

グリーンランド北西部カナック氷河における UAV を用いた表面地形測量

Surface Topography Survey Using an UAV on Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland

鵜飼 真汰^{1, 2}, 杉山 慎¹, 近藤 研^{1, 2},
Shinta Ukai^{1, 2}, Shin Sugiyama¹, Ken Kondo^{1, 2},
Corresponding author: ukaishinta@ees.hokudai.ac.jp (S.Ukai)

グリーンランド沿岸域では現在、北極圏の急激な温暖化の影響を受けて氷河の融解が顕著である。氷河変動の定量化とメカニズムの理解を目指し、我々は2012年からグリーンランド北西部に位置するカナック氷帽で調査を継続している。2022年の夏季には氷河上でドローンを用いた観測を実施した。ドローンから得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、表面高度の変化を定量化したので報告する。

1. 研究背景

グリーンランドは北極域の激しい温暖化の影響を受けており、特に沿岸部で氷河の急速な融解が発生している。氷河の融解には、気温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では、氷河の融解を促進されることが知られている¹⁾。このような効果を定量化するためには、人工衛星画像よりも高い分解能で高頻度に氷河上を解析する必要がある。ドローンは衛星画像よりも高解像度の画像が取得可能なため、近年氷河学において注目されている機材である²⁾。そこで本研究では、グリーンランド北西部カナック氷河上でドローンによる観測を行って、氷河上に存在する水流の変化を観測した。本研究では、2022年夏期に得られたデジタル標高モデル(DEM)とオルソ画像から、観測域における氷河表面の高度変化と水流の発達を明らかにすることを目的とした。

2. 調査対象地域

調査を行ったのは、グリーンランド北西部に位置するカナック氷帽($77^{\circ} 28' N, 69^{\circ} 14' W$)から溢流するカナック氷河である(図1)。著者らはこの氷河で2012年から観測を継続しており、質量収支、流動速度、表面高度の変化などが測定されている³⁾。2022年には7月から8月に現地観測

を実施した。ここで報告するドローン観測は、カナック氷河の中流域、標高550–750mで行った。この地域は氷河の消耗域にあたり、幅数10cmから数mまで様々なサイズの氷河上水流が存在する。

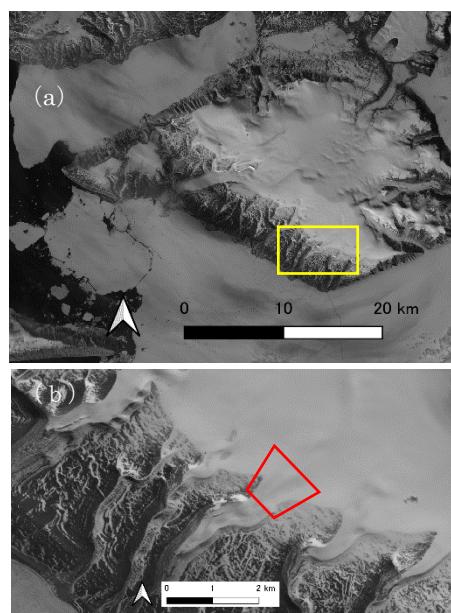


図1 (a) カナック氷帽の人工衛星画像 (Sentinel-2, 2023年6月16日撮影)。黄色枠は(b)の範囲を示す。(b) カナック氷河とその周辺域。赤枠はドローン観測を行った範囲を示す。

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 社のドローン 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 の高さで飛行させ、地上解像度 33 mm の画像を連続的に取得した。撮影画像の重なりの割合を示すオーバーラップとサイドラップはそれぞれ 70% と 65% に設定した。914000 m² の測定域において、1 回の測定で 680 枚の写真を撮影した。観測は 2022 年 7 月 14, 18, 26, 8 月 1, 6, 10 日の 6 回行った。



図 2 本研究で観測に使用したドローン
(DJI phantom4pro V2.0)

