

# 掘削孔ビデオカメラによる氷河底面の観測

杉山慎<sup>1,2</sup>、西村大輔<sup>2</sup>、福士 博樹<sup>3</sup>、千貝 健<sup>3</sup>

1. 共同利用推進部
2. 氷河・氷床グループ
3. 技術部先端技術支援室

## はじめに

氷河の底面状態は氷の流動に大きな影響を与え、特に短期的な流動変化をつかさどる底面流動機構を明らかにする上で重要である。例えば氷が岩盤の上に載っている場合は、氷と岩との界面におけるすべりが底面流動を引き起こす。その一方で、脆弱な底面堆積物層が存在する場合は、堆積物の変形が氷の流動に寄与する。したがって、底面流動メカニズムを理解するためには、底面状態の観察と底面流動の測定が必要となる。しかしながら、厚い氷の下で様々な観測を実施することは容易でないため、氷河底面流動は氷河研究の分野で大きな課題となっている。

氷河底面で観測を行うひとつの手法は、熱水ドリルによって掘削した縦孔の利用である。底面まで貫通した掘削孔に測定装置を挿入することで、底面水圧、掘削孔変形、氷の鉛直歪みなど、様々な観測が可能となる。我々は2007年に熱水掘削システムを開発し(Tsutaki and Sugiyama, 2009)、スイス・ローヌ氷河の流動機構解明に取り組んできた(Sugiyama and others, 2008)。これまでの観測によって、底面流動の寄与が重要であること、その寄与率は空間的に大きくばらついていること、場所によっては底面に堆積物層が存在すること、などを明らかにしてきた。しかしながら、底面流動が岩盤上のすべりで生じているのか、堆積物の変形によるものかは明らかでなく、底面状態の情報も間接的なものである。

そこで2009年夏の観測では、ローヌ氷河底面状態の直接観測と、底面流動を底面すべりと堆積物変形に分離することを目的として、氷河掘削孔ビデオカメラによる観測を実施した。本報では、低温研技術部との協力で開発したタイマー撮影機能つき掘削孔ビデオカメラを紹介し、この装置を使ったローヌ氷河での観測を報告する。

## 掘削孔ビデオカメラ測定システム

### 掘削孔ビデオカメラ

最長200 m 深の掘削孔内で動画を撮影するカメラとして、(株)リアックス社製のスマートカメラ SC-200 を選択した。このカメラは、LED 補助光源付き 510 × 582 画素 CCD カメラによる動画像を200 m のケーブルで伝えるもので、0°C の水で満たされた氷河掘削孔内で使用することができる。距離計付きの滑車を介してカメラを降下させることで、観測地点の深さを画像に表示することも可能である。しかしながら、カメラから出力されるアナログ動画信号を表示・記録する機能はなく、氷河底面の流動速度を測定するために必要なタイマー撮影機能も有していない。そこで以下に示すように、周辺機器と組み合わせることによって、掘削孔ビデオカメラを使った測定システムを構築した(図1)。

