

2014年10月9日

～2014年スイス実習レポート～

## ローヌ氷河湖における氷塊の挙動と水位変動

北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻 修士1年 片山直紀  
北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻 修士1年 門田萌

## 1. はじめに

氷河は、降雪によって雪や氷が堆積した涵養域と、融解が卓越する消耗域の質量収支の釣り合いで成り立っている。しかし近年の地球温暖化による気温上昇に伴い、氷河の後退が見られている。末端部分では、融解水がモレーンにせき止められて形成される氷河湖が見られることもある。氷河湖は貯水量が一定量以上になると決壊し、下流域に大きな被害をもたらすことが危惧されている。氷河はスイスにとって観光資源であるとともに住民にとっては注意しなくてはならない存在でもある。実際にブータンでは、氷河湖が決壊して洪水が発生し、建造物等に被害が出たという報告がある (Watanabe et al., 1996)。今回観測を行ったローヌ氷河にも氷河湖が 2005 年から存在する。ローヌ氷河はスイスアルプス中央部グリムゼル峠とフルカ峠の間に位置する全長約 8 km、氷河面積約 15.94km<sup>2</sup>、体積 2.063km<sup>3</sup>の温暖谷氷河である (e.g. Farinotti et al., 2009)。1850 年ごろからローヌ氷河の急激な後退が観察され、過去 70 年の間に約 50m 薄くなっていることが分かった

(Sugiyama et al., 2007)。ローヌ氷河はスイスにおける貴重な山岳氷河の一つであり、ローヌ川の水源地でもある。ローヌ川はフランス 4 大河川の一つで、主としてフランス南部を流れて地中海に注ぐ唯一の川であり、ヨーロッパにおいて重要な河川であるといえよう。

本研究では、ローヌ氷河前縁に形成された湖にて水位や水温、周囲の気温の測定、湖面の氷塊の動きの観察結果と考察を示す。どの時間帯に水位が上昇し、氷河湖決壊の恐れがあるか、などの知見を示すことを目的とする。

## 2. 観測方法

### 2.1 観測地点

観測は、スイスアルプス中央部に位置するローヌ氷河末端部(図 2.1)にある氷河湖にて観測を行った。観測機器(水位ロガー、インターバルカメラ)の設置位置は、図 2.2 に示した。

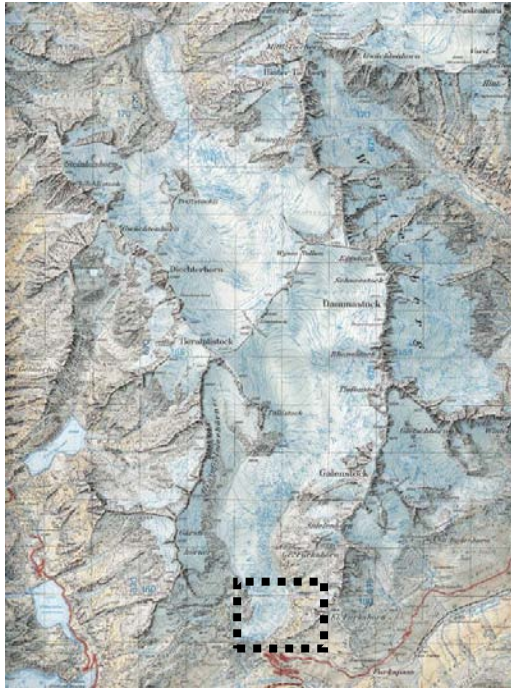


図 2.1 ローヌ氷河地形

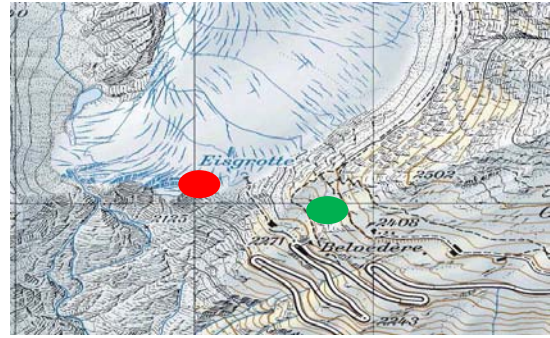


図 2.2 各計測機器の設置地点

(赤丸に水位ロガー、緑丸にインターバルカメラを設置した。)

