2014 スイス氷河実習 -気象観測-



- 理学院 宇宙理学専攻 修士2年 笹森映里
- 環境科学院 地球圈科学専攻 修士1年 鉤谷豪志
 - 農学院 環境資源学専攻 修士1年 伊倉万理

1. Introduction

氷河は気候変動に敏感に反応し、涵養と消耗(融解)といった現象を伴ってその形状を変化させることが分かっている。近年、地球温暖化による気温上昇に伴って世界各地の氷河のほとんどが後退傾向を示しており(IPCC, 2001)、急激な気候変動による氷河の融解量が増加しているといえる。特にスイスアルプスなどでは山岳氷河付近で生活する住民も多く、氷河から得られる水資源の減少や融解時の出水による土砂災害などが懸念されている。氷河の融解量と気候変動との関係が明らかになることで、今後の氷河の後退速度の予測や災害への対策に繋がると考えられる。

氷河の融解には顕熱、潜熱、伝導熱、放射収支が関わっている。積算温度法など気温と融解量の関連 性については既に多くのモデルも作られているが、放射エネルギーが氷河の融解に強い影響を与えてい ることも分かっており(Huss et al., 2009)、精度の高い融解量の予測をするためには双方を考慮に入れ る必要がある。

氷河上の表面融解量には空間的な違いは、1.氷河周辺の地形による日射の遮蔽、2.氷河表面のアルベド(反射能)、3.周辺の岩盤からの長波放射などの局所的な影響よって生じことが指摘されている(Sugiyama et.al, 2011)。 しかし、これらの放射エネルギーは時空間変動が著しいためモデル化が難しく、実際に現地で測定した値を用いて融解量の予測をすることが望ましいとされる。この研究では比較的低標高にあり、毎年著しい後退傾向にある山岳氷河であるローヌ氷河において気温、そして全ての放射エネルギー要素(日射量、反射日射量、入力・放出長波放射量)を現地で測定することで、ローヌ氷河における熱収支要素の空間分布と融解量の関係を明らかにすることを目的とする。

2009 年 7 月から 9 月に行われたローヌ氷河の融解量の測定では横断方面では氷河の西側が融解量が多 く、アルベドも大きいという結果であった(図1)。アルベドの値が大きく、日射のエネルギーを多く吸 収すると、氷河の融解が促進されることが分かっている。今回の研究では全ての放射エネルギーを測定 することで、アルベドと他の放射エネルギーが与える影響について明らかにする。



図 1 (a)2009年7月6日から9月6日までのローヌ氷河における1日あたりの平均融解量の分布(b)2009 年8月5日にローヌ氷河上で測定されたアルベドの分布(Sugiyama et. al, 2011)

2. Methods

2.1 気温

氷河上の気温は融解に大きく関わる要因の一つであり、本研究では氷河上の異なる場所での気温を測 定する。また、氷河上の気温や放射量は局所的な影響を受けた結果といえるため、局所的な気象だけで なくバックグラウンドの気象を観測することは氷河上の気象の特徴を明らかにするために重要である。 このために氷河上の気温に加え氷河外において気温と他の気象項目を測定することとする。

2.2 放射エネルギー要素

氷河の融解には放射エネルギー要素の中でもアルベドが大きく影響を与えていることが分かっている。 アルベドとは地表面が太陽放射を反射する割合のことをいい、日射量(短波入射量)と反日射量(短波 反射量)の比で表すことができる。アルベドが高いと日射をより多く反射し、反対にアルベドが低いと 吸収するということである。日射によるエネルギーを多く吸収すると氷河表面の融解が促進される。ま た地球上の物体は温度に応じてエネルギーを放射しており、これが長波放射(赤外放射ともいう)であ る。氷河が受ける長波放射は雲や周辺の岩盤由来であり、氷河表面に熱を与えてることを意味し、これ らも氷河の融解に関連があると考えられる。

