

Surface elevation change near the terminus of  
Rhonegletscher  
from 2007 to 2014

Akimoto Yuka

Takamiya Yoshiki

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

## 1. INTRODUCTION

氷河とは降雪によって雪や氷が堆積し、圧縮され重力により流動する巨大な氷の塊である。この氷河は周辺地形を大きく浸食し独特の氷河地形を形成することでも知られている。氷河から融解し流れ出る水は周辺環境の水源となり生活や農業用水の他、水力発電などの工業用水に利用されている。さらに年間多くの観光客が氷河を訪れ、氷河は観光資源としても成り立っている。

近年、地球温暖化による気温上昇の影響で世界に存在する氷河の縮小が明らかとなっている。国土の約 70%が山脈に覆われているスイスには数多くの氷河が存在しており、スイスの人々は昔から氷河と寄り添って生活してきた。従って地球温暖化による氷河の後退は切実な問題である。さらに氷河の後退と共にできた湖が徐々に容量を拡大し、モレーンでせき止められた巨大な氷河湖を形成している(Sakai et al., 2005, 2009)。これらのモレーンが様々な要因で決壊し大量の湖水が溢れ出し、下流域に大きな被害を与える氷河湖決壊洪水が問題になっている。

スイスのほぼ中心に位置するローヌ氷河は、ヨーロッパで最も大きい川であるローヌ川の水源として重要な役割を果たしている。また、Furka 峠からアクセスが容易であるため古くから研究されている氷河の一つである。ローヌ氷河の末端変動は 18 世紀から写真や地図で記録されており、150 年間でおよそ 1200 m 後退し、質量損失においては 1980 年から急激に大きくなっていることが報告されている (Huss et al., 2008)。従ってローヌ氷河における長期的な氷河の形状変化を観測する必要がある。

氷河の変動を考えるうえで質量収支は重要な概念である。質量収支は涵養量と消費量の差によって決まる。また、氷河は涵養域から消費域へと氷が流れることで形状を保っている。質量収支と流動の結果生じる氷河の形状変化を明らかにするために、氷河表面高度変化を測定することは重要である。本実習において、2007 年から GPS(Global Positioning System) を用いてローヌ氷河末端部における氷河表面高度変化を測定している。結果として毎年氷河の後退が見られ、場所によって氷河の表面高度の低下量に違いが見られた。そこで本研究では表面高度を観測し、過去の結果と比較することで氷河の低下量を把握すること。さらに将来的な氷河の形状変化を予測することを目的とした。

## 2. STUDY SITE AND METHOD

### 2-1. Study site

本研究の観測地点であるローヌ氷河はスイス・アルプス中央部 (46° 35' N, 8° 23' E) に位置しているスイス国内において 9 番目に大きな氷河である。本研究ではローヌ氷河の末端付近において氷河の流線方向で 19 地点、横断方向で 14 地点の合計 33 地点を観測地点とした(図 1)。

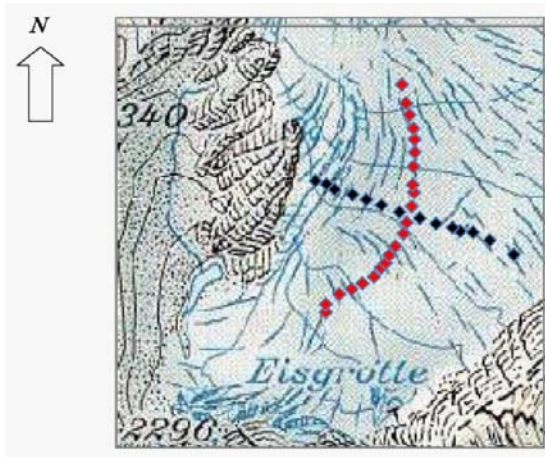
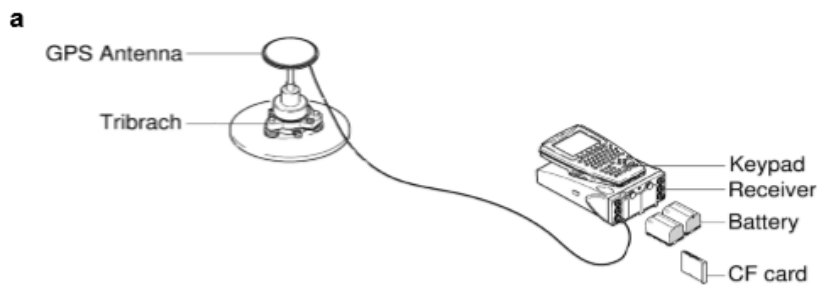