## 2.2 観測機器

今回以下の機器を観測に使用した。

### 氷河湖の水位測定

氷河湖の水位測定には、メーカーがクリマテック株式会社（製造：米国オンセットコンピュータ社）の HOB0 U20 水位ロガーを使用した。氷河湖の水位測定には、水深 76 m 用の水位ロガーを、大気圧の測定には、水深 4 m 用の水位ロガーを使用した。また、それぞれの水位ロガーの仕様は、以下の表 2.1 に記した。そして、HOBOWare Pro というソフトウェアを用いて水位ロガーの観測データの処理を行った。

### 氷河湖の撮影

氷河湖の時間変化の撮影は、メーカーが Brinno 社の機名 GardenWatchCam V1.0 を用いた。装置の仕様は以下の表 2.2 に記した。

表 2.1 水位ロガーの仕様(本観測では、赤枠のものを使用した)

水位測定				
型番	CO-U20-001-04 CO-U20-001-04-Ti	CO-U20-001-01 CO-U20-001-01-Ti	CO-U20-001-02 CO-U20-001-02-Ti	CO-U20-001-03 CO-U20-001-03-Ti
計測範囲	4m	9m	30m	76m
工場校正範囲	69~145kPa	69~207kPa	69~400kPa	69~850kPa
精度	±0.075%FS、 ±0.3cm	±0.05%FS、 ±0.5cm	±0.05%FS、 ±1.5cm	±0.05%FS、 ±3.8cm
分解能	<0.02kPa、 0.14cm	<0.02kPa、 0.21cm	<0.04kPa、 0.41cm	<0.085kPa、 0.87cm
破損圧	310kPa、 18m(水深)	310kPa、 18m(水深)	500kPa、 40m(水深)	1200kPa、112m(水深)
温度測定				
計測範囲	-20°C~50°C			
精度	±0.37°C@20°C、±0.5°C(-5~50°C)			
分解能	0.1°C@20°C、0.2°C(-5~50°C)、10bit			
共通仕様				
記録点数	21,700点(圧力+温度セット)、64kB不揮発性メモリ			
イベント記録	ホストPC接続時、バッテリー低下時			
応答速度	水位:1秒(90%) 温度35分(90%)			
使用環境	水中、空气中、耐油・耐溶剤ハウジング			
材質	316ステンレススチール(U20-001-01-Tiはチタンハウジング)、Viton O-リング、セラミック圧力センサー			
バッテリー寿命	5年(1分以上のロギングインターバルでの代表的使用例)、米国工場にて交換可			
バッテリー状態表示	PC接続時に確認可 バッテリー終時電圧を記録可			
動作確認インジケータ	本体付き赤色LEDにて表示			
サンプリング間隔	1秒~18時間内自由設定(固定、マルチプルレートサンプル機能付き)			
スタートモード	即時スタート、スタート時刻予約			
データ回収モード	計測中オフロード、計測ストップ後オフロード			
時間誤差	±1分/月(0~50°C)			
寸法/質量	25×150mm/210g ※U20-001-01-Tiは140g			

クリマテック株式会社ホームページより抜粋

表 2.2 ガーデンウォッチカムの仕様

GardenWatchCam 製品仕様



画素数	1.3メガピクセル
焦点距離	マクロモード:約50cm、通常モード:約1.0m～
動画フォーマット	AVI(音声なし)
撮影間隔	プリセット:1分、5分、30分、1時間、4時間、24時間 カスタム:5秒から11時間59分
記録画素数	1,280×1,024画素
記憶媒体	USBフラッシュドライブ(8GBまで対応)
電源	単三乾電池×4本
電源持続時間	4～6ヶ月(撮影頻度により異なる)
大きさ(幅)×(高さ)×(奥行き)	9.3×19.2×5.3cm
質量	約260g(本体のみ)

