

アラスカ南東部タク氷河が前進から後退に転ずる時期の 氷河末端位置と流動速度の変化

Terminus dynamics of Taku Glacier, Alaska, during the transition from advance to retreat

張 佳晏^{1,2}, 杉山 慎¹, Jason Amundson³, Lynn Kaluziensi³
Arlec Chnag^{1,2}, Shin Sugiyama¹, Jason Amundson³, Lynn Kaluziensi³
arlecchang@lowtem.hokudai.ac.jp (A. Chang)

Taku Glacier in Juneau Icefield, one of a few advancing glaciers in the world, has recently shown retreating signs. To better understand the mechanism of the transition from glacier advance to retreat, we conducted satellite data analyses on the terminus region of Taku Glacier. Terminus delineation revealed retreating glacier front in the eastern side since 1980s, while a shift from advance to retreat in the middle and western sides after 2010s. The surface elevation change showed ice thinning with rates accelerated from 2014–2017 to 2017–2021. Seasonal variations were observed in surface velocities, with a greater magnitude in the west.

1. はじめに

全世界の山岳氷河の質量損失量は、2000–2019年の平均で年間 267 Gt である¹⁾。そのうち、アラスカの氷河が占める割合は約 25 %に上る。アラスカの氷河の約 14 %は海や湖に流入するカービング氷河であり、その変動は気候変動だけに左右されず、Tidewater Glacier Cycle (TGC) と呼ばれる前進と急速な後退からなるサイクルを繰り返す特徴がある²⁾。21 世紀前半、アラスカの他の氷河において質量損失の加速が観測される一方、南東部に位置するタク氷河では唯一 2015 年まで前進が確認されている。しかしながら、近年では氷河末端が後退傾向に転じつつあり注目を集めている³⁾。本研究では、前進から後退に転ずる時期に焦点を当てて、タク氷河の末端位置、標高、流動の変化を、人工衛星データを用いて解明することを目的とする。

2. 研究対象地域

タク氷河はジュノー氷原最大の溢流氷河であり、全長約 55 km、総面積約 700 km²である (図 1)。この氷河は過去に少なくとも計 5 回の TGC が記録されている。直近では 1750 年にタク川をせき止める範囲まで氷河末端が前進し、その後 1890 年までの急速な後退によって長さ約 7 km のフィヨルドが形成された。1890 年以降は 2010 年

代まで継続的な前進が観測されている。

氷河の表面質量収支は、2013 年まで正の値を示した後に負の値に転じており、2013 年から 2018 年の間には、0.8 km³の質量損失が観測された³⁾。加えて 2015 年 7 月と 2018 年 9 月の間に、約 20 m の末端後退が観測され、さらなる後退が予測されている⁷⁾。

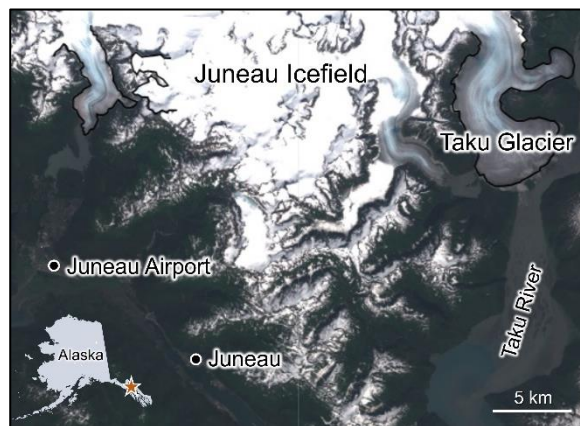


図 1 タク氷河の位置するジュノー氷原南部の人工衛星画像 (Sentinel-2, 2023 年 7 月 7 日撮影)。左下にアラスカ州におけるタク氷河の位置を示す。

3. 研究方法

3. 1. 氷河末端位置

氷河の末端位置は、人工衛星可視画像に Lea ら

¹北海道大学低温科学研究所

²北海道大学環境科学院

³南東アラスカ大学

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environment Science, Hokkaido University
University of Alaska Southeast

