グリーンランド北西部カナック氷河における UAV 測量

UAV surveys on Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland

矢澤 宏太郎^{1,2}, 今津 拓郎^{1,2}, 杉山 慎^{2,3} Kotaro Yazawa^{1,2}, Takuro Imazu^{1,2}, Shin Sugiyama^{2,3} Corresponding author: yazawa.kotaro.z2@elms.hokudai.ac.jp(K. Yazawa) ¹北海道大学 環境科学院,²北海道大学 低温科学研究所,³北海道大学 北極域研究センター ¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University,²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,

³ Arctic Research Center, Hokkaido University

グリーンランド沿岸部における著しい氷河変動を明らかにするため、グリーンランド北西部カナック氷河において 2012 年から流動速度と質量収支が継続的に観測されている. 2022–2024 年 7–8 月には従来の観測に加えて、氷河消耗域において UAV (unmanned aerial vehicle)測量を実施した.取得した画像データから高解像度の数値標高モデル (DEM) とオルソ画像を作成して、流動速度及び表面標高変化を解析した.オルソ画像に画像相関法を適用して測定した流動速度は、GNSS による精密測定に対して平均誤差は 0.32 m a⁻¹ であり、標高 700 m 付近で最大速度 (20.5 m a⁻¹)が得られた.標高 600 m 以下の範囲における 2022–2024 年の平均表面標高変化量は–1.01±0.11 m a⁻¹ であった.本研究は、氷河変動を広範囲で定量化する手法として UAV 測量の有用性を示した.

1. はじめに

グリーンランド沿岸部における著しい氷河変 動を明らかにするため,著者らはグリーンランド 北西部カナック氷河(77°28'N, 69°14'W)で2012 年から現地観測を継続している¹⁾. 氷河上に設置 したステーク (アルミニウムポール)を用いた観 測に加えて、高い時空間解像度で広範囲の測量が 可能な UAV (unmanned aerial vehicle) による観測 を 2022 年から実施している. UAV 画像から作成 された高解像度の数値標高モデル (DEM) とオル ソ画像によって,流動速度と表面標高変化の詳細 な解析が可能である. 例えば氷河の流動速度分布 から氷の歪みを推定すれば,氷河表面高度の変化 を浮上速度と質量収支に分離できる²⁾.本研究で は、2022-2024年7-8月にカナック氷河消耗域で 実施した UAV 測量の結果から、流動速度と表面 標高変化量を定量化した.

2. 研究対象地

カナック氷帽 (77°28'N, 69°14'W) はグリーン ランド北西部に位置し, その表面積は 259 km² で ある. カナック氷河は同氷帽から南西方向に流れ る溢流氷河の1つであり(図1), グリーンラン ド沿岸部で質量収支が長期モニタリングされて いる5つの氷河・氷帽の1つである³⁾. 2012 年 以降毎年夏期に, 氷河上に設置したステークを用 いて, 表面質量収支と流動速度の観測(標高 244– 982 m の計 6 地点)が実施されている(図 2)¹⁾. 2022 年から 2024 年の夏期には, カナック氷河の 標高 200-800 m において UAV 測量を実施した.



図1 カナック氷帽 (Sentinel-2, 2024 年 7 月 5 日撮影). 赤丸はグリーンランドにおける研究対象地,赤枠はカナック氷河を表す.



図 2 (a) カナック氷河流域(実線)と質量収 支の長期観測点(○). 背景は 2024 年 7 月 5 日撮 影の Sentinel-2 画像. (b) Stake 4 における GNSS 測量の様子.

3. 手法

3. 1. UAV 測量

UAV 測量には、DJI Phantom4 Pro V2.0 (2022, 2023 年) と DJI Mavic3 Multispectral (2024 年) を 使用し,飛行高度を 120 m に設定した.氷河消耗 域を標高 200-600 m, 600-800 m の 2 つの範囲に 分けて(図 3),計6日(2022 年 8 月 10, 11 日, 2023 年 7 月 20 日,8月4日,2024 年 7 月 18,24 日)にわたって測量した.撮影された画像を用い て,3.3 から 3.5 に示す解析を行った.



