2022 年度　スイス氷河実習

Rhone 川の河川調査
氷河の融解が
Rhone 川の水位・流量へ与える影響

2022 年 10 月 17 日

北海道大学環境科学院環境物質科学専攻　修士 1 年　井村朱里
北海道大学環境科学院環境起学専攻　　修士 1 年　六井菜月

目次

1. はじめに 2
2. 手法 4
2.1. 観測地点 4
2.2. 観測手法 5
2.2.1. 河川観測 5
2.2.2. 氷河湖での観測 6
2.3. 解析手法 7
2.3.1. 水位の算出 7
2.3.2. 流量データの入手 7
3. 結果 8
3.1. 気象観測 8
3.2. ローヌ川と氷河湖における水位の時間変動 9
3.3. 水位流量曲線 11
4. 考察 14
4.1. ローヌ川と氷河湖における水位と気温・水温の関係 14
4.2. 過去の実習の水位流量曲線から求めた流量 14
4.3. 水位流量曲線 15
4.4. 降水量と流量の関係 16
5. 結論 18
6. 謝辞 19
7. 参考文献 20

1. はじめに

山岳氷河の融解水は、生活用水、農業・工業用水、水力発電による電力など、周辺で生活する人々にとって非常に重要な水資源である。その一方で、氷河の崩壊や川の氾濫などの災害を引き起こす原因となることもあり、社会に直結する大きな問題となりうる。ゆえに、氷河の融解量を観測することは水資源の安定的な利用のためだけでなく、防災の観点からも、極めて重要であるといえる。

特にスイスはその国土に多くの山岳氷河を有しているため、スイスで生活する人々にとって氷河は貴重な水資源・重要な観光資源・災害の原因であり、生活・経済活動に密接に関わっている。したがって、古くから氷河の研究が盛んに行われており、氷河を流域にもつ河川の流量観測においても観測データは豊富である。

ローヌ（Rhone）川は、スイス連邦中央部 Valais 州に位置するローヌ氷河（座標 46.57°N, 8.38°E）の融解水を源流とし、スイス・フランスを縦断したのち地中海に流れ出る河川である。その全長は 813 km、流域面積は約 97,800 km^2 で、山岳地帯、農業地帯、都市部を流れ、ヨーロッパの広い範囲で人々に淡水資源を供給している。夏季のローヌ氷河の融解水は、氷河末端の氷河湖(図 1)を経てローヌ川として流下する。さらに左岸から合流するムト(Mutt)川と合流し、麓の集落であるグレッチ（Gletch）に流下する（図 2)。なお、ムト川は、ローヌ氷河より小規模なマト氷河の融解水に涵養される河川であることから、グレッチでの流量の大部分はローヌ氷河からの融解量によるものであると考えられる。

ローヌ氷河は年々後退し続けており、1865 年から継続して行われている観測（Huss et al., 2008）の成果から、1874 年から 2007 年の間に面積 22.2%、体積は 23.6%減少したと報告されている（Farinotti et al., 2009)。この後退の原因は、地球温暖化だけでなく、ローヌ氷河周辺の地質構造を反映した地形の存在も関与していると指摘されている（小元・大村, 2014)。このようなローヌ氷河の後退は、融解水の増加をもたらし、ローヌ川の流量に大きく影響を与えていると考えられる。

2022 年度スイス実習では、氷河を流域に持つ河川の特性を知ることを目的として、9 月 1 日から 9 月 4 日にかけて、ローヌ川流域グレッチにてローヌ川における河川流量観測を行い、さらに 9 月 2 日から 9 月 4 日にかけて、ローヌ氷河にて気象観測と氷河湖における水位観測を行った。本レポートでは、これらの観測結果、ローヌ氷河の融解量と河川の流量の関係性について、気象データと関連して考察する。

図 1.　ローヌ氷河末端部と氷河湖（2022 年 9 月 2 日撮影）

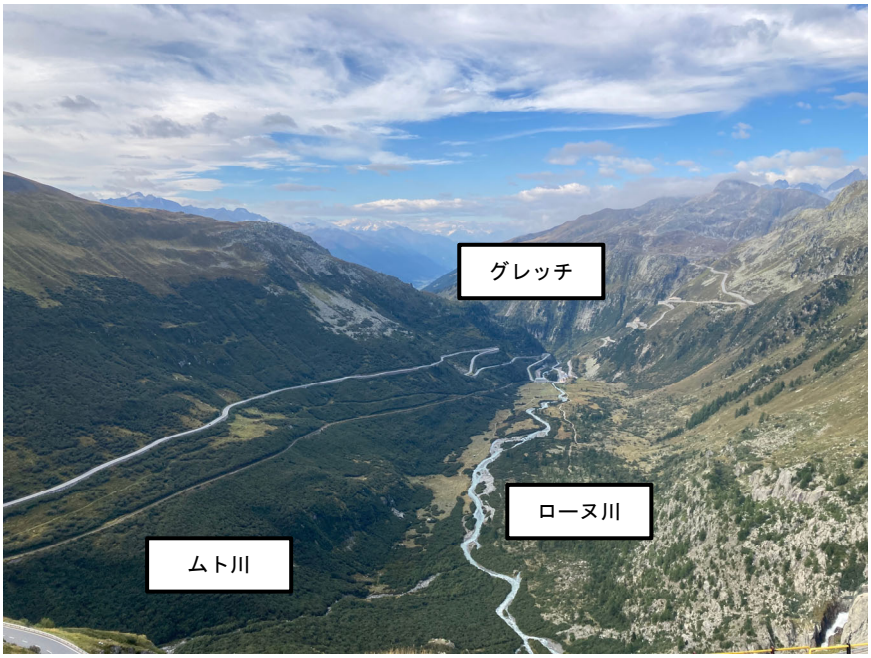

図 2.　ローヌ氷河から見たローヌ川、ムト川、グレッチ（2022 年 9 月 2 日撮影）

2. 手法

2.1. 観測地点

本研究では、ローヌ氷河末端に位置するローヌ氷河湖とローヌ川上流部を研究対象地域とした。河川観測は、2022 年 9 月 1 日から 9 月 4 日までローヌ川流域グレッチの橋（46.56°N, 8.36°E）にて、以下の図 3 の位置に水圧式水位計を設置した。また、ローヌ氷河末端の氷河湖の観測および気象観測は、2022 年 9 月 2 日から 9 月 4 日まで、以下の図 3 の位置にそれぞれ水圧式水位計と気象観測機を設置した。