2.3 融解量

氷河の形状は涵養と消耗のバランス(質量収支)と流動によって変化する。特に氷厚を調べることは 各地点での質量収支を把握する上で重要である。実際の氷厚を測定するには高度な技術が必要だが、氷 河の表面高度変化は GPS を用いて簡単に測量することができる。氷河の表面高度の変化は融解や流動に よる影響が含まれるが、この研究では主に表面高度の変化が融解によるものとして考察した。

2.4 調査地概要

この研究の調査地は、スイスアルプスの中のローヌ氷河とした(図1)。フランス四大河川のひとつの ローヌ川の源流であるローヌ氷河は、標高約2300~3500mに位置しており、150年以上前からこの氷河の 変動について記録されている。現在では1874年と比較して1700m後退しており、末端にはローネゼーと 呼ばれる湖が形成されている。この湖と氷河の末端の間ではカービングと呼ばれる、氷河の一部が氷河 本体と切り離されて氷山となる現象が起こることで氷河の後退が促進されている。また、氷河を囲む地 形の特徴としては、氷河の南西側の斜面によって、朝の数時間ほど氷河の東側の日射が遮蔽されるよう な形状であった。



図 2 ローヌ氷河 (航空写真は 2010 年のもの) (Google Maps より作成)

2.5 調査方法

氷河上の熱収支要素と表面融解量の関係を調べるために、毎年 GPS 観測されており表面高度の変化が 既知である地点(図3、表1)において気温及び放射エネルギー要素を測定した。気温は氷河上の東(右 岸側)、中央、西(左岸側)の3点にて温度計付ロガー(HIOKI, Model:3633/9631-02)を用いて定点で 30秒毎の瞬間値を記録した(図4)。温度計は通風式放射シェルター内にセンサーを取り付け、氷河表面 から120cmの高さで測定した。

放射エネルギー要素については日射量、反射日射量、入力・放出長放射量を、4 成分放射計(英弘精機, MS-40) にデータロガー(Campbell Sci. Inc., CR1000)を取り付けた装置を用いて氷河上で移動観測を行 った(図5)。放射エネルギー要素は9 地点(図3、表1)において1 地点につき5分間、最低2回、午 前(10:00-13:00) と午後(14:00-17:00)にて測定した。にて氷河表面から120cmの高さで測定を行っ た。このとき同時にサーモグラフィカメラを用いて氷河表面やその周辺環境の温度を測定し、地点ごと の長波放射量の違いを調べるための参考とした。

また、ローヌ氷河におけるバックグラウンドの気象を観測するために、氷河外の岩盤(北緯 46° 34'43.52 西経 8°23'12.546)に気象観測地点(ウェザーステーション)(図 5)を設置し、ウェザー トランスミッター(WXT520)と日射計、データロガー(Campbell Sci. Inc., CR1000)にて気温、湿度、 風向、風速、気圧、日射量を 20 秒毎の測定し、5 分平均値を記録した。ここにも氷河上のものと同じ温 度計付ロガー(HI0KI, Model:3633/9631-02)を同じ条件で設置し、比較対象とした。



図 3 ローヌ氷河上での観測地点

表 1 測定地点

name	Northing (m)	Easting (m)	気温測定
T14(西)	672477.9373	159629.6313	0
T13	672510.1687	159611.6077	
T12	672554.6461	159596.839	
K2	672694.2758	159549.0798	
T7(中央)	672725.339	159534.5923	0
Т6	672772.1117	159519.2966	
T4	672864.5016	159494.4952	
Т3	672912.0963	159480.7786	
T2(東)	672964.2424	159455.2532	0



