

グリーンランド北西部カナック氷河における氷レーダー探査

Ground penetrating radar survey on Qaanaaq Glacier in northwestern Greenland

佐藤 健^{1,2}, 杉山 慎¹

Ken Sato^{1,2}, Shin Sugiyama¹

Corresponding author: tosa-0727@ees.hokudai.ac.jp (K.Sato)

近年、グリーンランド周縁の氷河氷帽が急速に氷を失っている。氷河の質量損失は、海面上昇や海洋環境に影響を与える。氷河の将来変動を推定する数値モデルでは、氷厚データが必要である。しかしながら、観測の難しさから、グリーンランド周縁の氷河では氷厚データが不足している。そこで、本研究ではグリーンランド北西部カナック氷河を対象に、地中レーダー（GPR）による現地観測を実施した。その結果から氷厚分布を測定すると共に、氷河の内部および底面の構造や水文環境についての理解を深めることを目的とした。

1. はじめに

グリーンランド沿岸部には、氷床から切り離された氷河や氷帽が位置しており、その総面積は約 $89,300 \pm 2,800 \text{ km}^2$ である¹⁾。また、これらの氷河氷帽は、2018年10月から2021年12月の期間で $42.3 \pm 6.2 \text{ Gt/yr}$ の質量損失を示しており、グリーンランド全体の氷損失の $11 \pm 2\%$ を占めている²⁾。氷河変動を把握するには、衛星リモートセンシングによる解析が有用である。しかしながら、質量損失のメカニズムを理解し、将来予測を行うための数値モデルを開発するためには、詳細な現地観測が必要である。特にグリーンランドでは、そのような観測が不足している。また、本研究で行うカナック氷河の全貌の把握は、カナック氷河の流動特性の理解につながるだけでなく、末端に位置するカナック村において、氷河の水資源としての展望も知ることが可能である。このような背景から、GRENE (2012-2016)、ArCS (2016-2020)、ArCS II (2020-2025) のプロジェクトで、2012年からグリーンランド北西部のカナック氷帽の現地観測を実施している。その中で、我々はカナック氷河の氷厚分布の測定と氷総量の推定、底面地形のマッピング、氷河内部および底面の水文環境の理解を目的として、2022年夏にカナック氷河にて地中探査レーダー（GPR, Ground penetrating radar）を用いた現地調査を実施した。

2. 研究対象地域

カナック氷帽（ $77^\circ 28' \text{N}$, $69^\circ 14' \text{W}$ ）はグリーンランド北西部のカナック村から3 kmに位置し、標高範囲は15–1135 m、面積は 312 km^2 である（図1）³⁾。カナック氷河は、氷帽から張り出す多数の溢流氷河の1つであり、カナック空港とカナック村から約3 kmに位置している。2012年夏には、氷河中央線に沿った表面融解速度、氷河の流動速度、氷の厚さが測定された⁴⁾。その後も現在に至るまで、質量収支、流動速度、表面高度などの測定が継続されている。本研究では、2022年7月18日から8月12日に、カナック氷河の上流部から末端にかけて、GPRを用いた測定を行った。測定は、氷河の流線に沿った5つの測線と氷河の流れに対して垂直な9つの測線で行った（図2）。

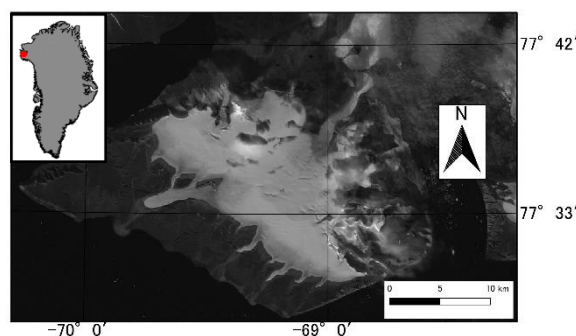


図1 カナック氷帽の衛星画像（2022年8月31日に Sentinel-2 によって撮影）。挿入図はグリーンランドにおけるカナック氷帽の位置。

¹北海道大学 低温科学研究所

²北海道大学 環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environment Science, Hokkaido University

