

南極半島リビングストーン島における氷河熱水掘削 Hot water drilling at glaciers on Livingston Island, Antarctic Peninsula

杉山慎 (北大低温科学研究所), ナヴァロ・フランシスコ (マドリッド工科大),
澤柿教伸 (法政大社会学部), 瀬川高弘 (極地研新領域融合研究センター),
大沼友貴彦 (千葉大理学), ヴァシレンコ・エヴゲニ (ウズベキスタン科学アカデミー)
Shin Sugiyama, Francisco Navarro, Takanobu Sawagaki, Takahiro Segawa,
Yukihiko Onuma and Evgeny Vasilenko

1. 研究の背景

南極半島では大規模な棚氷が崩壊し、多くの氷河が後退傾向を示すなど、氷河氷床の大きな変動が観測されている。この地域で起きている急激な温暖化がその主要因と考えられるが¹⁾、長期にわたる観測データは不足しており、氷河氷床変動の詳細とそのメカニズムは明らかでない。たとえば気温上昇によって、雪氷融解の促進とともに降雪量の増加が予想されるが、南極半島における質量収支の長期データは非常に少ない。また南極にあって比較的気温の高い同地域では、氷河底面の水理環境や、その変化が底面流動に与える影響が重要と考えられるが、それらの検討は進んでいない。

南極半島北端に位置するリビングストーン島では、スペインの Juan Carlos I 世基地を拠点として氷河観測が行われている。1995 年に Johnsons 氷河で始まった質量収支観測は、2001 年から Hurd 氷河を含む領域に拡張された。過去 10 年の質量収支は質量損失の速度が低下していることを示しており²⁾、温暖化が進行する同地域の氷河変動データとして興味深い。そのほか、氷レーダによる氷厚測定³⁾、衛星データを使った氷帽全域での流動速測定も行われている⁴⁾。Juan Carlos I 世基地では長期にわたる気象観測が継続されており、氷河研究の分野では南極半島にあって貴重な研究地である。

本研究では、リビングストーン島で研究を進めるスペインの研究者と協力して、Johnsons 氷河と Hurd 氷河において熱水掘削を実施した。氷河底面水圧を測定し、その変動と氷流動への影響を明らかにすることが主目的である。また掘削孔を使って、氷の温度測定、氷河底面堆積物のサンプリングを実施した。同地域で過去に行われた研究と連携して、南極半島における氷河の底面環境および氷河変動のメカニズムの理解を目指すものである。

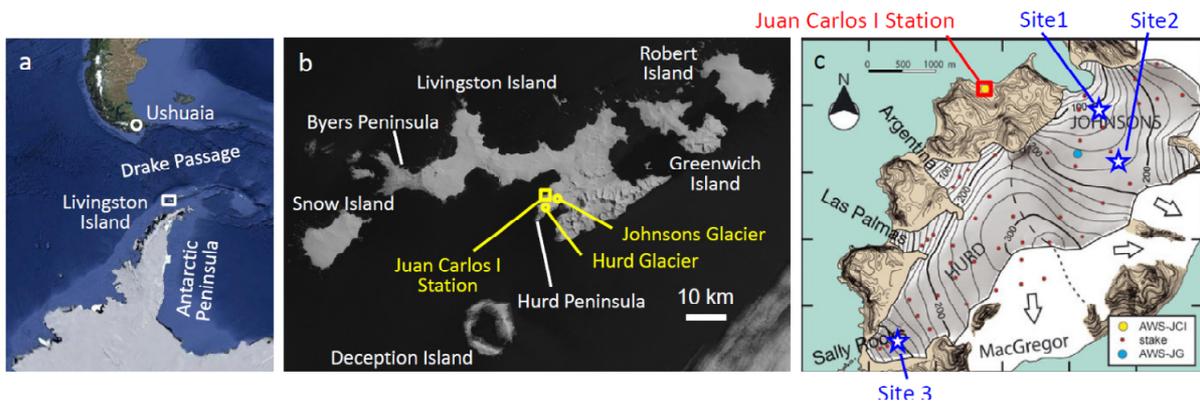


図 1 (a) 南極半島リビングストーン島の位置。(b) リビングストーン島周辺の Landsat 画像 (2014 年 1 月 16 日撮影)。(c) Johnsons 氷河および Hurd 氷河の掘削地点。

2. 研究対象地

リビングストーン島 (62.6° S, 60.4° W) は南シェトランド諸島に属し、全面積 (974 km²) の約 70% が氷に覆われている (図 1). 観測活動は、島の中心部に位置する Johnsons 氷河 (5.36 km²) と Hurd 氷河 (4.03 km²) で行った. Johnsons 氷河は末端がわずかに海に接するカービング氷河で、末端から約 400 m (Site 1) と、さらに上流約 800 m (Site 2) で掘削を実施した. Hurd 氷河では、陸上にある末端から約 500 m の地点 (Site 3) を掘削した. いずれの掘削地も Juan Carlos I 世基地から 5 km 以内に位置し、徒歩、スノーモービル、ボートによって輸送と移動を行った.

