

## 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削 Hot water drilling at the Langhovde Glacier, Antarctica

杉山慎（北海道大学低温科学研究所），澤柿教伸（北海道大学地球環境科学研究所），  
福田武博（北海道大学低温科学研究所・環境科学院）  
Shin Sugiyama, Takanobu Sawagaki, Takehiro Fukuda

### 1. はじめに

南極氷床の沿岸では，氷河（氷流）が海洋に流れ込んで棚氷を形成する．棚氷はカービングによって氷を流出し，またその底面が海水によって融解するため，氷床の質量変動に重要な役割を担っている．特に最近では，氷河の流動加速によって海洋への氷フラックスが増加し，南極氷床の質量が減少傾向にあるとの指摘がなされている<sup>1)</sup>．流動加速の原因としては，海洋の温暖化に起因する棚氷の縮小，崩壊が挙げられており，氷床と海洋の相互作用の解明が急務となっている．しかしながら，棚氷の底面融解，棚氷下の海水特性や循環，接地線（棚氷と接地氷床の境界）位置など，課題の解決に必要な情報は氷の底面下でしか観測できない．そのため，氷床と海洋の界面プロセスに関わる直接的データはほとんど得られていない．

以上のような背景に基づいて我々は，南極ラングホブデ氷河の接地線付近を熱水掘削し，掘削孔を用いて氷河の底面観測を行った．熱水掘削による南極氷床の底面観測は，日本の南極観測では初めて，世界でも実施例が限られる挑戦的な試みである．本稿では，熱水掘削システムについて紹介した後，観測地と野外活動の概要，および熱水掘削の結果について報告する．

### 2. 熱水掘削システム

熱水掘削とは，ホースで導いた熱水ジェットで氷を融かしながら掘り進む氷河・氷床の掘削手法である（図 1a）．毎時数 10 m という比較的大きな掘削速度が得られるため，氷河の内部や底面観測に必要な縦孔を設けるには最適な手法である．比較的安価で操作の容易な機器で構成されるという利点に加えて，設営が簡単なため移動しながら多点で掘削する目的にも適している．

北大低温科学研究所では 2007 年から熱水掘削システムの開発に着手し<sup>2)</sup>，スイスやパタゴニアの山岳氷河で成果を挙げてきた<sup>3,4)</sup>．ラングホブデ氷河で使用したシステム

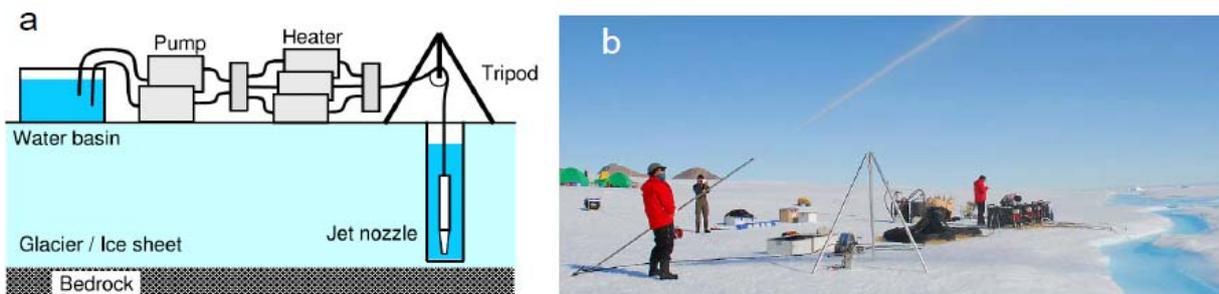


図-1 (a) 熱水掘削の概念図。(b) ラングホブデ氷河の第 1 掘削地点に設置された熱水掘削システム。写真右側の水路より融解水を汲み上げて、中央上方の熱水ジェットとして噴射する。

は、高圧ポンプとボイラーを備えた高圧熱水装置 (Kärcher 社 HDS1000BE) 3 台, 総長 750 m の高圧ホース (ブリジストン社 WAR08, 内径 12.7 mm), 低温科学研究所にて製作した掘削システム (ステンレスパイプを加工, ノズル直径 3.6 mm) によって構成される (図 1b). このシステムで毎分 30 リットル, 90°C 以上の熱水ジェットを吐出する. 100 m 程度の掘削であれば三脚と滑車でホースを操作するが, 氷の厚いラングホブデ氷河ではウィンチを使用した. 氷河上に十分な流水があればそれを直接吸い上げ, 流量が少ない場合には 2000 リットルの水槽にポンプアップしたものを水源とする.

### 3. 観測地と野外活動の概要

ラングホブデ氷河は南極昭和基地の南方約 20 km に位置し, 宗谷海岸に流れ込む典型的な流れの速い氷河である (図 2). 幅約 3 km のカービング端は年間約 130 m の速度で流動し, 氷を海に流出している<sup>5)</sup>. 氷河末端部は約 2 km にわたって極めて平坦な表面地形が続いており, 棚氷を形成していると考えられる. 平坦域の上流側では急激に表面傾斜が変化しており, その周辺に接地線が位置することを示唆している<sup>6)</sup>. 接地線と想定される地域の表面高度は海拔 40~50 m であり, 浮氷の力学的な平衡を仮定すれば氷厚は約 400~500 m と推定される.

