

UAV 測量によるグリーンランド北西部・ボードイン氷河における 2025 年夏季の末端変動

Changes near the front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, measured with UAV in summer 2025

見米富視^{1,2}, 矢澤宏太郎^{1,2}, 今津拓郎^{1,2}, 杉山慎^{1,3}
Fumi Mikome^{1,2}, Kotaro Yazawa^{1,2}, Takuro Imazu^{1,2}, Shin Sugiyama^{1,3}

Corresponding author : mikome.fumi.q5@elms.hokudai.ac.jp

¹北海道大学低温科学研究所, ²北海道大学大学院環境科学院, ³北海道大学北極域研究センター

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ²Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University,

³Arctic Research Center, Hokkaido University

グリーンランド北西部のボードイン氷河では、2008–13 年に末端が 1 km 以上後退し、氷厚の減少によって静水圧平衡に近づいている。そこで本研究では、2025 年 8 月 2–18 日に同氷河の末端域を無人航空機で測量して、空撮画像から作成した標高モデルとオルソ画像を解析した。その結果、8 月 2–18 日に平均 0.78 m の標高低下、中央部で最大 1.4 m d⁻¹ の流動速度、174 m の末端後退が算出された。2013 年に測量された基盤標高と比較した結果、氷河中央部では末端から 180 m の範囲で静水圧平衡に達している可能性が示唆された。

1. はじめに

近年、グリーンランド氷床では、氷損失が加速しており、2002–19 年にかけて 0.8 mm a⁻¹ の速度で海水準変動に寄与した¹⁾。この氷損失には、氷河の末端消耗が大きく関係している。特に北西部では、2010–18 年の質量損失の 69%が末端消耗に起因した¹⁾。末端消耗は、水中融解と氷塊が氷河から取れて海に流れ出すカービング（冰山分離）の 2 つに分けられる（図 1）。カービングを考える上で、氷河末端部における氷厚と水深の関係が重要である。氷厚が減少すると氷に作用する浮力が重力を打ち消すようになり、表面標高がある高さまで達すると浮力と重力が等しい静水圧平衡の状態となる。本稿ではこの標高を Flotation Level と呼ぶ。氷河の表面標高が低下して Flotation Level に達すると、カービングが促進されて氷河質量損失が加速すると考えられる²⁾（図 2）。この仮説の検証には、氷河末端における正確な標高データが必要である。昨今では、UAV（無人航空機）を用いた氷河観測が盛んであり、高時空間分解能のデータを広範囲で取得可能になった。そこで本研究では、グリーンランド北西部のカービング氷河を対象に、氷河末端を UAV で測量し、空撮画像から作成した DEM（数値標高モデル）とオルソ画像を用いて、流動速度、表面標高変化、末端変化距離を測定した。その結果から、

末端消耗の変動を推定し、表面標高と Flotation Level の関係を明らかにすることを目的とした。

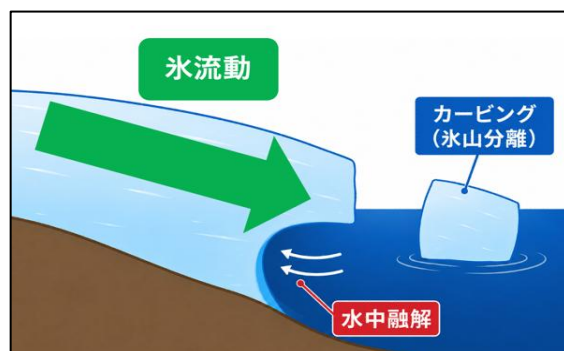


図 1. 末端消耗の概念図

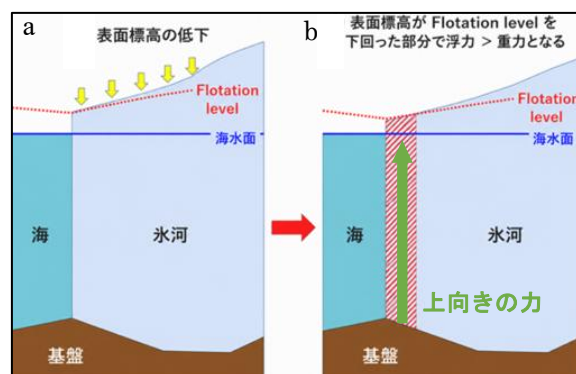


図 2. カービング氷河の後退メカニズム²⁾。(a) 表面標高が低下し、(b) Flotation Level に達すると、重力を上回る浮力が生じて、氷河末端が不安定化する。

