を持つ雪氷微生物による雪氷面のアルベド低下などの十分理解されていない要素が挙げられる. すでに, 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).

雪氷面は一般に他の地表面よりアルベドが高いため, 一旦融解すると雪氷-アルベドフィードバックにより融解後の地表面はより加熱される. グリーンランド氷床の縁辺部においては, 氷縁の後退によりこのようなことが発生している. また, 完全に雪氷が消失しない場合においても, 以下に述べる理由によりアルベド低下が起りうる.

氷床内陸部の涵養域は通年積雪で覆われているため, アルベドは比較的高く維持される. しかし, 積雪のアルベドは近赤外域では積雪粒径に依存し (Wiscombe and Warren, 1980), 可視域では BC や鉱物性ダスト等の積雪不純物濃度に依存して変化する (Warren and Wiscombe, 1980). さらに, 積雪不純物による可視域のアルベド低下率は積雪粒径が大きいほど加速されるため, 一般に積雪面上では温暖化に伴い図 1 に示す正のフィードバック効果が働く. このプロセスは常にアルベドを低下させる方向に働くため, 積雪汚染や積雪粒径成長は温暖化を加速させる働きを持つといえる. このフィードバックをリセットできるのは不純物濃度の低い新積雪だけである. 一方, 消耗域で主に夏季に現れる裸水のアルベドは積雪のそれよりも低いため, 裸水面が拡大することにより氷床表面

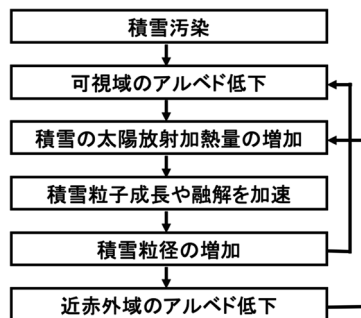


図 1 積雪のアルベドに働くフィードバック効果.
Aoki (2012) を日本語訳.

のアルベドは低下する (Tedesco *et al.*, 2011). さらに, 裸水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). 暗色化した裸水面 (暗色裸水域) のアルベドはさらに低く, その拡大は氷床全体のアルベド低下に大きく寄与している可能性がある.

質量損失が続くグリーンランド氷床上では, 積雪汚染や気温の上昇に伴う積雪粒径成長及び雪氷微生物による氷床表面アルベド低下によって表面融解が強化されるメカニズムが働いていると考えられる. その定量的なメカニズムを明らかにし, 温暖化の実態を把握するための現地観測と衛星観測が第一に必要である. 次に, 正確な短期, 長期の質量収支及び気候予測のためには, これら氷床表面を暗色化させる効果を見積もるための各種物理プロセスモデル開発とそれらを組み込んだ領域気象モデル及び地球システムモデルによる気象・気候再現実験が必要となる. さらに, アイスコアから長期のエロゾル成分や化学成分を測定し, 過去の環境変動を復元すると共に, 上記の物理プロセスを検証することが重要である.

そこで, 日本学術振興会の科学研究費助成事業 (科研費) 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; 2011-2015 年度) プロジェクト, その後継プロジェクトである「近年のグリーンランド氷床表面の暗色化と急激な表面融解に関する研究」(SIGMA-II; 2016-2020 年度) が実施された. これらのプロジェクトに加え, GRENE 北極気候変動研究事業 (2011-2015 年度), 北極域研究推進プロジェクト (ArCS; 2015-2019 年度),

研究参加者の科研費などを持ち寄り、グリーンランド氷床を舞台に以下の4つの研究目的が設定された。

(1) 大気・雪氷・微生物現地観測：自動気象観測装置 (AWS) による熱収支連続観測と分光放射、積雪特性、雪氷微生物の集中観測を実施し、積雪不純物濃度、質量収支、雪氷微生物の実態解明、それらによるアルベド低下、質量収支を明らかにする。

(2) アイスコア掘削：数十メートルから二百数十メートル深度のアイスコア掘削を行い、過去数十年から数百年間の雪氷中の BC 及びダスト粒子、その他化学成分の濃度変化を求め、人為起源及び自然起源のエロゾル及び環境変動を明らかにする。

(3) 衛星観測：衛星リモートセンシングにより、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明らかにする。

(4) 数値モデリング：積雪不純物効果を組み込んだ積雪変質モデルを開発し、氷床表面の熱収支や質量収支に与えるそれらの効果を調べると共に、地球システムモデル及び領域気象モデルに組み込んで、グリーンランドを含む北極域における、近年の急激な雪氷の融解の原因究明と近未来予測を行う。

以下、2011-2019 年度における SIGMA・SIGMA-II プロジェクト及び関連研究課題の研究成果の概要について解説する。

2. 大気・雪氷・雪氷微生物の現地観測

2.1 観測の概要

本研究ではグリーンランド北西部のカナック (Qaanaaq) 周辺域を活動の中心地と設定された。この理由はグリーンランド氷床における温暖化の影響が今後この地域で顕在化すると予想されることと、歴史的にグリーンランド氷床上の観測拠点は南部や中西部を中心に展開されており、北西部が比較的空白域であったためである。この研究では定常的な気象・質量収支観測を目的として自動気象観測装置 (AWS) を氷床上の SIGMA-A (78.1°N, 67.6°W, 1490 m a.s.l., 2012 年 6 月 30 日-現在)、カナック氷帽上 SIGMA-B (77.5°N, 69.1°W, 944 m a.s.l., 2012 年 7 月 18 日-現在)、氷床上

SIGMA-D (78.6°N, 59.1°W, 2100 m a.s.l., 2014 年 5 月 17 日-2015 年 10 月 21 日) の3箇所に設置された (図2 赤丸印)。SIGMA-A と SIGMA-B の AWS の写真及びセンサーの説明は Aoki *et al.* (2014a)、SIGMA-D の AWS は Matoba *et al.* (2015) に詳しく述べられている。SIGMA-A と SIGMA-B の AWS は、定期的な保守作業により現在も稼働中であるが、SIGMA-D は 2015 年 10 月の強風で倒壊したとみられる。SIGMA-D は 2014 年 5 月に 222m のアイスコア掘削 (Matoba *et al.*, 2015) が実施された地点である。AWS 以外の活動も含め、2011 年から 2015 年までの現地観測活動については青木ら (2017) で報告されているため、ここでは全期間における北西グリーンランドの観測活動の概要を述べる。

図2はこの地域における主な観測地点と移動手段を示す。初年度の 2011 年はヘリコプターを利用して内陸域の予備調査が実施され (桃色丸印)、2012 年以降の AWS の設置候補地、アイスコア掘削候補地が決定された。翌 2012 年夏季に前述の SIGMA-A と SIGMA-B の AWS が設置された。2012 年の AWS 設置時と 2013 年には SIGMA-A を中心に大気と雪氷の集中観測と雪氷微生物の多点観測 (緑丸印と青丸印) が実施された (Aoki *et al.*, 2014a, Yamaguchi *et al.*, 2014a)。2014 年にはカナダのレゾリュートベイから航空機がチャーターされ、SIGMA-D においてアイスコア掘削が実施された。翌 2015 年と 2017 年には主に徒歩で SIGMA-B とカナック氷帽で現地観測が実施され、2017 年には SIGMA-A で 60m 深のフィルンコア掘削と集中観測が実施された。さらに、2018 年はシオラパルクから犬橇で SIGMA-A を往復して積雪のトラバース観測が行われた (庭野ら, 2018)。

2.2 大気・雪氷

2011 年 7 月に内陸域3地点と 2012 年 6-7 月に SIGMA-A において積雪中の BC とダスト濃度が測定された。2011 年 7 月の測定結果は先行研究と同等以下の濃度であったが、記録的な高温となった 2012 年夏季の SIGMA-A では、2 週間の観測期間中に積雪表面で積雪不純物濃度の上昇が観測され、その値は先行研究の平均値よりも高濃度であった。また、ハンドオーガで採取された深さ

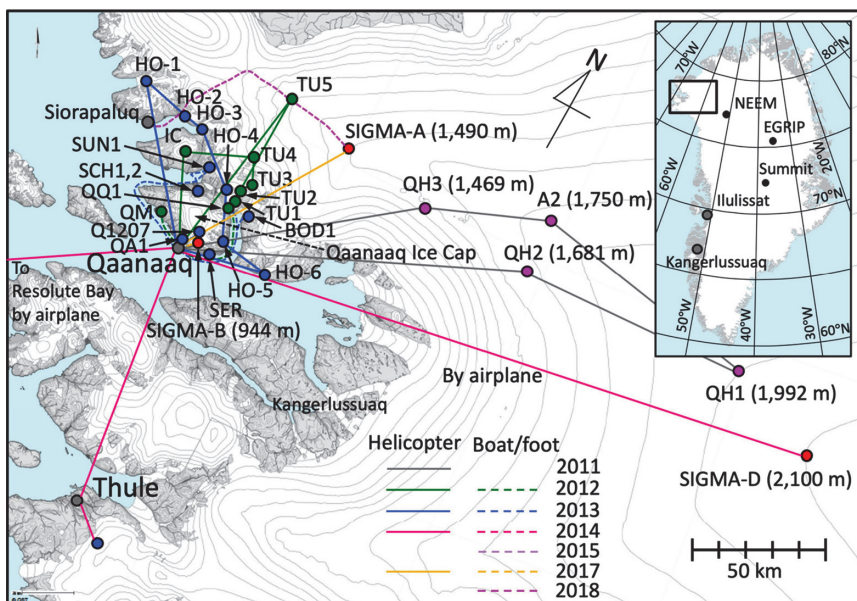


図 2 北西グリーンランドにおける SIGMA プロジェクト関連の観測地点と移動手段。赤丸印は SIGMA-A, SIGMA-B, SIGMA-D の AWS 地点, 桃色丸印は 2011 年の予備調査地点, 緑丸印と青丸印はそれぞれ 2012 年と 2013 年の生物多点観測地点 (地点名は Aoki *et al.* (2014a) を参照), 2014 年には航空機を利用して SIGMA-D でアイスコア掘削を実施, 2015 年は主に徒歩で SIGMA-B 地点とカナック氷帽で現地観測を実施, 2017 年は SIGMA-A, SIGMA-B 地点で観測を実施, 2018 年はシオラパルクから犬糧で SIGMA-A を往復, 2012-2014 年の Qaanaaq-SIGMA-A 間のヘリコプター往復ルートは図上では重なって表示されている。Aoki *et al.* (2014a) に加筆。

2m の積雪試料からは厚い氷板中で不純物濃度が相対的に高いことが示された。この原因として表面融解と昇華・蒸発による濃縮過程が働いていることが明らかになった (Aoki *et al.*, 2014b)。さらに、長距離輸送されにくい直径 $5\mu\text{m}$ 以上のダスト粒子が多く見つかった。一方、SIGMA-A におけるアルベド観測値に対して積雪不純物効果を扱うことのできる積雪アルベド物理モデル (PBSAM) (Aoki *et al.*, 2011) を用いた感度実験が行われた結果、アルベド低下量は不純物効果により最大約 2% であるのに対し、気温の上昇に伴う積雪粒径増加効果の方が約 10% と大きいことが推定された。

2012 年 7 月 12 日前後に引き起こされたグリーンランド氷床全域での記録的な表面融解イベント (Nghiem *et al.*, 2012) に伴って SIGMA-A でも実際に確認された急激な表面融解の要因について、AWS データと積雪変質モデル SMAP モデル (Niwno *et al.*, 2012) を用いて表面熱収支解析が

