

氷河水路の氷壁融解について：氷河での測定と室内実験

ISENKO Evgeni (北大低温研)

1. はじめに

氷河を流れる融水は、内部・底面に浸透し、複雑な排水システムを形成することがよく知られている。氷河排水システムを研究することは、さまざまな視点から面白いのである (Röthlisberger, 1972)。それは、消耗流出水量、氷河内部水量、氷河湖決壊の流量などが分かるために、重要である。氷河水路が変化する要因の一つは、氷壁融解過程であると考えられている。よって、本研究では、氷河での測定と室内実験の結果を計算結果と比べ、水路の氷壁融解速度が水温、流速などによってどう違うかを明らかにしようとする。

2. 氷と流れている水との熱交換

水路の壁の温度が流れている水の温度と違うとき、乱流の場合、その温度差 ΔT に比例する量の熱が水から壁へ流れる：

$$j = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

そして、係数 α は流速 v に比例する (Shatalina, 1990; Clarke, 2003)：

$$\alpha = Bv \quad (2)$$

($B = 2.64 \times 10^3 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)。したがって、面積 S_{wall} の氷壁へ時間 dt で流れる熱量は

$$\begin{aligned} dE_i &= j \cdot S_{\text{wall}} \cdot dt = \\ &= Bv\Delta T \cdot S_{\text{wall}} \cdot dt \end{aligned} \quad (3)$$

となる。その熱は質量 dm の氷を融かす：

$$dE_i = dm \cdot q \quad (4)$$

(q ：氷の潜熱)。3 式は 4 式と結合すれば、以下の熱交換方程式となる：

$$dm \cdot q = Bv\Delta T \cdot S_{\text{wall}} \cdot dt \quad (5)$$

さて、水路の幾何学を知れば、5 式によって氷壁融解速度を計算できる。

3. 室内実験

低温科学研究所の低温室で、氷ブロック内の人工水路の拡大を測定した。実験装置は、長さ 1.2 m の氷ブロック、水温調節できる給水システム、温度計からなっている (図 1)。上の水槽からの水は、氷ブロック内の水路を流れて、下の水槽に流入する。そして、ポンプによって上の水槽に戻る。上の水槽に入れているヒーターで、水温が不変に支えようとする。水温を測定するため、高精度温度計 (model D642, Technol Seven Co.) を利用した。

水路断面の初期形は円く用意されている。実験中でも、閉路の条件下、水路断面の周辺にそって融解が均一なので、不円形にならない。円形幾何学から

$$dm = \rho_i S_{\text{wall}} dr \quad (6)$$

したがって、5 式から融解速度は

$$\frac{dr}{dt} = \frac{B}{q\rho_i} \frac{Q}{\pi r^2} \Delta T \quad (7)$$

となる。流量を一定に支えていたので、7 式に流速 v から流量 Q に移した。7 式を積

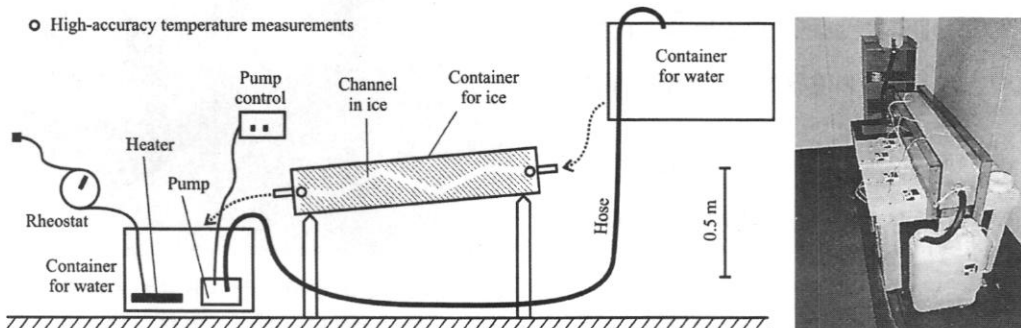


図 1 実験装置

分すれば、水路半径の変化が分かる：

$$r^3(t) = r_0^3 + 3 \frac{B}{q\rho_i\pi} TQ t \quad (8)$$

図2では、二つの実験に相当する8式で計算された曲線と実験で取られたデータが示されている。計算結果と実験結果とのいい一致から、流れのレジームは、乱流であったことが分かった。さらに、8式は、普段乱流である氷河内部閉路における流れに対しても応用できると示唆した。

4. 氷河での測定

1998年にカフカス Fisht 氷河、および2003年にパタゴニア Perito Moreno 氷河では、氷河上水流の水温、流速、氷壁融解速度を測定した(図3)。融解速度を測定するためには、氷にドリルされた穴に木材尺をさし込んで、その突き出ている部分の長さを毎日数回に測った。流速は、時計と浮遊物を使って直接に測定した。氷河上水流にも水が 0°C 付近なので、水温を高い精度で計らなければならない。そのためには、温度取りで取られた数日間で平均された水温データを使った。水位が変化しても温度センサーが水中から出ないように、固定されていないセンサーの仕組みを工夫して、水路にセットした(図4)。

