グリーンランド北西部カナック氷帽における 氷流動速度のモニタリング観測と数値モデリング Field measurements and numerical experiments on ice flow velocity of Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland

近藤 研^{1, 2}, 榊原 大貴^{2, 3}, 津滝 俊^{4, 5}, 杉山 慎² Ken Kondo^{1, 2}, Daiki Sakakibara^{2, 3}, Shun Tsutaki^{4, 5}, Shin Sugiyama² Corresponding author: ken_kondo@pop.lowtem.hokudai.ac.jp (K. Kondo)

To investigate seasonal and year-to-year ice flow variations of an Arctic ice cap, we conducted flow velocity measurements on Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland from 2012 to 2018. Velocity showed seasonal acceleration by 19 % in the summer 2012, indicating enhanced basal ice motion. Annual velocity decreased by 3.6 % from 2014 to 2016, which can be attributed to intensive mass loss during the period. Numerical experiments with an ice flow model implied existence of relatively warm ice within the glacier, suggesting the influence of latent heat released by meltwater refreezing.

1. はじめに

グリーンランド氷床の質量損失の増加が報告さ れているが,沿岸部に位置する氷河,氷帽について もその例外ではない. これらの氷河,氷帽は低標高 に位置しているため気候変動に敏感に反応するこ とが知られている 1). 氷河の流動は氷体を消耗域に 運搬する役割を担っているために, 流動加速は質量 損失の増加に繋がる.よって氷河の質量変動を理解 するためには流動速度の継続的な観測が必要とな る. また氷河の氷体温度は氷の粘性を変化させるこ とで流動速度に大きな影響を与える. 寒冷な北極域 に位置する氷河は気温に大きく影響を受けた温度 構造を持ち,その多くは氷河全体が圧力融解点を下 回る寒冷氷河,または一部が融点に達しているポリ サーマル氷河である.しかしながら、氷河内部の温 度分布は単純ではない. 例えば本研究の対象地であ るグリーンランド北西部のカナック氷河では,高標 高域で氷体温度が高くなる傾向が測定され, 流動速 度に影響を与えている可能性が示唆された^{2),3)}.

このような背景のもと我々は、グリーンランド北 西部の氷床周縁に位置するカナック氷帽にて、流動 速度の継続的な観測を行っている.本稿では、観測 によって定量化された流動速度の季節・年々変動を 報告するとともに,数値実験を用いて氷体温度が流 動速度に与える影響について議論する.

2. 研究対象地

カナック氷帽は、グリーンランド北西部カナック 村(77°28'N, 69°13'W)の北側に位置する面積 289 km²の氷帽である²⁾(図1a).カナック氷帽か ら南側に溢流するカナック氷河では、2012年以降 継続的に表面質量収支を中心としたモニタリング 観測が行われている³⁾.その結果、2012年から2016 年における氷河全体の年間表面質量収支の平均値 は-0.22±0.30 m w.e. a⁻¹ (water equivalent per annual)と報告されている.

3. 研究手法

(1)流動速度観測

カナック氷河上の標高 243-968 m a.s.l.の 6 地点 に観測サイトを設け、アルミポールを埋設した(図 1b).アルミポールの先端を GPS (Leica, System 1200, Enabler Ltd., GEM-1) によって測量し、前 回測定からの移動距離から流動速度を算出した.1

[「]北海道大学 大学院環境科学院 Graduate School of Environmental

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University ² 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

³北海道大学 北極域研究センター

Arctic Research Center, Hokkaido University

⁴国立極地研究所

National Institute of Polar Research

⁵東京大学 大気海洋研究所

Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo





図1(a) カナック氷帽の衛星画像(Sentinel-2, 2017年7月25日撮影). 赤枠は(b)の範 囲を示す.(b) カナック氷河における流動速 度(×)および氷体温度測定地点(△).