行われた。その結果、暖気を伴う下層雲の流入が下向き長波放射量の増加を引き起こし、これが表面融解に重要な役割を担っていたことが明らかになった (Niwno *et al.*, 2015)。図 3 は SIGMA-A で観測された熱収支の解析結果である。Period-1 は晴天が卓越し、Period-2 は曇天でこのとき顕著な表面融解が発生した。Period-1 から Period-2 で、下層雲の流入により短波放射収支 (S_{net}) の減少を凌駕する長波放射収支 (L_{net}) の増加によって、表面融解 (Q_{net}) が進んだと考えられる。さらに、廣瀬ら (2021) は、SIGMA-A における 2012 年-2019 年の長期の AWS データ解析から雪面熱収支の年々変動が大きいことと、その中でも夏季表面融解の大きかった 2012 年は特異な年であったと報告している。このことは SIGMA-B の AWS が位置するカナック氷帽における質量収支解析においても認められた (Tsutaki *et al.*, 2017)。

SIGMA-A で観測された気温と近赤外域アルベドとの関係から、統計的に近赤外域アルベドは気

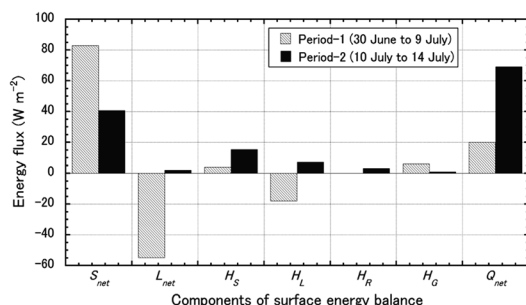


図 3 2012 年 7 月の SIGMA-A における雪面熱収支の解析結果。 S_{net} : 短波放射収支, L_{net} : 長波放射収支, H_S : 顕熱, H_L : 潜熱, H_R : 降水供給熱, H_G : 積雪中熱流量, Q_{net} : 融解熱, 各要素の向きは雪面を加熱する方向を正とする。 Period-1 は晴天が卓越し, Period-2 は曇天が卓越した。 Niwano *et al.* (2015) より引用。

温が -2°C 以上で低下し始めることが明らかになった。そこで, Toyoda *et al.* (2020) は海洋大循環モデルを用いて海水上の積雪アルベドにもこの経験的な関係を適用した場合の感度実験を実施した結果, 海水分布や厚さにもインパクトのあることが分かった。

グリーンランド氷床北西部における降雪中の d-excess と化学成分及び降雪をもたらす水蒸気の起源域周辺の気象・海水状況との関係を明らかにすることを目的として, 2017 年 5-6 月に SIGMA-A において降雪直後の表面雪が採取された。降水中の d-excess が高い日は陸起源物質濃度と人為起源物質濃度が小さく, $\text{Cl}^{-}/\text{Na}^{+}$ が海水比に近い値を示し, 水蒸気及び化学成分が観測サイトに近い地域から供給されたと推測された (黒崎ら, 2018)。また, グリーンランド中西部の海域を起源とする水蒸気が氷床内陸部を経てカナック地域に供給されるプロセスを, 氷床北西部の積雪中の水同位体比の空間分布からも明らかにした (Matoba *et al.*, 2014)。

カナック氷帽の表面に, 大気降水物としてまたは氷河表面の消耗による露出によって付加される不溶性微粒子の空間分布を測定するため, 2017 年 6-7 月にカナック氷帽上の流線上に設置された観測サイトにおいて大気降水物採取, 融解前の季節積雪観測, 氷体試料の採取が行われた。それぞれの試料に含まれる不溶性微粒子の濃度と粒径分布

をコールターカウンターで計測した結果, カナック氷帽消耗域の中流域が暗色化している要因として, 下流域や上流域に比べて氷体中の不溶性微粒子濃度が高いことが示された。また, 水同位体比から氷体の形成時期が完新世であることが示され, 完新世に平衡線高度が上昇した温暖な時期があり, そのときに上流域で不溶性粒子の濃縮が生じ, それが現在, 中流域で露出しているというプロセスが提唱された (Matoba *et al.*, 2020, 羽月, 2019)。

2.3 雪氷微生物

2011 年のカナック氷河予備調査において, Aoki *et al.* (2013) は暗色化した氷河上で分光器を用いて波長別アルベド測定を行った。放射伝達モデルによるアルベド計算値と比較から, クリオコナイトと赤雪の吸収係数を求めた結果, クリオコナイトは可視・近赤外域において, 赤雪は可視域において鉱物性ダストよりも光吸収が大きいことを見いだした。

Takeuchi *et al.* (2014) による 2012 年の雪氷微生物調査で採集された試料分析の結果, グリーンランド裸水域の不純物 (クリオコナイト) は, 北西部, 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。この結果は, 2012 年にカナック氷帽で観測された表面質量収支から求めた degree-day factor が標高 500-900m の雪氷微生物によるアルベド低下の顕著な領域で高くなる (Sugiyama *et al.*, 2014) ことと整合的である。

Uetake *et al.* (2016) は, 同年の微生物の顕微鏡観察から, 暗色物質を形成する微生物のタイプが標高によって変化していることを示した。下流部 (247-441 m) では暗色の色素を持つ緑藻類が多く, 中流部 (668-778 m) ではクリオコナイト粒と呼ばれる直径約 1 mm の団粒を形成する糸状性シアノバクテリアが多かった。この標高帯は光合成で生成された総炭素量が顕著に多く, 上記の degree-day factor が高い標高帯と一致することから, 特に糸状性シアノバクテリアの氷河融解に対する影響がより大きいことが示された。

氷河上の鉱物堆積物は雪氷微生物の栄養塩として重要な役割をもっている (Wientjes *et al.*, 2011). その起源を明らかにするため, Nagatsuka *et al.* (2014, 2016) は 2012 年と 2013 年にカナック周辺域 (図 2) の氷河で採集したクリオコナイトに含まれる鉱物成分の分析を行った. その結果, 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判明した. 一方, Uetake *et al.* (2016) においては, 糸状性シアノバクテリアの氷河上での高度分布と鉱物粒子の量と関連がみられた. 鉱物または鉱物から供給されている成分が細胞の増殖を促しているという仮説を支持し, クリオコナイトの形成とアルベドの低下に寄与している可能性を示した.

Uetake *et al.* (2019) はカナック周辺域の計 10 箇所の氷河で (図 2), クリオコナイト中のバクテリアの群集組成を比較した. その結果, クリオコナイトの成長が進んだ大きな粒では群集組成が互いに類似する一方で, 成長初期の小さなクリオコナイト (直径 30–249 μm) ではそれぞれの氷河によって特徴的な組成となることを示した. これらは氷河によって異なる表面融解水中の栄養塩濃度と関連があり, 近接している氷河であっても, クリオコナイトの初期生成過程が異なり, その後の成長と表面反射率に影響を与えることが示唆された.

Takeuchi *et al.* (2018) は 2012 年 7–8 月にカナック氷帽の裸氷表面のクリオコナイトホールを 15 日間に渡ってタイムラプスカメラで撮影し, ホールの一斉崩壊が 2 回発生する様子を捉えた. ホールの崩壊が起きると, 裸氷面上のクリオコナイトの被覆面積は, 1.0 から 3.4% に増加し, 再びホールが形成された時には, 0.4% まで減少した. 気象条件と比較すると, ホールの崩壊は曇りで降雨または強風時に発生し, 対照的に晴天条件ではホールは発達することが示された. その結果, ホールのサイズは気象条件によって変化し, 曇天, 温暖, 強風の条件は, ホール崩壊を引き起こし, 裸氷表面を暗色化させることが示唆された.

2.4 計測技術開発

本研究では積雪微物理量測定技術の開発や光吸収性エアロゾル成分の分析技術開発が行われた. 1 章で述べたように積雪粒径は近赤外域のアルベドを支配する重要な物理量である. 積雪粒径の高精度測定のため, 積雪粒子へのメタン吸着を利用したガス吸着式積雪比表面積 (SSA) 測定システムが開発された. その結果, 測定精度は 3% を達成し, どのような季節積雪にも対応可能な小型の装置が開発された (Hachikubo *et al.*, 2014). また, 濡れ雪の断面観測時に近赤外域の反射率から含水率を求める手法も開発された (Yamaguchi *et al.*, 2014b).

光吸収性エアロゾル成分の分析技術開発では, 積雪中の BC 濃度を分析するための熱・光学式のカーボン分析装置 OC-EC (Sunset Laboratory 社製, 米国) による測定法が改良された. この測定法では, 従来積雪を融解し, 石英フィルターで濾過したときに補足率が低下するという問題があった. これを長期の観測において凝集剤を用いて補足率を求め, それによって濃度を補正する方法が開発された (Kuchiki *et al.*, 2015).

大気エアロゾル粒子が氷晶核や雪氷中の不純物となるプロセスの理解に資する顕微鏡学的観察方法も開発された. まず, 電子顕微鏡を用いてグリーンランド周辺の上空で採取した大気エアロゾルの分析を行い, 氷晶核能との比較が行われた. その結果, 海塩や海からの有機物が氷晶核になりうる可能性が示唆された (Hartmann *et al.*, 2020). 次に, 森林火災から生じる BC やブラウンカーボンは雪氷暗色化の原因となりうるため, Adachi *et al.* (2019) はブラウンカーボンの成因を顕微鏡学的手法により解明した. さらに, 雪氷の昇華観察方法を開発し, 透過電子顕微鏡で雪氷中に存在していた BC 粒子の混合状態の観察を可能とし, BC がダストや海塩と混合している様子が明らかになった.

3. アイスコア掘削

3.1 掘削の概要

SIGMA プロジェクトでは 3 本のアイスコア掘削が実施された (表 1). 2012 年と 2017 年にアイスコアが採取された SIGMA-A は標高が 1490 m

とアイスコアが掘削される地点としては低く、海に近い沿岸部であることが特色である。夏季に表面融解が生じる浸透帯に位置するため化学シグナルによる環境復元が複雑になるが、積雪表面の融解量自体や積雪の表面融解に伴う積雪中の光吸収性不純物の濃縮過程の時系列変化を復元すること、沿岸部に居住地があるグリーンランド住民の生活環境に関わる環境変動を復元することが期待でき、SIGMA-A が掘削サイトに選定された。2014 年にアイスコアが掘削された SIGMA-D は、この地域の最大のカービング氷河である Tracy 氷河と Heilprin 氷河の涵養域における質量収支の時系列変化の復元を目的に、これらの氷河の上流部に位置するグリーンランド氷床の谷の部分に設定された。以下に、それぞれのアイスコアから得られた結果を記す。

3.2 2012 年 SIGMA-A アイスコア

グリーンランド氷床北西部における数十年間の表面質量収支を明らかにすることを目的に、2012 年 7 月に SIGMA-A (図 2) において深さ 19 m (1975 年頃) のアイスコアが採取された (表 1)。このアイスコアの浅部は表面融解の影響を受けた氷板やざらめ雪層で構成されているのに対し、深部は乾雪で構成されていた。このアイスコアから見積もられた年間の表面質量収支は、融解の影響が大きくなる 2001 年以降に減少していた。SIGMA-A は 20 m 深の雪温が -20°C と十分に低く (Yamaguchi *et al.*, 2014a), 夏季に表面で生じた融解水が積雪内に浸透して再凍結して氷板を形成する、いわゆる浸透帯に属する (Benson, 1960)。氷体温度が充分低いため、融解水が積雪カラムから流出することは通常は考えづらい。しかし、この地域では近年降水量の増加が観測されているこ

表 1 SIGMA-A 及び SIGMA-D におけるアイスコア掘採条件.