2. 研究対象地

本研究の対象地であるボードイン氷河は、グリーンランド北西部 (77°41'N, 68°37'W) に位置する (図 3a)。ボードイン氷河は、氷床から南に向かって流れる全長約 10 km、末端幅約 3 km のカービング氷河であり、2008–13 年にかけて 1.15 km 後退した³⁾。2013 年 7 月 7–11 日に実施された現地観測では、全氷厚のうち 86–89 % が海面下にあり、氷河末端は基盤に接地している一方で、表面標高が Flotation Level に近づいていた。そのため、

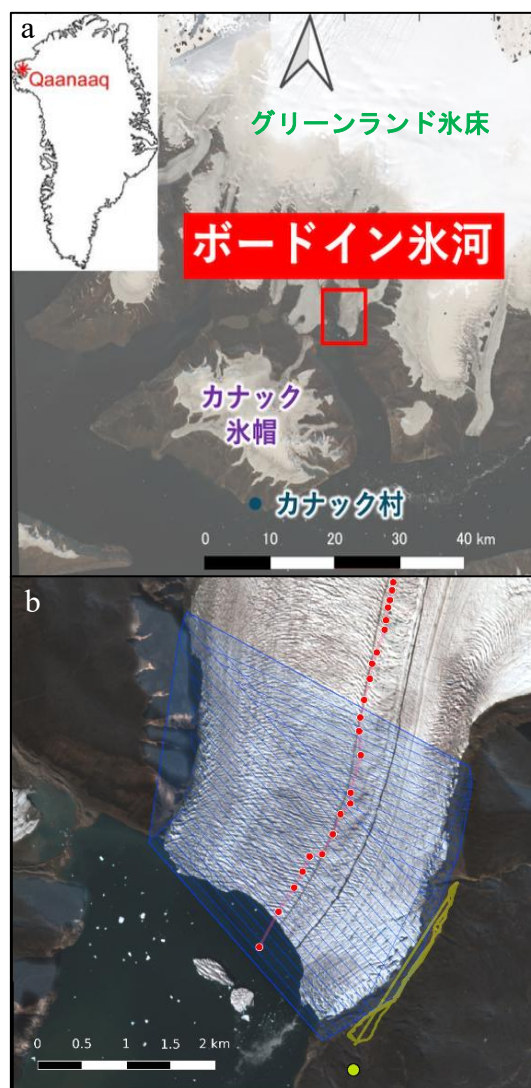


図 3. (a) ボードイン氷河周辺の衛星画像 (Sentinel-2, 2024 年 8 月 5 日) 赤枠内はボードイン氷河末端部を指す。

(b) ボードイン氷河における観測範囲。赤点は氷厚測定点、青線は UAV 飛行ルート、黄線は GNSS 測量ルート、緑点は GNSS 基準局の位置を示す。

僅かな標高低下や潮汐変動に敏感な不安定状態にある³⁾。

3. 研究手法

3.1. UAV 測量

2025 年 8 月 2, 6, 18 日に、DJI 社製 Mavic3M を用いて測量を実施した。氷河末端域約 10 km² の範囲を (ラップ率 70% と高度 300 m) で飛行ルートを設定した。左岸側の岩盤に設置した DJI 社製 GNSS 受信機 D-RTK2 を基準局としたリアルタイム・キネマティック測量により、1 cm 単位の高精度位置情報を取得した (図 3b)。空撮写真を Agisoft 社製画像解析ソフトウェア Metashape で処理し、1 m 解像度の DEM とオルソ画像を作成した。

