

# 口一又川流量から見積もる口 一又氷河融解量

2016 スイス氷河実習 レポート

北海道大学環境科学院地球圏科学専攻 修士2年 古川 峻人

北海道大学環境科学院地球圏科学専攻 修士1年 柴野 雄介

北海道大学環境科学環境起学専攻 修士1年 久保 匠

## Abstract

We investigated daily ablation rate of the Rhone glacier from the discharge of the Rhone River at Gletsch. The Rhone river has two main water sources above Gletsch, one is the main stream from the Rhone river, and the other the Muttbach River. We calculated the fraction of each source, and estimated that approximately 92.3 % of the discharge was supplied from the Rhone River. Assuming that the supraglacial evaporation and subglacial infiltration are negligible, the estimated daily discharge is equivalent to average ablation rate of the Rhone glacier by  $2.74 \text{ cm d}^{-1}$  from 3<sup>rd</sup> to 4<sup>th</sup> of September, 2016. Mass balance analyses of chemical data such as water temperature, pH, and electric conductivity supported the estimated fraction of two water sources. Finally, we compared the estimated ablation rate of the Rhone glacier with those estimated by so-called “degree-day method”, which showed consistency with all their simplistic approaches.

# 1 はじめに

山岳氷河は夏の雪や氷の融解、冬の雪の涵養といった季節変化の中で質量をバランスさせ定常的に存在している。夏の融解水はときに地形により氷河の末端で氷河湖を形成し (Tsutaki et al., 2011)、そこに端を発する河川を形成する。こうした川は氷河の麓の水源として古くから付近の住民に利用されてきた。特にアルプスの氷河の融解水は氷河の麓のみならず、ヨーロッパの広い範囲で流域の人々に供給され生活・経済活動に不可欠なものとなっている。

フランスの四大河川に数えられるローヌ川はスイス中央部に位置するローヌ氷河(46.57°N, 8.38°E)から流れ出た融解水が源になっている。夏季は気温の上昇に伴ってローヌ氷河が融解する。この融解水は氷河湖を經由し、ローヌ川として麓の集落グレッチに流下する。すなわち、ローヌ氷河の融解量はグレッチ付近の流量の大部分をまかなっている。

一方、ローヌ氷河は 1865 年に最初の観測が行われて以来、今日まで継続的に後退しており、1874 年から 2007 年までに面積にして 22.2 %、体積は 23.6 %減少したと報告している (Farinotti et al., 2009)。これはローヌ川の流量に大きく影響を与えたと思われる。

そこで、本研究では 2016 年度スイスアルプス野外実習の一環として、9 月 3-4 日にローヌ川において水温、pH、電気伝導度 (EC)、流量の観測を行い、ローヌ川の流量データからローヌ氷河の融解量を推定することを試みた。ただし、ローヌ川はグレッチより上流にて近隣の小規模のマト氷河の融解水に涵養されるムト川と合流している。そこでムト川の流量観測も同様に行い、ローヌ氷河由来の流出量ならびにローヌ氷河の表面融解量を推定した。



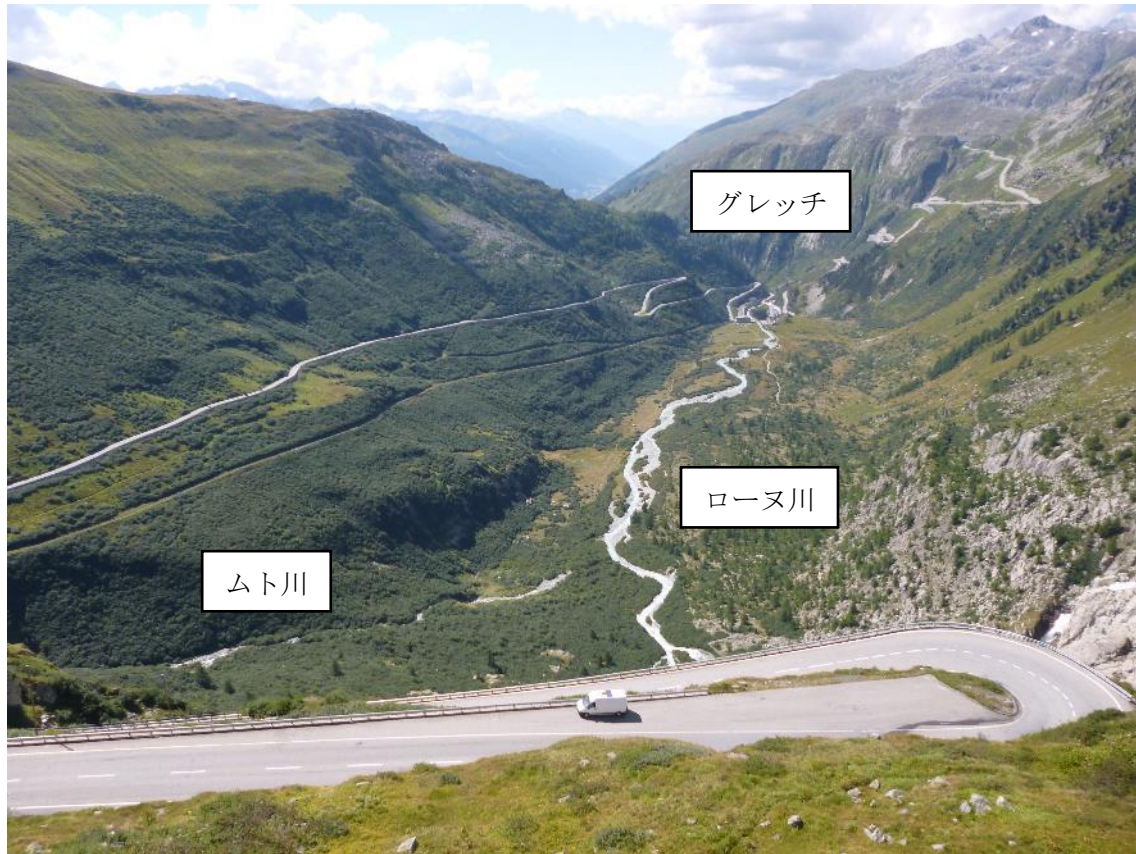


図1 ローヌ氷河上見る氷河湖(上)とローヌ氷河左岸から見下ろすローヌ川、ムト川、グレッチ(下)

