

グリーンランド北西部カナック氷河における

UAV 測量による表面変化の解析

Analysis of surface changes by UAV surveying on Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland

山田 宙昂^{1,2}, 鶴飼 慎太^{1,2}, 杉山 慎¹

Soratakato Yamada^{1,2}, Shinta Ukai^{1,2}, Shin Sugiyama¹

Corresponding author: s.yamada@lowtem.hokudai.ac.jp (S. Yamada)

グリーンランドにおける氷河変動とそのプロセスを理解するために、著者らのグループでは北西部カナック氷河において2012年から現地観測を実施している。2022年と2023年には、氷河下流域での表面標高、流動、および氷河上河川の観測を目的に、UAVを用いた観測を実施した。UAVによって得られた高解像度の画像データからデジタル標高モデルとオルソ画像を作成した。複数回の観測で得られた標高モデルと画像を比較することで、表面高度変化、流動速度、氷河上河川の発達を解析した。本稿では、2023年の観測結果を示し、特に2022年からの表面標高変化について定量的な議論を行う。

1. 研究背景

北極圏の急速な気温上昇を受けて、グリーンランド沿岸に位置する氷河氷帽の著しい融解と後退が起きている¹⁾。氷河の質量損失メカニズムをより深く理解するために、我々は2012年からグリーンランド北西部カナック氷帽で現地観測を実施してきた²⁾。氷河の融解には、気候以外にも様々なプロセスが関与する。例えば、氷河上に形成された水流は、氷河の融解を促進することが知られている³⁾。このような効果の定量化には、人工衛星画像よりも高い時空間分解能で氷河変動を解析する必要がある。UAV (unmanned aerial vehicle) は、衛星画像よりも高解像度の画像が取得できるため、近年氷河学において注目されている機材である⁴⁾。

そこで本研究では2022年に開始したカナック氷河でのUAV観測⁵⁾を引き続き2023年の夏季に実施し、得られた高解像度の画像データからデジタル標高モデル(DEM)とオルソ画像を作成した。また、各年のデータを比較して、観測域における表面標高変化と、氷河上河川の発達を定量化する事を目的とした。

2. 調査対象地域

カナック氷帽はグリーンランド北西部

(77°28'N, 69°14'W)に位置し、その表面積は312 km²である⁶⁾。本研究の対象地カナック氷河は、カナック氷帽から南側に溢流する氷河のひとつである(図1)。カナック氷河中流域から末端までの調査領域を上流部と下流部に分けて観測を実施した。上流部では、2022年には標高600–750 mの9.0 km² (上流部1)、2023年には範囲を広げて標高600–800 mの1.6 km² (上流部2)で観測を行った。下流部では両年ともに標高200–600 mの1.7 km²を観測した。

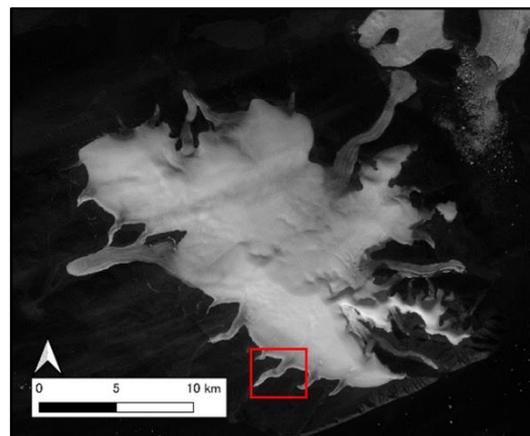


図1. カナック氷河周辺の人工衛星画像(Landsat8)。赤枠がカナック氷河。

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 Environmental Science, Hokkaido University

3. 手法

3. 1 ドローン観測

観測には DJI 社の UAV phantom4pro V2.0 (図 2) を使用した. この機器を氷河表面から高度 120 m で飛行し, 地上分解能 33 mm/pixel の画像を連続的に取得した. 撮影画像の重なり具合を示すオーバーラップとサイドラップはいずれも 70 % に設定した (2022 年の観測ではオーバーラップとサイドラップはそれぞれ 70 % と 65 %). 氷河上流部 2 において, 1 回の測定で約 1300 枚の写真撮影した. 下流部においては 1 回の測定で約 1900 枚の画像を取得した (図 3). 観測は, 上流部では 2023 年 7 月 17, 23, 28, 8 月 4 日の 4 回, 下流部では 7 月 20 日, 8 月 4 日の 2 回行った. 測量精度向上のため, 調査対象領域に地上基準点 (GCP: ground control point) を約 400 m 間隔で配置し, 位置座標をキネマティック Global Navigation Satellite System (GNSS) 測位で測量した. 得られた三次元座標を UAV 画像の処理に使用した.