3. 熱水掘削

掘削には北大低温研で開発した熱水掘削システムを使用した⁵⁾. システムは高圧熱水装置、高圧ホース、掘削ノズル、三脚、貯水槽などから構成され、約 150 m の氷厚が見込まれる本掘削では 2 台の熱水装置を用いた (図 2). 2014/15 年の夏シーズン、リビングストーン島の氷帽は低標高域まで数 m の積雪で覆われ、掘削に必要な水の確保に苦労した. 検討の末、容器に詰めた水をスノーモービルで輸送して、掘削地点の貯水槽に必要量を確保した. 融解の進む 1 月後半には積雪層の下から流水を、また状況が許せば掘削中に孔からあふれる水をポンプで汲み上げて利用した. 約 150 m の掘削に必要な水はおよそ 5,000 L である.

2015 年 1 月 12–30 日に、Site 1 と Site 2 で各 2 本、Site 3 で 1 本の掘削に成功した. Site 1 では厚さ約 140 m、Site 2 では約 150 m の氷を全層掘削し、氷河上層の温度測定を目的とする Site 3 では深さ 70 m で掘削を終了した (表 1). 合計 5 本、総延長 650 m の掘削に要した時間は 10.5 時間である (平均 62 m h⁻¹). ヒーターとポンプの燃料として、合計 213 L (20 L h⁻¹) の軽油と 36 L (3.4 L h⁻¹) のガソリンを消費した.

4. 掘削孔を使った観測

掘削後、孔内の様子を掘削孔カメラ (Raax SC-200) によって観察した (図 3). 掘削孔底部は懸濁しており、氷河底面には堆積物層が存在すると考えられる. 氷河底面まで掘削しなかった Site 3 でも孔内の懸濁が確認され、氷河内部に火山灰層が含まれているためと思われる.

Site 1 と Site 2 では、各地点 1 本の掘削孔に水圧センサ (Geokon M4500S) を設置し、氷河上に導いたケーブルに接続したデータロガー (Campbell CR1000) で底面水圧を連続測定した. Site 1 の底面水圧は、掘削後しばらくの間高く一定の値を示したが、1 月 29 日から 30 日にかけて急激に低下し (掘削孔水位に換算して 50 m 以上)、以降複雑な変動を示した (図 4). Site 2 でもほぼ同時期にゆっくりと水圧の低下が始まった. この結果は、Johnsons 氷河の底面に排水システムが存在することを示すものである. 一方、GPS (GNSS Technology GEM-1)



図 2 Site 2 における熱水掘削

表 1 各掘削孔の深さ，掘削に要した時間，燃料と水の消費量

掘削地点	掘削孔	深さ (m)	時間 (min)	軽油 (L)	ガソリン(L)	水 (L)
Site 1	BH1	139	104	50	8.0	3,120
	BH2	138	193	62	10.0	5,790
Site 2	BH3	153	166	50	8.5	4,980
	BH4	152	133	36	7.5	3,990
Site3	BH5	70	38	15	2.0	1,140
Total		652	10 h 34 min	213	36.0	19,020

で連続測定した氷の流動速度は，水位が低下した時期に加速イベントを記録した．以上の観測は，底面水圧の変化が底面流動をコントロールするとともに，流動変化が底面水理環境に与える影響を示唆している．このような観測結果は，南極半島では始めてとなるものである．

Site 1 と Site 2 の他の掘削孔では，新規に開発した紫外線殺菌装置による孔内殺菌，底面堆積物のサンプリングと採水を行った．掘削によって汚染された孔内の水を殺菌した後に堆積物を採取することで，氷底での生物活動を調査する試みである．採取された堆積物と水サンプルを持ち帰って分析し，生物活動の有無と殺菌装置の性能を確認する．

サンプリング作業を終えた掘削孔には，深さ 25 m 間隔でサーミスタ (Geokon M3810) を配置し，氷の温度測定を開始した．孔が閉じて掘削の熱的影響が除かれる次シーズン以降に正確な温度が測定される見込みである．Site 3 の掘削孔には，深さ方向により高い分解能を持つサーミスタチェーンを設置した．