(2018) が開発した Google Earth Engine Digitization Tool (GEEDiT) を適用して行った。解析期間は 1984 年から 2023 年であり、使用した衛星画像は Landsat 4, 5, 7, 8, 9 と Sentinel-2、衛星によって異なる解像度は 30–60 m である。1984 年の末端位置を基準にして、氷河面積変化量を氷河幅で除することで、平均的な末端位置移動量を算出した。また、過去の研究 (Ritchie et al., 2008) を参考に、末端部分を東、中央、西の 3 セクションに分けて解析を行った (図 2)。

3. 2. 氷河表面標高

表面標高の解析は、ArcticDEM Strips (解像度 2 m, Polar Geospatial Center よりダウンロード) によって行った⁹⁾。2014 年から 2021 年までの、計 22 の時期の異なるデータセットを用いた。雲の被覆領域を除去した後に、解像度を 10 m にダウンサンプリングし、Nuth and Kääb (2011) の手法に基づき標高値の補正を行った。補正時には ArcticDEM Mosaics を基準標高に用いた⁹⁾。補正後、GIS ソフトウェア (QGIS 3.30.3) を用いて氷河表面標高の変化を計算した。

3. 3. 表面流動速度

表面流動速度は、上述した ArcticDEM Strips の標高データを基に作成した陰影起伏図に、画像相関法を適用して解析した。使用した DEM の解像度は 5 m で、座標軸を UTM Zone 8N に統一してデータ格子点が一致するように調整した。画像相関法の解析には OpenPIV (Particle Image Velocimetry, Liberzon et al., 2020) を使用した。

4. 結果

4. 1. 末端位置の変化

1984 年から 2023 年の期間において、氷河末端位置は全体的に前進傾向を示したものの、末端の各セクションにおける空間的な違いが観察された (図 2)。中央セクションと西セクションでは顕著な前進が観測され、それぞれの平均前進距離は 232 m と 183 m であった。その一方で、東セクションの変化量は -50 m と小さく、最も東側にあたる部分では末端後退が確認された。

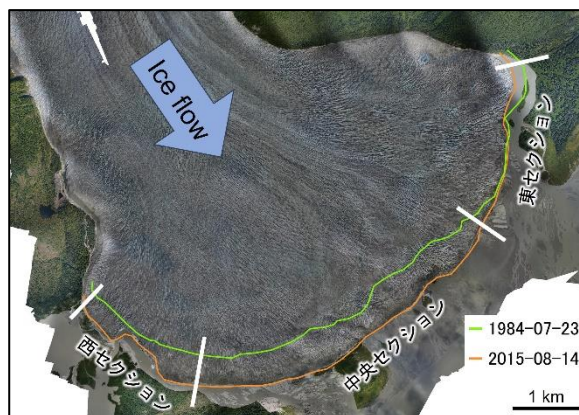


図 2 1984 年 (緑) および 2015 年 (橙) における氷河の末端位置。背景は 2015 年 8 月 2 日に撮影された航空写真によるオルソ画像。

4. 2. 表面標高変化

表面標高は観測期間中に低下傾向を示し、氷厚が減少していることが示された。2014 年 6 月から 2021 年 6 月の標高変化は、測定を行った氷河末端全域において負の値を示した。特に最末端部での変化が最も著しく、西側では最大 30 m の表面低下が観察された (図 3)。また後述する通り、異なる期間における表面標高変化を分析した結果、各末端域で異なる変化パターンが見られた。

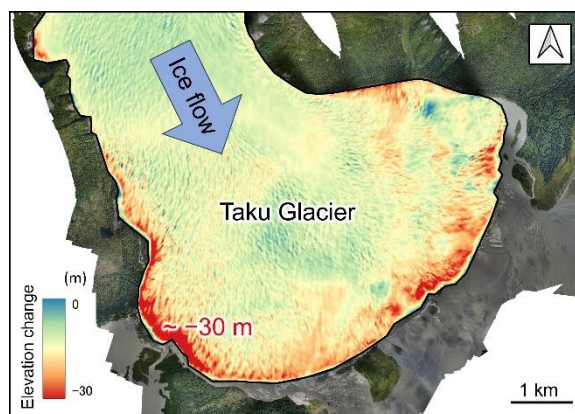


図 3 2014 年 6 月 6 日と 2021 年 6 月 19 日における氷河の表面標高変化。矢印は流動方向を示す。背景は 2015 年 8 月 2 日に撮影された航空写真によるオルソ画像。

