

## 総説

# 氷床表面質量収支の実態とそのモデリングの試み： 2020年夏最新版

庭野匡思<sup>1\*</sup>, 青木輝夫<sup>2,1</sup>, 橋本明弘<sup>1</sup>, 大島 長<sup>1</sup>, 梶野瑞王<sup>1</sup>,  
大沼友貴彦<sup>3</sup>, 藤田耕史<sup>4</sup>, 山口 悟<sup>5</sup>, 島田利元<sup>6</sup>, 竹内 望<sup>7</sup>,  
津 澁 俊<sup>8,2</sup>, 本山秀明<sup>2</sup>, 石井正好<sup>1</sup>, 杉山 慎<sup>9</sup>,  
平沢尚彦<sup>2</sup>, 阿部彩子<sup>8,2</sup>

### 要 旨

近年の極域での顕著な気温上昇に伴って、グリーンランド氷床では、雪氷融解とそれに起因する表面質量収支の減少が急速に進行している。南極氷床においても、将来の更なる温暖化に伴って同様の変化が引き起こされる可能性が考えられている。しかし、氷床の広大さゆえに、その詳細な実態と背景にあるメカニズムには不明な点が多い。我々は、この問題を解決する（プロセスを理解しモデル化するため）、特に2010年代以降、現地観測と最先端の数値モデリングを駆使した挑戦を続けてきている。本総説では、表面質量収支に焦点を絞り、グリーンランド氷床と南極氷床の昨今の表面質量収支の実態をレビューする。続いて、表面質量収支を計算することが可能な世界各国の最新の各種数値モデルを俯瞰する。その後、現在のモデルの限界・問題点を提示し、将来の研究の方向性を議論する。

キーワード：グリーンランド、南極、氷床、表面熱収支、表面質量収支、温暖化

Key words: Greenland, Antarctica, ice sheet, surface energy balance, surface mass balance, Global warming

## 1. はじめに

近年の地球温暖化に伴い、極域では著しい気温上昇が観測されている。この現象は、Manabe and Stouffer (1980) 以来、極域温暖化増幅 (Polar Amplification) として広く知られているが、南極域よ

りも北極域においてより顕著である (Overland *et al.*, 2017; Box *et al.*, 2019; Meredith *et al.*, 2020)。北極域における近年の気温上昇率は全球平均のその約2倍となっている (Serreze *et al.*, 2009; Cohen *et al.*, 2014) ことから、個別に北極温暖化増

1 気象庁気象研究所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

2 国立極地研究所

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

3 東京大学 生産技術研究所 大規模実験高度解析推進基盤

〒277-8574 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

4 名古屋大学大学院環境学研究所

〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町

5 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

〒940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山 187-16

6 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

7 千葉大学 大学院理学研究院

〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

8 東京大学大気海洋研究所

〒277-8564 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

9 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

\* 問合せ先: mniwano@mri-jma.go.jp

幅 (Arctic Amplification) と呼ばれることも多くなっている (吉森, 2019). 一方, 過去数十年間の南極域においては, 西南極の一部において有意な気温上昇トレンドが存在することが指摘されているものの, 東南極の気温はほぼ定常状態にある, と見られている (Nicolas and Bromwich, 2014; Jones *et al.*, 2016; Turner *et al.*, 2016). しかし, 非常に広大な南極氷床では現地気象観測網の密度が非常に粗いことから, 西南極と東南極での異なるトレンドはそれぞれ大きな不確実性を持つ, と評価されている (Meredith *et al.*, 2020).

この極域での気温上昇は, 様々なメカニズムを介して雪氷融解を加速している (この点は, 第 2 節で改めて詳解する). 生成される多量の融解水の一部は氷床周辺の海洋に流出すると同時に, 水体の流動をも助長して, 結果として, 氷床からの大量の雪氷質量 (以下, “質量” と略す) 損失を引き起こす (The IMBIE team, 2018, 2020; Meredith *et al.*, 2020). 氷床から失われて海洋に流入するそれらの融解水と水体は, 全球の海水準上昇と海洋循環の変容を引き起こす. 最新の推定 (The IMBIE team, 2020) によると, グリーンランド氷床は, 1992 年から 2018 年にかけて  $3,902 \pm 342$  Gt の質量を損失したとされる. それらは海洋に流出し, 全球海水準を  $10.8 \pm 0.9$  mm 程度押し上げたと考えられている. 更に温暖化が進むと, 2100 年時点では現在よりも  $70 \sim 130$  mm 程度も全球海水準がグリーンランド氷床由来の質量損失のみで押し上げられる可能性が考えられている. 一方, 南極氷床は, 1992 年から 2017 年にかけて  $2,720 \pm 1,390$  Gt の質量を損失したとされ (The IMBIE team, 2018), その損失量は年々増加している (Rignot *et al.*, 2019) もの, 状況はまだグリーンランド氷床ほど深刻ではない. なお, この値は,  $7.6 \pm 3.9$  mm の全球海水準上昇に相当する. しかし, 温暖化が一層進むと, 2100 年までに南極氷床由来の質量損失のみによって全球海水準が  $0.12$  m 程度押し上げられる可能性が考えられている (Oppenheimer *et al.*, 2019). 更に 2100 年より先では, 海水準上昇に対する南極氷床からの寄与がグリーンランド氷床からの寄与を上回ることが懸念されている (Oppenheimer *et al.*, 2019).

一般に, 氷床の質量変化 (Mass Balance; MB)

は, 大気-雪氷相互作用の帰結である表面質量収支 (Surface Mass Balance;  $SMB = \text{Precipitation} - \text{runoff} - \text{sublimation} - \text{evaporation}$ ) と海洋による氷床底面融解に起因する効果 (例えば Pritchard *et al.*, 2012; Golleddge *et al.*, 2019) を含む氷床流動による水体の海洋への流出 (Discharge; D) のバランスによって規定される ( $MB = SMB - D$ ). IPCC 第 5 次評価報告書 (Intergovernmental Panel on Climate Change's Fifth Assessment Report) (Vaughan *et al.*, 2013) が発表された時点では, グリーンランド氷床における SMB の減少率の絶対値と D の増加率がほぼ同等であると考えられていた (van den Broeke *et al.*, 2009a) が, 近年ではその状況が一変して, SMB の減少率の絶対値が D の増加率を大きく凌駕し始めていることが指摘されている (Enderlin *et al.*, 2014; Andersen *et al.*, 2015; van den Broeke *et al.*, 2016; Mouginit *et al.*, 2019; The IMBIE team, 2020). 一方, 南極氷床における 1979 年から現在にかけての質量損失は主に D の増加によって駆動されている (The IMBIE team, 2018) が, 上記のグリーンランド氷床で見られている質量損失のレジームシフトは, 将来更に温暖化が加速した場合には南極氷床でも発現する可能性があると考えられている. Bell *et al.* (2018) や Trusel *et al.* (2018) は, このことを南極氷床のグリーンランド氷床化 “Greenlandification” と呼び警鐘を鳴らしている. そのため, 現在は, SMB に関わる物理量を観測とモデルの両面から定量的・定性的に実態把握・理解することの重要性が未だかつてなく高まっている. とりわけ, 正確な定量的情報は, 今後の全球海水準上昇率の予想に直結することから, 非常に重要である. 以下では, その SMB に焦点を当てて議論を進める.

ここで若干話が逸れるが, 主著者は, 2012 年からグリーンランド氷床を対象とする研究に着手した. 当初は, 2012 年に北西グリーンランド氷床上に設置した自動気象観測装置 SIGMA (Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic)-AWS (automated weather station) (Aoki *et al.*, 2014a; Matoba *et al.*, 2018) と, それ以前に自ら開発していた詳細な積雪変質モデル SMAP (Snow Metamorphism and Albedo

Process) (Niwano *et al.*, 2012, 2014) を組み合わせ、 “点” での研究 (Niwano *et al.*, 2015) を実施した。この “点” での研究は、雪面熱収支を軸とする各種大気・雪氷物理プロセスの詳細な理解には大いに有効である一方で、広大なグリーンランド氷床全域で急速に進展している多種多様な変動メカニズムの理解には適さない。そこで、2016 年頃から、“点” での観測的研究は継続しつつ、更に、面的な情報を提示することが可能な大気モデルをベースとする数値モデル研究に着手することとした。2017 年秋に北海道大学で開催された日本気象学会 2017 年度秋季大会シンポジウム「北極域」において、その取り組みについて紹介した (庭野, 2019)。その後 2018 年に、我々は、グリーンランド全域を対象とする水平解像度 5 km の高解像度領域気候モデル NHM-SMAP (Non-Hydrostatic atmospheric Model-Snow Metamorphism and Albedo Process) を開発することに成功した (Niwano *et al.*, 2018)。NHM-SMAP は、SMB の詳細な時空間変化を計算することが可能である。更に、科学研究費助成事業・新学術領域研究『熱-水-物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床』(代表: 川村賢二博士, 国立極地研究所) の公募課題に採用され、NHM-SMAP の南極への適用にも着手したところである。

本総説では、まず、南北氷床の SMB の昨今の実態について、最新の研究成果をレビューする。続いて、氷床 SMB を計算することが可能な世界各国の最新の各種数値モデルを概観する。その後、現在のモデルの限界・問題点を提起し、国内の“バーチャル SMB 観測・モデリング研究チーム”とも言うべき本執筆チームが現在計画している将来の研究の方向性を提示・議論する。なお、我々は観測とモデルを研究の両輪と位置付けて活動しているが、本稿ではどちらかと言うとモデル開発者の立場に立って話を進めてみたい。また、温暖化由来の SMB 変化の最前線に目下直面しているのは、南極よりもグリーンランドであることは明らかであることから、本総説はグリーンランドに重点を置くこととする。

## 2. 氷床 SMB の実態

グリーンランド氷床や南極氷床において、SMB

に関連する地上気象・雪氷物理量を直接測定する試みは、自動気象観測装置や雪尺 (日本雪氷学会 2014) の技術・信頼性の向上と共に進展してきた。しかし、繰り返しになるが、これらの “点” での観測から氷床全域の面的な SMB の定量的・定性的実像と、その支配メカニズムを推定・理解することはほぼ不可能であることから、それらの “点” での観測によって検証・制約された様々なタイプのモデルがその目的のために活用されている。とは言え、モデルが提示するシミュレーション結果は現実では無いことは論を俟たないことから、モデルを活用する研究者は常に観測結果に立ち返って、研究対象を多角的かつ総合的に俯瞰する慎重な姿勢が求められる。モデルの詳細については、この後の第 3 節にて解説するが、本節では、モデルによる研究成果についても適宜紹介する。

なお、近年は、人工衛星や航空機に搭載されたレーザー高度計、レーダー高度計、及び重力センサーなどによって氷床変動をリモートセンシング観測する試みがなされている (例えば、The IMBIE Team, 2018, 2020)。これらリモートセンシング観測手法の発展によって、現地観測のみでは困難であった氷床全域の質量変動の把握が可能となってきた。しかしながら、これらの手法は SMB を直接観測するものではないため、観測による広域 SMB の高精度推定は依然として重要な課題である。高度計で観測された氷床表面高度の変化は、氷床流動、氷河性地殻均衡による基盤の隆起、氷床底面融解、及び SMB 変化を複合的に反映した結果 (例えば、Kuipers Munneke *et al.*, 2015) である。また、重力センサーの測定結果は氷床の質量変化 (MB) に対応する (例えば、King *et al.*, 2018)。

### 2.1 現地観測

グリーンランド氷床上における今日的かつ本格的な気象・雪氷観測と、それらを活用した雪氷融解に関する研究は、中西部イルリサットの上流に位置する ETH Camp で始まった (Ohmura *et al.*, 1991, 1992, 1994)。グリーンランド氷床の SMB が当時ほぼゼロになっていた平衡線 (Equilibrium line) において熱収支、MB の詳細な観測が行われ、更にグリーンランド深層掘削 GRIP との協力も実施されたことで、SMB や MB 変動研究 (Abe-

Ouchi *et al.*, 1994; Konzelmann *et al.*, 1994) が進んだ。その後、米国の Steffen and Box (2001) が、18 個の自動気象観測装置から構成される Greenland Climate Network (GC-Net) を主に氷床内陸部において構築した。これらによって取得された情報は、2000 年代初頭のグリーンランド氷床上の雪面熱収支を軸とする気候・気象研究を牽引した (例えば、Box and Steffen, 2001; Cullen and Steffen, 2001)。最近では、データ管理の一端をスイスが担っているのだが、洗練されたデータアクセスシステム (<https://www.wsl.ch/gcnet/cms/>) が構築され、データの利用が以前にも増して容易になっている。

多くの先行研究が示している通り、グリーンランド氷床上に存在する各流域 (Zwally *et al.*, 2012; Colgan *et al.*, 2019) からの質量損失量は中西部の流域において非常に大きい (Rignot *et al.*, 2008; van den Broeke *et al.*, 2009a; Kjeldsen *et al.*, 2015; Andersen *et al.*, 2015; Mouginot *et al.*, 2019; The IMBIE team, 2020)。その中西部カンゲルスアーク上流において信頼性の高い気象・雪氷観測を実施してきているのが、オランダのユトレヒト大学が構築してきた K-transect と呼ばれる観測網である (van de Wal *et al.*, 2005; van den Broeke *et al.*, 2009b, 2011, Kuipers Munneke *et al.*, 2018)。近年では、後述の PROMICE ネットワークとのコラボレーション (van As *et al.*, 2012) が盛んにおこなわれている。また、これまで電源の問題で氷床上での運用がほぼ行われてきていなかった渦相関法による雪面乱流熱フラックスの通年直接測定へのチャレンジも始めており (van Tiggelen *et al.*, 2020)、引き続き要注目である。

