

グリーンランド北西部カナック氷河における近年の流動変化

Change in the ice flow regime of Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland

今津 拓郎^{1,2}, 杉山 慎¹

Takuro Imazu^{1,2}, Shin Sugiyama¹

Corresponding author: takuro_imazu@lowtem.hokudai.ac.jp (T. Imazu)

近年、グリーンランド周縁部に分布する氷河氷帽の質量損失が著しい。氷河氷帽の質量変化は、表面質量収支だけでなく、氷流動にも影響を受ける。そこで、著者らは2012年からグリーンランド北西部カナック氷河において、質量収支や標高変化の測定と合わせて、流動速度を継続して観測している。本研究では、2012–2022年に観測された流動速度をまとめ、数値実験によって10年間の表面標高と氷河末端位置の変動を再現した。今後は作成したモデルを用いてカナック氷河や氷帽の将来変動予測を行う。

1. はじめに

近年、グリーンランド周縁部に分布する氷河氷帽の質量損失が著しい。これらの質量損失は時空間的に一様ではない。例えば、本研究で着目する北西部の氷河氷帽では、2003–2018年に加速傾向であった質量損失が2019年以降減速傾向に転じたことが人工衛星観測によって明らかとなった¹⁾。このような氷河の質量変化は、質量収支に加えて、涵養域から消耗域への氷流動にも影響を受けるため、質量変化のメカニズムを理解する上で長期間にわたる流動速度観測は重要である。しかし、グリーンランド北西部はアクセスが悪いため現地調査例が少ない。このような背景のもと、著者らはグリーンランド北西部のカナック氷河において、流動速度を2012年から継続して観測している。それらの観測結果をもとに、数値モデルの開発も行われており²⁾、数値計算は氷河変動の定量化とその要因を解明する上で有効な解析手法である。本稿では(1) 2012–2022年に観測された流動速度をまとめ、(2) 同期間の10年間の氷河変動（表面標高変化及び末端後退距離）を数値実験によって再現することを目的とした。

2. 研究対象地

カナック氷帽はグリーンランド北西部($77^{\circ}28'N, 69^{\circ}14'W$)に位置する面積 289 km^2 の氷帽である²⁾(図1a)。本研究の対象地域である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り、2012–2022年にかけて、中央流線に沿った標高243–968 m a.s.lの6地点で

流動速度と表面質量収支が観測されている³⁾(図1bの●、低標高域から高標高域にかけてSite1からSite6と呼ぶ)。また、氷河の中央流線(図1bの破線)に沿って2012年7月26–30日にGPSとアイスレーダーによって表面標高と底面地形が²⁾、2022年8月3日には表面標高が測定された³⁾。

3. 研究手法

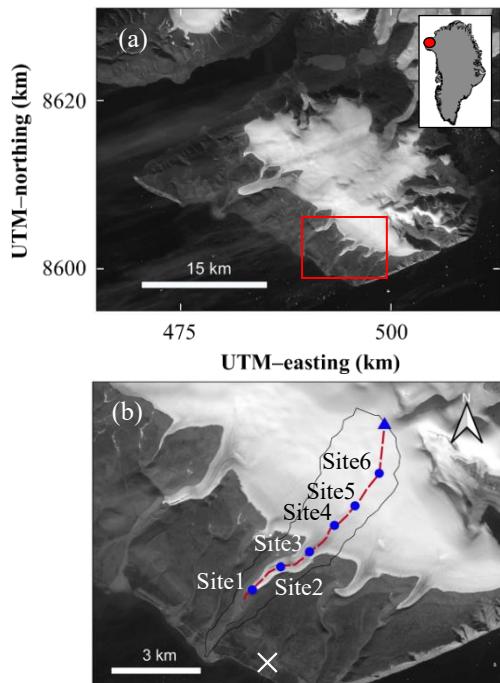


図1 (a) カナック氷帽の衛星画像 (Landsat 8, 2022年8月27日撮影)。赤枠は(b)の範囲を示す。(b) カナック氷河の流域(実線)、流動速度と表面質量収支の観測地点(●)、氷河上端(▲)、カナック村に設置したGPS基準局(×)、底面と表面標高の測線(破線)。

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. 1 流動速度の現地観測

氷河上に埋設したアルミポールの先端にGNSSアンテナ(Leica GS10, System1200; またはEnabler Ltd, GEM-1)を固定し、カナック村に設置した基準局(図1bの×)との約30分のスタティック干渉測位によって3次元座標を取得した。この測量を2012–2022年の7–8月に行い、ポールの座標変化から水平方向の流動速度を算出した。なお2021年はCOVID-19の影響を受けてデータ欠損となった。