図 1. ローヌ氷河における観測地点

## 2-2.Method

本研究では、干渉測位の一手法であるキネマティック測量(Kinematic positioning)によって Rhone 氷河の表面標高を測定した。干渉測位とは、ふたつの GPS 受信機で各衛星からの電波を記録し、両者の位相差から相対的な位置関係を測定する方法である。干渉測位は単独測位と比較して精度が良く誤差数 cm 以下で座標位置を測定することができる。

今回使用した GPS は Leica GPS System 1200 である (図 2)。水平位置の座標表記にはスイス直交座標系を用いた。座標が既知である基地局 (Reference) (Easting 672680.178 m, Northing 159037.537 m, Elevation 2286.191 m) と移動局 (Rover) の 2 台の GPS を用いることで、測定地点においた移動局の座標を測定した。上記の測量用 GPS に加えて、氷河上の測定地点を探すために、携帯用小型 GPS (GARMIN eTrex Vista HCx) を用いた。この GPS の水平の測定誤差は数メートルから約 5 m である。2014 年 9 月 5 日~7 日にかけて各地点で複数回観測を行い、衛星の電波状態が良く、精度良く得られた座標を本研究のデータとして扱う。



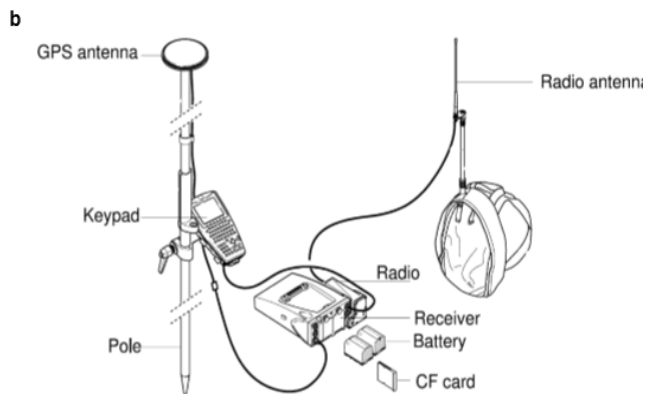


図 2. Leica GPS System 1200 のシステム (a) 基地局、(b) 移動局。

### 3. RESULT

観測したローヌ氷河の横断方向、流線方向における表面高度変化を 2008 年から 2013 年までの過去の観測結果と共に示す(図 3、4)。

氷河横断方向では 14 地点、氷河流線方向では 19 地点で観測を行った。それぞれの観測結果と共に 2007~2014 年の結果を図 3、図 4 に示す。今年の結果において横断方向の観測点における西端と東端との距離は約 486m であり、約 19m の高度差が見られた。流線方向の観測点における北端と南端との距離は約 578m であり、約 98m の高度差が見られた。今回の結果から横断方向における氷河の地形は過去の結果と同様に、東から西にむけて高度が低下しており、特に西端の地点で大きく低下していた。また、各年でのデータを比較すると横断方向、流線方向ともに高度が低下しているのが明らかである。

