

南極ラングホブデ氷河における 2021/22 年の熱水掘削

Hot-water drilling at Langhovde Glacier in Antarctica in 2021/22

杉山 慎¹, 近藤 研^{1,2}, 箕輪 昌紘¹

Shin Sugiyama¹, Ken Kondo^{1,2}, Masahiro Minowa¹

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

南極沿岸部における氷河の底面環境は、氷床ダイナミクスと氷床–海洋相互作用を理解する上で重要である。しかしながら、厚い氷の下での直接観測は困難で、南極における報告例は非常に少ない。そこで掘削孔を使った氷底観測を目的として、2021 年 12 月から翌年 1 月にかけて南極ラングホブデ氷河にて熱水掘削と観測を行った。接地線の上流側と下流側合わせて 3 か所で 5 回の掘削を行い、総延長 2220 m の縦孔を掘ることに成功した。この掘削孔を用いて氷河底面での観測を実施した結果、氷河表面の融解水が底面まで流入していることを示すデータを得た。また氷河底面水圧は海洋潮汐に同期した変動を示し、氷底と海洋が水理的に接続していることが明らかになった。また掘削孔にビデオカメラを挿入して観察したところ、土砂を含んだ底面付近の氷の様子や、接地線のごく近傍にも生態系が存在することが確認された。これらの結果は、南極の溢流氷河底面の水理水文環境と、棚氷下生態系に新しい知見を与えるものである。

1. はじめに

南極氷床の沿岸に分布する溢流氷河は、その底面で生じる速い流れで氷を海洋へと流出し、氷床変動に大きな役割を果たしている。また氷河の末端部に形成される棚氷では、その底面融解と融解水が海洋に与える影響が氷床と海洋の重要な相互作用として注目を浴びている。従って氷河底面環境の理解は、氷のダイナミクスと氷床–海洋相互作用を考える上で重要である。

このような背景の下で筆者らは、東南極に位置するラングホブデ氷河で、熱水掘削による観測を行ってきた。2011/12 年にはこの氷河で初めての全層掘削を行い、接地線近傍で棚氷下の海洋観測に成功した^{1,2)}。2017/18 年には接地線から下流側の広範囲で掘削を行い、棚氷下全域の海水構造と循環を明らかにしている^{3,4)}。

これらの取り組みも含めて、棚氷下の観測は南極各地でいくつか報告されている。しかしながら、接地線より上流側での掘削は例が少なく、氷河底面の水理水文環境や底面流動について、その場観測はほとんど行われていない。そこで 2021/22 年には接地線の上流側、氷が接地する地域での掘削を目指して活動を行った。

2. 研究対象地

ラングホブデ氷河は昭和基地の南方約 20 km (69°12'S, 39°48'E)、氷床からリュツォ・ホル

ム湾に流入する溢流氷河である (図 1)。氷河末端部は幅約 3 km、厚さ約 230 m、流動速度は年間約 120 m a⁻¹、比較的小規模ながら南極沿岸に見られる典型的な溢流氷河といえる⁵⁾。末端から 2–3 km 上流まで棚氷を形成しているが、接地線の位置は定かでなく、地形の影響を受けて複雑に入り組んでいると予想される。過去には筆者らが実

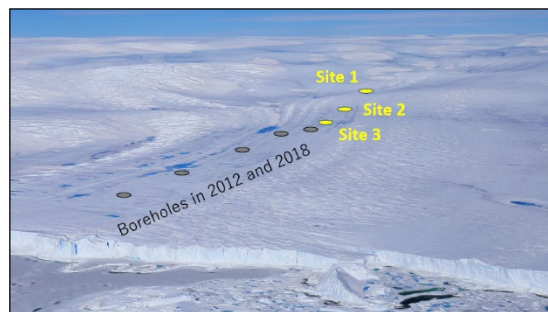
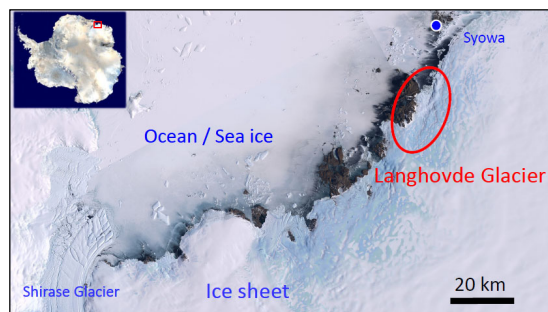