図 4 氷河上での気温定点観測装置



図 5 氷河外の岩盤に設置したウェザーステーション



図 6 放射エネルギー要素測定装置

3. Results

3.1. 気象ステーションにおける観測

図7に気象ステーションの観測結果を示す。9/5 は 13:15 頃から 17:20 にかけて最大で 2.4 mm/h の降 雨があり、日射量が小さく、気温の昼夜差も小さかった.雨は 14:00 頃に一度止み、その後再び降り出 した.降雨時は南西より(氷河下流から上流へ)の1-3.5 m/s 程の風が吹いていたが、雨が一度止む直 前には最大 7.2 m/s もの北東より(氷河上流から下流へ)の風が吹いていた.9/6 の日中は、日射量を見 ると、晴れていたが、時々雲が太陽を遮り日射量が少なくなっていることが読み取れる.晴れていると きの日射量は 13:30 – 14:00 頃に最大となることがわかる.今回の観測では最大で 845 W/m²(9/6 11:55) であった.気温は日射量につられるように変化している.日射が届き始める 7:30 頃に最低気温 5.3 ℃、 また最高気温は 18:00 頃に 14.3 ℃を記録している.

湿度は降雨のあった 9/5 午後に高くなっている(約 90 %). 9/6 では日中は低くなり夜にかけて高くなっている.また,観測された気圧は 772 – 775hPa であった.これと他の観測量との関係は見られなかった。



図 7 9/5 11:10 - 9/7 11:00 におけるウェザーステーションの観測結果.上から気温,日射量,風 向・風速,降水量,湿度,気圧を示している.風向は 0°(北),90°(東),180°(南),270°(西), と角度で表されている.また,破線は南風を表している.

3.2. 温度計付きロガーによる気温の観測

氷河上の三点とウェザーステーションの温度計付ロガーによる測定値は図8のようになった。気温は

9/5, 9/6 共に 18:00 頃に極大となっている。観測期間中, 氷河上の気温は最低で 2.2 ℃と常に 0 ℃を上回っており, 氷河を溶かすセンスにある。



図 8 氷河上の定点観測地点およびウェザーステーション(ロガー付温度計)における気温の推移(30 秒観測値の生データをプロット). 青はウェザーステーションの測定値で,9/5 11:10 - 9/7 11:00 のデ ータである.紫,緑,赤は氷河上の定点観測地点の測定値で,それぞれ西,中央,東の気温(9/5 18:00 - 9/7 11:00)を表している.

図9は同じ観測点における二つの温度計(ウェザートランスミッターと温度計付ロガー)による気温の 観測結果である。2種類の温度計による測定を行ったが、ほとんど差異は見られず、どちらの機器でも 正確な気温が測定できたといえる。9/5の午後からは降雨があったため気温も低く、午後の最高気温は 13:10の9.0℃であり、その後一時的に集中的に降雨があり気温が下がり、夕方にかけて回復して18:50 には8.6℃まで気温が上がった。9/6は朝から晴れており、最高気温は17:50の14.0℃であった。この地 点は氷河東側の岩盤であるため、早朝では氷河を囲む山に日射が遮られている。これが気温に表れてお り、8:00以降に急激な気温上昇が見られる。この地点の気温のピークは18:00~19:00であると考えられ、 太陽が西側に動き、日射量が多くなることも起因していると考えられる。



図 9 気温 ウェザートランスミッターとロガー付温度計の比較.赤はウェザートランスミッター,青 は温度計付きロガーで測定した気温を表す.

表2 は各観測点の平均気温を表している。基準点よりも氷河上の3点の方が低く、氷河上では東ほど 気温が低いという結果になった.この平均気温は気温減率0.006 ℃/m に従い、氷河中央を基準として 標高補正を行っている。標高補正を行うと,標高差による温度変化を排除した、同標高における観測点 の気温を比較できる。

場所	補正後(℃)
基準点	8.2
東	4.3
中央	5.4
西	5.9

表2 地点ごとの測定期間中平均気温(高度補正後)

3.3. 気温, 日射量, 風

図 10 は 4 地点における気温と日射量,風を比較した図である.氷河上の気温もウェザーステーション の気温と同様,日射につられるように変化している.ウェザーステーションの気温は日射に大きく影響 され、9/5 よりも 9/6 のほうが昼夜差が大きくなっている.一方,氷河上の気温は,天気の異なる 2 日間 で昼夜差に大きな差は見られなかった.これはウェザーステーションは岩盤上にあることが原因だと考 えられる.岩盤は日射によって暖められ,氷河よりも大きな長波放射を放出し,空気を暖めるためであ る.