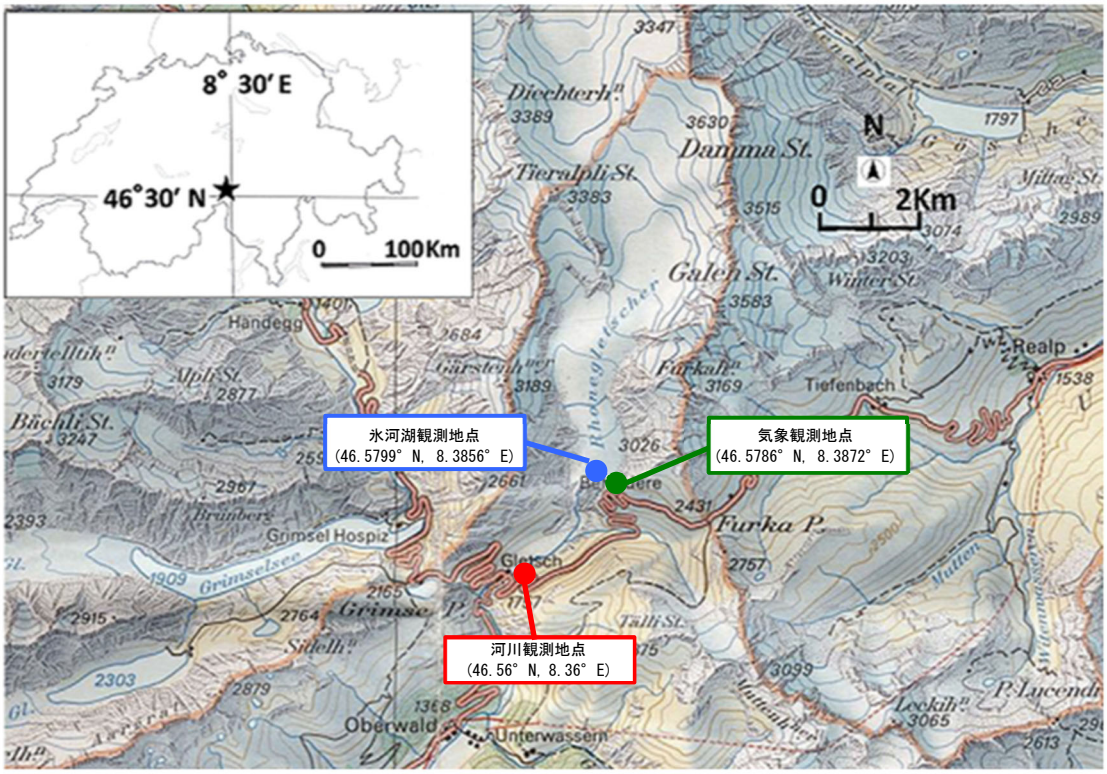

図 3.　本研究における観測地点の場所を示した地図

2.2. 観測手法

2.2.1. 河川観測

ローヌ川上流部のグレッチの教会の上流にある木製橋の直下の河床に、水圧式水位ロガー（図4；Onset 社製 HOBO U20L, 測定速度：±0.1%FS , ±1cm）を設置し、水圧と水温の時間変化を 1 分間隔で測定した。また、同地点の河岸に気圧測定ロガー（図 4；Onset 社製 HOBO U20, 測定速度：±0.05%FS , ±0.5cm）を設置し、気圧と気温の時間変化を 1 分間隔で測定した。測定期間は 2022 年 9 月 1 日 13 時 10 分から 9 月 4 日 9 時 42 分である。

このとき、河床に設置した水圧計が測定する全圧は、以下の式で表される。

$$\text{全圧 } P \;=\; \text{水圧 } P_W \;+\; \text{大気圧} P_A$$

したがって、今回必要な水圧 P_W は以下の(1)式で求めた。

$$\text{水圧 } P_W \;=\; \text{全圧 } P \;-\; \text{大気圧} P_A \cdots (1)$$

図 4.　水圧式水位ロガー（左）と気圧測定ロガー（右）

図 5.　河川観測地点；グレッチの橋から見たローヌ川上流部の様子（2022 年 9 月 1 日撮影）

2.2.2. 氷河湖での観測

氷河湖においても、ローヌ川での観測と同様にして全圧・水温と気圧を測定し(図 6)、氷河湖の水圧 P_W を求めた。観測期間は、2022 年 9 月 2 日 10 時 33 分から 9 月 4 日 10 時 17 分である。さらに、気象観測として、氷河湖から数十メートル高い位置に自動気象測器（Visala 社製 WXT520）を設置し、気温，湿度，降水量，風向及び風速を 10 分間隔で測定した（図 7)。観測期間は、2022 年 9 月 2 日 10 時 20 分から 9 月 4 日 9 時 42 分である。

図 6.　氷河湖での水圧測定ロガー設置の様子（2022 年 9 月 2 日撮影）

図 7.　気象観測地点の様子（2022 年 9 月 4 日撮影）

2.3. 解析手法

2.3.1. 水位の算出

ローヌ川と氷河湖の水位は、それぞれの地点における水圧と気圧データから、以下の(2)式を用いて時間ごとの水位H[cm]を求めた。

$$H = \frac{(P_w - P_A)}{\rho_W \, g} \cdots (2)$$

H ： 水位 [cm]

P_W ： 水圧 [kPa]

P_A ： 気圧 [kPa]

ρ_W: 水の密度 (1000 kg/m^3)

g ： 重力加速度 (9.8 m/s^2)

