

熱水ドリル掘削システムの構築

津滝俊（北大環境科学院），杉山慎（北大低温研）

1. はじめに

熱水ドリルは沸点近くまで加熱した水を噴射して氷を融かし、氷河に直径 10–20 cm の縦孔を掘削する手法で、主に氷河内部や底面での測定を目的とした掘削に使用される。

アイスコア掘削用のメカニカルドリルに対する優れた特徴として、毎時 50–100 m という掘削速度の大きさが挙げられる。これはメカニカルドリルの 10–100 倍に相当し、数 100–1000 m の氷河掘削を数時間から数日で完了することが可能である。その他には、氷点下から融解温度にある氷まで掘削可能であること。一般的な機器を組み合わせるため、開発と操作に経験と時間を要しないこと。また機器の設置と撤収が容易に行えるため、氷河上で移動して多点で掘削が可能であること等が挙げられる。熱水ドリルは主に欧米の研究機関によって開発され、山岳温暖氷河を対象に掘削が行われてきた（e.g. Taylor, 1884; Iken, 1988）。しかし日本国内では開発例はなく、熱水ドリルは存在しない。

本研究グループでは熱水ドリルの開発を目的として、氷厚 200–300 m 程度の温暖氷河の掘削を想定したシステムの構築と、性能試験および氷塊を用いた試験掘削、スイスのローヌ氷河における掘削を達成課題として研究を行った。

2. 熱水ドリル掘削システム

熱水ドリル掘削システムは、貯水槽、水を高圧で送り出すポンプ、加熱用のヒーター、熱水を導く耐圧ホースと噴射ノズル、ホースを支える三脚と滑車から構成される（図 1）。このシステムの中核となるポンプとヒーターは、一体型である高温高圧洗浄機（Kärcher HDS 1000 BE）を使用した（図 2 a, 表 1）。ポンプ、ヒーターはそれぞれガソリン、軽油を燃料とする。ポンプとドリル部分をつなぐ直径 0.5 インチの耐圧ホースの耐久上限は、水圧、水温それぞれ 21 MPa, 155 °C である。容積 3000 リットルの貯水槽はビニールパイプを骨組みとした組み立て式で、設置や撤収が容易に行える（図 2 b）。ドリル部分は長さ 1.5 m のステンレス製パイプと真鍮製ノズルから構成される（図 2 c）。掘削中、ホースは三脚に取り付けた滑車に通して保持される。滑車にはメジャーが取り付けられており、掘削距離が測定可能である（図 2 d）。パイプと、ホース・パイプ・ノズルの各連結部は北海道大学低温科学研究所技術部にて製作した。

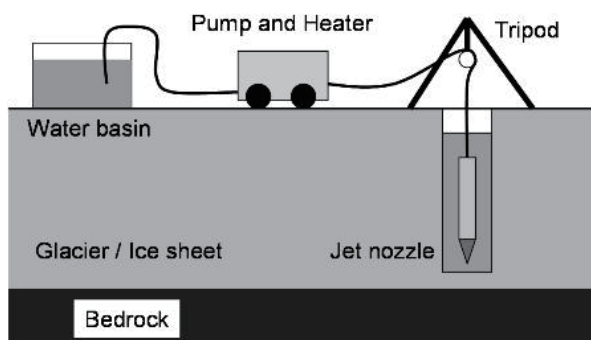


図1 熱水ドリル掘削システム概要図

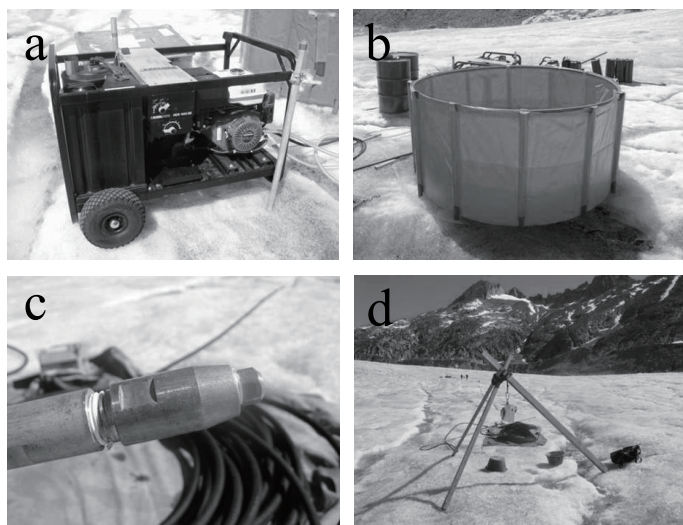


表1 ポンプ・ヒーター性能一覧

流量 (l h^{-1})	450-900
水圧 (MPa)	6-21
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	30-140