	SIGMA-A (2012)	SIGMA-D(2014)	SIGMA-A (2017)
場所	78°03'06"N, 67°37'42"W	77°38'10"N, 59°07'12"W	78°03'06"N, 67°37'42"W
標高	1490 m a.s.l.	2100 m a.s.l.	1490 m a.s.l.
掘削期間	2012 年 7 月 3 日, 6 日	2014 年 5 月 5 日~5 月 20 日	2017 年 5 月 23 日~5 月 28 日
掘削時気温範囲	$-2 \sim 2^{\circ}\text{C}$	$-32 \sim -10^{\circ}\text{C}$	$-17 \sim -5^{\circ}\text{C}$
掘削機	ハンドオーガー (北大低温研)	浅層メカニカルドリル (地球工学)	Dokodemo Drill II (北大低温研)
深度	19 m	222.55 m	60 m
年代	1975-2011	約 1200-2014	1903-2016
メンバー	的場, 山口, 山崎, 青木 (庭野, 谷川)	本山, 山崎, 的場, 藤田, 小室, 箕輪, 大沼	的場, 飯塚, 黒崎, 山崎 (庭野, 谷川)
分析項目	密度, 層位, 水同位体比, 溶存イオン濃度, EC/OC 濃度	密度, 層位, 水同位体比, 溶存イオン濃度, BC 濃度, 不溶性微粒子濃度, Nd, Sr 同位体比, 重金属濃度	密度, 層位, 水同位体比, 溶存イオン濃度, BC 濃度, 不溶性微粒子濃度, 重金属濃度, 臭素濃度, 近赤外線反射率, 塩微粒子の化学組成, 微粒子の形態観察
参考文献	Aoki <i>et al.</i> (2014a), Yamaguchi <i>et al.</i> (2014a), 的場ら (2017)	Matoba <i>et al.</i> (2015), 門田 (2016), Goto-Azuma <i>et al.</i> (2020), ¹ Nagatsuka <i>et al.</i> (submitted to Clim. Past)	黒崎 (2019), 川上 (2020), Matoba <i>et al.</i> (2018), Kurosaki <i>et al.</i> (2020), ² Fujita <i>et al.</i> (submitted to Earth Space Sci.)

¹ Nagatsuka, N., Goto-Azuma, K., Tsushima, A., Fujita, K., Matoba, S., Onuma, Y., Kadota, M., Minowa, M., Komuro, Y., Motoyama, H. and Aoki, T.: Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years. *Clim. Past*, in review, 2021.

² Fujita, K., Matoba, S., Iizuka, Y., Takeuchi, N., Tsushima, A., Kurosaki, Y. and Aoki, T.: Physically based summer temperature reconstruction from melt layers in ice cores. *Earth Space Sci.*, in review, 2021.

とから, SIGMA-A コアでは表面融解水の流出が生じていた可能性が示された (的場ら, 2017).

3.3 SIGMA-D アイスコア

本研究で掘削された 3 本のアイスコアのうち最深のものは 2014 年 5 月に SIGMA-D (図 2) で掘削された深さ 223 m (A.D.1200 年頃) の試料である (Matoba *et al.*, 2015) (表 1). この試料の一部を現地で融解した水試料を国内へ輸送し, 水同位体比, 溶存イオン主成分が定量された. 水同位体比は明瞭な季節変動を示し, ピークの数から年層が決定され, そのピーク間の距離から年間涵養量を求められた (¹Nagatsuka *et al.*, submitted to Clim. Past). その結果, 1660 年から現在までの平均涵養量は $0.25 \text{ m w.eq yr}^{-1}$ で, 10 年規模で変動したが小氷期の終焉前後では大きく変化しなかった (図 4). 陸起源物質である非海塩性カルシウムは, 秋から冬にかけてピークを示し, 近傍の露岩域を起源としていることが推定される.

BC 濃度は冷凍で持ち帰ったアイスコア試料の深度 113 m (A.D.1660 年) までをアイスコア連続融解・分析装置 (CFA) とレーザー誘起白熱法を用いた BC 測定装置 SP2 (Droplet Measurement Technology 社, 米国) によって分析された. BC の質量濃度は, 1870 年頃から増加し始めたが, 1910–1920 年にピークを迎え, その後減少に転じた. 1870 年頃からの濃度の増加は, 化石燃料の燃焼によって発生する人為起源の BC がグリーンランドに流入したためであると考えられる. 濃度の増加に伴って 1 粒子当たりの質量も増加したが, グリーンランドに到達する人為起源の BC の粒径が自然起源のものよりも大きいためと考えられる (Goto-Azuma *et al.*, 2020).

3.4 2017 年 SIGMA-A アイスコア

2017 年 5 月に SIGMA-A における 2 度目のアイスコア掘削が行われ, 60 m の試料が採取された (Matoba *et al.*, 2018). アイスコア試料は冷凍で国内に輸送され, 以下の物理化学解析が実施さ

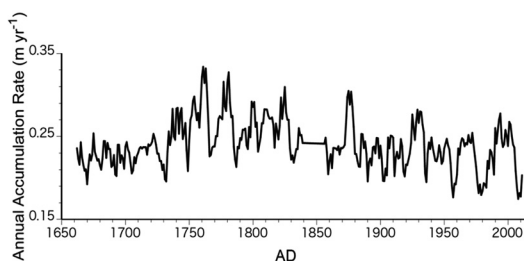


図 4 SIGMA-D アイスコアから分析された水同位体比から求めた年間涵養量 (水当量) の時間変化.

れた. アイスコアの層序が目視観察と近赤外線反射率によって計測され, 融解再凍結層, ざらめ雪層が検出された. X 線透過法によってアイスコアの密度プロファイルが求められた. 2–5 cm 間隔で試料が分割され融解後, 水同位体比, 溶存イオン主成分濃度, 臭化物イオン濃度, 不溶性微粒子濃度と粒径分布が計測された. 本アイスコア試料中の水同位体比および溶存化学種濃度の季節変動と火山と水爆実験の示準層を用いてアイスコアの年代が決定された (Kurosaki *et al.*, 2020). その結果, アイスコアの 60 m 深が 1903 年に相当した. また, アイスコアから求めた年間表面質量収支と, バフィン湾から SIGMA-A に輸送される空気塊中の水蒸気積算量と相関があることを示し, SIGMA-A アイスコアが局所的な環境変動を反映したシグナルを持つ可能性が示された. また, アイスコア中の d-excess の変動がバフィン湾の海水面積変動と相関があることが示され, 1903 年以降の海水面積変動が復元された. その結果, 北半球の温暖化が生じた 1920 年代に先んじて 1900–1920 年代に海水面積が減少していることが分かり, その理由の一つとして中緯度域からバフィン湾へ海洋中の熱輸送が増加したことが示唆された (Kurosaki *et al.*, 2020).

同アイスコア試料の X 線密度から厚さ 1 mm 以上の氷板が 243 層確認され, 氷板内に直径が 30 μm を超える硫酸塩不純物が存在していることが明らかとなった. 北極の温暖化のため, 1903 年から 1999 年にくらべて, 2000 年代のフィルムには厚さ 150 mm 以上の氷板が存在し, その氷板には数 mm にもなる不純物が存在していることが明らかになった. また, X 線密度と近赤外反射率の

¹ Nagatsuka, N., Goto-Azuma, K., Tsushima, A., Fujita, K., Matoba, S., Onuma, Y., Kadota, M., Minowa, M., Komuro, Y., Motoyama, H. and Aoki, T.: Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years, *Clim. Past*, in review, 2021.

関係から、ざらめ雪層を検出し、2000 年代のフィレンには低密度にもかかわらず比表面積が小さい層が検出された。この層は厚い氷板形成のために融解水が大規模に流出した層であると考えられる(川上, 2020)。

4. 衛星観測

4.1 アルゴリズム開発

グリーンランド氷床のような広大な領域を研究対象とする場合、衛星リモートセンシングは有効なツールである。本研究では、まず衛星データから積雪粒径や不純物濃度等の物理量を抽出する従来のアルゴリズムやその中で用いる積雪粒子形状モデルが改良された。多波長での衛星リモートセンシングによる積雪不純物・積雪粒径の推定では、現実的な形状・散乱特性を再現する積雪粒子形状モデルを用いた積雪多重散乱計算が重要である。氷雲の衛星リモートセンシング用に開発されたボロノイ凝集体モデル Ishimoto *et al.* (2012) とその変形型のボロノイカラムモデル(ここでは、両者を合わせて「ボロノイ形状モデル」と呼ぶ)が、それぞれ変態した積雪と新雪を表現する粒子形状モデルとして有効であると考えられた。この考えを裏付けるため、Ishimoto *et al.* (2018) は X 線マイクロ CT を使った人工雪・自然雪の 3 次元構造データから積雪粒子を分離した後、マーチング・キューブ法(3 次元構造データを多面体データに変換するアルゴリズム)により現実の積雪粒子形状を再現し、SSA などの形状特性やそのサイズ依存性について調べた(図 5a)。また、抽出した積雪粒子の可視・近赤外波長における光散乱特性を幾何光学近似法によって計算し、ボロノイ形状モデルのそれと比較した(図 5b)。X 線マイクロ CT データから抽出した積雪粒子の形状は図 5a のように新雪からしまり・ざらめ雪に変質する過程においてその形状特性が変化し、その形状特性にはサイズ依存性がある。サイズ分布で平均した可視・近赤外波長での粒子散乱特性は有効半径粒子の散乱特性にほぼ一致していた。また、変質した積雪粒子の単散乱位相関数はボロノイ凝集形状に近く、新雪粒子の単散乱位相関数はボロノイ凝集形状とボロノイ・カラム形状の中間的な特性を示す傾向があることが示された。

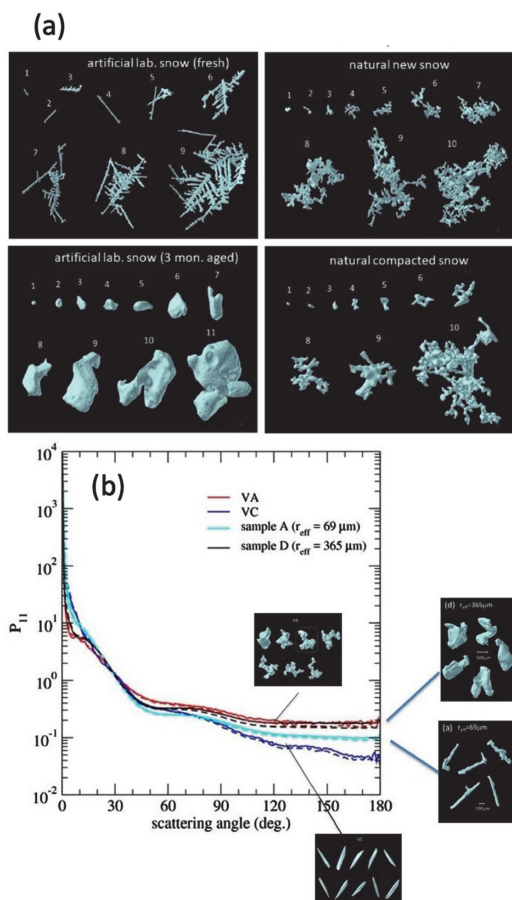


図 5 (a) 積雪 X 線マイクロ CT データから抽出した積雪粒子形状。(左上)人工新雪、(左下)人工雪 3ヶ月保管、(右上)自然新雪、(右下)自然しまり雪。(b) 幾何光学近似法を用いて計算したマイクロ CT 粒子とボロノイ粒子モデルの散乱位相関数の比較。実線は波長 $\lambda = 1,242 \mu\text{m}$ 破線は波長 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ 。VA はボロノイ凝集形状モデル、VC はボロノイカラム形状モデル、サンプル A と D はマイクロ CT 粒子。Ishimoto *et al.* (2018) に加筆。

上記の結果は全天分光日射計データから積雪粒径と積雪不純物濃度を推定するアルゴリズムに適用され、積雪粒径の増加に応じてボロノイ・カラム形状から凝集体形状に変化させることにより、積雪物理量の抽出精度が最も高くなることが示された(Tanikawa *et al.*, 2020)。また、積雪不純物モデルとして、内部混合形と外部混合形の 2 種類のモデルがテストされた結果、涵養期と融雪期、降雪特性の違う場所で使い分ける必要があること