## 2 研究対象地域

本研究では、スイスおよびフランスを流れる国際河川であるローヌ川の最上流に位置するローヌ氷河と、ローヌ川上流部を研究対象地域とした(第1図、第2図)。

ローヌ氷河は、スイス連邦中央部(46° 37' N、8° 24' E)に位置する谷氷河であり、末端部は標高2208m、最上部は標高3620mに達する(World Glacier Monitoring Service, 2012)。DEM(Digital Elevation Model)を用いた氷河の表面積と総量(体積)を推定する方法(Farinotti et al., 2009)からローヌ氷河の変動を推定すると、1874年では20.51km<sup>2</sup>であるのに対し、2007年では15.94km<sup>2</sup>であり、133年のうちに4.57km<sup>2</sup>縮小しているとされ、体積は0.709km<sup>3</sup>減少している(Funk et al., 2016)。このような近年の氷河の後退により、1990年代後期から氷河末端部に湖が出現し、さらに2005年には左岸側に小さな湖が出現した(Tsutaki et al., 2011)。この湖の形成によって氷河の流動速度が上昇し、急速に融解が進行している(小元ほか 2015)。

## 3 研究方法

ローヌ氷河上の表面融解水とクリオコナイトホール中の貯留水ならびに氷河湖水において合計7地点、ローヌ川と支流であるムト川においては合計7地点、総計14地点で水温・pH・ECの観測を行った(第3図)。氷河上においては、第3図に示す地点RG1・RG4・RG5において氷河表面を流れる流水を、地点RG2・

RG3 では氷河上に溜まった水を、RG6・RG7 では氷河湖の水を測定した。ローヌ川では第3図に示す R1-R5、支流のムト川では M1・M2 において河川水を測定した。また、ローヌ川とムト川の2地点 (第3図における R1・M1)で流量観測を行った。

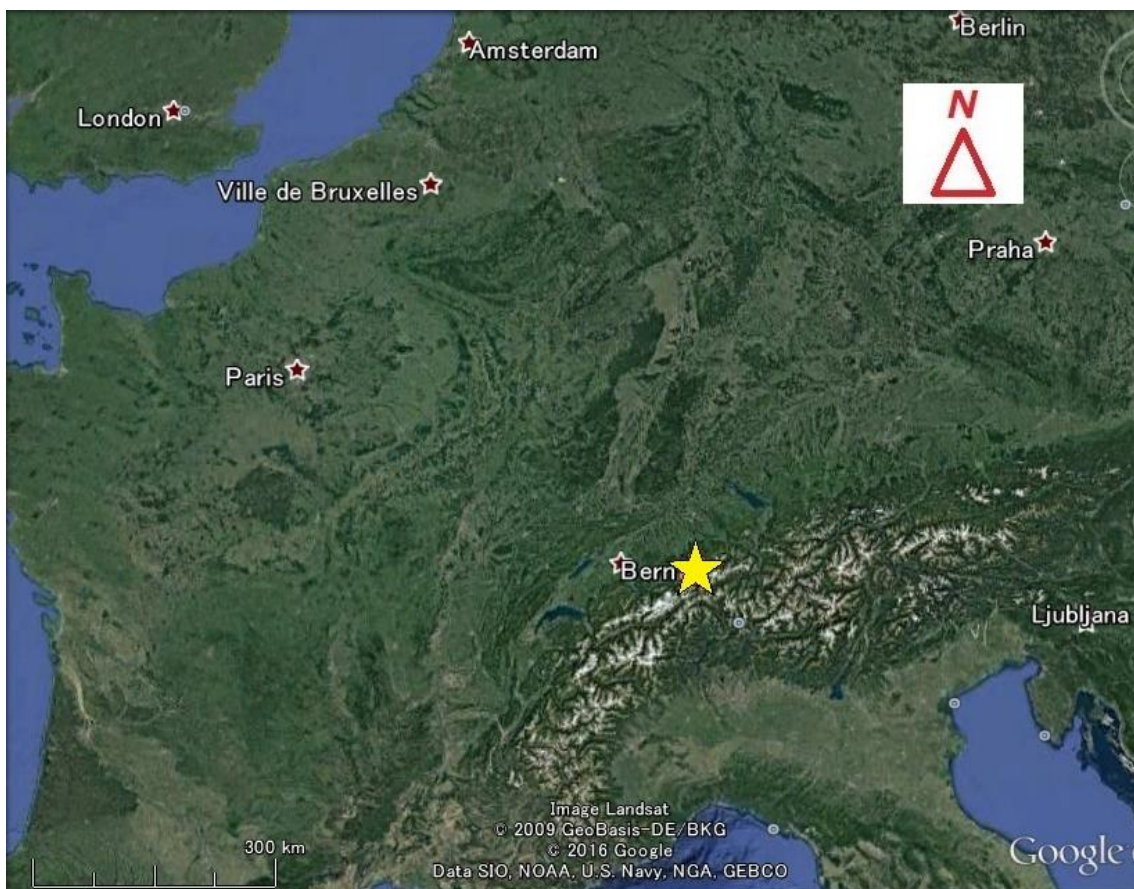


図2 研究対象地域 星印はローヌ氷河所在地 (Google Earth より作成)

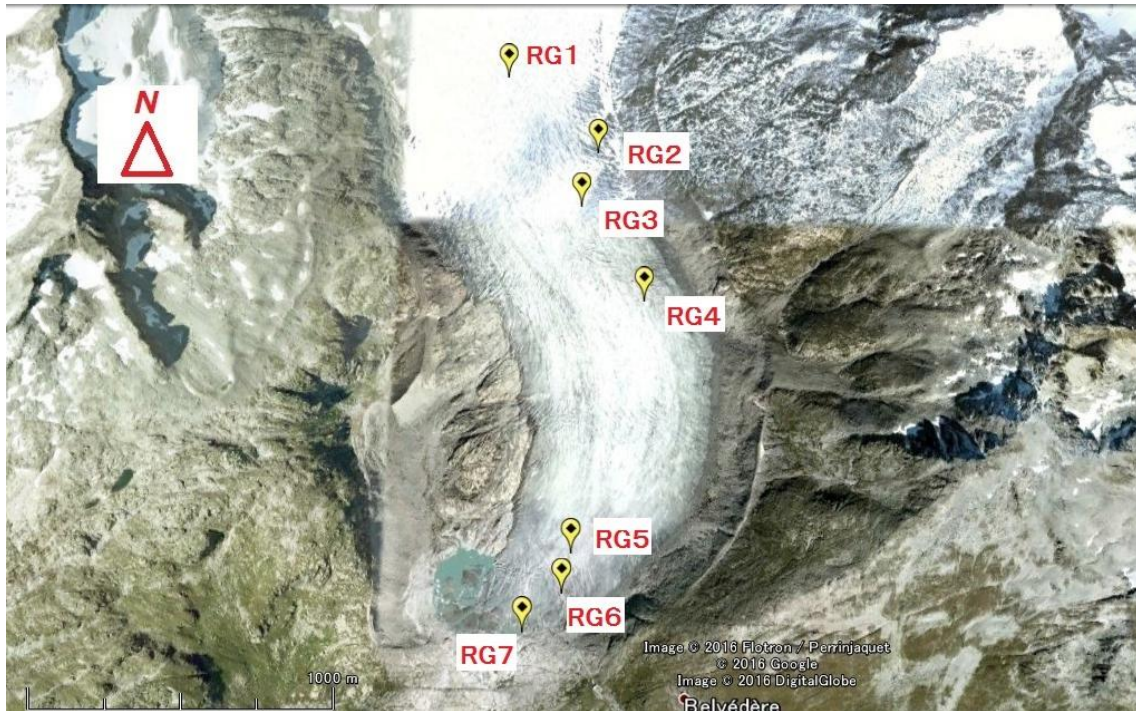


図3 ローヌ氷河上の観測点 (Google Earth より作成)