デンマーク・グリーンランド地質調査所 (GEUS) のは、Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet (PROMICE) と呼ばれる自動気象観測装置群 (Ahlström *et al.*, 2008) をグリーンランド氷床縁辺域 (消耗域) に設置し、一部のサイトでは雪尺測定も並行して実施している。この活動の一環として、国際 SMB 観測データセットの整備 (Machguth *et al.*, 2016a) も実施した。ここには、日本の観測隊によって取得されたデータ (Sugiyama *et al.*, 2014; Tsutaki *et al.*, 2017) もアーカイブされている。近年では、氷床から流出する

融解水量の直接測定も実施している (Ahlström *et al.*, 2017)。主著者は、2019 年春と夏に、GEUS の Jason E. Box 教授らと、グリーンランド氷床最南部の Qagssimiut ice lobe において共同雪氷現地観測を実施し、GEUS の PROMICE 自動気象観測装置ネットワークと雪尺測定状況を実際に目にする事が出来た。クレバスが非常に多い裸氷帯でのこれらの観測の難しさと、同時に、その (アクセスが困難な地域における気候モニタリングを確実に遂行する点での) 高い価値を再認識した。これらの観測の様子は、Air Greenland 機内誌 SULUK の 2020 年第 1 号において紹介された (Haarløv and Ostfeld, 2020)。なお、この一帯に位置する観測サイトは南北に連なる 1 つの線で繋ぐことが出来ることから、最近ではそれらサイトを Q-Transect と呼んでいる。Q-Transect のデータを活用した最新の研究 (Hermann *et al.*, 2018) は、現在の Qagssimiut ice lobe における単位面積当たりの SMB 減少量がグリーンランド氷床全域の中でも圧倒的に大きく、SMB 減少のホットスポットとなっていることを示した。

グリーンランド全域の中でも、北西部は上記の最南部以上にアクセスが困難な地域の 1 つである。一方で、北西部での質量損失が 2005 年以降急速に進行していることが Khan *et al.* (2010) によって初めて報告された。また、近年の夏期グリーンランド氷床上において切離された高気圧が形成されやすく、それが南方からの暖湿空気を北西部へ輸送することに一役買っていることが指摘されている (Tedesco *et al.*, 2016)。同じ北西部の氷床上にかつて存在したアメリカ軍キャンプ・センチュリー基地 (1959 年設立) は、1967 年を最後に放棄され、雪の下深くに埋もれていく運命にあったはずなのだが、近年の質量損失によって再びその姿を地上に現す可能性が指摘され世界に衝撃を与えた (Colgan *et al.*, 2016)。これらから分かるように、近年の北西部はグリーンランド氷床の中でもとりわけ国際的な注目が集まっている地域である。最近、Aoki *et al.* (2014a) が、気象・雪氷に関わる実態把握が十分になされてきていなかった氷床北西部に 2 つの自動気象観測装置を設置した。それらは SIGMA-A、及び SIGMA-B と呼ばれ、2012 年の夏から現在にかけて高品質な観測

データを取得し続けている (Matoba *et al.*, 2018). 我々が SIGMA-A に自動気象観測装置を設置したのは、ちょうど 2012 年 7 月 12 日前後の記録的な氷床全面融解イベント (Nghiem *et al.*, 2012) が発生した頃であった (Aoki *et al.*, 2014a; Yamaguchi *et al.*, 2014; Tanikawa *et al.*, 2014; Niwano *et al.*, 2015). Niwano *et al.* (2015) は、SIGMA-A において 7 月 10 日から 14 日にかけての積算降雨量が 100 mm に達したことを報告しているが、このことは海外の多くの研究者に驚きを与えた。2012 年の記録的な全面融解イベントについては改めて詳述する。同じ 2012 年からは、SIGMA-B が位置するカナック氷帽周辺において、雪尺を用いたユニークな広域 SMB 観測網を展開している (Sugiyama *et al.*, 2014; Tsutaki *et al.*, 2017). グリーンランド氷床本体から隔離した周辺沿岸域に存在する多数の氷帽では、多量の融解水を溜め込むことが可能な越年性積雪 (フィルン) が 1997 年頃にはほぼ失われ (所謂、ティッピング・ポイント)、以降、急速な質量損失が進んでいると考えられている (Noël *et al.*, 2017) ことから、実態解明が急務となっている。

南極での SMB 観測の近年の状況に関しては、平沢ほか (2017) が詳しい。中でも、日本の観測隊が、過酷な環境下にある東南極内陸のドームふじ基地 (Kameda *et al.*, 2008) やドームふじ基地と昭和基地の間のトラバースルート上 (Hoshina *et al.*, 2016; 本山, 2017) において長期に渡る雪尺観測を実施してきていることは特筆に値し、最新の SMB モデルの検証に欠かせない存在になっている。これらの観測データは JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) Data Reports (<http://polaris.nipr.ac.jp/~library/publication/pub/pub1.html>) (2020 年 7 月 31 日閲覧) において報告されている。また、このルート上には、2016 年以降、積雪深計を搭載した AWS が 4 か所に導入されており、今後、時間分解能の高い積雪変動に関する観測データが取得されていく (亀田ほか, 2020)。海外のグループによる近年の貢献としては、GLACIOCLIM-SAMBA (The glaciers, an Observatory of climate - Surface Mass Balance of Antarctica) (Favier *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016) と呼ばれる国際 SMB 観測データセットの整備が挙

げられる。ここには、日本の観測隊によって取得されたデータもアーカイブされている。

## 2.2 SMB 変動を支配するメカニズム

本節では、近年急激な SMB 減少が進行しているグリーンランド氷床で起きているバラエティに富んだ気象・雪氷現象について概観する。本稿では、紙面の都合もあり、近年の南極氷床で起きている現象のレビューは割愛するが、既に述べた通り、南極氷床の“Greenlandification” (Bell *et al.*, 2018; Trusel *et al.*, 2018) が進めば、これから紹介することに近い現象が南極氷床においても発現する可能性があることを念頭に置いて読み進めて頂けると幸いである。

現在の世界の研究コミュニティでは、グリーンランド氷床における近年の SMB 減少は、主に夏期の雪氷融解の加速と、結果として生成される融解水の海洋への流出に起因している、と認識されている。その背景に、冒頭で紹介した北極温暖化増幅に起因する気温上昇の存在があるのだが、物事はそう単純ではない。例えば、Bintanja and Selten (2014) は、温暖化に伴って将来の北極域で降水量が増えることを予想しているし、Koyama *et al.* (2017) は、現在のグリーンランド周辺での気温上昇に由来する海水減少が低気圧活動を助長して、氷床上の降雪を増やしている可能性を指摘している。加えて、新雪のアルベドは相対的に非常に高い (Wiscombe and Warren, 1980; Aoki *et al.*, 1999, 2003) ことから、雪氷融解を一層阻害する。では、氷床上では何が起きているのか? それを理解する鍵は夏の気象場の長期変化傾向にある。まず、1990 年代以降、夏期のグリーンランド氷床上では、長期停滞するブロッキング高気圧が形成されやすくなっていることが分かっている (Box *et al.*, 2012; Hanna *et al.*, 2013, 2015)。上述の切離高気圧 (Tedesco *et al.*, 2016) はその最たる例である。更に、その気圧配置が、北大西洋振動指数 (North Atlantic Oscillation index; NAO 指数) (例えば、Hildebrandsson *et al.*, 1897; Walker and Bliss, 1932; Hurrell *et al.*, 2003) の負の値によって特徴づけられることも明らかになってきた (Box *et al.*, 2012; Hanna *et al.*, 2013, 2015)。NAO 指数と言え、Stroeve (2001) 以来、グリーンランド氷床上の雪氷面アルベドと相関が良い可能性

が認識されていたが、このことは、この気象場の変調が引き起こす雪面熱収支の変化の帰結と捉えることが良さそうである。近年では、グリーンランド氷床におけるブロッキング高気圧の勢力盛衰の評価に際してグリーンランド・ブロッキング指数 (Hanna *et al.*, 2015) が有用であることも広く認識されてきている。

さて、夏期の氷床上に高気圧が長期停滞すると何が起きるのか？ まず、氷床周辺の大気下層で高気圧性（時計回り）の循環が強化されることにより、高気圧西側縁辺において南からの湿潤暖気移流が促進される。このことは氷床周辺の消耗域における下向き顕熱加熱を助長することに繋がる (Box *et al.*, 2012)。一方で高気圧の中心部では、下降流が卓越することで雲の生成が阻害され、晴天になりやすい。このことは下向き短波放射の増加をもたらす。結果として、雪水面加熱が助長され、表面融解が引き起こされやすくなる。ひとたび表面融解が発生すると、積雪の場合、wet snow metamorphism (Brun *et al.*, 1989) が加速して積雪粒径が急成長し、更にアルベドが低下する (Wiscombe and Warren, 1980; Aoki *et al.*, 1999, 2003)。裸氷の場合も、融解を経験することでアルベドが低下することが PROMICE 自動気象観測データから示されている (Wehrlé *et al.*, 2020)。近年のグリーンランド氷床上の氷のアルベドを考える上では、雪氷微生物 (例えば, Shimada *et al.*, 2016) への言及を避けては通れない。この点については、改めて後述する。また、高気圧が氷床上に停滞し続けると、氷床上での降水量は減少する。結果として、低いアルベドが維持され続ける訳である。この一連の流れが、現在の夏期雪氷融解を加速する基本的なフィードバックメカニズムと認識されている。では、Koyama *et al.* (2017) が主張している、グリーンランド周辺での海水減少由来の低気圧活動活性化と、それに由来する降雪量増加の可能性についてはどのように理解すれば良いのだろうか？ この点に関する示唆を与える興味深い結果が近年発表された：Noël *et al.* (2019) による成果であるが、近年の北西部では特に初夏の雲量増加が著しく、対照的に、中南部では雲量減少が進んでいる、とのことである。この成果は、北西部で降雪量が増えていることを直接的に示す

ものではないが、グリーンランド氷床上で降雪が増えている場所と減っている場所が存在していることを示唆しており、海水減少との関連性について今後更に調べていく必要がある。Bintanja and Selten (2014) は、温暖化に伴って将来の北極域で降水量が増えることを予想していたが、現状、グリーンランド氷床上においてそのことが正しいのか（あるいは実際に引き起こされ始めているのか）どうかに関する明快な解答を得るには至っていない。更なる現地観測の推進と衛星リモートセンシング技術の高度化が求められる。繰り返しになるが、温暖化時における氷床上の降水量変化は、雪氷アルベドフィードバックの強さに重大な影響を与えることから、今後、観測とモデルの両面から重点的に研究を進めていく必要がある。

2012年7月12日前後、グリーンランド氷床において、衛星観測史上最大の表面融解面積を記録した顕著な表面融解イベントが発生した (Nghiem *et al.*, 2012; Tedesco *et al.*, 2013; Hall *et al.*, 2013; Hanna *et al.*, 2014; Bennartz *et al.*, 2013; Neff *et al.*, 2014; Niwano *et al.*, 2015; Bonne *et al.*, 2015)。この間、グリーンランド氷床上には、暖気を伴った高気圧が停滞しており (Nghiem *et al.*, 2012)、この近年の夏期に特徴的な気圧配置は、NAO 指数やグリーンランド・ブロッキング指数の明瞭な変化からも見て取れた (Hanna *et al.*, 2014)。しかし、このイベントが、上記のメカニズムのみで引き起こされていたのであれば、真に記録的なイベントには成り得ていなかった可能性が高い。その点で、Bennartz *et al.* (2013) による研究成果は瞠目に値する：彼らは、下層の水雲の存在が氷床全域に及ぶ表面融解を引きこしたことを初めて明らかにした。彼らは、この水雲の鉛直積算雲水量が  $10\sim 40\text{ g m}^{-2}$  のスイートスポットに入った時のみ、水雲の加熱効果が最大化する、と主張している：すなわち、この条件を満たす水雲は長波放射に対しては光学的に不透明であることから雲下部から下向きの長波加熱を助長する一方で、太陽放射に対しては光学的に比較的透明であることから雲による下向き短波放射の減少を最小化するということである。ただし、この成果は数値モデルによる感度実験の結果導かれたものであったため、観測的な実証が必要不可欠であった。

