

# 熱水ドリルによる氷掘削を利用した氷床沿岸部における研究観測

杉山 慎

北海道大学低温科学研究所

## 1. はじめに

世界の氷河や氷床では、さまざまな目的で氷の掘削が行われている。規模の大きい例は南極やグリーンランドにおける氷コア掘削で、古環境の復元を目的に数 km におよぶ氷コアが採取されてきた。しかしながら、氷河氷床掘削の目的は氷コアばかりではない。たとえば氷河の流動状態を理解するためには、氷河内部や底面での測定が必要であり、孔内での観測を目的とした掘削が行われている。具体的には、氷河内部における氷の粘性変形や温度分布、氷河底面では底面流動速度や水圧などが測定の対象となる。また氷河流動の観測以外にも、棚氷下の海水循環や塩分濃度の測定、氷床底面での堆積物や生物サンプルの採取など、氷河氷床底面へのアクセスが必要となる観測はますます重要性を増している。したがって、氷コアを目的としない、より高速で機動力に富んだ氷掘削技術が必要となっている。このような背景を鑑みて本稿では、筆者らが最近開発した熱水ドリルシステムの紹介と、熱水掘削を利用した氷床沿岸部での研究観測の提案をおこなう。

## 2. 熱水ドリルシステムの開発

### 2-1. 熱水ドリルの概要

熱水ドリルは沸点近くまで加熱した水を高圧で噴射して氷を融解し、氷河に直径 10 cm 程度の縦孔を掘削するシステムである(たとえば Taylor, 1984)。水を加圧して送り出すポンプ、加熱用のボイラー、熱水を導く耐圧ホースと噴射ノズルからなる(図 1)。原理は高温高圧の水を噴出する洗車用ジェット噴水機と同じであるが、数 100 m の氷を掘削するためには十分な水圧、温度、流量が必要になる。氷コア掘削用の機械的ドリルと比較して、熱水ドリルが優れている点を以下に示す。

- ・掘削速度: 毎時 50~100 m の掘削速度はコアドリルの 10~100 倍である。
- ・簡単なシステム: 一般的な機器を組み合わせるため、コアドリルほど開発に経験と時間を要しない。
- ・掘削できる氷: 氷点下から融解温度にある氷まで掘削可能。
- ・機動性: 機器の設置と撤収が容易であるため、氷河上で移動して多点で掘削を行うことができる。

もっとも重要なのはきわめて短時間で掘削できる点であり、数 100~1000 m の氷床掘削を数日以内で完了することができる。掘削後は孔内に測器を設置することで、氷体内部で長期間の測定が可能となる。

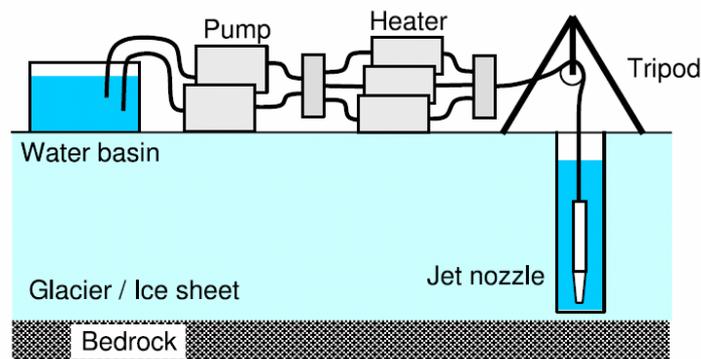


図 1. 熱水ドリルによる掘削を示す概念図

## 2-2. 開発したドリルシステム

温暖氷河における 300 m の掘削を目標において、熱水ドリルシステムを開発した(図 2)。システムの中核となる熱水装置には、山岳氷河ですでに実績のある Kärcher 社製のエンジン式高圧洗浄機 HDS1000BE を選定した(Hubbard and Glassar, 2005)。この装置は、ディーゼルを燃料とする熱水ボイラーとガソリンを燃料とする高圧エンジンポンプを組み合わせ、最高圧力 21MPa、流量 450-900  $l h^{-1}$  で、ボイラーでの最高温度 140°C の熱水を排出する。熱水は 0.5 インチ径の耐熱高圧ホースによって、先端にジェットノズルを固定した掘削ステムに導かれる。掘削ステムは外形 27 mm、内径 20 mm のステンレス製パイプを加工したものであり、必要に応じて 1.5 m のステムを 2 本つなぐことが可能である。ジェットノズルは市販の直進ノズル(口径 2.0 mm)を用い、掘削後に孔径を広げる場合は円形噴射ノズルに交換する。