図3 カナック氷河の UAV 測量範囲.赤枠と青 枠は2 つにわけられた調査範囲を示す.背景は 2024 年7月5日撮影の Sentinel-2 画像.

3. 2. GNSS 測量

氷河の表面標高と地上基準点 (GCP: ground control point) は Global Navigation Satellite System (GNSS) (GS10; Leica Geosystems 社) で測量し

た. 氷河の表面標高は、バックパックに GNSS ア ンテナを入れ、氷河上を歩いて測定し(図 4a)、 解析時にアンテナ高を差し引いた. 30 cm 四方の 板を氷河上と岩盤上に設置し(図 4b)、GCP とし て測量した.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を行 い、測量点の三次元座標を得た(図 4c). 2024 年 は GNSS を搭載した UAV を使用し、カナック村 に設置した基準局を用いて後処理によるキネマ ティック測位を行い、UAV の位置座標を得た.



図4(a) 氷河表面標高測定の様子.赤丸はアン
テナの位置を示す.(b) 氷河上に設置した GCP.
(c) カナック村に設置した基準局.

3.3.DEM の生成と検証

UAV 測量で取得した画像から DEM とオルソ 画像を作成するために,Structure-from-Motion 法 (Metashape; Agisoft 社)を使用した.この手法では, UAV の位置座標を用いてアライメントされた多 数の写真を用いて,隣り合う画像の中から特徴点 を見つけ出し,三次元座標を示す点群を構築した. この時ソフトウエア上で計算されたレンズの較 正値によって,カメラレンズの歪みを補正した. GCPを手動で追加して三次元座標を補正した後, 高密度クラウド構築により密な点群を得た.これ 基に DEM を作成し,DEM に合わせて歪みを除 いたオルソ画像を作成した.

GNSS で測定された表面標高を基準として,作 成した DEM の精度を検証した. 2022 年 8 月 11 日における DEM は, GNSS で測定された標高に 対して平均誤差-0.075 m,標準偏差 0.192 m であ った(図 5a). 2024 年 7 月 18 日については,平 均誤差-0.176 m,標準偏差 0.121 m であった(図 5b). DEM の標高値が GNSS の測定値に沿うよ う,得られた平均誤差を用いて DEM を補正した.



図5 (a) 2022 年 8 月と(b) 2024 年 7 月にお ける, DEM の標高値と GNSS で測定された標高 値の差分.

3. 4. 流動速度

3.3 で作成した 0.5 m 解像度のオルソ画像(2022 年8月10日と2023年8月4日,2022年8月11 日と2023年7月20日、2023年8月4日と2024 年7月24日,2023年7月20日と2024年7月18 日)に画像相関法(ImGRAFT; MATLAB)を適用 し、氷河の流動速度を算出した.基準画像におけ る参照範囲と対象画像における検索範囲はそれ ぞれ 100×100 ピクセル, 250×250 ピクセルに設定 し,約1年の間をおいて撮影された2枚の画像間 の移動距離を求めた.標高 200-600 m の画像に対 して,信号対雑音比が9以下の相関の低いピクセ ルを削除した. 測定されたすべての流動速度に対 して、隣接する8ピクセルとの流動速度差が2m a⁻¹ 以上のピクセルを外れ値として削除した.速 度が得られなかったピクセルには,隣接する8ピ クセルの平均値を内挿した. 岩盤は不動であると して計算された誤差は 0.5 m a⁻¹(標高 200-600 m), 0.7 m a^{-1} (標高 600-800 m) であり, Stake1-4 の GNSS 測量に対する平均誤差は 0.32 m a⁻¹であっ た.

3. 5. 表面標高変化

GIS ソフトウェア (QGIS) と MATLAB を用い て,2022 年 8 月 11 日と 2024 年 7 月 18 の DEM の差分から標高変化量を求めた. 岩盤は不動であ るとして計算された誤差は 0.11 m a⁻¹であった.