Niwano *et al.* (2015) は、2012 年 6 月 30 日から 7 月 14 日にかけて SIGMA-A の自動気象観測装置で取得した気象データを積雪変質モデル SMAP (Niwano *et al.*, 2012, 2014) に入力して、この間の雪面熱収支の時間変化を計算した。その結果を現地で行っていた目視気象観測結果の結果と組み合わせ解析したところ、7 月 10 日以降に起きた暖かな下層雲の流入に伴って短波放射収支が急激に減少したものの、その減少分を大きく凌駕する下層雲由来の長波放射加熱の増加が見られ、そのことが急激な表面融解を引き起こしたことを示した。この成果が、Bennartz *et al.* (2013) の主張の一端の最初の観測的実証と言える。現在、この暖かな下層雲の流入は、北米大陸で引き起こされた記録的な森林火災由来の熱波をトリガーとする北向き暖気移流と、氷床上に停留する高気圧の西側縁辺を通して北西氷床に到達したものと考えられている大西洋上の Atmospheric river (Neff *et al.*, 2014; Bonne *et al.*, 2015) の複合的な結果と考えられている。2019 年の夏は、2012 年の急激な表面融解・表面質量損失に迫るレベルの劇的な雪氷変動の経験をした (Tedesco and Fettweis, 2020)。この時の氷床上空の気温は 2012 年よりも高かったものの、逆に水蒸気量は少なかった (Tedesco and Fettweis, 2020) ことから、表面融解に対する雲の放射加熱効果は限定的なものとなった可能性が高い。しかし、2019 年に水蒸気量が少なくなった理由ははっきりしないため、更なる研究が必要である。

極域の雪面上において、曇っている時の雪面加熱が、晴れている時と比べて顕著になることが稀にあることは Ambach (1974) 以来知られていて、“radiation paradox”と呼ばれていた。2012 年の記録的な表面融解イベントに対する雲の重大な影響が明らかになって以降、グリーンランド氷床における radiation paradox の実態把握と、その氷床表面熱収支、更には SMB に対する影響に大きな世界的注目が集まった。この間、いくつかの注目すべき研究成果が発表されたが、現在の世界の研究コミュニティの大勢は、雲は“気候学的な時間スケール”では下向き短波放射を減少させて近年の SMB 減少を抑制する役割を担っていると認識している (Hofer *et al.*, 2017; Niwano *et al.*, 2019;

Ruan *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018, 2019)。ただし、Niwano *et al.* (2015) が報告したように、“1 週間程度のイベントスケール”では下向き長波放射加熱が表面融解を加速することは起こり得ることは引き続き留意しておくべきである。しかし、現状、下向き長波放射加熱が表面融解を加速するイベントがどのような条件下で発生するのか、については統一的な見解を得るには至っていない。上述の下層の水雲の存在 (Bennartz *et al.*, 2013) に注目しながら、そのイベント発生条件を調べていく必要がある。更に、雲の存在は夜間の放射冷却を抑制するため、一度生成された融解水の再凍結を阻害して runoff を加速する可能性がある (Van Tricht *et al.*, 2016)。また、曇天下の裸水域では、クリオコナイトホール (例えば、Takeuchi *et al.*, 2014) の崩壊が起こりやすいことが報告されている (Takeuchi *et al.*, 2018)。クリオコナイトホールが崩壊すると、後述の dark region (例えば、Shimada *et al.*, 2016; Tedstone *et al.*, 2017; Ryan *et al.*, 2018) 拡大を引き起こすことから、SMB 減少に繋がる可能性がある。しかし、グリーンランド氷床全域での定量的な実態把握には至っていない。実際にどのくらいの領域でその効果が出ているか、について、観測・モデル両面からの継続的な研究を行う必要である。

極域に存在する雪は、基本的に、氷と空気の集合として存在している。夏期には、それらに加えて、水が加わり、地球上でも非常に特異な陸面を構成する。2000 年代に入るまで、大部分の夏期の融解水は、たとえ生成されたとしても空隙に蓄積されて再凍結する運命にあった。しかし、2000 年代以降に年々激甚化している夏期の融解に伴って、氷床表面付近のフィルム内部の空隙の量が激減していることが指摘されている (Vandecrux *et al.*, 2019, 2020)。氷床上のフィルムから空隙が完全に失われると、生成される融解水は即時的に氷床から流出するので、グリーンランド氷床 SMB 減少のティッピング・ポイントを引き起こし得る。また、頻繁な融解水再凍結は、相変化に伴う潜熱を多量に雪水中に解放する (Cryo-hydrologic warming) (Phillips *et al.*, 2010) ことに繋がるため、更なる融解フィードバックのトリガーにもなり得る。融解水が空隙を埋めて再凍結が引き起こされ

るプロセスの延長線上にあるのが氷板の形成である。氷床上では、近年、積雪表面付近に頻繁に氷板が形成されていることが多点観測の結果に基づき報告されている (Yamaguchi *et al.*, 2014; Machguth *et al.*, 2016b)。しかも、これらの氷板の厚さが増加傾向にあることも明らかになってきた (MacFerrin *et al.*, 2019)。

近年のグリーンランド氷床で引き起こされている急激な雪氷融解のメカニズム理解を困難にしている要因に、光吸収性を持つ雪氷微生物 (Yallop *et al.*, 2012; Shimada *et al.*, 2016; Stibal *et al.*, 2017; Takeuchi *et al.*, 2014, 2018; Onuma *et al.*, 2018, 2020; Ryan *et al.*, 2018; Cook *et al.*, 2020; Williamson *et al.*, 2020) の存在と、それらの繁殖によって姿を現した消耗域の dark region (例えば, Shimada *et al.*, 2016; Tedstone *et al.*, 2017; Ryan *et al.*, 2018) がある。これまで多くの雪氷微生物種が報告されており、また、それらは雪の内部と氷上では異なる。マクロな実態把握の結果を大局的な観点でモデル化する研究を更に加速していく必要がある。

### 3. 数値モデリングの現状

前節では、今日の南北氷床の SMB の実態を概観し、特に現地観測の重要性を強調したが、自動気象観測装置や雪尺観測はあくまでも“点”での観測であり、広大な氷床に存在する様々な気候帯を十分にカバーしているとは言い難いのが実情である。それは、主に、氷床へのアクセスの困難さと、観測サイトにおける十分な電力確保の難しさ (Serreze and Barry, 2014) に起因する。また、雪面の高さの変化を高時間分解能で自動測定することが可能な測器としてしばしば活用されている超音波式積雪深計は、グリーンランド氷床の SIGMA-A における観測結果によると低温条件の過酷な環境下で異常値を示しやすい。更に、SMB 変化を駆動する重要な要因である降水の高精度観測が未だ実現していないことには、粒径が極めて小さい晴天降水 (ダイヤモンドダスト) の観測と、総観規模擾乱の影響下で強風が伴う比較的強度の強い降水の観測を両立することが極めて難しいこと (Hirasawa *et al.*, 2018) が影響している。吹雪による質量再配分と降水の分離が難しい問題も存在する。そこで、SMB に関わる物理量の面的か

つ時間的に詳細な情報を提供するために、モデルの活用が図られてきている。このような試みの嚆矢は Ohmura and Reeh (1991) の研究であり、ここで初めて、グリーンランド氷床上の降水量と SMB の面的な分布が示された。更に高解像度全球気候モデルによってシミュレートされたグリーンランド氷床 SMB の検証が開始された (Ohmura *et al.*, 1996)。現在、世界の研究コミュニティでは、氷床における大気・雪氷物理状態の再現性は、全球気候モデルよりも、より精緻な物理過程を考慮可能な一方で対象領域を制限することで計算コストを抑制出来る領域気候モデルに分があると考えられている (Yoshimori and Abe-Ouchi 2012)。しかし、全球モデルに関しても、昨今の計算機資源の急速な発展に呼応するかのように急速にその性能を上昇させてきている。この観点から、最近注目の全球モデル (近年では、地球システムモデルもある) 研究についても積極的に取り上げたい。なお、世界中には非常に多くの領域気候モデルと全球気候モデルが存在するが、それらが全て氷床 SMB を現実的に計算出来る訳ではないことに留意しておく必要がある。なぜならば、SMB の計算には、第 1 節で示した SMB の各要素を正確に計算することが出来る雪氷物理モデルが必要不可欠な一方で、それらは必ずしも多くの気候モデルに導入されている訳ではないからである (気候モデルの目的は非常に多岐に渡るため、雪氷物理の詳細な計算を必要としないモデルもある)。

#### 3.1 領域気候モデル

SMB 推定への領域気候モデルの今日的活用は、Box and Rinke (2003) に遡る。彼らは、デンマーク気象研究所 (Danish Meteorological Institute; DMI) で開発された水平解像度  $0.5^\circ$  の HIRHAM (Christensen *et al.*, 1996) をグリーンランド氷床全域に適用し、1998 年の季節変化と 1991 年から 98 年にかけての夏期限定の数値シミュレーションを行い、GC-Net で観測された地上気象・雪氷要素の月平均値の再現に成功した。HIRHAM はその後、DMI において更なる水平高解像度化が施され、近年再び活発に利用されている (Mernild *et al.*, 2010, 2011; Langen *et al.*, 2015, 2017; Mottram *et al.*, 2017)。

その後、信頼性が高く、現在にかけて世界的に



頻繁に活用されているベルギーの MAR (Modèle Atmosphérique Régional) が登場する (Fettweis *et al.*, 2005; Lefebvre *et al.*, 2005). MAR は, グリーンランド氷床全域を対象にして当時としては最高レベルの水平解像度 25 km を設定したことに加えて, SMB 推定には詳細な積雪モデルが必要であろう, と見越してフランスの詳細な (一方で計算コストが一般的な積雪モデルよりも高い) 積雪変質モデル Crocus (Brun *et al.*, 1992) を搭載した. 前述の通り, 2000 年代以降, グリーンランド氷床 SMB は急激な減少に転じており, 詳細な積雪変質モデルで SMB 計算を行うことが大きなアドバンテージとなっている. その後のモデル開発と様々な研究への活用の様子は非常に目覚ましく (例えば, Fettweis, 2007; Fettweis *et al.*, 2011a, 2011b, 2017), 国際的なスケールで研究を進展させている.

オランダで開発されている RACMO2 (The KNMI regional atmospheric climate model) (Van Meijgaard *et al.*, 2008; Noël *et al.*, 2015, 2018) は, ベルギーの MAR と並んで信頼性が高く, 現在世界的に活用されている領域気候モデルの 1 つである. 積雪内部での現実的な鉛直方向水分移動計算の検討 (Ettema *et al.*, 2010), 積雪粒径に依存した積雪アルベド計算スキームの導入 (Kuipers Munneke *et al.*, 2011), 吹雪による質量再配分の計算 (Lenaerts *et al.*, 2012), 大気場の側面境界条件の与え方が SMB 推定精度に重要な影響を与えることの解明 (van de Berg and Medley, 2016), 統計的ダウンスケーリング手法を用いた領域気候モデルの SMB 関連出力の水平高解像度化 (Noël *et al.*, 2016) など, 物理過程の高度化が絶え間なく実施されている. 本来, RACMO2 の大気パートは, 個別の雲 (対流) を解像しないモデル, つまり, 静力学平衡近似が仮定された静力学モデルである (HIRHAM と MAR も同様). 一般に, 静力学平衡は, 水平解像度 10 km あたりで破綻すると考えられている (例えば, Saito *et al.*, 2006) が, この閾値は全てのモデル (あるいはモデルの適用地域) で同一というわけでは必ずしもないようである. van de Berg *et al.* (2020) は, RACMO2 において水平解像度をどこまで向上させても (計算される) 大気場と雪氷物理場に異常が生じないかを

調べ, 6.6 km では問題ないが 2.2 km の結果は解析に供せないことを示した. こちらも, 強力なモデルを核とする国際共同研究を多方面で遂行している.

なお, 上記の HIRHAM, MAR, 及び RACMO2 は, 南極氷床においても既に行われている (例えば, Mottram *et al.*, 2020). ただし, HIRHAM の南極氷床 SMB 計算に際しては, 融解水の流出は考慮されておらず単純に降水量と昇華・蒸発量のバランスで計算しており (Mottram *et al.*, 2020), 更なる温暖化が進行した際の SMB 変化を正しく推定出来ない可能性がある. RACMO2 と MAR は融解水の流出を既に計算している (van Wessem *et al.*, 2018; Agosta *et al.*, 2019).

これらに続くのが我々の新しい領域気候モデル NHM-SMAP (Niwano *et al.*, 2018) である. 我々がモデル開発を始めた時点で, 既に上述の MAR や RACMO2 が世界の研究コミュニティで頻繁に活用されていたが, Vernon *et al.* (2013) が報告していた通り, MAR や RACMO2 を含む既存の領域気候モデルによる SMB の推定結果の間には大きなバラつきが存在していたことから, 参入して新機軸を打ち出せる余地はあると考えていた. 我々が提示する NHM-SMAP の主な利点は, 非静力学大気モデル (Saito *et al.*, 2006; Hashimoto *et al.*, 2017a, 2017b, 2018) を用いることによってより (グリーンランド版では) 水平解像度 5 km の高解像度力学的ダウンスケール計算が実現し現実的な雲が表現出来るようになること (図 1) と, 詳細な積雪変質モデル SMAP (Niwano *et al.*, 2012, 2014) を用いることによって, 積雪アルベドと積雪内部での鉛直方向融解水移動計算が精緻化されている点である.