図4 ローヌ氷河とムト川における観測点 (Google Earth より作成)

水温測定には防水型デジタル温度計 (FUSO 社製 FUSO-372、測定精度 $\pm 0.1\%$ )、pH・EC 測定には EC 計複合機 (HANNA 社製 PH Combo 1、測定精度 pH :  $\pm 0.05$ 、EC :  $\pm 2\%FS$ )を用いた。流量観測では、2 地点 (第 3 図 R1・M1)において測量により河川の横断方向の断面図を作成し、さらに電磁流速計を用いて水深に対し河床から水面までの距離の 60%の位置で流速を観測した。また R1 においてのみ、9 月 3 日～9 月 4 日の期間にかけて水圧式水位ロガー (Onset 社製 HOBO U20、測定精度 $\pm 0.05\%FS$ 、 $\pm 0.5cm$ )を設置し、水位の時間変動を測定した。その後、9 月 3 日 11 時 30 分と 15 時 30 分、9 月 4 日 8 時 30 分の水位と流量の 3 回の観測結果から、水位流量曲線を作成し、この曲線に基づいて水位データを水量に換算し

た。

## 4 結果

### 4.1 水温・水質の測定結果

ローヌ氷河とローヌ川における水温・pH・EC測定の結果を5図・6図に示す。上部の数字は観測時間を示す。氷河上においてはほぼ一様の結果となり、水温は0℃近く、ECも0から2 $\mu$ S/cmと極めて低い値をとった。pHは5.8前後をとる地点(RG1・4・5)と、6.7前後をとる地点(RG2・3・6・7)があった。ローヌ川においては、水温・EC・pHともにムト川で高い値を示し、ムト川合流後はローヌ川本流の各観測値が上昇している。

