

Observational report of GPS survey on Rhone glacier (2010)

北海道大学大学院環境科学院
修士課程1年 漢那 直也
鈴木 裕太
藤部 拓己

Contents

1 . Introduction (p.2~p.4)

2 . Method (p.4~7)

3 . Result(p.7~p.16)

3.1. Transverse sites

3.2. Longitudinal sites

4 . Discussion

5 . Reference

1. Introduction

氷河は降雪によって堆積した雪が長期間融け残り、再結晶化、圧密によって形成された、陸上に存在する巨大な氷塊である。その中でも山岳氷河は地球全体の氷河・氷床の体積比約 0.3%を占め、陸上に蓄えられた重要な淡水源として知られている。氷河の存在は、その地域に生活する人々にとって重要な役割を担っており、山岳氷河が融解する際に流れ出すことで膨大な水流からエネルギーを取り出せるだけでなく、貴重な生活用水であること、観光資源となるなど人々と密接な関わりがある。また、科学者にとって氷河は重要な研究対象であり、地球科学の観点から山岳氷河の挙動によって古環境を復元する試みもなされている。氷河は常に自重で流動しており、氷河上流の涵養域と下流の消耗域の質量バランス、また氷河の底がどのような状態であるか(融解水の存在、下層堆積物の性質等)を調べることで氷河の流動速度、流動量がわかる。氷河の流動によって形作られた氷河地形(モレーン)の形状や氷河跡に成立した植生、その生息範囲、土壌の層序、岩石率等から、過去から現在までの氷河の変遷を推定することが可能である。近年、南極氷床コアの掘削によって過去数十万年間の二酸化炭素濃度を推定することが可能となり、地球温暖化の議論がより活発化するようになった。山岳氷河の動態は地球環境の影響を顕著に受けていると考えられ、近年氷河の後退が観測、報告されている。グリーンランドの山岳氷河が大量に海に流れ出していることも報告され、氷河の後退を加速させている。また、アルベドの低下による融解の促進、海水面の上昇などが危惧されており、環境問題の視点からもその動態が研究されている。

氷河学の先駆的研究例として、1874年から1915年にかけてローヌ氷河は注目を浴びるようになり、初めて氷河の詳細な地形図が描かれた(Mercanton, 1916)。また、氷河の横断面上に色づけされた石を配置し、日ごとにその挙動を観測することで表面流動速度が見積もられた。このように観測の歴史が長いローヌ氷河はスイス中央アルプスの峠であるフルカ峠を望む標高約 2197-3600m に位置し、その表面積は 16.45km²、長さは 7.85km である(Huss et al., 2008)。小氷期には、その氷河末端がスイスから 280km 以上離れたフランスのリヨンまで達していたと考えられている。1865年から2007年にかけて、スイスの気温、降水量のデータセットをもとにローヌ氷河の涵養と消耗の質量バランスが算出され、質量バランスは変動するが、全体として減少傾向にあることが報告された(Funk et al., 2008)。将来の気候変動に応答するローヌ氷河の動向として、流動

モデル(Sugiyama et al., 2007)や質量バランスの数値計算によっていくつかのシナリオが考えられている。このように、長期にわたって研究が進んでいるローヌ氷河において研究を継続して行い、発展させていくことは、気候の変動や氷河の動態を理解する上で重要である。

本研究では、地球上の3次元座標を高い精度で測定する際に用いられる地球測位観測システム(GPS)によって、スイス・ローヌ氷河の表面高度を精度よく測定する。そして2007年から2009年度にかけて行われたGPS観測の結果と比較し、氷河の東西方向の横断面と、南北方向の縦断面における質量バランスの経年変化を見積もることを目的とする。

2. Method

本研究では、動的GPS観測(Real time kinematic positioning : RTK)という手法を用いてローヌ氷河表面高度の観測を行った。観測で用いたGPS機器はLeica GPS System 1200である。この手法は、単独の携帯用小型GPS(GARMIN eTrex Vista HCx)を使用して現在位置の座標を決定する(測定誤差：約5m)場合に対し、2機のGPSを用いて相対座標を求め、より高い精度(測定誤差：2~3cm)で観測点の座標を決定することができる。氷河上の調査地点から約500m離れた岩盤に基準となるGPSを固定し、氷河上を移動しながら受信するGPSの2機、さらに前年と同じ調査地点を決定するために携帯用小型GPSを用いて、観測地点の3次元相対位置座標を得た。またこの観測手法では、固定GPSから受信した位置座標データを氷河上の移動GPSに転送し、氷河上で衛星から得られた位置座標と転送された固定GPSの位置座標データを処理するため、リアルタイムで調査地点の相対位置座標を知ることが可能である。

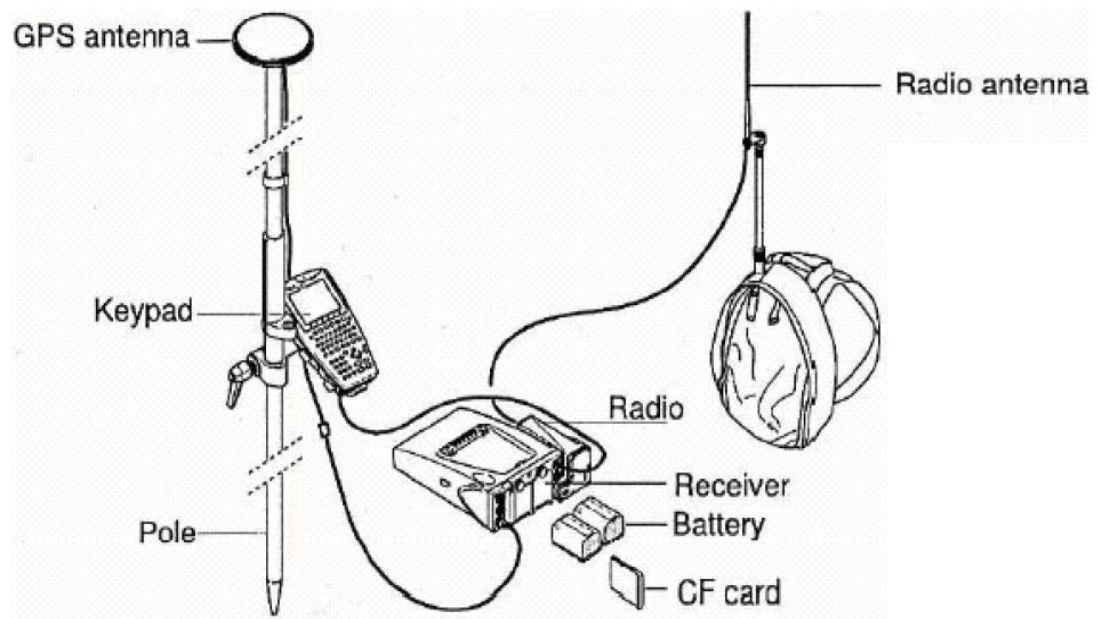


図 1.RTK - GPS 測定器具

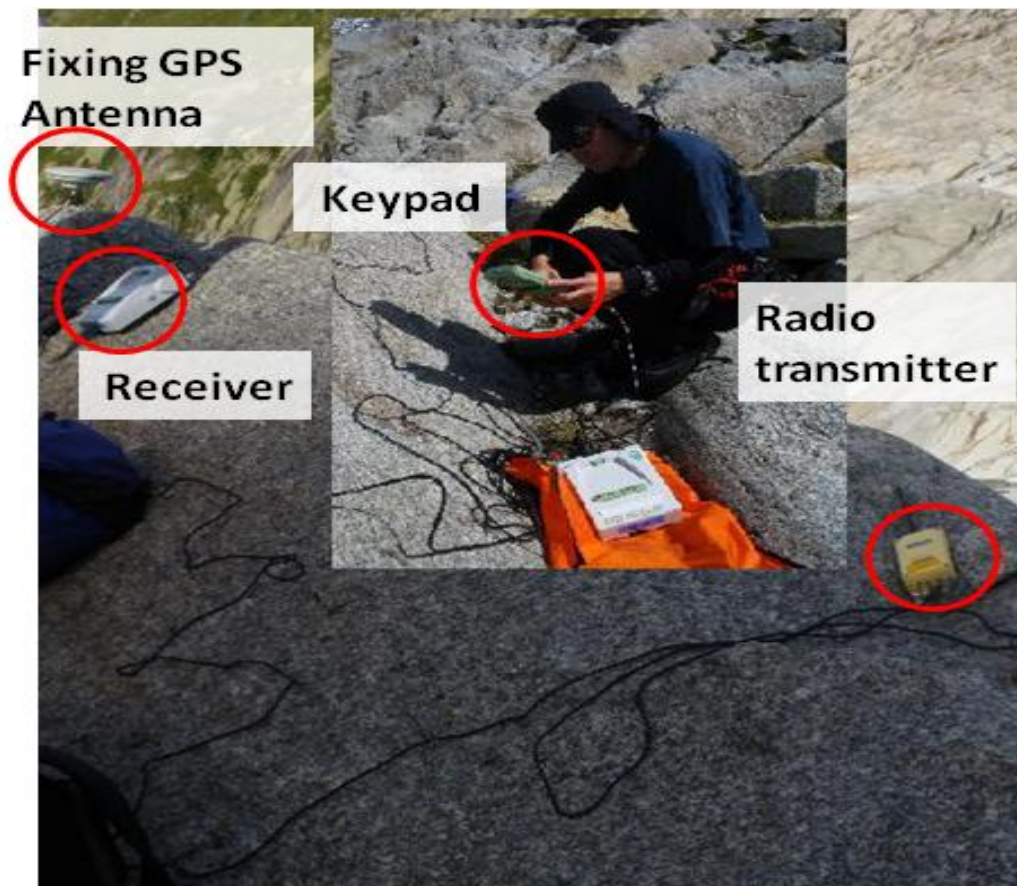


図 2.ローヌ氷河で利用した GPS 観測装置

今回行った調査範囲として、ローヌ氷河における南北方向の縦断面28地点と東西方向の横断面17地点の計45地点で相対位置座標と氷河表面高度を観測した。位置座標としてスイスグリッドを用いた。