図 2. 本研究で使用した UAV (DJI phantom4 pro V2.0).

3. 2 GPS 観測

氷河上の表面標高と GCP の測量に二周波 GNSS (Leica Geosystems 社, GS10) を用いた. GNSS アンテナをバックパックの上蓋に入れ, 氷河上を歩きながらデータを取得した (図 4). 得られたデータとカナック村に設置した GNSS 基準局のデータを用いて, キネマティック干渉測位によって三次元座標を得た. 過去の測定から, 測定精度は水平方向に 10 mm, 鉛直方向に 50 mm 程度と考えられる. この測量結果の鉛直座標

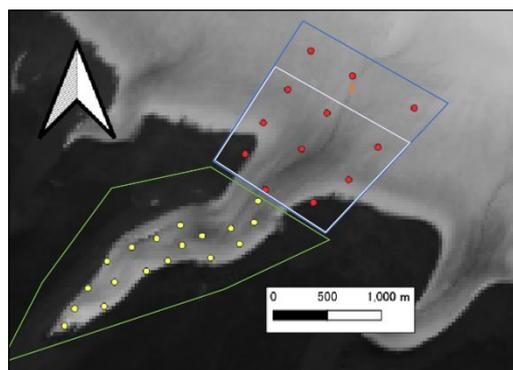


図 3. 調査領域の衛星画像(Landsat8).

青枠は上流部 1, 白枠は上流部 2, 緑枠は下流部の調査範囲を示す. また, 橙色の四角は氷河上河川の調査範囲.

からアンテナ高を差し引いて氷河表面高度とし, UAV 画像から生成した DEM の精度を検証した.

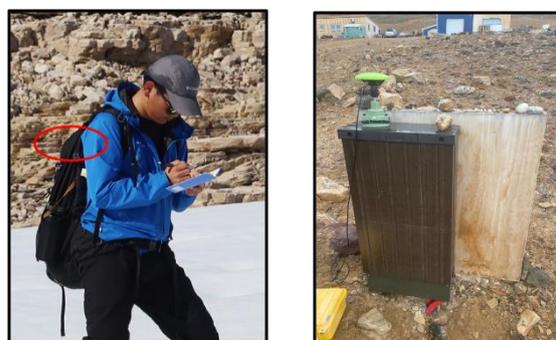


図 4. (a) GPS を背負い氷河上を歩く様子. 赤い丸で GPS の位置を示す. (b) キネマティック測量を行うためにカナック村に設置した GPS 基準局.

3. 3 DEM の生成と検証

Structure from Motion (SfM) と呼ばれる技術を用いて, UAV で撮影した多数の画像から DEM を生成した. この処理には Agisoft 社のソフトウェア Metashape を使用した. まずレンズの歪みを補正するキャリブレーションを行って, 生成される 3D モデルの精度向上を試みた. 次に画像のアライメントにより, 重なり合う連続した画像から特徴点を抽出し, 点群のマッチングを行う. 複数枚の写真から対応する特徴点を合わせることで, 物体表面の三次元座標を示す点群を作成した. 画像の歪みや解析のエラーによる外れ値は, ソフトウェアにしきい値を設定して取り除いた. 次に, アライメントから作成した点群をさらに高密度化して, 観測対象の詳細な地形を得た. この高密度点群から DEM を作成した. さらに作成

した DEM を基にして、撮影画像のモザイクからオルソ画像を作成した。

得られた DEM は GIS ソフトウェア (QGIS) と MATLAB (R2023b) を用いて解析を行った。まず GNSS で測定した標高と比較して DEM の精度検証を行った。次に 2 つの DEM を比較して標高の変化量を計算した。本稿では 2022 年から 2023 年の 1 年間の氷河標高の変化と、2023 年の夏季期間の変化を報告する。

4. 結果と考察

4. 1 作成された DEM とその精度検証

作成された DEM の全体図を示す (図 5)。2023 年に上流部で作成した 4 組の、DEM と GNSS 測定の標高値との差分はそれぞれ $0.56\text{ m} \pm 0.62\text{ m}$ (7 月 17 日), $0.48\text{ m} \pm 0.60\text{ m}$ (7 月 23 日), $0.44\text{ m} \pm 0.40\text{ m}$, $0.39\text{ m} \pm 0.46\text{ m}$ (8 月 4 日) であった (図 6)。GNSS の測定値に対する DEM の誤差には、場所による偏りは見られなかった。