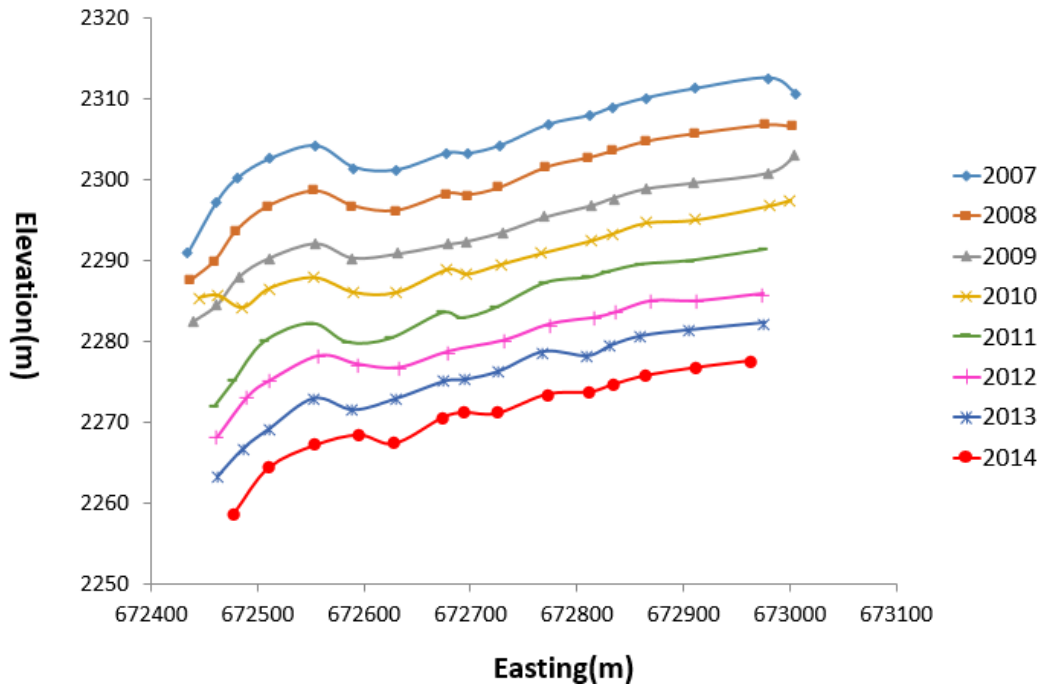


図 3. 2007-2014 年のローヌ氷河横断方向における表面標高

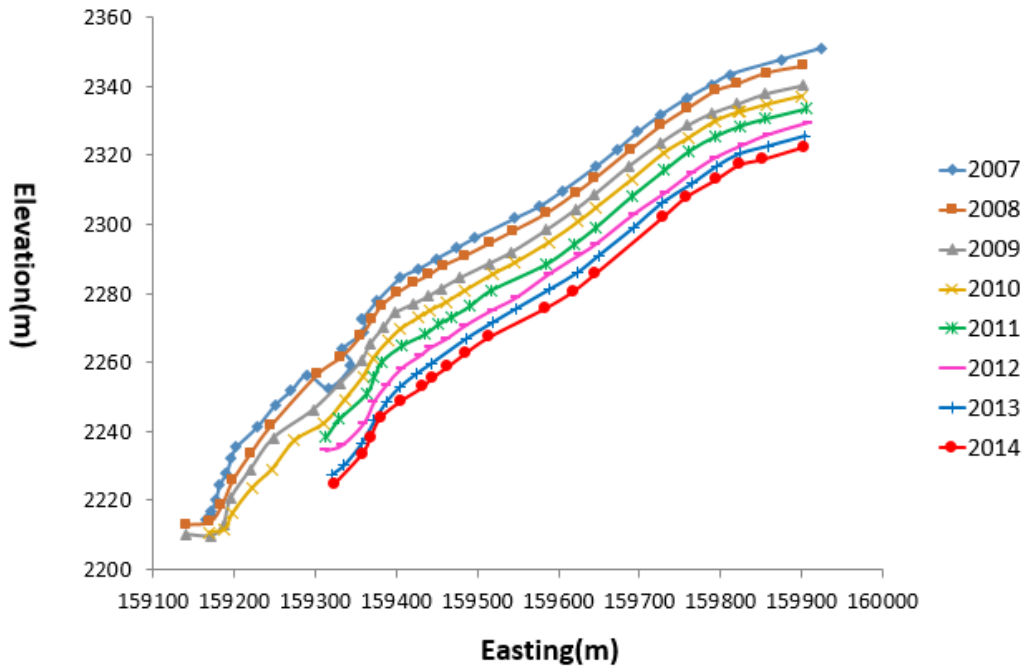


図 4. 2007-2014 年のローヌ氷河流線方向における表面標高

次に氷河の横断方向における 2013~2014 年の高度低下速度を過去の結果と比較するため  
に 2008~2013 年の一年あたりの平均高度低下速度を求め図 5 に示した。2013~2014 年の横