秒間隔で 30 分間の GPS 衛星データを取得し,カ ナック村に設置した基準局 (Enabler Ltd., GEM-1) を使ったスタティック干渉測位法によって測定を 行った. 2012 年 7 月 18 日から 2018 年 8 月 5 日の 間,毎年 7 月上旬と 8 月初旬に観測を行うことで, 夏期と年間の流動速度を測定した.

(2) 氷河流動モデル

先行研究²⁾で構築された2次元氷河流動モデルを 用いて氷河の流動速度を計算した.このモデルはグ レンの流動則と熱収支式を用いて氷河の流動 速度と温度分布を算出する.計算には有限要素法を 用いており,流線方向と鉛直方向の2次元空間を対 象とする(図2).氷河表面の氷体温度と底面から供 給される地殻熱流量(本研究では50Wm²)を境 界条件として計算を行い,流動速度と温度分布が定 常に達した値を出力する.

先行研究において,流動速度の再現に氷体温度の 実測が重要であることが示唆された²⁰. その結果を



図 22 次元氷河流動モデルの有限要素を示す (Sugiyama et al., 2014より引用). 横軸に氷河最 高標高からの距離, 縦軸に氷河末端からの高度を取 る.

受けて,2014-2015年に氷河表面近傍の氷体温度が 測定された³⁾.本研究では測定された氷体温度を用 いて,氷河流動モデルによる流動速度観測値の再現 性の向上を目指す.

4. 結果

(1) 流動速度

図3に流動速度の観測値を示す.年間流動速度の 平均値はサイト1で0.87ma⁻¹の最小値,サイト3 で19.8ma⁻¹の最大値を取った(図3a).観測期間 中に顕著な経年変化は見られなかったが,2014年 から2016年にかけて僅かな速度減少が見られ,サ イト3では20.2ma⁻¹から19.5ma⁻¹と3.6%減少 した.2012年には夏期の速度上昇が観測され,サ イト3で24.5ma⁻¹と年間流動速度に対して19% の加速を示した(図3b).

(2) 氷河流動数値実験

氷体表面温度の観測値を境界条件として, 流動速 度と温度分布を計算した(実験1)(図4).計算値 は全域で観測値を下回る結果となった.特に中流域 で観測値との差が大きく,サイト3での計算値は, 観測を59%下回る10.0 m a⁻¹であった.氷河底面 の温度は全域で圧力融解点以下を示し,末端で -10.6 ℃の最小値,サイト5 で-4.5 ℃の最大値を 取った.



5. 考察

(1) 流動速度

2015 年と 2016 年には降雪量が少なかったこと に加えて夏の気温が高く,大規模な質量損失が生じ ている 3. 氷河全域の年間質量収支は 2014/15 年に -0.72±0.32 m w.e., 2015/16 年に-0.27±0.31 m w.e.であり³⁾,同期間にカナック氷河の広い範囲で 氷厚が減少したと考えられる. したがって 2014 年 から2016年にかけて観測された年間流動速度の減 少は質量損失によって生じた氷厚減少が原因であ ると考えられる. そこで氷河流動モデルを用いて末 端で2m,最高標高で0mの氷厚減少が生じたと して流動速度の計算を行ったところ、サイト3にお いては 1.3 m の氷厚減少で流動速度が 1 m a⁻¹減少 する結果となった.この実験によって、観測された 流動速度の減少が氷厚減少に起因することが定量 的に示された.また2012年に観測された夏期の速 度上昇については,夏期の激しい融解によって融解 水が氷河底面に潜り込み,その結果上昇した底面水 圧によって底面滑りが加速した可能性が示唆され ている 2), 4). 氷河底面の温度が圧力融解点に達して いない場合,底面滑りは生じないと考えられる.し



図 4 (a) 2012 年夏期流動速度の観測値(○,最 も右がサイト1,左がサイト6),実験1の流動速 度計算値(実線),実験2の流動速度計算値(*, 実線)を示す.(b)実験1の底面温度計算値(実 線),実験2の底面温度計算値(*,実線)を示す.