領域気候モデルを実行する場合, 大気場の側面境界条件が必要不可欠である. 現在気候下で数値シミュレーションを行う際には, 大気再解析データがその用途で用いられることが一般的である. HIRHAM, MAR, 及び RACMO2 は, ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) の ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) を主に用いている. 一方, 我々は, 手始めに, 気象庁の最新の再解析 JRA-55 (Kobayashi *et al.*, 2015) を用いることとし

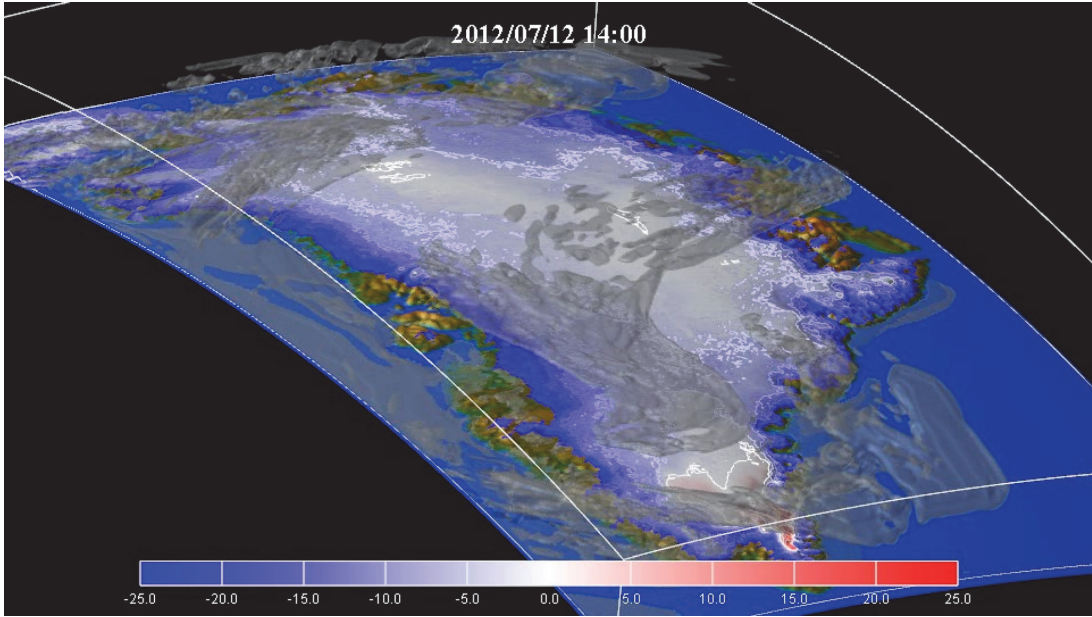


図 1 領域気候モデル NHM-SMAP によってシミュレートされた 2012 年 7 月 12 日 14 : 00 UTC におけるグリーンランド氷床上空の雲の三次元分布. 氷床表面に描かれたシェードは前 24 時間の SMB ( $\text{mm day}^{-1}$ ) を示す.

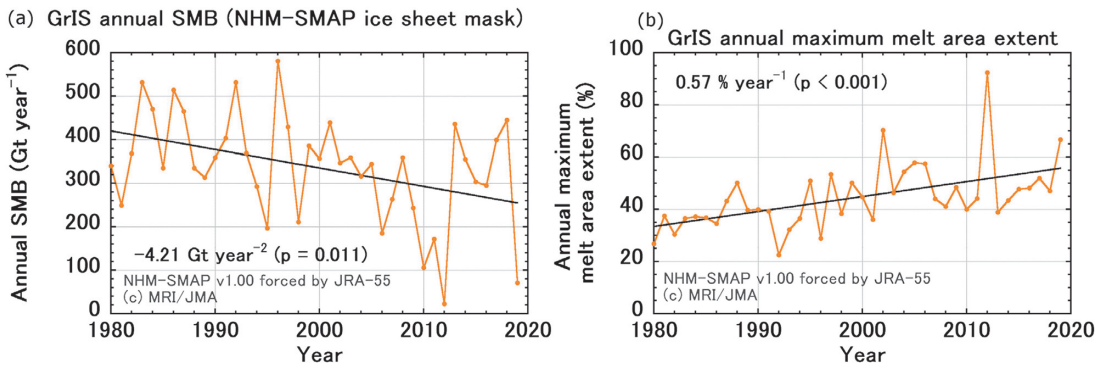


図 2 JRA-55 を境界値として実行した, 1980 年から 2019 年にかけてのグリーンランド版領域気候モデル NHM-SMAP 気候計算結果. (a) (周辺の氷帽) を含む氷床 SMB の経年変化と (b) 年最大氷床表面融解面積割合. 両経年変化ともに, 統計的に有意な変化傾向を示しており, その値を併記する.

た. Simmons and Poli (2015) や Fettweis *et al.* (2017) による北極域での再解析データ比較結果から, JRA-55 と ERA-Interim は北極域では同等の性能・信頼性を有すると認識されている. グリーンランド版については, 既に 1980 年から現在にかけて気候シミュレーションが完了している (図 2). そのシミュレーション結果は, 2000 年以降の急激な SMB 減少 (図 2a), 2012 年と 2019 年

の記録的な融解イベント (図 2a, 2b), 及び, 近年の氷床表面融解面積の広がり様子を良く表現している. その後, NHM-SMAP は南極氷床へも (その広さゆえに水平解像度は 12 km に落としたものの) 適用され, SMB の季節変化をシミュレートすることが可能となっている (図 3). 南極版は, グリーンランド版と完全に同様の方法で SMB 計算を行っている (つまり, 融解水の流出も

計算している)ことから、RACMO2 と MAR に続く精緻な SMB 推定の結果を提示出来ることになる。目下、2020 年 6 月中に過去 40 年分の気候計算を完了させる計画である。グリーンランド版については、現在は準リアルタイムでの計算を継続している (図 4)。

この 40 年分のグリーンランド版モデルシミュレーションデータは、つい最近に実施されたグリーンランド氷床 SMB 計算モデル相互比較プロジェクト GrSMBMIP (Greenland ice sheet Surface Mass Balance Model Inter-comparison Project) (Fettweis *et al.*, 2020) に提出され、上記の領域気候モデルや、後述の全球モデルなどと相互比較がなされた (Fettweis *et al.*, 2020)。比較の結果、領域気候モデルは依然とし SMB 再現精度の点で全球気候モデルよりも優れていることが再確認された。領域気候モデルの中では、NHM-SMAP は涵養域での SMB 再現性は非常に良かったものの、消耗域において融解を過小評価しており、結果として SMB を過大評価していることが確認された。他の領域気候モデルは、dark region に位置する裸氷域のアルベドを衛星観測データから得られる気候値などを使って拘束している (例えば、Langen *et al.*, 2017; Noël *et al.*, 2018)。一方、NHM-SMAP の現バージョンは光吸収性不純物の影響を直接的・間接的のいずれの方法でも考慮していないことから、この点は早急に改善する必要がある。

### 3.2 全球気候モデル (地球システムモデル)

全球気候モデルの分野で、こと氷床 SMB の精度良い推定を目指す点に注目すると、米国の大気-海洋結合 Community Earth System Model (CESM) の近年の他の追随を許さない急速な進展が目覚ましい。水平解像度 1° 程度で運用された CESM version 1 (Vizcaino *et al.*, 2013; Lenaerts *et al.*, 2016) の時点では、モデル内で熱・水を正しく保存させることに困難があったため、氷床分布を計算する氷床流動モデルとの結合計算を実施出来なかった。また、モデルで考慮可能な最大積雪深が水当量で 1m に制限されていたことから、グリーンランド氷床で近年引き起こされている急激な雪氷融解を現実的に計算することが難しかった (Lenaerts *et al.*, 2016)。しかし、その後、van

Kampenhou *et al.* (2017) によって最大積雪深が 10m w.e.に拡張された。また、氷床融解とその結果として引き起こされる融解水の海洋への流出を精緻に計算することを目指して、氷床周辺の水平解像度を局所的に上げる機能 (van Kampenhou *et al.*, 2019) も実装された。これら、CESM における雪氷物理過程の高度化によって、氷床流動モデル Community Ice Sheet Model version 2.1 (CISM2.1) (Lipscomb *et al.*, 2019) との双方向結合計算が実現した (Lawrence *et al.*, 2019)。これらのアップデートを反映した CESM version 2 がリリースされ (van Kampenhou *et al.*, 2020)、そのシミュレーション結果を境界条件として実施した RACMO2 力学的ダウンスケールの結果は、近年の急激なグリーンランド氷床 SMB 減少を再現することに成功した (Noël *et al.*, 2020)。

### 4. 将来のモデル開発に関する議論

本節では、前節までの広範なレビューに基づき、氷床 SMB 推定精度の更なる向上と、(国内ではまだ十分に組み込まれていない) 信頼性の高い将来予測を実現するために、今何をすべきか、について議論する。

我々が考える、第一に取り組むべき点は、NHM-SMAP において光吸収性を持つ雪氷微生物の影響を間接的あるいは直接的に考慮することである。間接的に考慮する方法は、例えば Langen *et al.* (2017) や Noël *et al.* (2018) に従って、dark region に関わる衛星抽出の雪氷物理量情報 (Shimada *et al.*, 2016; Box *et al.*, 2017) でモデルを拘束することが考えられる。一方で、直接的な方法とは、雪氷微生物が繁殖した雪氷面のアルベドをモデル計算する機能を NHM-SMAP に実装することである。海外では、大気-雪氷系の放射伝達モデル SNICAR (SNOW ICe And Radiative) (Flanner and Zender, 2006) を改良して雪氷微生物の雪氷アルベドへの影響を評価することが可能となっており、そのモデルバージョンは BioSNICAR-GO (Cook *et al.*, 2020; Williamson *et al.*, 2020) と呼ばれている。我々も、最近、Aoki *et al.* (2011) による積雪アルベド物理モデルにおいて微生物の影響を陽に考慮する取り組みに着手した (Onuma *et al.*, 2020)。この直接的な方法を採

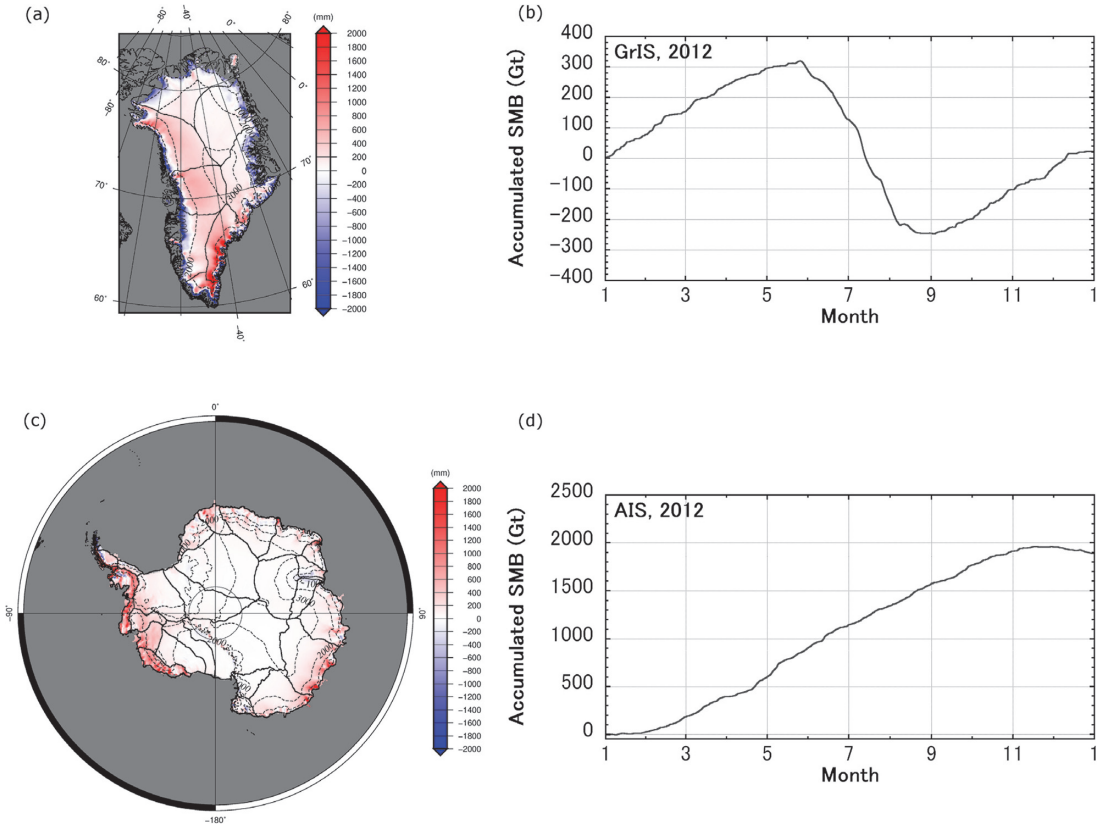


図 3 2012 年における, JRA-55 を境界値として実行した (a, b) グリーンランド氷床 (GrIS) 版と (c, d) 南極氷床 (AIS) 版領域気候モデル NHM-SMAP 気候計算結果. (a, c) 年積算 SMB の分布の様子と (b, d) 1 月 1 日を起点とする積算 SMB の時間変化を示す. 黒色実線は氷床上の代表的流域の境界線 (Zwally *et al.*, 2012), また, 黒色破線は 1000 m 間隔の標高を示す.

