

地中レーダーを用いたグリーンランド氷床南東ドームにおける 涵養量の時空間変動復元

Spatiotemporal reconstruction of accumulation rate on the South East Dome in the Greenland Ice Sheet using ground-penetrating radar

坂田 宙斗¹, 箕輪 昌紘², 藤田 耕史³, 的場 澄人², 川上 薫², 松本 真依¹, 飯塚 芳徳²
Hiroto Sakata¹, Masahiro Minowa², Koji Fujita³, Sumito Matoba², Kaoru Kawakami², Mai Matsumoto¹,
Yoshinori Iizuka²

Corresponding author: sakata.hiroto.l8@elms.hokudai.ac.jp (H. Sakata)

グリーンランド氷床の質量変動を理解する上で、涵養量の正確な定量化や涵養プロセスの理解は重要である。グリーンランド氷床南東ドーム (SE ドーム) 周辺の 18 km² の範囲で、地中レーダー (GPR) による氷床内部層の観測を実施した。アイスコアから測定した密度や層位、年代の情報と組み合わせることで涵養量の時空間変動の定量化を試みた。SE ドーム周辺の 2000 年から 2021 年までの年間平均涵養量は 1.12 m w.e. a⁻¹ であった。涵養量は SE ドーム東部で平均より 23% 大きな傾向が見られた。

1. はじめに

グリーンランド氷床の質量変動を理解する上で、涵養量の正確な定量化や涵養プロセスの理解は重要である。グリーンランド氷床の涵養量の復元はこれまで多数行われており、主にアイスコアや領域気候モデルを用いた研究例が多い¹⁾。アイスコアによる涵養量復元は、高い精度で長期間の涵養量の復元が可能であるが、広範囲に渡る涵養量の再現性は限られる。一方、領域気候モデルでは、広範囲における涵養量の復元が期待できるが、モデルの格子は~数十 km である。氷床表面の地形の影響を受け涵養量に変化する場合、不確実性が考えられる。これらの二つの手法を繋ぐ涵養量の復元手法として、地中レーダー (GPR) による氷床内部層観測が有用である。アイスコアより測定した密度や層位、年代の情報と、GPR による氷床内部層データを組み合わせることで、高い時空間分解能の涵養量の再現が可能である。

本研究では、グリーンランド氷床南東ドーム (SE ドーム) において GPR を用いて涵養量に関する現地観測を行った²⁾。GPR を用いて得られた氷床内部の反射波データを解析し、SE ドームで掘削したアイスコアのデータと反射波を比較し、GPR で得られた内部層の年代決定を試みた。内部層の厚さとアイスコアから取得した密度データを利用し、SE ドーム周辺の涵養量の時空間

変動の定量化との涵養メカニズムを明らかにすることが、本研究の目的である。

2. GPR 測量

2021 年 5 月 14 日から 6 月 2 日にかけて、SE ドーム II (67° 11' 30" N, 36° 28' 12" W) での掘削の最中に、SE ドーム周辺の 18 km² の範囲で GPS, GPR 測量を実施した (図 1)。側線の総延長は 83 km である (図 2)。SE ドームにおけるアイスコア掘削は、SE ドーム II の他に、2015 年に SE ドーム I (67° 10' 48" N, 36° 21' 36" W) においても行われている³⁾。

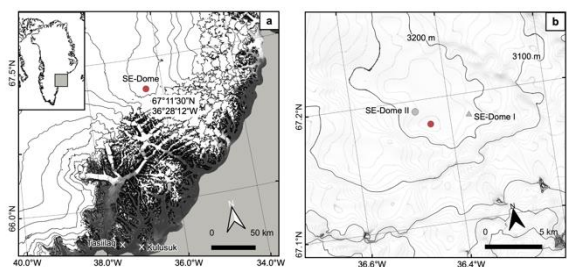


図 1 (a) グリーンランド氷床 SE ドームの位置を示した図. (b) SE ドーム周辺の地形図. SE ドーム I では 2015 年に、SE ドーム II では 2021 年にアイスコアが掘削されている。

¹ 北海道大学大学院環境科学院

² 北海道大学低温科学研究所

³ 名古屋大学大学院環境学研究所

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environmental Study, Nagoya University