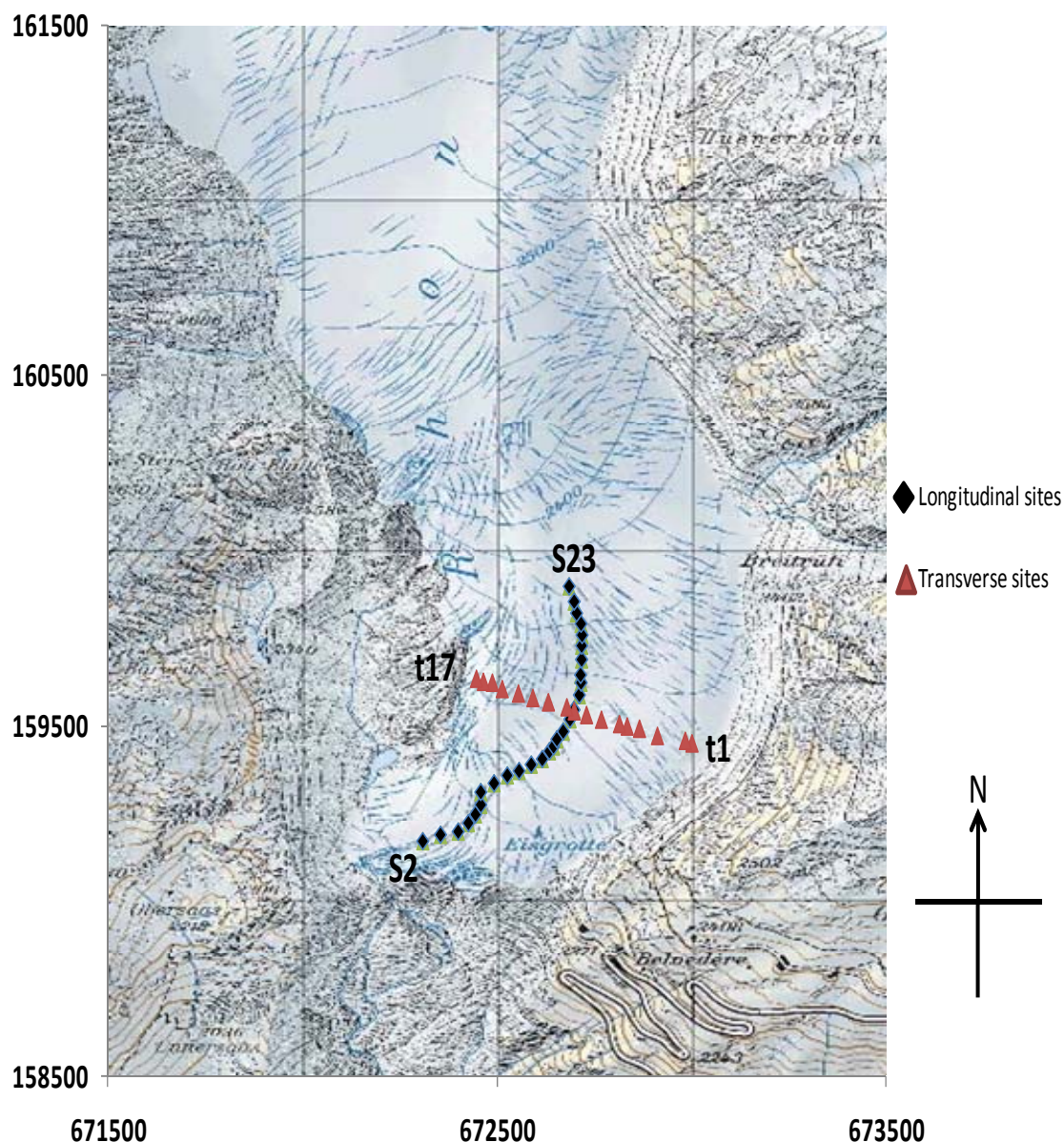


図 3.ローヌ氷河上の観測点

ここで留意すべきことは、前年度観測可能であった調査地点が土砂によって埋まっていたこと、クレバスや氷河湖の影響で観測が困難な地点、受信衛星数の減少によって測定誤差が増大した地点が存在したことが挙げられる。土砂やクレバスによって観測が困難であった地点は、可能な限り

調査地点に近い地点を観測、あるいは観測を断念し、測定誤差が極めて大きかった地点(横断面:t16、t17、(図 3))については解析結果から除外した。また2007年から2009年までは7月と9月の同時期に観測が行われているが、2010年は9月(本調査)の1度しか観測を行っていない。2007年の9月の観測地点は他の年の観測地点と大きく位置がずれているため、本解析では2007年7月31日、2008年9月8日、2009年9月6日、2010年9月2日の観測データを解析に用いることとした。しかし7月から9月の期間で表面高度の減少量が一年の減少量の約40%以上である(北山・鍵和田,2009)ことに留意しなければならない。また例年と同様の調査地点を探索するため使用した携帯用小型GPSが、約5mの測定誤差を含んでいることにも考慮する必要がある。

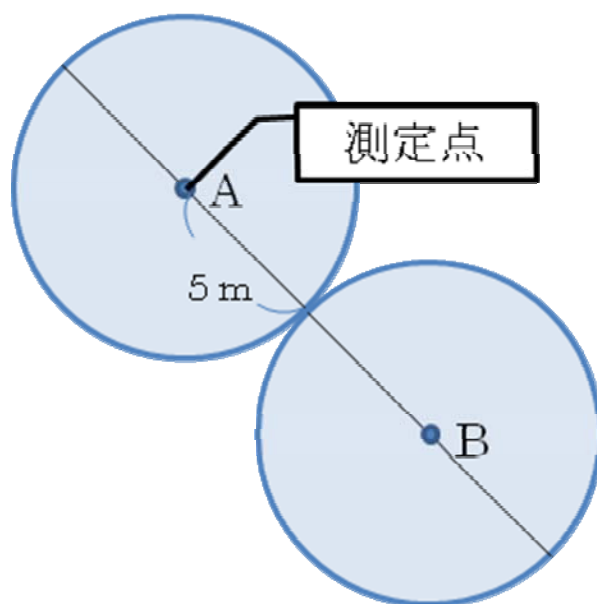


図 4. 携帯用小型 GPS の誤差範囲:前年に測定を行った時の実際の測定点(A)に含まれる携帯用小型 GPS の誤差範囲 5 m と翌年に測定を行った時の実際の測定点(B)に含まれる同様の誤差範囲 5 m のために、測定位置に 1 年で最大 10 メートルの誤差が生じる可能性がある。

3. Result

2010年9月2日に実施したRTK - GPS観測では、ローヌ氷河縦断方向28地点、横断方向17地点を調査した(図 3)。それぞれの観測地点におけるスイスグリッドでの位置座標を表 1, 表 2, 図 5に示す。

表 1. ローヌ氷河横断方向の観測点 (2010)

Transverse sites	Easting (m)	Northing (m)
t1	673000	159450
t2	672983	159457
t3	672912	159471
t4	672865	159491
t5	672834	159498
t6	672814	159505
t7	672767	159517
t8	672729	159530
t9	672697	159541
t10	672678	159552
t11	672631	159567
t12	672591	159579
t13	672554	159592
t14	672512	159605
t15	672487	159623
t16	672463	159625
t17	672446	159634

表 2. ローヌ氷河縦断方向の観測点 (2010)

Longtidunal site	Easting (m)	Northing (m)
s2	672309	159170
s3	672355	159188
s4	672400	159198
s5	672426	159222
s6	672444	159247
s7	672458	159274
s8	672458	159311
s9	672492	159336
bh8	672526	159358
s10	672556	159371
s11	672587	159389
bh3	672616	159405
s12	672634	159428
s13	672644	159442
bh02	672653	159462
s14	672669	159484
s15	672687	159519
bh1	672697	159546
s16	672711	159589
s17	672715	159624
bh4	672714	159646
s18	672716	159690
s19	672716	159730
bh7	672717	159760
s20	672715	159793
s21	672703	159823
s22	672697	159856
s23	672684	159900