図2 掘削システムの各部位

- (a) ポンプ・ヒーター
- (b) 貯水槽
- (c) ドリル先端部
- (d) 三脚と滑車

3. 熱水ドリルのテスト

3.1 システムの性能試験

掘削に先立ち、水圧、流量、水温、燃費に関するシステムの性能試験を行った。試験では、全開にした水道の蛇口から流水をポンプへ直接取り込み、流量が調節できる洗車用ノズルと4種類の直径（1.6, 2.0, 2.5, 3.0 mm）のストレート噴射ノズル、長さ50 mのホースを使用した。水圧の測定はポンプに付属している圧力ゲージを利用した。流量はノズルを挿入した木箱に熱水が貯留する時間から算出した（図3 a）。水温を測定する際、ノズルの先端から噴射する熱水の温度を直接計測するのは困難である。そこでポリタンクに熱水を連続的に注入し、温度ロガー（HIOKI 3633）を使用して噴射口付近の水温を測定した（図3 b）。燃費は試験を行う前後の燃料の変化量から算出した。

試験の結果、水圧は3-34 MPaの範囲で、ノズルの直径が小さくなるにつれ高い圧力値を示した。また3.0 mmのノズルは0.45 MPaとシステム稼動の下限を大きく下回り、エンジンが自動的に停止したため使用するノズルからは除外した。次に流量と水温の関係を図3cに示す。洗車用ノズルを使用した場合では流量約500 l h^{-1} の時に水温は100 $^{\circ}\text{C}$ に近く、流量の増加にともない水温は低下した。掘削用ノズルを使用した場合では、流量は950-1000 l h^{-1} 、水温は60-65 $^{\circ}\text{C}$ であった。燃費はガソリン、軽油それぞれ1.8 l h^{-1} 、6.1 l h^{-1} であった。

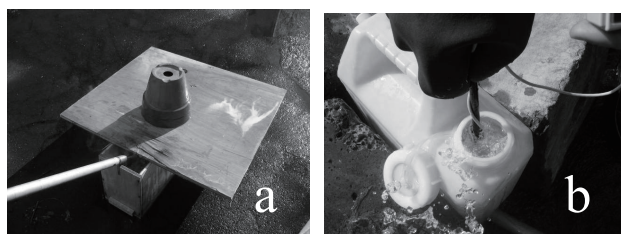


図3 (a) 木箱（520×150×240 mm³）による流量測定 (b) ポリタンク（10 リットル）と温度ロガー（HIOKI 3633）を使用した水温測定 (c) 流量に対する水温の変化（グラフ内

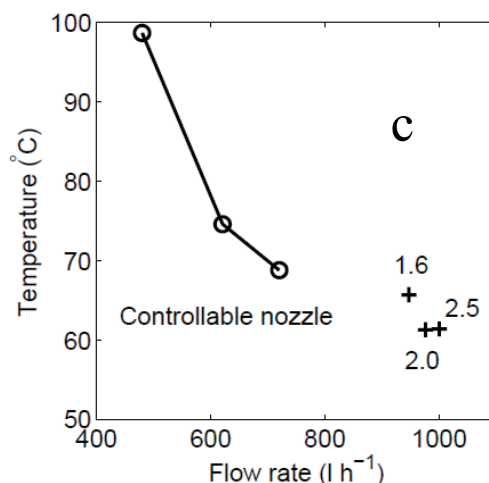




図4 氷塊 ($1 \times 0.5 \times 0.25 \text{ m}^3$)
を用いた掘削試験

表2 各設定温度による掘削時間

設定温度(℃)	掘削時間(秒)	掘削速度(m h^{-1})
非加熱(7.4)	124	29
30	53	68
50	43	84
70	27	133
90	39	92
110	28	129
135	31	116
150	31	116

3.2 氷塊を用いた試験掘削

次に、 $1 \times 0.5 \times 0.25 \text{ m}^3$ の氷塊を用いた掘削試験を行った(図4)。試験には2.0 mmのノズルと50 mのホースを使用し、水は水槽から汲み上げた。その結果、厚さ1 mの氷塊に直径約5 cmの孔を30秒で掘削することができた。また様々な温度設定で掘削したところ、ヒーターの設定温度が70℃以上では掘削速度はほぼ一定値を示した(表2)。これは、性能試験時に掘削用ノズルの水温は60–65℃であったように、設定温度を70℃以上にしても水温は変化しないためであると考えられる。また非加熱状態(7.4℃)でも多くの時間を要するものの掘削は可能であった。しかしながら機器の挿入や測定に十分な直径の掘削孔を短時間で得るには、より高温の水を使用するのが望ましいといえる。