GPR を用いて氷床内部に向けてパルス波を放射し、誘電率の違いによって生じる反射波を記録することで、フィルン内部の情報を記録した。レコーダーには GSSI SIR-4000, アンテナには GSSI-3207A を使用した。アンテナからは中心周波数 100 MHz のパルス波を毎秒 32 回発射した。また、パルス波を発射してから反射波を測定するまでにかかる時間 (TTWT: Two-way travel time) の上限は、1073.4 ns である。取得した反射波のデータについて、32 回の反射波を積分した。また、周波数 80–120 MHz でバンドパスフィルターと、水平方向の平均波を算出し全体から差し引くことでノイズを除去した。フィルン内のパルス波の伝播速度を、アイスコアから得られる密度データより求め、時間を深度に変換した⁴⁾。GPR データの解析においては、python の公開ライブラリである ImpDAR を用いた⁵⁾。

GPR 観測中には 2 周波 GPS (GEM-1, イネーブラ社) を同時に運用し、観測座標を決定した。GPS データは PPP キネマティック法により 1 秒ごとに GPS アンテナの三次元座標を求めた。

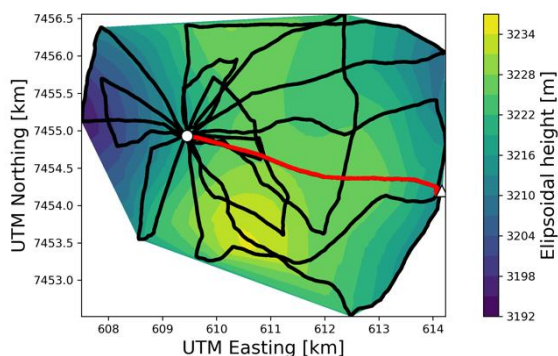


図2 GPS 測量による SE ドームの表面地形図。黒線は観測経路、赤線は SE ドーム I から SE ドーム II にかけての観測経路を示す。地図上の丸印は SE ドーム II, 三角印は SE ドーム I を示す。

3. 結果

3.1 SE ドームの地形

GPS 測量の結果、SE ドーム周辺の氷床表面地形が明らかとなった (図 2)。南北方向に尾根が走っており、東西方向には最大約 40 m の標高差があった。SE ドーム周辺は標高 3000 m 以上のドーム型の地形であり、SE ドーム I と II の楕円体高は、それぞれ 3210 m, 3218 m であった。

3.2 氷床内部構造

SE ドーム I から SE ドーム II のレーダーグラムを示す (図 3)。レーダーグラムでは、複数の深度で水平方向に連続した反射波を示す層がみられた。これらの反射層は、Internal Reflecting Horizon (IRH) と呼ばれ、過去の氷床表面を表すと考えられている⁶⁾。特に、氷床表面から深さ 20 m までの地点と、深さ 40 m 付近の地点で強度が強い反射波を示す IRH が確認できる (図 3)。他の全ての観測経路においても、同様の深度で強い反射が測定された。

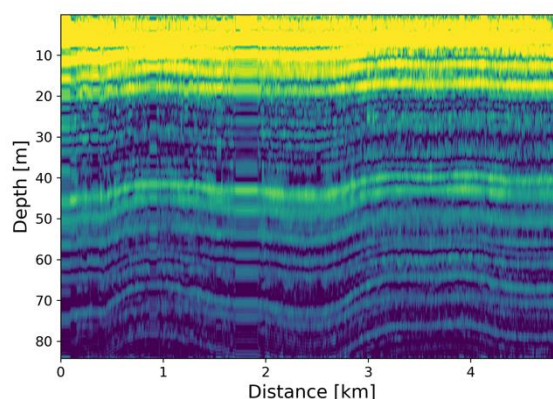


図3 図2の赤実線で示した経路上における氷床内部層の断面図。縦軸は深度、横軸は SE ドーム I を基準とした際の距離を示している。

この深度 20 m 付近と 40 m 付近の明瞭な IRH を全観測経路において検出し、各深度の偏差を計算した。(図 4)。GPR で検出した深度約 20 m 付近の IRH の深度の平均値は 16.5 m であり、偏差は、SE ドーム I では 1.9 m であるのに対し、SE ドーム II では -0.5 m であった。一方、深度 40 m 付近の IRH の深度の平均値は 37.8 m であり、偏差は、SE ドーム I と SE ドーム II では、それぞれ 4.4 m, 0.5 m であった。二つの IRH の深度は、SE ドーム II から SE ドーム I に近づくにつれ、約 3.2 m 大きくなる傾向を示した (図 4)。