写真測量から得たデータに正確な位置情報を与えることを目的に、氷河周辺の 6 か所、8 月 10 日の観測ではさらに氷河上に 3 か所、地上基準点 (GCP : ground control point) を設置した (図 3)。赤く塗った一辺 30 cm の木の板を地上に固定し、(図 4) 板の中心を後述する GPS 干渉測位により測量し、その三次元座標をドローン画像の処理に使用した。

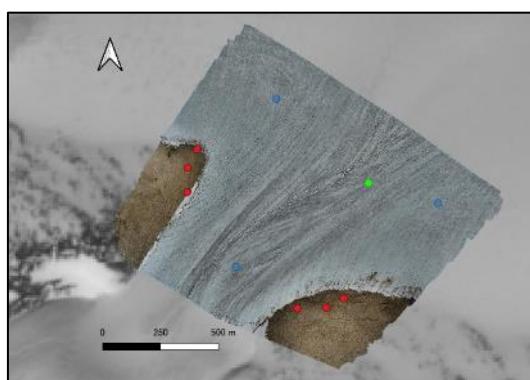


図 3 観測域の人工衛星画像に重ねたドローン撮影画像に、GCP (赤: 全測定、青: 8 月 10 日のみ) と飛行開始位置 (緑) の位置を示す。



図 4 観測域の岩盤上に設置した地上基準点。

3. 2 GPS 観測

氷河上の表面標高と GCP の測量に二周波 GPS (Leica Geosystems 社, GS10) を用いた。GPS 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 5)。得られたデータとカナック村に設置した GPS 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からアンテナ高を差し引いて、ドローン画像から生成した DEM の精度を検証した。



図 5 測量器具をバックパックに入れ、氷河上を歩く様子。

3. 3 DEM の生成と検証

Structure from Motion (SfM) と呼ばれる技術を用いて、ドローンで撮影した多数の画像から DEM を生成した。この作業には Agist 社のソフトウェア Meta shape を使用した。まずレンズのキャリブレーションを行った。レンズの歪みを補正するキャリブレーションを行って、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により、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って大きく外れた値は、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な点群にすることで、測量対象の詳細な地形を得た。この高密度な点群から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)のラスター計算機を用いて解析を行った。まずGPSで測定した標高をDEMと比較して精度検証を行った。次に二つのDEMを比較して標高の変化量を計算した。本稿では8月10日のDEMの標高から7月26日のDEMの標高を差し引いて得られた、夏季15日間の氷河地形の変化を報告する。

4. 結果と考察

4. 1 精度検証

GPSで測量した標高値と、7月26日のDEM(6つのGCPを設置)の差の平均は0.07m、その標準偏差は0.27mであった。8月10日のDEM(9つのGCPを設置)は差の平均が0.11m、その標準偏差が0.35mであった。したがって、GCPの追加による精度の向上はみられていない。これらの誤差の要因として、上流域のGCPが足りていない標高690m以上には比較的顕著な歪みが見られた。従って次回の観測では、観測地域に等間隔のGCPの設置が必要だと考える。

4. 2 標高変化

7月26日から8月10日にかけて氷河上で顕著な標高低下が観測され(図6)、観測域における平均高度変化量は-0.68mであった。特に河川、氷河と岩盤の境界付近で顕著な高度変化が観測された。特に観測域における最大の河川の周辺では、他の氷河上よりも標高低下量が大きい。また、氷河の横断方向に測線をおいて標高とその変化を比較したところ、氷河上の右岸側より左岸側の表面の低下量が大きい傾向があると明らかとなつた(図7)。この原因として、氷河の左岸側の方の表面が右岸側の方が黒い(図3)ことから、表面のアルベドの違いが要因である可能性が考えられる。

氷河の周縁部では、7月26日には雪が広がっているのに対して、8月10日には融解が進んで積雪域が減少している(図8)。したがって、氷河と岩盤の境界で測定された標高変化は、雪の融解が原因である。