2.3.2. 流量データの入手

今回の実習では時間の制約からグレッチにおいてローヌ川の流量観測は行わなかったので、スイス公表の流量データを使用した。ローヌ氷河の直下に位置するグレッチでは、今回我々が河川観測を行った橋の約 300 m 下流において、スイス連邦政府によってローヌ川の水位と流量の観測が 1956 年から継続して行われている。我々の観測地点とスイス連邦政府の観測地点の距離は近く、両地点間に合流する支流はない。したがって、両地点の流量はほぼ等しいと仮定し、本レポートでは、我々が測定した水位データとスイス公表の流量データを用いて水位流量曲線（H-Q 曲線）を作成することを試みた。過去の実習では、流量を測定して水位流量曲線を描いていたが、3〜4 点のみのプロットで水位流量曲線を引いていたため、一般的な水位流量曲線がそうであるように、綺麗な二次曲線を示す結果であるかどうかわからなかった。しかし、今回はスイス公表データを使うので、十分な数の流量データが使えるため、自分達で観測した水位データと合わせて水位流量曲線を作成すれば、綺麗な二次曲線を描くグラフが得られるのではないかと考えた。

スイス公表データは、スイス連邦環境庁（FOEN ; Federal Office for the Environment）のホームページ（ https://www.hydrodaten.admin.ch/en/2268.html ）で常時公開されている。グレッチにおけるローヌ川の水位と流量の時間変動のデータは 20〜25 分間隔でリアルタイムに公表されている。なお、この FOEN データは過去 7 日間の測定データが公表されており、時間とともに常時データが更新されていくため、過去のデータは見ることができなくなる。

3. 結果

3.1. 気象観測

図 8 に気象観測の結果を示す。9 月 2 日 10:20 ～ 9 月 4 日 12:00 の期間の気温、風速、降水量の 10 分間隔のデータである。

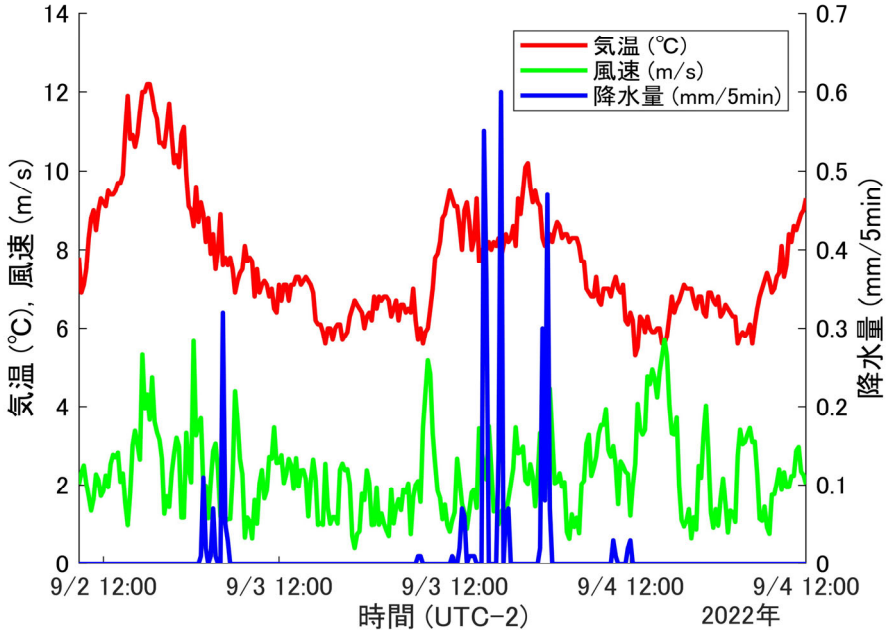

図 8.　ローヌ氷河湖付近での観測で得られた気象観測結果

気温は日周期変動を示している。以下の表 1 に、上記の結果から最高気温、最低気温とその時の時刻、観測期間中の平均気温をまとめたものを示す。

表 1.　9 月 2 日 10:20 ～ 9 月 4 日 12:00 の期間中の気温データのまとめ

	9/2	9/3	9/4
最高気温 [℃]	12.2	10.2	9.3
時刻	15:00, 15:10	17:00	12:00
最低気温 [℃]	6.4	5.6	5.3
時刻	23:50	9:50	0:20
平均気温 7.7 ℃			

また、風速に関しては、日周期は見られないが、観測中大きく変動していることがわかる。観測期間中の最大風速、最小風速、平均風速はそれぞれ 5.073 m/s (9/4 2:20)、0.403 m/s (9/3 5:10)、2.253 m/s であった。さらに、降水量は 9/2 の深夜、9/3 の昼間と夜間に観測され、期間中の降水量の最大値は、0.6 mm/5 min (9/3 15:10) であった。

3.2. ローヌ川と氷河湖における水位の時間変動

水圧式水位ロガーによる 1 分毎の水位データを(2)式に代入し、ローヌ川と氷河湖における 1 分毎の水位変動をそれぞれ算出した。それらのグラフに水温と気象観測データからの気温と共にプロットしたグラフを図 9 に示す。