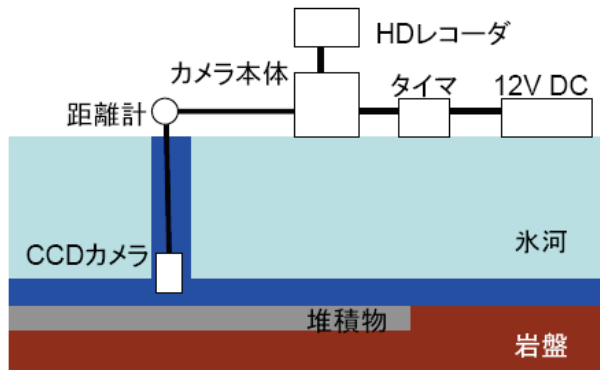


図 1. 掘削孔カメラ測定システム。

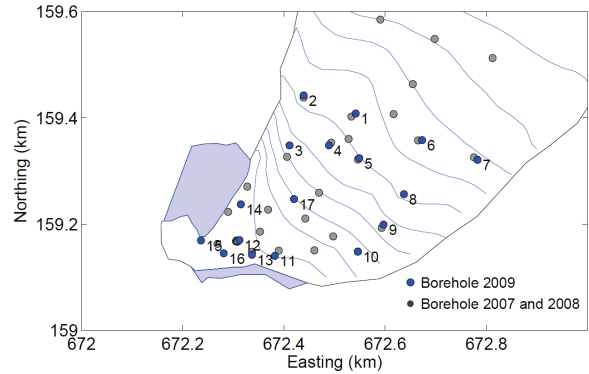


図 2. ローヌ氷河における掘削地点。

### 表示・記録およびタイマー撮影機能

カメラからの動画像をスクリーンに表示し、記録するための機器として(株)アクセス社製のポータブルフォトストレージ VP8360 を使用した。3.6 インチのカラー液晶を備えたこの機器は、携行に都合の良い大きさであり (135 × 72 × 23 mm)、Li イオン内部バッテリーによる駆動も野外での使用に適している。アナログ出力信号はデジタル化され、内臓ハードディスク上に記録される。このような機能を持った機器は他にも存在するが、タイマー録画機能を持っていることが本機種を選択した理由となった。あらかじめプログラムした 8 つの時間帯に自動的に記録を行う機能は、底面流動速度を測定するために必要不可欠だからである。電源も記録時のみ投入されるため、電源供給の得られない氷河上に放置して一定間隔で画像を記録することができるようになった。

十分な電源供給が得られない氷河上でインターバル測定を行うためには、掘削孔ビデオカメラの動作をタイマーで制御する必要がある。カメラは鉛蓄電池からの DC 12 V 電源によって動作するが、この供給電源を外部タイマーでオンオフすることで、必要な時間にのみカメラを作動させることとした。使用したタイマーは、(株)オムロンのデジタルタイマ H5CX-AD である。小型軽量 (48 × 45 × 70 mm、135 g) のこのタイマーは 2.4 W の電源を必要とするものの、 $10^{-3}$  秒- $10^4$  時間という広い時間スケールで直流電源をコントロールすることができる。現状での問題点は、時計を持たずに現在からの相対時刻で作動する点であり、時刻で動作する記録装置と整合するようにタイマーをスタートさせる必要がある。

## ローヌ氷河における観測

### 観測地

スイス・ローヌ氷河は全長約 8 km の山岳氷河である。近年その末端に氷河湖が形成され、湖の拡大による氷流動の変化、さらには氷河後退の加速が予想されている。我々は湖水による底面状態の変化、およびそれに伴った流動変化の解明を目的として、2009 年 6-9 月に各種の観測を実施した。氷河末端から約 1 km 上流に至る地域で熱水掘削を行い (図 2)、掘削孔ビデオカメラを使った観測を 9 月まで実施した。掘削孔ビデオカメラ以外には、GPS による流動速度、底面水圧、掘削孔の傾斜、底面堆積物の厚さ、融解量、アルベド、表面高度、気象などの測定を行っている。

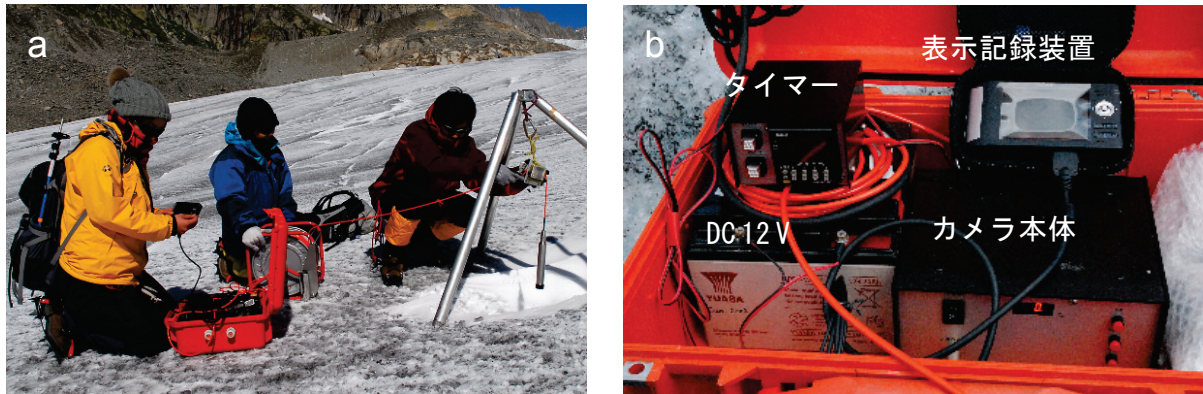


図 3. (a) 掘削孔カメラを使った観測、および(b)測定システム。

### 掘削孔ビデオカメラによる底面観察

掘削孔にカメラを挿入し、孔内、特に底面状態の直接観測を行った（図 3）。特に掘削孔の上部は水も澄み、LED 光源によって鮮明な氷の観察が可能であった。底面付近では氷内に礫なども見出され、氷河底面氷へ堆積物や岩石が取り込まれている様子が確認された。氷河底面においては、多くの掘削孔で水が濁り、氷河底に粒径の小さな堆積物層が存在することが示唆された。一方側岸に近い幾つかの掘削孔では、基盤岩が明瞭に観察された。これらの結果から、氷河底面の状態は場所によって異なり、岩盤および堆積物層によって構成されていることが明らかになった。堆積物層が存在する掘削孔底面では、当初は水の濁りで画像が不鮮明となり観察が不可能であった。その後いくつかの掘削孔では、底面の濁りが解消されて観察が可能になった。これらの掘削孔では堆積物が沈殿した他、氷河底面の排水システムと接続して細かい粒子を含む水が排出されたと考えられる。掘削孔中で撮影した画像を図 4 に示す。