掘削に必要な水は自立式の 3000 l 貯水タンクから供給される。掘削中にホースの重量を支えるため、三脚と滑車を使用する。滑車は掘削深を知ることができるよう、回転数によってホースの送り出し長さが計測できるものを製作した。

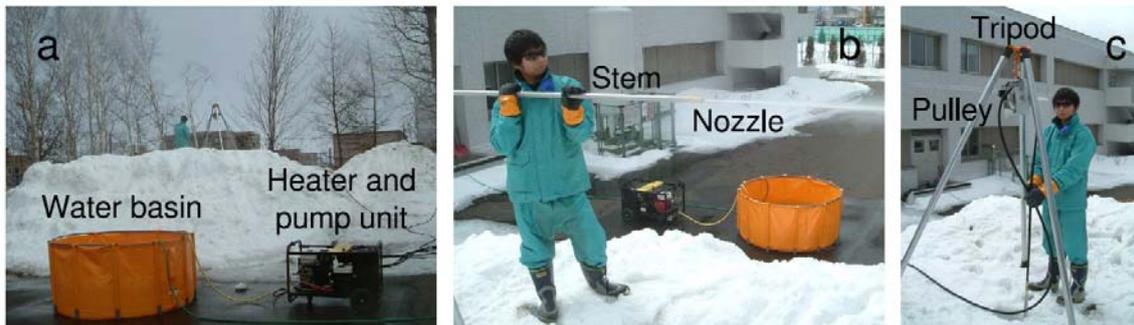


図 2 開発した熱水ドリルシステム

## 2-3 テスト結果

開発したドリルシステムをテストするため、熱水の流量と温度、燃料消費量などの測定を行った。直径 2 mm のノズルを使ってボイラーを最高出力で運転した場合、熱水の温度は 70°C 前後、流量と水圧は約 900  $l h^{-1}$ 、8 MPa となった。流量と水圧はポンプ能力の最大および最低値となっており、高流量・低圧力での稼働となっている(図 3)。流量を調整できるノズルを用いて熱水温度の変化を調べたところ、流量を 450  $l h^{-1}$  に絞ったところで 100°C に達し、流量の増大に従って温度が低下する傾向が得られた(図 3)。温度、圧力、流量がノズル径に依存するため、その最適化がドリルシステムの能力を決めると考えられる。上記テスト中の燃料消費量は、ボイラーのディーゼル消費量が 6.9  $l h^{-1}$ 、ポンプのガソリン消費量が 1.7  $l h^{-1}$  であった。