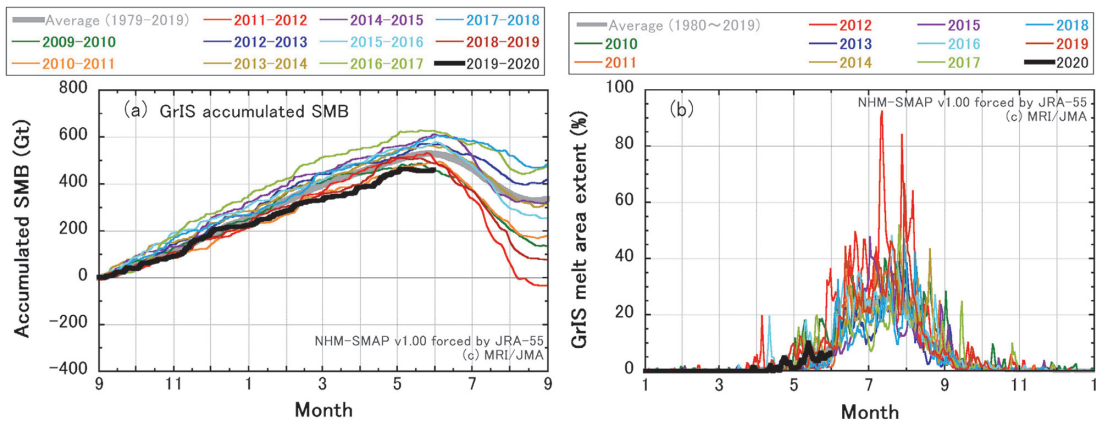


図 4 準リアルタイム実行している, JRA-55 を境界とするグリーンランド版領域気候モデル NHM-SMAP の計算結果モニター図の一例. (a) (周辺の氷帽) を含む氷床の 9 月を起点とする積算 SMB と (b) 氷床表面融解面積割合の季節変化.

用する場合に大きな課題となるのは、雪氷微生物の分散と繁殖をどのようにモデル化するか、である。現在、我々は、生物学的繁殖理論に基づくロジスティックモデル (Onuma *et al.*, 2018) を用いて推定することを目指している。このモデルは、初期細胞濃度、細胞増加率、及び環境収容力 (繁殖上限) を考慮しており、繁殖時間の関数として細胞濃度の変化を計算する。加えて、現在のところ簡便なパラメタリゼーションによって計算している氷アルベド (Niwano *et al.*, 2018) の計算手法を物理モデル化することも不可欠である。

光吸収性不純物と言えば、雪氷微生物よりも強い単位質量あたりの光吸収性能を持つと考えられているブラックカーボン (例えば Oshima *et al.*, 2009; Aoki *et al.*, 2014b) やダスト (例えば, Aoki *et al.*, 2014b) の影響も無視できない。また、鉍物ダストは微生物の繁殖に影響を与えることも知られている (Nagatsuka *et al.*, 2016)。今後、更なる温暖化に伴って北米大陸における森林火災が増えた場合、森林火災由来の熱波を源とする空気塊によって輸送されるブラックカーボンやダストが夏季の氷床上に滞留する高気圧の西側縁辺を通過して氷床周辺に到達する頻度が増加する可能性が考えられる。NHM-SMAP を、ブラックカーボンやダストの長距離輸送を計算可能な大気化学輸送モデル NHM-Chem (Kajino *et al.*, 2019) と結合した上で、積雪変質モデル内部における光吸収性不純物の鉛直方向再配分計算 (Tuzet *et al.*, 2017) を行う必要がある。

さて、過去～現在の氷床 SMB 推定の精度向上については、ここまで述べた研究内容である程度達成すると期待される。一方で、更なる温暖化に伴ってそのニーズが急激に増加している将来予測をどのように実現するか、については現状、検討を始めた段階である。考えられるアプローチは 2 つある。すなわち、世界的に取り組まれている結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP: Coupled Model Intercomparison Project) に提出される全球気候モデル (地球システムモデル) の将来気候予測結果を側面境界として NHM-SMAP を実行するアプローチと、CESM コミュニティで取り組まれているような次世代地球システムモデル開発のアプローチである。RACMO2 のコミュニ

ティのように両方実現することが理想的であるが、現在の我々が置かれた環境の (特に人的な) 研究リソースは非常に限られている。そのため、主著者が現在のところ有望と考えているアプローチは後者である。気象研究所は、世界的にも著名な地球システムモデル Meteorological Research Institute Earth System Model version 2 (MRI-ESM2) (Yukimoto *et al.*, 2019; Kawai *et al.*, 2019; Oshima *et al.*, 2020) を開発・運用していることから、CESM コミュニティの取り組みなどを参考にして、そのモデル自体に直接手を加えて雪氷物理過程を高度化することが出来るのではないかと考えている。その上で、領域気候モデルと地球システムモデルの間で多くのモデルパーツを横断的に共有可能とするシームレスなモデル開発体制を構築したいと考えている。この体制が実現すれば、物理過程や現在気候下の詳細な変動メカニズム理解には領域気候モデル (NHM-SMAP) を活用し、その知見を最大限取り込んだ地球システムモデル (MRI-ESM2) は将来気候予測に特化させること (言い換えると、限られたリソースで最大限の成果を創出すること) が可能となるだろう。更に、氷床流動を扱うモデリング研究 (Saito *et al.*, 2016) との連携が展開出来ると期待される。

今後は、気象研究所内のプロジェクト、2020 年度から開始された北極域研究加速プロジェクト ArCS II (<https://www.nipr.ac.jp/arcs2/>) (2020 年 8 月 7 日閲覧)、更に科学研究費助成事業・新学術領域研究「熱-水-物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」(<http://grantarctic.jp/>) (2020 年 7 月 31 日閲覧) 等のオールジャパンの枠組みを有効活用して、上記計画を確実に実現していきたい。

## 5. おわりに

2020 年の年始時点には全く予想していなかったことであるが、2020 年 6 月、時代は前触れもなくポスト・コロナに突入した。これまでは、必要な研究予算さえ準備出来れば (この点が全く簡単ではないのだが…)、比較的気軽に極域での現地観測に行けたかと思うが、先を正確に見通せない時代の到来によって、以前と同じ状態を維持できるかどうかは極めて不透明となりつつある。ま

た、関連して、特に欧州における、温暖化抑制のために飛行機を使った移動を極力減らそうという“flyingless”ムーブメントの急速な興隆も見逃せない。そのため、信頼における数値モデルを有効活用した研究の重要性は今後一層増していくものと思われる。我々は、本稿で記した通り、そのための主要なツール NHM-SMAP を既に手に入れた。今後は、NHM-SMAP を軸に据えた多種多様な研究を強力に推進していくことが必要不可欠である。冒頭で述べた通り、本総説での議論の力点は相対的に南極よりもグリーンランドに置かれたわけであるが、数年後に改めて氷床 SMB に関する総説原稿を執筆する機会があれば、南極に関してもより深い洞察と議論が出来るようにしたい。なお、主著者自身ここ数年間の間に、大規模モデルデータのハンドリングにかなり精通してきた。データのリクエストに対しては、以前よりも大分早く対応出来るようになってきているように思う。NHM-SMAP データを活用した研究に興味のある研究者は、是非、遠慮なくデータのリクエストを主著者まで送ってほしい。また、モデル開発自体に興味のある方も常時絶賛大募集中である。詳細は、同じく主著者にコンタクトしてみたい。最後に、サイエンス本流の話ではないが、今後は NHM-SMAP、更には我が国の極域大気-雪氷相互作用研究業界の世界的プレゼンスの一層の向上に関しても特に意識して注力していくという決意表明をして本総説の結びとする。

### 略語一覧

ArCS: Arctic Challenge for Sustainability  
 AWS: automated weather station  
 CESM: Community Earth System Model  
 CISM: Community Ice Sheet Model  
 CMIP: Coupled Model Intercomparison Project  
 D: Discharge  
 DMI: Danish Meteorological Institute  
 ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts  
 ERA-Interim: Interim ECMWF Re-Analysis  
 ETH: Eidgenössische Technische Hochschule  
 GC-Net: Greenland Climate Network

GEUS: De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland  
 GLACIOCLIM-SAMBA: The glaciers, an Observatory of climate - SurfAce Mass Balance of Antarctica  
 GrSMBMIP: Greenland ice sheet Surface Mass Balance Model Inter-comparison Project  
 HIRHAM: HIgh Resolution limited area model (HIRLAM) - ecmwf HAMburg (ECHAM)  
 IMBIE: ice sheet mass balance inter-comparison exercise  
 JARE: Japanese Antarctic Research Expedition  
 MAR: Modèle Atmosphérique Régional  
 MB: Mass Balance  
 MRI-ESM2: Meteorological Research Institute Earth System Model version 2  
 NAO: North Atlantic Oscillation  
 NHM-Chem: The Japan Meteorological Agency's regional meteorology - chemistry model  
 NHM-SMAP: Non-Hydrostatic atmospheric Model-Snow Metamorphism and Albedo Process  
 PROMICE: Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet  
 RACMO2: The KNMI regional atmospheric climate model version 2  
 SIGMA: Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic  
 SMAP: Snow Metamorphism and Albedo Process  
 SMB: Surface Mass Balance  
 SNICAR: SNOW ICe And Radiative

### 謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP17K12817, JP18H05054, JP17KK0017, JP20H04982, JP18H03363, JP16H01772, JP15H01733, JP19H01143)、環境省地球環境保全試験研究費、北海道大学低温科学研究所共同研究 (2012~2018 年度)、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20172003, JPMEERF20202003, JPMEERF20205001)、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム (領域テーマ C ; JPMXD0717935561)、及び北極域研究加速プロジェクト (ArCS II) JPMXD

1420318865 の助成を受けた。査読の過程では、1 名の匿名の査読者と担当編集委員の藤田秀二博士より大変的確かつ建設的なご意見を頂いた。心より感謝申し上げます。

## 文 献

- Abe-Ouchi, A., Blatter, H. and Ohmura, A. (1994): How does the Greenland ice sheet geometry remember the ice age?. *Glob. Planet. Change*, **9**, 133-142.
- Agosta, C., Amory, C., Kittel, C., Orsi, A., Favier, V., Gallée, H., van den Broeke, M.R., Lenaerts, J.T.M., van Wessem, J.M., van de Berg, W.J. and Fettweis, X. (2019): Estimation of the Antarctic surface mass balance using the regional climate model MAR (1979-2015) and identification of dominant processes. *The Cryosphere*, **13**, 281-296.
- Ahlström, A.P., Gravesen, P., Andersen, S.B., van As, D., Citterio, M., Fausto, R.S., Nielsen, S., Jepsen, H.F., Kristensen, S.S., Christensen, E.L., Stenseng, L., Forsberg, R., Hanson, S. and Petersen, D. (2008): A new programme for monitoring the mass loss of the Greenland ice sheet. *Geol. Surv. Den. Green. Bull.*, **15**, 61-64.
- Ahlström, A.P., Petersen, D., Langen, P.L., Citterio, M. and Box, J.E. (2017): Abrupt shift in the observed runoff from the southwestern Greenland ice sheet. *Sci. Adv.*, **5**, e1701169.
- Ambach, W. (1974): The influence of cloudiness on the net radiation balance of a snow surface with a high albedo. *J. Glaciol.*, **13**, 73-84.
- Andersen, M.L., Stenseng, L., Skourup, H., Colgan, W., Khan, S.A., Kristensen, S.S., Andersen, S.B., Box, J.E., Ahlström, A.P., Fettweis X. and Forsberg, R. (2015): Basin-scale partitioning of Greenland ice sheet mass balance components (2007-2011). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **409**, 89-95.
- Aoki, T., Aoki, T., Fukabori, M. and Uchiyama, A. (1999): Numerical simulation of the atmospheric effects on snow albedo with multiple scattering radiative transfer model for the atmosphere-snow system. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **77**, 595-614.
- Aoki, T., Hachikubo, A. and Hori, M. (2003): Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4616.
- 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.
- 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.
- 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.
- Bell, R.E., Banwell, A.F., Trusel, L.D. and Kingslake, J. (2018): Antarctic surface hydrology and impacts on ice-sheet mass balance. *Nat. Clim. Chang.*, **8**, 1044-1052.
- Bennartz, R., Shupe, M.D., Turner, D.D., Walden, V.P., Steffen, K., Cox, C.J., Kulie, M.S., Miller, N.B. and Pettersen, C. (2013): July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds. *Nature*, **496**, 83-86.
- Bintanja, R. and Selten, F. (2014): Future increases in Arctic precipitation linked to local evaporation and sea-ice retreat. *Nature*, **509**, 479-482.
- Bonne, J.-L., Steen-Larsen, H.C., Risi, C., Werner, M., Sodemann, H., Lacour, J.-L., Fettweis, X., Cesana, G., Delmotte, M., Cattani, O., Vallelonga, P., Kjær, H.A., Clerbaux, C., Sveinbjörnsdóttir, Á. E. and Masson-Delmotte, V. (2015): The summer 2012 Greenland heat wave: In situ and remote sensing observations of water vapor isotopic composition during an atmospheric river event. *J. Geophys. Res. -Atmos.*, **120**, 2970-2989.
- Box, J.E. and Steffen, K. (2001): Sublimation on the Greenland ice sheet from automated weather station observations. *J. Geophys. Res.*, **106**, 33965-33981.
- Box, J.E. and Rinke, A. (2003): Evaluation of Greenland ice sheet surface climate in the HIRHAM regional climate model using automatic weather station data. *J. Climate*, **16**, 1302-1319.
- 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.
- Box, J.E., van As, D., Steffen, K. and the PROMICE project team. (2017): Greenland, Canadian and Icelandic land-ice albedo grids (2000-2016). *Geol. Surv. Den. Green. Bull.*, **38**, 53-56.
- Box, J.E., Colgan, W.T., Christensen, T.R., Schmidt, N. M., Lund, M., Parmentier, F.-J.W., Brown, R., Bhatt, U.

