

南パタゴニア氷原 Pío XI 氷河における 2018 年以降の末端変動と流動変化

Ice front variations and flow dynamics of Glacier Pío XI, Southern Patagonia Icefield, since 2018

平野 聖晃^{1,2}, 波多 俊太郎³, 杉山 慎^{1,4}

Masaaki Hirano^{1,2}, Hata Shuntaro³ Shin Sugiyama^{1,4}

Corresponding author: Hirano.masaaki.t4@elms.hokudai.ac.jp (M. Hirano)

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国立極地研究所, ⁴北海道大学北極域研究センター

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

³ National Institute of Polar Research, ⁴ Arctic Research Center, Hokkaido University

南パタゴニア氷原の Pío XI 氷河は、周囲の氷河が後退する中で 1945 年以降前進傾向にある。過去の末端前進についていくつかの報告があるが、2018 年以降の末端変動とその要因は明らかでない。そこで、本研究では光学衛星画像を用いて 2018–2025 年の末端変動を測定し、流動速度のデータセットと合わせた解析を行った。その結果、2018–2025 年も前進傾向は継続し、末端位置は 684 m 前進した。2023 年は特異的な流動速度の加速が確認され、期間平均 (510 m a^{-1}) の約 2.7 倍、2022 年の約 4.6 倍 (290 m a^{-1}) である 1350 m a^{-1} を記録した。同期間における末端変動と流動変化について、氷河前縁の堆積物の影響が示唆された。

1. はじめに

パタゴニアは世界の中でも氷河の質量損失が著しく、全球の山岳氷河による海面上昇の約 10% (約 2.5 mm) に相当する¹⁾。南パタゴニア氷原でも多くの氷河が後退・縮小しているが、氷原最大の Pío XI 氷河は、20 世紀中頃以降、顕著な前進傾向を示している²⁾。この特異な前進は気候要因のみでは説明できず、氷河末端消耗と流動の影響が指摘されている²⁾。2000–2018 年において南末端は 1.4 km 前進し、その要因として、末端前縁の堆積物による水中融解とカービングの抑制が指摘されている²⁾。しかし、氷河前縁のほぼ全てが堆積物に覆われた 2018 年以降の氷河変動は十分に明らかになっていない。そこで本研究では、2018–2025 年における Pío XI 氷河南末端の末端位置を人工衛星データを用いて測定し、流動速度のデータセットと合わせて解析することで、堆積物が近年の氷河変動に及ぼした影響を明らかにすることを目的とする。

2. 研究対象地域

南パタゴニア氷原に位置する Pío XI 氷河は南米で最も大きく、その総面積は約 1233 km^2 である。本氷河の末端は南北に分かれ、北側は氷河湖 (Lago Greve)、南側はフィヨルド (Eyre Fjord) に流入するカービング氷河である (図 1)。過去の観測記録によると、1945 年から 1962 年の間に

10 km 以上前進し、2000 年以降も南末端で約 1400 m の前進が確認されるなど、長期的な前進が観測されている³⁾。また、南末端の前縁部では 2010 年代から堆積物の形成が始まり、2019 年には氷河の前縁を覆う規模まで発達したものの、2023 年にはその一部が海面上から見えなくなったことが報告されている⁴⁾。本研究では、前縁に堆積物の形成と消失が生じた南末端領域を主な対象として、末端環境の変化に伴う近年の氷河動態を解析した。

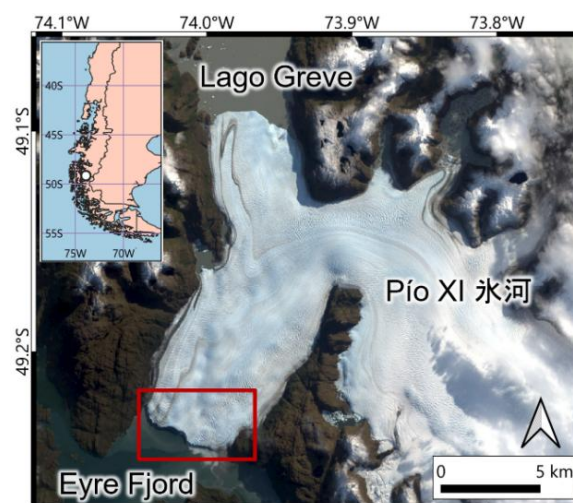


図 1 Pío XI 氷河の光学衛星画像 (Landsat-9, 2026 年 5 月 12 日撮影)。左上に南米大陸における研究対象地 (白丸)、赤枠で氷河の南末端を示す。