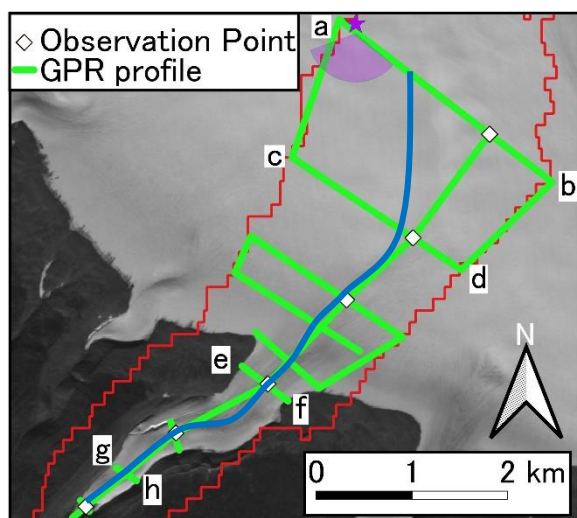


図2 カナック氷河に設定された GPR の測線と質量収支測定地点の位置. 紫点は図9の撮影地点と撮影方向. 青線は推定された底面の谷地形. 背景画像は2022年9月17日に Sentinel-2 によって取得された衛星画像.

3. 研究手法

GPR は、電磁波の反射を用いて、地中の構造を測定する装置である。氷河で使用した場合、氷の厚さや底面形状、氷河内部構造に関する情報を得ることができる（例えば、Karušs ら⁵⁾）。本研究では、GSSI 社製の GPR システム（SIR-4000, 3200MFL）を用いた。このシステムは、コントローラ、発信機、受信機、長さ 2.4 m のアンテナから構成され、氷河内に発射された電磁波の往復時間と反射強度を測定する（図 3）。電磁波の中心周波数は 40 MHz であり、反射シグナルを 1 秒間に 30 回記録する。また、測定地点を 2 周波 GPS 装置（Leica Geosystems, GS10）によるキネマティック測量で記録した。氷河内における電磁波の伝播速度は 1.68×10^8 m/s を仮定して、反射シグナルの往復時間を氷河内の距離に換算した⁶⁾。

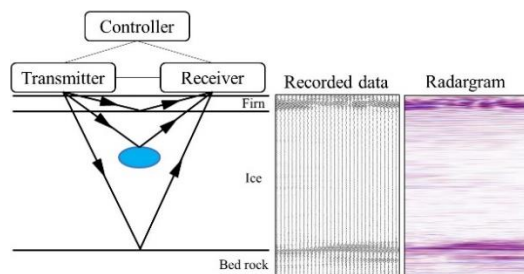


図3 GPR による氷河内測定の模式図と測定によって得られる反射シグナルと反射像。

4. 結果と考察

4. 1 氷厚

全ての GPR プロファイルの中で、最大氷厚は測線 c-d で観測された 201 m であった（図 4）。また、氷河の流れに垂直な鉛直断面プロファイル全てを用いて、測定された氷厚をカナック氷河全域に線形補間して氷厚分布を推定したところ、平均氷厚は 99 m であった。

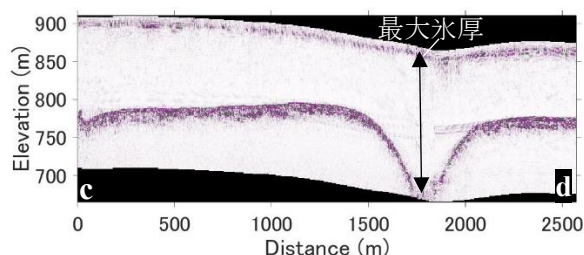


図4 測線 c-d (図2) に沿って得られたレーダグラム (カラースケールは反射強度)。

4. 2 氷河底面地形

GPR で測定した氷厚分布と GPS で測定した氷河表面標高を組み合わせることで、氷河断面の地形を得た。測線 a-b および測線 g-h に沿った鉛直断面プロファイルを図 5 および図 6 に示す。これらのプロファイルでは、表面の起伏よりも深い谷地形が底面に確認された。このような顕著な底面の谷地形は、全ての横断測線で確認された。このことから、カナック氷河の底面には、図 2 に示すような連続した谷地形が存在していることが明らかになった。