- S., Euskirchen, E.S., Romanovsky, V.E., Walsh, J.E., Overland, J.E., Wang, M., Corell, R.W., Meier, W.N., Wouters, B., Mernild, S., Mård, J., Pawlak, J. and Olsen, M.S. (2019): Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 045010.
- Brun, E. (1989): Investigation on wet-snow metamorphism in respect of liquid-water content. *Ann. Glaciol.*, **13**, 22–26.
- Brun, E., David, P., Sudul, M. and Brunot, G. (1992): A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, **38**, 13–22.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., Lopez, P., van Meijgaard, E. and Botzet, M. (1996): *The HIRHAM4 regional atmospheric climate model*. Copenhagen, Danish Meteorological Institute, 51 pp.
- Colgan, W., Machguth, H., MacFerrin, M., Colgan, J.D., van As, D. and MacGregor, J.A. (2016): The abandoned ice sheet base at Camp Century, Greenland, in a warming climate. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 8091–8096.
- Colgan, W., Mankoff, K.D., Kjeldsen, K.K., Bjørk, A.A., Box, J.E., Simonsen, S.B., Sørensen, L.S., Khan, S.A., Solgaard, A.M., Forsberg, R., Skourup, H., Stenseng, L., Kristensen, S.S., Hvidegaard, S.M., Citterio, M., Karlsson, N., Fettweis, X., Ahlstrøm, A.P., Andersen, S.B., van As, D. and Fausto, R.S. (2019): Greenland ice sheet mass balance assessed by PROMICE (1995–2015). *Geol. Surv. Den. Green. Bull.*, **43**, e2019430201.
- Cohen, J., Screen, J., Furtado, J., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J. and Jones, J. (2014): Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat. Geosci.*, **7**, 627–637.
- Cook, J.M., Tedstone, A.J., Williamson, C., McCutcheon, J., Hodson, A.J., Dayal, A., Skiles, M., Hofer, S., Bryant, R., McAree, O., McGonigle, A., Ryan, J., Anesio, A.M., Irvine-Fynn, T.D.L., Hubbard, A., Hanna, E., Flanner, M., Mayanna, S., Benning, L.G., van As, D., Yallop, M., McQuaid, J.B., Gribbin, T. and Tranter, M. (2020): Glacier algae accelerate melt rates on the south-western Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **14**, 309–330.
- Cullen, N.J. and Steffen, K. (2001): Unstable near-surface boundary conditions in summer on top of the Greenland Ice Sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4491–4493.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hølm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553–597.
- Enderlin, E.M., Howat, I.M., Jeong, S., Noh, M.-J., van Angelen, J.H. and van den Broeke, M.R. (2014): An improved mass budget for the Greenland ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 866–872.
- Ettema, J., van den Broeke, M.R., van Meijgaard, E., van de Berg, W.J., Box, J.E. and Steffen, K. (2010): Climate of the Greenland ice sheet using a high-resolution climate model – Part I: Evaluation. *The Cryosphere*, **4**, 511–527.
- Favier, V., Agosta, C., Parouty, S., Durand, G., Delaygue, G., Gallée, H., Drouet, A.-S., Trouvilliez, A. and Krinner, G. (2013): An updated and quality controlled surface mass balance dataset for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 583–597.
- Fettweis, X., Gallée, H. and Lefebvre, F. (2005): Greenland surface mass balance simulated by a regional climate model and comparison with satellite-derived data in 1990–1991. *Clim. Dyn.*, **24**, 623–640.
- Fettweis, X. (2007): Reconstruction of the 1979–2006 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate model MAR. *The Cryosphere*, **1**, 21–40.
- Fettweis, X., Mabilbe, G., Erpicum, M., Nicolay, S. and van den Broeke, M. (2011a): The 1958–2009 Greenland ice sheet surface melt and the mid-tropospheric atmospheric circulation. *Clim. Dyn.*, **36**, 139–159.
- Fettweis, X., Tedesco, M., van den Broeke, M. and Ettema, J. (2011b): Melting trends over the Greenland ice sheet (1958–2009) from spaceborne microwave data and regional climate models. *The Cryosphere*, **5**, 359–375.
- Fettweis, X., Box, J.E., Agosta, C., Amory, C., Kittel, C., Lang, C., van As, D., Machguth, H. and Gallée, H. (2017): Reconstructions of the 1900–2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate MAR model. *The Cryosphere*, **11**, 1015–1033.
- 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.
- Flanner, M. G. and C. S. Zender (2006): Linking snowpack microphysics and albedo evolution. *J. Geophys. Res.*, **111**, D12208.
- Golledge, N. R., Keller, E. D., Gomez, N., Naughten, K. A., Bernales, J., Trusel, L. D. and Edwards, T. L. (2019): Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt. *Nature*, **566**, 65–72.
- Haarlov, C. and Ostfeld, L. (2020): 12 days on the ice sheet. *SULUK 2020*, **1**, 48–53.
- Hall, D. K., Comiso, J. C., DiGirolamo, N. E., Shuman, C. A., Box, J. E. and Koenig, L. S. (2013): Variability in the surface temperature and melt extent of the Greenland ice sheet from MODIS. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2114–2120.
- Hanna, E., Jones, J. M., Cappelen, J., Mernild, S. H., Wood, L., Steffen, K. and Huybrechts, P. (2013): The influence of North Atlantic atmospheric and oceanic forcing effects on 1900–2010 Greenland summer climate and ice melt/runoff. *Int. J. Climatol.*, **33**, 862–880.
- Hanna, E., Fettweis, X., Mernild, S. H., Cappelen, J., Ribergaard, M. H., Shuman, C. A., Steffen, K., Wood, L. and Mote, T. L. (2014): Atmospheric and oceanic climate forcing of the exceptional Greenland ice sheet surface melt in summer 2012. *Int. J. Climatol.*, **34**, 1022–1037.
- Hanna, E., Cropper, T. E., Jones, P. D., Scaife, A. A. and Allan, R. (2015): Recent seasonal asymmetric changes in the NAO (a marked summer decline and increased winter variability) and associated changes in the AO and Greenland Blocking Index. *Int. J. Climatol.*, **35**, 2540–2554.
- 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.
- Hashimoto, A., Niwano, M., Aoki, T., Tsutaki, S., Sugiyama, S., Yamasaki, T., Iizuka, Y. and Matoba, S. (2017a): Numerical weather prediction system based on JMA-NHM for field observation campaigns on the Greenland ice sheet. *Low Temp. Sci.*, **75**, 91–104.
- Hashimoto, A., Yamada, K., Hirasawa, N., Niwano, M. and Aoki, T. (2017b): Antarctic numerical weather prediction for supporting JARE by using JMA-NHM. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **47**, 5.09–5.10.
- Hermann, M., Box, J. E., Fausto, R. S., Colgan, W. T., Langen, P. L., Mottram, R., Wuite, J., Noël, B., van den Broeke, M. R. and van As, D. (2018): Application of PROMICE Q-transect in situ accumulation and ablation measurements (2000–2017) to constrain mass balance at the southern tip of the Greenland ice sheet. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, **123**, 1235–1256.
- Hildebrandsson, H. H. (1897): Quelques recherches sur les centres d'action de l'atmosphère. *Kongl. Svenska Vetenskaps-akad. Handl.*, **29**, 3.
- 平沢尚彦, 亀田貴雄, 本山秀明 (2017) : 南極氷床の涵養量の分布と年々変化. 気象研究ノート, **233**, 171–204.
- Hirasawa, N., Konishi, H., Nishimura, K., Genthon, C. and project group of Japan Meteorological Agency (2018): SPICE site report: Rikubetsu, Japan. *WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE) (2012–2015), Instruments and Observing Methods*, **131**, Annex 8.3.
- Hofer, S., Tedstone, A. J., Fettweis, X. and Bamber, J. L. (2017): Decreasing cloud cover drives the recent mass loss on the Greenland Ice Sheet. *Sci. Adv.*, **3**, e1700584.
- Hoshina, Y., Fujita, K., Iizuka, Y. and Motoyama, H. (2016): Inconsistent relationships between major ions and water stable isotopes in Antarctic snow under different accumulation environments. *Polar Science*, **10**, 1–10.
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., Visbeck, M. (eds). (2003): The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. American Geophysical Union, Washington DC, 279 pp.
- Jones, J. M., Gille, S. T., Goosse, H., Abram, N. J., Canziani, P. O., Charman, D. J., Clem, K. R., Crosta, X., de Lavergne, C., Eisenman, I., England, M. H., Fogt, R. L., Frankcombe, L. M., Marshall, G. J., Masson-Delmotte, V., Morrison, A. K., Orsi, A. J., Raphael, M. N., Renwick, J. A., Schneider, D. P., Simpkins, G. R., Steig, E. J., Stenni, B., Swingedouw, D. and Vance, T. R. (2016): Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate. *Nat. Clim. Chang.*, **6**, 917.
- 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. (2019): 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. Meteorol. Soc. Japan*, **97**, 337–374.
- Kameda, T., Motoyama, H., Fujita, S. and Takahashi, S. (2008): Temporal and spatial variability of surface mass balance at Dome Fuji, East Antarctica, by stake method from 1995 to 2006. *J. Glaciol.*, **54**, 107–116.
- 亀田貴雄, 平沢高彦, 山内 恭 (2020): 南極無人気象観測および米国ウイスコンシン大学宇宙理工学センター南極気象研究室との国際共同研究に関するワークショップの開催報告. 雪氷, **82** (3), 163–167.
- Kawai, H., Yukimoto, S., Koshiro, T., Oshima, N., Tanaka, T., Yoshimura, H. and Nagasawa, R. (2019): Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 2875–2897.
- Khan, S.A., Wahr, J., Bevis, M., Velicogna, I. and Kendrick, E. (2010): Spread of ice mass loss into northwest Greenland observed by GRACE and GPS. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L06501.
- King, M.D., Howat, I.M., Jeong, S., Noh, M.J., Wouters, B., Noël, B. and van den Broeke, M.R. (2018): Seasonal to decadal variability in ice discharge from the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **12**, 3813–3825.
- Kjeldsen, K., Korsgaard, N., Bjørk, A., Khan, S.A., Box, J.E., Funder, S., Larsen, N.K., Bamber, J.L., Colgan, W., van den Broeke, M., Siggaard-Andersen, M.-L., Nuth, C., Schomacker, A., Andresen, C.S., Willerslev E. and Kjær, K.H. (2015): Spatial and temporal distribution of mass loss from the Greenland Ice Sheet since AD 1900. *Nature*, **528**, 396–400.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K. (2015): The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Konzelmann, T., van de Wal, R.S.W., Greuell, W., Bintanja, R., Henneken, E.A.C. and Abe-Ouchi, A. (1994): Parameterization of global and longwave incoming radiation for the Greenland Ice Sheet. *Glob. Planet. Change*, **9**, 143–164.
- Koyama, T., Stroeve, J., Cassano, J. and Crawford, A. (2017): Sea Ice Loss and Arctic Cyclone Activity from 1979 to 2014. *J. Climate*, **30**, 4735–4754.
- Kuipers Munneke, P., van den Broeke, M.R., Lenaerts, J. T.M., Flanner, M.G., Gardner, A.S. and van de Berg, W.J. (2011): A new albedo parameterization for use in climate models over the Antarctic ice sheet. *J. Geophys. Res.*, **116**, D05114.
- Kuipers Munneke, P., Ligtenberg, S.R.M., Noël, B.P.Y., Howat, I.M., Box, J.E., Mosley-Thompson, E., McConnell, J.R., Steffen, K., Harper, J.T., Das, S.B. and van den Broeke, M.R. (2015): Elevation change of the Greenland Ice Sheet due to surface mass balance and firn processes, 1960–2014. *The Cryosphere*, **9**, 2009–2025.
- Kuipers Munneke, P., Smeets, C.J.P.P., Reijmer, C.H., Oerlemans, J., van de Wal, R.S.W. and van den Broeke, M.R. (2018): The K-transect on the western Greenland Ice Sheet: Surface energy balance (2003–2016). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **50**, S100003.
- Langen, P.L., Mottram, R.H., Christensen, J.H., Boberg, F., Rodehacke, C.B., Stendel, M., van As, D., Ahlström, A.P., Mortensen, J., Rysgaard, S., Petersen, D., Svendsen, K.H., Aðalgeirsdóttir, G. and Cappelen, J. (2015): Quantifying energy and mass fluxes controlling Godthåbsfjord freshwater input in a 5 km simulation (1991–2012). *J. Climate*, **28**, 3694–3713.
- Langen, P.L., Fausto, R.S., Vandecrux, B., Mottram, R.H. and Box, J.E. (2017): Liquid Water flow and retention on the Greenland Ice Sheet in the regional climate model HIRHAM5: Local and large-scale impacts. *Front. Earth Sci.*, **4**, 110.
- Lawrence, D.M., Fisher, R.A., Koven, C.D., Oleson, K.W., Swenson, S.C., Bonan, G., Collier, N., Ghimire, B., Kampenhout, L., Kennedy, D., Kluzek, E., Lawrence, P.J., Li, F., Li, H., Lombardozi, D., Riley, W.J., Sacks, W.J., Shi, M., Vertenstein, M., Wieder, W.R., Xu, C., Ali, A.A., Badger, A.M., Bisht, G., Broeke, M., Brunke, M.A., Burns, S.P., Buzan, J., Clark, M., Craig, A., Dahlin, K., Drewniak, B., Fisher, J.B., Flanner, M., Fox, A.M., Gentine, P., Hoffman, F., Keppel-Aleks, G., Knox, R., Kumar, S., Lenaerts, J., Leung, L.R., Lipscomb, W.H., Lu, Y., Pandey, A., Pelletier, J.D., Perket, J., Randerson, J.T., Ricciuto, D.M., Sanderson, B.M., Slater, A., Subin, Z.M., Tang, J., Thomas, R.Q., Val Martin, M. and Zeng, X. (2019): The Community Land Model Version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 4245–4287.
- Lefebre, F., Fettweis, X., Gallée, H., Van Ypersele, J.-P., Marbaix, P., Greuell, W. and Calanca, P. (2005): Evaluation of a high-resolution regional climate simulation over Greenland. *Clim. Dynam.*, **25**, 99–116.

