

パタゴニア南氷原 ピオオンセ 氷河での熱水掘削

Hot-water drilling at Pio XI glacier, the Southern Patagonia Icefield

杉山 慎^{1,2}, 近藤 研³, 張佳晏^{2,4}, 平野聖晃^{2,4}, ラダ カミーロ⁵, サンドバル ポール⁶
マルチネス ナターリア⁵, シェーファー マリウス⁶

Shin Sugiyama^{1,2}, Ken Kondo³, Arlec Chang^{2,4}, Masaaki Hirano^{2,4}, Camilo Rada⁵,
Paul Sandoval-Quilodrán⁶, Natalia Martinez⁵, Marius Schaefer⁶

Corresponding author: sugishin@lowtem.hokudai.ac.jp (S. Sugiyama)

¹北海道大学 北極域研究センター, ²北海道大学 低温科学研究所, ³名古屋大学 環境学研究科, ⁴北海道大学 環境科学院,
⁵Universidad de Magallanes, Chile, ⁶Universidad Austral de Chile

チリ, 南パタゴニア氷原に位置するピオオンセ氷河は, 過去数 10 年にわたり前進傾向にある世界的にも稀な氷河である。氷河の末端付近は流動速度とその変動が大きく, 氷の輸送が特異な氷河変動に主要な役割を果たしていると考えられる。そこでピオオンセ氷河の流動メカニズムを理解するため, 2025 年 12 月に氷河の熱水掘削を実施した。海に流入する南側の氷河末端から 5 km の地点で全層掘削に成功し, 厚さ 450 m の氷の底面水圧を測定したところ, 気温や降水に影響を受けた大きな水圧変化が明らかになった。また水圧の変化に同期して, 短期的な流動加速や日周期変動が観測された。本報告では熱水掘削の概要と初期データを紹介する。

1. はじめに

気候変動の影響を受けて, 世界の山岳域で著しい氷河の縮小が生じている。南米パタゴニアでも急速な氷損失が生じており, 1976~2024 年の単位面積あたりの氷損失速度は $0.68 \text{ m w.e. a}^{-1}$ と見積もられ, この値は同期間で世界最大である¹⁾。特にパタゴニアを特徴づけるカービング氷河が, 大きな氷損失の要因となっている。その中にあって, 南パタゴニア氷原から西側に溢流するピオオンセ氷河では, 20 世紀初頭から前進・拡大傾向が観測されている²⁾。

ピオオンセ氷河の特異な変動傾向の原因として様々な仮説が提唱されているが, 氷河の流動が重要な役割を担っている可能性が高い。氷原から末端域には年間 1 km を超える速度で氷が流入しており, その年々変動, 季節変動は数倍にも達する³⁻⁵⁾。大きな流動速度とその変動の原因として, 底面堆積物, 大量の融解水, 海と湖の影響などが挙げられるが, 現地での観測例は乏しく, 詳しいことは明らかになっていない。

この背景に基づいて私たちは, ピオオンセ氷河の変動と流動のメカニズムを明らかにするため, 2024 年から現地観測を開始した⁶⁾。本研究では, 2025 年 12 月に実施した熱水掘削と掘削孔を用いた観測の概要を報告する。

2. 研究対象地

南パタゴニア氷原の北西部に位置するピオオンセ氷河は, 長さ 70 km, 面積 $1,255 \text{ km}^2$ を覆う南米最大の氷河である⁴⁾ (図 1)。これまで長く前進傾向にあることが知られており, 1926 年の突発的な前進によって氷河末端は南北に分岐し, その後北側は Greve 湖, 南側は Eyre フィヨルドに流入する形で前進を続けている²⁾。現在の氷河末端位置は, 分岐点の北側と南側それぞれ約 6 km および 12 km にある。

2025 年の現地観測では, 南側末端付近で氷河および海洋の調査を実施した。ピオオンセ氷河は複雑なフィヨルドで囲まれており, 物資の輸送には大きな努力を要した。日本から輸送した約 2 t の機材は, 現地で調達した 500 kg の燃料と合わせて, トラック (プンタアレナスからプエルトナタレス), フェリー (プエルトナタレスからプエルトエデン), チャーター船 (プエルトエデンから氷河前停泊地), ヘリコプター (停泊地から氷河) を使って, 2026 年 12 月 4~10 日に輸送された (図 1a, 表 1)。熱水掘削を実施したのは, 南側末端から約 5 km の地点である (49.20°S , 73.98°W)。氷河前のフィヨルドにチャーター船の停泊地を設け (49.23°S , 74.09°W) (図 1c), 掘削地点までの 9 km は, ヘリコプター (Airbus AS350 B2) を用いて人員と物資の輸送を行った。