株式会社バイコムホームページから抜粋

## 2.3 観測方法

### 水位ロガー

湖の水位変動を測定するために、計測範囲 76 m の水位ロガーを木材にテープで固定したものを、氷河湖に沈めた(図 2.3)。大気圧の変化が水圧に与える影響を除去するために、計測範囲 4 m の水位ロガーを氷河脇の岩盤の割れ目に設置して大気圧を同時に測定した(図 2.4)。そして、2014 年 9 月 4 日 18 時 17 分から 2014 年 9 月 7 日 10 時 16 分まで観測を行った。



図 2.3 氷河湖での水位ロガー設置の様子



図 2.4 岩盤での水位ロガー設置の様子

### インターバルカメラ

図 2.2 に示した岩盤上にインターバルカメラを設置した(図 2.5)。5 分間隔で撮影されるように機器を設定し、2014 年 9 月 4 日 18 時 34 分から 2014 年 9 月 7 日 10 時 23 分までの期間、日没時間帯を除いて撮影を行った。



図 2.5 インターバルカメラの設置

## 3. 結果

図 3.1 は今回観測された氷河湖の水位、水温、気温を表す。水位は 9 月 5 日の 10 時頃から徐々に上がり始め、19 時 32 分にその日の最大値 785.92cm を記録した。その後再び下降を続け、翌 6 日の 11 時頃に再び上昇し、20 時 28 分に観測期間中の最大値 890.41cm を記録した。一方気温は 9 月 5 日の 11 時頃から上昇を始め、12 時 28 分に観測期間中の最大値 8.879°C を記録した。その後は下降を続け、翌 6 日の 6 時 17 分に最小値 4.207°C を記録した。17 時 57 分にはその日の最大値 8.282°C を記録し、その後は再び下降した。水温にいたっては変化が  $\pm 0.674^{\circ}\text{C}$  以内であったものの、9 月 6 日は水温が最大値である  $2.088^{\circ}\text{C}$  を記録した 15 時の約 3 時間後である 18 時 6 分に気温がその日の最大値である  $8.282^{\circ}\text{C}$  を記録した。また、水位、気温はともに日変動の周期性が見られた。



