

# パタゴニア・ペリートモレノ氷河での熱水掘削と GPS 連続測定

杉山 慎<sup>1</sup>、刀根 賢太<sup>1</sup>、新堀 邦夫<sup>2</sup>、高塚 徹<sup>3</sup>

1. 氷河・氷床グループ
2. 技術部装置開発室
3. 技術部先端技術支援室

## 1. はじめに

末端が湖や海に流れ込むカービング氷河は、通常の氷河と比較して急激な氷河変動を示す。たとえばグリーンランドや南極沿岸では、カービング氷河が近年急速に後退し、氷床の質量収支に大きな影響を与えている。急激な氷河変動の原因は、末端部が水に漬かっているがゆえの流動特性にあると考えられるが、カービング氷河の流動については理解が進んでいない。具体的には、氷河底面に高い水圧が発生して底面流動を促進していると予想されるが、カービング氷河の底面水圧を測定した例は非常に少ない。

これまでに我々は、スイスアルプスの氷河において熱水掘削を駆使した氷河観測を行ってきた (Sugiyama and others, 2008)。掘削孔を用いて氷河内部と底面の状態を観測することで、氷河流動機構の解明に成果を挙げている。本研究では、アルプスでの研究成果を南米パタゴニア氷原のカービング氷河に発展させ、熱水掘削による底面流動測定と GPS による流動測定を実施した。氷河の底面水圧と流動速度の関係を明らかにすることが研究の目的である。本報では、パタゴニアの氷河では初めての試みとなった、熱水掘削について報告する。

## 2. 観測地

南米チリとアルゼンチンの国境に位置するパタゴニア氷原は  $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$  の面積を占め、南半球では南極氷床に次いで巨大な氷塊である (図 1a)。その変動が海水準に与える影響、世界でも有数の多涵養多消耗な氷河特性などの重要性が認識されているが、厳しい気候と複雑な地形に阻まれて研究は進んでいない。ペリート・モレノ氷河は南パタゴニア氷原を代表する溢流氷河であり、パタゴニアの溢流氷河がほとんどそうであるように、末端が湖に流入するカービング氷河である (図 1b)。末端から 10 km 上流までは中央部の流動速度が年間 400 m 以上であり、極めて流動速度が速い。本研究では、氷河末端から 4.7 km 上流を観測地とし、熱水掘削と GPS による流動測定を行った。この地点における氷厚は約 500 m、氷の 60-70% は末端湖の水位以下に位置する (図 2)。