オレンジの網掛けでは南・南西の風が吹いた後に氷河上3点の気温差が小さくなっている.また,ここ



図 10 上図は4点の気温と日射量,下図は風向と風速を示している.オレンジ色の網掛けは南 - 南西 の風が吹き氷河上3点の気温差が小さくなった部分である.

3.4 放射エネルギー要素

3.4.1 アルベド

測定したアルベドは図 11 のようになった。T3 の午後が 0.049 と測定値の中で最低値であり、T6 の

午後の 0.18 が最大値であった。氷河の東側でアルベドが最も低くなり、中心付近が高く、西側では中心 よりも少し低くなる傾向があった。



図 11 横断方向のアルベドの分布 エラーバーは最大値と最小値を示す

3.4.2 短波入射量 短波入射量の結果は図8のようになった。T14・T6・T2以外では午前のほうが午後よりも値が大きくなっている。この三点では午後の値のばらつきが非常に大きく、日射量の変動が著しかったことが分かる。午後の地点での最少値同士で比較すると、東端のT2が925.2 W/m²と最大であり、K2 が最小で186.4 W/m²であった。午前中はT14が最も低く230.8 W/m²であり、すぐ隣の側点であるT13との差が著しく大きい。T6もT14に次いで小さく、周辺の側点と比較して著しく低い値である。



図 12 氷河上の短波入射量 (エラーバーは最大値と最小値を示す)

3.4.3 長波入射量

長波入射量は図7のようになった。午後よりも午前の方が地点での違いが大きかった。午前の最小値はT14の271.7Wm⁻²であり最大値はK2の296.3Wm⁻²であった。午後ではK2は最小値の302.9Wm⁻²であり、T4で310.7Wm⁻²であった。午前中の値(270~295Wm⁻²)と比較して午後(300~310Wm⁻²)は全体的に高い値を示しており、絶対値の変化が5~35Wm⁻²程度であった。値の高い午後は東西で10Wm⁻²程度のばらつきであったのに対して、値の低い午前中は西側で小さい値を示した。



3.5 表面高度変化量

2013 年から 2014 年にかけて GPS 測量による表面高度を測定したところ、地点ごとの表面高度変化は図 15 のようになった。氷河の西側の T14 が最も表面高度変化が大きく-7.92 m で、K2 が-4.0 m で最も変化が小さい。T14 は他の地点と比較してひときわ表面高度変化が著しく、表面融解量が極めて多いと考えられる。



図 14 横断方向の表面高度変化(2013-2014)

4. Discussion

氷河上の熱収支は式1のように表される。

 $S (1-a) + L + H + LE + C = \sigma T s^4 + M$ (1)

S:日射量 a: アルベド L:長波入射量 H: 顕熱 LE: 潜熱 C:熱伝導 σ Ts:表面からの長波放 射量 (Ts は氷河表面の温度で常に 0℃) M:融解量

ここでは熱伝導と潜熱は無視することとし、氷河上の融解量は日射量、アルベド、長波入射量、顕熱に よって支配されているといえる。顕熱は気温や風によって影響される項であり、双方が大きいほど氷河 に熱が供給される。これらの項の違いが表面融解量の違いに現れると言える。

氷河中央と東西の気温を比較したグラフが図 16 である。平均的に西側は常に中央より気温が高く、逆 に東側は低い結果となり、氷河西側で表面高度変化が大きいことに対応している。

西側で気温が高くなる理由としては、温められた西側岩壁の影響を受けている可能性が考えられる。 氷河上の気温が氷河表面の影響をかなり受けていることは、図 10 で見られるように、南風のときに地点 ごとの温度差が小さくなることから明らかであり、氷河の上流から来る北風は冷やされた空気であると 言える。ローヌ氷河の地形をみると観測地点上流で氷河が湾曲しており、上流の氷河に沿って流れてき た風はここで向きを強制的に変えられるが、その時に西側の温められた壁に接した空気塊は温度が上昇 することが推察される。