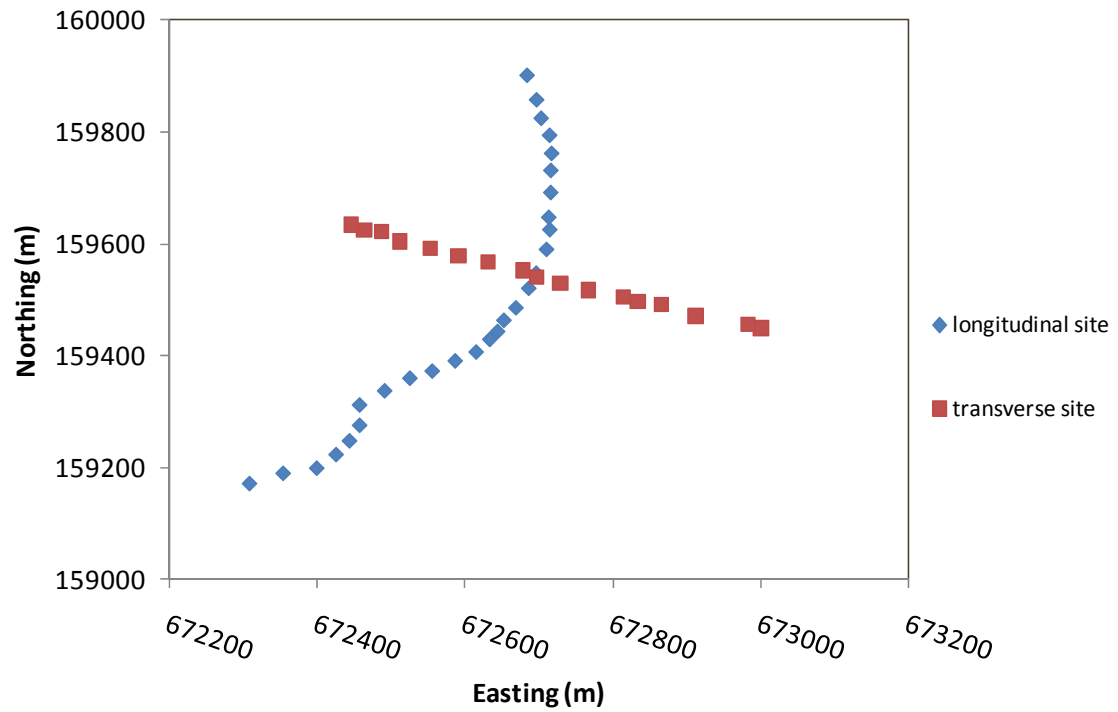


図 5.ローヌ氷河上の観測ポイント (2010)

また、RTK 観測で得られた相対位置の測定誤差を図 6,図 7に示す。

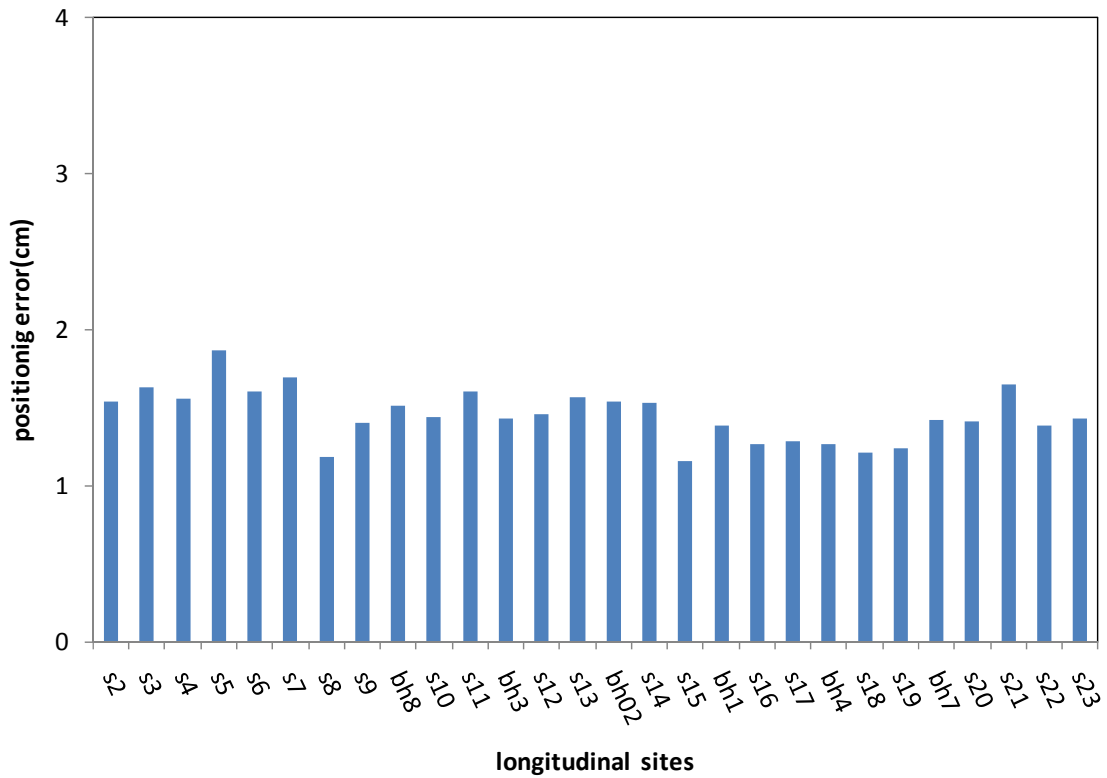


図 6. ローヌ氷河縦断方向の測定点の測定誤差 (2010)

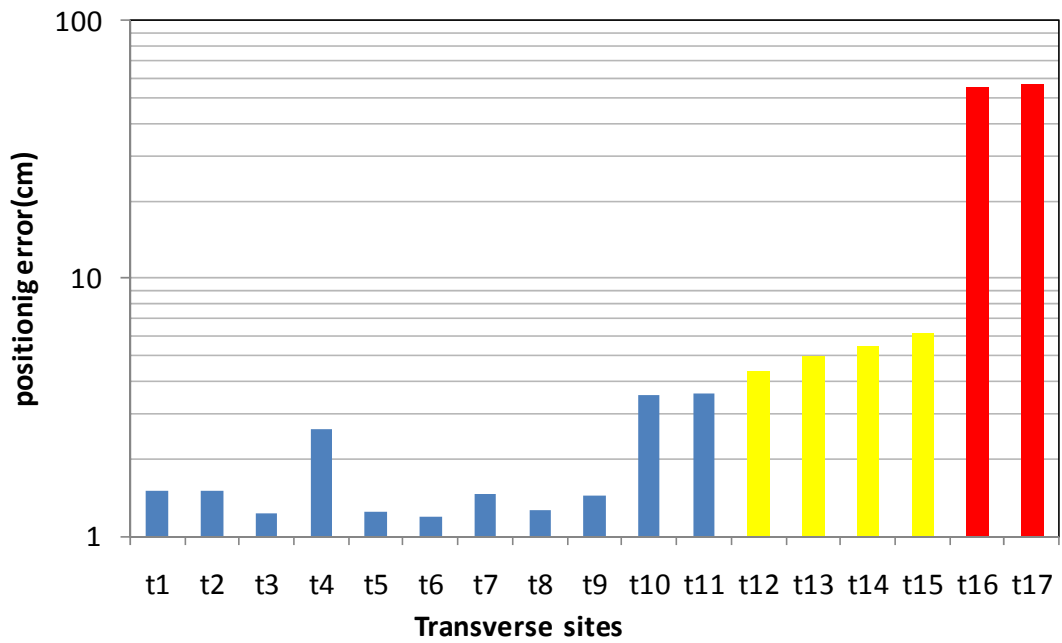


図 7. ローヌ氷河横断方向の測定点の測定誤差 (2010)

今回の観測で許容できる測定誤差は 3cm 以下であるが、ローヌ氷河横断方向の 6 地点(横断方向 : t12, t13, t14, t15, t16, t17, (図 7))において、衛星数の減少により信号の受信感度が低下し、測定誤差が大きかった。特に測定誤差が大きかった 2 地点(t16, t17)についてはその表面高度データを解析結果として使用しなかった。これらは氷河の端に近い山壁が衛星の信号を遮ってしまったことが原因として考えられる。

3.1 Transverse sites

今回実施したRTK観測の氷河横断方向における東西断面のローヌ氷河表面高度と、2007 - 2009年に実施された表面高度測定の結果を図 8に、また各年におけるローヌ氷河横断面の表面高度差を図 8に示す。