断方向における高度低下速度について、東側の高度低下速度は過去と近い値であったのに対し、西側は過去の結果と比較しても高度低下のばらつきが大きかった。2013~2014年の1年間の高度低下速度は、東側に比べ西側で大きかった。過去の高度低下速度と今年の高度低下速度を比較すると、最西端の t2b においては 2013 までの平均高度低下速度が  $-4.2\text{m a}^{-1}$  であったのに対し 2014 は  $-7.9\text{m a}^{-1}$  と高度低下速度は急激に大きくなっていった。

また横断方向における観測地点を東端、中部、西端の3区画に分け高度低下速度を算出した(表 1.a)。2014年の観測では速度低下は東端で  $-4.65\text{m a}^{-1}$ 、中部で  $-4.68\text{m a}^{-1}$ 、西端で  $-5.38\text{m a}^{-1}$  だった。2014年の高度低下速度と過去の平均高度低下速度を比較すると、東端は高度低下速度が小さく、中部、西端では高度低下速度が大きくなっていった。特に西端において今年は高度低下速度が大きくなっており、2013年までの平均高度低下速度より  $-0.16\text{m a}^{-1}$  大きくなっていった。

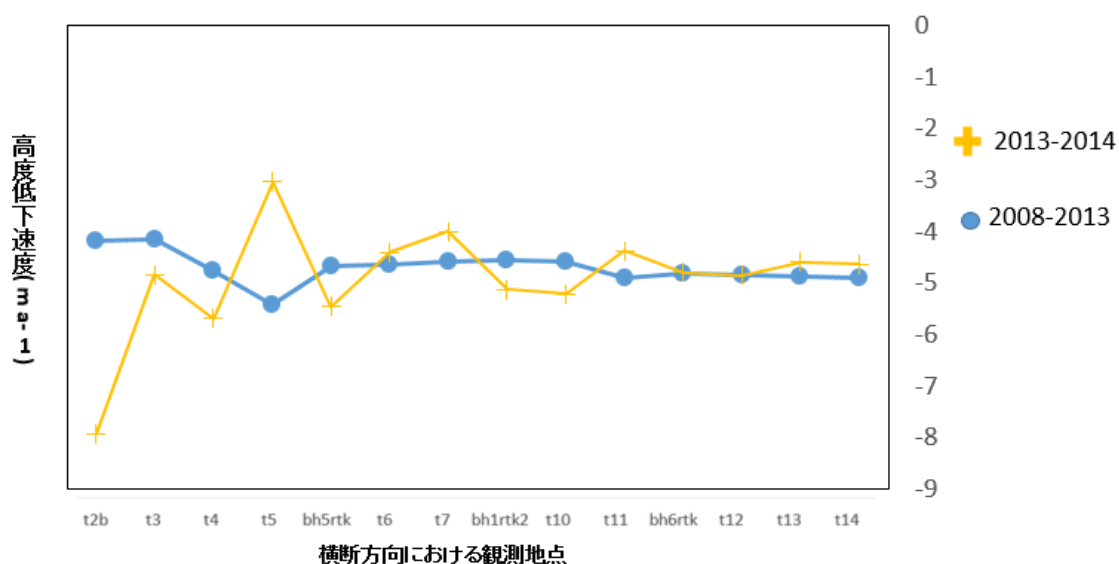


図 5. 横断方向における 2013~2014 年と 2007~2013 年の平均高度低下速度

	2013-2014	2007-2013
t02-bh5rtk(東端)	$-4.65\text{m a}^{-1}$	$-4.97\text{m a}^{-1}$
t06-t10 (中部)	$-4.68\text{m a}^{-1}$	$-4.68\text{m a}^{-1}$
t11-t14(西端)	$-5.38\text{m a}^{-1}$	$-5.22\text{m a}^{-1}$