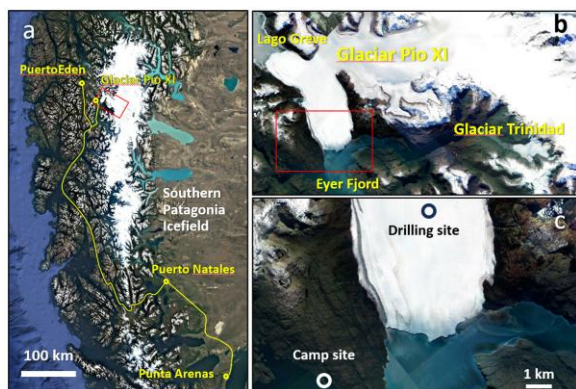


図 1. (a) 南パタゴニア氷原におけるピオオンセ氷河までの移動ルート。(b) ピオオンセ氷河。赤枠は c に拡大した範囲。(c) 南側氷河末端。人工衛星画像は GoogleEarth による。

3. 研究手法

掘削には、北海道大学低温科学研究所で開発した熱水システムを使用した (図 2a)。この装置は過去にスイスや南極で運用の実績があり、2010年にはパタゴニアで初となるアルゼンチンペリートモレノ氷河での掘削に使用された^{7,8)}。高压熱水装置 (Kärcher HDS1000) で生成された熱水は、内径 0.5 インチの高压ホース (ブリジストン WAR08) を介して、長さ 3 m の金属パイプ先端にとりつけたノズルから熱水ジェットとして噴出される。ピオオンセ氷河では、熱水装置 3 台を使用して、80–90℃の熱水を毎分 30 リットルで生成し、直径 3.6 mm のノズル (香取組製作所 K-18) を使って掘削を行った。高压熱水装置は、ガソリン駆動の高压ポンプと、軽油を燃料とするコイル式ヒーターから構成される (図 2b)。装置 3 台の平均燃料消費量は、1 時間あたり軽油 21.9 リットル、ガソリン 7.8 リットルであった。

掘削孔内には、振動弦式の水圧センサ (Geokon, 4500SH) を設置し、氷河上のデータロガー (Campbel, CR1000X) を用いて、氷河底面水圧を 5 分間隔で測定した。また掘削地点に埋設したアルミポールにアンテナを固定して、二周波 GNSS (Global Navigation Satellite System) 受信機 (ENABLER, GEM-5) を連続的に稼働した。記録された GNSS データは単独精密測位法で解析し、15 分毎の流動速度を求めた。氷河付近の気象条件として、ERA5-Land 再解析データを氷河前縁での実測値で校正した気温、および観測地点から約 80 km 離れた Témpanos Fjord で観測された日降水量を解析に使用した。

表 1 輸送と観測活動 (PA: Punta Arenas, PN: Puerto Natales, PE: Puerto Eden, CT: Caleta Tortel)

日付 (2025 年)	活動内容
12 月 4 日	PA⇒PN (トラック等)
12 月 5～6 日	PN⇒PE (フェリー)
12 月 9 日	PE⇒氷河 (チャーター船)
12 月 10 日	氷河上への機材輸送
12 月 11 日	悪天による停滞
12 月 12 日	氷河上で熱水掘削準備
12 月 13～14 日	熱水掘削, 氷河上観測
12 月 15 日	氷河上の機材を撤収
12 月 16～20 日	氷河と海洋での観測
12 月 21～22 日	氷河⇒PE
12 月 23 日	PE⇒CT (チャーター船)
12 月 25～27 日	CT⇒PN (フェリー)
12 月 28 日	PN⇒PA (トラック等)