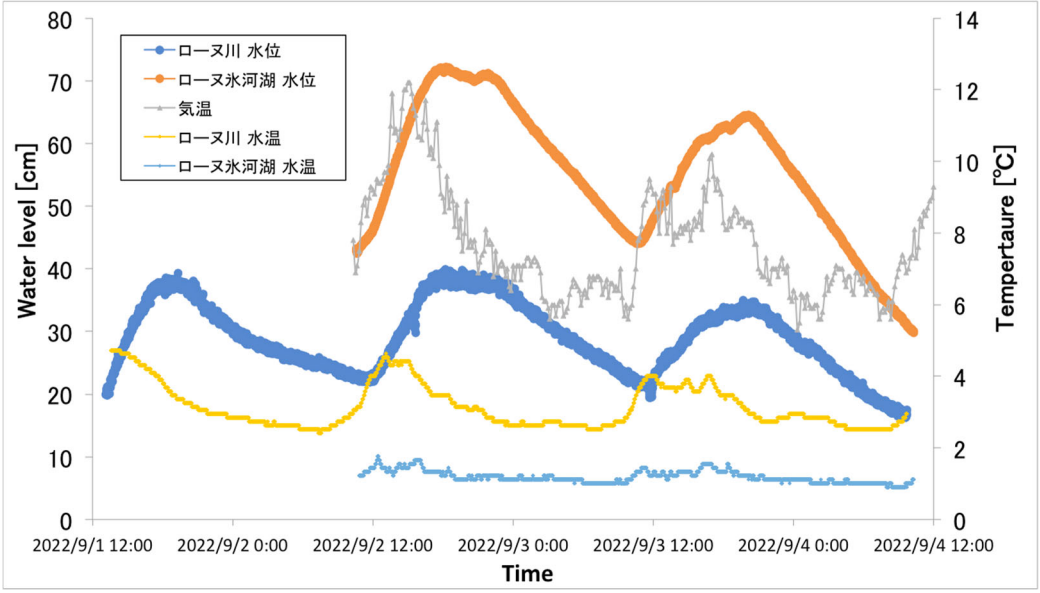

図 9.　ローヌ川、ローヌ氷河湖における水位、水温および気温の時間変動

このグラフから、氷河湖の水温は観測期間を通してあまり変動がなく、ほぼ一定で観測期間中通して 0.9～1.8 ℃であるのに対し、そのほかの気温、ローヌ川水位、氷河湖水位、ローヌ川水温は日周期変動を示すことがわかる。以下の表 2 に、上記の結果からローヌ川、ローヌ氷河湖における水位、水温の各観測日における最大値及び最小値とそのときの時刻、観測期間中の平均値をまとめたものを示す。なお、測定開始初日および測定最終日の値は 24 時間測定していないので、その日の最大値若くは最小値ではない可能性がある。

表 2.　ローヌ川、ローヌ氷河湖における各水位、水温のデータのまとめ

			9/1	9/2	9/3	9/4
ローヌ氷河湖	水位 [cm]	最大	―――	72.19	66.72	55.35
		時刻	―――	18:17	0:00	0:00
		最小	―――	42.45	44.04	31.08
		時刻	―――	10:37	10:38	9:40
		期間中平均	55.31 cm			
	水温 [℃]	最大	―――	1.764	1.548	1.112
		時刻	―――	12:24-12:30	16:12-17:02, 18:19-18:27	0:00-1:25, 1:29-1:31, 2:20, 3:01-3:22, 4:31-4:41, 10:09-10:17
		最小	―――	1.112	1.003	0.893
		時刻	―――	19:01-20:07, 21:14-21:21, 21:47-22:56, 23:02-23:59	5:15-5:17, 5:57-8:48, 8:59-9:48, 8:59-9:04, 9:12-9:42, 9:45-9:47, 22:58-23:02, 23:39	8:23-8:24, 8:26-9:34, 9:43
		期間中平均	1.186 ℃			
ローヌ川	水位 [cm]	最大	39.31	39.92	36.78	29.37
		時刻	19:18	18:12	0:08	0:19
		最小	19.85	21.95	19.45	16.22
		時刻	13:14	11:45	11:43	9:36
		期間中平均	29.09 cm			
	水温 [℃]	最大	4.727	4.623	3.998	2.943
		時刻	13:35-14:24	13:07-13:08	11:26-12:15	0:00-0:53
		最小	2.837	2.410	2.517	2.517
		時刻	23:30-23:59	7:26-7:35	6:18-7:35	4:31-8:25
		期間中平均	3.148 ℃			