表 1. 横断方向 3 区画における高度低下速度の比較

同様に氷河の流線方向における高度低下速度を図 6 に示した。過去のデータと比較すると、2013 年までの平均高度低下速度に比べ、2013 年から 2014 年の高度低下速度は全体的に小さくなっていった。特に末端部における表面高度低下速度が例年に比べ小さくなっていった。また地点 s16、s17 では今年 1 年間の高度低下速度が過去のデータより大きくなっていった。流線方向における観測地点も同様に北端、中部、南端の 3 区画に分け高度低下速度を算出した(表 2)。2013 年までのデータと比較すると今年の観測では南端では $-4.32 \text{ m a}^{-1}$ 、中部では $-4.78 \text{ m a}^{-1}$ 、北端では $-3.70 \text{ m a}^{-1}$  の高度低下速度であった。2013 年までは南端(末端)の低下速度が $-5.24 \text{ m a}^{-1}$  と大きかったのに対し 2014 年は $-4.32 \text{ m a}^{-1}$  と例年より高度低下速度は小さかった。

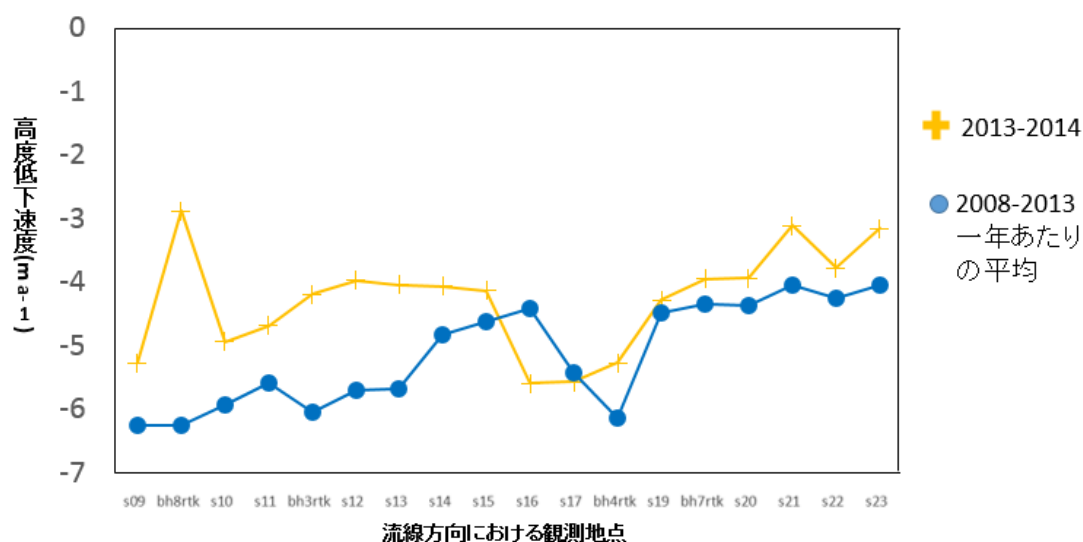


図 6. 流線方向における 2013~2014 年と過去 1 年間あたりの平均高度低下速度

	2013-2014	2007-2013
s9-s12(南端)	$-4.32 \text{ m a}^{-1}$	$-5.24 \text{ m a}^{-1}$
s13-sbh4rtk(中部)	$-4.78 \text{ m a}^{-1}$	$-5.02 \text{ m a}^{-1}$
s19-s23(北部)	$-3.70 \text{ m a}^{-1}$	$-4.23 \text{ m a}^{-1}$

表 2. 流線方向 3 区画における表面低下速度の比較

2008 年から 2014 年の 7 年間で流線方向、横断方向が経年的にどのように低下してきたか各年における流線方向、横断方向の表面高度低下速度の平均を算出した。