図 15 氷河上の気温の比較

Sugiyama et al. (2011)では図6のようなアルベドの分布となっており中央が最も高く、両岸にいくに つれて低くなるといった傾向を示しており、今回の午前中の測定では同じような傾向を示した。氷河上 のアルベドが低くなる要因としてはクリオコナイトと呼ばれる微生物があるが、両岸が低い値を示す理 由としては側岸からの土砂供給が主な理由だと考えられる。特に東側は西側に比べて落石も多く、土砂 供給が頻繁に行われるために氷河表面がそれらに被覆されて、アルベドの値が低くなるという可能性が ある。氷河中央でアルベドが低い理由としては、氷河中央部では融解水が多く流れており、氷河表面の 堆積物を洗い流すからであると考えられる。アルベドが低いほど融解熱が増加するはずであり、最もア ルベドが高かった K2 は表面高度変化が最も小さかった。しかし、アルベドと表面高度変化は対応してい ない点も多く、今回の調査でははっきりとした関係が明らかにならなかった。Sugiyama et al. (2011)で は氷河の東側はアルベドが低く、融解が促進されるはずであるが、朝方に数時間ほど東側の日射が遮蔽 されることが融解量を抑える効果が強い可能性が示唆されており、今回の測定でも似た結果が得られた。

今回の測定ではアルベドの同じ箇所での測定値に大きなばらつきが見られたが、日射量や表面の状態 (雲の陰など)に左右されるため、日射量が同じで、測定場所に陰を作らない条件である快晴であると きに測定する必要がある。今回長波放射の結果からも分かるように午後のの測定の際雲が多く、晴れ間 が見える時と雲の影になる時とで測定値が大きく異なった可能性がある。

今回の観測では、表面高度変化の要因として上記の気温やアルベドに加えて Sugiyama et al. (2011) で述べられている周辺の岩盤からの長波放射の影響は示すことはできなかった。これは長波入射量を測 定する際に雲量の時間変動が著しく、測定値から純粋に岩盤からの長波入射を抽出することができなか ったためである。放射量の測定は快晴時に行い、条件を揃えることで正確な比較をするべきである。

岩盤の長波放射量は抽出することはできなかったが、図 16 のようにサーモグラフィで見ると、氷河表 面の温度は約 0℃であるのに対して周囲の岩盤の温度が 10℃以上高いことが分かる。これらからも、先 ほど述べた、西側の岩盤によって上流からの空気が温められて気温が上昇するといった現象が起きてい る可能性が考えられる。



図 16 (a) 氷河を南側(下流側)から俯瞰したときの温度分布 氷河に対して周囲の岩盤の温度が高 いことが分かる(b) T14 から西側(左岸側)の岩盤を撮影したもの 氷河表面は氷点下程度であるが、 最も高い箇所では 23℃を示している

5. Conclusion

今回の調査を通して氷河の融解量の空間的分布はその場の局所的な熱収支に影響されていることが示 唆された。ローヌ氷河では西側が最も表面高度変化が著しく融解量が多いと考えられており、その場の 気温、アルベドだけでなく、その周囲の岩盤による長波放射等の複合的要因によって融解が促進されて いる。また、その場の局所的な条件を作り上げる要因となるものは付近の土砂生産源であったり、氷河 全体の地形に起因する風向であったりする。今後は同条件での正確な熱収支要素の測定と、周囲の環境 から受ける長波放射の評価方法の確立が求められる。

<参考文献>

IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K.Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

Huss, M., M. Funk, and A. Ohmura (2009), Strong Alpine glacier melt in the1940s due to enhanced solar radiation, Geophys. Res. Lett., 36,L23501, doi:10.1029/2009GL040789.

Sugiyama, S., Yoshizawa, T., Huss, M., Tsutaki, S., & Nishimura, D. (2011). Spatial distribution of surface ablation in the terminus of Rhonegletscher, Switzerland. *Annals of Glaciology*, *52*(58), 1-8.