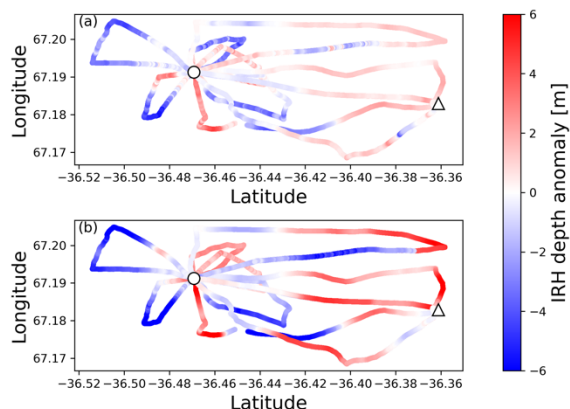


図4 (a) 深度 20 m 付近の明瞭な IRH と (b) 深度 40 m 付近の明瞭な IRH の偏差の空間分布。カラーバーが偏差を示している。地図上の丸印は SE ドーム II, 三角印は SE ドーム I を示す。

4. 考察

4.1 内部反射層とアイスコア情報の比較

今回の調査で得られたレーダーグラムでは、表層付近と深度 20 m, 40 m 付近で強度の強い反射波が確認できた。これらの深度において、2021 年に SE ドーム II で掘削されたアイスコアから、深度 17 m と 38 m にそれぞれ 2012 年, 2000 年に形成された融解再凍結層の存在が報告されている⁷⁾。したがって、強度の強い反射波は、融解再凍結した層や氷板などの高密度層に GPR から照射されるパルス波が反射することで生じていると考えられる(図 5)。深度 17 m の IRH を 2000 年, 深度 38 m の IRH を 2012 年の層であると仮定し涵養量の定量化を行った。

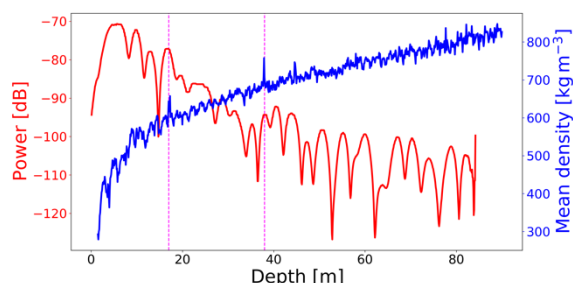


図5 SE ドーム II におけるアイスコアの密度 (青) と GPR の反射波強度 (赤) を比較した図。ピンク色の点線は融解再凍結層が報告されている深度を示す。

4.2 涵養量の定量化

3.2 節で推定した IRH の年代をもとに、2000 年から 2012 年, 2012 年から 2021 年の年間平均涵養量 \dot{b} [m w.e. a⁻¹] の定量化を以下の式により試みた⁸⁾。

$$\dot{b} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho(z)}{\rho_w} dz$$

ここで、 t_1 , t_2 は IRH の年代, z_1 , z_2 は IRH の深度である。また、 ρ はフィルムの密度であり、2021 年に SE ドーム II で掘削されたアイスコアから得られた密度を全観測経路において一様と仮定し使用した。さらに、 ρ_w は水の密度であり、1000 kg m⁻³ とした。

2000 年から 2012 年における全観測経路の年間平均涵養量は 0.995 m w.e. a⁻¹ であった (図 6 a)。また、2012 年から 2021 年の期間では 1.03 m w.e. a⁻¹ であり (図 6 b), 涵養量は 0.035 m w.e. a⁻¹ 増加していた。一方、SE ドーム II で掘削されたアイスコアにより復元された二つの期間の年間平均涵養量は、2000 年から 2012 年の期間では 0.93 m w.e. a⁻¹, 2012 年から 2021 年の期間では 1.05 m w.e. a⁻¹ であり、0.12 m w.e. a⁻¹ 増加していた。

次に年間平均涵養量の空間分布についてみると、東西方向に顕著な涵養量の差が存在した (図 6)。例えば、GPR 測量による結果では、SE ドーム I の涵養量は、SE ドーム II の涵養量より、2000 年から 2012 年の期間では 0.11 m w.e. a⁻¹, 2012 年から 2021 年の期間では 0.10 m w.e. a⁻¹ 大きな値を示した。一方、2000 年から 2012 年の期間におけるアイスコアによる涵養量の推定値も、SE ドーム II に対して、SE ドーム I は 0.23 m w.e. a⁻¹ 大きな値であった。GPR により推定した東西方向の涵養量の差は、アイスコアによる推定値より 0.12 m w.e. a⁻¹ 小さな値を示したが、どちらも西から東にかけて涵養量が大きくなる傾向を示した。この涵養量の空間分布の異なりとして、SE ドーム周辺の気候が原因の一つとして考えられる。例えば、SE ドーム周辺では、定常的に北から東からの風が発達することが報告されている²⁾。これらの卓越風による削剥や積雪の再分配の影響が、涵養量の空間分布の異なりに影響を与えた可能性が考えられる。今後、空間的な密度分布や氷床流動による鉛直歪みの影響の考慮、領域気候モデルと比較を進めることで、涵養量の正確な定量化や涵養プロセスの理解が必要である。

