2022 年度 スイス実習 GPS 調査

Rhone 氷河末端における過去 15 年間 (2007 年-2022 年)の表面標高変化

渡邊 果步, 捧 茉優

北海道大学大学院環境科学院 地球圏科学専攻 雪氷寒冷圏科学コース 修士2年

1. Introduction
2. Materials and methods4
2.1. Study site
2.2. Methods
2.2.1. GPS surveying
2.2.2. Meteorological data
1. Results7
4. Discussion
4.1. Relationship between climate and surface elevation change10
4.2. Relationship between flow rate and surface elevation change rate11
4.3. Spatial pattern of surface elevation change in the transverse direction12
5. Conclusion
6. Appendix
7. References

1. Introduction

氷河とは陸地に存在する巨大な氷の塊であり、自重により流動することが特徴である. 氷河は、地球に存在する淡水の約75%を占め、氷床(南極氷床やグリーンランド氷床) と山岳氷河に分類される.特に山岳氷河の融解水は周辺で暮らす人々の貴重な水資源となっている.氷河の体積は主に、降雪による涵養と、融解やカービングによる消耗のバランスによって変化する.近年の地球温暖化により氷河の後退が加速しており、RCP8.5(温暖化対策を続けなかった場合の気候変動シナリオ)において、特に中央アルプスや北アジアなど比較的小さな氷河が多く分布する地域では、2100年までに現在の氷河の質量の80%以上が減少すると予測されている(図1)(Hock et al., 2019 in IPCC SROCC).

スイスは国土の約70%が山脈に覆われ,数多くの山岳氷河が存在している.近年1980 年以降,アルプス氷河において顕著に氷が失われており,Rhone氷河もその一つである. (図2)(Huss et al.,2008).さらに過去に撮影された写真をみると,1900年には急斜面 下の谷底にRhone氷河末端が届いていたが,1979年には末端部が急斜面の上部まで後退し たことがわかる(図3).そして,後退を続けたRhone氷河は図4に示す写真のように急 斜面から姿を消し,1993年に右岸末端,2005年には左岸にも氷河湖が出現した(Tsutaki et al.,2013).その後もRhone氷河の後退により氷河湖は次第に成長し,2011年には左右2 つの湖が合体(結合)した.Rhone氷河は,周辺の交通環境などが整備されていることか ら多くの人々が訪れ,スイスの重要な観光資源となっている(Omoto and Ohmura, 2015).現在,氷河末端の一部は布で覆われ,布の断熱効果を利用して融解を抑制するな ど地球温暖化からRhone氷河を守る取り組みが行われている(図5).今後も氷河の後退 が進行し、湖水量が増大した氷河湖に、地すべりによって土砂が流入することによって, 下流域へ大量の水が流れ出す危険性が考えられる.Rhone氷河の変動を把握することは非 常に重要である.

そこで北海道大学のスイス実習では Rhone 氷河が年々どのように氷を失っているかを明らかにするため、表面標高変化を 2007 年から毎年観測してきた. 当観測では 2022 年の表面標高を観測し、過去の観測結果とともに解析することで、2007-2022 年における Rhone 氷河の表面標高変化を明らかにすることを目的とした.



図1 世界の各地域における氷河質量の変化予測. 2015 年を 100 %として, 100 年までの 変化を 3 つの RCP 排出シナリオで予測している(Hock et al., 2019 in IPCC SROCC).



図 2 Rhone, Aletsch, Gries および Silvretta 氷河の 1865-2006 年における積算質量 バランス(Huss at al., 2008).



図 3 (左) 急斜面下の谷底に末端が届いている Rhone 氷河 (1900 年, スイス国立工科大 学地理学教室撮影) と(右) 末端部が急斜面の上部まで後退した Rhone 氷河 (1979 年, Dr. U. Moser 撮影) (Omoto and Ohmura, 2015).



図4 急崖から完全に消えた Rhone 氷河. 2014 年 7 月撮影 (Omoto and Ohmura, 2015).



図 5 急崖の上流部に存在する氷河湖と末端の一部が布で覆われた Rhone 氷河. 2022 年 9 月撮影.

2. Materials and methods

2.1. Study site

Rhone 氷河はスイスアルプス中央部(北緯 46°37′, 東経 8°20′), ローヌ谷の最上流部に 位置しており, その全長は 10.2 km, 最大幅は 3.2 km である(Omoto and Ohmura, 2015). 末 端付近では, 2007 年から北海道大学による表面標高の観測が継続して行われてきた(表 1).