3. 研究手法

3. 1 氷河末端位置と堆積物

2018 年 1 月から 2025 年 11 月までの期間に取得された計 68 枚の光学衛星画像を用いて、地理情報システムソフトウェア (QGIS) 上で南末端の変動を目視判別した。本解析には、Landsat-7, 8, 9 (空間分解能 15 m), Sentinel-2 (同 10 m), および PlanetScope (同 3 m) を用いた。氷河末端の面積変化を氷河幅で除して、平均的な前進・後退距離を算出した。また、氷河末端の全幅に対して、氷縁に堆積物が認められる割合を定量化した。

3. 2 氷河流動速度

氷河南末端から上流 35 km までの範囲で、2018 年 1 月から 2025 年 4 月における流動速度を、NASA の ITS_LIVE (Inter-mission Time Series of Land Ice Velocity and Elevation) の月平均データセットを用いて解析した。本データは空間解像度 120 m のグリッドデータで、局所的な異常値を除去するため、窓枠 7×7 ピクセルの Median フィルターを適用した。求めた流動速度場から氷河の中央流線に沿った年平均流動速度と月平均流動速度の空間分布を算出した。

4. 結果

4. 1 末端位置と堆積物の変化

末端位置は、2018 年から 2022 年 10 月までの約 5 年間で 360 m 前進 (約 72 m a^{-1}) した。しかし、2022 年 11 月以降急激な後退に転じ、2023 年 6 月までに約 300 m 後退した (図 2)。その後は季節変動を伴いながら再び前進に転じ、2025 年 11 月までに約 700 m の前進を記録した。この末端位置の変動と連動して、氷河前縁の堆積物および氷河表面にも変化が確認された。2018 年から 2022 年末にかけては、南末端全幅のほぼ 100% で堆積物が確認された。しかし、2022 年 11 月 5 日から 12 月 6 日までの約 1 か月の間に、氷河前縁における堆積物の被覆割合は 20% へと急激に減少した (図 3)。さらに、この堆積物減少が起きた 2022 年 12 月には、氷河末端部において流動方向に直交する横断クレバス (氷の割れ目) の形成が確認された (図 3)。これ以降、氷河前のフィヨルドにはカービングによって分離した多数の氷山が継続的に確認されるようになった。

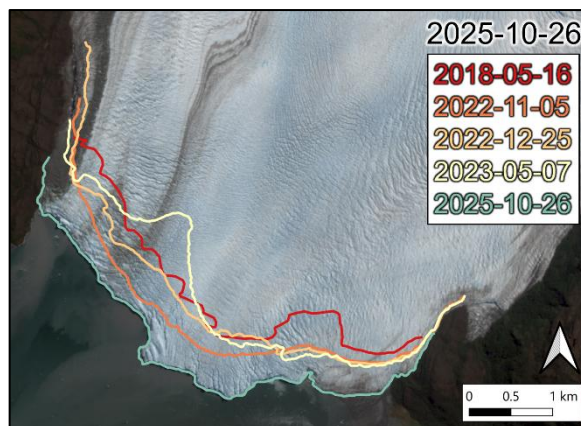


図 2 2018 年から 2025 年における Pio XI 氷河の南末端位置変化。背景は Sentinel-2 画像 (2025 年 10 月 26 日撮影)。

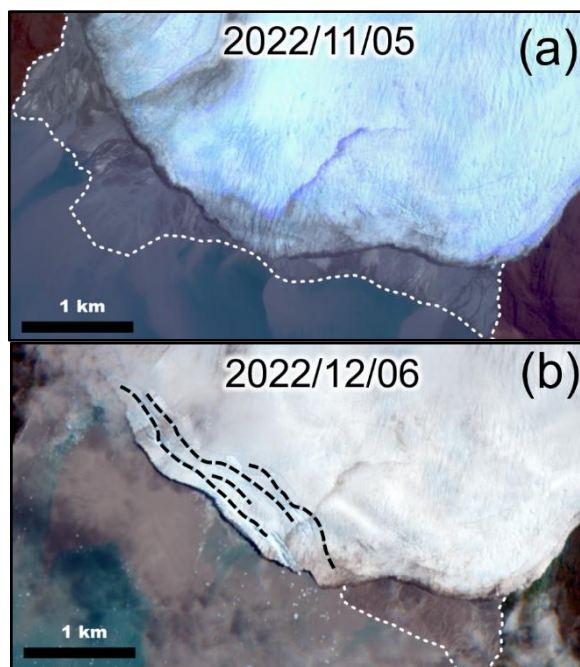


図 3 (a) 氷河南末端の堆積物が急激に減少する前 (PlanetScope, 2022 年 11 月 5 日撮影) と、(b) 減少した後 (Sentinel-2, 2022 年 12 月 6 日撮影) の人工衛星画像に、堆積物の範囲 (白点線) と氷河表面のクレバス (黒点線) を示す。

4. 2 流動速度変化

2018 年から 2025 年までの氷河の中央流線に沿った年平均流動速度の空間分布から、末端部における顕著な速度変化が明らかになった (図 4)。2018 年から 2022 年にかけて、末端から 0–1.5 km における平均流動速度は 308 m a^{-1} であった。しかし、2022 年から 2023 年にかけてその値は約 8