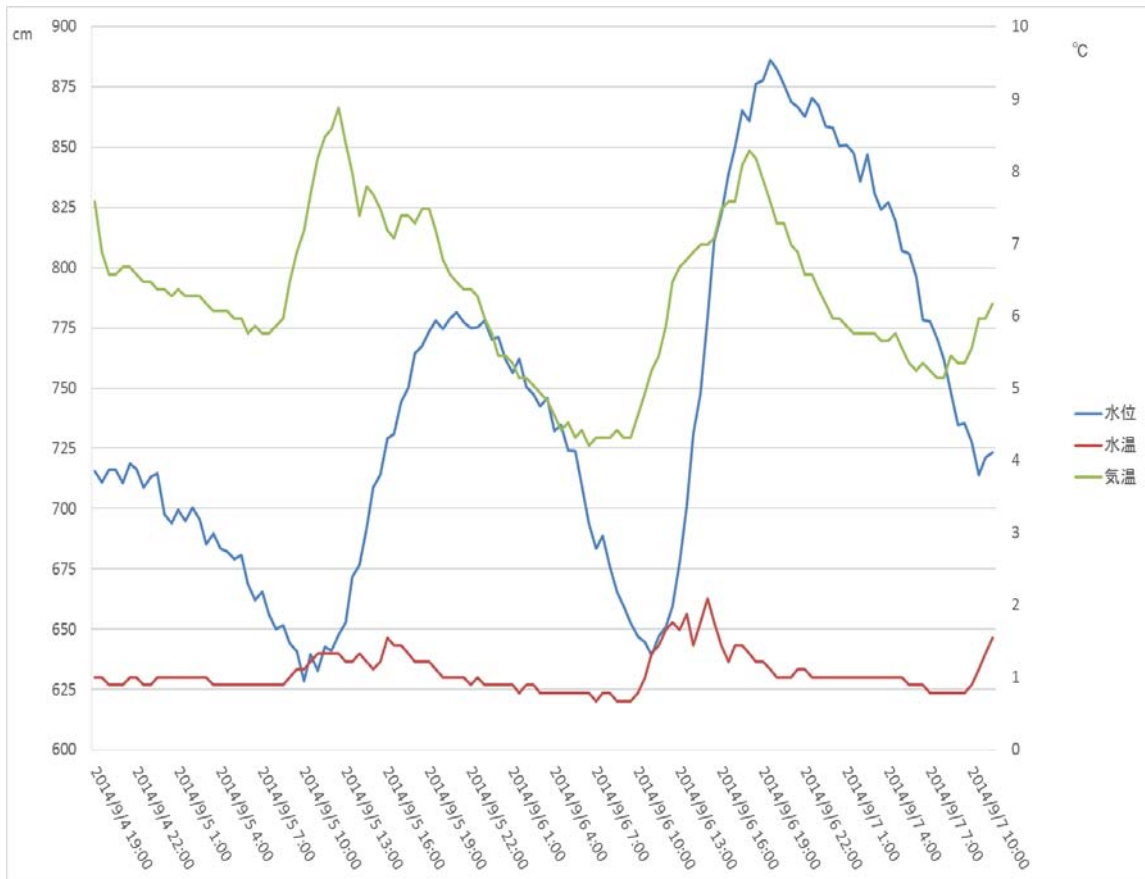


図 3.1 氷河湖における水位、水温、気温

氷塊の動きについてインターバルカメラより得られた画像(図 3.2、3.3)をもとに結果を示す。氷塊は右回りと左回りのときがあった。9月5日の10時頃から21時頃にかけては時々左に回りながらも右回りで、6日の11時頃から20時頃にかけては左回りであった。それ以外の時間帯は停滞していた。水位が上昇したときに氷塊は動いていることが分かる。ただ、氷塊の動く方向との関係性はこのグラフからだけではわからない。