が明らかになった。一方、偏光情報を用いて衛星リモートセンシングによる積雪物理量抽出精度を向上させるため、地上において光学・積雪観測データを取得し、アルゴリズム改良の可能性が検討された。2012 年 7 月に SIGMA-A において、雪面反射光の波長別偏光度が測定され、波長依存性、反射角依存性、積雪粒径依存性について調査された。その結果、波長 $1.6\ \mu\text{m}$ などの短波長赤外域の偏光情報を用いることで、積雪表面粒径の精度向上が期待できることが示された (Tanikawa *et al.*, 2014)。この他、積雪物理量の抽出方法として、機械学習の 1 つであるニューラルネットワーク関数と最適推定法を組み合わせた方法を採用し、全天分光日射計データを用いてその有効性を確認した (Tanikawa *et al.*, 2015)。この方法は、従来の方法よりも計算速度が早く効率的な解法を与えるため、気候変動観測衛星 (GCOM-C) の多波長光学放射計 (SGLI) を用いた積雪物理量抽出アルゴリズム開発の参考となった。

4.2 雪氷物理量の抽出結果

4.1 章で述べた積雪粒子形状モデルを用いて実際の衛星データからグリーンランド氷床上の積雪物理量が抽出された。また、衛星データの複数のバンド (波長帯) における反射率の組み合わせから裸水域・暗色裸水域面積変動が抽出された。積雪物理量の抽出に用いた衛星センサは主に米国の Terra/Aqua 衛星の中分解能撮像分光放射計 (MODIS) と前述した日本の GCOM-C 衛星の SGLI センサーである。積雪粒径と積雪不純物濃度は、前述のボロノイ凝集体/カラムモデル (Ishimoto *et al.*, 2018) を積雪粒子散乱モデルとして採用し、北極モデル大気と積雪層における多重散乱放射伝達モデル計算 (Aoki *et al.*, 2000) に基づくアルゴリズムが用いられた。積雪不純物濃度を抽出する際には BC 粒子の内部混合型モデル (Chýlek and Srivastava, 1983) が用いられた。このアルゴリズムを 2000-2019 年の MODIS データに適用し、グリーンランド氷床全域における積雪表面粒径の長期変動を解析した結果、7 月と 8 月の月平均値は増加トレンド (全期間平均値に対してそれぞれ $+5.1\%/10$ 年と $+9.1\%/10$ 年)、9 月は減少トレンド ($-5.5\%/10$ 年) となった。最大値は記録的な表面融解が発生した 2012 年 7 月に記

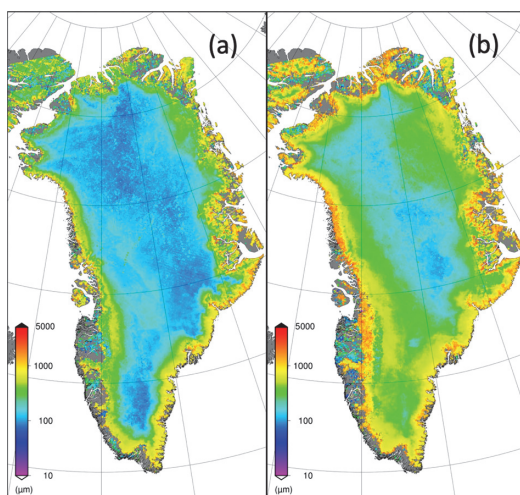


図 6 MODIS データから抽出したグリーンランド氷床における (a) 2000 年 7 月と (b) 2012 年 7 月における積雪表面粒径 (半径) の月平均値。

録した。図 6 は 2000 年 7 月と 2012 年 7 月の表面積雪粒径の月平均値である。2000 年 7 月では沿岸域で粒径が大きいものの、内陸部では $100\ \mu\text{m}$ 以下の小粒子であったが、2012 年 7 月には内陸の広い範囲まで $100\ \mu\text{m}$ 以上の大粒子の分布が広がっていることが示された。この結果は内陸部涵養域におけるアルベド低下を示唆するものである。一方、9 月に積雪粒径が減少トレンドを示す原因として、近年降雪量や降雪頻度が増加している可能性がある。

一方、沿岸の消耗域においては夏季に裸水域が現れ、その一部はアルベドの低い暗色裸水域となる。図 7 は MODIS データから求めたグリーンランド氷床における 2000-2014 年における 7 月の月平均裸水域面積 (図 7a) と暗色裸水域面積 (図 7b) の経年変化を全領域と北東部、北西部、南西部、南東部に分けて示したものである (Shimada *et al.*, 2016)。2000 年に比べ 2012 年には全裸水域面積と暗色裸水域面積はそれぞれ 3.1 倍、7.5 倍に拡大していることが示された。このような消耗域と暗色裸水域の拡大が氷床全体のアルベド低下に大きく寄与しているものと考えられる。

熱赤外域輝度温度が雪質によって変化する (Hori *et al.*, 2013) ことを利用し、MODIS によって観測されたグリーンランド氷床上の熱赤外域輝

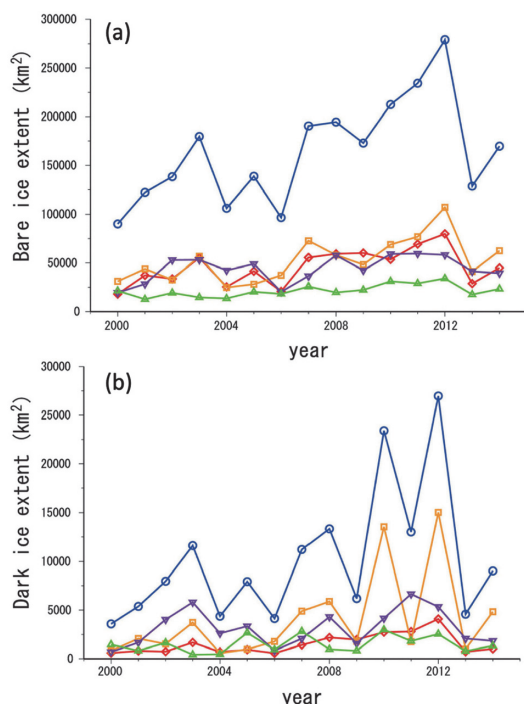


図 7 MODIS データから求めたグリーンランド氷床における 7 月の月平均 (a) 裸氷域面積と (b) 暗色裸氷域面積の経年変化, 青: 全領域, 紫: 北東部, 赤: 北西部, 橙: 南西部, 緑: 南東部. Shimada *et al.* (2016) より引用.

度温度の変動を, 2012 年 7 月の SIGMA-A における積雪断面観測結果と比較し, 表面雪質が表面霜からざらめ雪に変質する過程で, 衛星が観測した輝度温度にも長波長側ほど輝度温度が低下する変動が確認された. これより, 熱赤外域の輝度温度を複数波長帯で計測することによって, 雪面温度と同時に雪質を分類することが可能であると実証された (Hori *et al.*, 2014). さらに, Hori *et al.* (2017) は 1978 年以降の長期の北半球の積雪面積が従来考えられていたよりも季節的にも面積的にも近年の温暖化の影響を強く受けて減少していることを複数の衛星データ解析によって示した.

5. 数値モデリング

5.1 領域気象・気候モデル

SIGMA プロジェクトでは, 水平解像度 5 km の気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) を用いた雪氷フィールド観測支援のための気象予測実験が実

施された (橋本ら, 2016, Hashimoto *et al.*, 2017). さらに, グリーンランド北西部を対象とする水平解像度 1 km の気象予測実験が, SIGMA-A やボードイン氷河終端における夏季の観測と同期して実施され, 観測点の実況をもとに予測精度が検証された. また, これらの実験結果を用いて, 夏のボードイン氷河終端部周辺 20~30 km にわたる領域の局地風系の特徴が調べられた. その結果, 水平解像度 5 km では, 総観規模擾乱の影響が弱く局地的な循環場の影響が大きい場合に風向・風速・気温の予測精度が低くなることが明らかになった. また, 水平解像度 1 km に高解像度化すると, 晴天時においてボードイン氷河終端部周辺に生じる局地風系の日変化を再現できることが示された. さらに, 2016 年 12 月-2019 年 4 月における気象再現実験が行われ, 冬季観測と比較するとともに, シオラパルクやカナックにおける強風イベントの再現実験の結果, 強風の一部がおろし風のメカニズムによって生じており, この種の強風は, 北西に位置する高压部と南東に位置する低压部の間で, 気圧傾度が強まった状態で出現することが明らかになった (Hashimoto *et al.*, 2018, 橋本ら, 2019).

本研究では積雪物理量の変動や大気-雪氷相互作用の解明のため, 国内や SIGMA-A における観測に基づき, 積雪粒径, アルベドなどの積雪物理状態, 熱収支, 質量収支の計算が可能な積雪変質モデル (SMAP) が開発された (Niwano *et al.*, 2012, 2014). SMAP には BC や dust といった積雪不純物によるアルベド変化を計算することのできる PBSAM が組み込まれており, それらの効果を陽に扱うことができる. SMAP は 2 章で述べた 2012 年 7 月の顕著な表面融解イベント時の熱収支解析にも用いられた. さらに, SMAP と JMA-NHM の結合システムである極域気候モデル (NHM-SMAP) が構築された. このモデルによって 2011 年から現在までのグリーンランド領域計算が行われ, SIGMA-A, SIGMA-B の AWS データなどを用いたモデル精度評価の結果, アルベドや地上気温が精度良く再現された. また, 2012 年 7 月の記録的な表面融解イベントに対応する表面融解域の急激な広がりも非常によく再現されることが示された (Niwano *et al.*, 2018).

NHM-SMAP を準リアルタイムで運用することにより, 表面質量収支と表面融解面積の変動を詳細にモニタリングすることが可能となった. 図8はNHM-SMAPによって計算されたグリーンランド氷床の日々の表面質量収支である. 2011-2012 質量収支年と2018-2019 質量収支年に引き起こされた顕著な表面質量損失が再現されている. NHM-SMAP はその後, 1980 年から現在までのグリー

ンランド表面質量収支の長期気候計算に利用され, グリーンランド氷床表面質量収支計算モデル相互比較プロジェクト GrSMBMIP (Fettweis *et al.*, 2020) に参加した. さらに, NHM-SMAP によるグリーンランド氷床における雲放射効果の感度実験が行われた結果, 雲量が増加するほど雪氷表面融解面積は拡大するものの, 雪氷質量損失は雲量の減少によって加速されることが明らかにされた (Niwano *et al.*, 2019).

SIGMA-II プロジェクトから気象庁非静力学モデルにガス-エアロゾル-雲過程を組み込んだ領域気象化学モデル (NHM-Chem) が導入された. 図9はNHM-Chemで考慮される3通りのガス-エアロゾル-雲過程である. NHM-Chemでは, 本研究で扱う代表的な光吸収性エアロゾルであるBCと鉱物ダストの外部混合を個別に取り扱う5-category型(エイトケン, 微小 (soot-free), 微小 (mixed with soot), 粗大 (海塩), 粗大 (ダスト))が新規開発され(図9a), 従来の3-category型(エイトケン, 微小, 粗大)(図9b)との違いが評価された (Kajino *et al.*, 2019a).

次にNHM-ChemとSMAPを結合し, 東アジア領域(モデル格子間隔 $\Delta x=30$ km)と札幌市($\Delta x=6$ km)における積雪中BCの挙動に関する

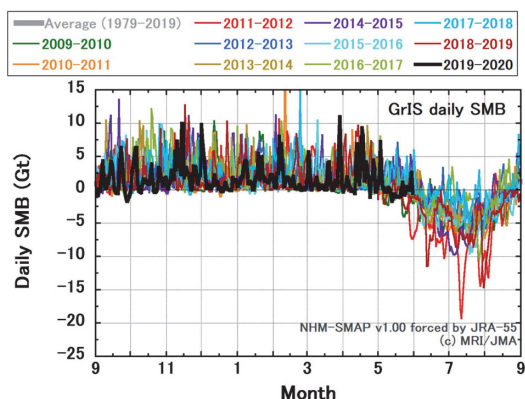


図8 極域気候モデルNHM-SMAPによって計算されたグリーンランド氷床の日々の表面質量収支. 質量収支年(9月から翌年8月まで)に対する値.

