

マルチビーム・ソナーによるパタゴニア・グレイ氷河末端の水中観測

Multibeam sonar survey of underwater ice at the front of Glaciar Grey in Patagonia

杉山慎¹, 波多俊太郎^{1,2}, 森尚仁³, ポールサンドバル⁴, マリウスシェーファー⁴
Shin Sugiyama¹, Shuntaro Hata^{1,2}, Takami Mori³, Paul Sandoval⁴, Marius Schaefer⁴
Corresponding author: sugishin@lowtem.hokudai.ac.jp (S. Sugiyama)

近年各地のカービング氷河で急激な変動が報告されている。その変動を理解するためには、水中融解やカービング等の氷河末端プロセスの解明が重要である。しかしながら、淡水性カービング氷河での研究が遅れている。そこで本研究では、チリ・パタゴニアで湖に流入するグレイ氷河において、マルチビームソナーを用いた氷河末端水中観測を試みた。2023年3月に4日間にわたる測定を行い、3つに分離した末端それぞれの水中形状と湖底地形のマッピングに成功した。氷河末端の水中形状を解析したところ、湖の深い部分で氷が前方にせり出す傾向にあることが示された。また複数回測定された末端形状の比較から、観測期間中に起きた水中カービングで約 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の氷が失われたことが明らかになった。以上の結果は、淡水性カービング氷河の末端水中形状を初めて直接観測し、カービングと水中融解について重要な示唆を与えるものである。

1. はじめに

気候変動の影響を受けて、世界各地の氷河氷床で質量減少が報告されている。2000年以降に生じた海水準上昇は、その45%が氷河氷床の融解が原因とされており、今後その影響が増加することが予測されている¹⁾。中でも山岳域で特に急激な変化を示しているのが、海や湖に流入するカービング氷河である。また21世紀に入って質量減少が著しいグリーンランド氷床では、海洋性カービング氷河の末端部で氷が急速に失われている。

カービング氷河の変動が激しい理由は、氷河末端のプロセスにある。通常の氷河は降雪と融解のバランスで変動するが、カービング氷河は末端の水中融解とカービング(冰山分離)によっても氷を失う(図1)。末端消耗と呼ばれるこれらのプロセスは、気温上昇以外の要素(水温、基盤地形、氷河流動)に影響を受け、急速な氷河後退の原因となる。特に水中融解の重要性が認識されたのは最近のことで、その理解は遅れている。

氷河末端の直接観測は非常に困難で、水中の氷が直接観測された例は稀である。そんな中グリーンランドでマルチビームソナーが氷河前で運用されて、末端上部が水中で突出する様子が確認された^{2,3)}。この観測結果は、先行研究によって提唱された、氷河底面から湧昇する融解水が海底近くの水融解を促進する⁴⁾、とのメカニズムと整

合的である。オーバーハングした氷は崩れやすくカービングを促進すると考えられるが、これがどの程度普遍的な現象なのか、議論が続いている。

末端消耗に関する研究は、アラスカやグリーンランドの海洋性カービング氷河を中心に進められてきた。それに対して湖に流入する氷河の研究は遅れている。本研究の対象地パタゴニアの他、アラスカ、ニュージーランド、ヒマラヤに数多くの淡水性カービング氷河が分布し、その急激な後退が各地域の氷損失に大きな影響を与えている。したがって、カービング氷河の振る舞いを総合的に理解するためにも、淡水性氷河の末端プロセスの理解が重要となっている。

以上の背景に基づいて我々は、パタゴニアの淡水性カービング氷河で観測を実施している。これまでの研究で、氷河から流出する融解水が湧昇せずに湖底付近に滞留すること⁵⁾、比較的水温が高い湖水面近くで水中融解が進むことなどが明ら