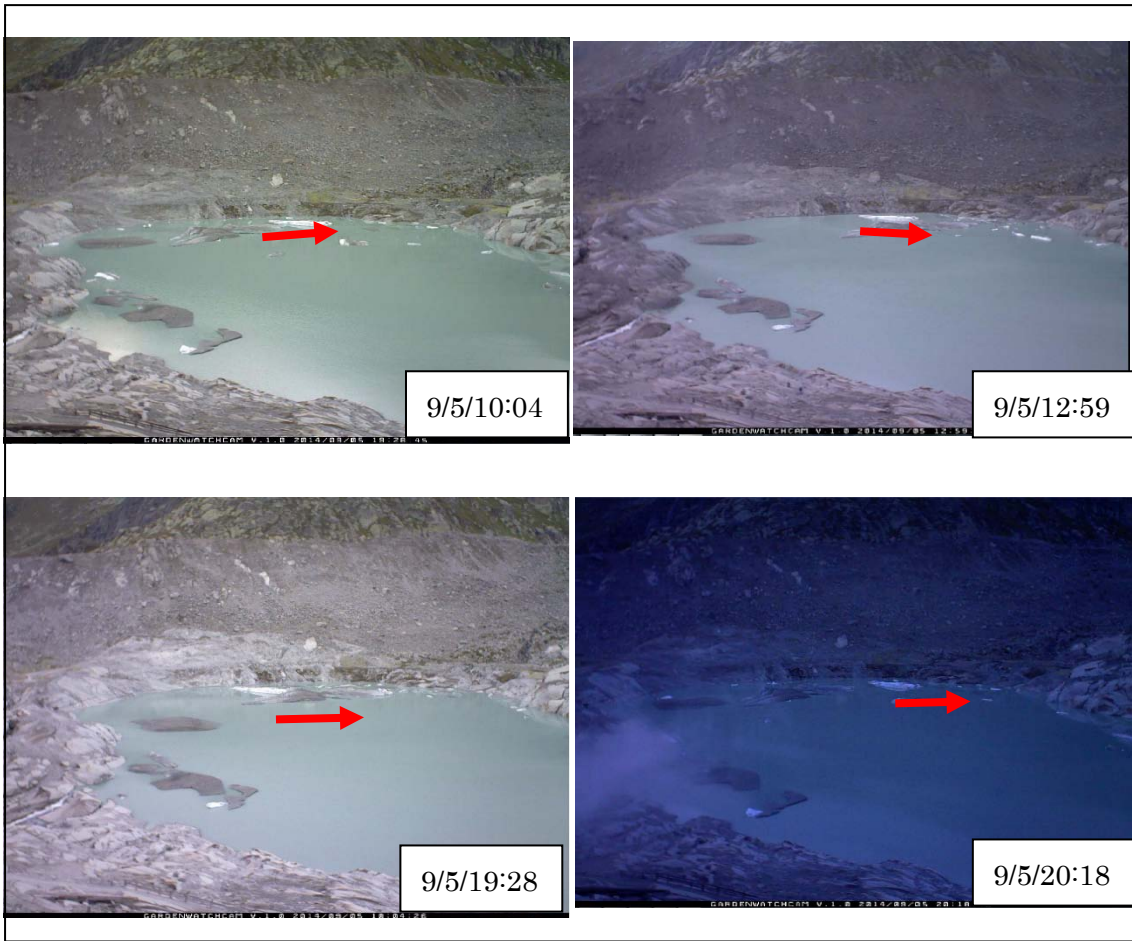


図 3.2 氷河湖における氷塊の右回りの動き



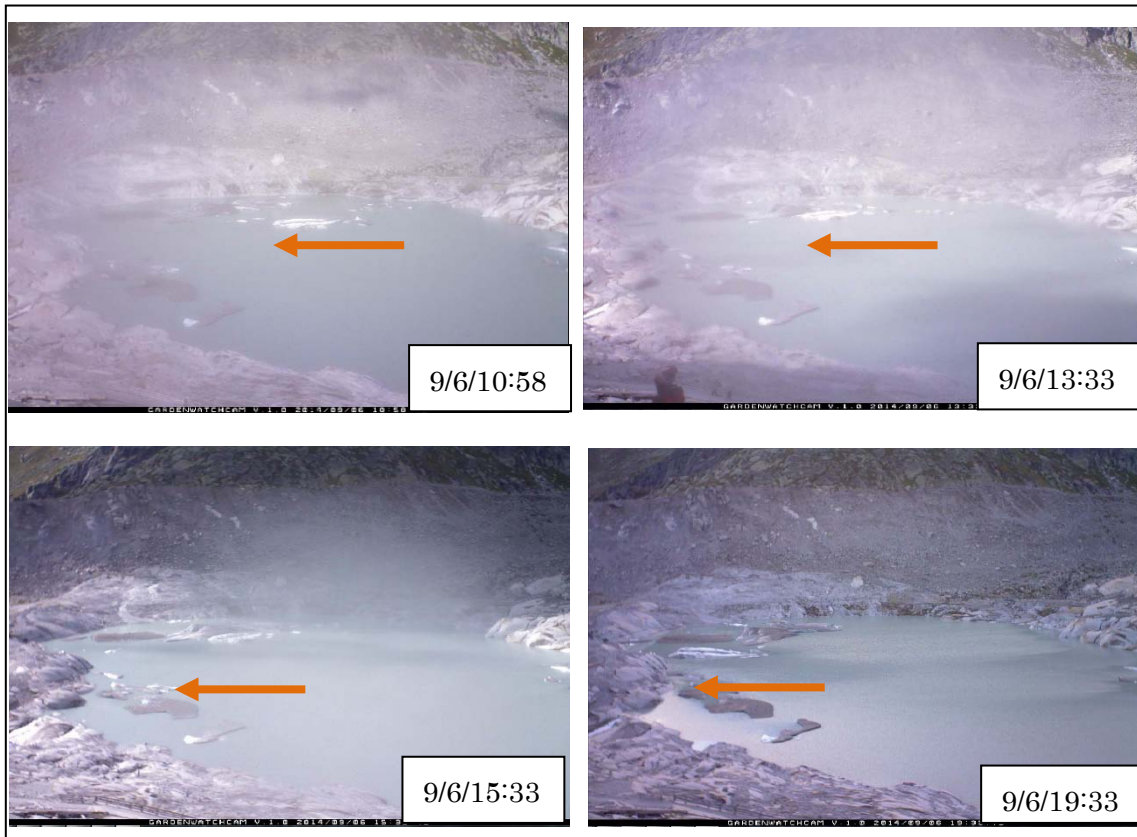


図 3.3 氷河湖における氷塊の左回りの動き