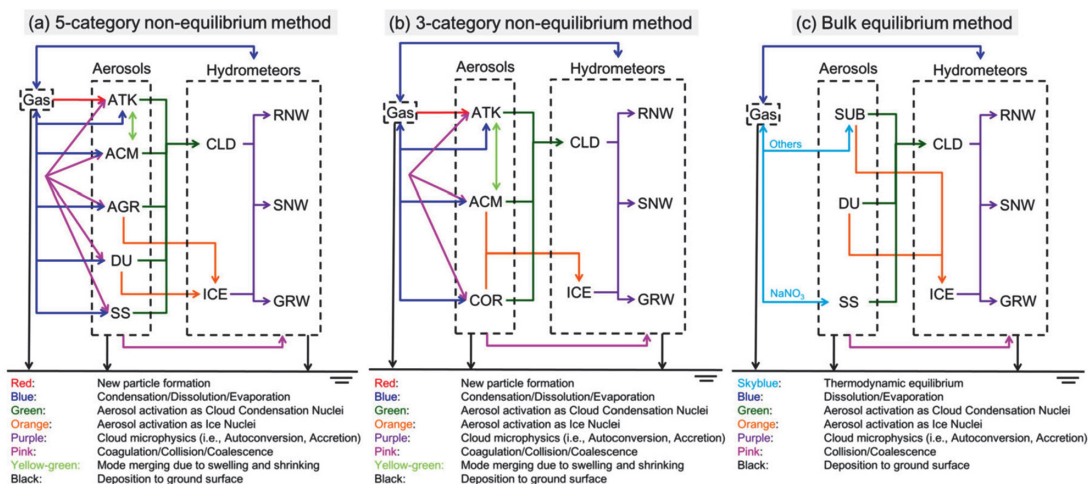


図9 NHM-Chemで考慮されるガス-エアロゾル-雲過程. (a) 5-category法(本モデルの独自表現), (b) 3-category法(グローバルスタンダードな手法), (c) バルク法(軽量で気象庁における現業予報で活用). ATK: エイトケンモード, ACM: 累積モード, AGR: BCと内部混合する累積モード, DU: 鉱物ダスト, SS: 海塩粒子, COR: 粗大粒子, SUB: サブミクロン粒子, CLD: 雲粒, ICE: 雲氷, RNW: 雨滴, SNW: 雪片, GPW: 霰粒子. Kajino *et al.* (2019a) より引用.

計算が行われた。札幌市における積雪中 BC 混合比について観測値と計算値の比較検証を行った結果、モデルは BC 混合比を 1 桁以上過小評価していた。一方、福島第一原発事故により放出された放射性セシウムのマルチ気象モデルアンサンブル実験からも、化学輸送モデルにおいてセシウムの除去過程の過小評価が明らかになった (Kajino *et al.*, 2019b)。現在、本研究グループでは放射性セシウムの膨大な観測データセットを利用して、積雪中 BC を含めた沈着過程モデルの改善に向けた取り組みが行われている。NHM-Chem-SMAP による積雪中の不純物濃度の過小評価についても、改善された沈着過程モデルを用いることで、問題の解決に繋がると考えられる。NHM-Chem-SMAP のグリーンランド氷床への適用については、6 章で議論する。

5.2 地球システムモデル

気象研究所は第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) に向けて大気モデル、海洋モデル、エロゾルモデル、大気化学モデルを結合して構成する地球システムモデル (MRI-ESM1, Yukimoto *et al.*, 2011) を開発した。MRI-ESM1 はその特色として、陸面過程モデル (HAL) に SMAP モデル、その中に PBSAM が組み込まれており、これに全球エロゾルモデル MASINGAR を組み合わせることで積雪上に沈着して不純物となる吸収性エロゾル効果の表現が可能となった。このモデルによる吸収性エロゾルの再現実験、発生源推定実験、及び気候への影響を調べるための感度実験が行われた。1850 年から現在に至るまでの MRI-ESM1 による歴史再現実験における大気中の BC とダストエロゾルの雪氷域への沈着の変動が調査された結果、グリーンランド中心部への BC 沈着は、アイスコアによる観測値の傾向とよく対応していた。沈着量の時間変化は 20 世紀前半では多いものの後半には減少し、SIGMA-D で掘削されたアイスコアの解析結果と整合的であった。一方、積雪微生物の寄与を見積もるための感度実験により、アルベド低下域では融雪開始初期に積雪の昇温に伴い積雪粒径が増大し、雪氷融解量に大きな影響があった (田中ら, 2012)。また、モデル内での BC エロゾル量に対する気温の感度実験を行い、放射を通じた BC の効果が高緯度域で顕著で

あることなどを示唆した (Tanaka *et al.*, 2013)。

MRI-ESM1 に多くの改良を実施することで、第 6 期結合モデル相互比較計画 (CMIP6) に向けた MRI-ESM2 が開発された (Yukimoto *et al.*, 2019)。MRI-ESM2 は、MRI-ESM1 と同様に大気モデル、海洋モデル、エロゾルモデル、大気化学モデルが結合して構成される。この中で、従来の MRI-ESM1 が含む問題点を克服するために、大気中の BC に関して、BC が疎水性から親水性へと変換される変質過程 (Oshima and Koike, 2013)、降水による除去過程、被覆による光吸収の増大効果 (レンズ効果) の導入 (Oshima *et al.*, 2009) などの改良が実施された。MRI-ESM2 では、積雪中の放射伝達で特に重要なアルベドを物理的に計算する PBSAM が結合されているため、BC とダスト粒子が積雪アルベドおよび放射効果に及ぼす影響が従来よりも高精度で評価可能となった。

MRI-ESM2 による現在気候の再現性を確認するために、近年 (2008-2015 年) を対象として、現実的な気象場と海面水温を与える再現計算が実施され、地上・衛星・積雪観測等との比較が行われた。MRI-ESM1 の BC 変質過程スキームを用いた計算では、北極域の地上で観測された大気中 BC 濃度を過小評価し季節変化を再現できなかったのに対し、MRI-ESM2 による計算では BC 濃度の季節変化の再現性が大きく向上した。また、北極圏における積雪中 BC 濃度とグリーンランドでの積雪粒径の広域分布等の再現性についても従来よりも大きく向上した。北極圏での大気上端における BC の直接放射強制力は約 0.2 W m^{-2} (年平均) と推定された。さらに、CMIP6 の枠組みで実施されたモデル相互比較実験 (RFMIP, AerChemMIP) において、MRI-ESM2 を用いて大気上端における人為起源物質の有効放射強制力が推定され、北極域では BC は二酸化炭素に次いで二番目に大きい正の有効放射強制力を持つことが明らかとなった (Oshima *et al.*, 2020)。また北極域では、BC の雪氷面への沈着によるアルベド低下の効果が BC の短波有効放射強制力に及ぼす寄与が大きいことが示された。

5.3 雪氷微生物モデル

2014 年 6-7 月のカナック氷河における雪氷藻類の観測結果を用いて、藻類繁殖の数値モデル化

が行われた。その結果、積雪域の赤雪藻類および裸水域の緑藻は、繁殖率と環境収容力を定義することにより比較的単純なロジスティック・モデルが適用可能であることが示された (Onuma *et al.*, 2018)。しかし、同氷河におけるシアノバクテリアの藻類濃度は時間変化による有意な増加を示さず、シアノバクテリアの増殖に関しては、環境収容力に達していることを前提とし、表面鉱物量をその環境収容力を決めるパラメータとして用いることが現実であると考えられた。次に、雪氷藻類によるアルベド低下効果を計算するため、藻類がもつ色素の波長別吸光係数を PBSAM に導入し、雪氷藻類効果を組み込んだアルベド物理モデルが構築された。図 10 はこのモデルで計算されたアルベドの積雪粒径依存性と鉱物性ダスト濃度依存性である。積雪粒径が大きいほど、または積雪中のダスト濃度が少ないほど、藻類によるアルベド低下効果が大きくなることが示された (Onuma *et al.*, 2020)。このモデルによって、BC、鉱物粒子に加え、藻類のアルベドへの影響を求めることが可能になった。さらに、全球気候モデル MIROC の陸面過程モデル MATSIRO に前述のロジスティック・モデルを組み込み、全球の積雪域における赤雪藻類の繁殖が推定された。その結果、北半球では 4 月以降、主に北極域で藻類の増加がみられ、8 月になると特にグリーンランド氷床南部の 50-1500 km² の範囲で赤雪現象の発生がみられるなどの時空間的特徴が明らかになった。今後はこれらの全球分布を衛星画像等で検証することに加えて、裸水域の藻類数理モデルの実用化を試みる。そして、雪氷上の微生物が引き起こすアルベド低下効果 (バイオアルベド効果, 大沼・竹内, 2021) による北極圏の雪氷融解への寄与を定量化することを目指す。

クリオコナイトホール (CCH) が壊れる際に、その中身が周辺に広がることで表面のアルベドが低下する現象は、グリーンランド氷床表面の暗色化に関してこれまで考慮されていなかった新たなプロセスである (Takeuchi *et al.*, 2018)。CCH の深さ変化は、CCH 底部での融解と表面の水との融解速度差で表すことができるため、CCH 底部に到達する太陽放射を考慮した CCH モデルを開発し、これまでに観測されている CCH の深さの

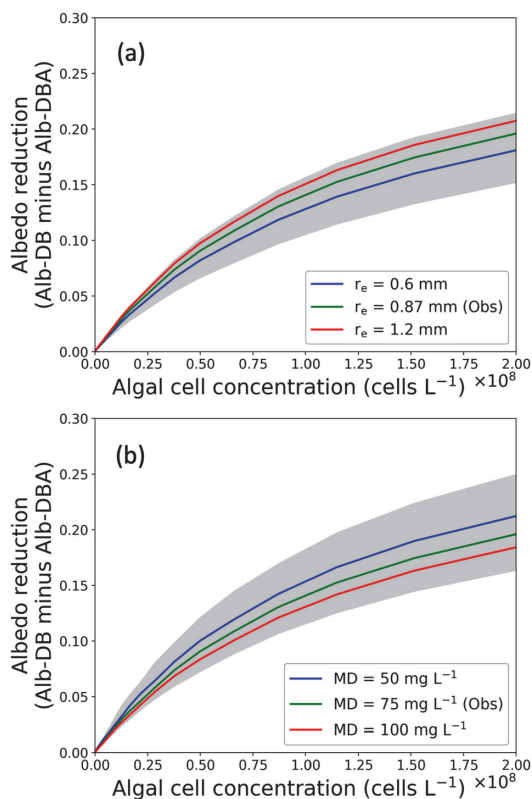


図 10 積雪アルベド物理モデルを用いた雪氷藻類によるアルベド低下量の感度実験結果。(a) 積雪粒径, (b) 鉱物ダスト濃度の依存性。Onuma *et al.* (2020) より引用。

時間変化の再現性について検証すると共に、CCH の深さが浅くなる条件と深くなる条件についてそれぞれ統計解析が行われた。図 11 は CCH モデルで計算された CCH の深さの時間変化の直達日射量依存性と顕熱依存性である。CCH は太陽放射の直達光が強い状況で深くなる傾向にある (図 11 a) 一方、浅くなる時には顕熱が大きい (図 11 b) が示された。

6. 考察と今後に向けて

SIGMA-A・B 両サイトの AWS は 2012 年以降現在まで 8 年間維持され、その観測データは多くの研究に利用されてきた。SIGMA-B は平衡線高度のやや上部に位置し、AWS に対する相対的な雪面の上昇が少ないことと、カナックから徒歩でアプローチが可能なおことから定期的な保守により

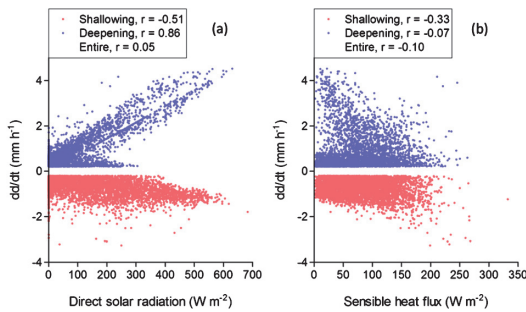


図 11 クリオコナイトホール (CCH) モデルで計算された CCH の深さの時間変化 (dd/dt) の (a) 直達日射量依存性, (b) 顕熱依存性. 青点は CCH が深くなり, 赤点は浅くなる傾向を示している.