3.3. 水位流量曲線

我々で測定し算出した水位データとホームページから読み取った FOEN の流量データを使って横軸に水位 H、縦軸に流量 Q をとったグラフを作成した（図 10)。

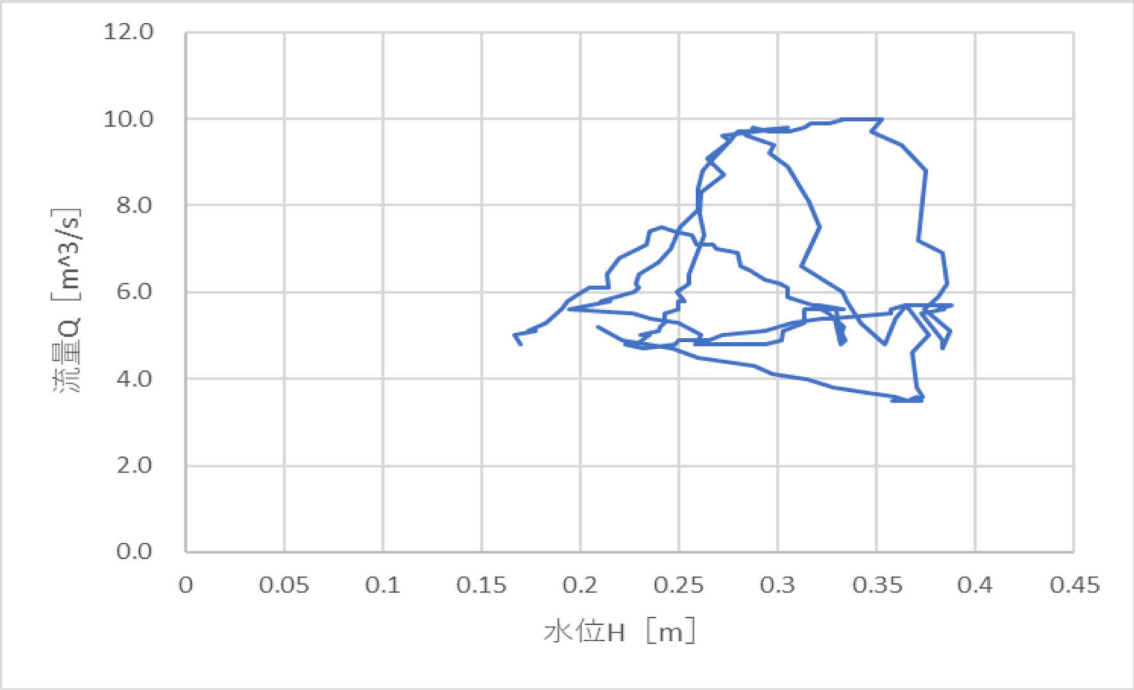

図 10.　我々で測定し算出した水位データとホームページから読み取った FOEN の流量データを使って横軸に水位 H、縦軸に流量 Q をとったグラフ。

曲線になるどころかこのようなグラフができてしまい、水位流量曲線は作成できなかった。水位と流量は同じ変動を示すはずなので、横軸に水位 H、縦軸に流量 Q をとったグラフはこのようにバラついたグラフにはならないはずである。そこで水位データと FOEN 流量データを横軸時間にしてプロットして見てみると、どうやら水位と流量のピークがずれており、流量がおよそ 12 時間水位より遅れているような挙動を示していた（図 11 上)。FOEN ホームページ（https://www.hydrodaten.admin.ch/en/2268.html ）を調べると、常時更新されて公開されているデータとは別に、過去 7 日間の水量データの時間変動のグラフが画像で公開されていた（生データはなかった)。そのグラフ(図 11 下)と先ほどのグラフ（図 11 上）の横軸時間を合わせて比較すると、測定した水位とずれずに連動していることがわかる。おそらく、今回我々がホームページで読み取ったリアルタイム更新されている方の水位と流量のデータは約 12 時間遅れて時間がずれて表記されているようであった。しかし残念ながら、そのことがわかったときにはその生データは更新されて見ることができなくなってしまっていたため、正しい流量データは得られなかった。

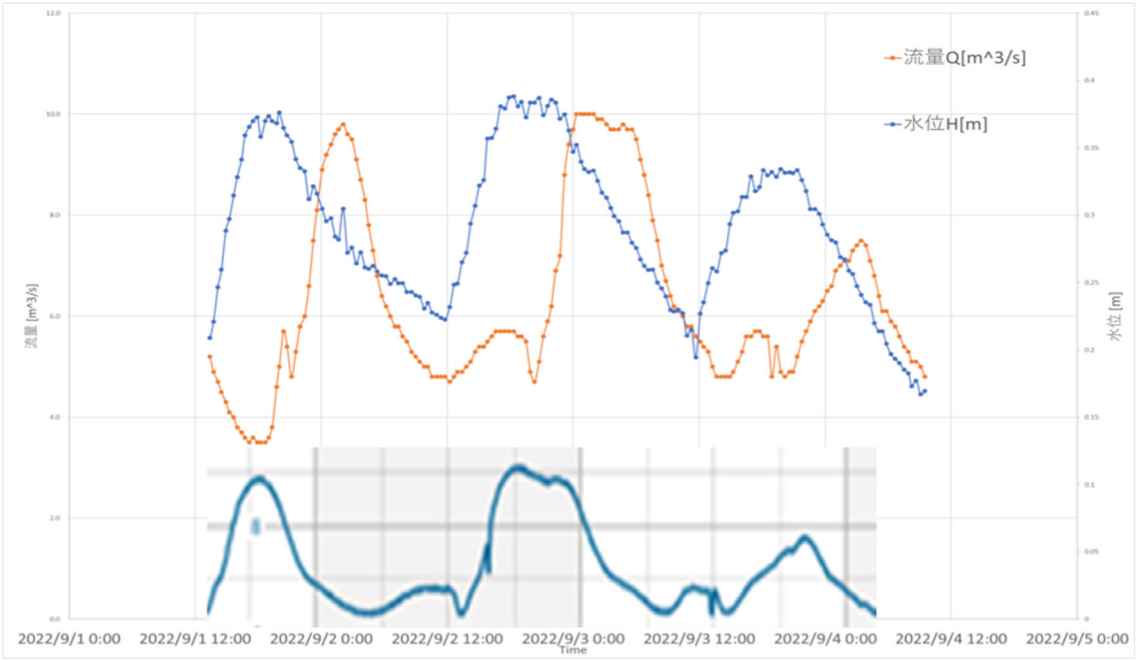

図 11.　水位と流量の時間変動。

（上）測定した水位と FOEN 流量。（下）FOEN ホームページの流量の時間変動の画像データ.

今回は水位流量曲線が作成できなかったので、過去のスイス実習（2016～2019 年度）で作成した水位流量曲線(表 3)に、我々が測定した水量データの値を代入して流量を算出した。その結果を以下の図 12 に示す。

表 3.　過去のスイス実習で作成した水位流量曲線

実習年度	求めた水位流量曲線の式
2016	$y = 12.333x - 0.\dot{3}985\dot{2}$
2017	$y = e^{\left(\frac{x\,[cm]+15.526}{36.882}\right)}$
2018	$y = 21.974x + 2.4668$
2019	$y = 13.08\ln(x\,[m]) + 25.02$

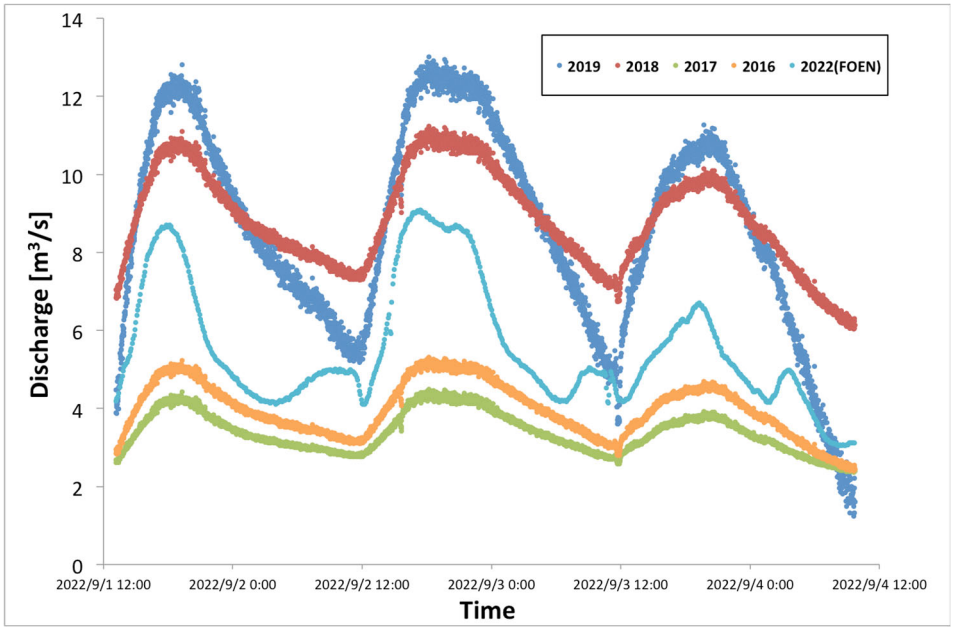

図 12.　過去のスイス実習で作成した水位流量曲線から求めた流量の時間変動

さらに、後日、FOEN に問い合わせをし、我々の観測期間中の水位と流量の生データを入手した。その流量データも上の図 12 に合わせて表示した。また、そのデータを用いて、今回の水位流量曲線を作成した(図 13)。求めて水位流量曲線の式は、$y = 0.028x^2 - 0.4994x + 8.8944$となった。