私たちと他の研究者(Marston, 1983)にもよく観察されたのは、氷河上水路は、その断面が変化せずに、氷を融かし、深くなることである。その断面は、幅が深さの約4倍である半楕円形に考えられる。その幾何学では、融解速度 dr は水路が深める速度となる。その場合：

$$dm = \rho_i a \Delta x \cdot dr \quad (9)$$

ここでは、 a ：水路の幅、 Δx ：水路にそっての短い距離。また、潤辺は $\frac{\pi}{2} a \cdot 0.79$ となり、氷と水との境界である氷壁の面積は：

$$S_{\text{wall}} = 0.79 \frac{\pi}{2} a \Delta x \quad (10)$$

5,9,10式を結合すれば、水路が深める速度は次のようになる：

$$\frac{dr}{dt} = 1.24 \frac{Bv}{q\rho_i} \Delta T \quad (11)$$

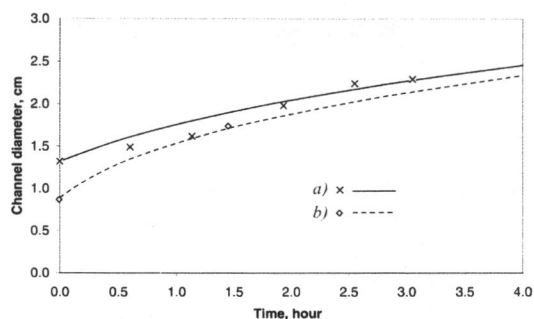


図2 水路直径の変化。曲線は8式による計算結果、印は実験で取られたデータ。a) 初期直径 1.3 cm、時間 183 min、水温 0.25°C ；b) 初期直径 0.9 cm、時間 87 min、水温 0.65°C

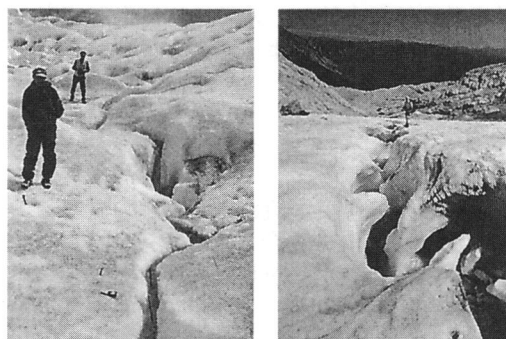


図3 パタゴニア Perito Moreno 氷河(左)とロシアの北カフカス Fisht 氷河(右)の表面上チャンネル

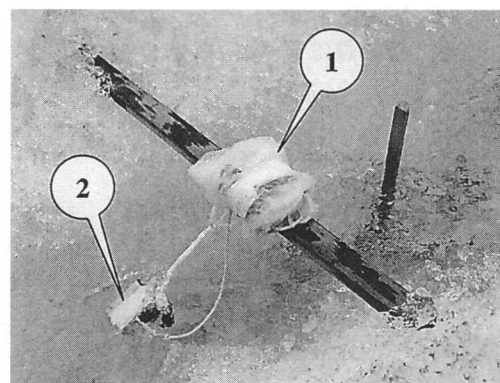


図4 氷河上の水流にセットされる温度取り：1)データロッガー；2)センサー

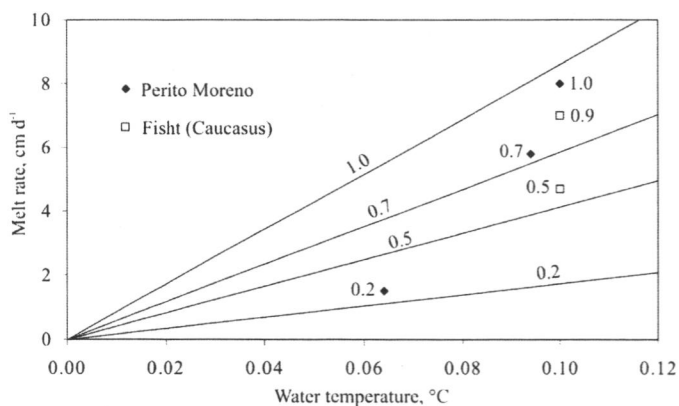


図5 水温による氷河上水路における氷壁融解の速度。直線は11式による計算結果、印はそれぞれ Perito Moreno 氷河と Fisht 氷河での測定結果。数字は流速(m/s)を示す。

図5には、11式で計算された直線が書かれている。精度の低い測定にもかかわらず、氷河で得られたデータが計算結果と非常に一致することが分かった。

5. 結論

氷と流れている水との熱交換関係式に基づいた計算を、氷河での測定と室内実験で確かめた。明らかになったことは、以下にまとめられている。

a) 流速と水温だけ測定すれば、水路の氷壁融解速度が分かる。

b) 氷河上の水路の場合、その融解速度は流速と水温に正比例することが分かった。

c) その計算方法は氷河水文学に対して広く活用できることが分かった。

6. 謝辞

室内実験の際には、ロシア科学アカデミーの地理学研究所の B.R. Mavlyudov さん、パタゴニア Perito Moreno 氷河で色々手伝っていただいた低温研の成瀬廉二助教授、長岡大学の佐藤和秀さんに、たいへんお世話になりました。ここに感謝の意を示します。

7. 参考文献

Clarke, G.K.C., 2003. Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring-Hutter formulation. *J. Glaciol.*, **49** (165), pp. 299-313.

Marston, R.A., 1983. Supraglacial stream dynamics on the Juneau icefield. *Annals of the Association of American Geographers*, **73** (4), pp. 597-608.

Röthlisberger, H., 1972. Water pressure in intra- and subglacial channels. *J. Glaciol.*, **11** (62), pp. 177-203.

Shatalina, I.N., 1990. Heat exchange in the processes of ice freezing and melting. *Library of Hydroengineering No.95*. Leningrad, Energoizdat, 120 p. (In Russian).