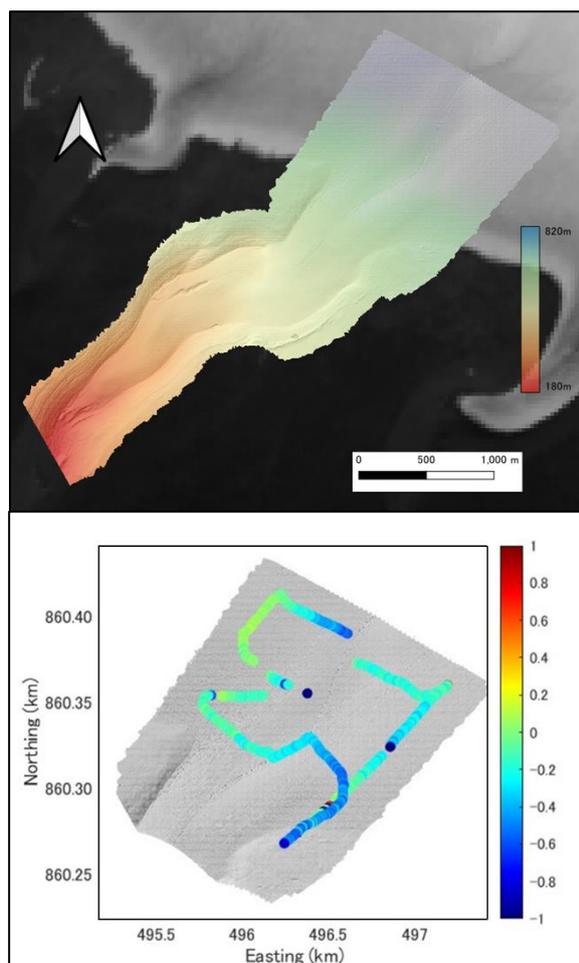


図 6. DEM の標高と GPS 測量で得た標高の差分。

4. 2 標高変化

2023 年 7 月 17 日の DEM の標高から 2022 年 7 月 14 日の DEM の標高を差し引いて得られた、上流部 1 の 1 年間の表面標高変化は 1.55 m であった (図 7)。標高変化は領域の上部で特に高い値を示した。2022 年の DEM において上部に GCP が少なかったため、DEM の標高が過大評価されたことも原因の一つだと考えられる⁹⁾。今後、2022 年の DEM の補正を行う必要がある。

また、2023 年 8 月 4 日の DEM の標高から 2023 年 7 月 17 日の DEM の標高を差し引いて得られた、夏季 18 日間の表面標高変化は -0.86 m であった (図 8)。これは、調査領域において観測された同期間の表面融解量 -0.84 m と近い値である。

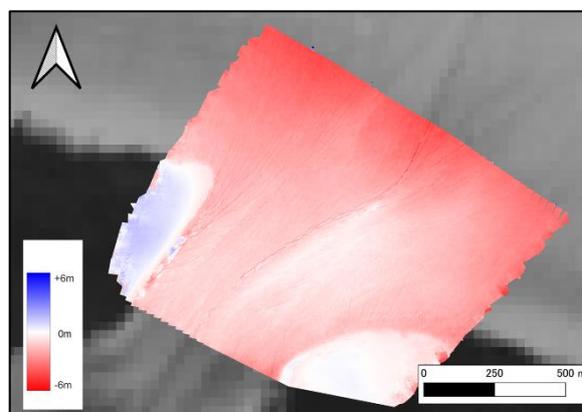


図 7. カナク氷河上流部の 2022 年 7 月 14 日から 2023 年 7 月 17 日までの間の標高変化。

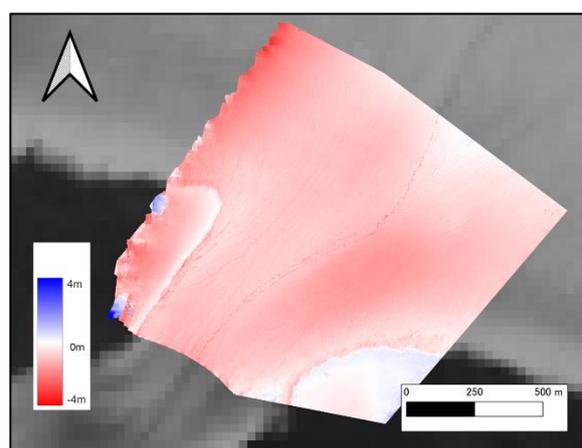


図 8. カナク氷河上流部の 2023 年 7 月 17 日から 8 月 4 日までの間の標高変化。

4. 3 氷河上河川の発達

2023 年 7 月 23 日から 8 月 4 日の 12 日間において、氷河上河川の流路と深度に大きな変化が見

られた(図8). 河川以外の表面変化が約-0.5 mに留まるのに対して、河川の流路上では-1 m以上の表面変化が見られた(図9). 最も変化の大きいところでは-1.5 mの変化が確認された(図10).