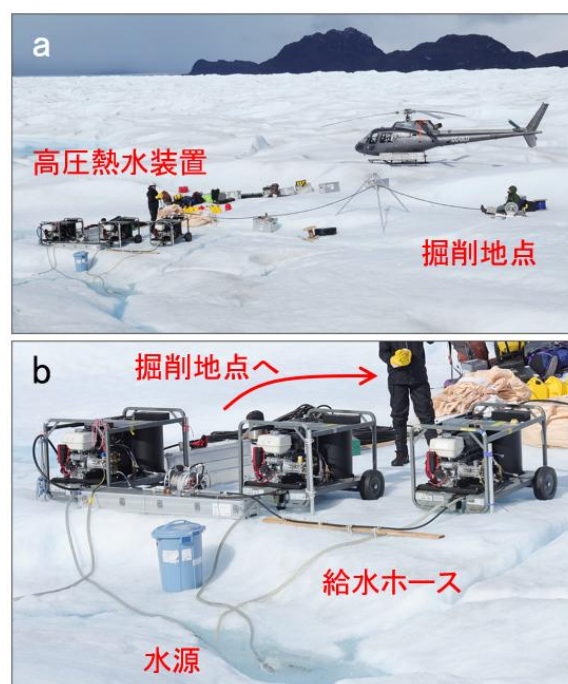


図 2. (a) ピオオンセ氷河における熱水掘削。(b) 高压熱水装置の設置状況。

4. 結果

12 月 12 日に掘削装置のセットアップを行い、13 日に 1 回目の熱水掘削を実施した (掘削孔 1)。7.5 時間で、十分と見込んで接続したホース長を全て使って 397 m を掘削したが、底面に到達しなかった。掘削中、275 m の深さで掘削孔の水位が低下し、氷河内の排水路に接続したと考えられる。

翌 14 日にはホース長を延長して、6 m 離れた地点で 2 回目の掘削を行い、8.5 時間後に 450 m で氷河底面に達した (掘削孔 2)。この掘削では、深さ 419 m で孔内の水位が低下した。二回の掘削における平均掘削速度は 55 m h^{-1} であった (図 3)。

推定よりも厚い氷に対してケーブルが短く、2 本の掘削孔それぞれの深さ 397 m に水圧センサを設置した。いずれのセンサも顕著な水圧変動を示し、孔が氷河排水システムに接続したことが示唆された (図 4b)。しかしながら水圧振動の幅は両者で大きく異なり、12 月 14~21 日における振幅は、掘削孔 2 で 0.1 MPa 程度に対して、掘削孔 1 では約 5 倍大きな変動が測定された。また底面水圧は、掘削地点の氷厚に対する静水圧平衡 (氷の上載圧力に等しい水圧) の 80~90%程度で推移し、水圧の変化に対して流動速度が敏感に影響を受ける状態にあることを示している⁸⁾。

氷河の流動速度は気温と相関した日周期変動を示した (図 4a)。また 12 月 16 日には 25 mm の日降水量と同期して、平均値の約 2 倍まで速度が上昇した。これらの速度変化は、概ね底面水圧の変化と連動している。すなわち、氷河上の融解水や雨水が底面に流入して水圧が上昇し、底面流動が促進されたことを強く示唆するものである。

表 1 掘削孔の諸情報 (標高は楕円体高、氷厚と底面標高は 2~3 m の不確定性を含む)

	掘削孔 1	掘削孔 2
掘削日	12 月 13 日	12 月 14 日
深さ	397 m	450 m
表面標高	265 m	265 m
底面標高	—	-185 m
排水深	275 m	419 m