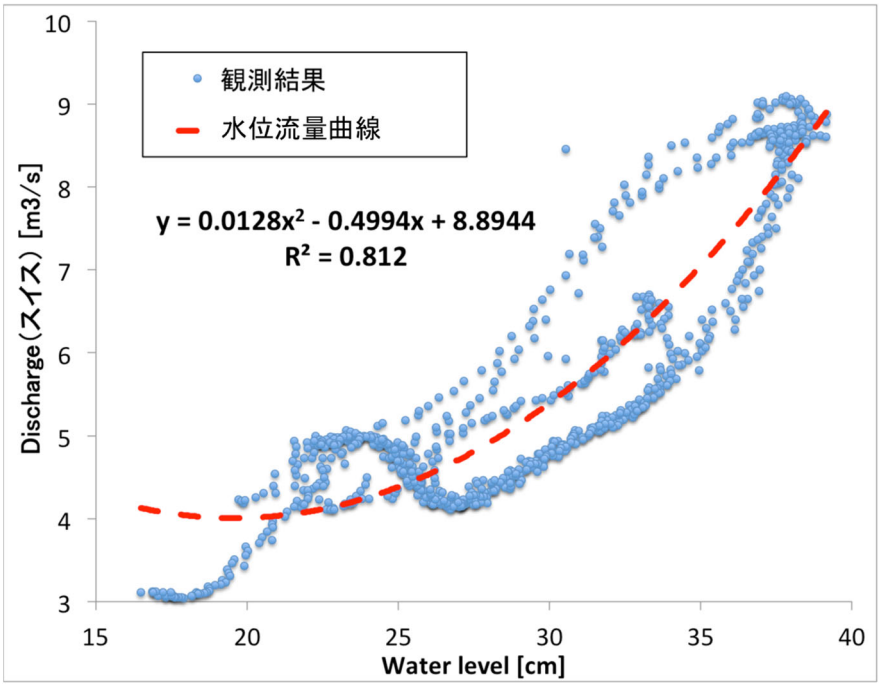

図 13.　水位流量曲線

4. 考察

4.1. ローヌ川と氷河湖における水位と気温・水温の関係

ローヌ氷河と氷河湖における水位と水温の関係について、図 14 からわかるように氷河湖水温は気温によらずほぼ一定であるが、氷河湖の水位とローヌ川の水位は気温に連動して変化していることがわかる。このことから、気温が上昇すると、まずローヌ氷河からの融解水が氷河湖に流入するので氷河湖の水位が遅れて上昇する。その後、ローヌ川の水位が上昇する。という一連の関係がわかる。また、ローヌ川の水温に関しては、気温の変動と共に変動しているが、気温ほど急激な温度上昇や低下は見られない。さらに、ローヌ川の水位が上昇するとローヌ川の水温は低下し、逆に水位が下がると水温は上昇している。これと氷河湖の水温は気温によらず低温度でほぼ一定であることから、気温の上昇に伴って氷河からの冷たい融解水が氷河湖に流入し、さらにその冷たい水がローヌ川まで流れてくる。したがって、川の水位が上昇すると冷たい水が増すため、川の水温は低下する。

4.2. 過去の実習の水位流量曲線から求めた流量

過去のスイス実習における水位流量曲線から、今回の流量を求めた図 12 より、各年度によって算出された流量には差が生じた。これは、各年度の水位流量曲線（表 3）が一次関数や指数関数などの異なる式を用いていたことによる。また、過去の実習では、流量の観測データが少ないため、水位流量曲線は正確ではないことも要因であると考えられる。例えば、2019 年の水位流量曲線を用いた流量は他の年度よりも変動が大きい。これは、2019 年は他の年よりも狭い値の範囲でしか流量の観測を行っておらず、その水位流量曲線にはプロットに偏りができており、プロットのない部分の近似曲線は正確ではないことが原因だと考えられる。より正確な水位流量曲線を作成するには、偏りのない、より幅広い値での流量観測を数多く行うことが重要である。

過去の実習で作成した水位流量曲線は、プロットの数が少なく 3〜4 点しか取得していないので、より幅広い値の流量の観測をもっと行い、よりデータを増やして作成すれば今回の図 12 の結果は大きく変わった可能性がある。しかし、これらの水位流量曲線はそもそも測定した年が違うので、測定環境も大きく異なるため毎年の水位流量曲線が同じになるようなことはなく、過去の実習における観測結果が正しいかどうかの議論は図 12 の結果からは議論できない。

4.3. 水位流量曲線

図 13 の FOEN 流量データと我々が測定した水位データを用いて作成した水位流量曲線には、ヒステリシスが見られた。この結果について考察する。まず、図 13 に日付のデータを加えた図 14 を以下に示す。