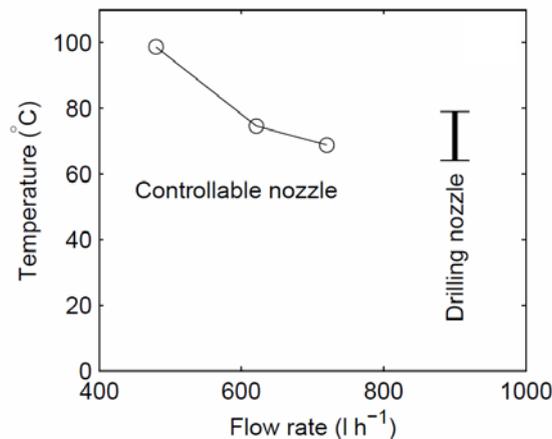


図 3 ノズルを換えて流量を変化させたときの熱水ジェット温度

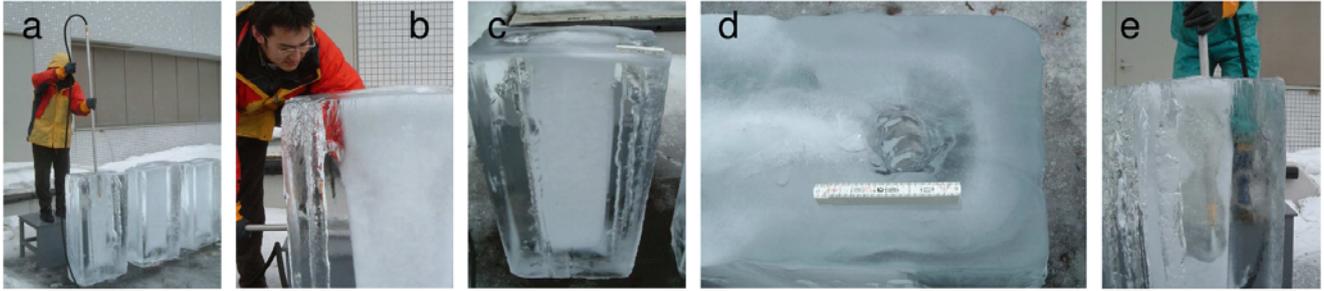


図 4. 氷ブロックを使った試験掘削

次に 25×50×100 cm の氷ブロックを用いて試験掘削を行った(図 4)。2 mm 径のノズルによる掘削は非常に良好で、直径約 5 cm、長さ 1 m の掘削に必要な時間は約 30 秒である。掘削孔の直径はノズルの送り速度を調整することで大きくなるが、希望の直径で掘削を続けるには熟練が必要であろう。掘削ステムの重量は 1 m の掘削では全く問題なかったが、より深い掘削では直進性を高めるためにより重いステムが有利だと考えられる。

### 3. 熱水掘削を利用した氷床沿岸部における研究観測

#### 3-1. 接地線付近における氷床動力学の解明

近年南極およびグリーンランド氷床において、棚氷の崩壊とそれに続いて内陸部で起きる氷の流動速度の増加が観測され、巨大な氷床が数年～数 10 年という時間スケールで大きく変動する可能性が示唆されている。もっとも劇的だったのは 2002 年に南極半島で起きた Larsen B 棚氷の崩壊で、わずか 1 ヶ月余りの間に 3200 km<sup>2</sup> の棚氷が崩壊して海に流れ出した (Shepherd and others, 2003)。この棚氷に氷を供給していた氷河では 2002 年以降にその流動速度が 2 倍以上に増加し、棚氷の支えを失って流動が促進されたのではないかと考えられている (Rignot and others, 2004)。西南極最大の氷流 Pine Island 氷河や、グリーンランドで最も流動が活発な氷流 Jakobshavn でも同様な現象が起きており、①温暖化による棚氷の融解→②棚氷の崩壊→③棚氷の支えを失った氷流の加速→④氷の流出による氷床体積減少、という仮説が議論され始めている。

このような現象を理解するためには、氷流および棚氷の内部と底面における観測(図 5)が必要であり、測定装置の設置には熱水掘削が最も有効な手段となる。寒冷な氷を掘削するためには、ボイラーやポンプに大きな能力が要求されるのはもちろん、容易に得られない水を再利用するなどの技術が必要である。アメリカのグループによって西南極の氷流で 1000m の掘削が行なわれてきた実績があるほか(たとえば Kamb, 2001)、グリーンランドの氷流 Jakobshavn でもスイスのグループが 1000m を越える掘削に成功している(Iken and others, 1993)。氷内部では、氷の粘性変形による流動を見積もるための温度分布、掘削孔の傾きを利用した歪測定(Lüti and others, 2002)が重要である。また氷流底面では底面水圧(Engelhardt and Kamb, 1997)の他、底面流動が堆積物の変形によるものか、氷と堆積物との界面でおこっているのかが非常に大きな興味となる(Engelhardt and Kamb, 1999)。一方氷棚では、その底面融解量と、融解の原因として考えられている海水温度の変化を測定する。これまでに、氷床沿岸部においてこれらの観測を総合的に実施した例はなく、世界に先駆けた重要な観測となりうる。