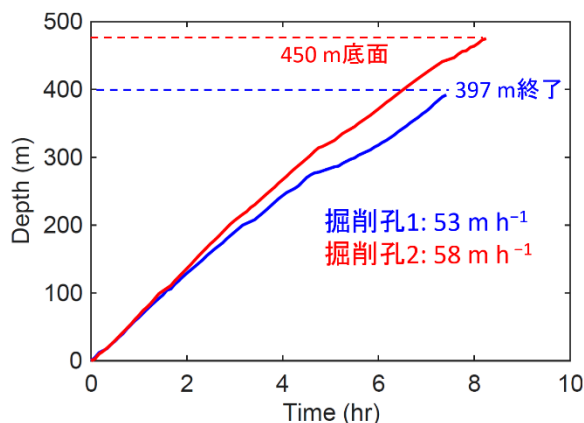


図 3. 熱水掘削の所要時間と掘削深度の関係 (青: 1 回目, 赤: 2 回目)。

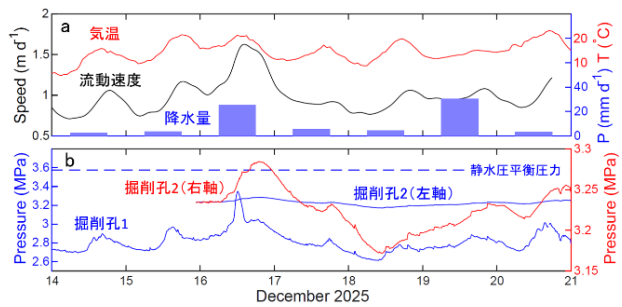


図 4. (a) 流動速度 (黒), 気温 (赤), 日降水量 (青). (b) 掘削孔 1 と 2 で測定した底面水圧 (青は左, 赤は右軸). 青破線は掘削地における静水圧平衡に相当する圧力。

5. 今後の展望とまとめ

氷河を離れた 12 月 21 日以降も測定を継続し、2026 年 3 月 11 日にヘリコプターによる機材回収を行った。その結果、1 月末頃までの有意な流動速度と底面水圧データが得られた。約 1.5 月に渡る流動速度の変化は水圧と高い相関関係を示し、両者の変化は気温と降雨にコントロールされている。またふたつの水圧センサで異なる変動傾向はその後にも維持されており、掘削孔 1 でより大きな水圧変化が得られた。今後はこれらのデータを解析して、水圧と流動速度の関係性、掘削孔による水圧変動の振幅と位相差から、ピオオンセ氷河の流動メカニズムと底面環境の解明を目指す。

本研究では、パタゴニアでは二例目となる熱水掘削と底面水圧の測定に成功した。その結果、研究例の少ないパタゴニアのカービング氷河、特に今も前進傾向にある特異な氷河で、氷河底面環境とその流動への影響を示唆する重要なデータを得た。2024 年と 2025 年に実施した、気象観測、ドローン測量、海洋観測等との結果とも合わせて、ピオオンセ氷河の変動、および海洋との相互作用に関して理解の推進が期待できる。

【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—氷・海/湖・大気・陸の境界に直接観測で迫る—」(25H00452) の下で実施した。現地観測に参加した野村大樹、漢那直也、高野祥太郎、津田裕貴、Nadia Cohen の各氏、パイロットの Pedro Miranda 氏をはじめとするヘリコプターとチャーター船の乗員、および機材輸送で尽力を得た Nicolas Recabarren, Rdorigo Traub, 南雲正寿の各氏に謝意を表する。

【参考文献】

- 1) Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., and Zemp, M. (2015): Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2014 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations. *Earth System Science Data*, **17**, 1977–2006.
- 2) Rivera, A., Aravena, J. C., and Casassa, G. (1997): Recent fluctuations of Glaciar Pio XI Patagonia: discussion of a glacial surge hypothesis. *Mountain Research and Development*, **17**, 309–322
- 3) Wilson, R., Carrión, D., and Rivera, A. (2016): Detailed dynamic, geometric and supraglacial moraine data for Glaciar Pio XI, the only surge-type glacier of the Southern Patagonia Icefield. *Annals of Glaciology*, **57**, 119–130.
- 4) Hata, S. and S. Sugiyama. (2021): Changes in the Ice-Front Position and Surface Elevation of Glaciar Pio XI, an Advancing Calving Glacier in the Southern Patagonia Icefield, From 2000–2018. *Frontiers in Earth Science*, **8**, 576044.
- 5) Hata, S., Kasuya, T., Sato, Y., Schaefer, M., Tabone, I., Sandoval-Quilodran, S., and Sugiyama, S. (2026): Field activities at Glaciar Pio XI, the Southern Patagonia Icefield, in 2024. *Bulletin of Glaciological Research*, **44**.
- 6) 平野聖晃, 波多俊太郎, 杉山慎 (2026) : 南パタゴニア氷原 Pio XI 氷河における 2018 年以降の末端変動と流動変化. 北海道の雪氷, **45**.
- 7) Sugiyama, S., Skvarca, P., Naito, N., Tone, K., Enomoto, H., Shinbori, K., Marinsek, S., and Aniya, M. (2010): Hot-water drilling at Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glaciological Research*, **29**, 27–32.
- 8) Sugiyama, S., Skvarca, P., Naito, N., Enomoto, H., Tsutaki, S., Tone, K., Marinsek, S., and Aniya, M. (2011): Ice speed of a calving glacier modulated by small fluctuations in basal water pressure. *Nature Geoscience*, **4**, 597–600