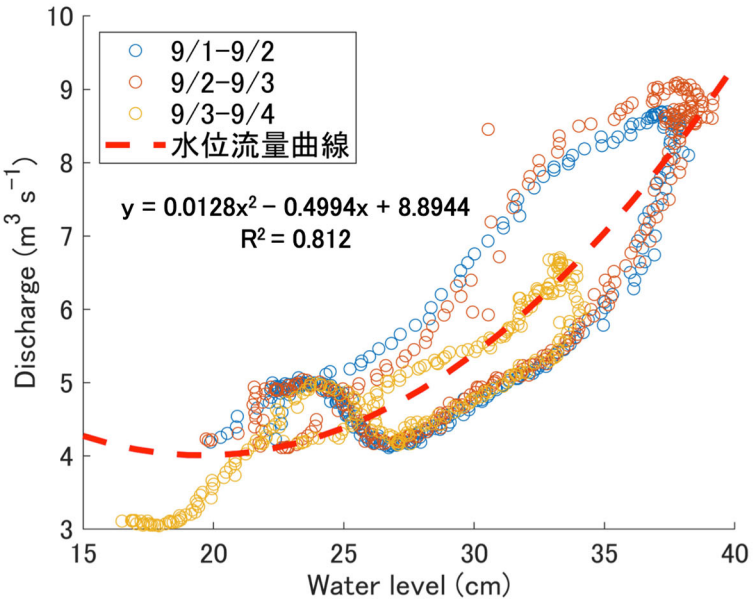

図 14. 水位流量曲線（日付データ含）

さらに、以下の図 15 に、FOEN の流量データと我々が測定した水位データを、横軸を時間にしてプロットしたグラフを示す。

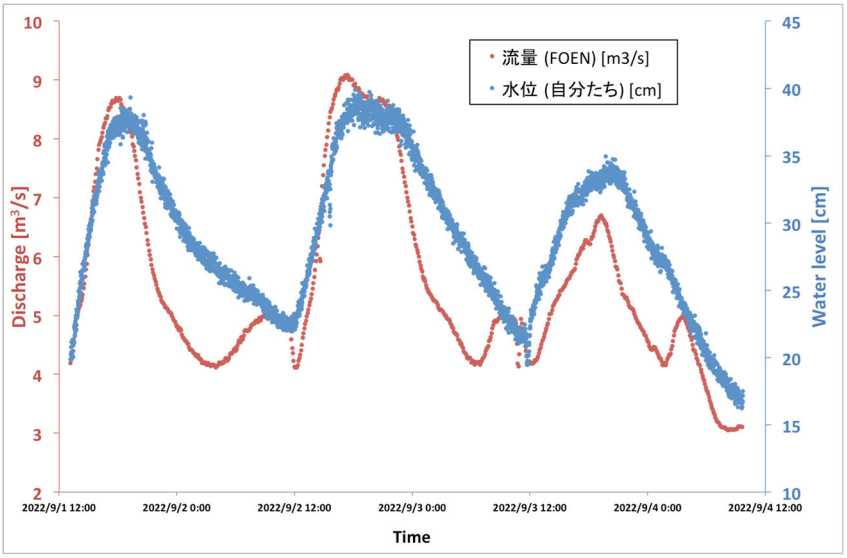

図 15. FOEN の流量データと我々が測定した水位データの時間変動

図 15 より、FOEN の流量データと我々が測定した水位データのピークが横軸方向にわずかにずれていることがわかる。つまり、FOEN の観測地点と我々の観測地点に距離があるため、測定結果にタイムラグが生じていることを示している。このタイムラグの存在により、FOEN の流量データと我々が測定した水位データを使って作成した水位流量曲線（図 13,14）にはヒステリシスが見られるのだと推測した。水位と流量の両方ともに FOEN のデータを使い、水位流量曲線を作成したところ（図 16)、ヒステリシスは見られなかった。

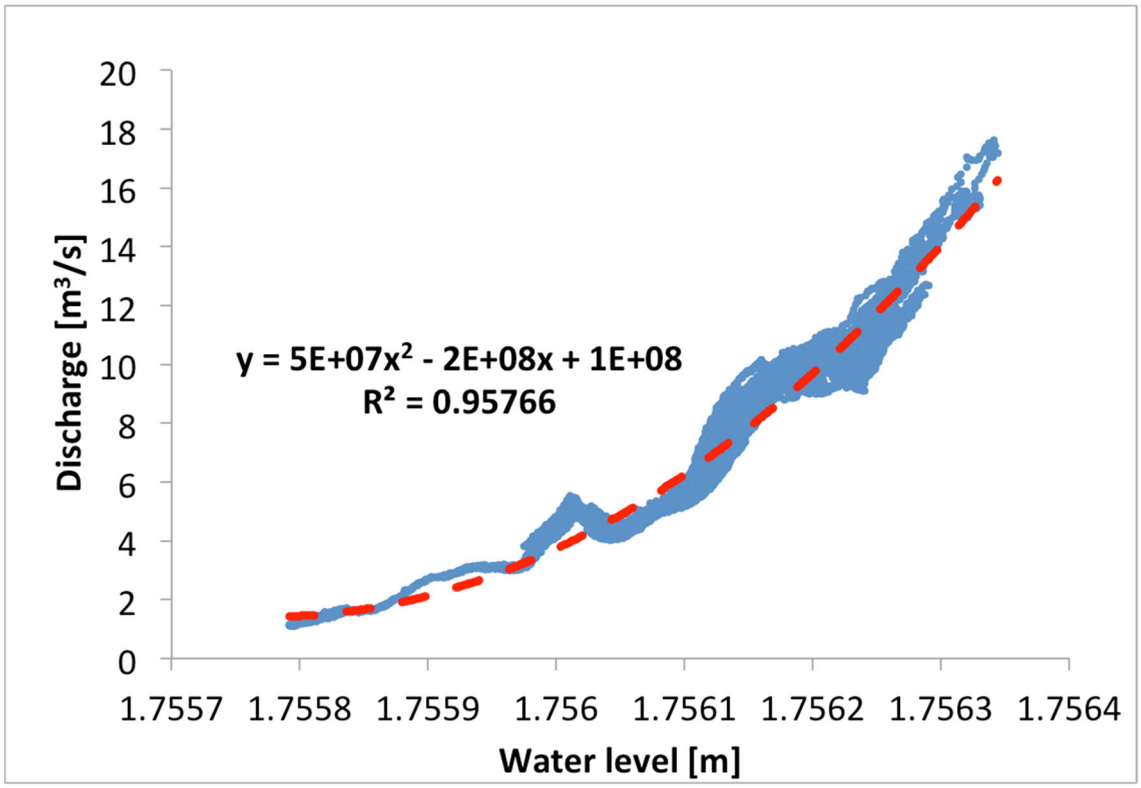

図 16.　水位と流量の両方とも FOEN のデータの水位流量曲線

4.4.　降水量と流量の関係

後日、FOEN から入手した流量データから、今回測定した気象観測データと降水量との関係性について考察する。以下の図 14 に、入手した流量と測定した降水量と気温のデータの時間変動のグラフを示す。