経年の変動幅は流線方向で $-3.65 \sim -5.97 \text{ m}$ の範囲に存在し、横断方向で $-4.18 \sim -5.95 \text{ m}$

範囲に存在した。2014 年は流線方向で-4.27m、横断方向で-4.83mであり平均より高度低下速度が小さかった。

	流線方向	横断方向
2007-2008	-5.49	-4.71
2008-2009	-5.97	-5.24
2009-2010	-3.65	-4.18
2010-2011	-4.90	-5.95
2011-2012	-5.80	-5.40
2012-2013	-4.18	-4.50
2013-2014	-4.27	-4.83
合計(m a <sup>-1</sup> )	-34.26	-34.81
平均(m a <sup>-1</sup> )	-4.89	-4.97

表 3. 2007-2014 年の流線および横断方向における年間あたりの平均表面高度低下

#### 4. DISCUSSION

##### 4-1. 流線方向における表面低下速度

過去の観測において、氷河末端付近における高度低下が特に著しい理由として、下流部に存在する氷河湖による融解やカービングが末端付近の消耗を促進するためと考えられていた。しかし今年の測定結果では氷河末端付近における表面低下速度が例年に比べ小さくなっていた。2005 年、2013 年、2014 年の氷河湖の様子を比較すると、2005 年から 2013 年にかけて氷河が後退して氷河湖が拡大した後、2014 年には湖に接している氷河面積は比較的小さくなっている（図 7）。したがって、氷河末端付近における融解やカービングが弱まり、消耗が抑制されている可能性がある。







図7 (a) 2005, (b) 2013, (c) 2014年におけるローヌ氷河末端部の写真.写真はスイス連邦工科大学の連続撮影カメラによるもの (<http://people.ee.ethz.ch/~glacier/acam.html> 引用)。

#### 4-2.横断方向における表面高度低下速度

2013年2014年には西側での高度低下速度が大きく特に最西端で最も大きかった。先行研究では、この地域において夏期融解速度が大きいことが報告されており (Sugiyama et al., 2011) (図10)、本研究の結果と整合的である。先行研究では、氷河の後退と共に氷河西側の岩壁の露出が進行し、岩壁からの輻射熱により気温が増加し融解速度が増えたと考えられている。この仮説を検証するために、2014年の実習中に測定されたローヌ氷河における横断方向の気温観測データを示す(図8)。

気温観測の結果では、西側での平均気温は  $5.9^{\circ}\text{C}$ 、中央での平均気温は  $5.4^{\circ}\text{C}$ 、東側での平均気温は  $4.3^{\circ}\text{C}$  であり、氷河西側での気温が最も高いことが示された。長波放射の測定では、各地点による変化は顕著でなく、岩壁からの長波放射が気温上昇の原因であるかどうかははっきりしない。