欠測データが少ない. 表面状態は暑夏には表面融解が進むことで裸氷が現れるため, 雪氷微生物研究にも利用された. 反対に, 冷夏には積雪状態が維持するという特徴をもつ観測点である. 一方, SIGMA-A は涵養域に位置し, 2012 年の設置以降, 積雪の涵養は 2020 年 1 月には積雪深にして約 6 m に達し, 今後も定期的な保守が不可欠である. SIGMA-A では AWS データを使った研究だけでなく, アイスコア掘削や表面積雪の化学分析など, 多くの研究に利用されてきた. SIGMA-A・B の AWS は現在, 世界気象機関 (WMO) の全球雪氷圏監視計画 (GCW) の CryoNet サイト (<https://globalcryospherewatch.org/cryonet/>) に登録されている. しかしながら, これらの AWS は 2017 年のセンサー交換 (Matoba *et al.*, 2018) と 2018 年の着雪除去作業 (庭野ら, 2018) 以降保守ができていない状況である. このため, 一部のセンサーが劣化や着雪により主に冬季に欠測が発生し, 品質管理・補正などの技術開発が進められている. 今後, 新型コロナウイルスの影響で長期間保守ができない場合, AWS による自動観測が完全停止することが懸念される. SIGMA-A・B の AWS は, 今後も温暖化の影響監視や各種プロセス研究, モデル・衛星プロダクト検証のために長期の観測継続が望まれる.

グリーンランド氷床上の消耗域では, アルベドの低い暗色裸氷域が存在し, 表面を覆っているクリオコナイトの増殖には栄養塩となる鉱物性ダストが必要である. Nagatsuka *et al.* (2014, 2016) は

氷河上堆積物の分析からその起源として周辺域からの輸送を示唆する結果を得た. 一方, Aoki *et al.* (2014b) は SIGMA-A の表面積雪中に, 直径 5 μm 以上のダスト粒子を多く確認している. このサイズのダスト粒子はアジアなどの遠方起源から長距離輸送されにくいいため, やはり周辺域起源を示唆するものである. 実際, 中西部の Kangerlussuaq 周辺の河川に沿った土砂の堆積域からダストストームが発生すること確認されている (Bullard and Mockford, 2018). さらに, 大気中のダスト濃度が現在よりも高かったと考えられる氷期に, 氷床表面にダスト粒子が現在よりも多く供給されていた可能性がある. これらの推定を確認するためのさらなる研究が必要である.

2018 年 7 月には中西部 Kangerlussuaq エリアの暗色裸氷域でヘリコプターを利用した雪氷微生物とアルベドの機動観測が実施された. 残念ながら直前にこの時期には珍しい降雪があり, 訪れた 3 箇所の観測点全てが積雪で覆われていたため, 自然状態での暗色裸氷面の波長別アルベドは観測できなかった. 今後も暗色化の最も進んだ地域での機動観測を実施し, 衛星観測の検証, 生物学的分析, プロセスモデル開発等を進める必要である.

積雪の衛星リモートセンシングに関してはボロノイ粒子形状モデル (Ishimoto *et al.*, 2018) の開発により, 高精度の積雪物理量抽出の見通しが立った. 一方, 裸氷域に関しては, 裸氷面そのものが一般に不規則であること, 表面が数ミリ~十数ミリの氷粒子で覆われていることが多いこと, 光学特性が十分知られていない雪氷微生物の影響があるなどの問題が残されているため, 今後新しい放射伝達モデルの開発などを通して, アルゴリズム開発を進める必要がある. さらに, 積雪粒径等の物理量の衛星観測結果については, グリーンランド全域平均の年々変動を解析してきたが, 今後, 領域毎の違いやその要因について解析を進めることが変動メカニズムの解明にとって必要であろう.

アイスコアの掘削は準備, 実施, 解析の全期間を含めると多くの時間と予算を必要とする. また, その技術を有する研究者の数も限られている. このため, 本プロジェクトにおいても千年スケールのアイスコアは 1 本しか掘削できなかった. こ

の貴重なコアの解析は今後も継続される予定である。一方、本プロジェクトにおいて、軽量の掘削機とコンパクトな観測装備を用い、比較的アクセスが容易な氷床沿岸部でアイスコアを採取すれば、100年程度の局所的な環境変化を復元できるアイスコアを小規模な観測で採取することができた。アイスコアから化学成分だけでなく、海水などの環境変動との関係が見出された。今後も掘削地点を工夫することにより、新たな環境変動を再現できる可能性があり、現地観測や数値モデルと連携した研究の推進が必要である。

雪氷を含む数値モデリングは本プロジェクトで最も進展した分野のひとつであろう。ここでは、PBSAM, SMAP, NHM-SMAP, NHM-Chem, MRI-ESM1, MRI-ESM2, といった様々な次元、時間、空間スケールのモデルが開発・利用されてきた。それに加え、雪氷藻類繁殖のロジスティック・モデル、雪氷藻類効果を組み込んだPBSAM, CCHモデルなど新しいプロセスモデルも開発された。これらのプロセスモデルは領域モデルや地球システムモデルに組み込むことが可能なため、新たな研究の進展が期待できる。

NHM-SMAPについては、現在、氷河流域毎・涵養域・消耗域別の表面質量収支変動解析システム、氷床上の代表的観測拠点におけるモデル計算結果時系列抽出システム、表面融解面積計算機能、MODIS衛星抽出の月平均表層粒径とモデル計算結果を比較するための検証システム、MODISアルベドによるNHM-SMAPモデル制約実験システムなどが開発中である。

さらに、NHM-Chem-SMAPについては北半球輸送計算を可能にするために、ポーラステレオ座標系への対応及び全球インベントリの追加実装を行い、北半球(90km)-グリーンランド(15km)のネステイング計算(高い水平解像度での計算結果を得るために、対象領域を含む広い領域で低解像度計算を行い、その結果を境界条件として対象領域において高解像度計算を行う方法)が可能となった。今後、雪氷面へのBCと鉱物ダスト沈着によるアルベド低下に伴うグリーンランド氷床質量損失の計算が計画されている。また、ダストに関しては長距離輸送成分とグリーンランド近傍からのローカルダスト由来の成分を見積もり、質量

損失への寄与が計算される計画である。

上に述べてきたように、グリーンランドの研究には長期の継続的観測が重要である。一方で多額の予算を必要とする。このため、多数の研究者を結集したプロジェクトで効率化を図る必要がある。2020年6月から北極域研究加速プロジェクト(ArCS II)プロジェクト(2020-2024年度)が開始された。その中の戦略目標①雪氷課題「急激な温暖化に伴う雪氷圏変動の実態把握と変動メカニズムの解明」では、SIGMA, ArCS及び関連プロジェクトの観測・分析・モデル資産を受け継ぐ形で以下の3つのサブ課題による研究が計画されている: サブ課題1「氷床・氷河・季節積雪変動の実態把握とメカニズム解明」、サブ課題2「氷床・氷河・季節積雪変動の実態把握とメカニズム解明」、サブ課題3:「季節海水域における雪氷-大気間の物質・水循環解明とその気候への影響評価」。ArCS II雪氷課題においても現地観測、アイスコア掘削・分析、衛星観測、数値モデリングの相互連携による研究の進展が期待される。

7. 人材育成

現在の日本における自然科学分野の大きな問題のひとつが人材不足である。グリーンランドの現地観測においても長期間現地に赴くことができる研究者の数は限られ、学生が現場で重要な役割を担ってきた。それら学生や若手の研究者にとっては、現場での実践的経験は非常に貴重なものであった。また、現地観測データは、博士論文、修士論文、卒業論文等に大いに寄与した。SIGMA・SIGMA-IIプロジェクト及び関連研究課題によって、博士8名(論文博士を含む)、修士31名、学士15名が輩出された。さらに、褒賞関係では日本雪氷学会学術賞1件、技術賞1件、平田賞5件、論文賞4件、関東以西支部論文賞1件、北海道支部北海道雪氷賞2件、雪氷研究大会等の優秀発表賞5件、中谷吉郎科学奨励賞1件、北海道大学大塚賞1件の受賞者を数えた。このように本プロジェクト及び関連研究課題では自然科学分野の人材育成に大きく寄与したといえる。今後も人材育成の観点をもちつつ研究を推進することが重要であろう。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 (JP23221004, JP26701004, JP15H01733, JP16H01772, JP26257201, JP26247078, JP26241020, JP17K12817, JP17KK0017, JP18H05054, JP18H03363, JP18H05292, JP19H01143, JP20H04982), 環境省地球環境保全試験研究費, JAXA 第 2-4 回地球環境変動観測ミッション (GCOM), JAXA 第 2 回地球観測公募, ArCS 北極域研究推進プロジェクト (ArCS), (独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20172003, JPMEERF20202003, JPMEERF20205001), 北極域研究加速プロジェクト (ArCS II) JPMXD1420318865, 北海道大学低温科学研究所共同研究 (2012~2018 年度) からの助成を受けて実施された。本研究の実施にあたり, 下記の方々に深く感謝する: 兒玉裕二, 小室悠紀, 對馬あかね, 箕輪昌紘, 保坂征宏, 鈴木利孝, 岩田幸良, 下田星児, 杉浦幸之助, 本吉弘岐, 本谷研, 田中聡太, 門田 萌, 柴田麻衣, 羽月 稜, 榊原大貴, 安藤卓人, 堀 彰, 宮本 淳, 齊藤 健, 藤田秀二, 新堀邦夫, 岩崎圭祐。また, グリーンランドでの現地観測の実施にあたり協力頂いたグリーンランド州政府, 在デンマーク日本大使館, ヘリコプターのチャーターで協力頂いたエアグリーンランド, カナダのレゾリュートから SIGMA-D への航空機運航及びアイスコア輸送で協力頂いた Kenn Bohrek Air Ltd. 及び Polar Continental Shelf Program, 日本からの物資輸送その他で協力頂いた東洋トランス株式会社, 一般社団法人・北極観測支援機構, (株)地球工学研究所, (株)九州オリンピア工業に心よりお礼申し上げる。カナック村では下記の方々に現地観測や生活面で世話になった。深く感謝する: Panigpak & Saki Daorana 夫妻, 故 Finn Hansen, Hans Jensen, Navarana K'avigak, Jesper Olsen, Lars Wille, Ole Mathiesen, 故 Svend Erik Ascanius, Paul Martin Lund, Merete Laubjerg, Sofie Jensen, 大島育雄, 中山由美, 澤野林太郎。

本研究で収集した SIGMA AWS 観測データは国立極地研究所の北極域データアーカイブ (ADS) (<https://ads.nipr.ac.jp/kiwa/Summary.action?selectFile=A20140714-002>) から公開され