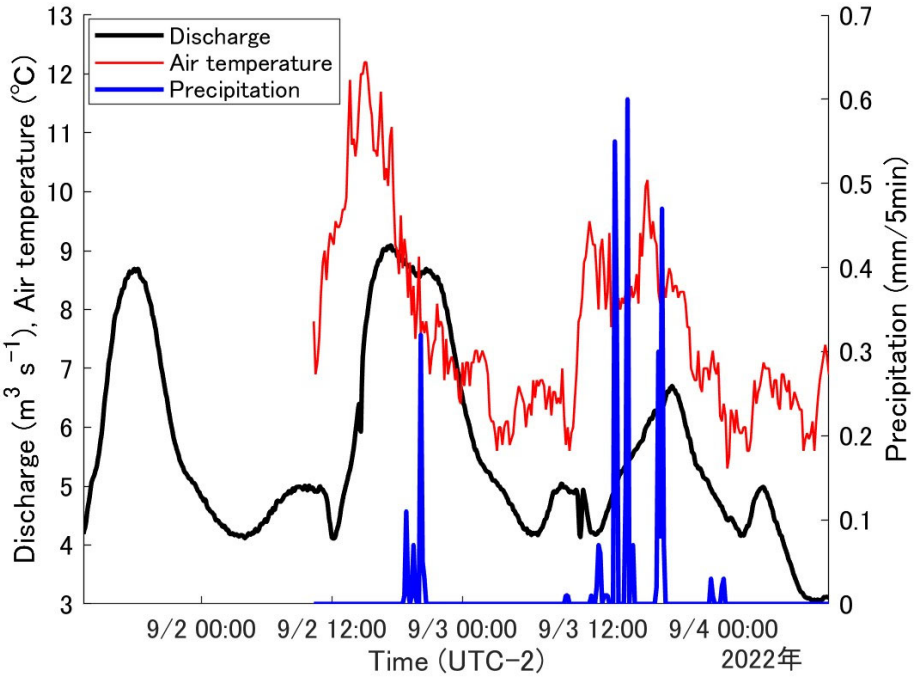

図 14.　入手した流量(FOEN)と測定した降水量と気温のデータの時間変動

このグラフから、降水量が増加すると、それに伴って気温が低下していることがわかる。さらに、気温が低くなると氷河からの融解水が減少するため、流量が減少している。このとき、普通ならば、降水があればそれに伴って流量も増えるはずだが、今回は降水に伴って流量は減少している。このことについて考察する。

一般的に、氷河の下流にある河川の流量は、氷河からの融解量と降水量によって供給される。よって以下の関係が成り立つ。

$$流量 = 融解量 + 降水量$$

今回は、降水により気温低下つまり融解量が減少し、流量が減少しているので、上の関係式より、

$$\therefore 融解量\downarrow + 降水量\uparrow = 流量\downarrow$$

となっている。つまり、今回の流量減少は、雨が降ったことによる降水量よりも、融解量が減ったことによる減少量の方が大きかったため起こったと考えられる。つまり、今回観測された降水量程度であれば、ローヌ川の流量の上昇に与える影響は小さく、それよりもむしろ、降水量により気温が低下することで融解量が減少し、結果として流量を減少させる方向に働いている。

5. 結論

本研究では、ローヌ川流域グレッチにおける河川流量観測、ローヌ氷河における気象観測、氷河湖における水位観測によって、ローヌ氷河の融解量と河川の流量の関係性について、気象データと関連して考察することを目的とした。

今回、我々が測定し算出した水位データと、スイス公表のホームページから読み取った FOEN のリアルタイムの流量データを用いて水位流量曲線の作成を試みたところ、一般的な水位流量曲線に見られる二次曲線ではなく、不規則なプロットとなった。その原因として、FOEN のリアルタイムの流量データが約 12 時間遅れていることを指摘した。

過去のスイス実習(2016～2019 年度)で作成した水位流量曲線を用いて求めた流量の時間変動をグラフに表したところ、各流量の値には差が生じた。これは、各年度の水位流量曲線が一次関数や指数関数などの異なる式を用いていたためである。また、過去の実習では、流量の観測データが少ないため、水位流量曲線は正確ではないことも要因であると考えられる。

後日 FOEN から入手した流量データと我々が測定した水位データを用いて水位流量曲線を作成すると、二次曲線で近似することができた。また、FOEN と我々の観測地点の間の距離により、ヒステリシスが見られた。また、入手した流量(FOEN)データと測定した降水量、気温のデータの関係性について検討し、今回の観測期間中の降水量ほどであれば、ローヌ川の流量の上昇に与える影響は小さいということがわかった。

6. 謝辞

本研究にあたり、2022 年度スイス実習でご指導くださった杉山慎先生、白岩孝行先生に感謝申し上げます。また、講義や議論の時間を提供してくださいました、スイス連邦工科大学の皆様に感謝申し上げます。諸手続きでお世話になりました長谷川桃子様に感謝申し上げます。

特に今年は新型コロナウイルスの影響もあり実施が危ぶまれた中でこのような機会を与えてくださりとても感謝しています。本実習でお世話になりました皆様に熱くお礼申し上げます。

最後に、ともに研究を行った学生の皆様へお礼申し上げます。

7. 参考文献

Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Hock, R. (2008a). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *Journal of Geophysical Research*, **113**(F1):F01015.

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.

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.

古川崚人, 柴野雄介, 久保匠 (2016), スイス氷河実習流量観測レポート.

網野智美, 岡野瑞樹, 伊藤大雪 (2017), スイス氷河実習流量観測レポート.

川上薫, 木野佳音, 長谷川大輔 (2018), スイス氷河実習流量観測レポート.

江刺和音, 瓢子俊太郎, (2019), スイス氷河実習流量観測レポート.