また氷河の西側では地形の影響で風が弱く、気温の上昇をもたらした可能性がある(図9)。

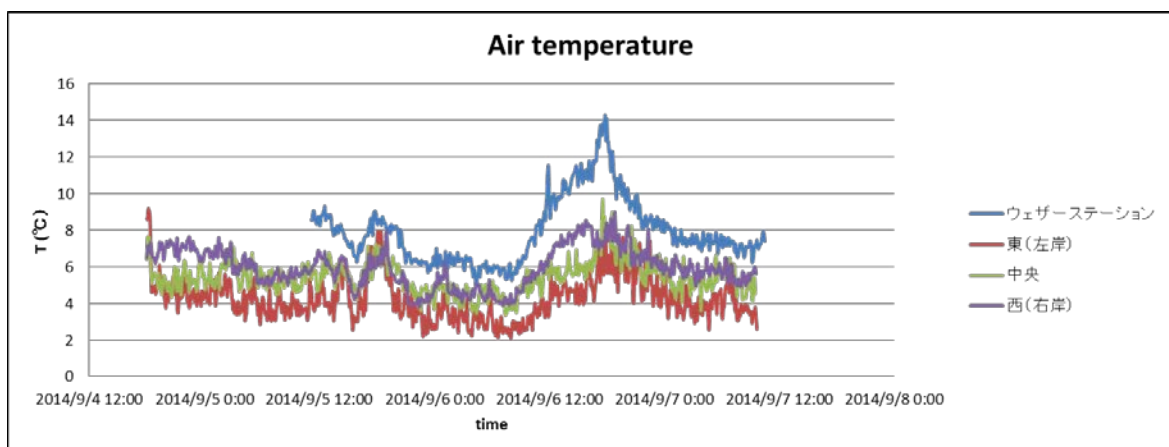


図8. 2014年 Rhone 氷河での気温観測データ

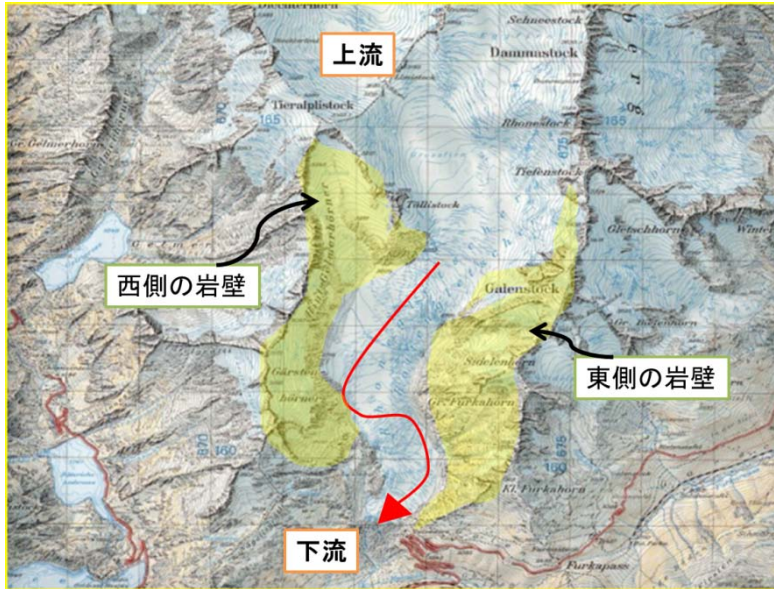


図9. 地形から推測されるローヌ氷河末端部における風の流路

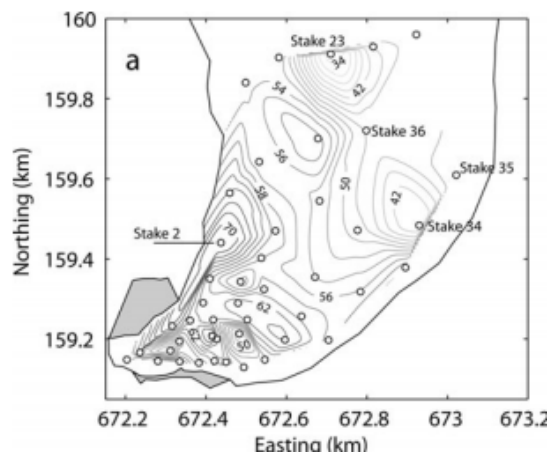


図10. 2009年7/6~9/6までの一日当たりの融解量 (Sugiyama et al., 2011)。

また、西側では氷河地形の凹凸が大きく、測定位置のずれによる標高変化が激しい。よって、東側よりも誤差の影響を受けやすい点も考慮する必要がある。

#### 4-4. 気候要素（平均気温、降雨量）と表面高度低下速度の関係

各年の高度低下速度は氷河の消耗期間である夏の気温と涵養期間である冬の降水量に大きく影響されるのではないかと考えた。そこで2008-2014年の各年について6~8月の最高気温の平均と前年の11月~3月までの総降水量を図11に示した。流線方向と横断方向における高度低下速度が2008-2014で大きかったのは2009年と2011年だった。2009年は夏の気温、冬の降水量共にほぼ平均であった。また2011年は夏の最高気温、冬の降水量と共