4. 3. 表面流動速度

氷河末端域の流動速度場には、非常に大きな季節変化が観察された (図 4)。夏期間では、流動速度は西セクションに向かって加速する一方で東セクション方向には減速する傾向がある (図 4a)。一方冬期間では、西セクションへの流動が減速し、

逆に東セクションでは夏よりも大きな流動速度が認められた (図 4b).

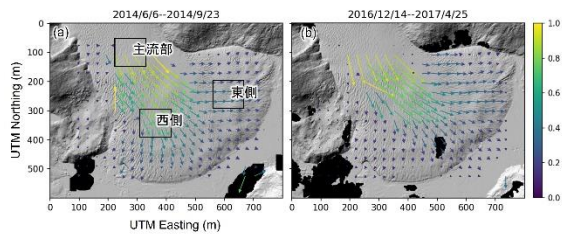


図 4 (a) 夏期間における流動速度 (2014 年 6 月 6 日–2014 年 6 月 23 日). 黒枠は図 7 の平均流動速度の測定範囲を示す. (b) 冬期間における流動速度 (2016 年 12 月 14 日–2017 年 4 月 25 日).

5. 議論

5. 1. 各セクションにおける末端位置の変化

末端位置の変化は 3 つの期間に分けて考察できる (図 5). まず 1984–1998 年では, 西セクションと中央セクションにおいて前進が観察されたが, 東セクションでは顕著な後退があった (1986–1998 年に -217 m). 同期間前後の人工衛星画像 (Landsat 5) を確認すると, 1984 年に東セクションの前縁で湖が形成されていたことが分かった. したがって, 東セクションにおける後退は湖形成によるものだと考えられる. 次に 1998–2015 年では, 氷河末端は全てのセクションで前進を示した. 前進速度は場所によって異なり, 西セクションと東セクションではそれぞれ 5.4 m a⁻¹ と 8.7 m a⁻¹ と小さいが, 中央セクションでは前者と比べて 1.7 から 2.7 倍と大きく, 14.7 m a⁻¹ である. さらに 2015–2023 年には, 全てのセクションにおいて前進傾向から後退傾向に転じた.

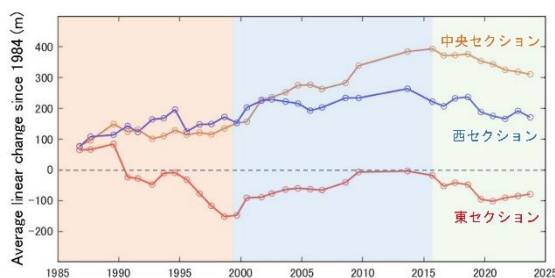


図 5 東 (赤), 西 (青), 中央セクション (橙) における氷河末端位置の平均変化量.

5. 2. 表面標高低下速度の増加

氷河末端が前進から後退に転ずる時期における挙動を明らかにするために, 後退直後 (2014–2017 年) とその後の期間 (2017–2021 年) にお

ける表面標高変化速度を計算した (図 6). 後退直後の変化速度は比較的小さいが, 特に西セクションでは -5 m a⁻¹ と顕著な標高低下が確認された (図 6a). その後の期間では, 氷河末端全域で変化速度率が増加した (図 6b). すなわち, 2017 年以降に表面標高変化率が加速したことが明らかになった.

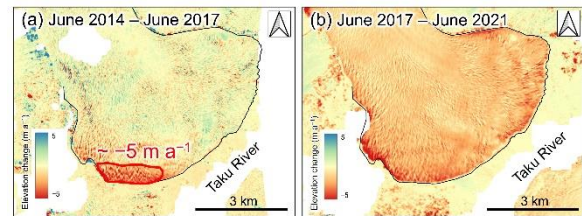


図 6 (a) 氷河が後退に転じた直後 (2014–2017 年) と, (b) その後の期間 (2017–2021 年) における表面標高変化速度.