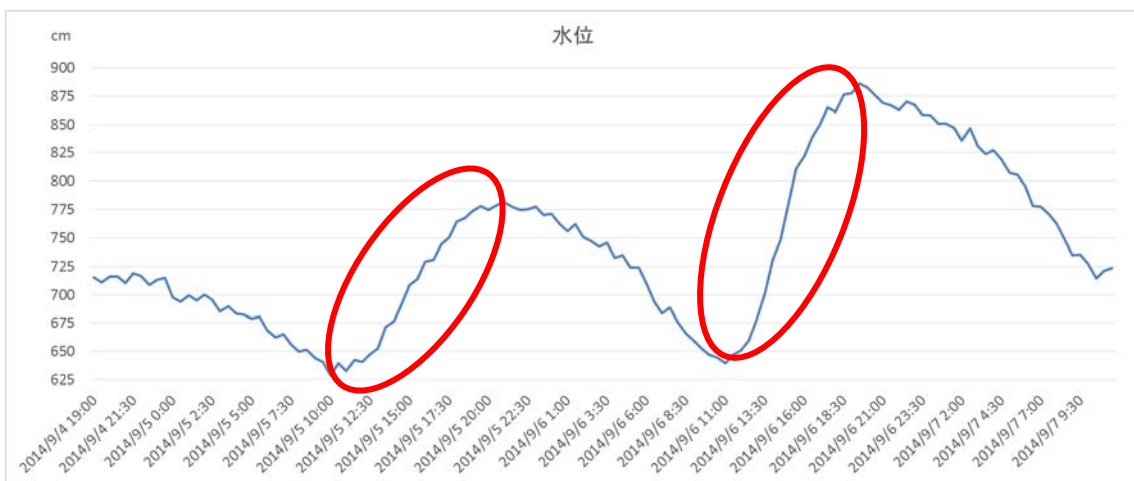


図 3.4 氷河湖における水位

水位と気温のグラフを図 3.5 に示す。それぞれが最大値を記録した時間をグラフ上に示す。5 日は、気温が上昇してから約 7 時間後に水位の上昇が見られた。6 日は、気温が上昇してから約 2 時間 30 分後に水位の上昇が見られた。