に高い値を示した。2014 年は流線方向と横断方向共に高度低下速度が平均より小さかった。夏の平均最高気温は平均より低く、冬の降水量はほぼ平均であった。従って今回の結果から表面高度低下速度・夏の平均最高気温・冬の総降水量の関係は今回の結果からはわからなかった。これは氷の低下速度の要素が夏の平均最高気温と冬の降水量だけではないことが考えられる。さらに今回の観測方法ではクレパスや傾斜のある地点の誤差が大きくなることや表面高度低下速度は純粋な氷の低下速度は示せないことが原因ではないか。

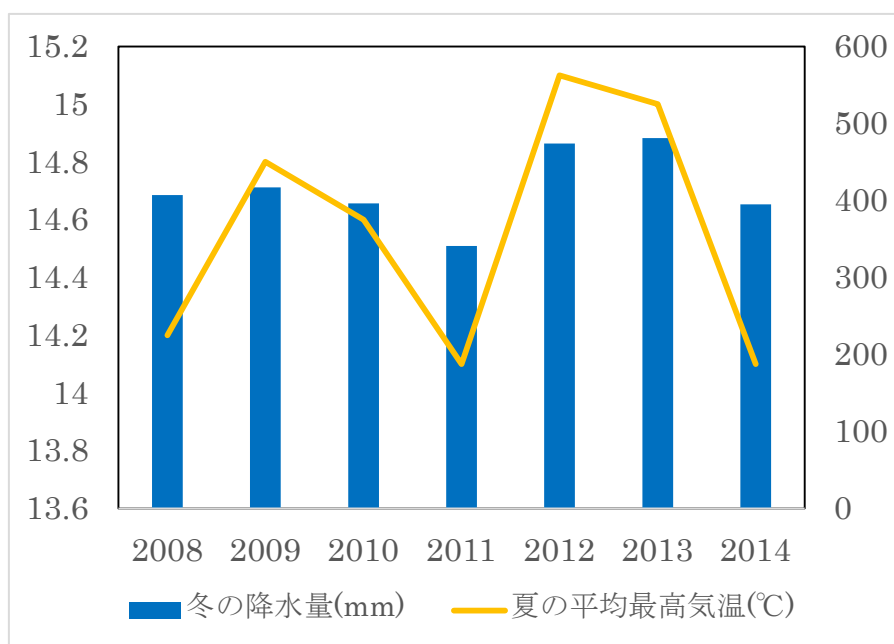


図 11. 各年における冬の総降水量と夏の平均最高気温.

## 5. CONCLUSION

スイスローヌ氷河において GPS によるキネマティック測量を行い、氷河末端部で流線方向と横断方向に設定した側線に沿って氷河表面標高を測定した。2013 年から 2014 年にかけての高度変化は流線方向で-4.27m/year であり、末端付近での表面低下速度が 2013 年までの値と比較して低下していた。横断方向での変化速度は-4.83m/year であり、測線上の各点を比較すると、最西端の地点において最も大きな低下速度が得られた。2008 年から 2013 年の平均高度低下速度と比較すると、2013–2014 年の低下速度は流線方向では 0.85 倍、横断方向では 0.97 倍であり、年間変化速度は小さくなっている。

過去の結果と今年の結果から、横断方向では西の岩壁付近で氷河の後退が今後も促進することが予想される。しかしながら、湖に近い部分ではカービングや湖の融解による質量損失が抑制されることで、表面低下速度の低下が予想される。融解速度が低下しても氷河の後退は収まらないだろう。

## 6. References

Huss, M., Bauder, A., Funk, M. and Hock, R. 2008. Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *GEOPHYSICAL RESEARCH* 113(f1), 1-11.

Sakai, A., Nishimura, K., Kadota, T. and Takeuchi, N. 2009. Onset of calving at supraglacial lake on debris-covered glacier of the Nepal Himalaya, *Journal of Glaciology*, 55(193), 907-917.

Sugiyama, S., T, Yoshizawa., M , Huss., S, Tsutaki and D, Nishimura. 2011. Spatial distribution of surface ablation in the terminus of Rhonegletscher, Switzerland., *Annals of Glaciology*, 52(58) .