3. 2 氷河数値モデル

氷河の流動モデルと質量収支の観測値を基に、氷河変動モデルを構築した(図2)。このモデルを使った数値実験によって、2012–2022年の10年間で生じたカナック氷河の表面標高変化及び末端の後退を再現した。

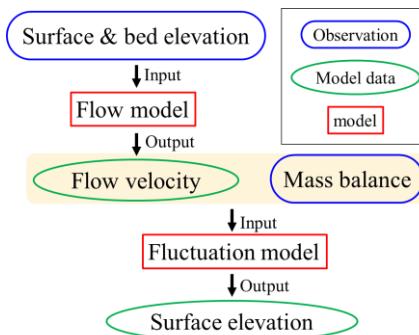


図2 本研究で構築した氷河変動モデルの構造を示す。観測値(青), 計算値(緑), 数値モデル(赤)。

3. 2. 1 氷河流動モデル

先行研究²⁾で構築された2次元流動モデルを改良し、観測された流動速度を再現するモデルを構築した。氷河の中央流線(図1bの破線)に沿った流動方向と鉛直方向にそれぞれx, z軸をとった場合、x-z平面内の運動量保存則と質量保存則はそれぞれ以下で表される。

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho g \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = C\eta U \frac{H}{W^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

σ_{ij} ($i, j = x, z$)は応力テンソルの成分、 $\rho = 910 \text{ kg m}^{-3}$ は氷の密度、 $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ は重力加速度、Cは氷河側岸からの摩擦を表す係数(氷河が谷地形

に溢流する領域では $C = -40.5$, それ以外の領域では0とする), η は氷の粘性係数、Uは水平方向の流動速度、Hは氷厚、Wは氷河幅、 u_i は $i = x, z$ 方向の流動速度成分を表す。構成式を用いて式(1)の応力テンソルの成分をひずみ速度に変換し、式(1)及び式(2)を解いた。その際に用いた構成式であるグレンの流動則は以下で表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = A\tau_e^{n-1}\tau_{ij} \quad (3)$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ はひずみ速度、Aは氷体温度に依存する速度因子、 τ_e は有効応力、 τ_{ij} は偏差応力である⁴⁾。本研究では、 $n = 3$ を仮定した。2012年に観測された表面標高と底面標高から得た2次元縦断面を初期地形として、有限要素で水平方向を30分割、鉛直方向を10分割した(図3)。その有限要素上で式(1)–(3)を有限要素法によって解き、流動速度を算出した。境界条件には、2014年の観測で得られた氷表面から13m地点の氷体温度⁵⁾を与え、底面から供給される地殻熱流量を 47 mW m^{-2} と仮定した。式(1)のC、式(3)のA及び境界条件の地殻熱流量は、2012/2013年に観測された水平方向の流動速度を再現するように最適化した。

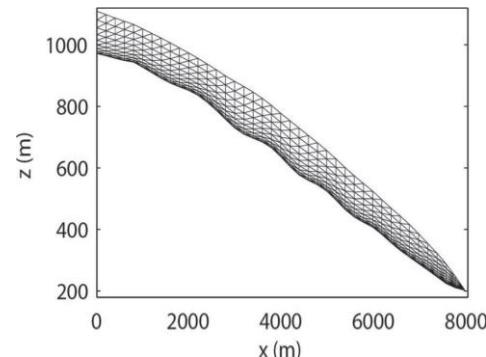


図3 氷河流動モデルに使用したメッシュ化した2次元のカナック氷河縦断面(Sugiyama, S. et al., 2014より引用)。横軸に氷河上端(図1bの▲)からの距離、縦軸に標高を示す。

3. 2. 2 氷河変動モデル

氷河流動モデルによって得られた氷河表面の流動速度(u_x, u_z)と表面質量収支の観測値(b)を用いて、表面標高を1年毎に以下の式で計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = b + u_z - u_x \frac{\partial h}{\partial x} + G \quad (4)$$

Gは2次元の氷河変動モデルに対して3次元的な効果を補正する項であり、図3の $0 \leq x < 2130 \text{ m}$ の領域、 $2130 \leq x < 5160 \text{ m}$ の領域及び $x \geq 5160 \text{ m}$ の領域に対して、それぞれ式(5)–(7)を適用した。