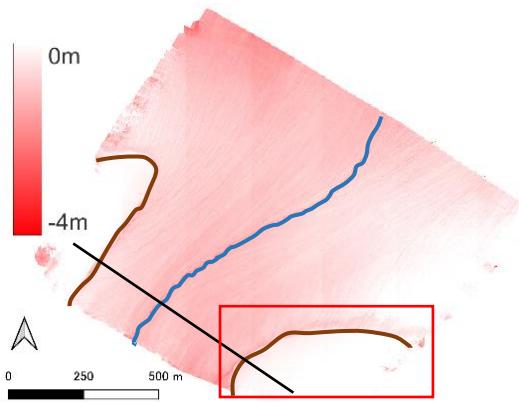


図6 7月26日のDEMと8月10日のDEMの標高差の図。青い線は観測域における最大の河川、茶色の線は氷河と岩盤の境界線を示す。赤枠は図8の画像の撮影範囲を示す。

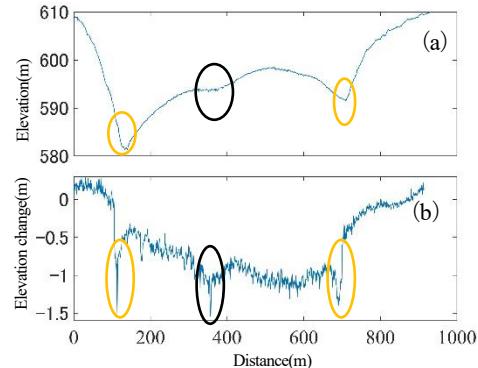


図7 図6中の黒線の位置における(a)7月26日のDEMの標高と(b)DEMの標高差の断面図。黒で囲われた場所は観測域における最大の河川を示し、黄色で囲われた場所は氷河と岩盤の境界を示す。

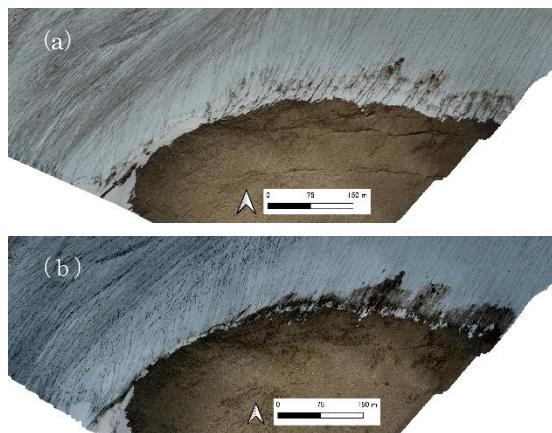


図8 氷河と岩盤の境界における (a) 7月 26日および (b) 8月 10日のオルソ画像.

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年夏季にドローンを用いた調査を行った。撮影画像から生成したDEMの精度は、GPSで測量した標高値と、DEMの差から求めた。その平均は0.07–0.11 m、標準偏差0.27–0.35 mであった。この精度のばらつきは、氷河上流部でGCPが十分に設置できていなかったことが原因だと考えられる。DEMの精度向上させるために、次回の観測では上流部に追加のGCPの設置が有効だと考える。また、7月26日と8月10日のDEMの比較から、観測域における15日間の平均高度低下量は−0.68 mであることが分かった。特に河川、氷河と岩盤の境界付近で大きな高度低下が観測された。また、氷河の横断方向に測線をおいて標高とその変化の比較から、氷河上の右岸側より左岸側の低下量が大きい傾向があると明らかとなった。この原因として、氷河の左岸側と右岸側の表面のアルベドの違いが要因である可能性が考えられる。

【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ものである。観測を行う際、所属する研究室のメンバー、先生方には多くのご支援を頂きました。心よりお礼申し上げます。

【参考文献】

- 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.

- Gaffey C, Bhardwaj A. 2020: Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Cryosphere: Latest Advances and Prospects, *Remote Sens.* 2020, **12**(6), 948.
- Sugiyama et al., 2014: Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, **55**(66), 25–33.