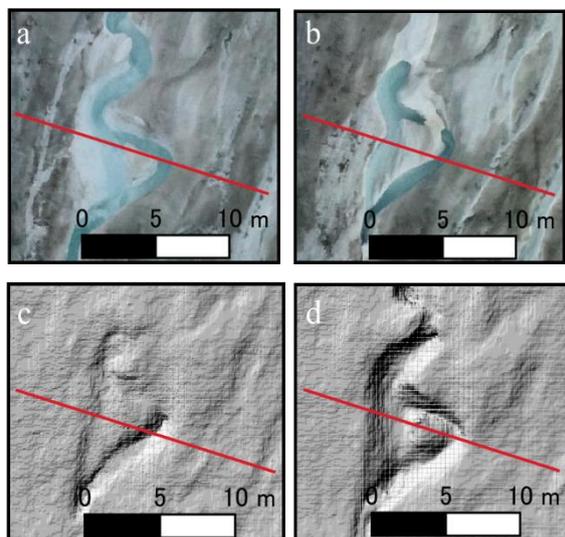


図9. 氷河上河川の一部を示したオルソ画像。(a) 2023年7月23日 (b) 2023年8月4日と、陰影起伏図 (c) 2023年7月23日 (d) 2023年8月4日.

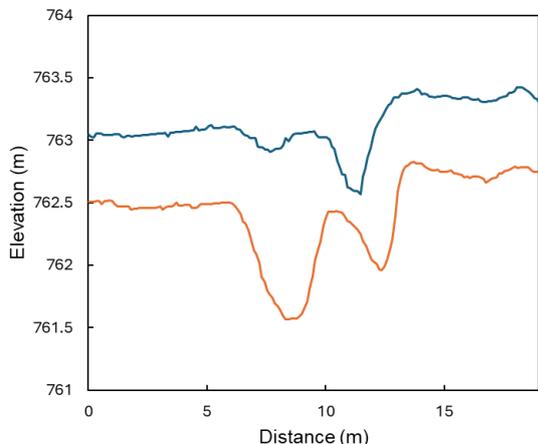


図10 図9の画像中の赤いラインに合わせて氷河の切断面から示したグラフ(縦軸は標高で、横軸は赤いラインの始点からの距離).

5. まとめ

グリーンランド北西部カナック氷河にて2022年夏季、2023年夏季にUAVを用いた調査を行った。撮影した画像から生成されたDEMの解像度は0.07-0.11 mであった。生成されたDEMの標高値とGNSSによって測量した標高値の差分の平均は0.39-0.56 m、標準偏差は0.46-0.62 mであ

った。特に調査領域上流部に注目して標高変化を解析したところ、2022年から2023年の1年間での氷河の平均表面標高変化は-1.55 mであり、2023年夏季の18日間の平均表面標高変化は-0.86 mであった。

また氷河上河川では、2023年夏季の12日間(2023年7月23日-2023年8月4日)における流路と深度の変化を定量化した。特に河川の一部では、12日間の間に-1.0 m以上の表面標高変化が示された。

【謝辞】

本研究は、ArCS II北極域研究推進プロジェクトの一環として実施された。現地観測メンバーに謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 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**(12).
- 2) 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.
- 3) Isenko, E., Naruse, R., Mavlyudov, B. (2005). Water temperature in englacial and supraglacial channels : change along the flow and contribution to ice melting on the channel wall. *Cold Reg. Sci. Technol.* **42**(1):53-62
- 4) Gaffey C, Bhardwaj A. (2020). Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Cryosphere: Latest Advances and Prospects. *Remote Sensing*. **12**(6):948.
- 5) 鶴飼慎太. (2023).グリーンランド北西部カナック氷河におけるUAVを用いた表面地形観測, 北海道大学環境科学院修士論文
- 6) Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Aoki, T., Niwano, M. (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** (75), 181-192
- 7) 渡邊果歩, (2023).グリーンランド北西部カナック氷帽における2012-2022年の表面質量収支, 北海道大学環境科学院修士論文