

グリーンランド氷床では今、何が起きているのか？ —温暖化の最前線からの報告—

What is happening in the Greenland ice sheet?
A report from the hotspot of global warming

庭野匡思*

1. はじめに

2021年にノーベル物理学賞を受賞された真鍋淑郎博士は、1980年に発表した論文¹⁾において、地球温暖化が進行する状況下では極域における気温上昇率が他の地域におけるそれよりも遥かに大きくなる可能性があることを指摘した。このことは、特に2000年代以降、現実のこととなって我々の眼前に突き付けられており、今では、極域温暖化増幅(Polar Amplification)として広く認識されている。そして、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²⁾ことから、個別に北極温暖化増幅(Arctic Amplification)と呼ばれることも多くなってきている³⁾。その、まさに現代の地球温暖化のホットスポットと呼ぶべき北極域に、世界で二番目に大きな氷床(厚い雪氷によって覆われている部分の表面積が 10^6 km^2 より大きな領域のこと)であるグリーンランド氷床が存在する。

北極域での気温上昇は、様々なメカニズムを介して氷床上に存在する雪氷の融解を加速する。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、クレバスなどを伝って氷床下部に到達して(液体水は氷と基盤地形の潤滑剤の役割を果たすことから)氷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⁴⁾。氷床から失われて海洋に流入するそれらの融解水と氷体は、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⁵⁾によると、グリーンランド氷床は、1992年から2018年にかけて $3,902 \pm 342 \text{ Gt}$ 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 $10.8 \pm 0.9 \text{ mm}$ 程度押し上げたと考えられている。今後、2100年にかけて温暖化が一層進み続けると、現在より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70～130 mm程度も押し上げられる可能性が提示されている。

氷床の質量変化(Mass Balance; MB)を定量的かつ正確に理解するためには、大気-雪氷相互作用の帰結である表面質量収支(Surface Mass Balance; SMB = 降水 - 液体水の流出 - 氷床表面における昇華 - 氷床表面における蒸発)と、氷床流動による氷体の海洋への流出(Discharge; D)にMBを分離して($MB = SMB - D$)評価することが必要不可欠である。2013年にIPCC第5次評価報告書(Intergovernmental Panel on Climate Change's Fifth Assessment Report)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⁵⁾。このため、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。このような背景の元、我々は2010年代から、グリーンランド氷床においてSMBに関連する観測・モデル研究を推進してきている。本稿では、我々がやってきた多岐に及ぶ研究の中から、太陽放射・赤外放射の変動に起因する雪氷融解に関係する部分を特にピックアップして概説する。

2. 氷床SMBの実態把握

既にみたように、氷床SMB変動は大気-雪氷相互作用によって駆動されることから、氷床表面にお

*気象庁気象研究所

ける気象・雪氷場を直接観測することで、氷床 SMB の実態把握を行うことが可能である。そのため我々は、2012年6月末に、北西氷床上の SIGMA-A サイトに自動気象観測装置（図1）を設置した。その後、現在にかけて高品質な観測データが継続的に取得されている。自動気象観測装置が設置された直後の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⁶⁾。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いた⁶⁾ことが分かっている。

従来の理解⁷⁾では、氷床上に高気圧が停滞すると、以下のプロセスを経て雪氷表面融解が引き起こされやすくなると整理されていた：

1. 氷床周辺の気圧下層で高気圧性（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。
2. 一方で高気圧の中心部（氷床内陸部）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ため、雪氷面加熱が助長され表面融解が引き起こされやすくなる。

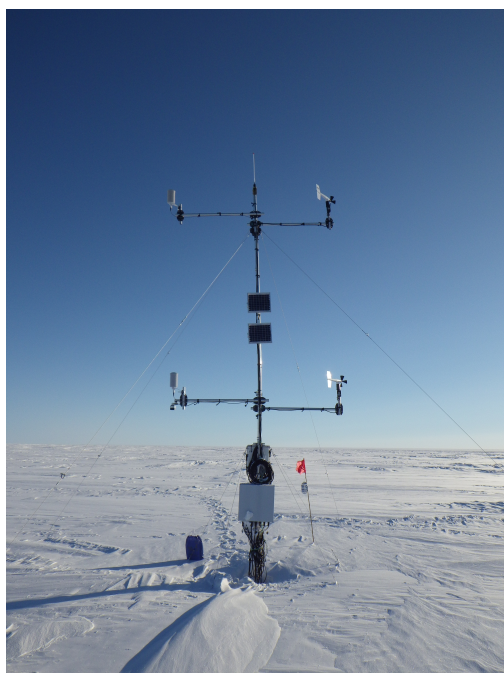


図1 北西グリーンランド氷床上 SIGMA-A サイトに設置されている自動気象観測装置。気温・湿度・風向風速は2高度で測定されている。その2高度の間に設置されているソーラーパネルで発電を行い、雪面の下に埋められているボックスに格納されているバッテリーに蓄電する。その電力により、冬季の極夜期間であっても絶え間なく測定が継続されている。