倍の 2518 m a^{-1} に達した. この急激な加速イベントの詳細な推移を捉えるため, 同区間の速度を月ごとに解析した. その結果, 2022 年 11 月までは 500 m a^{-1} 以下であった速度が, 2022 年 12 月から急加速し, 2023 年 8 月には 3580 m a^{-1} に達したことが明らかになった (2022 年 8 月 (308 m a^{-1}) の 10 倍) (図 5). その後流動速度は低下したものの, 2024 年以降は年平均で約 1000 m a^{-1} と加速前よりも大きな速度を維持している (図 4).

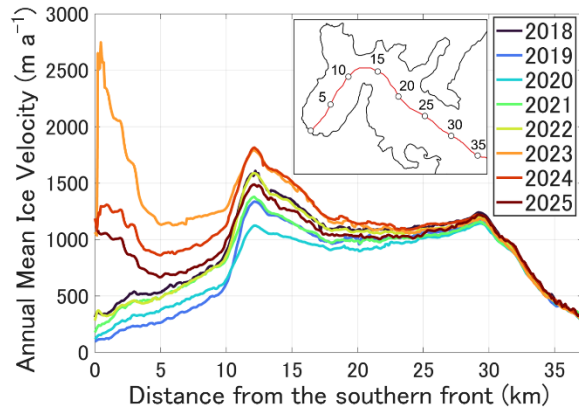


図4 2018 年から 2025 年の氷河の中央流線上の年平均流動速度. 右上図は氷河の中央流線と 5 km 間隔の点を示す.

5. 議論

これらの結果は, 2022 年 12 月に氷河前縁の 80% で堆積物が確認されなくなるとほぼ同時に, 急激な流動加速と末端後退が始まったことを示している. したがって, 堆積物の支持力を失った氷が加速するとともに, 海水にさらされた氷河末端での消耗量が増加し, 半年で 300 m に達する大規模な後退が生じたと考えられる. 一方, 2023 年 6 月以降に末端は再び前進を始めた (図 6). この時期に, 流動速度は前年比で最大約 10 倍という異常な急加速を示している. このことから, 堆積物消失による応力場の変化で氷のフラックスが増加し, 結果として末端での消耗量を氷の供給量が上回った可能性がある. さらに同年 8 月以降は氷河が減速し, 末端への氷の供給量が減少したにもかかわらず, 前進が継続している (図 6). この時期には, 急加速によって押し出された氷河末端が, フィヨルド内の堆積物に再び乗りあげて, カービングが抑制されたと考えられる. これらの観測結果から, Pío XI 氷河南末端の近年の変動は, 「堆積物の消失による末端後退と加速」から「加速に伴う氷供給量の増大による再前進」, そして「堆積物による消耗の減少」という, 堆積物と氷