図 6 Rhone 氷河の位置と末端部の氷河湖. 1:200,000 地勢図 No. 3084 (Swisstopo, 1987), 赤枠: 1:25,000 地形図 Guttannen (No. 1230) および Urseren (No. 1231) を貼り合わ せた (Swisstopo, 2009a, b) (Omoto and Ohmura, 2015)

表1 観測日一覧

観測日(年/月/日)
2007/7/31, 9/8
2008/9/7, 8
2009/9/6
2010/9/2
2011/9/2, 3
2012/9/8
2013/9/6
2014/9/6, 7
2015/9/4, 5
2016/9/3
2017/9/2
2018/9/1
2019/8/30

2.2. Methods

2.2.1. GPS surveying

当観測では, 2022 年 9 月 2–3 日に Leica GS10 によるキネマティック測量(Kinematic positioning)を行った.キネマティック測量とは、位置情報の基準となる基地局

(Reference)と、移動する観測点としての移動局(Rover)の2台のGPSを用いて、比較 的短時間(~1秒)の測定で相対位置を測位する方法であり、位置情報を誤差数センチメ ートルの範囲で短時間に算出することが可能である(図7).氷河末端よりも下流の左岸 側の基盤岩上に基準局を1台設置し(図8),氷河上の各観測点で約30秒ずつキネマティ ック測量を行った. 2007年の観測点の位置情報(図8)をハンディ GPS (GARMIN eTrex) で確認し、ハンディ GPS 表示で1m以内に近づいて同座標での観測を行った.座 標表記にはスイス直交座標系(LV03)を用いた.



撮影)を使用.基準局の写真(右).

解析は、解析ソフトウェア Leica Infinity を用いて後処理によって行った. 基準局の x 座 標, y 座標,標高は、それぞれ 672680.178、159037.537、2286.191 m(楕円体高)である. 解析した観測点の表面標高データより、2007–2022 年における年間の表面標高低下速度を 求めた. この時、最も末端に近い観測点の標高はカービングによる浮力の変化の影響を受 けるなど、本来の目的である氷厚変化を反映しない可能性があるので除いて計算した.ま た、2007 年と 2022 年における流線方向の最も下流側の観測点、および横断方向の両端の 観測点の x-y 座標を用いて、それぞれの 2 点間の距離を求めることで、2007–2022 年の 15 年間の Rhone 氷河の末端および末端付近の幅の変化量を推定した. さらに、観測点毎に 15 年間の各年に観測した x-y 座標を用いて、観測地点と平均座標の平均絶対偏差を求め、流 線方向・横断方向それぞれの測定プロファイルで観測点の水平方向の平均的なばらつきを 評価した.

2.2.2. Meteorological data

測定された氷河変動の要因を,周辺の気象データを使って解析した.ローヌ氷河西側に 位置する Grimsel Hospiz (北緯 46°34′,東経 8°20′,標高 1980 m) で観測された,冬 (11–3 月)の月平均降水量を用いた (Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss よ り取得).また同地点で観測された夏 (5–9月)の気温の1時間値データから1日 (= Δ t)の平均気温を算出した (NOAA (アメリカ海洋大気庁, National Centers for Environmental Information より取得).

鉛直気温減率(=-0.006 ℃ m⁻¹) (Braithwaite and Hughes, 2022)を考慮し, 観測した各年の横断方向の平均表面標高での日平均気温を求め, さらに各観測期間における積算暖度

(PDD,単位℃・day)を計算した.ただし観測がなかった 2020 年と 2021 年については,前年の9月から翌年の9月の期間で積算暖度を計算した.さらに,表面低下速度に対する気温の影響を調べるために、求めた積算暖度と 2007–2019 年における Rhone 氷河の横断方向の表面低下量(*M*,単位 m yr⁻¹)を用いて,表面低下速度に対する積算暖度の比例係数(*k*,単位 m ℃⁻¹)を求めた(式 1).

$$k = \frac{M}{PDD} = \frac{M}{\sum_{T_m \ge 0} T_m \,\Delta t'} \quad (\not \eqsim 1)$$

このように求めた積算暖度・表面低下係数を用いて,2019-2022年における年表面低下 量を推定した(式2).



$$M_t = k \cdot PDD_t$$
 (式 2)

図 9 気象データとして用いた観測ステーション Grimsel Hospiz の位置(Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss より)

1. Results

図 10 に 2007–2022 年の観測点を示す. 2007 年の観測では, 流線方向に s1–s38, 横断方向に t1–t16の観測点を設けた. しかし 2022 年の観測では, 流線方向において末端の後退で s1–s14 の地点での測定ができなかった. さらにクレバスによって s15 での測定が困難であったため, 新たに s15s という観測点を設けた. また横断方向においては氷河の縮小によって t1, t2, および t12–16 が測定不可能であり, 岩盤が露出していた bh6rtk 地点の代わりに, 氷河と岩盤の境界に bh6rtks を新たに設けた. 2007–2022 年において, 氷河の末端は 550 m 後退しており, 幅は右岸側で 184 m, 左岸側で 149 m 縮小していた.