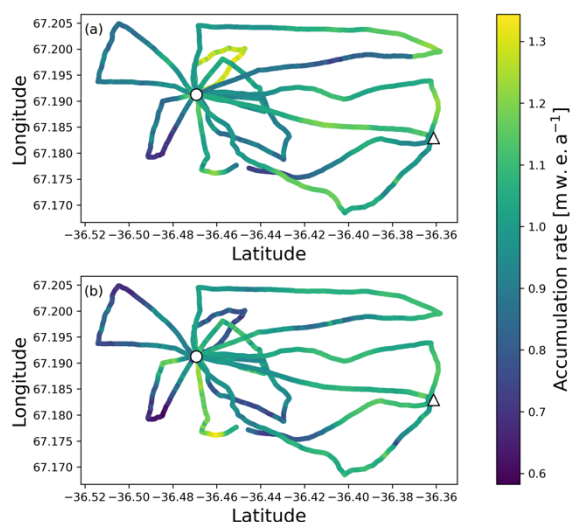


図6 (a) 2000年から2012年の期間と (b) 2012年から2021年の期間の年間平均涵養量の空間分布。地図上の丸印はSEドームII、三角印はSEドームIを示す。

5. まとめ

本研究では、グリーンランド氷床南東部に位置するSEドーム周辺において、全長約83kmに渡るGPRデータを取得し解析を行った。GPRデータを用いて約85mまでの氷床内部構造を明らかにした。複数の深度で水平方向に連続する内部反射層が複数の深度で見られた。特に、深度約20m付近と40m付近では特に強度の強い反射波を取得した。この二層について、全観測経路において深度を検出したところ、SEドームIIからSEドームIに近づくにつれてIRHの深度が約3.2m深くなる傾向を示した。

2021年にSEドームIIで掘削されたアイスコアからは、深度17mに2012年に生じたと考えられる融解再凍結した層が、深度38mに2000年に生じたと考えられる融解再凍結した層が確認できたことが報告されている。二つの深度で見られた強いIRHをそれぞれ2012年と2000年のIRHと推定し、涵養量の復元を試みた。二つの期間における年間平均涵養量は0.995 m w.e. a⁻¹、1.03 m w.e. a⁻¹であった。西から東にかけて涵養量が10%大きくなる傾向を示した。今後は、SEドーム周辺の年間平均涵養量の空間分布を地形図や気象条件と比較することで、涵養量の空間的異なりの原因を明らかにする。また、より短期間でのIRHの年代特定を行い、高時間分解能のSEドーム周辺の涵養量を復元する。

【謝辞】

本研究は、科学研究費補助金(S)18H05292(代表:飯塚芳徳准教授)と、北極研究加速プロジェクト(ArCS II)公募研究の助成を受けて実施した。測量に用いたGPS受信機は杉山慎教授から、GPRアンテナは藤田秀二教授からお借りした。

【参考文献】

- 1) Furukawa, R. *et al*, 2022: Seasonal-Scale Dating of a Shallow Ice Core From Greenland Using Oxygen Isotope Matching Between Data and Simulation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122** (20), 10,873-10,887
- 2) Iizuka, Y. *et al.*, 2021: Ice Core Drilling and the Related Observations at SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet, *Bull. Glaciol. Res.*, **39**, 1-12
- 3) Iizuka, Y. *et al*, 2017: A Firn Densification Process in the High Accumulation Dome of Southeastern Greenland, *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **49**(1), 13-27
- 4) Kovacs, A. *et al*, 1995: The in-situ dielectric constant of polar firn revisited, *Cold Reg. Sci. Technol.*, **23**(3), 245-256
- 5) Lilien, D.A. *et al*, 2020: ImpDAR: an open-source impulse radar processor, *Ann. Glaciol.*, **61**(81), 114-123
- 6) Fujita, S. *et al*, 1999: Nature of radio echo layering in the Antarctic ice sheet detected by a two-frequency experiment, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **104**(B6), 13013-13024
- 7) Kawakami, K. *et al*, 2023: SE-Dome II Ice Core Dating With Half-Year Precision: Increasing Melting Events From 1799 to 2020 in Southeastern Greenland, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**(20)
- 8) Lewis, G. *et al*, 2019: Recent precipitation decrease across the western Greenland ice sheet percolation zone, *Cryosphere*, **13**, 2797-2815