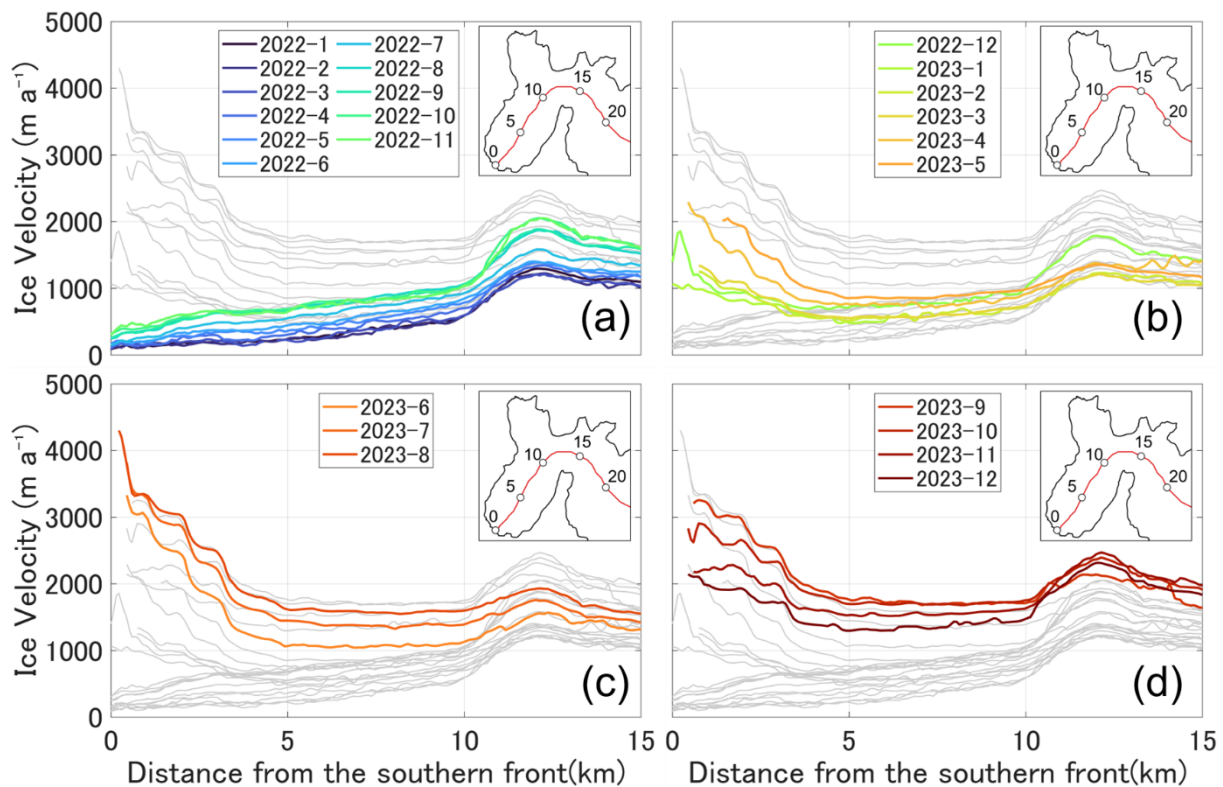


図5 2022 年から 2023 年の氷河の中央流線上の年平均流動速度. それぞれの期間は, (a) 2022 年 1 月-2022 年 11 月. (b) 2022 年 12 月-2023 年 5 月. (c) 2023 年 6 月-2023 年 8 月. (d) 2023 年 9 月-2023 年 12 月.

河の相互作用によって引き起こされたと考えられる。

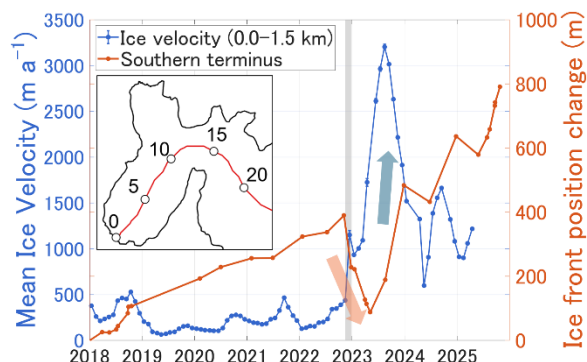


図6 氷河の南末端から上流 1.5 km までの平均流動速度(青), および南末端変動量(橙)の時系列変化. 灰色の縦帯は氷河末端の堆積物が一部消失した時期を示す.

6. まとめ

本研究では, Pío XI 氷河南末端の変動を明らかにするため, 2018–2025 年の人工衛星データを解析した. その結果, 2022 年 11 月から 12 月の約 1 ヶ月間で氷河前縁の堆積物が急減したことに連動し, 末端の急激な後退(半年間で約 300 m)と流動の急加速(前年同月比約 10 倍の最大 3580 m a⁻¹)が生じたことが明らかになった. 一方, 2023 年 6 月以降に末端は再び前進に転じ, 流動加速による氷供給量の増大が要因として挙げられる. その後, 流動が減速に転じた後も前進が継続し, 2025 年 11 月までに約 700 m の再前進を記録した. これらの結果から, 氷河前縁を覆う堆積物の消失による末端後退と急加速が観測された後, 末端が堆積物に乗り上げながら再前進す

るなど, 堆積物の影響を強く受けた氷河変動が明らかになった. 今後は, 流動加速前後における氷河表面の標高および傾斜の変化を解析するとともに, 流動速度場と末端変動から末端消耗量を明らかにすることで, 本仮説の妥当性を検証する.

【謝辞】

本研究は, 日本学術振興会科学研究費助成事業(基盤研究(S), 課題番号 JP25H00452)の助成を受けて実施した.

【参考文献】

- (1) Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., and Zemp, M. (2025): Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2024 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations. *Earth System Science Data*, **17**, 1977–2006.
- (2) Warren, C. R., Rivera, A., and Post, A. (1997): Greatest Holocene advance of glacier Pío XI, Chilean Patagonia: possible causes. *Annals of Glaciology*, **24**, 11–15.
- (3) Hata, S. and S. Sugiyama. (2021): Changes in the Ice-Front Position and Surface Elevation of Glacier Pío XI, an Advancing Calving Glacier in the Southern Patagonia Icefield, From 2000–2018. *Frontiers in Earth Science*, **8**, 576044.
- (4) Piret, L., Bertrand, S., Moffat, C., Feldens, P., Papenmeier, S., and Arz, H. (2024): Recent ice-contact delta formation in front of Pío XI glacier controls sedimentary processes in Eyre Fjord, Patagonia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **49**, 5054–5068.