図 1 (上) 南極昭和基地周辺の研究対象地。

(下) ラングホブデ氷河の末端部を内陸側に望む (2021 年 12 月 14 日撮影)。2021/22 年の掘削地点を Site 1–Site 3 で示す。

¹ 北海道大学 低温科学研究所

² 北海道大学 環境科学院

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

施した研究観測の他¹⁻⁶⁾、人工衛星データによる氷河上湖の観測が報告されている⁷⁾。

過去2回の観測では、末端から約3 kmまでの棚氷域で掘削を行っている。本研究ではこれまでよりも上流側、末端から3-4 kmの範囲において3か所(図1下の第1-3掘削地点)で掘削を実施した。2021年12月16日にリュッツォ・ホルム湾に停泊した砕氷船しらせからCH-101型ヘリコプターで氷河脇のキャンプに入り、氷河上の偵察期間を経て12月22日に氷河上に機材と人員を移動、その後1月28日に昭和基地に撤収するまで、約6週間の野外活動を行った。

3. 研究手法

3.1 熱水掘削

掘削には北海道大学低温科学研究所で開発した熱水掘削システムを使用した(図2)。ラングホブデ氷河の他、スイス、パタゴニア、南極半島の氷河で運用実績を持つ装置である。このシステムは、高圧熱水装置(Kärcher HDS1000)から発生する熱水を内径0.5インチの高圧ホースに導き、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を生成する。今回の掘削では熱水装置3台を組み合わせ、直径3.6 mmのノズルから80-90°Cの熱水を毎分30リットルで噴出した。高圧熱水装置には、高圧ポンプとコイル式ヒータそれぞれに軽油とガソリンを使用する。装置3台を稼働した際の燃料消費量は、1時間あたり軽油18.5リットル、ガソリン6.1リットルであ

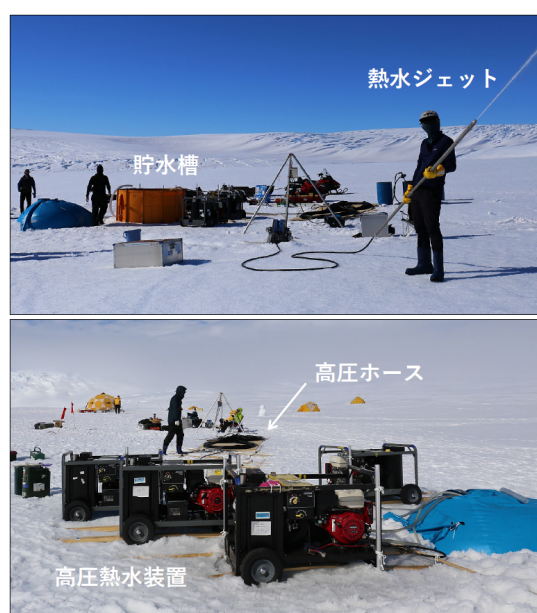


図2 氷河で使用した熱水掘削システム

った。氷河上ではスノーモービルとソリを使って装置を輸送して、3地点での掘削を実施した。

3.2 掘削孔を使った観測

掘削孔を使って氷河底面と内部、棚氷下の観測を行った。掘削孔底部では、振動弦式の水圧センサ(Geokon社製、M4500SH)を設置して底面水圧を測定した。また加速度計と水圧・温度センサを封入した測器を新たに開発し、氷河底面で氷の滑りを観測した⁸⁾。また氷河底面から0, 25, 50, 100, 200, 300, 400 mの位置にサーミスタ(Geokon社製、M3810-2)を設置して氷温を測定した。さらに深度2 mと200 mには、地震計(Lennartz社製、LE-3D)と方位傾斜計を内蔵した装置を設置した。その他、耐圧容器に封入したビデオカメラ(HX-A1H)をケブラーロープで吊り下げて孔内を観察した他、水温・塩分・深度プロファイラー(IDRONAUT社製、OceanSeven304)を使って孔内と棚氷下の水質特性を測定した。