4. ローヌ氷河における掘削

2007年7月11–31日にスイスのローヌ(Rhone)氷河で掘削を行った。ローヌ氷河はスイスアルプスの中央部(46°35' N, 8°23' E)に位置する全長約8 kmの山岳温暖氷河である(Huss, 2008)。ローヌ氷河末端部では2005年より新しい氷河湖の形成が確認された(図5)。氷河末端に湖が形成されることで、カービング現象による氷の消耗や、湖水の浮力に起因する末端部の崩壊などにより氷河の後退が進行するため、今後の氷河の変動が注目されている。今回掘削を行った地点は、氷河消耗域の流線沿いに6箇所、流線と直交方向に2箇所の計8箇所である(図6)。



図5 末端部に形成された氷河湖
(2007年9月撮影)

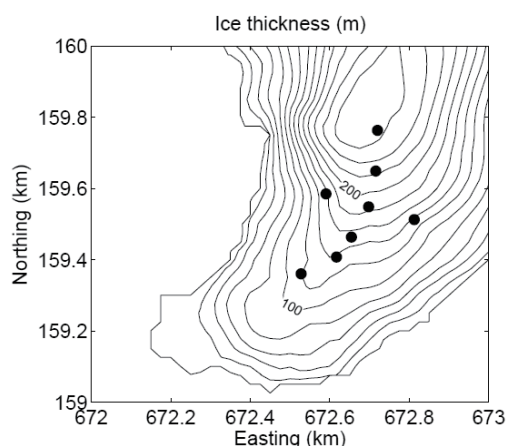


図6 ローヌ氷河消耗域の掘削地点(等高線はZahno (2004)によるアイスレーダ測定から得られた氷厚)

期間中は大きなトラブルも無く、順調に掘削が行われた。掘削した孔は直径 15-20 cm で、測定機器の挿入や孔内の測定には十分な大きさの孔が得られた。掘削地点 8 箇所

(BH1-BH8) の結果は、それぞれ掘削距離 87-138 m、掘削速度 32-67 m h⁻¹であった (表 3)。実際には 1 日あたり 1 本から 2 本の孔を掘削したので、7 日間で延べ 900 m 以上の掘削を行うことができた。また掘削孔の深さを

直接計測することにより、氷河の正確な氷厚を得ることができた。2003 年に行われたアイスレーダによる氷厚調査の結果では、掘削地点付近の氷厚は 110-230 m であった (Zahno, 2004; 表 3)。掘削結果と比較することにより、アイスレーダで測定された氷厚は全体的に過大評価されていることが明らかになった。今回の掘削で正確な氷厚データが得られたことで、今後ローヌ氷河を対象とした氷河の流動や質量収支に関する研究に大いに貢献すると予想される。

表3 各掘削孔の掘削距離、掘削速度と、同地点付近のアイスレーダ測定による氷厚 (Zahno, 2004)

掘削孔No.	掘削距離 (m)	掘削速度 (m h ⁻¹)	アイスレーダ測定 (m)
BH1	138	50	180-190
BH2	120	64	145-155
BH3	119	51	130-140
BH4	124	32	220-230
BH5	99	67	130-140
BH6	87	41	150-160
BH7	135	38	260-270
BH8	103	38	110-120

5. まとめ

本研究では新しい熱水ドリルを開発し、性能試験と試験掘削、及び温暖氷河での掘削を行った。性能試験の結果、掘削用ノズル装着時の流量は 950-1000 l h⁻¹、水温は 60-65 °C であり、試験掘削では厚さ 1 m の氷を 30 秒で掘削できた。スイスのローヌ氷河では 8 箇所掘削を行い、7 日間で延べ 900 m 以上を掘削することができた。また得られた正確な氷厚データは、今後ローヌ氷河の流動や質量収支に関する研究への貢献が期待される。

謝辞

新しい熱水ドリルを開発するにあたり、中鉢健太氏をはじめ北海道大学低温科学研究所技術部の方々に多大なるご協力を頂きました。株式会社ナカムラサービスには滑車部分の製作をして頂きました。また性能試験やローヌ氷河での掘削を行う際には北海道大学低温科学研究所氷河・氷床グループの西村大輔氏、佐藤建氏、スイス連邦工科大学 Martin Funk 教授、Heinz Blatter 教授にご協力頂きました。心より謝意を申し上げます。

文献

- Huss, M., A. Bauder, M. Funk, and R. Hock, 2008: Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *Journal of Geophysical Research*, **113**, F01015.
- Iken, A., 1988: Adaption of the hot-water-drilling method for drilling to great depth. *Mitteilung*, **94**, 211-229, VAW, ETH Zürich.
- Taylor, P. L., 1984: A hot water drill for temperate ice. *CRREL Spec. Rep.*, 84-34, 105-117.
- Zahno, C., 2004: Der Rhonegletscher in Raum und Zeit: Neue geometrische und klimatische Einsichten. Diplomarbeit, ETH Zürich. (In German)