- Lenaerts, J. T. M., van den Broeke, M. R., van Angelen, J. H., van Meijgaard, E. and Déry, S. J. (2012): Drifting snow climate of the Greenland ice sheet: a study with a regional climate model. *The Cryosphere*, **6**, 891–899.
- Lenaerts, J. T. M., Vizzaino, M., Fyke, J. van Kampenhout, L. and van den Broeke, M. R. (2016): Present-day and future Antarctic ice sheet climate and surface mass balance in the Community Earth System Model. *Clim. Dyn.*, **47**, 1367–1381.
- Lipscomb, W. H., Price, S. F., Hoffman, M. J., Leguy, G. R., Bennett, A. R., Bradley, S. L., Evans, K. J., Fyke, J. G., Kennedy, J. H., Perego, M., Ranken, D. M., Sacks, W. J., Salinger, A. G., Vargo, L. J. and Worley, P. H. (2019): Description and evaluation of the Community Ice Sheet Model (CISM) v2.1. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 387–424.
- MacFerrin, M., Machguth, H., van As, D., Charalampidis, C., Stevens, C. M., Heilig, A., Vandecrux, B., Langen, P. L., Mottram, R., Fettweis, X., van den Broeke, M. R., Pfeffer, W. T., Moussavi, M. S. and Abdalati, W. (2019): Rapid expansion of Greenland's low-permeability ice slabs. *Nature*, **573**, 403–407.
- Machguth, H., Thomsen, H. H., Weidick, A., Abermann, J., Ahlström, A. P., Andersen, M. L., Andersen, S. B., Bjørk, A. A., Box, J. E., Braithwaite, R. J., Bøggild, C. E., Citterio, M., Clement, P., Colgan, W., Fausto, R. S., Gleie, K., Hasholt, B., Hynek, B., Knudsen, N. T., Larsen, S. H., Mernild, S., Oerlemans, J., Oerter, H., Olesen, O. B., Smeets, C. J. P. P., Steffen, K., Stober, M., Sugiyama, S., van As, D., van den Broeke, M. R. and van de Wal, R. S. (2016a): Greenland surface mass balance observations from the ice sheet ablation area and local glaciers. *J. Glaciol.*, **62**, 861–887.
- Machguth, H., MacFerrin, M., van As, D., Box, J. E., Charalampidis, C., Colgan, W., Fausto, R. S., Meijer, H. A. J., Mosley-Thompson, E. and van de Wal, R. S. W. (2016b): Greenland meltwater storage in firn limited by near-surface ice formation. *Nat. Clim. Chang.*, **6**, 390–393.
- Manabe, S. and Stouffer, R. J. (1980): Sensitivity of a global climate model to an increase of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **85**, 5529–5554.
- 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.
- Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H. and Schuur, E. A. G. (2020): Polar Regions. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, edited by Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., & Weyer, N. M., In press.
- Mernild, S. H., Liston, G. E., Hiemstra, C. A. and Christensen, J. H. (2010): Greenland Ice Sheet surface mass-balance modeling in a 131-Yr perspective, 1950–2080. *J. Hydrometeorol.*, **11**, 3–25.
- Mernild, S. H., Liston, G. E., Hiemstra, C. A., Christensen, J. H., Stendel, M. and Hasholt, B. (2011): Surface mass balance and runoff modeling using HIRHAM4 RCM at Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord), west Greenland, 1950–2080. *J. Climate*, **24**, 609–623.
- 本山秀明 (2017) : 雪尺観測から見える氷床表面質量収支の変動. 気象研究ノート, **233**, 193–204.
- Mottram, R., Boberg, F., Langen, P., Yang, S., Rodehacke, C., Christensen, J. H. and Madsen, M. S. (2017): Surface mass balance of the Greenland Ice Sheet in the regional climate model HIRHAM5: Present State and Future Prospects. *Low Temp. Sci.*, **75**, 105–115.
- Mottram, R., Hansen, N., Kittel, C., van Wessem, M., Agosta, C., Amory, C., Boberg, F., van de Berg, W. J., Fettweis, X., Gossart, A., van Lipzig, N. P. M., van Meijgaard, E., Orr, A., Phillips, T., Webster, S., Simonsen, S. B. and Souverijns, N. (2020): What is the Surface Mass Balance of Antarctica? An Inter-comparison of Regional Climate Model Estimates. *The Cryosphere Discuss.*, in review.
- Mouginot, J., Rignot, E., Bjørk, A. A., van den Broeke, M., Millan, R., Morlighem, M., Noël, B., Scheuchl, B. and Wood, M. (2019): Forty-six years of Greenland Ice Sheet mass balance from 1972 to 2018. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **116**, 9239–9244.
- 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.
- Neff, W., Compo, G. P., Ralph, F. M. and Shupe, M. D. (2014): Continental heat anomalies and the extreme melting of the Greenland ice surface in 2012 and 1889. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **119**, 6520–6536.
- 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.

- Nicolas, J.P. and Bromwich, D.H. (2014): New reconstruction of Antarctic near-surface temperatures: Multidecadal trends and reliability of global reanalyses. *J. Climate*, **27**, 8070–8093.
- 日本雪氷学会, (2014): 新版雪氷事典. 日本雪氷学会, 307 pp.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 non-hydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **12**, 635–655.
- 庭野 匡思 (2019): グリーンランド氷床における近年の急激な雪氷質量損失—現地観測と数値モデルによるメカニズム理解の試み—。 *天気*, **66**, 225–230.
- Niwano, M., Hashimoto, A. and Aoki, T. (2019): Cloud-driven modulations of Greenland ice sheet surface melt. *Sci. Rep.*, **9**, 10380.
- Noël, B., van de Berg, W.J., van Meijgaard, E., Kuipers Munneke, P., van de Wal, R.S.W. and van den Broeke, M.R. (2015): Evaluation of the updated regional climate model RACMO2.3: summer snowfall impact on the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **9**, 1831–1844.
- Noël, B., van de Berg, W.J., Machguth, H., Lhermitte, S., Howat, I., Fettweis, X. and van den Broeke, M.R. (2016): A daily, 1 km resolution data set of downscaled Greenland ice sheet surface mass balance (1958–2015). *The Cryosphere*, **10**, 2361–2377.
- Noël, B., van de Berg, W., Lhermitte, S., Wouters, B., Machguth, H., Howat, I., Citterio, M., Moholdt, G., Lenaerts, J.T.M. and van den Broeke, M.R. (2017): A tipping point in refreezing accelerates mass loss of Greenland's glaciers and ice caps. *Nat. Commun.*, **8**, 14730.
- Noël, B., van de Berg, W.J., van Wessem, J.M., van Meijgaard, E., van As, D., Lenaerts, J.T.M., Lhermitte, S., Kuipers Munneke, P., Smeets, C.J.P.P., van Uft, L.H., van de Wal, R.S.W. and van den Broeke, M.R. (2018): Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using RACMO2 – Part 1: Greenland (1958–2016). *The Cryosphere*, **12**, 811–831.
- Noël, B., van de Berg, W.J., Lhermitte, S. and van den Broeke, M.R. (2019): Rapid ablation zone expansion amplifies north Greenland mass loss. *Sci. Adv.*, **5**, eaaw0123.
- Noël, B., van Kampenhou, L., van de Berg, W.J., Lenaerts, J.T.M., Wouters, B. and van den Broeke, M.R. (2020): Brief communication: CESM2 climate forcing (1950–2014) yields realistic Greenland ice sheet surface mass balance. *The Cryosphere*, **14**, 1425–143.
- Ohmura, A., Steffen, K., Blatter, H., Greuell, W., Rotach, M., Konzelmann, T., Laternser, M., Abe-Ouchi, A. and Steiger, D. (1991): *ETH Greenland expedition. Progress Report No. 1*. Zurich, Swiss Federal Institute of Technology, 108 pp.
- Ohmura, A., Steffen, K., Blatter, H., Greuell, W., Rotach, M., Stober, M., Konzelmann, T., Forrer, J., Abe-Ouchi, A., Steiger, D. and Niederbäumer, G. (1992): *ETH Greenland Expedition. Progress Report No. 2*. Zurich, Swiss Federal Institute of Technology, 94 pp.
- Ohmura, A. and Reeh, N. (1991): New precipitation and accumulation maps for Greenland. *J. Glaciol.*, **37**, 140–148.
- Ohmura, A., Konzelmann, T., Rotach, M., Forrer, J., Wild, M., Abe-Ouchi, A. and Toritani, H. (1994): Energy balance for the Greenland ice sheet by observation and model computation. *Snow and Ice Covers; Interaction with the Atmosphere and Ecosystems*, edited by Jones, H.G., Davies, T.D., Ohmura, A., and Morris, E.M., Gentsbrugge, IAHS, 85–94.
- Ohmura, A., Wild, M. and Bengtsson, L. (1996): A possible change in mass balance of Greenland and Antarctic Ice Sheets in the coming century. *J. Climate*, **9**, 2124–2135.
- 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. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, edited by Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K.,

- Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. and Weyer, N.M. In press.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Overland, J., Walsh, J. and Kattsov, V. (2017): Chapter 2. Trends and feedbacks. *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*, Oslo, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 9–24.
- Phillips, T., Rajaram, H. and Steffen, K. (2010): Cryo-hydrologic warming: A potential mechanism for rapid thermal response of ice sheets. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20503.
- Pritchard, H.D., Ligtenberg, S.R.M., Fricker, H.A., Vaughan, D.G. and van den Broeke, M.R. (2012): Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502–505.
- Rignot, E., Box, J.E., Burgess, E. and Hanna, E. (2008): Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20502.
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., van den Broeke, M., J. van Wessem, M. and Morlighem, M. (2019): Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **116**, 1095–1103.
- Ruan, R., Chen, X., Zhao, J., Perrie, W., Mottram, R., Zhang, M., Diao, Y., Du, L. and Wu, L. (2019): Decelerated Greenland Ice Sheet driven by positive summer north atlantic oscillation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 7633–7646.
- Ryan, J.C., Hubbard, A., Stibal, M., Irvine-Fynn, T.D., Cook, J., Smith, L.C., Cameron, K. and Box, J.E. (2018): Dark zone of the Greenland Ice Sheet controlled by distributed biologically-active impurities. *Nat. Commun.*, **9**, 1065.
- Saito, F., Abe-Ouchi, A., Takahashi, K. and Blatter, H. (2016): SeaRISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, **10**, 43–63.
- Saito, K., Fujita, T., Yamada, Y., Ishida, J., Kumagai, Y., Aranami, K., Ohmori, S., Nagasawa, R., Kumagai, S., Muroi, C., Kato, T., Eito H. and Yamazaki, K. (2006): The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.
- Serreze, M.C. and Barry, R.G. (2014): *The Arctic Climate System*, 2nd ed., Cambridge, Cambridge University Press, 404 pp.
- Serreze, M.C., Barrett, A.P., Stroeve, J.C., Kindig, D.N. and Holland, M.M. (2009): The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, **3**, 11–19.
- 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**, 1–10.
- Simmons, A.J. and Poli, P. (2015): Arctic warming in ERA-Interim and other reanalyses. *Q.J. Roy. Meteorol. Soc.*, **141**, 1147–1162.
- Steffen, K. and Box, J.E. (2001): Surface climatology of the Greenland ice sheet: Greenland Climate Network 1995–1999. *J. Geophys. Res.*, **106**, 33951–33964.
- Stibal, M., Box, J.E., Cameron, K. A., Langen, P.L., Yallop, M.L., Mottram, R.H., Khan, A.L., Molotch, N.P., Christmas, N.A.M., Quaglia, F.C., Remias, D., Smeets, C.J.P.P., van den Broeke, M.R., Ryan, J.C., Hubbard, A., Tranter, M., van As, D. and Ahlström, A.P. (2017): Algae drive enhanced darkening of bare ice on the Greenland ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 11463–11471.
- Stroeve, J. (2001): Assessment of Greenland albedo variability from the advanced very high resolution radiometer Polar Pathfinder data set. *J. Geophys. Res.*, **106**, 33989–34006.
- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S. and Aoki, T. (2014): Initial field observation on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland. *Ann. Glaciol.*, **55**, 25–33.
- 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.
- Takeuchi, N., Sakaki, R., Uetake, J., Nagatsuka, N., Shimada, R., Niwano, M. and Aoki, T. (2018): Tem-