$$G = -C_1 \log (W_{ELA} + 1 - W) \quad (5)$$

$$G = C_2 \log (W) \quad (6)$$

$$G = C_3(T_{thd} - T) \quad (7)$$

式(5)は平衡線より上流部の領域において、氷河の中央流線から氷フラックスが発散する作用を考慮しており、 $C_1 = 0.01$ は発散係数、 $W_{ELA} = 2590\text{ m}$ は平衡線の氷河幅、式(5)及び(6)の W は氷河幅を表す。式(6)は谷地形に溢流する境界より上流部から平衡線以下の領域において、中央流線に対して氷フラックスが収束する作用を考慮しており、 $C_2 = 0.16$ は収束係数を表す。式(7)は氷河が谷地形に溢流する領域において、谷地形の蛇行（図 1b の Site2 付近）が中央流線の氷フラックスに与える影響を考慮しており、 $C_3 = 4$ は傾き係数、 $T_{thd} = 0.45$ は中央流線の緯度に対する絶度の傾きの閾値、 T はその傾き（ただし、 $T_{thd} \geq T$ のとき $C_3 = 0$ ）を示す。式(5)の C_1 、式(6)の C_2 、式(7)の C_3 及び T_{thd} は 2022 年に観測された表面標高を再現するように最適化された。

4. 結果と考察

4. 1 流動速度の観測結果

Site1–4において 2012–2022 年の 10 年間で氷河の流動速度は減少傾向を示した（図 4）。減少幅は Site1 から Site4 でそれぞれ -0.37 m a^{-1} , -1.08 m a^{-1} , -1.65 m a^{-1} , -1.02 m a^{-1} であり、Site3 での減速が最も著しい。一方、Site5 と Site6 の流動速度は 2016 年以降、それぞれ 0.14 m a^{-1} と 0.21 m a^{-1} の増加傾向を示した（図 4）。

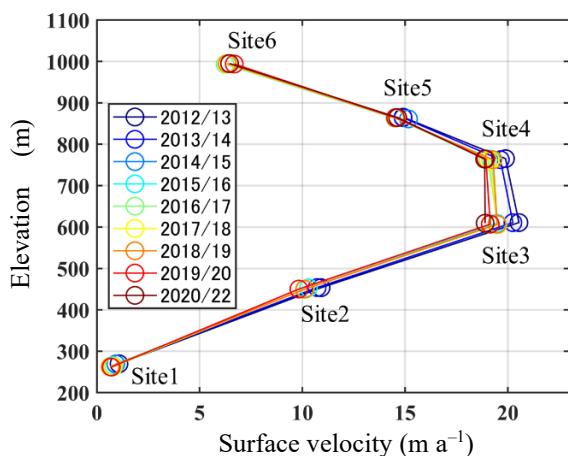


図 4 2012–2022 年の 10 年間で観測された氷河表面の水平方向の流動速度。

4. 2 氷河流動モデルの較正及び検証

2012 年に観測した底面標高と表面標高を用いて氷河流動モデルで流動速度を計算した結果、図 5a に示す流動速度が算出された。2012/2013 年の観測値に対する計算値の平均二乗根誤差は 0.91 m a^{-1} となり、概ね良い一致が見られた（図 5b）。また、2022 年の表面標高の観測値をもとに流動速度を算出した結果、同年の観測値に対する平均二乗根誤差は 1.03 m a^{-1} であった（図 5b）。以上より、流動モデルは氷河変動に伴って変化する流動速度を概ね良く再現することが示された。

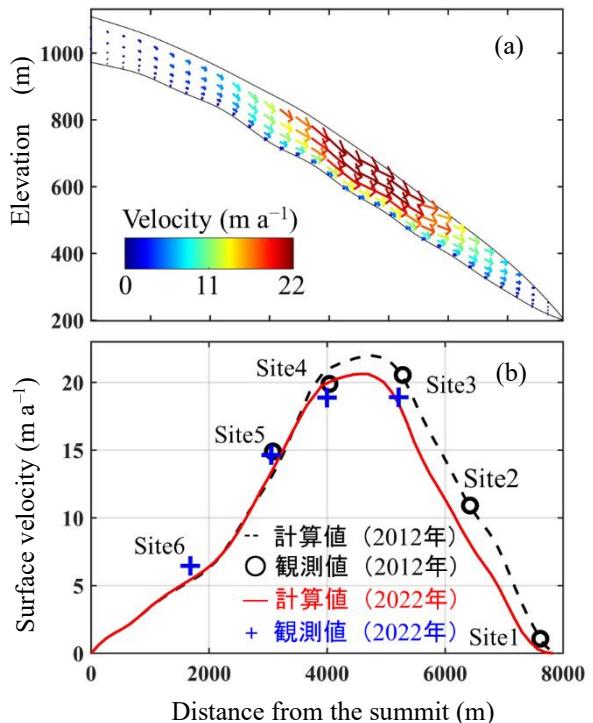


図 5 (a) 2012/2013 年の流動速度を再現した氷河流動モデル結果。 (b) 氷河表面の水平方向の流動速度。 2012 年計算値（黒破線）、2012 年観測値（○）、2022 年計算値（赤線）、2022 年観測値（+）。