たがって 2012 年の季節的な速度上昇は,氷河底面 温度が圧力融解点に達していることを示している.

(2)氷河流動モデル

計算された氷河底面の温度は最高で−4.5 ℃と全 域で圧力融解点以下であり、2012 年夏の流動変化 から推定される底面条件と整合的ではない. そこで, 氷体表面温度を変化させて感度実験を行い, 観測値 を再現するための条件を探った. その結果, 氷体表 面温度の観測値から SIGMA-B サイトで 3.5℃, サ イト4で2.5℃高い氷体温度を与えた際に、流動速 度の観測値と良い一致が得られた(実験2)(図 4a,). 温度条件の変化に伴う速度増加はサイト 3 で最大 となり、 10.0 m a^{-1} から 26.7 m a^{-1} であった. さ らに 2012 年夏期の速度上昇が観測されたサイト 2 からサイト4では、氷河底面の温度が圧力融解点以 上を示した(図4b). すなわち, 氷河底面の融解が 観測値を再現する条件であることを示している. こ の結果は、大気や地熱以外の熱源によって氷がより 高い温度に保たれている可能性を示す. 例えば、ク レバスに流入した融解水が氷河内部で再凍結する

北海道の雪氷 No.38 (2019)

Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

ことで、潜熱を放出して氷体温度を上昇させる.また、涵養域において融解水が積雪内に浸透して再凍結しても氷体温度は上昇する⁵⁰.よって氷河の流動 速度を正確に再現するためには、更なる数値実験や 現地観測によって氷河内部の温度構造を明らかに する必要がある.

6. まとめと今後の展望

グリーンランド北西部に位置するカナック氷河 において, 2012-2018 年に継続的な流動速度観測を 行い、数値実験との比較を行った. 夏期流動速度は 2012年に最大で19%の季節的な上昇を示し、底面 水圧上昇による底面滑りの加速が示唆された.年間 流動速度は 2014 年から 2016 年にかけて 3.6 %減 少し,同時期に起きた氷厚減少が原因であることが 示唆された. 2014-2015年に測定された氷河表面近 傍の氷体温度を境界条件として数値実験を行った ところ、観測値を下回る流動速度が得られた.氷体 温度に対する流動速度の感度実験によって,氷河内 部の温度が計算結果よりも高く,底面が融解に達し ていることが示唆された. 融解水がクレバスや積雪 内で再凍結することで発生する潜熱を,数値計算に 取り入れることが重要と考えられる.以上の結果は, 融解水の再凍結によって寒冷・ポリサーマル氷河の 温度構造が変化し、流動速度を変動させることを示 す.よって本研究は、氷河流動機構の理解に加えて、 温暖化傾向にあるグリーンランドにおける氷河変 動の将来予測に重要な知見を与えるものである.

【謝辞】

本研究は,GRENE 北極気候変動研究事業および ArCS 北極域研究推進プロジェクトの一環として実施したものである.

【引用文献】

- Hanna E, Mernild SH, Cappelen J and Steffen K, 2012: Recent warming in Greenland in a long-term instrumental (1881–2012) climate context. I. Evaluation of surface air temperature records, *Environ. Res. Lett.*, 7(4), 045404.
- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S., and Aoki, T. 2014: Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, 55(66), 25-33.
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Aoki, T., and 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(75pt2), 181-192.
- 4) 丸山未妃呂,津滝俊,榊原大貴,澤柿教伸,杉 山慎,2014: グリーンランド北西部カナック氷 帽における質量収支・流動速度・表面高度変化 の観測,北海道の雪氷,33,81-84.
- van Pelt, W. J. J., Oerlemans, J., Reijmer, C. H., Pohjola, V. A., Pettersson, R., and van Angelen, J. H., 2012: Simulating melt, runoff and refreezing on Nordenskiöldbreen, Svalbard, using a coupled snow and energy balance model, *The Cryosphere*, 6, 641-659.