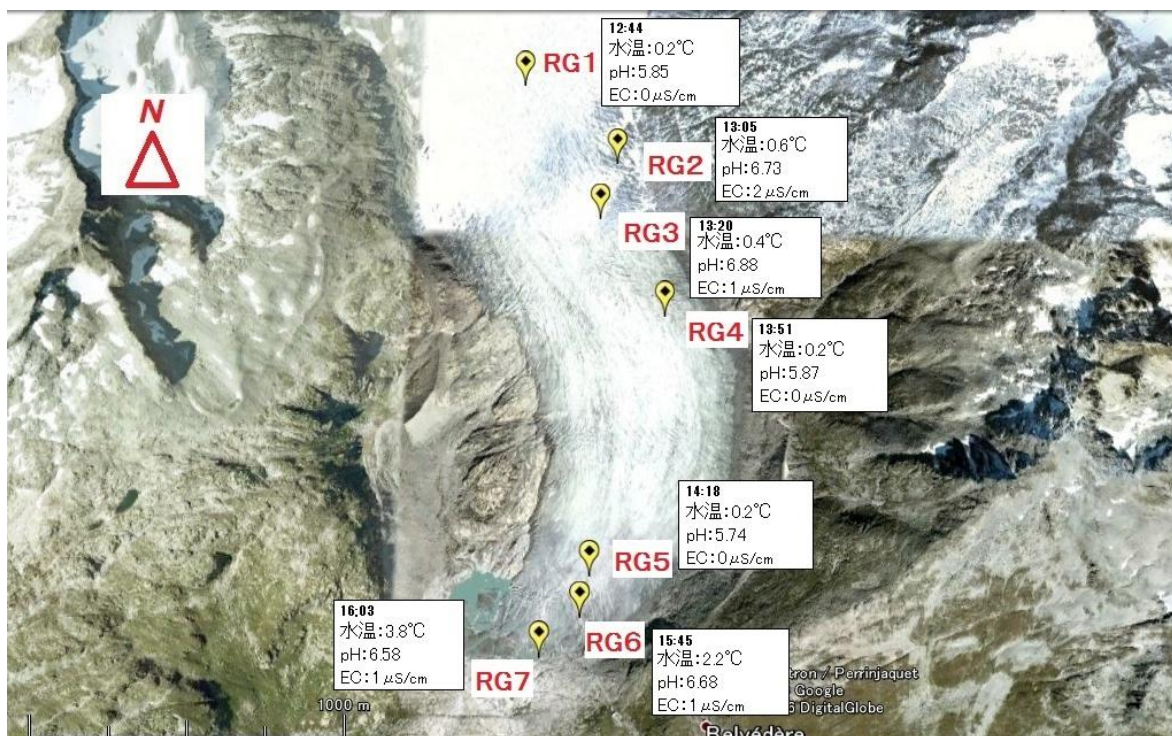


図5 ローヌ氷河上の観測結果

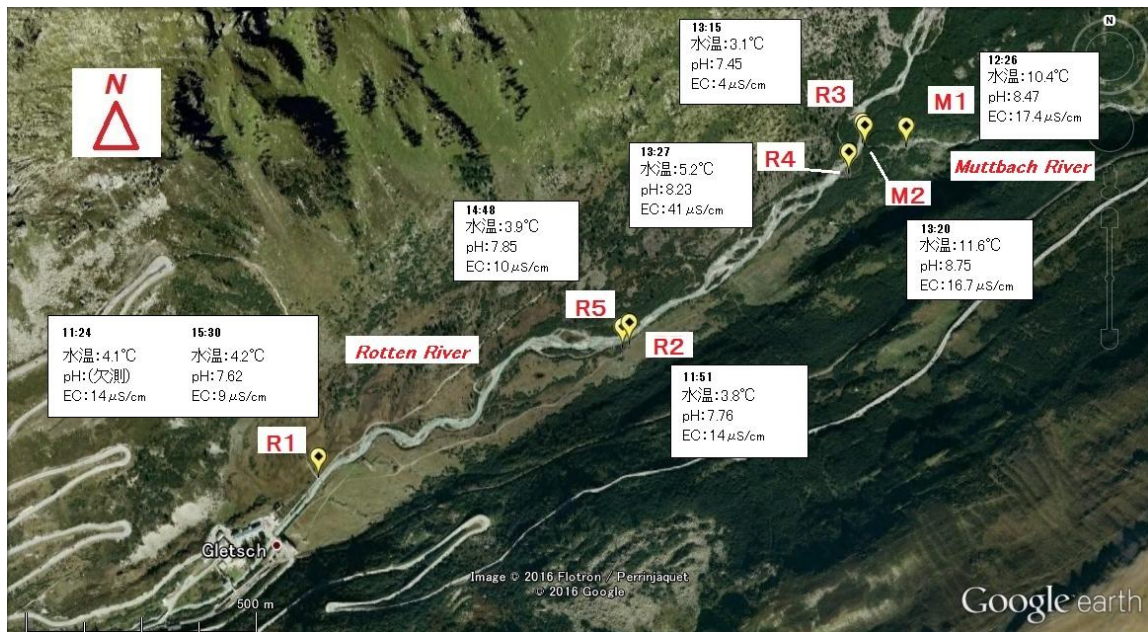


図6 ローヌ川とムト川の観測結果

## 4-2 ローヌ川の流量測定結果

ローヌ川の R1 はムト川との合流を経た水が流れている。R1 と後に述べる M1 における岸からの距離と深さの関係を図 7 に示した。ここで 3 日の(11:24)と夕(15:30)、4 日の朝(8:30)の 3 回流量の観測を行った。R1 での 3 回の流速の測定結果、また流量の計算結果を図 8 に示す。結果 3 日朝、夕、4 日朝でそれぞれ 3.08、5.47、2.95 m<sup>3</sup>/s となった。また R1 では 3 日の朝の観測の際圧力計を水上と水中に設置し、1 分毎の水位 (圧力計の上にある水の圧力) の変化をとらえることにした。得られた水圧のデータから気圧のデータを差し引くことで気圧の変化の影響を排除し、正しい水位の変化を求めた。この水位と 3 回の流量観測から得られる水位流量曲線が図 9 である。水位と流量の関係は一般に 2 次曲線で示されるが、今回は観測が 3 回であったため線形に近似し式を得た。得られた水位流量曲線と観測したローヌ川の水圧から流量を計算し時系列で示したものが図 10 の赤線である。

ムト川の M1 では 3 日の昼 (12:26) に 1 回流量の観測を行った。この結果を図 11 に示す。この観測で、ムト川の流量 0.267 m<sup>3</sup>/s を得た。この時間のローヌ川 R1 の流量は 3.35 m<sup>3</sup>/s と計算されている。よってムト川は水量として 7.7% 寄与していることが分かった。合流前のローヌ川はローヌ氷河の融解水であり、合流前のムト川も同様にムト氷河の融解水である。そこで近隣に存在する両氷河の融解量の日変化の割合は同程度とみなし、R1 における流量は両河川が 1 日を通して一定の割合で寄与するものとした。この前提を基に R1 におけるローヌ氷河由来の水の流量を図 10 の緑線で示した。

さらに今回の観測は 3 日朝より 4 日の朝の方が早い時間帯に行われたため、24 時間の流量を計算することができない。そこで 3 日朝と 4 日朝の流量に大きな差はないことに着目し近似することにした。4 日の 11:24 の流量は 3 日と同じであると仮定し 4 日の 8:30 から 11:24 を線形で結ぶことで 24 時間の流量を得た。この場合のローヌ氷河の融解量は  $37.3 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/day であった。

本観測で我々は流速のデータを川底から水面までの距離の 60 % の位置で取得したが、河川の流量を計



算するにあたり、流速を川底から水面までの距離の 40% の位置での値に補正する必要がある。そこで我々は、マンニングの公式を用いることによりこの補正を行った。補正の結果も川底からの高さ  $z$  における流速  $V(z)$  は以下のマンニングの公式によって表される。

$$V(z) = \rho g \theta / 2 \eta \times z (2h - z) \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は液体の密度、 $g$  は重力加速度、 $\theta$  はその地点の勾配、 $\eta$  は粗度係数、 $h$  は川底から水面の距離である。川底から水面までの距が 60% の地点の流速を  $V(z_1)$ 、40% の地点の流速を  $V(z_2)$  とすると、この 2 点で上のマンニング公式の波線部は等しいことより、

$$V(z_2) / V(z_1) = z_2 (2h - z_2) / z_1 (2h - z_1) \quad (2)$$

と計算できる。ここで  $z_2 = 2/3 \times z_1$  であるため、(  $40/60 = 2/3$  で計算した)。この値を先ほどの式に代入すると、

$$V(z_2) / V(z_1) = (12h - 4z_1) / (18h - 9z_1) \quad (3)$$

つまり、

$$V(z_2) = V(z_1) \times (12h - 4z_1) / (18h - 9z_1) \quad (4)$$

と計算することができ、従来求めていた値である  $V(z_1)$  と  $z_1$  から補正した値  $V(z_2)$  を求めることができる。

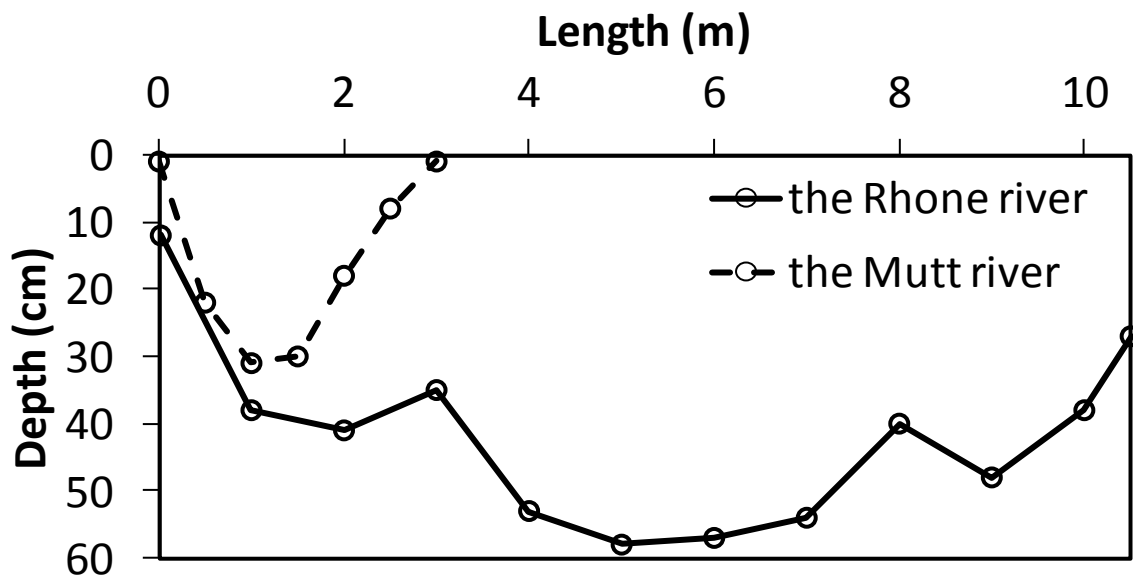


図 7 R1(ローヌ川)と M1(ムト川)の河川断面図

岸からの距離 (m)