図 10 2007-2022 年の観測点

2007-2022年における氷河上の観測点毎のばらつきを求めたところ、流線方向・横断方 向の観測点において平均絶対偏差はそれぞれ2.7m,3.0mとなった(詳細はAppendixの 表1に示す).2007-2022年におけるRhone氷河の流線方向・横断方向の表面標高のプロ ファイルを図11,図12に示す.両者ともに表面標高は2007年から年々低下しており,15 年間での低下量は流線方向で平均23.9m,横断方向で平均24.1mであった.また流線方 向・横断方向それぞれにおいて,各観測点における2007-2019年および2019-2022年の年 間表面標高低下速度を図13,図14に示す.流線方向において,下流ほど表面標高低下速 度が大きい.また2019年以降はそれ以前よりも3.7m大きな低下速度であった.横断方向 も同様に2019年を境に直近3年間の年間表面標高低下速度は、それ以前よりも3.0m大き かった.また左岸側に比べて右岸側でより低下速度が大きく、その傾向はそれ以前(2007-2019年)に比べて顕著にみられた.









4. Discussion

4.1. Relationship between climate and surface elevation change

2007-2019年において極大・極小の表面低下速度を観測した要因を考察するため、気象 データと比較した(図15).表面低下速度が極大であった2016-2017年の積算暖度は観測 全期間の平均値よりも4%大きく、冬季平均降水量は平均値よりも31%小さかった.すな わち、冬季の降雪の少なさにより氷河の表面が裸氷である期間が長く、アルベド低下の影 響も受けて比較的高い気温条件により夏季の融解が促進されたと考えられる.一方、表面 低下速度が極小であった2018-2019年の積算暖度は平均値よりも7%大きかった.その一 方で、冬季平均降水量は平均値よりも31%大きかった.したがって、冬季の多量の降雪が 通常より長く氷河表面を覆い融解を抑制したために、標高低下が抑えられたと考えられ る.

また,積算暖度・表面低下係数から推定した 2019-2022 年の年表面低下速度は,それぞれ 5.7 m yr⁻¹, 5.1 m yr⁻¹, 6.7 m yr⁻¹ となった.特に,2022 年の夏はヨーロッパを熱波が襲い,積算暖度は平均値に対して 179 %と観測期間中最も大きな値となった.ただし,推定した表面低下速度は降雪や氷河表面の状態を無視しているため,更なる解析が必要である.



 図 15 2007-2022 年における, Grimsel Hospiz での冬季(11-3月)平均降水量(上図, 青, 左軸), 積算暖度(上図, 橙, 右軸). 点線は全観測期間の平均値を示す. Rhone 氷河での横断方向の表面標高低下速度の絶対値(下図, 棒, 左軸), 推定した表面標高低下速度(下図, 黄, 右軸).

4.2. Relationship between flow rate and surface elevation change rate

2019-2022年の表面低下速度が、2007-2019年の平均値よりも流線方向・横断方向それぞれ 3.7 m, 3.0 m 大きかった要因に、氷河湖の形成と氷河の体積減少による流動速度の減少 が影響していると考えられる.2005年にRhone氷河の左岸末端に氷河湖が形成され、それ を境に氷厚は顕著に減少し、流動速度は上流側の観測点で減少、末端付近で増加している (図 16) (Tsutaki et al., 2013).上流側の流動速度の減少は、近年の温暖化で涵養域が縮 小し、氷の体積が減少していることに起因すると考えられる.このような上流域と末端付 近の流動速度の差によって、氷は流動方向に伸長して歪み、消耗が促進され、その結果末 端付近の表面標高が顕著に低下したと考えらえる.特に、横断方向の観測点における表面 標高低下速度は、2022年に観測できた観測点のデータのみを用いて計算しているため、 2019年以前は末端から離れている.そのため、近年3年間の低下速度は気象要因による表 面低下に、氷河湖が引き起こす末端付近の氷厚の減少が加わり、顕著に大きな値になった と考えられる.