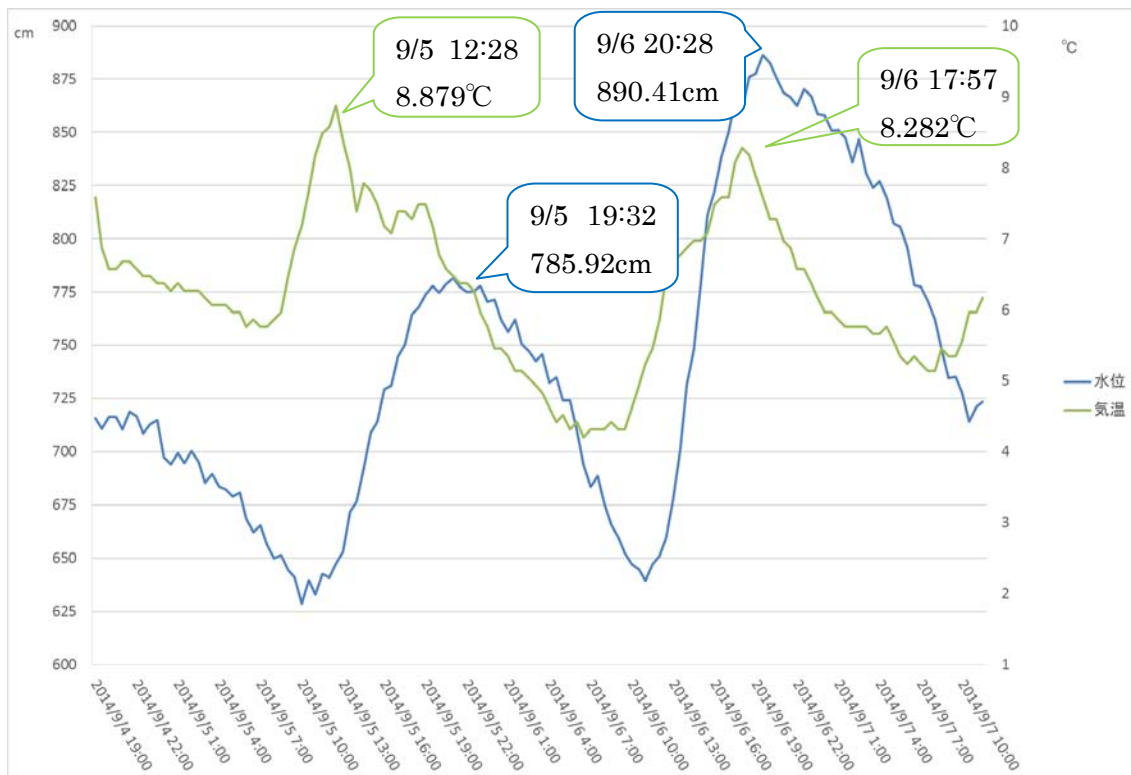


図 3.5 氷河湖における水位と気温

#### 4. 考察

##### 気温と水位変動

気温と水位変動の変動には相関性が見られ、気温が上昇すると、水位も上昇し、逆に気温が下降すると水位の下降もみられる。また、気温、水位の変動には3~5時間ほどのタイムラグが見られる。これらの事象についての考察を行いたいと思う。まず、気温が上昇すると氷河表面の融解が促進される、その融解水が増加することで水位の上昇が起こることが考えられる。また、気温が低下すると融解が抑制される。ただ、そこにタイムラグが発生する要因としては、融解水が氷河湖まで氷河表面を流れ落ちるのに時間を要するからと考えられる。9/5に比べ9/6の方が最大水位が高かった理由としては、9/6の気温の方が、暖かい時間帯が長かったため融解量が大きかったからと思われる。

##### 水温

水温変化を引き起こす大きな要因として、主に二つ考えられる。一つ目は、氷河からの融解水であり、氷河湖の水温低下は、この融解水によって湖が冷やされることで起こると考えられる。二つ目は、太陽の放射エネルギーであり、湖の水温上昇は、太陽の放射エネルギーにより湖が温められることで起こると考えられる。太陽の放射により溶けた氷河の融解水が氷河上流から湖へ流れ落ちるまでの間、先に湖が太陽の放射熱によって温められ、

水温が上昇していく。そして、融解水が徐々に湖に流れ落ちることで、湖が冷やされる。やがて、太陽の放射熱によって湖が温められる働きよりも、融解水によって冷やされる働きが強くなり、水温が低下したと考えられる。