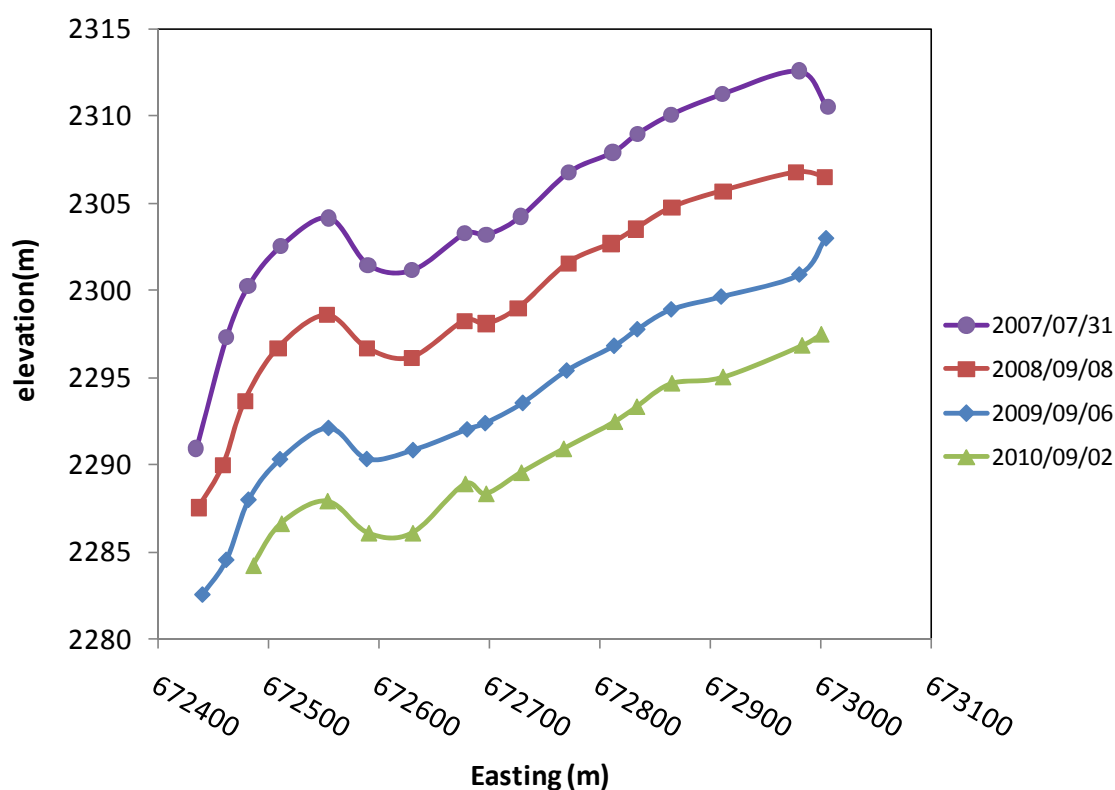


図 8.各年の氷河横断方向の表面高度差 (東西断面)

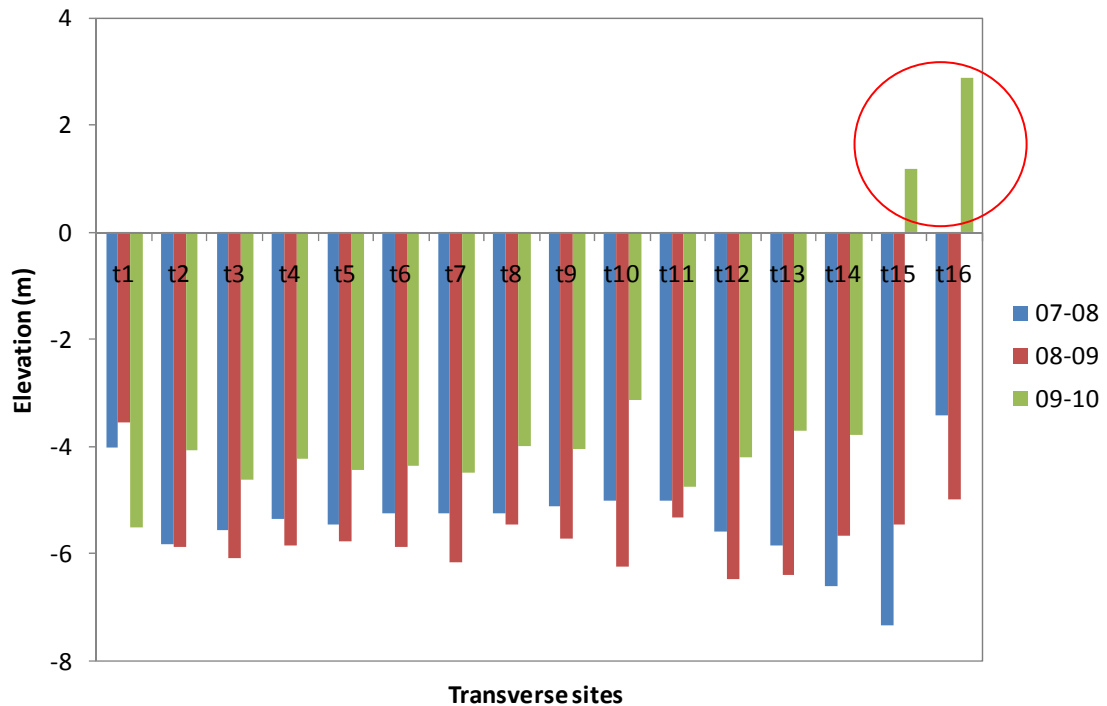


図 9.各年のローヌ氷河横断方向の表面高度差

今回行った観測では、ローヌ氷河横断方向の表面高度は西側で2284mと低く、東側で2297mとおよそ13mの高度差がある。氷河の両岸において、側方向の岩盤に沿うように側方融解が見られ、流線方向に対し東側で顕著であった。また、2007 - 2010年の間で表面高度を比較してみると、ローヌ氷河全体の表面高度は継続して減少した。しかし図 9から2008-2009年の表面高度減少量をピークに多くの地点で09-10年の減少量は小さくなっている。2009-2010年において2か所で表面高度が上昇している点があるが、これは誤差の大きかったt16とt17の地点であるため、外れ値であると考えられる。また、2009年と2010年の各測定地点での氷河表面高度差を図 10に示す。

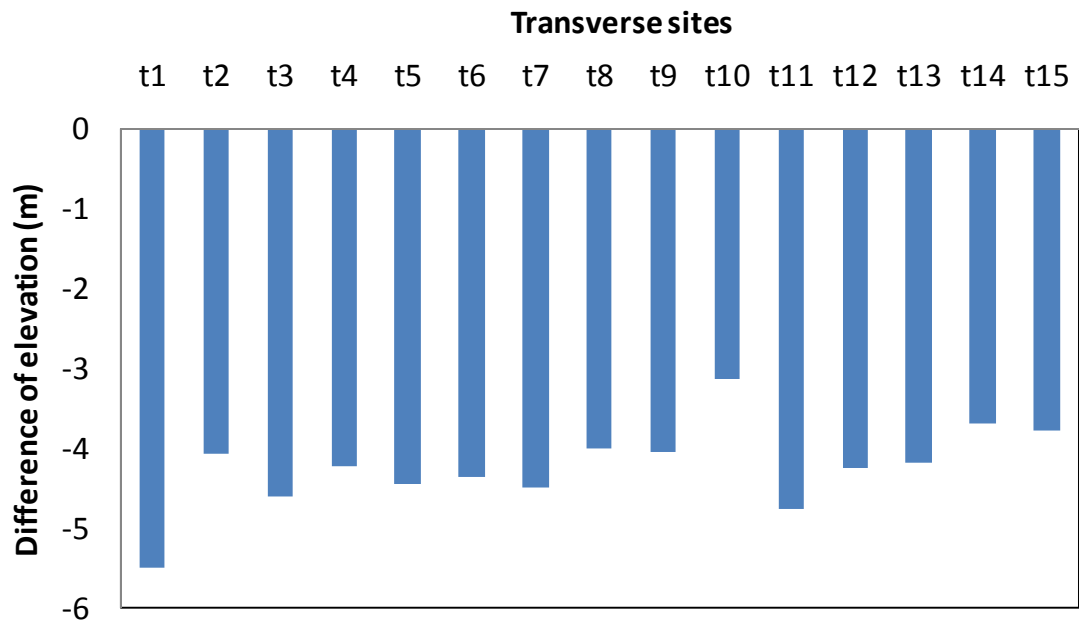


図 10. ローヌ氷河縦断方向の測定点の表面高度差(2009-2010)

2009年と比較して氷河表面高度は全体で平均約4m低下しており、2007年から2010年の3年間で表面高度は平均約15m低下している。また年間の平均高度差はおよそ - 5mであった。

3.2 Longitudinal sites

氷河縦断方向における南北断面の表面高度を図 11に示す。調査地点s7については2008年と2009年の表面高度データが欠損していたため、表面高度を見積もることができなかった。