3.2. 流動速度分布

数値解析ソフトウェア MATLAB のオープンソースコード ImGRAFT を用いて、画像相関法で範囲内の流動速度分布を求めた。テンプレート幅 60 ピクセル、検索幅 180 ピクセル、分解能 10 m に設定した。作成した 8 月 2, 18 日の 2 枚のオルソ画像を比較し、流動速度分布を算出した。流動速度の精度を評価するため、流動しない氷河両岸域 (図 4) で速度成分を算出した。その結果、両成分ともに平均値は 0.01 m d⁻¹、標準偏差は 0.1 m d⁻¹ 程度に収まった (図 4)。

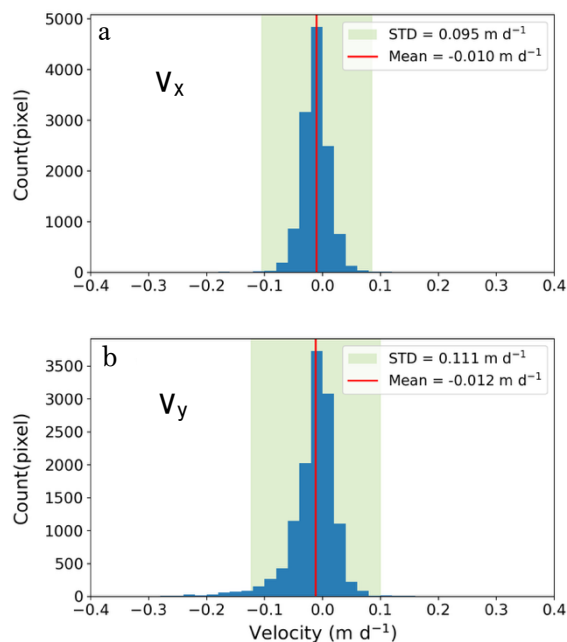


図 4. 岩盤における速度の $x \cdot y$ 成分のヒストグラム。赤線は速さ平均、緑の領域は $\pm 1\sigma$ を示す。(a) が x 成分、(b) が y 成分を示す。

3.3. 表面標高変化

氷河東側で実施した徒歩による GNSS キネマティック測量 (図 3b) の標高値と、作成した 8 月 2, 18 日の DEM の同地点における標高値を比較することで、DEM の鉛直誤差を算出した (図 5)。平均の誤差をもとに 2 つの DEM を補正した。流動速度によるクレバスの移動を補正してから、2 つの DEM を比較し、平均標高変化を求めた。

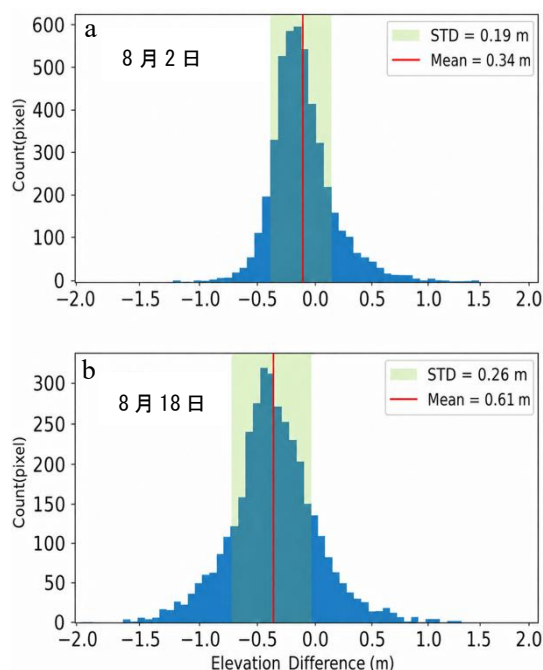


図 5. DEM 標高値と GNSS 標高値の差をプロットしたヒストグラム。赤線は差分平均、緑の領域は $\pm 1\sigma$ を示す。(a) が 8 月 2 日、(b) が 8 月 18 日を示す。

3.4. 末端変動距離

作成したオルソ画像を地理情報システムソフトウェア QGIS に読み込み、末端線を手動で描画した。8 月 2, 6, 18 日の末端位置を比較して、氷河末端に沿って 100 m ごとに末端位置の平均距離を測定した。その結果、8 月 2 日末端線の西端が 0 m、東端が 4300 m となった。