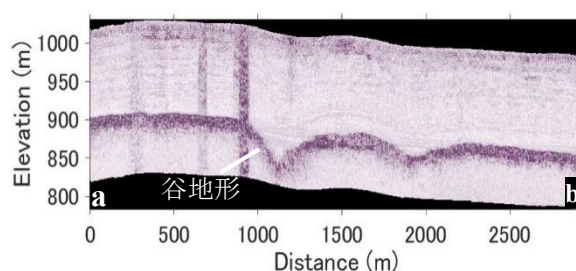


図5 測線 a-b に沿って得られたレーダグラム。

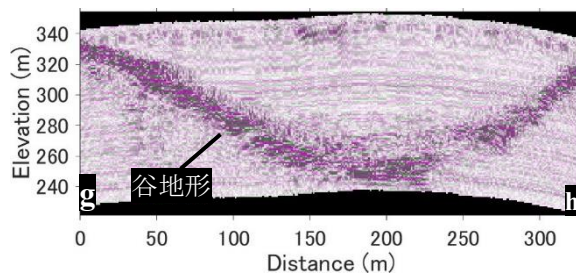


図6 測線 g-h に沿って得られたレーダグラム。

4. 3 氷河内部および底面の水文環境

標高の高い領域に位置する測線 B (図 7) では、基盤を示す反射に加えて、氷河表面付近から始まる連続した強い反射信号が得られている。この信号は、現地観測で確認された水で満たされたクレバス (図 8) の位置と一致していることから、この水からの反射であると解釈できる。また、氷河基盤付近には、上に凸の反射が確認された (図 7)。この凸状の反射源として 2 つの可能性が考えられる。ひとつは氷河底面の隆起地形、もうひとつはハイドロフラクチャリング (融解水の侵入による氷の破碎) によって形成された水路である。これらの可能性を検証するためには、さらなる調査・解析が必要である。さらに、調査ルート 3~6 の中標高域では、氷河表面の水流によって、電磁波の散乱が発生している (図 9)。氷が融点より冷たいために融解水は氷河内部に入らず、表面で水流を形成しているものである。また、氷河底面付近では、基盤を示す反射以外は確認されなかった。

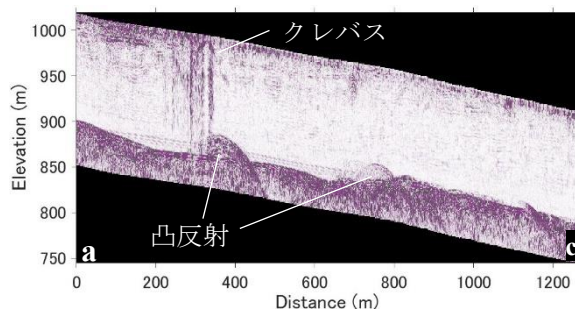


図 7 測線 a-c に沿って得られたレーダーグラム。

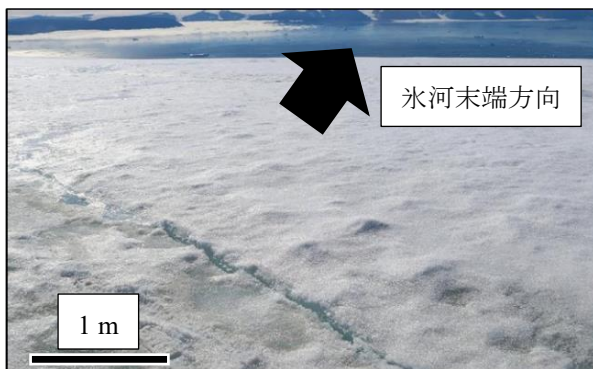


図 8 現地高標高域で観測された水で満たされたクレバス (撮影日: 2022 年 8 月 6 日)