(a)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10.5
水位 (cm)	12	38	41	35	53	58	57	54	40	48	38	27
流速 (m/s)	0	1.65	0.06	1.69	2.03	1.82	1.87	1.72	1.67	1.22	1.29	0
流量 (m <sup>3</sup> /s)	0	0.652	0.023	0.744	1.127	1.047	1.038	0.808	0.735	0.525	0.210	0

(b)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10.5
水位 (cm)	28	63	58	58	55	77	75	76	64	64	58	50
流速 (m/s)	0.17	1.51	0.64	1.79	2.48	2.38	2.4	2.08	1.6	1.5	2.99	0
流量 (m <sup>3</sup> /s)	0.077	0.914	0.371	1.011	1.637	1.809	1.812	1.456	1.024	0.915	0.807	0

(c)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10.5
水位 (cm)	16	38	39	38	57	60	50	52	47	48	39	31
流速 (m/s)	0	1.38	0	1.65	1.9	1.85	1.55	1.62	1.7	1.26	1.2	0
流量 (m <sup>3</sup> /s)	0	0.531	0.000	0.784	1.112	1.018	0.791	0.802	0.808	0.548	0.210	0

図 8 R1 における水位と流速の測定結果と流量の計算結果。(a), (b), (c), はそれぞれ 9 月 3 日の 11 時 24 分, 9 月 3 日の 15 時 30 分, 9 月 4 日の 8:30 の結果を示している。

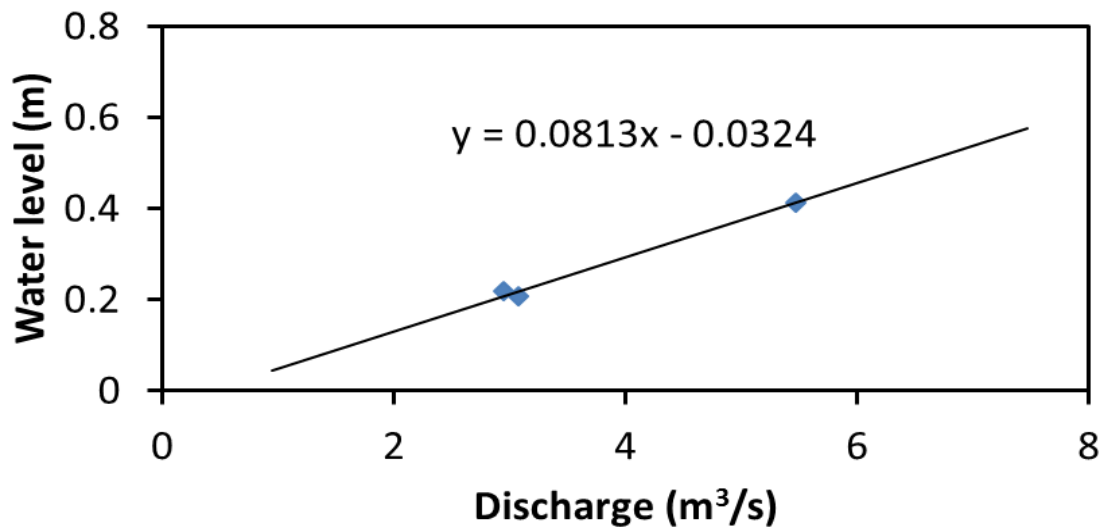


図 9 R1 における水位流量曲線

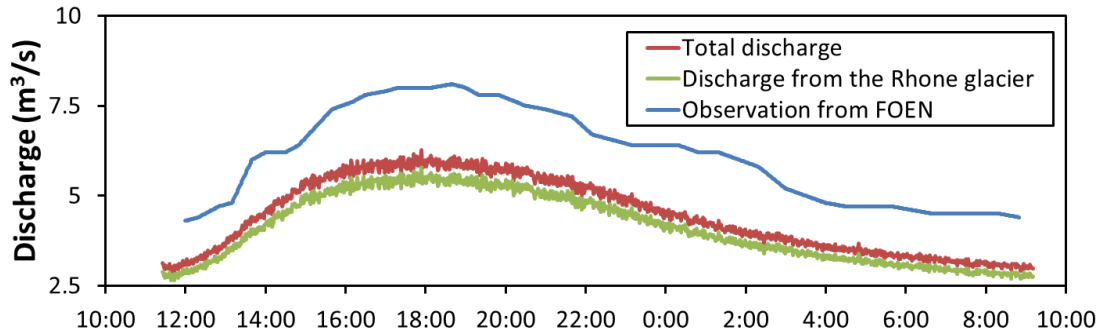


図 10 9月3日から4日の流量 (赤線はR1、緑線はR1からムト川の流量を差し引いたもの、青線はFOENにおけるグレッチでの流量)

	岸からの距離 (m)						
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
水位 (cm)	1	22	31	30	18	8	1
流速 (m/s)	0	0.25	0.76	0.86	0.68	0	0
流量 (m³/s)	0	0.033	0.116	0.103	0.044	0	0

図 11 M1 における 9月3日 12時 26分での水位と流速の測定結果と流量の計算結果。

## 5. 考察

### 5-1 ローヌ川の流量

本観測では我々はローヌ川の水位と流速の値を用いて、ローヌ川の流量を計算した。流量は本流と支流でそれぞれ値を導出し、本流から支流の値を差し引くことでローヌ氷河に起因する流量を求めた。図 10 に全流量とローヌ氷河由来の流量、また Federal Office for the Environment (FOEM) で提供されるグレッチでのローヌ川の観測データを示したが、我々が本観測で求めた流量は FOEM のデータよりおおよそ 1~2 m³/s 程低い値となった (図 12)。この要因として、我々は川底に存在する大きな石などを底面として水位を測定してしまったことが 1 つ考えられる。流量は水位と流速を掛けたパラメータであるため、水位の過小評価は結果として流量の過小評価にもつながる。しかし本観測では川底の様子を詳しく調査したわけではないため、どの程度の大きさの石がどの程度分布しているかという事象を観点に入れた、定量的な側面で計算値の違いを議論することは難しい。また我々が求めた流量は時間単位のスケールで見ればその増減を確かに確認できるが、分単位のスケールで見ると微かな増減を繰り返しながら全体的に値を変えていく。これは機器の測定方法に起因すると考えられる。水位の値は 1 分間隔で導出されるが、この水位の値は 1 分間の平均値ではなく、瞬間値として導出される。つまり水面が波打つような場所では波の最高地点と最低地点ではもちろん水位に差が生じることとなり、瞬間値を用いると同一の 1 分内でも