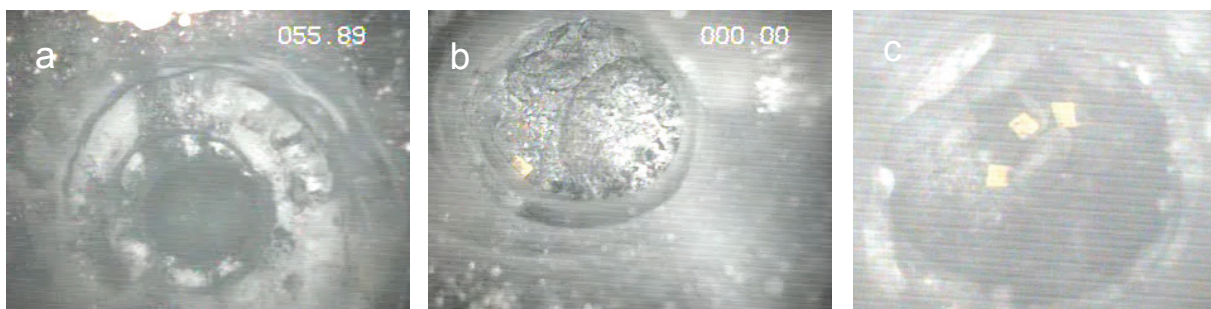


図 4. 掘削孔内の画像。(a) 底面付近の孔壁に堆積した砂粒、(b) 氷底岩盤、および(c) 堆積物の上に載った石とマーカ。

## インターバル撮影による底面流動速度の測定

底面が明瞭に観察できる掘削孔において、タイマーを使ったインターバル撮影を行った。多くの場合においてシステムはプログラム通り稼動し、数時間おきの底面画像が得られた。測定にあたっては、予め目盛の入ったマーカーを孔内に投入してスケールとする。このマーカーおよび石などの移動量を測定することで、氷河と堆積物または岩盤との界面におけるすべり速度が得られる。数時間のインターバルで撮影した画像を一部解析したところ、マーカーの移動は非常に小さいものであった。今後はさらに多くの画像を解析する他、微少な移動量を画像から求める処理方法を検討する予定である。

タイマーを使った測定その他、数日から数週間の間隔において、掘削孔底面の繰り返し観察を行った。その結果を GPS 測定による表面流動速度および掘削孔傾斜測定による氷の変形による流動速度と比較することにより、いくつかの掘削孔において底面流動機構が明らかになった。氷河中央に近い掘削孔 6 (図 2) では、表面流動速度  $21.1 \text{ m a}^{-1}$  と氷の変形による流動速度  $15.4 \text{ m a}^{-1}$  から、底面流動速度が  $5.7 \text{ m a}^{-1}$  と求められた。この掘削孔の底面で期間において堆積物上のマーカーと石を観察したところ、19 日間での移動量が  $50 \text{ mm}$  以下であり、底面で起きた流動量  $0.30 \text{ m}$  のほとんどが底面堆積物の変形によることが判明した。一方側岸に近い掘削孔 9 (図 2) における底面流動速度は  $17.0 \text{ m a}^{-1}$  であり、表面流動速度の 80% を占めている。この掘削孔の底面では氷が岩盤上に接触しており、底面流動が岩盤上のすべりで起きていると考えられる。

## まとめ

掘削孔ビデオカメラにタイマー撮影機能を加えた掘削孔測定システムを構築した。このシステムを用いてスイス・ローヌ氷河にて底面の観測を行い、以下の結果を得た。

- ・ローヌ氷河末端から  $1 \text{ km}$  にかけての領域で、底面堆積物層が存在すること、また場所によっては氷が直接岩盤に接していることを確認した。
- ・氷河の底面流動を、岩盤上のすべりと底面堆積物の変形に分離することに成功した。

これらの結果は、ローヌ氷河の底面状態、底面流動機構が空間的に一様でないことを示すものである。この知見は、氷河湖の成長に伴う氷河の変動を理解する上で非常に有用である。

本研究は、文部科学省科学研究費（基盤研究 C）、および北海道大学環境科学院 GCOE プログラムの支援を受けて実施した。

## 参考文献

- 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.