4. 3 氷河変動モデルの結果及び検証

氷河変動モデルで 2012–2022 年の表面標高変化を計算した結果、平均表面標高変化は -4.95 m であった。同期間に観測された変化は -7.30 m であり、数値モデルは実際の表面低下を 32% 過小評価した（図 6a の破線）。また、後退距離の計算値は 93 m であった一方、観測された後退距離は 105 m であった。土砂に覆われた末端位置の同定が難しいことを考慮すると、氷河変動モデルはカナック氷河の後退を概ね良く再現したといえる（図 6b）。標高変化の観測値に着目すると、氷河上端から $6000\text{--}7000\text{ m}$ 付近に 2 つの極大値があり（図

6a の↑), それぞれ谷地形の蛇行 (図 1b の Site2 付近) の始点と終点付近に位置する。すなわち, 極大値は氷河の 3 次元的な構造によって生じた標高変化である可能性が高く, そのような特徴は 2 次元縦断面に着目した本研究の数値モデルでは再現されてない。よって, 式(5)–(7)を用いて設定した 3 次元的な氷フラックスを与える項 G は今後改善の余地がある。

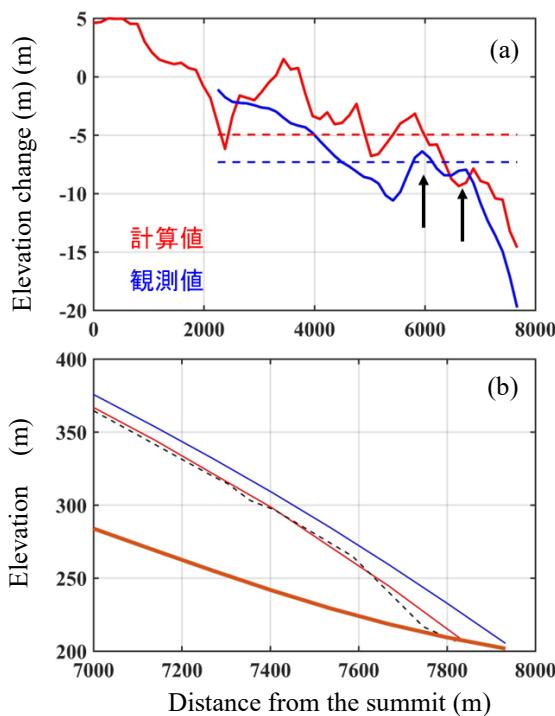


図 6 (a) カナック氷河中央流線の 2012 年から 2022 年における表面標高変化の計算値 (赤) と観測値 (青), 破線はそれぞれ観測された領域での平均を示す. (b) 表面標高の末端付近の拡大図. 2012 年観測値 (青), 2022 年計算値 (赤), 2022 年観測値 (黒), 2012 年に観測された底面標高 (茶).

5.まとめ

グリーンランド北西部カナック氷河において, 2012–2022 年の流動速度を測定した結果, Site1–4 において流動速度の減少傾向がみられた. 特に Site3 において 1.65 m a^{-1} の最も大きな減速がみられた. また, 上流部では流動速度の増加傾向が示された. 氷河流動モデルによって, 2012 年及び

2022 年の流動速度を再現した結果, 平均二乗根誤差はそれぞれ 0.91 m a^{-1} と 1.03 m a^{-1} となった. 氷河変動モデルによって, 2012–2022 年の表面標高変化を計算したところ, 平均 -4.95 m と算出され, 観測値を 32% 過小評価した. 後退距離の計算値は 93 m であり, 観測値の 105 m をやや下回ったが, 土砂に覆われた氷河末端位置の同定が難しいことを考慮すると, 概ね良い再現性を示した.

今後の展望として, 構築した氷河数値モデルを用いて, 過去の気候変動を入力してカナック氷河の変動を計算し, 光学人工衛星データをもとに検証する予定である. また, 将来の気候変動シナリオを用いてカナック氷河の将来変動を計算し, 気候変動が氷河の質量変化に与える影響を解明する.

【謝辞】

本研究は GRENE 北極気候変動研究事業, ArCS 北極域研究推進プロジェクト及び ArCS II 北極研究加速プロジェクトの下で実施した. 本研究にこれまで携わってこられた方々に謝意を表する.

【参考文献】

- 1) Khan, S. A. et al., 2022 : Accelerating Ice Loss From Peripheral Glaciers in North Greenland, *Geophysical Research Letters*, **49**(12), e2022GL098915.
- 2) Sugiyama, S. et al., 2014 : Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, **55**(66), 25–33.
- 3) 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.
- 4) Cuffey, K.M. and W.S.B. Paterson, 2010 : the physics of glaciers, Elsevier, Burlington, MA, USA, ISBN 978-0-12-369461-4.
- 5) 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.