

スイスアルプス・ローヌ氷河における過去100年の流動速度変化

西村大輔 (北海道大学環境科学院), 杉山慎 (北海道大学低温科学研究所),
Andreas Bauder (スイス連邦工科大学), Martin Funk (スイス連邦工科大学)

1. はじめに

氷河は気候の変化に応答してその大きさを変化させるため、気候変動の指標として重要である。氷河は主に上流域での降雪により質量を増加し(涵養)、下流域での融解により質量を失う(消耗)ため、その質量変化は涵養と消耗のバランスにより決定される、しかしながら10 - 100年以上の長い時間スケールでは、涵養域から消耗域への氷の流動が非常に重要な役割を果たし、その詳細を知る事なしに氷河変動は予測できない。

これまで氷河の流動に関する研究は多く行われてきた。しかし、氷河変動の時間スケールに対して氷河研究の歴史が浅いため、100年以上の時間スケールで氷河の形状変化と流動速度を比較した研究はほとんど行われていない。

氷河の流動は大きく氷体内部の粘性流動と氷河底面流動に分ける事が出来る。氷河底面が圧力融解温度に達している氷河では融解水が底面流動を生じさせると考えられており、氷河全体の流動を考える上で底面流動の寄与は重要である。しかしながら、氷河底面は厚い氷体の下にあり、底面状態を広範囲かつ長期的に観測することは極めて困難である。

本研究は1. 氷河形状と流動速度の観測値の蓄積のある氷河を対象に100年を超える時間スケールで氷河形状が有意に変化した前後での流動状態を比較する。2. 流動速度と氷河形状のデータを用いて数値実験を行い、過去100年の温暖谷氷河底面流動性の変化について議論する。

2. 研究対象地

スイス・アルプス中央部(46° 35' N, 8° 23' E), ローヌ(Rhone)氷河は、小氷期以降急速に後退しつつある約8 kmの長さの温暖谷氷河である(Huss and others, 2008)。17世紀から絵画、写真、地図、DEM (Digital Elevation Model)によりその消長が記録されてきた。

(1) 地図と、航空写真による解析から1874-1882 (Mercanton, 1916), 1928-1930 (Jost, 1936), 1959, 1980, 1991, 2000 (Zahno, 2004; Bauder and others, 2007)の各年における氷河表面地形、(2) 1874年から1910年にかけて、氷河上に配置した石の移動を年ごとに観測した、特に氷河下流側半分について詳細な表面流動速度二次元分布(Mercanton, 1916)、(3) アイスレーダによる底面地形(Zahno, 2004)、(4) スイス連邦工科大学によるローヌ氷河の1960年以降の継続的な航空写真、が得られている。これらのデータにより1874年まで遡る氷河の三次元分布と二次元表面流動速度分布を知る事が可能である。