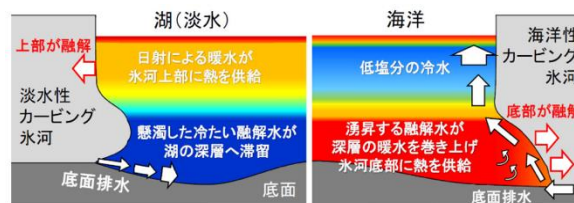


図1 (左) 本研究で注目する淡水性カービング氷河と、(右) 海洋性カービング氷河末端プロセスの比較。

¹北海道大学低温科学研究所

²北海道大学創成研究機構

³株式会社マリン・ワーク・ジャパン

⁴オーストラル大学理学部

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Creative Research Institution, Hokkaido University
Marine Works Japan Ltd.
Faculty of Science, Austral University of Chile

かになった⁶⁾(図1)。しかしながら、特に水深の深い領域の氷河末端形状は明らかになっておらず、水中融解の測定例もない。そこで2023年3月に、パタゴニアのグレイ氷河にて、湖では初めてとなるマルチビームソナーによる観測を実施した。本報ではその概要と結果の一部を紹介する。

2. 研究対象地

観測を行ったのは、南パタゴニア氷原の南東部、チリに位置するグレイ氷河である。氷河は標高60–2360 m a.s.l.に表面積243 km²に渡って広がり、3つに分離した末端はいずれもグレイ湖に流入している(図2)。グレイ湖は長さ16 km、2017年の時点での面積は38 km²、最大深度は410 mである⁷⁾。氷河は観光で賑わうパイネ国立公園にあるため、パタゴニアにおいては比較的アプローチが容易で、宿泊施設やボートなどの施設が得られる利点がある。

我々は2016年からグレイ氷河での現地調査を行っている。これまでに、係留系を使って水温の通年変化を明らかにした他⁷⁾、サイドスキャンソナーによる氷河末端観測に成功している⁹⁾。それらの結果、50–100 m以深は一年を通じて水温が低いため融解が抑制され、氷が湖側に突き出していることが明らかになった。この他、ドイツとチリの研究グループによって、長期の気象観測や流動測定などが報告されている⁸⁾。

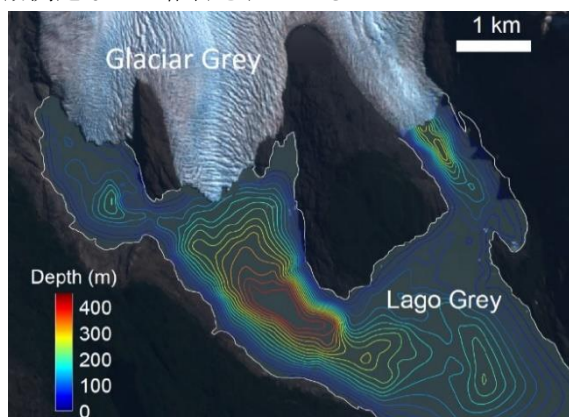


図2 観測を行ったグレイ氷河末端部とグレイ湖。等値線は水深を示す。

表1 使用したマルチビームソナーの諸元

音波の周波数	200, 300, 400 kHz
測定レンジ	最大 550 m
発信ピングレート	最大 50 Hz
スワス角度	最大 170°
ピングあたりの測深点数	最大 512 点

3. 観測手法

2023年3月1–15日にグレイ氷河末端近くの宿泊地に滞在し、湖と氷河で観測を行った。本研究では、比較的コンパクトなマルチビームソナー(KONGSBERG社製, EM2040P)を日本から輸送し、湖水中の氷河末端形状と湖底地形を測定した。最大170°の扇状に512本の音波ビームを射出し、550 mの距離まで測定が可能とされる装置である(表1)。測定深度や必要とされる分解能に応じて、発信周波数を200, 300, 400 kHzから選択する。また氷河末端を測定する場合は、水中の氷にビームが照射されるようにビームの幅と方向を調整した。