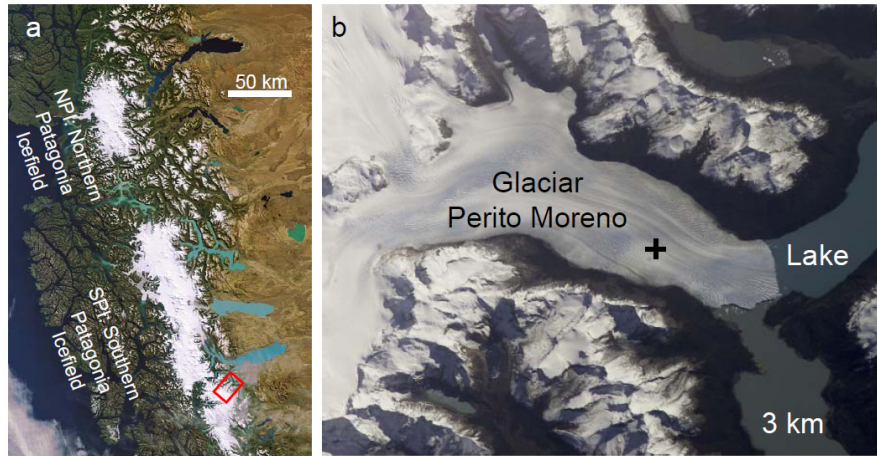


図1 (a) 南米チリとアルゼンチン国境に位置する南北パタゴニア氷原。(b) 掘削と観測を行ったペリート・モレノ氷河。掘削および観測点を (+) で示す。

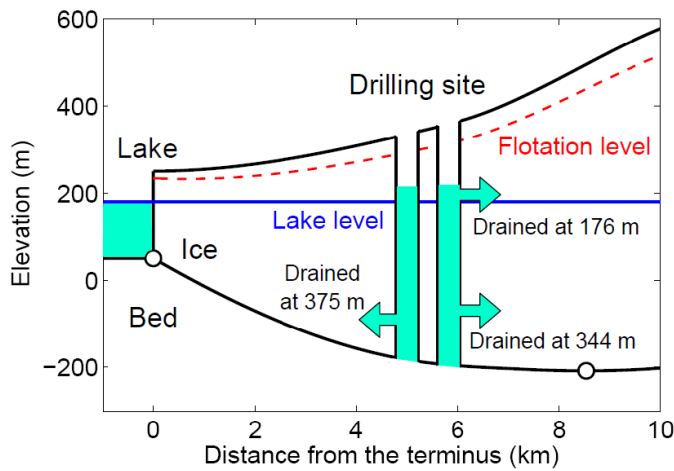


図2 ペリート・モレノ氷河の縦断面図。氷河底面は測定値 (○) の内挿によってもとめた。点線は Flotation level と呼ばれ、水位がこの高度に至ったところで氷の荷重が水圧と等しくなる。2本の掘削孔から排水が起こった深さ(底面を基準)を示す。

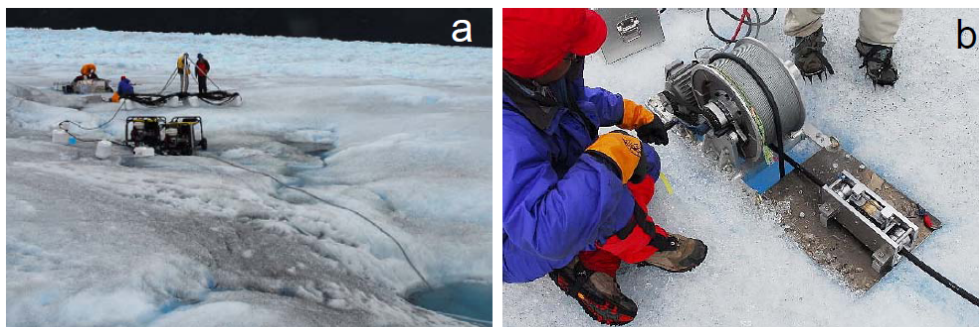


図3 (a) ペリート・モレノ氷河における熱水掘削のようす。右下の池から揚水し、左中ほどに見える2台の熱水装置で高圧熱水を生成する。左上が掘削地点。(b) 掘削に用いたウィンチ。ホースはドラムを一周して掘削孔に降ろされる。右下がホースを制動するために新規に製作したブレーキ。