5. まとめ

本研究では，氷河底面における水理環境と生物活動の調査，氷河内部の温度分布測定を目的に，南極半島北部に位置するリビングストーン島において熱水掘削を行った．同地域における氷河底面探査は初めての試みである．研究活動は Juan Carlos I 世基地をベースにして，スペインの研究者と共同で実施した．

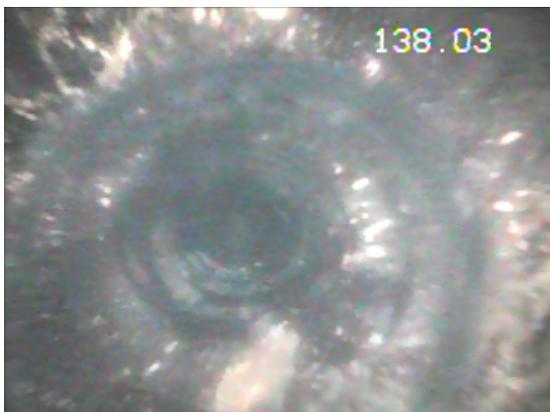


図 3 Site 2 の掘削孔深さ 138 m における掘削孔カメラ画像

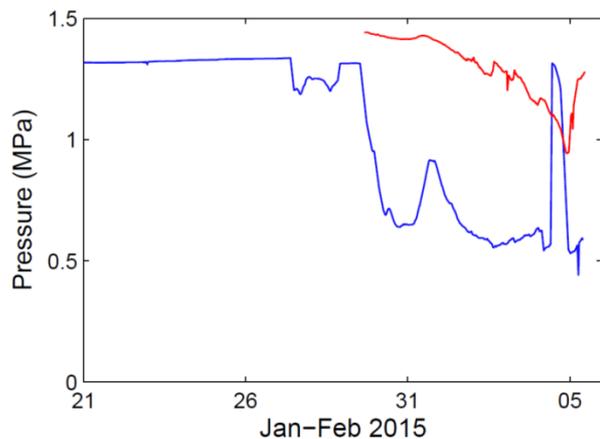


図 4 Site 1 と Site 2 における底面水圧変化

2015年1月, Johnsons 氷河の2地点および Hurd 氷河の1地点において合計5本の掘削に成功した. 掘削の総延長は652 m, 平均掘削速度 62 m h^{-1} , 燃料の消費速度は經由 20 L h^{-1} , ガソリン 3.4 L h^{-1} である. 掘削孔には底面水圧測定用の水圧センサ, および氷温測定用のサーミスタチェーンを設置した他, 底面堆積物と水のサンプリングを行った. またサンプリングに先立っては, 紫外線による孔内殺菌を試行した.

底面水圧は1月29日以降複雑な変動を示し, 南極半島の氷河底面に排水システムが存在することが初めて確認された. またこの水圧変化と同時に, 氷河流動が短期変動を示し, 両者の関係性が強く示唆された. 採取されたサンプルは現在日本に持ち帰って分析中である. また2015/16シーズンには氷温測定と流動測定を目的に, 再度リビングストーン島での観測を予定している.

【参考・引用文献】

- 1) Cook, A. J., A. J. Fox, D. G. Vaughan and J. G. Ferrigno, 2013 : Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. *Science*, **308**, 541–544.
- 2) Navarro, F. J., U. Y. Jonsell, M. I. Corcuera, A. Martin-Espanol, 2013 : Decelerated mass loss of Hurd and Johnsons Glaciers, Livingston Island, Antarctic Peninsula. *J. Glaciol.*, **59**(213), 115–128.
- 3) Navarro, F. J., J. Otero, Y. Y. Macheret, E. V. Vasilenko, J. J. Lapazaran, 2009 : Radioglaciological studies on Hurd Peninsula glaciers, Livingston Island, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **50**(51), 17–24.
- 4) Osmanoglu, B., F. J. Navarro, R. Hock, M. Braun, and M. I. Corcuera, 2014 : Surface velocity and mass balance of Livingston Island ice cap, Antarctica. *Cryosphere*, **8**, 1807–1823.
- 5) Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, K. Tone, H. Enomoto, K. Shinbori, S. Marinsek and M. Aniya, 2010: Hot-water drilling at Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glaciological Research*, **28**, 27–32.

【謝辞】

スペイン観測隊リーダーの Jordi Felipe, および Juan Carlos I 世基地メンバーの支援に感謝する. 掘削・観測装置の開発に北大低温研技術部の新堀氏と森氏の協力を, また南極渡航手続きには石崎氏, 樋口氏ら国立極地研究所の協力を得た. 本研究はスペイン研究開発助成 (CTM2011 - 28980), および研究科研費(基盤研究 B23403006)の助成を受けて実施した.