掘削地の決定には, 推定された接地線位置を参考にした. 当初は接地線の上流側と下流側の二ヶ所での掘削を予定しており, 推定接地線の約 1 km 上流側を第 1 掘削地点とした (図 2b). しかしながら後述するように, 掘削によってこの地点が浮氷であることが判明したため, さらに 0.5 km 上流に第 2 掘削地点を定めた. 観測を行った 2012 年 1 月には, 氷河末端から少なくとも 4 km 上流まで裸氷が広がり, 融解水が流れる水路や, 直径数 10~数 100 m の湖が確認された.

2011 年 12 月 28 日に砕氷船しらせを出発し, 3 日間の偵察行動を行った後, 第 1 掘削地点にキャンプを設営して観測活動に入った. 熱水装置の調整に数日を費やした後, 1 月 6 日と 8 日に掘削を実施. その後キャンプを移動し, 1 月 16 日と 21 日には第 2 掘削地点にて掘削を行った. 掘削作業終了後は掘削孔を使った測定, 氷河上でのアイスレーダ, GPS 測定などを実施し, 1 月 29 日にキャンプを撤収して昭和基地に入った. その後はヘリコプターを使って日帰りの観測を何度か行い, 2 月 9 日に全ての観測活動を終了した. 観測活動の概要を表 1 にまとめる.

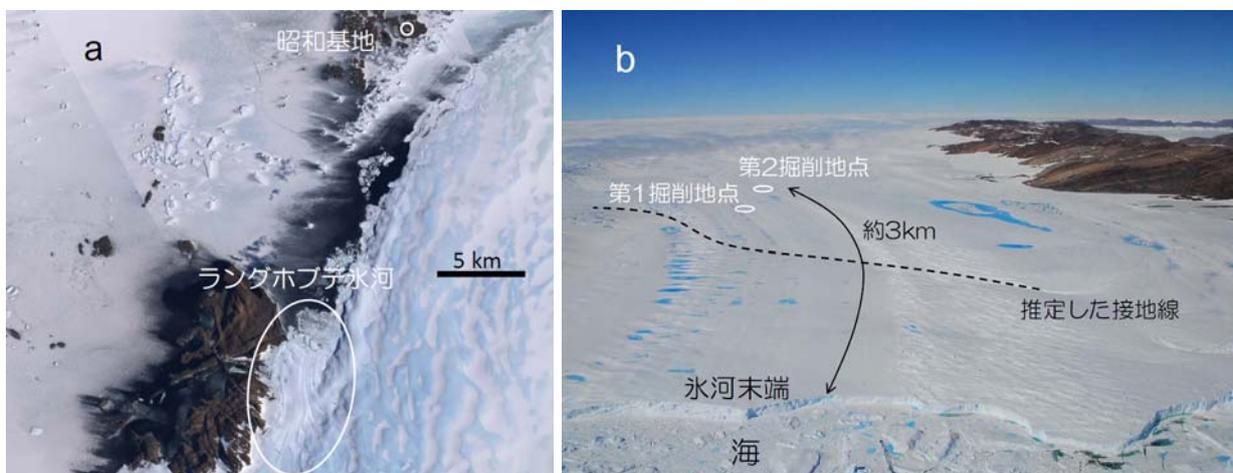


図-2 (a) 南極沿岸の人工衛星写真にラングホブデ氷河と昭和基地を示す。  
(b) ラングホブデ氷河のカービング端から上流側を望む。

表-1 ラングホブデ氷河における観測活動の概要

	期間 (2011~2012年)	活動内容	宿泊地
予察期間	12月28日~1月1日	氷河上偵察, 掘削地決定	予察キャンプ(氷河脇)
第1掘削期間	1月2~14日	熱水掘削, 掘削孔観測, 流動測定, 気象観測	第一掘削地点キャンプ
第2掘削期間	1月15~21日		
観測期間	1月22~29日	氷厚探査, 氷河測量, 流動測定, 気象観測	第二掘削地点キャンプ
観測継続期間	1月30日~2月9日	氷厚探査, 測定装置メンテ	昭和基地

4. 熱水掘削の結果

熱水掘削では氷河底面への到達を判断することが容易でない。しかしながら今回は、掘削孔の水位変化から明瞭なシグナルが得られた。氷河の氷に透水性がないため、掘削中は注入した熱水と同量の融解水が孔からあふれ続ける。やがて掘削が氷河底面に到達すると、孔内の水が底面に排水されて水位が下がり掘削が完了したことが示唆された。掘削孔が氷河を貫通したことは、掘削後孔に挿入したビデオカメラによっても確認された<sup>7)</sup>。