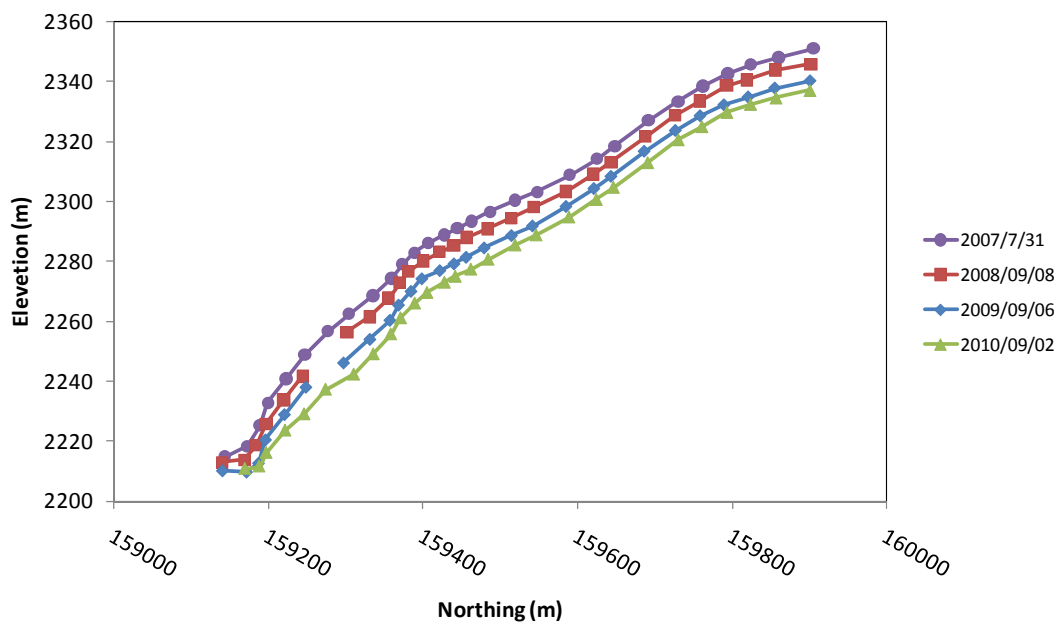


図 11.各年のローヌ氷河縦断方向の表面高度（南北断面）

今回観測した地点において、氷河末端部は氷河が融解して生じた氷河湖と接しており、クレバスが発達していた。観測範囲の氷河上流部と末端部の高度差は約126mであり、2007 - 2010年の期間で氷河横断面と同様に流線方向の表面高度は全体として継続して減少している。また、2007 - 2010年、2009年と2010年の氷河表面高度差を図 13, 図 13に示す。

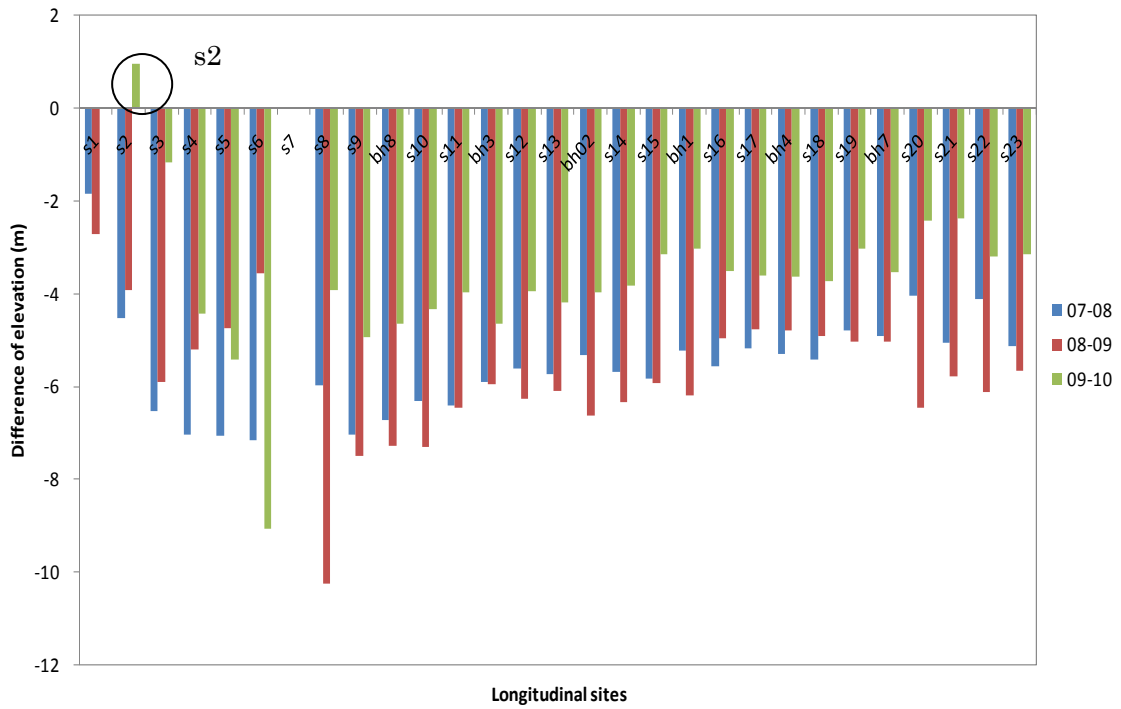


図 12.各年のローヌ氷河縦断方向の表面高度差

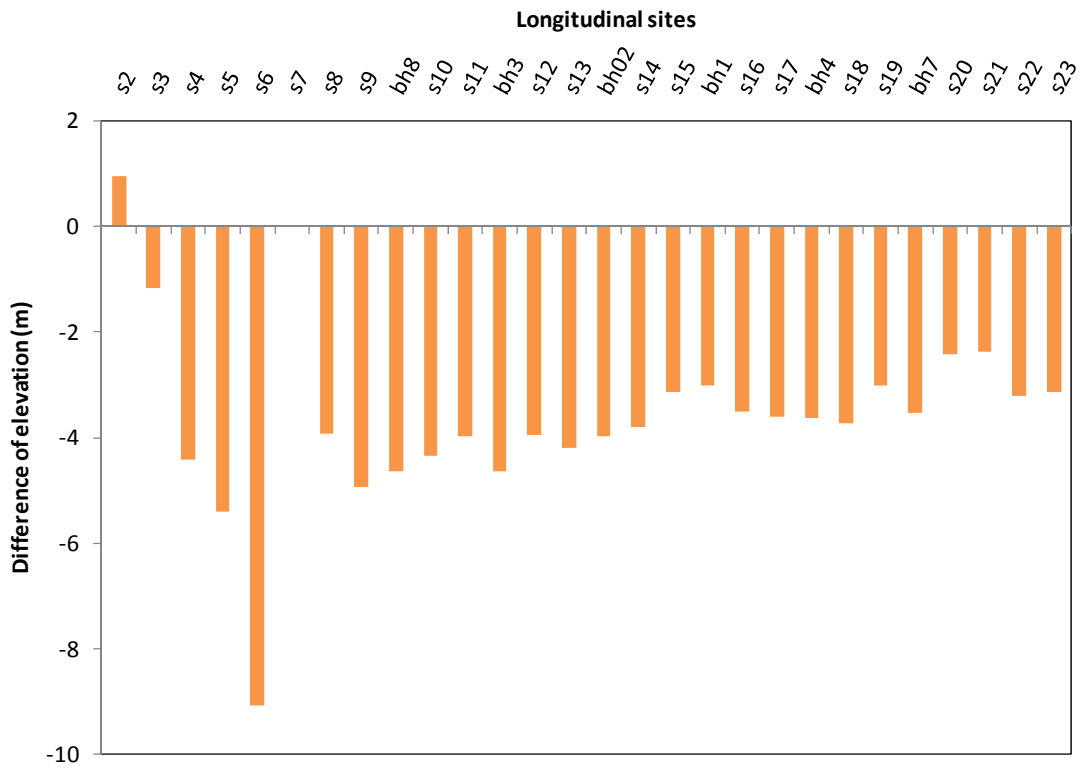


図 13.ローヌ氷河横断方向測定点の表面高度差(2009-2010)

例年、観測範囲の氷河末端よりも上流において高度低下が顕著であるが、図 12より氷河横断方向の結果と同様に、多くの地点で2008-2009年の表面高度減少量をピークに2009-2010年の減少幅が小さくなっていることがわかる。前年度と今年度を比較すると、調査地点s2（下流側）においては高度が前年の同地点より約1m増加していた(図 12)。氷河の縦断方向について前年の表面高度と比較すると、氷河全体では平均約4m低下していた。さらに2007年から2010年の3年間で表面高度は全体として平均約15m減少し、年毎の高度差は横断方向と同様におよそ平均 - 5mであった。

4. Discussion

図 14,図 15に各年の氷河縦断方向と横断方向の測定点位置について示す。図 15から2010年の測定点位置は過去の測定点位置に比べて全体的に南側に平均 6 m程ずれている。観測結果からわかるように下流側では表面高度の減少幅が小さくなる傾向にあることから2009-2010年の減少幅が2008-2009年より小さくなっているのは測定位置が違うことによる可能性が考えられる。しかし携帯用小型GPSによる誤差が最大10mあることは留意しなければならない。