- poral variations of cryoconite holes and cryoconite coverage on the ablation ice surface of Qaanaaq Glacier in northwest Greenland. *Ann. Glaciol.*, **59**, 21–30.
- Tanikawa, T., Hori, M., Aoki, T., Hachikubo, A., Kuchiki, K., Niwano, M., Matoba, S., Yamaguchi, S. and Stamnes, K. (2014): In-situ measurement of polarization properties of snow surface under the Brewster geometry in Hokkaido, Japan and northwest Greenland ice sheet. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 13946–13964.
- Tedesco, M., Fettweis, X., Mote, T., Wahr, J., Alexander, P., Box, J.E. and Wouters, B. (2013): Evidence and analysis of 2012 Greenland records from spaceborne observations, a regional climate model and reanalysis data. *The Cryosphere*, **7**, 615–630.
- Tedesco, M., Mote, T., Fettweis, X., Hanna, E., Jeyaratnam, J., Booth, J.F., Datta, R. and Briggs, K. (2016): Arctic cut-off high drives the poleward shift of a new Greenland melting record. *Nat. Commun.*, **7**, 11723.
- Tedesco, M. and Fettweis, X. (2020): Unprecedented atmospheric conditions (1948–2019) drive the 2019 exceptional melting season over the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, **14**, 1209–1223.
- Tedstone, A.J., Bamber, J.L., Cook, J.M., Williamson, C. J., Fettweis, X., Hodson, A.J. and Tranter, M. (2017): Dark ice dynamics of the south-west Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **11**, 2491–2506.
- The IMBIE team (2018): Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, **558**, 219–222.
- The IMBIE team (2020): Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, **579**, 233–239.
- Trusel, L.D., Das, S.B., Osman, M.B., Evans, M.J., Smith, B.E., Fettweis, X., McConnell, J.R., Noël, B.P. and van den Broeke, M.R. (2018): Nonlinear rise in Greenland runoff in response to post-industrial Arctic warming. *Nature*, **564**, 104, 2018.
- 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.
- Turner, J. Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Hosking, J.S., Bracegirdle, T.J., Marshall, G.J., Mulvaney, R. and Deb, P. (2016): Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, **535**, 411–415.
- Tuzet, F., Dumont, M., Lafaysse, M., Picard, G., Arnaud, L., Voisin, D., Lejeune, Y., Charrois, L., Nabat, P. and Morin, S. (2017): A multilayer physically based snow-pack model simulating direct and indirect radiative impacts of light-absorbing impurities in snow. *The Cryosphere*, **11**, 2633–2653.
- van As, D., Hubbard, A.L., Hasholt, B., Mikkelsen, A.B., van den Broeke, M.R. and Fausto, R.S. (2012): Large surface meltwater discharge from the Kangerlussuaq sector of the Greenland ice sheet during the record-warm year 2010 explained by detailed energy balance observations. *The Cryosphere*, **6**, 199–209.
- van de Berg, W.J. and Medley, B. (2016): Brief Communication: Upper-air relaxation in RACMO2 significantly improves modelled interannual surface mass balance variability in Antarctica. *The Cryosphere*, **10**, 459–463.
- van de Berg, W.J., van Meijgaard, E. and van Ulft, L.H. (2020): The added value of high resolution in estimating the surface mass balance in southern Greenland. *The Cryosphere*, **14**, 1809–1827.
- Vandecrux, B., MacFerrin, M., Machguth, H., Colgan, W. T., van As, D., Heilig, A., Stevens, C.M., Charalampidis, C., Fausto, R.S., Morris, E.M., Mosley-Thompson, E., Koenig, L., Montgomery, L.N., Miège, C., Simonsen, S. B., Ingeman-Nielsen, T. and Box, J.E. (2019): Firn data compilation reveals widespread decrease of firn air content in western Greenland. *The Cryosphere*, **13**, 845–859.
- Vandecrux, B., Fausto, R.S., van As, D., Colgan, W., Langen, P.L., Haubner, K., Ingeman-Nielsen, T., Heilig, A., Stevens, C.M., MacFerrin, M., Niwano, M., Steffen, K. and Box, J.E. (2020): Firn cold content evolution at nine sites on the Greenland ice sheet between 1998 and 2017. *J. Glaciol.*, **66**, 591–602.
- van den Broeke, M.R., Bamber, J., Ettema, J., Rignot, E., Schrama, E.J.O., van de Berg, W.J., van Meijgaard, E., Velicogna, I. and Wouters, B. (2009a): Partitioning recent Greenland mass loss. *Science*, **326**, 984–986.
- van den Broeke, M., Smeets, P. and Ettema, J. (2009b): Surface layer climate and turbulent exchange in the ablation zone of the west Greenland ice sheet. *Int. J. Climatol.*, **29**, 2309–2323.
- van den Broeke, M., Smeets, C.J.P.P. and van de Wal, R. S.W. (2011): The seasonal cycle and interannual variability of surface energy balance and melt in the ablation zone of the west Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, **5**, 377–390.
- van den Broeke, M.R., Enderlin, E.M., Howat, I.M., Kuipers Munneke, P., Noël, B.P.Y., van de Berg, W.J., van Meijgaard E. and Wouters, B. (2016): On the recent contribution of the Greenland ice sheet to sea level change. *The Cryosphere*, **10**, 1933–1946.

- van de Wal, R., Greuell, W., Van den Broeke, M., Reijmer, C. and Oerlemans, J. (2005). Surface mass-balance observations and automatic weather station data along a transect near Kangerlussuaq, West Greenland. *Ann. Glaciol.*, **42**, 311–316.
- van Kampenhout, L., Lenaerts, J. T. M., Lipscomb, W. H., Sacks, W. J., Lawrence, D. M., Slater, A. G. and van den Broeke, M. R. (2017). Improving the Representation of Polar Snow and Firn in the Community Earth System Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 2583–2600.
- van Kampenhout, L., Rhoades, A. M., Herrington, A. R., Zarzycki, C. M., Lenaerts, J. T. M., Sacks, W. J. and van den Broeke, M. R. (2019). Regional grid refinement in an Earth system model: impacts on the simulated Greenland surface mass balance. *The Cryosphere*, **13**, 1547–1564.
- van Kampenhout, L., Lenaerts, J. T. M., Lipscomb, W. H., Lhermitte, S., Noël, B., Vizcaino, M., Sacks, W. J. and van den Broeke, M. R. (2020). Present-day Greenland Ice Sheet climate and surface mass balance in CESM2. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, **125**, e2019JF005318.
- Van Meijgaard, E., van Ulft, L. H., van de Berg, W. J., Bosveld, F. C., van den Hurk, B., Lenderink, G. and Siebesma, A. P. (2008): *Technical Report 302: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1*. De Bilt, Royal Netherlands Meteorological Institute, 43 pp.
- van Tiggelen, M., Smeets, P. C. J. P., Reijmer, C. H. and van den Broeke, M. R. (2020): A vertical propeller Eddy-Covariance method and its application to long-term monitoring of surface turbulent fluxes on the Greenland Ice Sheet. *Boundary-Layer Meteorol.*, **176**, 441–463.
- Van Tricht, K., Lhermitte, S., Lenaerts, J. T. M., Gorodetskaya, I. V., L'Ecuyer, T. S., Noël, B., van den Broeke, M. R., Turner, D. D. and van Lipzig, N. P. M. (2016): Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff. *Nat. Commun.*, **7**, 10266.
- van Wessem, J. M., van de Berg, W. J., Noël, B. P. Y., van Meijgaard, E., Amory, C., Birnbaum, G., Jakobs, C. L., Krüger, K., Lenaerts, J. T. M., Lhermitte, S., Ligtenberg, S. R. M., Medley, B., Reijmer, C. H., van Tricht, K., Trusel, L. D., van Ulft, L. H., Wouters, B., Wuite, J. and van den Broeke, M. R. (2018): Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using RACMO2 – Part 2: Antarctica (1979–2016). *The Cryosphere*, **12**, 1479–1498.
- Vaughan, D. G., Comiso, J. C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. and Zhang, T. (2013): Observations: Cryosphere. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge, Cambridge University Press, 317–382.
- Vernon, C. L., Bamber, J. L., Box, J. E., van den Broeke, M. R., Fettweis, X., Hanna, E. and Huybrechts, P. (2013): Surface mass balance model intercomparison for the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, **7**, 599–614.
- Vizcaino, M., Lipscomb, W. H., Sacks, W. J., van Angelen, J. H., Wouters, B. and van den Broeke, M. R. (2013): Greenland Surface Mass Balance as Simulated by the Community Earth System Model. Part I: Model Evaluation and 1850–2005 Results. *J. Climate*, **26**, 7793–7812.
- Walker, G. T. and Bliss, E. W. (1932): World Weather V. *Mem. R. Metrol. Soc.*, **4**, 53–84.
- Wang, Y., Ding, M., van Wessem, J. M., Schlosser, E., Altnau, S., van den Broeke, M. R., Lenaerts, J. T., Thomas, E. R., Isaksson, E., Wang, J. and Sun, W. (2016): A comparison of Antarctic ice sheet surface mass balance from atmospheric climate models and in situ observations. *J. Climate*, **29**, 5317–5337.
- Wang, W., Zender, C. S. and van As, D. (2018): Temporal characteristics of cloud radiative effects on the Greenland Ice Sheet: Discoveries from multiyear automatic weather station measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 311–348.
- Wang, W., Zender, C. S., van As, D. and Miller, N. B. (2019). Spatial distribution of melt season cloud radiative effects over Greenland: Evaluating satellite observations, reanalyses, and model simulations against in situ measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 57–71.
- Wehrlé, A., Box, J. E., Niwano, M., Anesio, A. M. and Fausto, R. S. (2020): Greenland bare ice albedo from PROMICE automatic weather station measurements and Sentinel-3 satellite observations. *Geol. Surv. Den. Green. Bull.*, in review.
- Williamson, C. J., Cook, J., Tedstone, A., Yallop, M., McCutcheon, J., Poniecka, E., Campbell, D., Irvine-Fynn, T., McQuaid, J., Tranter, M., Perkins, R. and Anesio, A. (2020): Algal photophysiology drives darkening and melt of the Greenland Ice Sheet. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **117** 5694–5705.
- 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.
- Yallop, M., Anesio, A., Perkins, R., Cook, J., Telling, J., Fagan, D., MacFarlane, J., Stibal, M., Barker, G., Bellas, C., Hodson, A., Tranter, M., Wadham, J. and Roberts, N.W. (2012): Photophysiology and albedo-changing potential of the ice algal community on the surface of the Greenland ice sheet. *ISME J.*, **6**, 2302–2313.
- Yamaguchi, S., Matoba, S., Yamazaki, T., Tsushima, A., Niwano, M., Tanikawa, T. and Aoki, T. (2014): Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 95–105.
- Yoshimori, M. and Abe-Ouchi, A. (2012): Sources of spread in multimodel projections of the Greenland ice sheet surface mass balance. *J. Climate*, **25**, 1157–1175.
- 吉森正和 (2019) : 北極温暖化増幅のメカニズムと将来予測. *天気*, **66**, 214–219.
- 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. Jpn.*, **97**, 931–965.
- Zwally, H., Giovinetto, M., Beckley, M. and Saba, J. (2012): Antarctic and Greenland Drainage Systems, [http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo\\_data/ant\\_grn\\_drainage\\_systems.php](http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo_data/ant_grn_drainage_systems.php) (2020. 09. 09 閲覧).

## Review of the current polar ice sheet surface mass balance and its modelling: the 2020 summer edition

Masashi NIWANO<sup>1\*</sup>, Teruo AOKI<sup>2,1</sup>, Akihiro HASHIMOTO<sup>1</sup>, Naga OSHIMA<sup>1</sup>, Mizuo KAJINO<sup>1</sup>, Yukihiko ONUMA<sup>3</sup>,  
Koji FUJITA<sup>4</sup>, Satoru YAMAGUCHI<sup>5</sup>, Rigen SHIMADA<sup>6</sup>, Nozomu TAKEUCHI<sup>7</sup>, Shun TSUTAKI<sup>8,2</sup>,  
Hideaki MOTOYAMA<sup>2</sup>, Masayoshi ISHII<sup>1</sup>, Shin SUGIYAMA<sup>9</sup>,  
Naohiko HIRASAWA<sup>2</sup> and Ayako ABE-OUCHI<sup>8,2</sup>

<sup>1</sup> *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052*

<sup>2</sup> *National Institute of Polar Research, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518*

<sup>3</sup> *Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Chiba 277-8574*

<sup>4</sup> *Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya 464-8601*

<sup>5</sup> *Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 16-187, Suyoshi-Maeyama, Ngaoka, Niigata, 914-0821*

<sup>6</sup> *Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505*

<sup>7</sup> *Graduate School of Science, Chiba University, Chiba, 263-8522*

<sup>8</sup> *Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8564*

<sup>9</sup> *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Nishi 8, Kita 19, Sapporo, 060-0819*

\* *Corresponding author: mniwano@mri-jma.go.jp*

(2020年6月26日受付, 2020年8月7日改稿受付, 2020年10月19日再改稿受付,  
2020年10月19日受理)