観測には、現地で観光に使用されているボート(長さ約5 m、幅約2 m)をチャーターした。金属のパイプやラッシングベルトを使って、ソナー発信器、動揺センサ、GPS等をボートに固定した。観測中はボート上に置いたコントローラーとPCでソナーが制御され、動揺センサとGPSのデータと共に解析された音波反射点の三次元座標がその場でPCに表示される。また、GPSの干渉測位によってソナーデータの精度を向上することを目的に、地上にGPS基準局をおいた。

マルチビームソナーによる測定は、天候とボート稼働スケジュールに合わせて3月4, 5, 11, 14日に延べ20時間実施した。また湖の観測に加えて、氷流動とカービングの測定を目的に、氷河脇にカメラ(Canon 6D Mark II)を4台設置し、末端部を15分間隔で自動撮影した。

4. 結果および議論

4日間の観測によって、東末端にて3回、中央と西末端にて各1回の水中末端観測に成功した。3月11日に測定した中央末端では、深さ約150 mの湖底に接地しており、氷河前縁は水深が大きくなるほど前にせり出す形状が認められた(図3a)。この結果は、湖底付近の冷たい湖水が水中融解を抑制する、との仮説と整合的である。氷と湖底との境界も明瞭に観察され、マルチビームソナーによる水中氷河測定の有用性が確認された。

氷が最も厚い東末端でも、3月4–5日の測定で氷河末端の深部が前にせり出す傾向が確認された。しかしながら3月11日には、氷河中央部の150 m以深で氷が大きくえぐれたオーバーハング形状が確認された(図3b)。自動撮影カメラの写真では、3月7日夜から8日早朝までの間に大

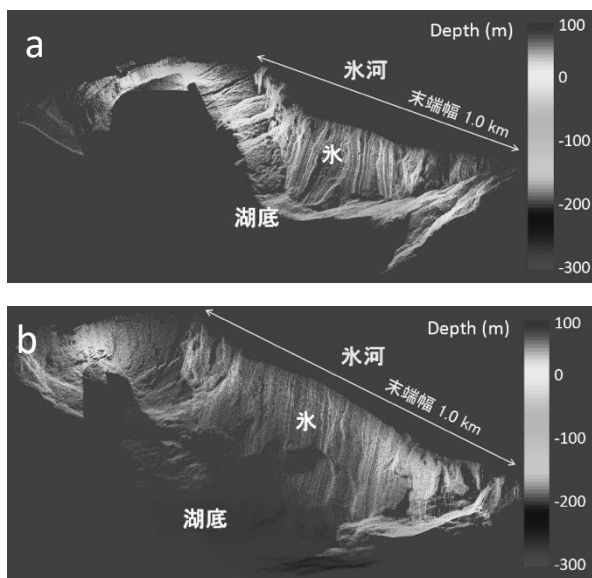


図3 2023年3月11日に測定された、グレイ氷河の(a)中央末端及び(b)東末端における水中氷形状。グレースケールは標高を示す(水面は標高約50 m)。

きなカービングイベントが確認されており、その際に水中で氷が失われたものと考えられる。3月11日と4-5日の氷河末端形状を比較したところ、この間に約 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の氷が分離したことが明らかになった。

この他、氷河近くの湖底をマルチビームソナーで測深し、約 12 km^2 にわたって詳細な底面地形マップを得た(図4)。このデータには、モレーン地形や複雑な基盤構造、堆積地形が確認され、氷河の変動や融解水の流出に関する情報を含むものと考えられる。

5. まとめと今後の展望

本研究では、パタゴニアのグレイ氷河において、淡水性カービング氷河では初めてとなる、マルチビームソナーによる末端水中測定を行った。その結果、氷河末端の詳細な水中形状をマッピングすることに成功した。氷の形状は、湖水温度の分布から予想される水中融解の特徴(水面近くで融解がより大きい)と整合的であった。また、複数回行った測定の比較から、観測期間中に起きた大きな水中カービングについて、氷が分離した場所とカービング量が明らかとなった。これらの成果は、淡水性カービング氷河の末端消耗を理解する上で重要なものである。