#### 3-2. その他の研究領域への利用

熱水ドリルによる掘削孔は、氷床動力学以外の広い分野で新しい研究の可能性を広げるものである。近年、南極沿岸における海水の淡水化が報告されており(たとえば Jacobs and others, 2002)、淡水の直接的な供給源となる棚氷下での観測は非常に興味深い。棚氷の底面融解量その他、海水の温度や塩分濃度、棚氷下での海水循環を長期的にモニタリングすることで、氷床沿岸における海洋の変化をつかむことができる。また氷床底面で堆積物や岩石をサンプリングすることができれば、氷床変動の歴史を読み解く情報が得られる可能性がある。さらに底面でのサンプリングは、可能性が盛んに

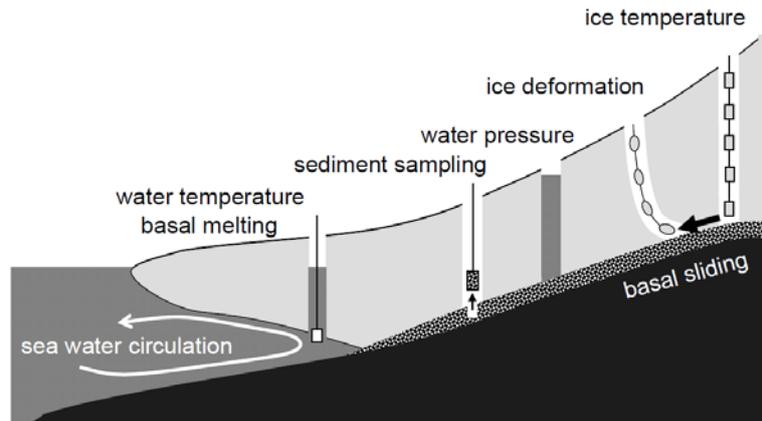


図 5. 熱水掘削孔を利用した氷床沿岸部での観測

議論されている氷底生物の発見にもつながり得るものである。熱水ドリルは本来氷コアを目的としないが、装置を改良することによって、氷床内部の任意の深さから氷サンプルを採取することも可能である(Engelhardt and others, 2000)。これまでサンプルを得ることが難しかった、氷床深部の氷や底面氷に関する理解が進むと期待される。

#### 参考文献

- Engelhardt, H. and B. Kamb. 1997. Basal hydraulic system of a West Antarctic ice stream: constraints from borehole observations. *J. Glaciol.* **43**(144), 207-230
- Engelhardt, H. and B. Kamb. 1999. Basal sliding of Ice Stream B, West Antarctica. *J. Glaciol.* **44**(147), 223-230
- Engelhardt, H., B. Kamb and R. Bolsey. 2000. A hot-water ice-coring drill. *J. Glaciol.*, **46**(153), 341-345.
- Hubbard, B. and N. Glasser. 2005. *Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology*. 115-124, John Wiley & Sons, Ltd, England.
- Iken, A. and 3 others. 1993. Mechanisms of fast flow in Jakobshavns-Isbrae, West Greenland. 1. measurements of temperature and water-level in deep boreholes. *J. Glaciol.*, **39**(131), 15-25.
- Jacobs, S. S., C. F. Giulivi and P. A. Mele. 2002. Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, **297**, 386-389.
- Kamb, B. 2001. Basal zone of the West Antarctic ice streams and its role in lubrication of their rapid motion. *The West Antarctic Ice Sheet, Behavior and Environment*. ed. by R. B. Alley and R. A. Bindshadler, *Antarctic Research Series*, **77**, 157-199, American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Lüthi, M. and 4 others. 2002. Mechanisms of fast flow in Jakobshavns-Isbrae, West Greenland. 3. Measurements of ice deformation, temperature and cross-borehole conductivity in boreholes to the bedrock. *J. Glaciol.*, **48**(162), 369-385.
- Rignot, A. and 5 others. 2004. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(18), 18401.
- Shepherd, A. and 3 others. 2003. Larsen ice shelf has progressively thinned. *Science* **302**, 856-859.
- Taylor, P. L. 1984. A hot water drill for temperate ice. *CRREL Spec. Rep.* **84-34**, 105-117.