掘削完了後、フロート式の水位計で孔内の水位を測定し、CTD（電導度・温度・深度）センサ（IDRONAUT社 Ocean Seven 304）を挿入して孔内と氷河底の水深と水質を測定した。その結果、第1掘削地点は氷の厚さが398mであり、その下に深さ24mの海水層が存在することが明らかになった。さらに上流に位置する第2掘削地点も、厚さ431mの氷の下は深さ10mの海水層であった。以上の結果から、表面地形から判断した接地線よりも上流側にも関わらず、掘削を行った二地点が浮氷上にあることが判明した。観測によって明らかになった氷河断面と実施した観測内容を図3に、また4本の掘削孔の詳細を表2にまとめた。

今回行った掘削の総長は1650mであり、平均掘削速度は40 m hr<sup>-1</sup>であった。熱水装置が消費した燃料は、ボイラー用の軽油が810リットル、ポンプエンジン用のガソリンが255リットルであり、燃料消費率はそれぞれ1.92リットル hr<sup>-1</sup>と5.86リットル hr<sup>-1</sup>となった。

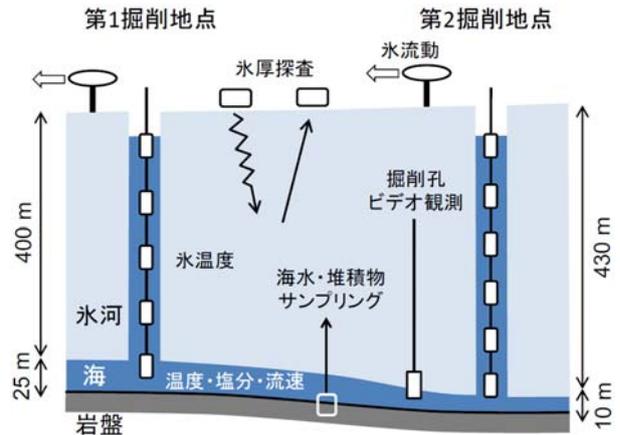


図-3 掘削によって明らかになった氷河断面の模式図と実施した観測の概要。

表-2 掘削孔の詳細

掘削地点	掘削日	氷厚 (m)	海水深 (m)	表面に対する掘削孔水位(m)
第1掘削地点 S 69°12'09" E 39°49'21"	2012年1月6日	未測定	未測定	30.6
	2012年1月8日	398.4	24.2	31.4
第2掘削地点 S 69°12'24" E 39°49'26"	2012年1月16日	431.4	11.3	42.5
	2012年1月21日	429.6	9.2	42.0

## 5. まとめ

2011年12月から2012年2月にかけて、南極ラングホブデ氷河の接地線付近で熱水掘削をおこなった。その結果二ヶ所で合計4本の全層掘削に成功し、それぞれの場所の氷厚(約400および430 m)と氷河下の海水層の深さ(約25および10 m)を確認した。これらの場所は、表面の起伏に基づく従来の判断基準では接地域に当たる場所であり、氷河上の観測から接地線を決定することの難しさが明らかになった。図3に示した通り、掘削孔内部と氷河上で各種の観測を実施している。それらの結果については場所を改めて報告する。

## 6. 謝辞

ラングホブデ氷河での観測にあたっては、第52次および第53次日本南極地域観測隊のサポートを受けた。特に樋口和生氏と白濱政典氏には、それぞれ野外行動の安全管理と熱水掘削システムの修理調整に尽力頂いた。棚氷下での海水測定は青木茂氏(北大低温研)の準備によって実施した。また熱水掘削装置の改良において新堀邦夫氏(北大低温研)の協力を得た。以上の方々に感謝致します。本研究は第53次日本南極地域観測隊のプロジェクトとして、その一部に科研費(挑戦的萌芽研究23651002)の助成を受けて実施した。

### 【参考・引用文献】

- 1) Pritchard, H. D., R. J. Arthern, D. G. Vaughan and L. A. Edward, 2009: Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets, *Nature*, **461**, 971–975.
- 2) Tsutaki, S. and S. Sugiyama. 2009. Development of a hot water drilling system for subglacial and englacial measurements. *Bulletin of Glaciological Research*, **27**, 7–14.
- 3) Tsutaki, S., D. Nishimura, T. Yoshizawa and S. Sugiyama. 2011. Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. *Annals of Glaciology*, **52**(58), 31–36.
- 4) Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, H. Enomoto, S. Tsutaki, K. Tone, S. Marinsek and M. Aniya. 2011. Ice speed of a calving glacier modulated by small fluctuations in basal water pressure. *Nature Geoscience*, **4**, 597–600.
- 5) 福田武博, 杉山慎, 澤柿教伸, 2012: 南極ラングホブデ氷河における表面流動速度測定と氷厚探査, *北海道の雪氷*, **31**, 97–100.
- 6) 福田武博, 杉山慎, 澤柿教伸, 2011: ALOS/PRISM ステレオ画像を用いた南極ラングホブデ氷河の表面地形解析, *雪氷研究大会(2011・長岡)講演要旨集*, 170.
- 7) 澤柿教伸, 杉山慎, 福田武博, 2012: 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削孔を用いたビデオ観察, *北海道の雪氷*, **31**, 93–96.