3. 氷床縁辺域・中心部を問わず、ひとたび表面融解が発生すると、雪氷アルベド（雪氷面に入射する放射フラックス密度と雪氷面から反射される放射フラックス密度の比）は新雪の状態と比べて格段に低くなる^{8,9)}ことが知られており、転じて更なる雪氷面短波放射加熱を助長する。
4. 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。

しかし、2012年7月12日前後のイベントは、その従来の描像では説明出来ない特徴が多数見られた。

我々は、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（図1）で取得した気象データを、積雪物理状態の詳細な時間変化を計算することが可能な積雪変質モデル SMAP^{10,11)} に入力して、この間の雪面熱収支の時間変化を計算した¹²⁾。その結果を、自動気象観測装置設置後も現地に取り続き滞在していた我々自ら実施していた目視気象観測結果の結果と組み合わせて解析したところ、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（つまり、下層暖気が存在していて、かつ、曇っていたことが雪氷表面融解を加速した）ことを示した¹²⁾。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、氷床上に滞留する高気圧の西側縁辺を通過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大気の川（atmospheric river）¹³⁾の複合的な結果と考えられている。

極域の雪面上において、曇っている時の雪面における放射加熱が、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1970年代以来知られていて、“radiation paradox”¹⁴⁾と呼ばれていた。しかし、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の可能性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 SMB に対する影響に大きな世界的注目が集まった。

3. 氷床 SMB 変動の支配メカニズム

自動気象観測装置を用いた直接観測は、地球科学の根幹をなす基本的かつ重要な取り組みであり、各種大気・雪氷物理プロセスの詳細な実態把握に資す

る。しかし、その1点での観測的研究成果のみで、非常に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代表的描像を浮かび上がらせることは出来ない。そこで我々は、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。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¹⁵⁾。NHM-SMAPは、気象場の変動に加えてSMBの詳細な時空間変化を計算することが可能である(図2)。我々は、このNHM-SMAPを(SIGMA-Aのみならず、海外の研究グループが維持管理しているものも含む)利用可能な全ての自動気象観測データを用いて検証(あるいは、場合によってはモデルパラメーターを制約)して精度を確認した上で、広域での氷床SMB変動支配メカニズムの理解の深化に取り組んでいる¹⁵⁾。

我々は、この開発したばかりのNHM-SMAPを用いて、グリーンランド氷床のSMBに対する雲の影響を調べた¹⁶⁾。モデルの中で仮想的に快晴条件を仮定する感度実験を行った結果、雲の存在は、“1週間程度の時間スケール”で見ると下向き長波放射加熱を助長して氷床表面融解を加速させることがあるものの、“気候学的な時間スケール”(ひと夏より長い時間スケール)で見ると下向き短波放射を減少させてSMB減少を抑制する役割を担うことが示された。ちょうど同じ頃、Hofer et al. (2017)¹⁷⁾は別の領域気候モデルの計算結果の経年変化を解析して、また、Wang et al. (2018)¹⁸⁾はデンマークの観測グループが氷床上に展開している自動気象観測装

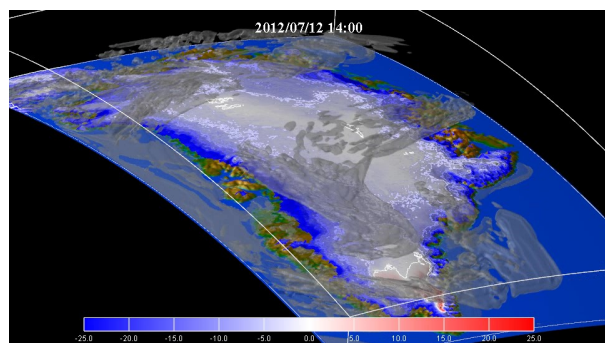


図2 領域気候モデルNHM-SMAPによってシミュレートされた2012年7月12日14:00 UTCにおけるグリーンランド氷床上空の雲の三次元分布。氷床表面に描かれたシェードは前24時間のSMB (mm day⁻¹)を示す。