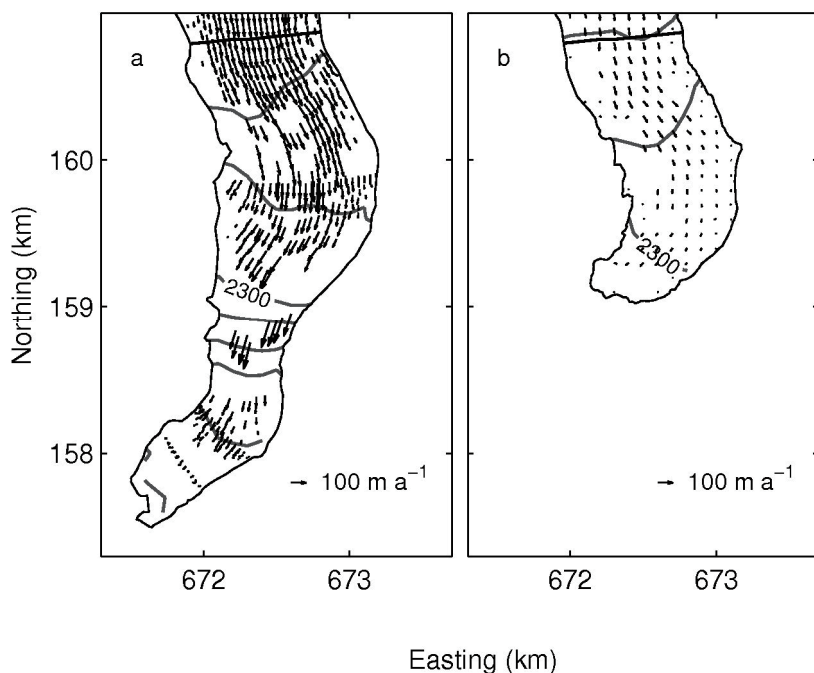


図 1. a.1874-1910 年, b.2005-2006 年におけるローヌ氷河流動速度分布. 等高線は表面高度(100 m 間隔), 座標はスイス座標系を示す. 太線は数値計算を行った氷河横断線を示す.

3. 手法

3.1 表面流動速度と表面高度の解析

1970-1971, 1981-1982, 1999-2000, 2005-2006年の航空写真を航空写真解析装置KERN DSR 15-18によって解析し, 氷河上の石やクレバスの移動を追跡することでローヌ氷河下流側半分の表面流動速度二次元分布を100 m 間隔で得た. また同時に, 写真測量によって氷河表面高度を求めることで氷厚の変化も明らかにした. 一方, 1874年から1910年の観測で測量された石の位置(Mercanton, 1916)をデジタルデータ化して, 表面流動速度分布を得た.

3.2 数値実験

明らかになった流動速度変化の原因, 特に底面流動の変化を調べるため, 氷河平衡線から約 1.5 km 下流にとった氷河横断プロファイル(図 1 の太線)を対象に数値実験を行った. 数値実験は氷を非圧縮性の連続体とし, 剪断応力と氷体にかかる重力の釣り合いの式,

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho g \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (1)$$

を有限要素法で解く事によって氷河横断面内の流動速度の水平成分を計算した. ρ は氷の密度, g は重力加速度, S は表面高度, τ_{ij} は剪断応力を表す. 氷の構成方程式は Glen の流動則(Glen, 1955; Nye, 1957),

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = A \tau_e^{n-1} \cdot \tau_{ij}, \quad (2)$$

を与えた。 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ は歪み速度、 τ_e は実効応力を表す。 実効応力の指数 n を3とし、流動定数 A には近隣に位置するウンターアール氷河で求められた $75 \text{ MPa}^{-3} \text{ a}^{-1}$ (Gudmundsson, 1999) を使用し、過去100年の間に変化していないものと仮定した。 底面剪断応力に一次比例する底面流動則、

$$u_b = C \tau_b \quad (3)$$

を仮定し、測量で得られた表面流動速度を再現するように、応力係数 C を決めた。 ここで u_b は底面流動速度、 τ_b は底面剪断応力を表す。

4. 結果と考察

航空写真測量と過去のデータのデジタル化によって図1のように表面流動速度の2次元分布を得た、ローヌ氷河では、1874年から2006年の間に氷河全域で氷厚が減少すると同時に、流動速度が顕著に低下していることが明らかになった。 たとえば氷河平衡線から約1.5 km下流(図1の太線)では、氷河中央部で氷厚が320 mから270 mに15%低下し、流動速度が 100 m a^{-1} から 50 m a^{-1} に50%低下した。 図2に示すように数値計算によって測量データを再現した。 底面流動の応力係数 C はそれぞれ1878年に $340 \text{ m a}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ 、1970年に $250 \text{ m a}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ 、1981年に $280 \text{ m a}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ 、2000年に $170 \text{ m a}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ 、2006年に $150 \text{ m a}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ となった。 この結果は (1) 過去100年の間に底面流動の応力係数が減少した、すなわち、氷厚の減少による粘性変形量の減少に加えて氷河底面の流動性が減衰したことが過去100年の流動速度低下をもたらした可能性、または、(2) 氷河底面流動は底面応力に一次比例する流動則で表す事ができない可能性を示す。 今後、底面応力の指数を変えて実験する必要がある。