4. 結果

4.1 第1掘削地点

活動期間中に3地点で5回の掘削を行い、深さ200-551 m、総長2220 mに及ぶ掘削に成功した。掘削装置の稼働時間は68.7時間、再掘削等の時間を除いた実質的な掘削時間は60.3時間、平均掘削速度は毎時40 m hr⁻¹であった(図3)。

第1掘削地点では、12月24日に200 mの掘削を行って地震計を設置した後、1月6日にかけて551 mの全層掘削を2回実施した。孔内では、底面に近づくにつれて氷中に堆積物が増える様子が観察された。氷河底面には堆積物が存在するものの、その層厚は比較的薄い様子である。また約500 mの深さを掘削中に孔内の水位が急激に低下した。カメラによる孔内の観察では、概ね同じ

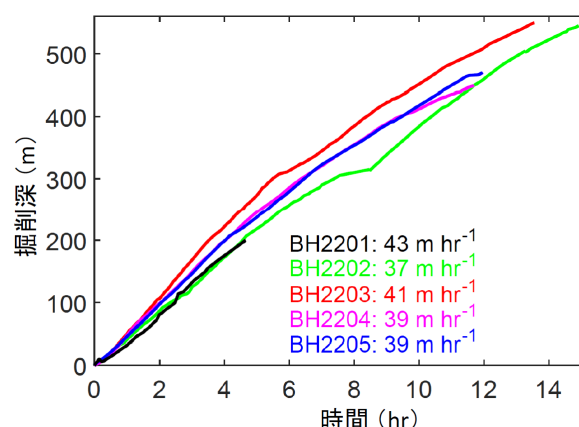


図3 熱水掘削の深さと要した時間

表 1 各掘削地点における氷厚、表面標高、海底標高

掘削地点	第 1 掘削地点	第 2 掘削地点	第 3 掘削地点
掘削孔	BH2203	BH2204	BH2205
掘削日	2022/01/06	2022/01/14	2022/01/22-23
氷厚 (m)	551	455	478
表面標高 (m a.s.l.)	115.2	61.1	79.4
海底標高 (m a.s.l.)	-436	-394	-399

深さに氷の割れ目が観測され、これが水路となって氷河底面へと排水したとみられる。

底面に達する掘削孔 2 本にはそれぞれ、底面滑り観測器、および水圧計とサーミスターを設置した。これらの測器によって測定された底面水圧は、氷の上載荷重に対して 80%以上に達しており、顕著な時間変動を示した。特に 1 月 2-4 日には水位に換算して 20 m の圧力上昇がみられた。この時期に氷河上では、降雨と融解水がクレバスに流れ込む様子が観察されており、氷河表面の水が底面まで達していたと推定される。また 1 月 14 日以降は振幅 1-2 m の周期的な圧力変動を示し、昭和基地で測定された潮汐と同期していることが確認された。すなわち、氷河底面が海洋と水理的に接続していることが明らかとなった。

4. 2 第 2 および第 3 掘削地点

1 月 14 日に掘削した第 2 掘削地点では、厚さ 455 m の氷の下に約 5 m の海水層、1 月 22-23 日に掘削した第 3 掘削地点では厚さ 478 m の氷の下に 2 m の海水層がそれぞれ確認された(表 1)。これらの地点は平坦な氷河末端部に対して、内陸に向けて表面が傾斜しており、氷は接地しているものと推定していた。実際のところ、海水面下の氷に作用する浮力は氷に加わる重力よりも顕著に小さく、静水圧平衡を満たしていない。すなわち、周辺の氷との力学的な相互作用の結果として、海底から”持ち上げられている”と考えられる。