より精度の高い氷河形状の解析を目的に、現在ソナーデータの補正、較正、外れ値の除去などを

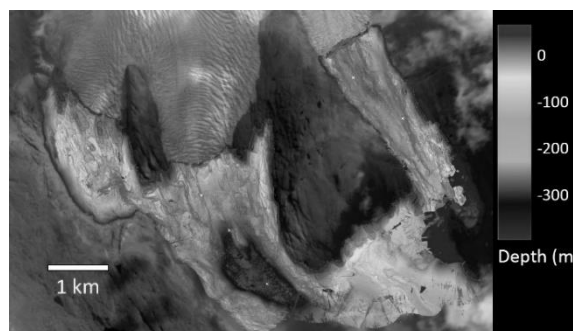


図4 マルチビームソナーで測定された湖底地形。グレースケールは標高を示す。

進めている。今後はカービングが観察されなかった期間の末端形状変化と氷流動速度から水中融解を定量化し、アラスカの海洋性氷河で報告された測定との比較を目指す⁹⁾。さらに湖底の詳細地形を解析し、過去の氷河変動、氷河からの融解水流出、土堆積等のメカニズムを明らかにする。

【謝辞】

グレイ氷河での観測にサポートを得た、アウトドアアクティビティー会社 Bigfoot のメンバー、および Nicolas. R. Traub に謝意を表す。マルチビームソナーの観測には株式会社マリン・ワーク・ジャパンの協力を得た。本研究は、JSPS 科研費基盤研究 A (20H00186) の助成を受けて実施したものである。

【参考文献】

- 1) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- 2) Rignot, E., I. Fenty, Y. Xu, C. Cai, and C. Kemp, 2015: Undercutting of marine-terminating glaciers in West Greenland, *Geophysical Research Letters*, **42**, 5909–5917.
- 3) Fried, M. J., Catania, G. A., Bartholomaeus, T. C., Duncan, D., Davis, M., Stearns, L. A., Nash, J., Shroyer, E. and Sutherland, D. 2015: Distributed subglacial discharge drives significant submarine melt at a Greenland tidewater glacier, *Geophysical Research Letters*, **42**, 9328–9336.
- 4) Motyka, R. J., L. Hunter, K. A. Echelmeyer, and C. Connor, 2003: Submarine melting at the terminus of a temperate tidewater glacier,

- LeConte Glacier, Alaska, U.S.A, *Annals of Glaciology*, **36**, 57–65.
- 5) Sugiyama, S., M. Minowa, D. Sakakibara, P. Skvarca, T. Sawagaki, Y. Ohashi, N. Naito and K. Chikita, 2016: Thermal structure of proglacial lakes in Patagonia. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, **121**, 2270–2286.
- 6) Sugiyama, S., Minowa, M., and Schaefer, M., 2019: Underwater ice terrace observed at the front of Glaciar Grey, a freshwater calving glacier in Patagonia., *Geophysical Research Letters*, **46**, 2602–2609.
- 7) Sugiyama, S., Minowa, M., Fukamachi, Y., Hata, S., Yamamoto, Y., Sauter, T., Schneider, C. and Schaefer, M. 2021: Subglacial discharge controls seasonal variations in the thermal structure of a glacial lake in Patagonia. *Nature Communications*, **12**, 6301.
- 8) Weidemann, S. S., Sauter, T., Malz, P., Jaña, R., Arigony-Neto, J., Casassa, G., and Schneider, C., 2018: Glacier mass changes of lake-terminating Grey and Tyndall Glaciers at the Southern Patagonia Icefield derived from geodetic observations and energy and mass balance modeling. *Frontiers in Earth Science*, **6**:81.
- 9) Sutherland, D. A., Jackson, R. H., Kienholz, C., Amundson, J. M., Dryer, W. P., Duncan, D., Eidam, E. F., Motyka, R. J. and Nash, J. D. 2019: Direct observations of submarine melt and subsurface geometry at a tidewater glacier. *Science*, **365**(6451), 369–374.