ている。

文 献

- Adachi, K., Sedlacek III, A.J., Kleinman, L., Springston, S.R., Wang J., Chand, D., Hubbe, J.M., Shilling, J.E., Onasch, T.B., Kinase, T., Sakata, K., Takahashi, Y. and Buseck, P.R. (2019): Spherical tarball particles form through rapid chemical and physical changes of organic matter in biomass-burning smoke. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **116**, 19,336-19,341, doi:10.1073/pnas.1900129116.
- Aoki, T. (2012): Reflection properties of snow surfaces. *Light Scattering Reviews* 7, edited by A.A. Kokhanovsky, Praxis Publishing, 151-187.
- Aoki, T., Aoki, T., Fukabori, M., Hachikubo, A., Tachibana, Y. and Nishio, F. (2000): Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bidirectional reflectance of snow surface. *J. Geophys. Res.*, **105**, 10,219-10,236, doi:10.1029/1999JD901122.
- Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Kodama, Y., Hosaka, M. and Tanaka, T. (2011): Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, **116**, D11114, doi: 10.1029/2010JD015507.
- Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Matoba, S., Uetake, J., Masuda, K. and Ishimoto, H. (2013): Numerical simulation of spectral albedos of glacier surfaces covered with glacial microbes in northwestern Greenland. *RADIATION PROCESSES IN THE ATMOSPHERE AND OCEAN (IRS2012)*, Robert Cahalan and Jürgen Fischer (Eds), *AIP Conf. Proc.*, **1531**, 176-179, doi:10.1063/1.4804735.
- Aoki, T., Matoba, S., Uetake, J., Takeuchi, N. and Motoyama, H. (2014a): 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**, 3-20, doi:10.5331/bgr.32.3.
- Aoki, T., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Niwano, M., Kuchiki, K., Adachi, K., Uetake, J., Motoyama, H. and Hori M. (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.
- 青木輝夫, 庭野匡臣, 谷川朋範, 橋本明弘, 的場澄人, 杉山 慎, 竹内 望, 本山秀明, 永塚尚子, 植竹 淳, 堀 雅裕, 島田利元, 山口 悟, 藤田耕史, 山崎哲秀

- (2017): 「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. 極地, **53**, 34-40.
- Benson, C.S. (1960): Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland ice sheet. Dissertation (Ph. D.), California Institute of Technology, doi:10.7907/G7V2-0T57.
- Box, J.E., Fettweis, X., Stroeve, J.C., Tedesco, M., Hall, D. K. and Steffen K. (2012): Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *The Cryosphere*, **6**, 821-839, doi:10.5194/tc-6-821-2012.
- Bullard, J. and Mockford, T. (2018): Seasonal and decadal variability of dust observations in the Kangerlussuaq area, west Greenland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **50**, e1415854, doi: 10.1080/15230430.2017.1415854.
- Chýlek, P. and Srivastava, V. (1983): Dielectric constant of a composite inhomogeneous medium. *Physical Review B*, **27**, 5098-5106, doi:10.1103/PhysRevB.27.5098.
- Fettweis, X., Hofer, S., Krebs-Kanzow, U., Amory, C., Aoki, T., Berends, C.J., Born, A., Box, J.E., Delhasse, A., Fujita, K., Gierz, P., Goelzer, H., Hanna, E., Hashimoto, A., Huybrechts, P., Kapsch, M.-L., King, M. D., Kittel, C., Lang, C., Langen, P.L., Lenaerts, J. T. M., Liston, G.E., Lohmann, G., Mernild, S.H., Mikolajewicz, U., Modali, K., Mottram, R.H., Niwano, M., Noël, B., Ryan, J.C., Smith, A., Streffing, J., Tedesco, M., van de Berg, W.J., van den Broeke, M., van de Wal, R.S.W., van Kampenhout, L., Wilton, D., Wouters, B., Ziemen, F. and Zolles, T. (2020): GrSMBMIP: Intercomparison of the modelled 1980-2012 surface mass balance over the Greenland Ice sheet. *The Cryosphere*, **14**, 3935-3958, doi:10.5194/tc-14-3935-2020.
- Goto-Azuma, K., Homma, T., Saruya, T., Nakazawa, F., Komuro, Y., Nagatsuka, N., Hirabayashi, M., Kondo, Y., Koike, M., Aoki, T., Greve, R. and Okuno, J. (2020): Studies on the variability of the Greenland Ice Sheet and climate. *Polar Science*, doi:10.1016/j.polar.2020.100557, in press.
- Hachikubo, A., Yamaguchi, S., Arakawa, H., Tanikawa, T., Hori, M., Sugiura, K., Matoba, S., Niwano, M., Kuchiki, K. and Aoki T. (2014): Effects of temperature and grain type on time variation of snow specific surface area. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 47-53, doi:10.5331/bgr.32.47.
- 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.
- Hashimoto, A., Niwano, M., Aoki, T., Tsutaki, S., Sugiyama, S., Yamasaki, T., Iizuka, Y. and Matoba, S. (2017): Numerical weather prediction system based on JMA-NHM for field observation campaigns on the Greenland ice sheet. *Low Temperature Science*, **75**, 91-104.
- Hashimoto, A., Niwano, M., Yamaguchi, S., Yamasaki T. and Aoki, T. (2018): Numerical simulation of lee-side downslope winds near Siorapaluk in northwest Greenland. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **48**, 5.05-5.06.
- 橋本明弘, 山崎哲秀, 青木輝夫, 庭野匡思, 山口 悟 (2019): グリーンランド北西部シオラパルク・カナックにおける強風の出現特性. 北海道の雪氷, **38**, 81-84.
- Hartmann M., Adachi, K., Eppers, O., Haas, C., Herber, A., Holzinger, R., Hünnerbein, A., Jäkel, E., Jentzsch, C., van Pinxteren, M., Wex, H., Willmes, S. and Stratmann, F. (2020): Wintertime airborne measurements of ice nucleating particles in the high Arctic: a hint to a marine, biogenic source for Ice Nucleating Particles. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087770, doi:10.1029/2020GL087770.
- 羽月 稜 (2019): グリーンランド北西部カナック氷河における汚れ物質の空間分布特性. 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻修士論文, 79 pp.
- Hori, M., Aoki, T., Tanikawa, T., Hachikubo, A., Sugiura, K., Kuchiki, K. and Niwano M. (2013): Modeling angular-dependent spectral emissivity of snow and ice in the thermal infrared atmospheric window. *Appl. Opt.*, **52**, 7243-7255, doi:10.1364/AO.52.007243.
- Hori, M., Aoki, T., Tanikawa, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Yamaguchi, S. and Matoba S. (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.
- Hori, M., Sugiura, K., Kobayashi, K., Aoki, T., Tanikawa, T., Kuchiki, K., Niwano, M. and Enomoto, H. (2017): A 38-year (1978-2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors. *Remote. Sens. Environ.*, **191**, 402-418. doi:10.1016/j.rse.2017.01.023.
- 廣瀬 聡, 青木輝夫, 庭野匡思, 的場澄人, 谷川朋範, 山口 悟, 山崎哲秀 (2021): 北西グリーンランド氷床 SIGMA-A サイトで観測された雪面熱収支の特徴. 雪氷, **83**, 143-154.
- Ishimoto H, Masuda K, Mano Y, Orikasa N., and Uchiyama A. (2012): Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **113**,

- 632-43. doi:10.1016/j.jqsrt.2012.01.017.
- Ishimoto H, Adachi S, Yamaguchi S, Tanikawa T, Aoki T. and Masuda K. (2018): Snow particles extracted from X-ray computed microtomography imagery and their single-scattering properties. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **209**, 113-128. doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.01.021.
- The IMBIE Team (2020): Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, **579**, 233-239, doi: 10.1038/s41586-019-1855-2.
- 門田 萌 (2016) : グリーンランド北西氷床 (SIGMA-D) アイスコア化学解析に基づく小氷期以降の環境変動. 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻修士論文, 48 pp.
- Kajino, M., Deushi, M., Sekiyama, T. T., Oshima, N., Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Ching, J., Hashimoto, A., Yamamoto, T., Ikegami, M., Kamada, A., Miyashita, M., Inomata, Y., Shima, S., Takami, A., Shimizu, A., Hatakeyama, S., Sadanaga, Y., Irie, H., Adachi, K., Zaizen, Y., Igarashi, Y., Ueda, H., Maki T. and Mikami, M. (2019a): NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology - chemistry model: model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 337-374, doi:10.2151/jmsj.2019-020.
- Kajino, M., Sekiyama, T. T., Igarashi, Y., Katata, G., Sawada, M., Adachi, K., Zaizen, Y., Tsuruta, H. and Nakajima, T. (2019b): Deposition and dispersion of radio-caesium released due to the Fukushima nuclear accident: Sensitivity to meteorological models and physical modules. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 1823-1845, doi:10.1029/2018JD028998.
- 川上 薫, (2020) : グリーンランド北西部 SIGMA-A アイスコアの融解再凍結層に含まれる不純物の解析. 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻修士論文, 93 pp.
- Kuchiki, K., Aoki, T., Niwano, M., Matoba, S., Kodama, Y. and Adachi, K. (2015): Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical method and gravimetric methods: Variations during 2007-2013 winters in Sapporo. Japan. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 868-882, doi:10.1002/2014JD022144.
- 黒崎 豊 (2019) : アイスコア中の水同位体比を用いたグリーンランド北西部の海水変動の解明. 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻修士論文, 95 pp.
- 黒崎 豊, 的場澄人, 飯塚芳徳, 庭野匡思, 谷川朋範, 青木輝夫 (2018) : バフィン湾周辺の環境がグリーンランド北西部の降雪中の d-excess と化学成分に与える影響. 雪氷, **80** (6), 515-529.
- Kurosaki, Y., Matoba, S., Iizuka, Y., Niwano, M., Tanikawa, T., Ando, T., Hori, A., Miyamoto, A., Fujita S. and Aoki, T. (2020): Reconstruction of sea ice concentration in northern Baffin Bay using deuterium excess in a coastal ice core from the northwestern Greenland Ice Sheet. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031668, doi:10.1029/2019JD031668.
- Matoba, S., Yamasaki, T., Miyahata, M., and Motoyama, H. (2014): Spatial variations of $\delta^{18}\text{O}$ and ion species in the snowpack of the northwestern Greenland ice sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 79-84, doi:10.5331/bgr.32.79.
- Matoba, S., Motoyama, H., Fujita, K., Yamasaki, T., Minowa, M., Onuma, Y., Komuro, Y., Aoki, T., Yamaguchi, S., Sugiyama, S. and Enomoto H. (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.
- 的場澄人, 山口 悟, 對馬あかね, 青木輝夫, 杉山 慎 (2017) : グリーンランド氷床北西部沿岸部における表面質量収支の変動. 低温科学, **75**, 37-44, doi:10.14943/lowtemsci.75.37.
- Matoba, S., Niwano, M., Tanikawa, T., Iizuka, Y., Yamasaki, T., Kurosaki, Y., Aoki, T., Hashimoto, A., Hosaka, M. and Sugiyama, S. (2018): Field Activities at the SIGMA-A site, northwestern Greenland Ice Sheet, 2017. *Bull. Glaciol. Res.*, **36**, 15-22, doi:10.5331/bgr.18R01.
- Matoba, S., Hazuki, R., Kurosaki, Y. and Aoki, T. (2020): Spatial distribution of the input of insoluble particles into the surface of the Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland. *Front. Earth Science*, **8**: 542557, doi: 10.3389/feart.2020.542557.
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J. and Shimada R. (2014): Mineralogical composition of cryoconite on glaciers in northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 107-114, doi:10.5331/bgr.32.107.
- 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.
- Nghiem, S.V., Hall, D.K., Mote, T.L., Tedesco, M., Albert, M.R., Keegan, K., Shuman, C.A., DiGirolamo, N.E. and Neumann, G. (2012): The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20502, doi:10.1029/2012GL053611.
- 庭野匡思, 山崎哲秀, 山口 悟 (2018) : 北極大槓観測行 2018. 雪氷, **80** (6), 588-592.