図 16 2000-2009 年における C1(上流側の観測点)と C2(末端付近の観測点)での水平 流動速度(点線)と氷厚変化速度(菱形付き実線). 垂直に引かれた点線は氷河湖 が形成された時期を示す(Tsutaki et al., 2013).

4.3. Spatial pattern of surface elevation change in the transverse direction

直近3年間(2019-2022年)において、横断方向の年間表面標高低下速度が左岸側より も右岸側の方が大きく、その傾向はそれ以前(2007-2019年)に比べて顕著にみられた. その要因として、右岸側の岩壁からの長波放射による影響が近年増大したためと考えられ る. Rhone 氷河の右岸側の岩壁は東方向を向いており、日中の太陽放射を吸収しやすく、 2009年7月6日から9月6日に観測された Rhone 氷河末端の日平均融解量の空間分布をみ ると、Rhone 氷河の右岸側で日平均融解量が最大となることが分かる(図17).これは氷 河の後退によって露出した右岸側の岩盤からの長波放射をその近くの氷が吸収したためと 考えられている(Sugiyama et al., 2011).直近3年間の横断方向における年間表面標高低 下速度は、それ以前(2007-2019年)よりも3.0m大きかったことから、氷河のさらなる後 退により右岸の岩盤の露出面積が直近3年間で激しく拡大したことが示唆される.そして 岩壁から氷への長波放射が増え、右岸側で氷の融解がより促進されたと考えられる.



図 17 Rhone 氷河末端における 2009 年 7 月 6 日から 9 月 6 日までの日平均融解量(mm w.e. / day). ステークで観測を行った地点を丸で示す(Sugiyama et al., 2011).

5. Conclusion

スイス Rhone 氷河において, GPS 測量によって流線方向と横断方向の表面標高を観測した. 2007-2022 年に観測されたデータを解析し,年々の表面標高低下速度を定量化し,気象データとの比較を行った.その結果,Rhone 氷河では 15 年間において流線方向で 23.9 m,横断方向で 24.1 m標高が低下し,2016-2017 年に最大の表面低下速度(7.0 m yr⁻¹), 2018-2019 年に最小の表面低下速度(4.0 m yr⁻¹)を示した.表面低下速度の年変動を,冬季(11-3月)平均降水量と積算暖度と併せて考察した結果,どちらの寄与も重要であることが分かった.また,積算暖度を用いて 2019-2022 年の年表面低下速度を推定したところ,2021-2022 年に顕著に表面標高が低下したことが推測された(6.7 m yr⁻¹).これは2022 年夏季にヨーロッパを襲った熱波により積算暖度が全観測期間の平均値よりも 79 %大きいことが寄与するとともに,氷河湖形成による流動速度の減少により氷が伸長方向に歪むことが要因であると考えられる.さらに 2019-2022 年において,横断方向の年間表面標高低下速度が左岸側よりも右岸側の方が大きく,空間的な違いが顕著にみられた.これは氷河の著しい後退により,右岸側の岩壁からの長波放射による影響が近年増大したためと考えられる.

2007年の観測点で15年間表面標高の測定を続けてきたが、氷河の末端の後退とクレバスの形成により観測範囲が制限されていることに加え、表面標高変化に氷河湖が大きく貢献していると考えられる。今年は2007年の観測点に加えて、さらに上流側に横断方向の観測点を設け測定した(Appendix表2,図3)。今後は末端付近および上流側の横断面の測定を続けることで、主に気象に影響した表面標高の変化とそれに氷河湖の影響が加わった変化の両方を議論したいと考える。

6. Appendix

表1 2007-2022 年の観測点の水平座標のばらつき

Point id	Mean Absolute	Point id	Mean Absolute	
(Longitudinal profile)	Deviation (m)	(Transversal profile)	Deviation (m)	
s16	3.1	t4	3.6	
s17	2.1	t5	3.2	
bh4rtk	2.5	bh5rtk	3.2	
s18	2.5	t6	3.2	
s19	2.1	bh1rtk2	2.7	
bh7rtk	2.3	t10	2.5	
s20	2.0	t11	2.5	
s21	3.1			
s22	3.0			
s23	3.1			
Mean	2.7	Mean	3.0	