5. 3. 表面流動速度の季節変動

氷河末端の東側, 西側, および主流部における表面流動速度の変化を比較した結果 (サンプリング箇所は図 4 を参照), 西側ではより顕著な季節変動が認められた (図 7). 西側での流速は, 夏期において最大で 0.73 m d⁻¹ を示し, 冬期において最小で 0.28 m d⁻¹ まで低下した. 西側におけるこの季節変動は, 2016/17 年を除き, 主流部における流動速度の変化と相関を示した. 一方で, 東側では全期間において流動速度の変化が小さく (0.25 m d⁻¹– 0.39 m d⁻¹), 季節変動も不明瞭である.

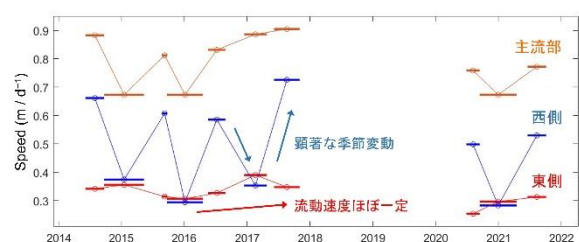


図 7 図 4 に示す東側 (赤), 西側 (青), 主流部 (橙) のサンプリング地点における平均流動速度.

6. まとめ

近年前進から後退傾向に転じたアラスカ・タク氷河において, その末端部を対象として人工衛星データを解析した結果, 以下のことが示された.

(1) 氷河末端は, 中央セクションにおいて 2015 年, 西セクションにおいては 2013 年に最大前進位置を示し, その後は後退に転じた. また東セク

ションにおいては、1980年代に最大前進位置を示し、その後は後退傾向を示した。1984–1998年に東セクションで観測された顕著な後退は、湖の影響と考えられる。(2) 氷河の表面標高は2014年以降全域で低下傾向にあり、その低下速度は2014–2017年から2017–2021年にかけて増加した。

(3) 表面流動速度は西セクションで最も顕著な季節変動が観察され、東セクションでは季節変動は不明瞭であった。

本研究の結果は、タク氷河が後退に転ずるタイミングが氷河末端の各位置によって異なり、氷河湖の形成や流動場の季節変動に影響を受けていることを示唆するものである。

【謝辞】

本研究は、ArCS II 若手人材海外派遣プログラム2023年度第1回派遣支援の助成を受けて実施した。本研究に使用したオルソ画像は、アメリカ地質調査所(USGS)のChristopher McNeilによる解析結果である。

【参考文献】

- 1) Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, Menounos B, Nuth C, Girod L, Farinotti D, Huss M, Dussaillant I, Brun F, Kääb A, 2021: Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature* **592**, 726-731.
- 2) Brinkerhoff, D, Truffer, M, Aschwanden, A, 2017: Sediment transport drives tidewater glacier

periodicity, *Nature Communications* **8**.

- 3) McNeil C, O’Neel S, Loso M, Pelto M, Sass L, Baker EH, Campbell S, 2020: Explaining mass balance and retreat dichotomies at Taku and Lemon Creek Glaciers, Alaska, *Journal of Glaciology* **66**, 530-542.
- 4) Ritchie JB, Lingle CS, Motyka RJ, Truffer M, 2018: Seasonal fluctuations in the advance of a tidewater glacier and potential causes: Hubbard Glacier, Alaska, USA, *Journal of Glaciology* **54**, 401-411.
- 5) Porter, Claire, et al., 2022 : “ArcticDEM – Strips, Version 4.1”, <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>, Harvard Dataverse, V1.
- 6) Porter, Claire, et al., 2023 : “ArcticDEM, Version 4.1”, <https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W>, Harvard Dataverse, V1.
- 7) Zechmann JM, Truffer M, Motyka RJ, Amundson JM, Larsen CF, 2020: Sediment redistribution beneath the terminus of an advancing glacier, Taku Glacier (T’aakú Kwáan Sít’i), Alaska, *Journal of Glaciology*, **67**, 204-218.