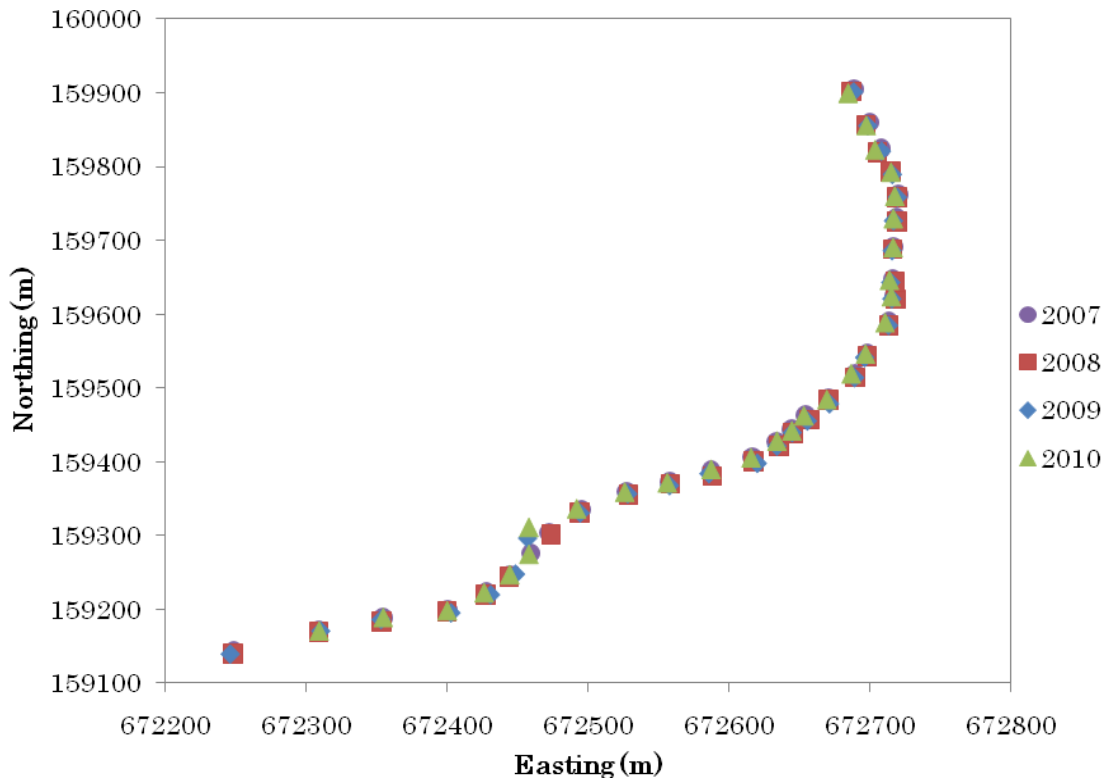


図 14. 各年の氷河縦断方向の測定点位置

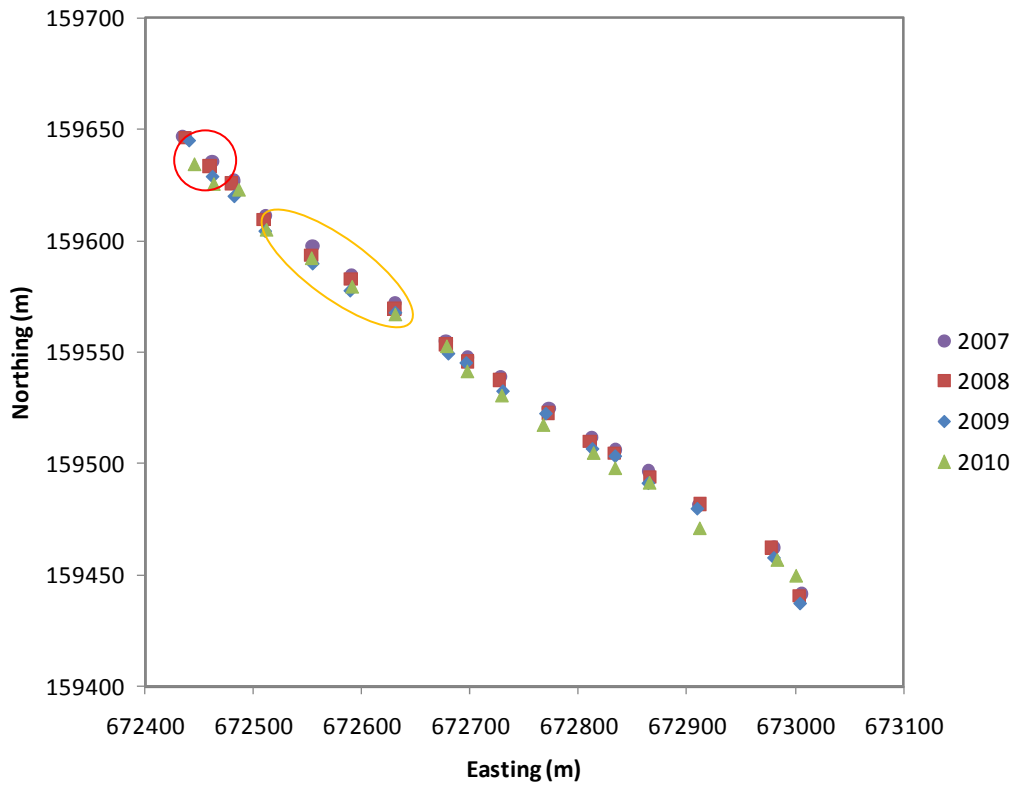


図 15. 氷河横断方向の各年の測定点位置

表3に毎年の前年度から減少した標高差の横断方向、縦断方向それぞれの平均量を示す。

表 3.各年の平均標高差

	2007-2008	2008-2009	2009-2010
縦断方向	2.51m	5.61m	3.88m
横断方向	2.96m	5.06m	3.45m

縦断方向に関しては2009年から平均3.88m、縦断面においても平均3.45m減少しており、氷河の消耗域は全体的には減少しており、過去のレポートを参照すると平均の高度減少量は2007年から2008年にかけては縦断方向が2.51m、横断方向が2.96m、2008年から2009年にかけては、縦断方向が5.61m、横断方向が5.06m減少した。よって、2008年から2009年にかけての標高の減少量よりは小さいが2007年から2008年にかけての標高の減少量よりは大きくなっている。このことは2008年から2009年の減少量が非常に大きかったことを示している。

本研究でRTK-GPS観測手法を用いてローヌ氷河表面高度を観測し、2007-2010年にかけて氷河横断方向、縦断方向で継続して表面高度が減少していることが示唆された。ローヌ氷河において、涵養域と消耗域の質量バランスを保つ高度(Equilibrium Line Altitude: ELA)が1978年と比較して2003年で上昇していることが報告されている。1978年においては2600m付近であったが、2003年では3400mまでELAが上昇し、過去25年間で消耗域が拡大していることが示唆されている。今回観測した調査地点は最も標高が高い場所で2370mであり、2003年で報告されたELAよりも低い位置で、氷河の消耗が顕著である氷河末端の一部分である。従って、今回得られた観測結果だけではローヌ氷河全域の質量が年々減少傾向にあると一概に言えない。今回の観測においては、氷河末端付近の消耗が顕著な地域において過去4年間にわたり氷河の質量が減少傾向にあることが示唆される。また、ローヌ氷河全域における質量の変化について様々な議論がなされており、1874年から2007年にかけて表面積は4.57 km²、氷の体積は0.709 km³減少しており、1874年から2000年の間に正味の質量バランスは平均で0.24 ma⁻¹w.e.減少している(Bauder et al., 2007, Funk et al.,)。1874年から2006年にかけて、氷厚の減少に伴う粘性変形量の減少により氷河底面の流動性が減衰し、流動速度が顕著に低下していることも報告されている(Nishimura et al., 2008)。さらに氷河の涵養量は気温と降水量に関係していることが示唆されており、文献から得たスイスアルプス