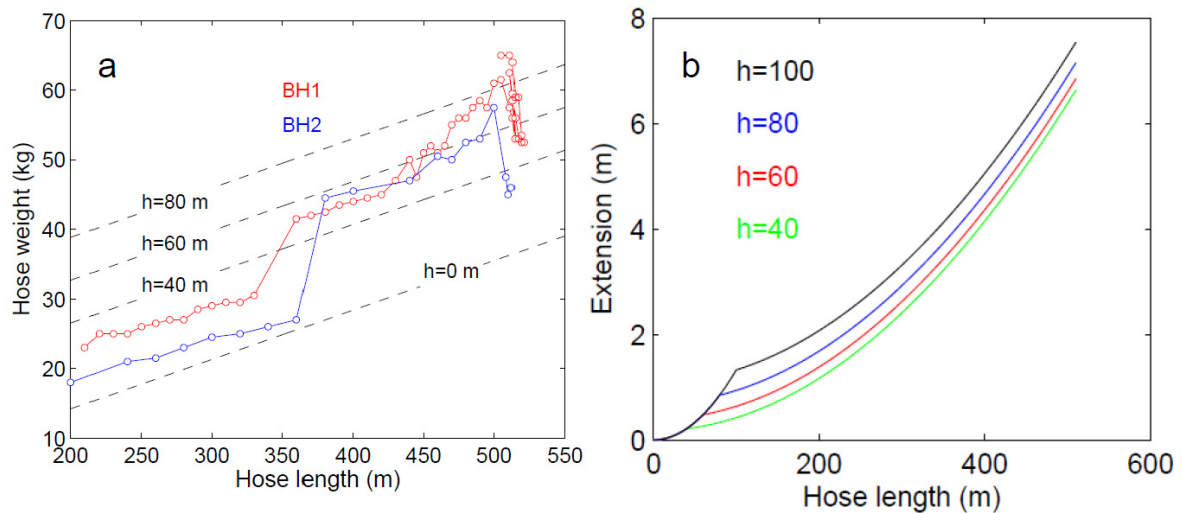


図 4 (a) 掘削中に測定したホースの重量。点線は、表面から掘削孔内の水位までの距離 (h) を各値に仮定して見積もられるホース重量計算値。(b) 掘削孔内の水位を仮定して計算した、掘削孔内に垂れ下がったホースの長さに対するそのホースの伸び量。

### 3. 熱水掘削システム

熱水掘削には、低温科学研究所が保有するシステムを増強して使用した (Tsutaki and Sugiyama, 2009)。これまでのシステムは 200 m 深程度の掘削を目的としており、ペリート・モレノ氷河の掘削には熱量とホース長が不足するほか、重くなったホースを操作するウィンチが必要になる。熱水を発生する高圧熱水装置 (Kärcher HDS1000BE) を新規に追加して 2 台構成とし、高圧ホースも 550 m まで延長した (図 3a)。氷コア掘削に用いられるウィンチを熱水掘削用に転用することとし、ホースを滑らかに操るためのブレーキシステムを技術部装置開発室にて新たに製作した (図 3b)。

### 4. ペリート・モレノ氷河での熱水掘削と底面水圧測定

2010 年 2 月 25 日にヘリコプターを使って約 1 t の機材を現場に輸送し、翌 26 日から掘削を開始した。機器のトラブルに見舞われて掘削は難航したが、3 月 2 日に底面までの掘削に成功した。掘削が底面に達したと確認するために、掘削中はホースの重量をばねばかりで計測している (図 4a)。ホース長 344 m で掘削孔内の水が排水された際に急激な増加を示した以外は、ホース重量は掘削が進むにつれて連続的に増加している。その後ホース長 508–514 m で顕著に重量が減少し、先端が氷河底面で着底したと判断した。

さらに正確な掘削孔深さ、すなわち氷厚を求めるために、ホースの自重による伸びを以下の通り見積もった。ホースの製造メーカ、(株)ブリジストンによる試験の結果、使用したホース (WAR08) の加圧下 (10 MPa) における伸び率は 100 kg 重の荷重に対