置の観測結果を分析して、同様の結論を得た。そのことから、IPCC第6次評価報告書(IPCC AR6)第1作業部会(WG1)第9章¹⁹⁾において、氷床SMB変動に対する雲の影響の理解の現状がIPCC報告書史上初めて記された。

しかし、現状、雲由来の下向き長波放射加熱が氷床表面融解を加速する1週間程度の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。このことに1つの重要な示唆を与える研究としてBennartz et al. (2013)²⁰⁾がある。彼らは、氷床表面融解を引き起こす顕著な下向き長波放射加熱をもたらす雲の種類が(特定の条件を持つ)水雲であることを示した。それによると、下層に水雲が存在し、かつ、水雲の鉛直積算雲水量が10~40 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。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が助長される一方で、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は最小化される。今後は、グリーンランド氷床表面融解を、衛星や数値モデルによって推定された雲の発生状況と照らし合わせて解析していくことが必要である。また、電力が限られた氷床上の現場で雲を観測する手法を高度化することも必要であろう。

雲-氷床相互作用において十分に検討されていないプロセスは他にも存在する。一般的に知られている通り、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氷床からの融解水の流出を加速する可能性がある²¹⁾。しかし、このことがグリーンランド氷床で確実に起きているかどうかは、まだ実証されていない。また、曇天下の裸氷域では、クリオコナイトホール(裸氷域において形成される円柱状の穴であり、中には鉱物粒子・微生物・有機物などが沈殿している)の崩壊が起こりやすいことが報告されている²²⁾。クリオコナイトホールが崩壊すると、光吸収性能がある鉱物粒子・微生物・有機物が氷表面に広く分布することに繋がることから氷アルベドを低下させてSMB減少に繋がる可能性がある。しかし、この点についても、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。観測・モデル両面からの継続的な研究を行う必要である。

4. おわりに

本稿で見た通り、グリーンランド氷床の質量損失

は、そのプロセスには未解明な点が依然として多いものの、間違いなく全球海水準上昇に繋がることから、日本に住む我々にとっても決して他人事ではない。最新の気候変動レポート IPCC AR6 によると、人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない、(https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_WG1_SPM_JP_20210901.pdf, 2022年2月24日 閲覧) とされている。個々人が問題なく出来る範囲で良いと思うので、地球に優しいライフスタイルに変えていく意識を持つことが重要であると思う。また最近では、ご存知の通り、地球温暖化を抑制するためのジオエンジニアリングが検討され始めているが、グリーンランド氷床もジオエンジニアリングで守るべき対象として位置づけられ始めている²³⁾。我々は、このような具体的な緩和策の検討をまだ行ったことがないので、関連する工学系の研究者の方々とともにこれを契機に情報交換など始めることが出来ればと期待している。本稿を読んで興味を持たれた方は、是非、著者までご一報頂ければ幸いである。

謝辞

本講演・執筆の貴重な機会を与えて頂きました大竹秀明博士（産業技術総合研究所）に心から感謝します。本研究は、JSPS 科研費 (JP21H03582, JP17KK0017, JP18H03363)、環境省地球環境保全試験研究費 (MLIT1753) 及び北極域研究加速プロジェクト (ArCS II; JPMXD1420318865) の助成を受けました。

参考文献

- 1) S. Manabe and R. J. Stouffer, Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ in the atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 85, 5529–5554 (1980).
- 2) J. Cohen, J. Screen, J. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland and J. Jones, Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, 7, 627–637 (2014).
- 3) 吉森正和, 北極温暖化増幅のメカニズムと将来予測, *天気*, 66, 214–219 (2019).
- 4) M. Meredith, M. Sommerkorn, S. Cassotta, C. Derksen, A. Ekaykin, A. Hollowed, et al., Chapter 3: Polar regions. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, et al. (Eds.), *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (2019).
- 5) The IMBIE team, Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018, *Nature*, 579, 233–239 (2020).
- 6) S. V. Nghiem, D. K. Hall, T. L. Mote, M. Tedesco, M. R. Albert, K. Keegan, C. A. Shuman, N. E. DiGirolamo and G. Neumann, The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012, *Geophysical Research Letters*, 39, L20502 (2012).
- 7) J. E. Box, X. Fettweis, J. C. Stroeve, M. Tedesco, D. K. Hall and K. Steffen, Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers, *The Cryosphere*, 6, 821–839 (2012).
- 8) T. Aoki, A. Hachikubo and M. Hori, Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos, *Journal of Geophysical Research*, 108, 4616.
- 9) A. Wehrlé, J. E. Box, M. Niwano, A. M. Anesio and R. S. Fausto, Greenland bare ice albedo from PROMICE automatic weather station measurements and Sentinel-3 satellite observations, *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 47, 5284.
- 10) M. Niwano, T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka and Y. Kodama, Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 117, F03008 (2012).
- 11) M. Niwano, T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, Y. Kodama, S. Yamaguchi, H. Motoyoshi and Y. Iwata, Evaluation of updated physical snowpack model SMAP, *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 65–78 (2014).
- 12) M. Niwano, T. Aoki, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Kuchiki and H. Motoyama, Numerical simulation of extreme snowmelt observed at the SIGMA-A site, northwest Greenland, during summer 2012, *The*