3.5. 氷厚と Flotation Level 算出

2013 年に氷レーダによって測定された基盤地形データを使用した³⁾ (図 3b)。2025 年 8 月 18 日の表面標高データから、縦断線上における氷河断面図を作成し、表面標高と Flotation Level の関係を検討した。Flotation Level (F) は、海水密度 ρ_{sea} (1025 kg m^{-3})、氷密度 ρ_{ice} (917 kg m^{-3})、基盤地形標高を Z_b として、以下のように求めた。

$$F = \left(1 - \frac{\rho_{\text{sea}}}{\rho_{\text{ice}}}\right) Z_b \quad (1)$$

4. 結果と考察

4.1. 流動速度分布

流動速度は氷河末端中央部で最大 1.4 m d^{-1} となり、 1.2 m d^{-1} 以上の領域が 0.37 km^2 を占めた (図 6)。西側でより速度が大きくなる傾向が見られ、 0.3 m d^{-1} 以下の領域は東側では 0.84 km^2 、西側では 0.15 km^2 であった。

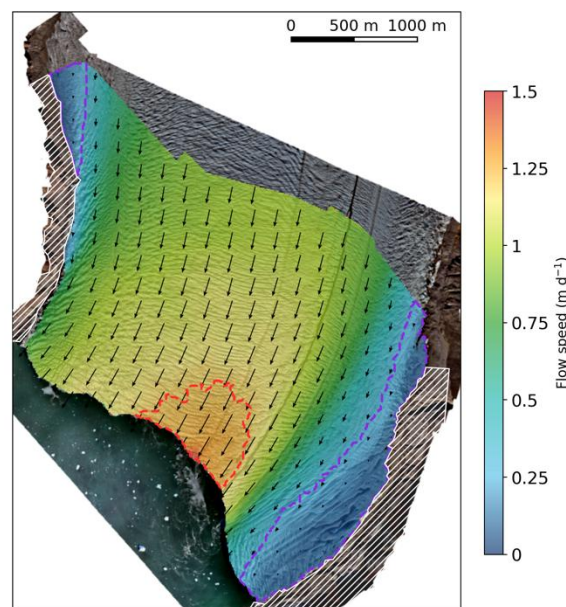


図 6. 8 月 2–18 日の流動速度分布。赤破線は 1.2 m d^{-1} 以上の領域、紫破線は 0.3 m d^{-1} 以下の領域、白掛け線は流動速度を校正した岩盤領域を示す。

4.2. 表面標高変化

8 月 2–18 日に観測領域内 (8 km^2) で平均して $0.78 \pm 0.32 \text{ m}$ 表面標高が低下した。

4.3. 末端位置変化

8 月 2–6 日にかけて氷河末端は後退傾向を示し、この期間の平均変動距離は -0.4 m d^{-1} であった。その後、8 月 6–18 日には後退速度が -4.7 m d^{-1} まで増加した。(図 7)。この期間における後退は氷河の中央部で顕著であり、東側から 2.2 km の地点では最大 174 m の後退が観測された一方で、末端の西側 400 m と東側 1600 m における変動距離は $\pm 15 \text{ m}$ の範囲内であった。

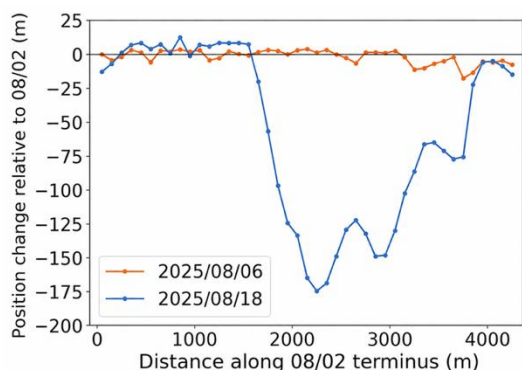


図 7. 8 月 2 日からの末端変動距離（正の値が前進を示す）. 横軸は氷河西側からの距離、縦軸は 8 月 2 日からの変動距離を示す.