表 2 2022 年における観測点の位置

Longitudinal profile		Transversal profile			New Transversal profile			
Point id	Easting (m)	Northing (m)	Point id	Easting (m)	Northing (m)	Point id	Easting (m)	Northing (m)
s15s	672703.2591	159487.0181	t3	672894.3387	159488.4914	e1	672507.5405	159902.4582
s16	672710.7933	159586.5876	t4	672868.8312	159498.3018	e2	672538.4305	159901.0494
s17	672718.0841	159620.1236	t5	672839.0333	159509.2955	e3	672565.4489	159896.2722
s18	672714.7716	159685.6156	bh5rtk	672814.2502	159512.8076	e4	672599.0793	159898.7049
s19	672717.3046	159725.1653	t6	672776.3771	159524.2063	e5	672627.276	159900.7458
bh7rtk	672719.7494	159758.4593	t7s	672748.4452	159539.4623	e6	672657.9564	159901.9483
s20	672714.0425	159791.5812	t7ss	672705.4445	159538.1506	e7	672689.9766	159901.2212
s21	672710.1372	159819.2907	bh1rtk2	672695.1932	159547.1533	e8	672715.5499	159901.4482
s22	672698.1047	159856.2745	t10	672678.6599	159553.2713	e9	672748.9015	159903.2077
s23	672687.4215	159903.8059	t11	672630.8165	159569.27	e10	672777.3594	159903.02
s24	672680.4772	159933.2784	bh6rtks	672607.404	159582.5634	e11	672807.3526	159903.7504
s25	672672.4348	159963.7896				e12	672840.9797	159901.6662
s26	672666.0479	159995.1718				e13	672869.9901	159903.5251
s27	672657.7187	160024.9904				e14	672900.4898	159904.1389
s28	672647.6796	160053.6059				e15	672931.0916	159903.3184
s29	672507.4909	159902.4435				e16	672962.5616	159901.018
						e17	672989.193	159897.5567
						e18	673019.3135	159899.7549
						bh4rtk	672713.7636	159644.2655





Easting (m) 図 3 2022 年の観測で新たに測定した横断プロファイル



図4 2001-2022年におけるスイスアルプスの氷の量の変化(%)

7. References

Braithwaite, R. & P. Hughes (2022). Positive degree-day sums in the Alps: A direct link between glacier melt and international climate policy. *Journal of Glaciology*, 68(271), 901-911. doi:10.1017/jog.2021.140.

Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Grimsel Hospiz (2022). <u>https://www.meteoswiss.admin.ch/home/climate/swiss-climate-in-detail/homogeneous-data-series-since-1864.html?station=grh</u>

Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, Al. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer (2019). High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 131–202. doi: 10.1017/9781009157964.004

Huss, M., A. Bauder, M. Funk & R. Hock (2008). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. Journal of Geophysical Research, 113(F1):F01015, doi:10.1029/2007JF000803.

Huss, M. (2022). Worse than 2003: Swiss glaciers are melting more than ever before [Press Release]. <u>https://scnat.ch/en/uuid/i/2e076759-0234-567e-9bfb-2cdfebd6ff34-</u> Worse than 2003 Swiss glaciers are melting more than ever before

National Oceanic and atmospheric administration (NOAA), National Centers for Environmental Information (2022). Integrated Surface Dataset (Global), Data Search, <u>https://www.ncei.noaa.gov/access/search/data-search/global-hourly?stations=06744099999&startDate=2007-01-05T00:00:00&endDate=2007-01-05T23:59:59</u>.

Omoto, K. & A. Ohmura (2015). The Rapidly Retreating Rhone Glacier in the Central Alps, Switzerland: Reconstruction Based on Photographs and Documents, Journal of Geography (Chigaku Zasshi), 124(1), 127–135, 2015, doi:10.5026/jgeography.124.127.

Sugiyama, S., T. Yoshizawa, M. Huss, S. Tsutaki, & D. Nishimura (2011). Spatial distribution of surface ablation in the terminus of Rhonegletscher, Switzerland. Annals of Glaciology, 52(58), 1– 8. doi: 10.3189/172756411797252185.

Swisstopo (1987). Landeskarte der Schweiz 1:200000, Nr.4. Bundesamt für Landestopographie. Swisstopo.

Swisstopo (2009a) Landeskarte der Schweiz 1:25000, Guttannen Blatt 1230. Bundesamt für Landestopographie. Swisstopo.

Swisstopo (2009b) : Landeskarte der Schweiz 1:25000, Urseren Blatt 1231. Bundesamt für Landestopographie. Swisstopo.

Tsutaki, S., S. Sugiyama, D. Nishimura & M. Funk (2013). Acceleration and flotation of a glacier terminus during formation of a proglacial lake in Rhonegletscher, Switzerland. *Journal of Glaciology*, *59*(215), 559-570. doi:10.3189/2013JoG12J107.