4. 結果と考察

4. 1. 流動速度

流動速度分布は、氷河の中央において流動速度 が速く、氷河の末端や岩盤付近において速度が遅 い傾向があった(図 6).氷河の中央流線におけ る Stake 3 と 4 の間(標高 700 m 付近)で最大速 度(20.5 m a⁻¹)が得られた(図 7).



図6 (a) 2022 年 8 月 11 日から 2023 年 7 月 2 日おける標高 200-600 m 及び (b) 2022 年 8 月 10 日から 2023 年 8 月 4 日における標高 600-750 m の流動速度 (カラースケール) とそのベクトル. 赤い矢印は GNSS で測定した流動ベクトル. 緑の 実線は中央流線を示す.



北海道の雪氷 No.44 (2025) Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

(赤), 2023-2024 年 (青)の流動速度. 実線と丸 印はそれぞれ UAV 及び GNSS で測定した流動速 度.

4. 2. 表面標高変化

標高 600 m 以下の消耗域における,2022 年 8 月 11 日から 2024 年 7 月 18 日の平均表面標高変 化速度は,-1.01±0.11 m a⁻¹であった.標高 400 m 付近の氷河上及び岩盤との接触域において大き な表面標高低下がみられた(図 8).融解水が氷 河上水路と岩盤との接触域を侵食することによ り,氷損失が加速したと考える.さらに,氷河末 端付近において顕著な表面標高低下がみられた. 氷河末端の側壁では,15 m の表面標高低下,9 m の後退が確認された(図 9).この側壁には土砂 が多く,裸氷よりもアルベドが小さい.そのため, 融解が促進されたと考える.



図8 2022 年 8 月 11 日から 2024 年 7 月 18 日に おける,標高 600 m 以下の範囲での平均表面標高 変化速度.



図 9 氷河末端の側壁における A 点から B 点で の標高変化.

5. まとめ

グリーンランド北西部カナック氷河において 2022-2024 年の 7-8 月に UAV 測量を実施した. 取得した画像から高解像度の DEM とオルソ画像 を作成した. 作成された DEM の鉛直誤差は 0.2 m以下であった.これらのデータを用いて,流動 速度と表面標高変化を測定した.測定された流動 速度は, Stake1-4の GNSS 測量に対して平均誤差 0.32 m a⁻¹ であり,標高 700 m 付近で最大速度 (20.5 m a⁻¹) であった. また, 標高 250-600 m に おける平均表面標高変化は-1.01±0.11 m a⁻¹であ り,特に標高400m付近と末端部の側壁で顕著な 表面標高低下と後退がみられた.氷河上水路やア ルベドは氷河の表面標高低下に影響を与えると 考える.本研究は、氷河変動を広範囲で定量化す る手法として UAV 測量の有用性を示した. 今後 は、カナック氷河で観測された氷厚データを用い て, 氷フラックスや浮上速度を算出し, 表面標高 変化の要因について詳細に解析する.

【謝辞】

本研究は, ArCS-II 北極域研究加速プロジェクト(JPMXD1420318865)及び ArCS-3 北極域研究 強化プロジェクト(JPMXD1720521001)の一環 として実施した.

【参考文献】

- Sugiyama et al., 2025: Changes in the coastal environments and their impact on society in the Qaanaaq region, northwestern Greenland. *Polar Science*, in press, 101206. doi: 10.1016/j.polar.2025.101206
- Lander et al., 2021: Estimating surface mass balance patterns from unoccupied aerial vehicle measurements in the ablation area of the Morteratsch–Pers glacier complex (Switzerland), *The Cryosphere*, 15, 4445–4464. doi: 10.5194/tc-15-4445-2021
- Machguth et al, 2016: Greenland surface massbalance observations from the ice-sheet ablation area and local glaciers, journal of glaciology. Journal of glaciology, 62(235), 861–887. doi: 10.1017/jog.2016.75