4. 4. 氷厚変化と Flotation Level

2013 年 7 月 11 日から 2025 年 8 月 18 日の期間に、縦断測線上で平均 18 m 氷厚が減少した（図 8）. この標高低下によって、末端から 180 m にかけて表面標高が Flotation Level を下回った. この地域は 1.2 m d^{-1} 以上の流動域（図 6 の赤破線）、末端線の急速な後退域（図 7）と重なっている.

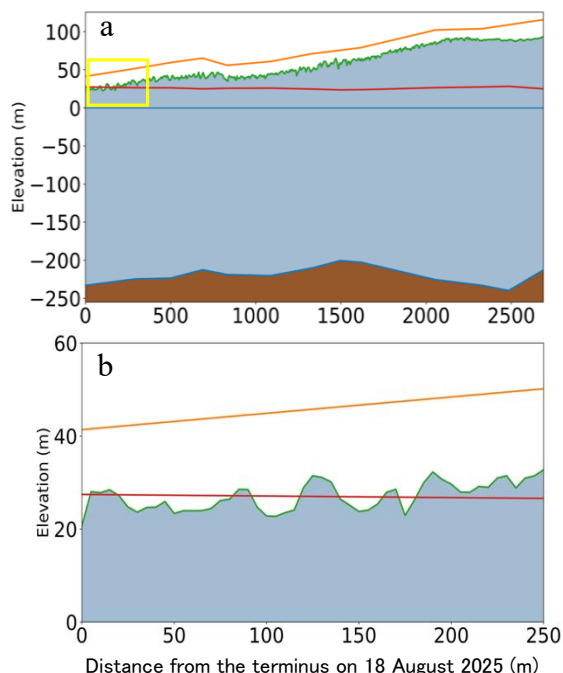


図 8. (a) 氷河縦断測線上の断面図と (b) その拡大図. 横軸が 2025 年 8 月 18 日の氷河末端からの距離、縦軸が標高を示す. 橙線が 2013 年の表面標高、緑線が 2025 年 8 月 18 日の表面標高、赤線が 2025 年 8 月 18 日の Flotation Level を示す.

これらの結果から、ボードイン氷河末端域は表面標高が Flotation Level に達したことで、基盤が氷河底面の摩擦が弱まって流動が促進され、カービングが発生しやすくなっている可能性がある.

5. まとめ

グリーンランド北西部ボードイン氷河末端部において、2025 年 8 月 2–18 日に UAV 測量を実施し、取得した画像から 1 m 解像度の DEM とオルソ画像を解析し、流動速度分布・表面標高変化・末端位置変化を算出した. その結果、観測領域内で平均 0.78 m 標高が低下した. 中央部では最大 1.4 m d^{-1} の流動速度が算出され、16 日間に最大 174 m の後退が計測された. 2013 年に取得された基盤地形と統合して解析した結果、中央部において氷河末端線から 180 m にわたって Flotation Level を下回っていた. この領域では、氷河が基盤に完全に接地していないため、底面抵抗が弱まって流動速度が大きくなり、カービングが発生しやすくなっている可能性が示唆される. 今後の研究では、2016–19 年現地観測データや衛星データを活用し、氷厚の正確な分布をより幅広く算出することで、氷河表面標高と Flotation Level との関係を氷河の領域ごとに考察したい.

【謝辞】

本研究は科研費基盤研究 S「カービング氷河の末端プロセス・海/湖・大気・陸の境界に直接観測で迫る」(25H00452) および北極域研究強化プロジェクト (ArCS-3) JPMXD1720251001 の一環として実施した. 2025 年夏のグリーンランド観測に参加したメンバーの協力に感謝する.

【参考文献】

- 1) Mouginot, J. et al., 2019: Forty-six years of Greenland Ice Sheet mass balance from 1972 to 2018. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**(19), 9239–9244.
- 2) 浅地泉ほか 2018: グリーンランド北西部 Bowdoin 氷河における末端位置の変動と海底地形の関係, *北海道の雪氷*, **37**, 119–122.
- 3) Sugiyama, S. et al. 2015: Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, *Journal of Glaciology*, **61**(226), 223–232