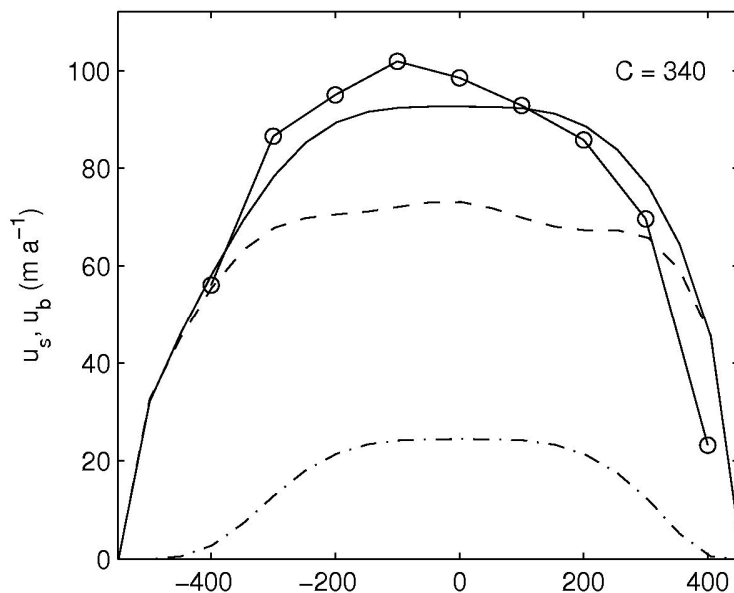


図2. 図1太線部分の1878年の流動速度。観測値(○)，実線と破線は底面流動応力係数 C を $340 \text{ m a}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ とした時の表面流動速度と底面流動速度，一点鎖線は底面流動なしで計算した表面流動速度を示す。

5. まとめ

航空写真測量と過去のデータのデジタル化により1874年から2006年間の表面流動速度と氷河の形状を定量化した。また氷河形状から氷河横断面内流動速度を計算する数値実験で、表面流動速度を再現するよう底面流動則の応力係数を決めた。結果は(1)氷河底面の流動性が減衰したことが過去100年の流動速度低下をもたらした可能性、または、(2)氷河底面流動は底面応力に一次比例する流動則で表す事ができない可能性を示した。

謝辞

スイス連邦工科大学水理水文氷河学研究所, Hermann Bösch氏に航空写真解析を一から教わった。また, 大村纂教授, Heinz Blatter教授, Patrick Riesen氏にスイスにおける研究のサポートをして頂いた。記して御礼申し上げます。

参考文献

- Bauder, A., M. Funk and M. Huss. 2007. Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Ann. Glaciol.*, **46**, 145-149
- Glen, J. W. 1955. The creep of polycrystalline ice. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser A*, **228**, 519-538
- Gudmundsson, G.H. 1999. A three-dimensional numerical model of the confluence area of Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. *J. Glaciol.*, **45**(150), 219-230.
- Huss, M., A. Bauder and M. Funk. 2008. Determination of seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *J. Geophys. Res.*, **113**, F01015.
- Jost, W. 1936. Die seismischen Eisdickenmessungen am Rhonegletscher 1931. *Denkschr. Schweiz. Naturforsch. Ges.*, **71**, 26-42
- Mercanton, P.L., ed. 1916. Vermessungen am Rhonegletscher /Mensuration au glacier du Rhône:1874-1915. *Neue Denkschr. Schweiz. Naturforsch. Ges.*, **52**.
- Nye, J. F. 1957 The distribution of stress and velocity in glaciers and ice sheet. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, **311**, 445-467.
- Zahno, C. 2004. Der Rhonegletscher in Raum und Zeit: neue geometrische und klimatische Einsichten. (Diplomarbeit, ETH Zürich.)