- Niwano, M., Hashimoto, A. and Aoki, T. (2019): Cloud-driven modulations of Greenland ice sheet surface melt. *Sci. Rep.*, **9**, 10380, doi:10.1038/s41598-019-46152-5.
- Niwano, M., Aoki, T., Kuchiki, K., Hosaka, M. and Kodama, Y. (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., Aoki, T., Kuchiki, K., Hosaka, M., Kodama, Y., Yamaguchi, S., Motoyoshi, H. and Iwata, Y. (2014): Evaluation of updated physical snowpack model SMAP. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 65–78, doi:10.5331/bgr.32.65.
- Niwano, M., Aoki, T., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Kuchiki, K. and Motoyama, H. (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.
- Niwano, M., Aoki, T., Hashimoto, A., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Fujita, K., Tsushima, A., Iizuka, Y., Shimada, R. and Hori, M. (2018): NHM-SMAP: Spatially and temporally high resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **12**, 635–655, doi:10.5194/tc-12-635-2018.
- 大沼友貴彦, 竹内 望 (2021) : 北極圏の氷河および氷床の融解を加速させるバイオアルベド効果とそのモデル化研究. 雪氷, **83** (1), 55–56.
- Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M. and Aoki, T. (2018): Observations and modelling of algal growth on a snowpack in north-western Greenland. *The Cryosphere*, **12**, 2147–2158, doi:10.5194/tc-12-2147-2018.
- Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M. and Aoki, T. (2020): Physically based model of the contribution of red snow algal cells to temporal changes in albedo in northwest Greenland. *The Cryosphere*, **14**, 2087–2101, doi:10.5194/tc-14-2087-2020.
- Oppenheimer, M., Glavovic, B.C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A.K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R.M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B. and Sebesvari, Z. (2019): *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, edited by H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer, 321–445.
- Oshima, N. and Koike, M. (2013): Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 263–282, doi:10.5194/gmd-6-263-2013.
- Oshima, N., Koike, M., Zhang, Y. and Kondo, Y. (2009): Aging of black carbon in outflow from anthropogenic sources using a mixing state resolved model: 2. Aerosol optical properties and cloud condensation nuclei activities. *J. Geophys. Res.*, **114**, D18202, doi:10.1029/2008JD011681.
- Oshima, N., Yukimoto, S., Deushi, M., Koshiro, T., Kawai, H., Tanaka, T. Y. and Yoshida, K. (2020): Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Prog. Earth. Planet. Sci.*, **7**, 38, doi:10.1186/s40645-020-00348-w.
- Shepherd, A., Ivins, E.R., Geruo, A., Barletta, V.R., Bentley, M.J., Bettadpur, S., Briggs, K.H., Bromwich, D.H., Forsberg, R., Galin, N., Horwath, M., Jacobs, S., Joughin, I., King, M.A., Lenaerts, J.T.M., Li, J., Ligtenberg, S.R.M., Luckman, A., Luthcke, S.B., McMillan, M., Meister, R., Milne, G., Mouginot, J., Muir, A., Nicolas, J.P., Paden, J., Payne, A.J., Pritchard, H., Rignot, E., Rott, H., Sørensen, L.S., Scambos, T.A., Scheuchl, B., Schrama, E.J.O., Smith, B., Sundal, A.V., van Angelen, J.H., van de Berg, W.J., van den Broeke, M.R., Vaughan, D.G., Velicogna, I., Wahr, J., Whitehouse, P.L., Wingham, D.J., Yi, D., Young, D. and Zwally, H.J. (2012): A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, **338**, 1183–1189, doi:10.1126/science.1228102.
- 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.*, **4**, 43, doi:10.3389/feart.2016.00043.
- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S. and Aoki, T. (2014): Initial field observations on Qaanaaq ice cap, 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.
- Takeuchi, N., Sakaki, R., Uetake, J., Nagatsuka, N., Shimada, R., Niwano, M. and Aoki, T. (2018): Temporal variations of cryoconite holes and cryoconite coverage on the ablation ice surface of Qaanaaq Glacier in

- northwest Greenland. *Ann. Glaciol.*, **59**, 21–30, doi:10.1017/aog.2018.19.
- 田中泰宙, 青木輝夫, 坂見智法, 保坂征宏, 足立恭将, 行本誠史, 地球システムモデル開発グループ (2012): 20 世紀再現実験による吸収性エアロゾルによる積雪汚染. 日本気象学会 2012 年秋季大会講演予講集, **102**, 469.
- Tanaka, T. Y. and MRI Earth System Modeling Group, (2013): Climatic effect of black carbon in the MRI global climate model. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **68**, 65–68, doi:10.11483/mritechrepo.68.
- Tanikawa, T., Hori, M., Aoki, T., Hachikubo, A., Kuchiki, K., Niwano, M., Matoba, S., Yamaguchi, S. and Stamnes, K. (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**, 13,946–13,964, doi:10.1002/2014JD022325.
- Tanikawa, T., Li, W., Kuchiki, K., Aoki, T., Hori, M. and Stamnes, K. (2015): Retrieval of snow physical parameters by neural networks and optimal estimation: case study for ground-based spectral radiometer system. *Opt. Express*, **23**, A1442–A1462, doi:10.1364/OE.23.0A1442.
- Tanikawa, T., Kuchiki, K., Aoki, T., Ishimoto, H., Hachikubo, A., Niwano, M., Hosaka, M., Matoba, S., Kodama, Y., Iwata, Y. and Stamnes, K. (2020): Effects of snow grain shape and mixing state of snow impurity on retrieval of snow physical parameters from ground-based optical instrument. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031858, doi:10.1029/2019JD031858.
- Tedesco, M., Fettweis, X., van den Broeke, M. R., van de Wal, R. S. W., Smeets, C. J. P. P., van de Berg, W. J., Serreze, M. C. and Box, J. E. (2011): The role of albedo and accumulation in the 2010 melting record in Greenland. *Environ. Res. Lett.*, **6**, 014005, doi:10.1088/1748-9326/6/1/014005.
- Toyoda, T., Aoki, T., Niwano, M., Tanikawa, T., Urakawa, L. S., Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Hirose, N. and Yamanaka, G. (2020): Impact of observation-based snow albedo parameterization on global ocean simulation results. *Polar Sci.*, **24**, 100521, doi:10.1016/j.polar.2020.100521.
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Aoki, T. and Niwano, M. (2017): Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016. *Ann. Glaciol.*, **58**, 181–192, doi:10.1017/aog.2017.7.
- Uetake, J., Tanaka, S., Segawa, T., Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Motoyama, H. and Aoki, T. (2016): Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland. *FEMS Microbiology Ecology*, **92**, fiw127, doi:10.1093/femsec/fiw127.
- Uetake, J., Nagatsuka, N., Onuma, Y., Takeuchi, N., Motoyama, H. and Aoki, T. (2019): Bacterial community changes with granule size in cryoconite and their susceptibility to exogenous nutrients on NW Greenland glaciers. *FEMS Microbiology Ecology*, **95**, fiz075, doi:10.1093/femsec/fiz075.
- van den Broeke, M. R., Bamber, J., Ettema, J., Rignot, E., Schrama, E., van de Berg, W. J., van Meijgaard, E., Velicogna, I. and Wouters, B. (2009): Partitioning recent Greenland mass loss. *Science*, **326**, 984–986, doi:10.1126/science.1178176.
- Warren, S. G. and Wiscombe, W. J. (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., Van de Wal, R. S. W., Reichert, G. J., Sluijs, A. and Oerlemans, J. (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 Warren, S. G. (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., Matoba, S., Yamazaki, T., Tsushima, A., Niwano, M., Tanikawa, T. and Aoki, T. (2014a): Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 95–105, doi:10.5331/bgr.32.95.
- Yamaguchi, S., Motoyoshi, H., Tanikawa, T., Aoki, T., Niwano, M., Takeuchi, Y. and Endo, Y. (2014b): Application of snow specific surface area measurement using an optical method based on near-infrared reflectance around 900-nm wavelength to wet snow zones in Japan. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 55–64, doi:10.5331/bgr.32.55.
- Yukimoto, S., Yoshimura, H., Hosaka, M., Sakami, T., Tsujino, H., Hirabara, M., Tanaka, T. Y., Deushi, M., Obata, A., Nakano, H., Adachi, Y., Shindo, E., Yabu, S., Ose, T. and Kitoh, A. (2011): Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model description —. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, 88 pp. doi:10.11483/mritechrepo.64.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida,

K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yabu, S., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Obata, A., Adachi, Y. and Ishii, M. (2019): The Meteorological Research Institute Earth System

Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931–965, doi:10.2151/jmsj.2019-051.

Studies on Atmosphere, Snow/Ice, and Glacial Microbes on Greenland Ice Sheet by SIGMA and relevant projects — A linkage to the ArCS II Project —

Teruo AOKI^{1*,2}, Sumito MATOBA³, Masashi NIWANO², Katsuyuki KUCHIKI², Tomonori TANIKAWA²,
Nozomu TAKEUCHI⁴, Satoru YAMAGUCHI⁵, Hideaki MOTOYAMA¹, Koji FUJITA⁶, Tetsuhide YAMASAKI⁷,
Yoshinori IZUKA³, Masahiro HORI⁸, Rigen SHIMADA⁹, Jun UETAKE¹⁰, Naoko NAGATSUKA²,
Yukihiko ONUMA¹¹, Akihiro HASHIMOTO², Hiroshi ISHIMOTO², Taichu Yasumich TANAKA², Naga OSHIMA²,
Mizuo KAJINO², Kouji ADACHI², Yutaka KUROSAKI¹², Shin SUGIYAMA³, Shun TSUTAKI¹,
Kumiko GOTO-AZUMA¹, Akihiro HACHIKUBO¹³, Kaoru KAWAKAMI¹⁴ and Takeshi KINASE²

¹ National Institute of Polar Research, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518

² Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

³ Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, N19W8, Kita-ku, Sapporo, 060-0819

⁴ Graduate School of Science, Chiba University, 1-33, Yayoicho, Inage Ward, Chiba, 263-8522

⁵ Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and
Disaster Resilience, Suyoshi, Nagaoka, 940-0821

⁶ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601

⁷ Avangnaq Arctic Environmental Research Activity Project, Takatsuki, Osaka 596-0094

⁸ School of Sustainable Design, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama, 930-8555

⁹ Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency,
2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505

¹⁰ Colorado State University, Department of Atmospheric Science, 200 West Lake Street,
1371 Campus Delivery, Fort Collins, CO 80523-1371, USA

¹¹ Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 5-1-1 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8574

¹² Remote Sensing Technology Center of Japan, 3-17-1 Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001

¹³ Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami 090-8507

¹⁴ Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, N10W5, Kita-ku, Sapporo, 060-0810

* Corresponding author: aoki.teruo@nipr.ac.jp

Abstract: Currently occurring rapid warming in the Arctic could affect global environmental changes through sea level rise and remote atmospheric effect. The surface melting of the Greenland Ice Sheet (GrIS) involves various uncertainties, which are issues to be elucidated for accurate climate projections. To clarify how the atmosphere, snow/ice, and glacial microbes in the GrIS affect the ice sheet change under global warming, the SIGMA and SIGMA-II projects were conducted from FY2011 to FY2019. In parallel, big Arctic research projects such as GRENE and ArCS were also done, which accelerated the Japanese Greenland researches. This paper describes the research results of the SIGMA and SIGMA-II projects as well as the related research projects in the categories of (1) in-situ observations of the atmosphere, snow/ice, and glacial microbes, (2) ice core drilling, (3) satellite observation, and (4) numerical modeling. Furthermore, we discuss current issues in these studies, a linkage to the Cryosphere subject of recently launched ArCS II Project, and the importance of capacity building.

(2020 年 7 月 1 日受付, 2020 年 8 月 31 日改稿受付, 2020 年 11 月 21 日再改稿受付,
2020 年 11 月 23 日受理)