### 氷河湖の氷塊の変動

氷河湖において、氷塊の挙動に変化を起こす要因として、風と、氷河湖内の水循環が考えられる。氷河湖の水位は、氷河からの融解水の量と、湖の落ち口からの排水量のバランスで変動する。融解水が多い日中では、排出量との差が正になり、水位が上昇する。また、融解水が少ない朝方や夜間では、排出量との差が負になるために、水位が下降することがわかっている。その融解量と排出量の関係が氷河湖内での水循環に影響を及ぼしている可能性について我々は着目した。日中では、氷河から湖に流れ込んだ融解水はすぐには、湖の落ち口から排出されないために、押し返されるように水は氷河末端に向けて流れる。しかし、夜間では、融解量よりも排出量の方が多いため、落ち口に向けて流れる水の流れが卓越しているため、氷塊も落ち口に向けて変動していた可能性が示唆された。また、インターバルカメラの映像の氷塊の変動からも、その仮定の傾向が見られた。

## 5. まとめと今後の展望

我々は、スイスアルプス中央部に位置するローヌ氷河の、氷河湖にて、二日間に渡り、水位や水温、周囲の気温の測定、湖面の氷塊の動きの観測を行った。湖の水位、水温の観測は、水位ロガーを用いた。そして大気圧の変化が水圧に与える影響を除去するために、水位ロガーを氷河脇の岩盤の割れ目に設置して大気圧の測定を行った。また、インターバルカメラを用いて、氷河湖の氷塊の動きを観測した。

気温と水位の観測結果からは、気温が上昇すると、水位も上昇し、逆に気温が下降すると水位の下降もみられるといったように、気温と水位変動には相関性が見られた。また、大気温と水位の変動にはタイムラグがあることがわかった。以上の結果から、氷河上が温められたことによって氷河表面が融解し、その融解水が湖に流れ込むことによって、水位が変動しており、融解を引き起こす大気温の変動が重要な役割を果たしていることがわかった。また、気温と水位変動のタイムラグが、主に何によって引き起こされているのかを知るために、今後、ローヌ氷河での各地点での融解量の測定また、融解水の流出の経路の解析が必要であると思われる。

水温の観測結果からは、気温の上昇と共に、水温の上昇も見られた。しかし、湖の水位が上昇し、その日の最高水位に近づくと、急激に水温が低下することがわかった。以上の結果より、水温は、主に太陽からの放射熱と融解水による冷却によって変動することが示唆された。

氷河湖と氷塊の変動の観測結果からは、日中と夜間では氷塊の変動に違いが見られることがわかった。日中では、氷河末端の方向に氷塊は移動し、夜間では、湖の水の落ち口に

向かって移動していることがわかった。以上の結果から、融解水が増加し、排出量の方が下回る日中と、融解水が減少し排出量の方が上回る夜間では、氷河湖内での水循環が異なることが示唆された。また、水循環は、湖底地形にも大きく影響されると考えられるので、詳細な湖底地形の観測が必要と思われる。また、氷河からの融解量と氷河湖の落ち口からの排出量の測定を行うことも、氷河湖の変動のメカニズムを解析するために必要と思われる。

今回の観測は、短期間の観測しか行うことができなかったために、局所的な解析しか行うことがしかなかったため、解析を進める上で、正確な変動を捉える事が出来なかった可能性がある。また、季節的な変化を捉えるためにも、今後、長期的な観測が必要である。

## 6. 参考文献

- Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M. and Truffer, M. (2009). A method to estimate ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers. *J. Glaciol.*, 55(191), 422–430.
- Sugiyama, S., Bauder, A., Zahno, C. and Funk, M. (2007). Evolution of Rhonegletscher, Switzerland, over the past 125 years and in the future: application of an improved flowline model. *Annals of Glaciology*, 46, 268–274.
- Watanabe, T., and D. Rothacher (1996). The 1994 Lugge Tsho glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya." *Mountain Research and Development* 16.1, 77-81.