水位に若干の差が出ることになる。

我々の本流と支流の流量の計算結果から、ローヌ氷河からの融解水の寄与はおおよそ 92.3%、支流からの寄与はおおよそ 7.7%であることがわかった。この結果からローヌ川はローヌ氷河の融解水の寄与が大半を占めていることがわかる。また 1 分間隔での流量と先ほどの寄与率を用いて、本観測日(2016/09/03~2016/09/04)当たりのローヌ川を流れる氷河融解水の流量は  $37.2 \times 10^4 \text{ m}^3$  であることが計算できた。(Farinotti et al., 2009) によるローヌ氷河の面積は  $15.7 \text{ km}^2$  である。したがって、ローヌ氷河の融解水が蒸発や浸透によって失われていないと仮定すると、この観測日で計算出来たおおよそ 1 日当たりのローヌ氷河の融解量は 2.74 cm であることが分かった。以上の計算は、液体と固体の水の密度が等しいという仮定の下で行った。

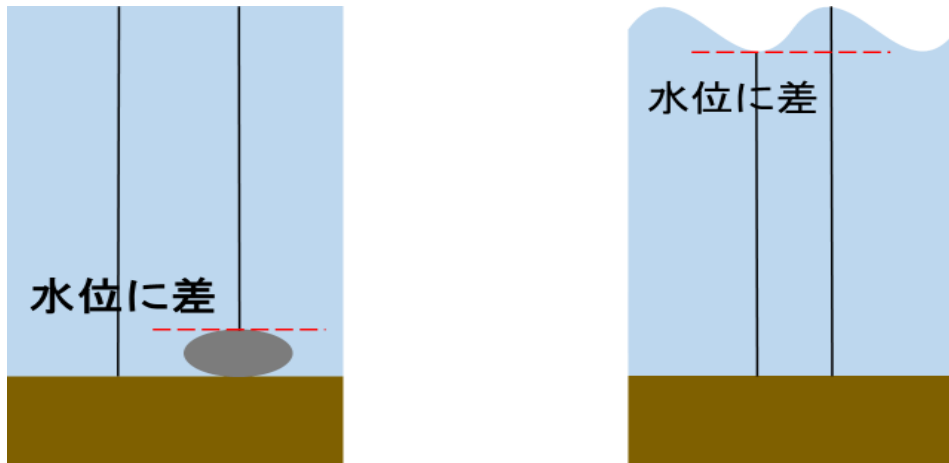


図 12 左は川底の石による、右は水面の揺らぎによる水位の違いを表している。

## 5-2 化学的データ(水温、pH、EC)を用いたローヌ氷河融解水と支流の寄与率の検討

3-1 でローヌ川の水はローヌ氷河融解水が約 92.3 % を占め、支流からの水が 7.7 % であることが計算された。本観測で得られた化学データを用いることにより、これらのデータの信頼性を検討した。

### 5-2-1 水温

水温はローヌ氷河上で約  $0\sim 1^\circ\text{C}$ 、氷河湖で約  $3^\circ\text{C}$  となり、河川では本流ではおおよそ  $4^\circ\text{C}$  で支流では高く  $10^\circ\text{C}$  を超える値となった。このことから水温はローヌ氷河上由来の融解水と支流の水で大きく異なり、その混合比を議論するにあたり良い指標とすることができると考えられる。支流との合流前の R3 での水温データと支流の M1 と M2 水温データの平均を用い、それぞれが 3-1 で計算された比率で混合したとすると予想される水温は約  $3.76^\circ\text{C}$  となることが考えられる。この結果は R4(水温  $5.1^\circ\text{C}$ )を除きすべてのデータが  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以下に収まった。よってこの混合比を水温に適用すると、我々が導出した結果を支持するものとなった。

### 5-2-2 pH

氷河・氷河湖の pH は  $5.7\sim 6.9$ 、河川本流の pH は  $7.5\sim 8.2$ 、支流の pH は  $8.5\sim 8.8$  であり、pH も水温と同様に融解水と支流の混合比を議論するにあたりよい指標とすることが考えられる。R3 の pH データと M1, M2 の pH データの平均から、それぞれが 3-1 で求めた比率で混合したとすると予想される pH は 7.48 となる。これは R4(pH 8.23)を除きすべてのデータが  $\pm 0.4$  内に収まった。よってこの混合比を pH に適用すると、同じく我々が導出した結果を支持するものとなった。

### 5-2-3 EC

氷河・氷河湖の EC は 0~2  $\mu\text{S/cm}$ 、河川本流の EC は 4~41  $\mu\text{S/cm}$  (R4 での 41 の高値については後に考察)、支流の EC はおおよそ 17  $\mu\text{S/cm}$  から EC も同様に混合比を議論するに当たりよい指標とすることが考えられる。R3 の EC データと M1 と M2 の EC データの平均からそれぞれが 3-1 で求めた比率で混合したとすると予想される EC は 4.98  $\mu\text{S/cm}$  となる。これは混合後の河川本流の EC (= 9 ~ 41  $\mu\text{S/cm}$ ) と比べ明らかに低い値となった。よって EC から 2 つの水の混合比を支持する結果は得られなかった。

水温・pH・EC のデータを用いて、我々が導出したローヌ氷河融解水が河川本流に占める割合の信憑性を確認した。水温と pH はその結果をおおよそ支持するものとなったが、EC は支持する結果とはならなかった。EC は予想される値より高い値を示したが、その理由は以下のように考えられる。1 つに周囲に植生土壌があることにより、そこから降雨による浸透水の流入が EC の上昇に寄与している可能性がある。またもう 1 つに付近の動物の糞などで汚染された水が河川に介入している可能性も考えられる。この 2 つの可能性を R1 での異なる時間の EC の変化からも裏付けることが可能である。R1 では午前の 11:30 頃に EC 値 14  $\mu\text{S/cm}$  を、午後の 15:30 頃に EC 値 9  $\mu\text{S/cm}$  を記録し、EC 値が低下していることが分かる。同時にこの時間の水量を見ると、11:30 では約 3.0  $\text{m}^3/\text{s}$ 、15:30 では約 5.0  $\text{m}^3/\text{s}$  であり水量は増加している。この時間での変化は気温上昇による氷河の融解量の増加に起因すると考えられる。氷河の EC 値は低く、表面からの融解水がほとんどを占めることが考えられ、この水は不純物の含有量が低い。このことから気温上昇などにより氷河からの融解水の水量が増えると、不純物を含まない水の水量が増加することとなり、その結果本流の下流域で汚染された水を希釈したと考えると辻褃が合う。

また R4 のデータに関しては EC だけではなく、全てのデータで予測される結果とは外れる値となった。本観測では写真などを用意することが出来なかったが、R4 付近でマンホールのようなものが確認できた。直接的な要因となっているか定かではないが、生活排水のようなものが R4 付近で流れ込み、結果として R4 で予測値とは異なる結果を招いている可能性が考えられる。

以上から化学データは周囲の環境の影響を受ける EC を除いた、水温・pH で我々が計算したローヌ氷河融解水の割合を支持するものとなり、我々が水量から導出した結果をさらに裏付けることができるだろう。