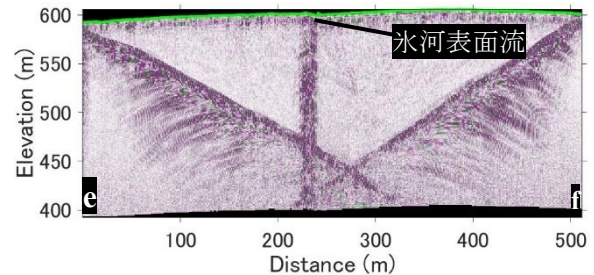


図 9 測線 e-f に沿って得られたレーダーグラム。

4. 4 カナック氷河の氷総量

GPS 測量で得られた氷河表面標高と GPR 調査で得られた氷厚分布について、氷河全域に線形補間することにより (図 10)、カナック氷河の氷量を推定した。その結果、カナック氷河には約 1.3 km^3 (1.2 Gt) の氷が存在すると推定された。

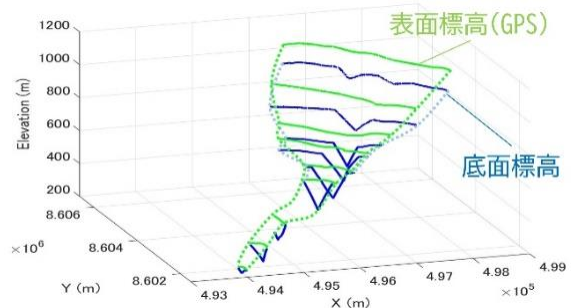


図 10 GPR 測線上の氷河表面 (緑) および基盤 (青) 標高。

6. まとめと今後の展望

本稿では、グリーンランド北西部カナック氷河において、GPR を用いた現地観測を実施した。GPR 観測は 2022 年 7 月 18 日から 8 月 12 日の期間に、合計 14 本 (総長 21.1 km) の測線で実施した。その結果、カナック氷河調査域の最大氷厚は 201 m、平均氷厚は 99 m と示された。また、カナック氷河の底面には、連続した谷地形 (最大幅約 500 m、最大深約 100 m) が確認された。低標高域では氷河内部および底面に水文環境は確認されない一方で、高標高域では、水で満たされたクレバスからの反射が確認された。底面付近には基盤反射とは異なる反射が確認された。この反射は水路の存在を示す可能性があり、今後も更なる調査・議論が必要である。また、測定データの内挿によってカナック氷河の氷総量を推定した結果、約 1.3 km^3 (1.2 Gt) と示された。今後は GPR 観測における測定データの誤差の評価を行い、氷厚データの精度向上に取り組む。また、氷河の表面流動速度や表面質量収支のデータを用いて氷厚

を推定 (例えば, Farinotti ら⁷⁾) し, 測定データとの比較や検証を行う。

【謝辞】

本研究は, 北極域研究推進プロジェクト (ArCS) JPMXD1300000000, および北極域研究加速プロジェクト (ArCSII) JPMXD1420318865 の一環として実施した。カナックでの現地観測では日下稜氏, 渡邊果歩氏, 今津拓郎氏, 鶴飼真汰氏の助けを得た。また現地活動のサポートを得た Toku Oshima 氏, Kim Petersen 氏に謝意を表す。

【参考文献】

- 1) Rastner, P., T. Bolch, N. Mölg, H. Machguth, R. Le Bris and F. Paul, 2012: The first complete inventory of the local glaciers and ice caps on Greenland, *The Cryosphere*, **6**, 1483-1495.
- 2) Khan, S. A., Colgan, W., Neumann, T. A., van den Broeke, M. R., Brunt, K. M., Noël, B., et al. 2022: Accelerating Ice Loss From Peripheral Glaciers in North Greenland, *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL098915.
- 3) Tsutaki S et al., 2017: Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016, *Annals of Glaciology*, **58**(75pt2), 181-192.
- 4) Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S., & Aoki, T. , 2014: Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, **55**, 66, 25-33.
- 5) Karušs Jānis, Kristaps Lamsters, Jurijs Ješkins, Ireneusz Sobota, and Pēteris Džeriņš, 2022: UAV and GPR Data Integration in Glacier Geometry Reconstruction: A Case Study from Irenebreen, Svalbard, *Remote Sens*, **14**, 3 456.
- 6) Glen, J., & Paren, J., 1975: The Electrical Properties of Snow and Ice. *Journal of Glaciology*, **15**, 73, 15-38.
- 7) Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., & Truffer, M., 2009: A method to

estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers, *Journal of Glaciology*, **55**, 191, 422-430.