- Cryosphere, 9, 971-988 (2015).
- 13) W. Neff, G. P. Compo, F. M. Ralph and M. D. Shupe, Continental heat anomalies and the extreme melting of the Greenland ice surface in 2012 and 1889, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119, 6520–6536.
 - 14) W. Ambach, The influence of cloudiness on the net radiation balance of a snow surface with a high albedo, *Journal of Glaciology*, 13, 73–84 (1974).
 - 15) M. Niwano, T. Aoki, A. Hashimoto, S. Matoba, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, K. Fujita, A. Tsushima, Y. Iizuka, R. Shimada and M. Hori, 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 (2018).
 - 16) M. Niwano, A. Hashimoto and T. Aoki, Cloud-driven modulations of Greenland ice sheet surface melt. *Scientific Reports*, 9, 10380 (2019).
 - 17) S. Hofer, A. J. Tedstone, X. Fettweis and J. L. Bamber, Decreasing cloud cover drives the recent mass loss on the Greenland Ice Sheet, *Science Advances*, 3, e1700584 (2017).
 - 18) W. Wang, C. S. Zender and D. van As, Temporal characteristics of cloud radiative effects on the Greenland Ice Sheet : Discoveries from multiyear automatic weather station measurements, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123, 311–348 (2018).
 - 19) B. Fox-Kemper, H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A., Slangen, Y. Yu, 2021, Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In : *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
 - 20) R. Bennartz, M. D. Shupe, D. D. Turner, V. P. Walden, K. Steffen, C. J. Cox, M. S. Kulie, N. B. Miller and C. Pettersen, July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds, *Nature*, 496, 83–86.
 - 21) K. Van Tricht, S. Lhermitte, J. T. M. Lenaerts, I. V. Gorodetskaya, T. S. L'Ecuyer, B. Noël, M. R. van den Broeke, D. D. Turner and N. P. M. van Lipzig, Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff, *Nature Communications*, 7, 10266 (2016).
 - 22) N. Takeuchi, R. Sakaki, J. Uetake, N. Nagatsuka, R. Shimada, M. Niwano and T. Aoki, Temporal variations of cryoconite holes and cryoconite coverage on the ablation ice surface of Qaanaaq Glacier in northwest Greenland, *Annals of Glaciology*, 59, 21-30 (2018).
 - 23) X. Fettweis, S. Hofer, R. Séférian, C. Amory, A. Delhasse, S. Doutreloup, C. Kittel, C. Lang, J. Van Bever, F. Veillon, and P. Irvine, Brief communication : Reduction in the future Greenland ice sheet surface melt with the help of solar geoengineering, *The Cryosphere*, 15, 3013–3019 (2021).

著者略歴



庭野 匡思 (ニワノ マサシ)
 気象庁 気象研究所 主任研究官。その他、防災科学技術研究所 客員研究員と国立極地研究所 客員准教授を兼任。欧州地球科学連合 (EGU) The Cryosphere 誌編集委員、日本気象学会 SOLA 誌編集委員。これまで、積雪変質モデル SMAP と雪氷圏に特化した領域気候モデル NHM-SMAP を開発し、IPCC AR6 などに貢献してきた。現在は、日本国内の季節積雪域やグリーンランド氷床上で気象・雪氷観測を行い、上記モデルによるシミュレーション結果と照らし合わせ、雪氷物理過程の理解の深化と温暖化による雪氷圏変動を具体的に明らかにする研究を進めている。また、SMAP モデルを気象庁現業で活用するための技術的検討を進めている。博士 (理学)。 <https://masashiniwano.net/>