第 3 掘削地点で掘削孔にビデオカメラを挿入したところ、氷河下の深さ 2 m の海底に生物が見出された。枝をもったサンゴ状の生物や、イソギンチャクと思われる色鮮やかな生物が、海底堆積物や岩の上に付着しており、接地線のごく近傍まで生態系が広がっていることを示している。近年南極の各地で報告されている棚氷下の生態系に関して⁹⁾、新しい事例を与えるものである。

また底生生物が豊富に生息している状況から、

棚氷の接地線のごく近傍では、土砂の堆積速度は遅いと推測される。海水温度は凍結温度に近く、これまでに棚氷のより海に近い地点で測定された水温よりも低い。すなわち、この地点までは海洋の熱が届かず、棚氷底面の融解が比較的遅いことが示唆された。

5. まとめ

本研究では南極ラングホブデ氷河において、接地線上流側、および接地線に極めて近い下流側の掘削を行った。その結果 3 地点で全層掘削 4 本を含む 5 本の熱水掘削に成功した。氷河底面で測定した水圧は、氷河上クレバスへの融解水の流入に伴って大きく上昇した。また海洋潮汐と同期した水圧変動が測定された。これらの観測結果は、氷河表面から底面への融解水の流入、底面と海洋との水理的接続を示すものである。また接地線近傍の棚氷側では海底に各種の生物が観察され、接地線の際まで生態系が広がっていることが明らかになった。さらに、これらの掘削によって判明した氷河形状は、接地線付近の氷が静水圧平衡から大きく外れていることを示した。

以上の成果は、南極の溢流氷河底面の水理水文環境に対して新しい知見を与え、棚氷下海洋の生態系、接地線近傍の氷河地形について理解を推し進めるものである。

【謝辞】

本研究は南極地域観測第 9 期重点研究観測「氷床・海水縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」の一部として、第 63 次日本南極地域観測隊の夏期オペレーションとして実施した。また科研費新学術領域研究「熱-水-物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」(17H06316) および基盤研究 A「カービング氷河の末端プロセスと変動メカニズム ―湖と海で何が違うのか―」(20H00186) の助成を

得た。青木茂氏, 田村岳史氏, 川村賢二氏ら研究プロジェクト関係者の協力, 渡部陽氏, 久保木学氏を中心とした観測隊メンバーによる野外活動へのサポート, しらせ飛行科によるヘリコプター輸送支援に謝意を表する。

【参考文献】

- 1) Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda and S. Aoki. 2014: Active water exchange and life near the grounding line of an Antarctic outlet glacier. *Earth and Planetary Science Letters*, **399C**, 52–60.
- 2) 杉山慎, 澤柿教伸, 福田武博, 2012: 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削, 北海道の雪氷, **31**, 89–92.
- 3) Minowa, M., S. Sugiyama, M. Ito, S. Yamane and S. Aoki. 2021: Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica. *Nature Communications*, **12**, 3929.
- 4) 杉山慎, 箕輪昌紘, 山根志織, 伊藤優人, 2018: 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削, 北海道の雪氷, **37**, 7–10.
- 5) Fukuda, T., S. Sugiyama, T. Sawagaki and K. Nakamura. 2014: Recent variations in the terminus position, ice velocity and surface elevation of Langhovde Glacier, East Antarctica. *Antarctic Science*, **326(6)**, 636–645.
- 6) Minowa, M., E. A. Podolskiy and S. Sugiyama. 2019: Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica. *Annals of Glaciology*, **60(79)**, 57–67.
- 7) Langley, E. S., A. A. Leeson, C. R. Stokes and S. S. R. Jamieson, 2016: Seasonal evolution of supraglacial lakes on an East Antarctic outlet glacier. *Geophysical Research Letters*, **43**, 8563–8571.
- 8) 近藤研, 杉山慎, 箕輪昌紘, 2022: 東南極ラングホブデ氷河における底面滑りの直接観測, 北海道の雪氷, **41**.
- 9) Griffiths, H. J., P. Anker, K. Linse, J. Maxwell, A. L. Post, C. Stevens, S. Tulaczyk and J. A. Smith, 2021: Breaking all the rules: The first recorded hard substrate sessile benthic community far beneath an Antarctic ice shelf. *Frontiers in Marine Science*, **8**:642040.