### 5-3 気温から見積もる氷河融解量との比較

我々が計算した河川の水量からの 1 日の氷河融解量と、気温を用いた融解量の値と比較を試みた。気温による氷河の 1 日の融解量は、(Shiraiwa et al., 1997)により以下のように計算することができる。式：

(1)

$$M = f \Theta_a \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで M は 1 日の融解量( $\text{cm}/\text{day}$ )、f は day degree factor ( $\text{cm} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ )、 $\Theta_a$  は 1 日の平均気温である。本観測では f として (shiraiwa et al., 1997)が Koryro Glacier の異なる 2 点で導出した、 $f = 0.72$  と  $f = 0.55$  を両方使用しそれぞれで計算を行った。気温のデータはローヌ氷河付近に設置した WTX520 の 9/3 の 00:00 から同日の 23:55 分までのデータを用いた。データは 5 分おきに取りられ、その値を 1 日あたりで平均した。

また氷河上では気温は一樣ではなく、高度が上がるにつれ低くなるため、(1)式を用いる場合、高度変化による気温 T の変化を考慮しなければならない。そこで我々は気温減衰率  $-6^\circ\text{C}/\text{km}$  を使用し、測定を行った気温データをそれぞれの高度での値に換算した。具体的には標高 100m ごとに区切り、面積計算の

都合上例えば標高 2340 m ~ 2440 m を 2400 m の気温の適応範囲として、2440 m ~ 2540 m を 2500 m の気温の適応範囲とし 2300m での気温から  $6 \cdot 100/1000 = 0.6$  °C 引いた気温を用いた (図 13)。測定を行った標高はおおよそ 2300 m であるためこの気温が基準となる。ローヌ氷河の標高はおおよそ 2280 m ~ 3630 m であり、2300 m での気温は高度 2280 ~ 2240m の範囲のみ適応させた。また 3600 m の気温は氷河の末端の都合上高度 3540 ~ 3630 の範囲で適応した。

このように 1 部の例外を除き高度 100 m 毎で区切った 1 日の融解量  $M$  が求められるが、その後その領域の面積による違いを考慮しなければならない。面積  $S$  は Google map でローヌ氷河の地図上から任意の計算ソフトを用いて算出した。面積の導出過程を図として載せる (図 14)。図 14 の囲んだ赤い部分が面積として導出できる。そして、融解量  $M$  とその領域の面積  $S$  から融解量を堆積として計算できる (融解堆積  $V_X = M_X \times S_X$  :  $X$  は気温の基準とした高度)。この融解堆積をそれぞれ高度 100 m 毎で区切った領域で計算し、その和を計算する ( $\sum V_X = V_{2300} + V_{2400} + \dots + V_{3300}$ )。  $\sum V_X$  はローヌ氷河の全体での融解量となるため、これをローヌ氷河の面積:  $S_{Rhône}$  で割ると、ローヌ氷河全体でみた融解した高さ  $M_{Rhône}$  を求めることができる。(式 2)

$$M_{Rhône} = \sum V_X / S_{Rhône} \dots \dots \dots (2)$$

計算の結果、 $M_{Rhône}$  は 4.88 cm ( $f=0.72$ )、3.72 cm ( $f=0.55$ ) となった。我々が計算した 2.74 cm と比べると若干高い値となったが、これは我々の水量からの計算では氷河湖からの蒸発量や、地中への浸み込みなどを考慮に入れていないため、気温からの計算よりも値が小さくなることは合点が付く。以上より我々の水量による 1 日の氷河融解量の値は概ねその値を正確に見積もったということが出来るだろう。

先の計算ではローヌ氷河の面積を、水量からの計算では (Farinotti et al., 2009) の 15.9 km<sup>2</sup>、気温からの計算では我々の独自の計算値 14.3 km<sup>2</sup> を用いているため、正確な比較を行うためには値をどちらかに統一する必要がある。そこで再度我々の計算した面積値から水量によるローヌ氷河融解量を見積もるとおおよそ 2.60 cm/day となる。その値は先と比べて高くなるが考察に影響を与えるほどではない。ここで、(Ferranti et al., 2009) の結果は 2007 年という今からおおよそ 10 年前の値である点。我々の計算結果は、氷河の領域決定の不十分さなど、それぞれ様々な不確定要素を含んでいるという点を十分に留意しなければならない。

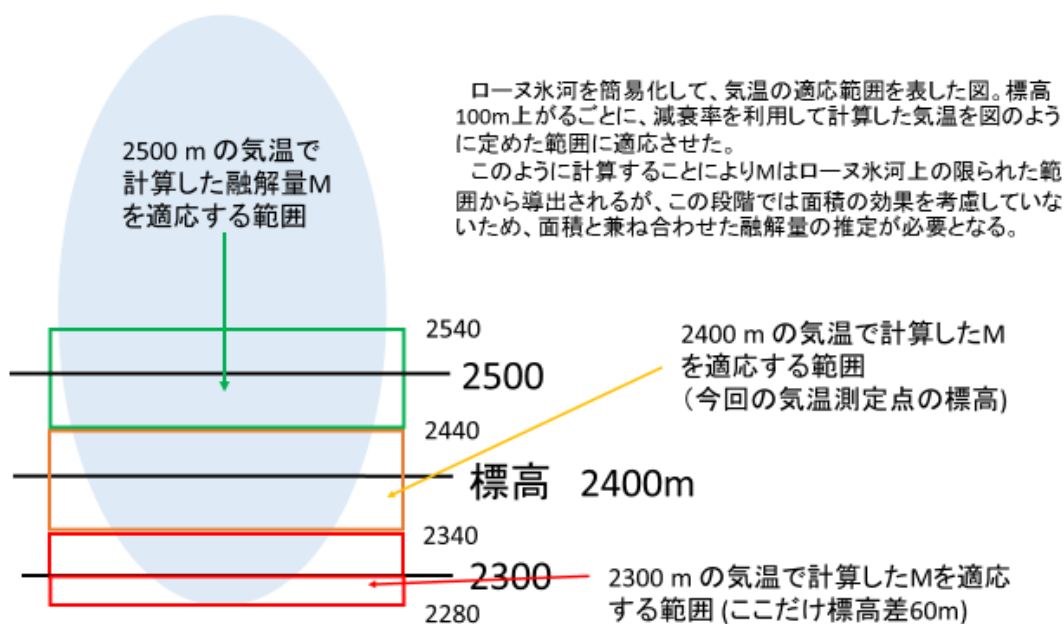


図 13 融解量  $M$  を求めるに当たり、気温の適応範囲をローヌ氷河を簡易化して表した図。2300 m での気温を基準にし、100 m 毎に減衰率から気温を求め、その気温がどこの範囲で適応されるかが図の四角で囲った範囲で分かる。