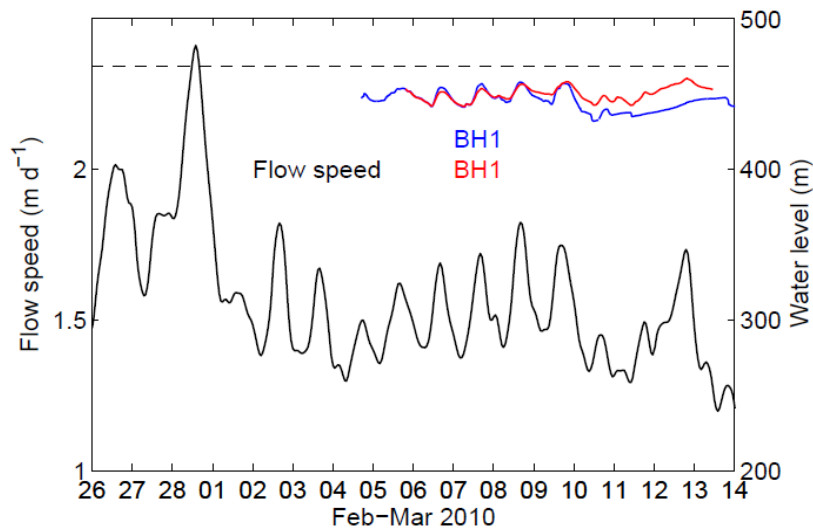


図 5 氷河表面流動速度と掘削孔水位の変化。水位は氷河底面からを基準とした値。点線は氷の Flotation level。

して7%であった。この数値に加えて、ホースの形状（内径 12.7 mm、外径 19.8 mm）と質量（1 m あたり 0.25 kg）を用いて掘削中のホース伸び量を見積もった（図 4b）。掘削孔内の水位がホースを支える浮力に影響するため、伸び量の計算では氷河表面からの水位を 40–100 m と仮定している。一方掘削終了時に測定されたホース重量は、水位が氷河表面から 60–80 m 下にあると仮定して見積もった重量とほぼ等しい（図 4a）。そこで、図 4b においてこの水位を適用することにより、掘削終了時のホース伸び量を  $7 \pm 0.5$  m と推定した。その後 3 月 5 日に終了した 2 本目の掘削孔もほぼ同じような氷厚を示し、掘削地点での氷厚を  $515 \pm 5$  m と結論づけた。

掘削終了後は 2 本の掘削孔内に水圧センサ (Geokon 4500S および HOBO U20) を設置し、掘削孔内の水位変化を 10–30 分間隔で測定した。

## 5. GPS による流動速度の測定

2010 年 2 月 25 日から 4 月 2 日にわたって、掘削地点から 100 m 程度北において流動速度の測定を行った。氷河上に埋設した長さ 2 m のアルミポールに GPS アンテナを固定し、1 時間間隔で 30 分間 GPS 衛星のデータを記録した。氷河外の岩の上でも同じタイミングでデータを取得し、両者を処理することで 3–5 mm 程度の誤差でポールの位置を測定することができる。得られた位置座標をガウシアンフィルターで平滑化した後に毎時の流動速度を求めた。

GPS を長期間氷河上で自動運転するために、ソーラーパネル (20 W) と蓄電池 (12 V、7.2 Ah) を組み合わせた電源ユニットを使用した。直流電源を GPS 受信機に導くために必要なアダプターを技術部先端技術支援室にて製作している。

## 6. 観測結果

氷河表面の流動速度と、掘削孔内の水位の変化を図 5 に示す。掘削孔内の平均水位は底面から約 450 m であり、氷河の底面水圧が氷の上載荷重の 90%以上に達することが明らかになった。水位は 10–20 m 程度の小さな振幅で日周期変動を示し、表面融解水の影響を受けて底面水圧が変動していると理解できる。

一方、流動速度は顕著な日周期変動を示し、その変動のタイミングは掘削孔内の水位変動とほぼ同じであった。底面水圧のわずか数%の変動によって、40%程度の流動変化が駆動されている。底面水圧が上載荷重に近づくと流動速度が急激に増加することが知られているが (e.g. Bindschadler, 1983)、常に水圧が高く保たれているため、流動速度が水圧の微少な変動に敏感に反応するものと考えられる。このようなカービング氷河特有の流動現象は、これまでに予想されてはいたものの、底面観測を伴った観測データは存在しなかった。氷河底面での観測例が無いパタゴニアにおいて、カービング氷河の流動特性の理解を推し進めるデータを得たものと考えている。

## 謝辞

ペリート・モレノ氷河での観測は、筑波大学・安仁屋政武氏、広島工大・内藤望氏、北見工大・榎本浩之氏、アルゼンチン南極研究所・Pedro Skvarca 氏の協力を受け、科研費 18251002 基盤 (A) 代表・安仁屋政武の支援を受けて行われた。観測機材の準備と発送にあたっては、的場澄人氏、津滝俊氏、白岩孝行氏の協力を得た。現地での観測手続きに関しては、菅原通夫氏、在日アルゼンチン大使館に尽力を頂いた。また、アルゼンチンでの活動をサポートした Hielo y Aventura および Tohin のメンバー、ホースの伸び試験を行った (株)ブリジストン、熱水掘削システムに技術提供頂いたケルヒャージャパン (株) と (株) ナカムラサービスに感謝する。

## 参考文献

- Bindschadler, R. 1983. The importance of pressurized subglacial water in separation and sliding at the glacier bed. *Journal of Glaciology*, **21**(101), 3–19.
- Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Nishimura, H. Blatter, A. Bauder and M. Funk. 2008. Hot water drilling and glaciological observations at the terminal part of Rhonegletscher, Switzerland in 2007. *Bulletin of Glaciological Research*, **26**, 41–47.
- 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.