における気温と降水量の平均偏差を図 16に示す。

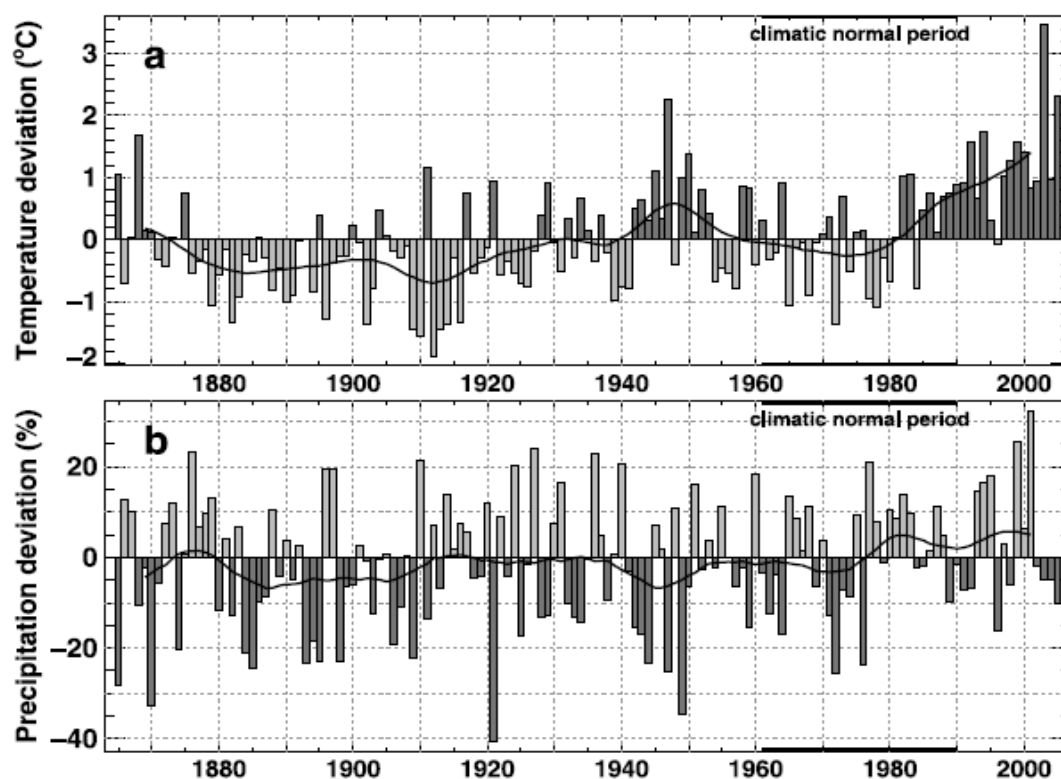


図 16. スイスアルプスにおける気温と降水量の平均偏差

図 16 より 1870 年から 2000 年にかけて、降水量(降雪量)の変動はあまり見られない(1975 年からは増加傾向にある)が、気温が相対的に上昇傾向にある。そのため、降水量は比較的生じるが雪が形成されにくく、ここ数十年にわたる温暖化の影響がローヌ氷河の涵養量を低下させている要因の一つであると考えられる。またこの気温と降水量の経年観測値をもとに氷河の質量バランスモデルが報告され、1865 年から 2006 年にかけてローヌ氷河における質量バランスの遷移は全体として減少傾向にあることが確認されている(Huss et al., 2008, 図 17)。

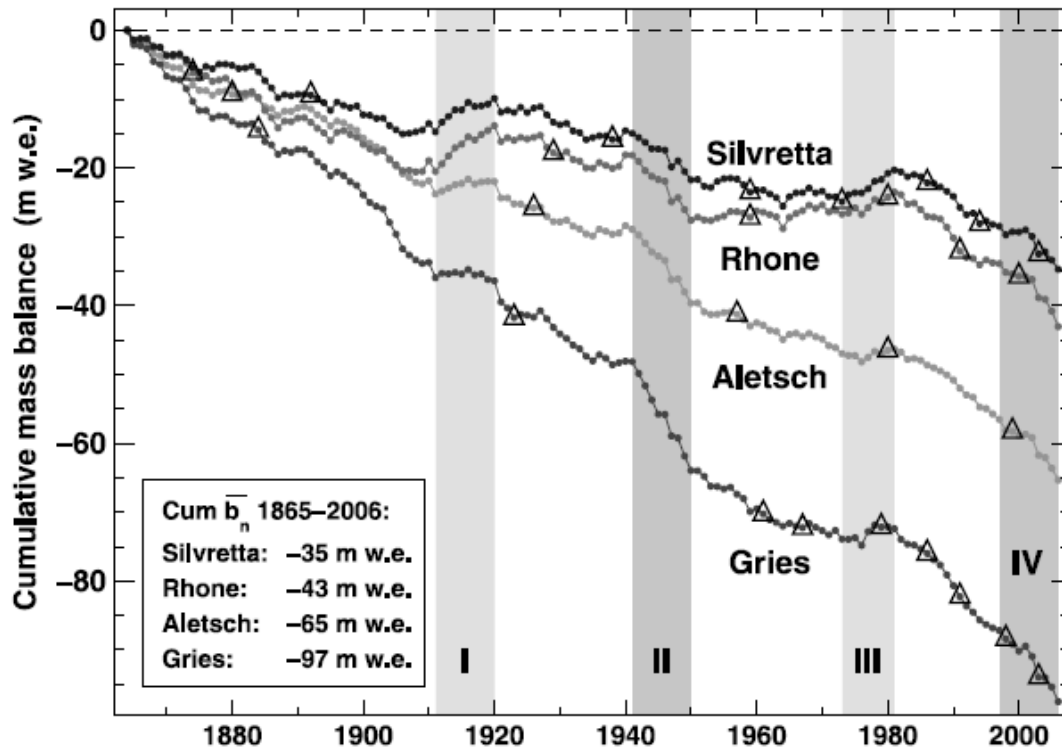


図 17. 1865 - 2006 年にわたるスイスアルプスの正味の平均涵養質量バランスの遷移

また、氷河の流動によって形作られた地形(モレーン)から、ローヌ氷河表面高度の減少について議論できる。ローヌ氷河周辺には過去に氷河が存在していたと考えられるモレーンが観察でき、モレーンに発達した植生、土壌の層序、岩石率によって相対的な年代を推定することができる。現在と比較して、1840年代、1996年に形成されたと考えられているモレーンは明らかに標高が高かったことが地形調査から推測できる。今回の観測では4年間の局所的な消耗域の表面高度低下のみを議論しているが、ローヌ氷河全体として顕著に表面高度は低下していることが氷河地形からも推測できる。

また今回得られた観測結果と、アイスレーダーで観測されたローヌ氷河横断面における氷河底面地形の高度を図 18に示す。

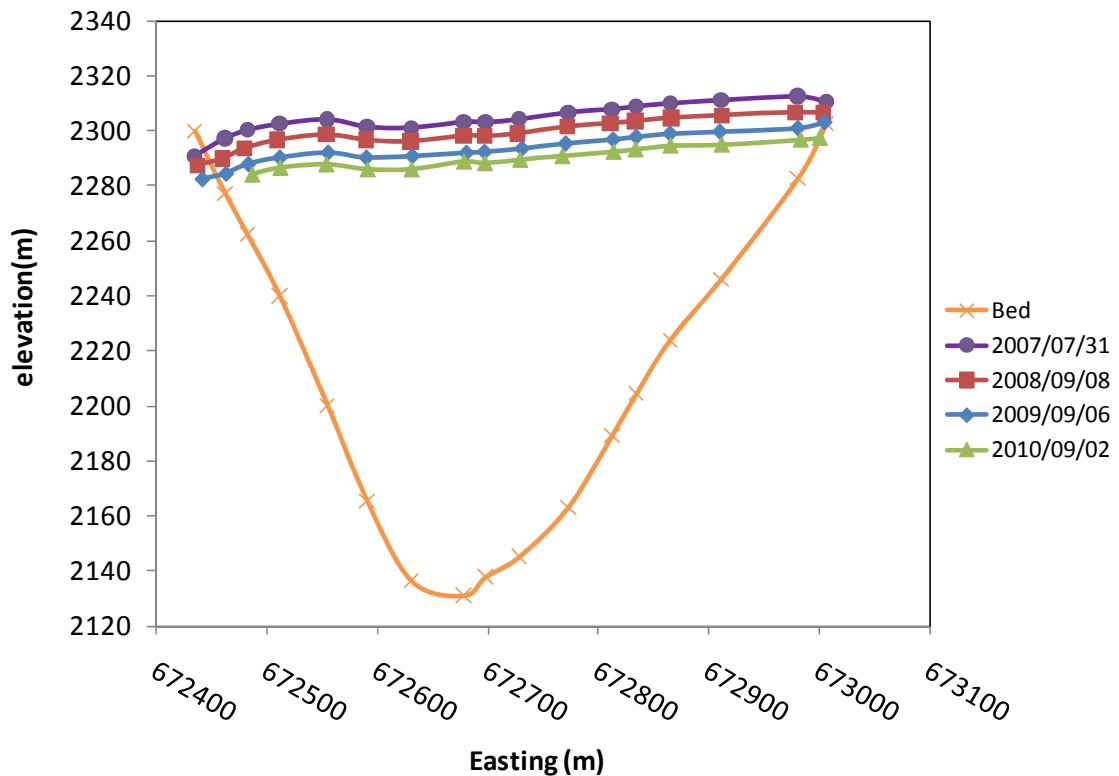


図 18. ローヌ氷河横断面における底面地形

今回観測した氷河表面と底面の岩盤までの高度差は最も高い地点(t10)で約150mあり、底面地形は窪地になっている。観測の際、両岸で側方の岩盤に沿うような顕著な融解が見られた。このことについて、太陽光の日射により側方の岩盤が温められ、側方の傾斜に沿うような融解が生じていたことが考えられる。氷河上で測定されたアルベドが0.76 - 0.5(新雪 - クリオコナイトが存在する氷河表面)であるのに対し、岩盤のアルベドは0.16と低かった。このことから、岩盤は氷河表面と比較してより日射を吸収することがわかる。また、底面では氷河の自重によって高圧になっており、摂氏0°Cで存在する氷河の氷は圧力がかかればかかる程より液体として存在するようになる(図 19)。よって氷河底面では氷河の底面融解によって融解水が溜まっている可能性がある。