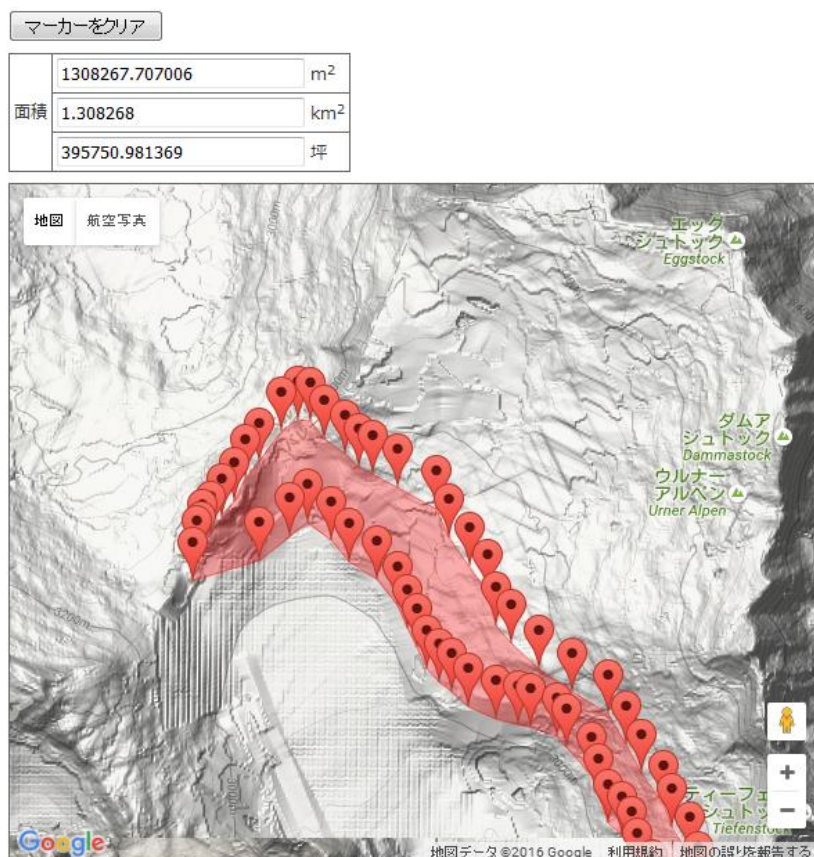


図 14 面積の導出方法 等高線に沿って赤い部分で囲った部分はその面積

#### 5-4 今後の課題

本観測で我々は河川の流量からローヌ氷河の融解量を推定したが、この手法による推定値は過小評価した値となっている。要因の 1 つは氷河や氷河湖からの蒸発で、ローヌ氷河の融解水は 1 度氷河湖に蓄積されたのちに河川水となり流出する。この蓄積期間での湖からの蒸発量は無視することはできないだろう。また氷河湖からや河川からの地中への浸み込みも値に影響している可能性も考えられる。気象データを用いた蒸発量の推定など、さらなる正確な水量推定がより精密な融解量推定には必要である。また我々の求めた流量は FOEM の水量と比較すると 1 ~ 2 m<sup>3</sup>/s 低い値となった。我々はこの要因を石などによる水位値の違いに起因すると考え、水位の正確な決定も次回の観測には期待される。また、流速値を我々は Manning の公式で補正した値を用いたが、実際に正しい測点で計測した値は、この補正值とはまた違うものとなる可能性もある。

氷河湖の化学データによれば、EC の値から本観測では、氷河融解水のほとんどが表面からの融解で占められていることが分かった。しかし時期により氷河湖の EC 値が上昇する可能性もあり、この場合氷河の底面からの融解水が割合を増したことが推定できる。そのような場合での 1 日の氷河融解量を推定し、本観測で計算した値と比較するとまた新しい知見が得られるかもしれない。

最後に気温による融解量の推定を試みたが、この計算には多くの不確定要素を含んでいる。始めに気

温を氷河近辺の観測点を基準とし、気温減率を用いて高度変化に順応させている点である。より精密な平均気温測定は、氷河上でそれぞれの高度毎に継時的な変化を追い行う必要がある。Degree day factor として、我々は (Shiraiwa et al., 1997) の Koryto 氷河の値を用いたが、本来はローヌ氷河上で一定の高度毎にその値を計算すること必要がある。この作業も融解量推定の正確さの向上に繋がるだろう。また、面積の導出も非常に大まかなものであるため、その正確さの向上が見込まれる。気温以外の要素、例えば水蒸気量なども融解に影響していることも踏まえる必要も、関与する程度によっては考慮する必要があるだろう。

## 6 結論

本研究ではローヌ氷河の融解水が流れるローヌ川とローヌ川に合流するムト川の水温、pH、EC、流量を観測することでローヌ氷河の融解量を推定することを目的とした。FOEM が提供するローヌ川の流量観測のデータと比較すると、本観測は過小評価となった。これは本観測が川底の詳細を把握できずに行われたため、石や地形の影響を受けたため水位を正しく測ることができなかったためと考えられる。ムト川がローヌ川に合流しているため正確に氷河の融解量を推定するためには、ムト川がローヌ川に与える影響を明らかにする必要がある。そこでローヌ川、ムト川の流量から双方が合流後に寄与する割合を計算した。この計算結果は水温、pH とともに整合性がとれムト川が合流後のローヌ川に与える影響は計算した流量と概ね合致した。しかし、EC に関しては周囲から少量かつ高濃度の電解質が流れ込んだ影響のためか、辻褃の合う結果は得られなかった。この結果からローヌ氷河は 1 日に領域全体を平均して 2.34 cm/day の低下を示すことが明らかとなった。さらに本研究では氷河付近で観測された気温を用いて融解量の計算を行ったところ、計算結果は過大評価となった。これは流量観測の結果に大気への蒸発・土壌への浸み込みによる効果を考慮していないためであると考えられる。

## 引用文献

小元久仁夫, 大村 纂 (2015), 急速に後退するスイスのローヌ氷河—写真と資料による氷河の後退史—, 地学雑誌, 124(1), 127-135.

Fariotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Truffer, M. (2009). A method to estimate ice volume and ice thickness distribution of alpine glaciers. *Journal of Glaciology*, **55**(191), 422-430.

Funk, M., Huss, M., and Bauder, A. (2016) Glaciology on Rhonegletscher, *スイス氷河実習* 2016, 91-104.

Shiraiwa, T., Y.D. Muravyev, S. Yamaguchi, G.E. Glazirin, Y. Kodama and T. Matsumoto (1997), Glaciological features of Koryto Glacier in the Kronotsky Peninsula, Kamchatka, Russia. *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 27-36.

Tsutaki, S., Nishimura, D., Yoshizawa, T. and Sugiyama, S. (2011), Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. *Annals of Glaciology*, **52**(58), 31-36.

World Glacier Monitoring Service (2012), Fluctuations of Glaciers. *World Glacier Monitoring Service*, Zurich, **10**, 130.