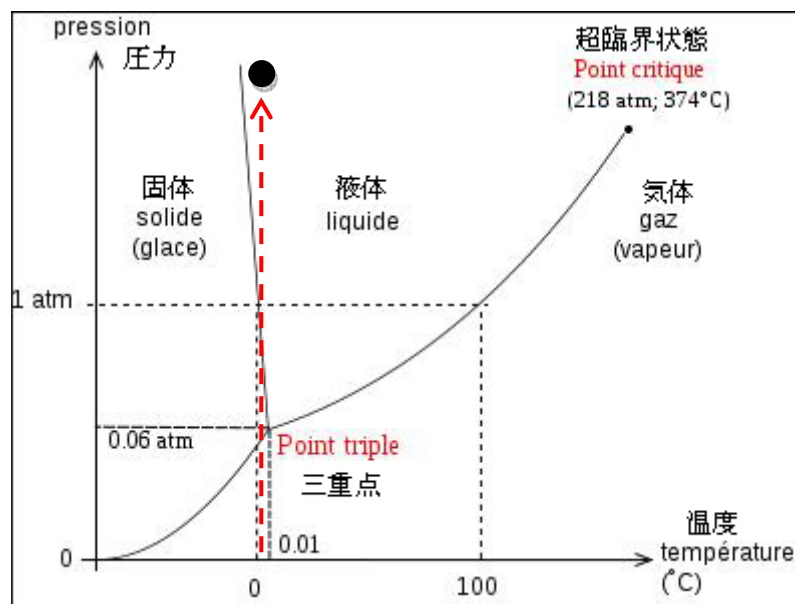


図 19. 水の三態図

氷河消耗域における表面高度の経年低下として、全体的にあるいは局所的に氷河底に溜まった融解水がチャンネルの形成等の要因により、排出が促進された可能性が考えられる。ローヌ氷河と氷河底面地形が類似しているウンターグリンデルワルド氷河では、氷河底の窪地に融解水が排出されるチャンネルが存在し、季節によって開閉することが報告されている。北山・鍵和田(2009)は、2008年度と2009年度の夏季において融解量に差がなかったことを示唆し、7月から9月の期間で表面高度の減少量が一年の減少量の約40%以上であると報告した。従って、気温が高い夏季においてチャンネルが発達し、氷河底面の融解水が一定量排出されている可能性がある。近年、熱水を利用して氷河を掘削する方法(Tsutaki and Sugiyama, 2009)が考えられ、新たな手法で氷河底面の状態を知ることが可能となった。今後、ローヌ氷河の消耗域において氷河底面の状態をより詳細に明らかにすることは意義があるように思う。

また、氷河縦断方向について、氷河底面の高度を図 17に示す。

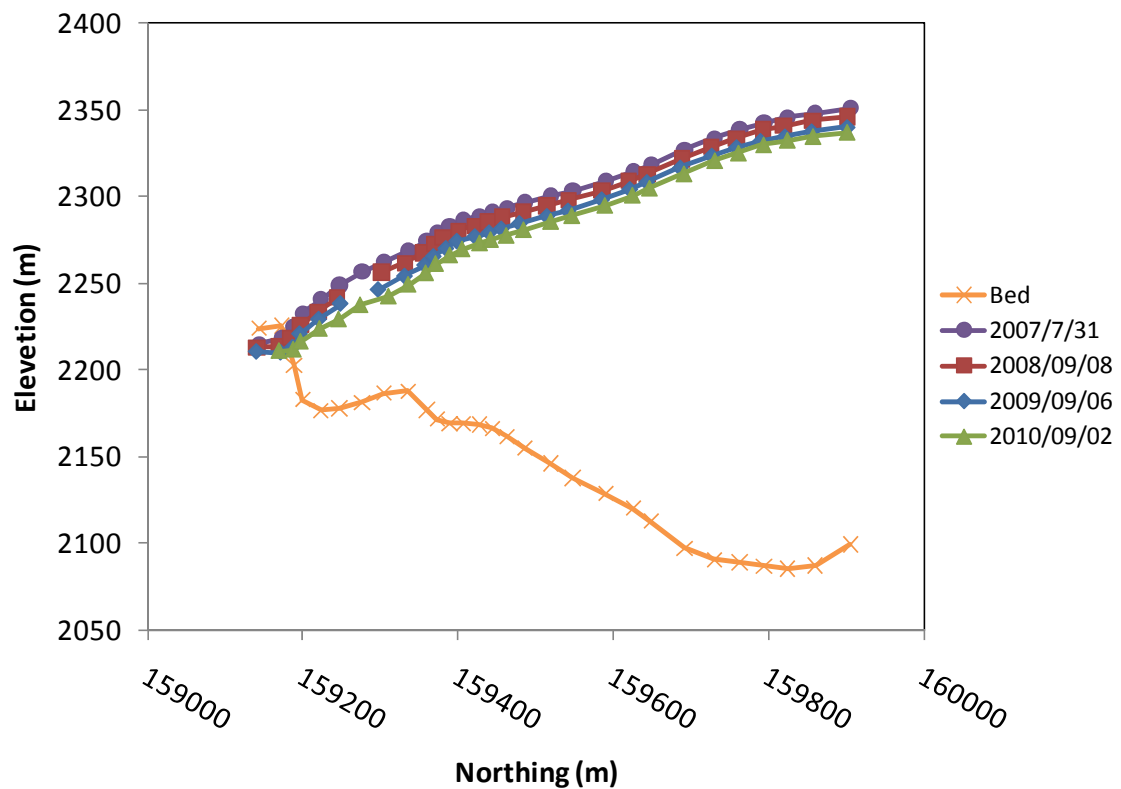


図 20. ローヌ氷河縦断面における底面地形

ローヌ氷河縦断方向において表面高度が減少傾向にある一方で、2009年と比較して末端(調査地点：s2)の高度が約1m上昇していたことが確認できた(図 13)。この高度差が生じた原因として、末端に形成された湖の影響が挙げられる。ローヌ氷河では末端に氷河湖が発達し、その潜在的な水量は $10.2 \times 10^6 \text{m}^3$ (平均水深：22m, 最大水深：71m)であることが報告されている(Funk et al., 図 21)。



図 21. ローヌ氷河末端に形成された氷河湖

氷河湖に接した氷河の末端は、底面が融解水で満たされることで、上方に持ちあげられた可能性があり、この過程はカービング現象として氷河末端の消耗をさらに促進すると考えられる。さらに今回GPS観測と並行して測定したローヌ氷河のアルベドは、時間によって推移するが、氷河上を覆った新雪において平均0.76、クリオコナイトで覆われた氷河表面で0.5、氷河湖表面で0.09であった。氷河湖のアルベドは氷河表面と比較して5-10倍と非常に低い値で、より太陽光を吸収していることがわかる。氷河湖の存在が末端における融解をさらに加速させている可能性が考えられる。またエラー! 参照元が見つかりません。より、氷河末端から上流にかけて氷河底面地形は窪地になっており、氷河末端の融解が進むと融解水が溜まり、さらに氷河湖の規模が大きくなることが考えられ、アルベドの低下による吸収熱量の増加で氷河の後退が加速させられるような正のフィードバックも引き起こすことが危惧される。

氷河末端付近の質量減少には、「氷河末端付近で積雪が減少している」「氷河末端付近への涵養域からの氷河の供給が滞っている」「氷河末端付近の融解量が増大している」など複数の要因が考えられる。今後氷河の変

動や質量収支を正しく理解し、見積もるためには涵養域と消耗域全体を含めた観測が必要である。これに加え氷河の融解を進める要因として氷河の表面積の変化や斜面方向、氷河表面の着色状態などの情報を得ることもより詳細な研究を進めていく上で重要である。

5. Reference

1. Bauder A., Funk M. and Huss M. (2007): Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46, 147
2. Huss, M., Bauder, A., Funk, M. and Hock, R. (2008): Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *J. Geophys. Res.*, 113.
3. Mercanton, P. L. (1916): Vermessungen am Rhonegletscher 1931. *Denkschrift der Schweizerischen Natureforschenden Gesellschaft*, LXXI(2), 1-41
4. Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Nishimura, H. Blatter, A. Bauder and M. Funk. (2008): Hot water drilling and glaciological observations at the terminal part of Rhonegletscher, Switzerland in 2007. *Bulletin of Glaciological Research*, 26, 41-47.
5. 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. *Ann. Glaciol.*, 46, 268-274.
6. Wallinga, J. and van de Wal, R. S. W. (1998): Sensitivity of Rhonegletscher, Switzerland, to climate change: experiments with a one-dimensional flowline model. *J. Glaciol.*, 44(147), 383--393.

7. 西村大輔, 杉山慎, Bauder A., Funk M. (2008): 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. 日本雪氷学会, 27, 41-44.
8. 北山智暁, 鍵和田玄(2009): スイス・ローヌ氷河における GPS-RTK 測量観測結果報告 (2009), 1-17.