2013 年度スイス氷河実習レポート

ローヌ氷河表面のアルベド測定

農学院　環境資源学専攻　森林・緑地管理学講座　M1 山本逸生
環境科学院　地球圏科学専攻　雪氷・寒冷圏科学コース　M1 大橋良彦

1. はじめに

1.1　氷河の重要性と危機

氷河の融解は世界の多くの地域において重要な役割を果たしている。中でも山岳氷河は地球上に存在する陸氷の１%にも満たないにも関わらず(Ohmura, 2010)、人間生活に密接に関わっている。例えば、山岳氷河からの流出水は、灌漑用水、水力発電、山岳地域における携帯水など、氷河周辺に住む人々に重要な水資源を供給している(Schaefli et al., 2007; Huss et al., 2008a)。そのため山岳氷河の縮小、消失によって引き起こされる流出水量やその季節変動の変化は、氷河流域に住む人々の生活に大きな影響を与えうる。また山岳氷河、氷帽の融解は海面上昇の要因として熱膨張に次ぐものであると報告されている(IPCC AR4, 2007)。気温変化に敏感に応答する山岳氷河、氷帽は陸氷の大部分を占めているグリーンランドや南極の氷床に先んじて縮小するため、現在、地球温暖化の影響による海面上昇への寄与率が非常に高いことが明らかにされている。現在、地球温暖化の影響により氷河は危機的な速度での後退を続けている。Huss et al. (2008b)は、1865 年から 2006 年までのスイスアルプスに存在する４つの氷河の累積質量収支を計算した結果、著しくその質量が減少していることを報告している(図 1.1)。将来の氷河の動態が人間社会へ与えるインパクトを予測するためには、氷河の融解速度をより正確に推定する必要性がある。

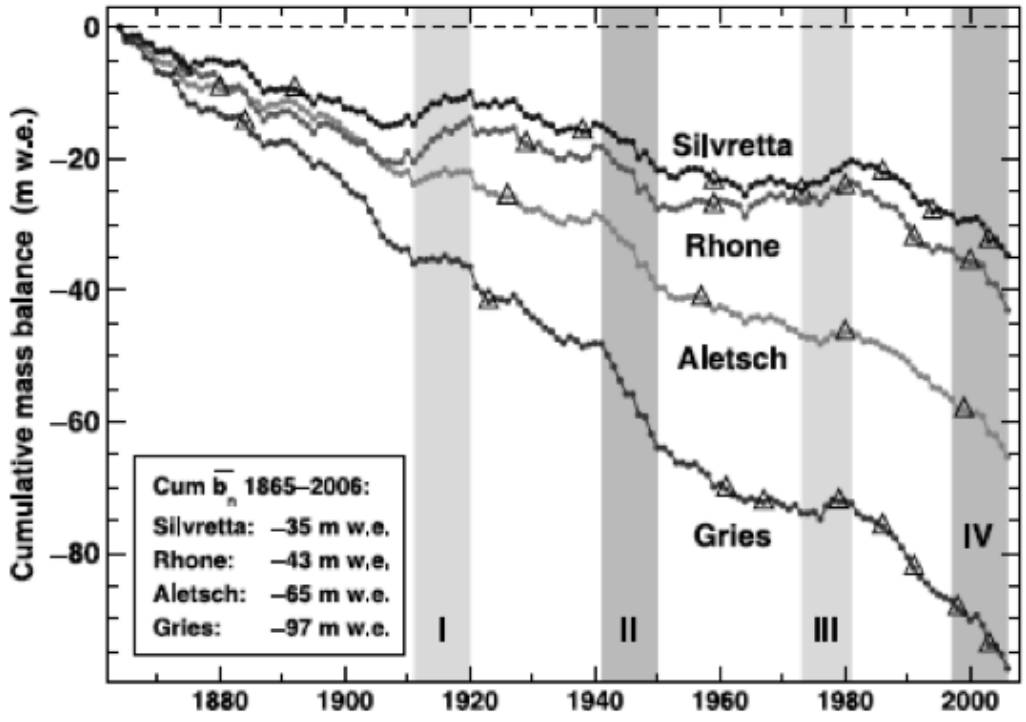

図 1.1　スイスアルプスの 4 つの氷河の累積質量収支(Huss et al., 2008b)

1.2　アルベド

氷河融解の要因には顕熱、潜熱、伝導熱、放射収支などが挙げられるが、その中でも放射収支は氷河の融解量を制御する主要な要因である(Huss et al., 2009)。地表面の日射の反射能をアルベドと呼ぶ。アルベドは氷河融解に対する敏感な指標として知られている。アルベドは太陽からの放射エネルギーに対する反射エネルギーの比であり、式.1 で表される。

$$\text{(式.1)} \qquad a = \frac{\text{反射エネルギー}}{\text{放射エネルギー}}$$

つまり、アルベドが低いほど、太陽から放射されたエネルギーの吸収する量が多く、より氷河の融解を促すことを意味する。アルベドは地表面状態の違いによっても様々な値を示すことが知られている。氷河上では、気温や天候、氷河の存在する地域によって表面状態が異なるため、アルベドの値も様々である。一般的にアラスカやカナダなど高緯度に位置する氷河はヒマラヤ山脈やヨーロッパアルプスにおける氷河に比べ白くアルベドの値が高い。また、涵養域と消耗域で比べれば、涵養域の方が氷河の表面の色は白くアルベドの値が高くなる。同じ氷河上であっても、新雪や古雪の違い、氷河表面の融解や汚れなどの氷河表面状態の違いによってアルベドの値は異なる。氷河の融解量の時空間変動を理解し、将来の氷河動態を予測するためには、氷河の上流と末端、中心部と側部、カーブにおける内側と外側といったアルベド値の空間的なばらつき、同じ地点におけるアルベドの値の時間的変化を知ることが必要である。

1.3　既往研究

山岳氷河においてアルベドに関連した研究はこれまでにも数多く行われてきた(e.g. Gascoin et al., 2009; Yasunari et al., 2010; Dumont et al., 2011)。Sugiyama et al. (2011)は、スイスのローヌ氷河末端部において氷河表面のアルベドの空間分布を調査し、氷河の融解はアルベドの値と強い相関があること、アルベドは中央部と比較して側部において低い値を示すことを明らかにし、側部の方が周囲の山からの堆積物が供給されやすく、より黒色物質に覆われていることを示した。

1.4　目的

氷河上のアルベドの値は時空間的な変動が極めて高く、モデル計算などでその変動を推定することは難しい。広範囲において氷河の融解を評価する場合は、実際に計測したその氷河特有のアルベドを用いることが最も有効である(Brock et al., 2000)。しかしながら、山岳氷河に関する現地観測データは、氷河が存在する場所へのアプローチが限られていることや詳細なデータ取得が困難なことから、非常に限られている。現在、世界に存在する氷

河は 70,000 箇所以上が確認されているが、そのうち観測データが取得されているのはおよそ 300 地点ほどのみであり(Lemke et al., 2007)、アルベドが計測された場所となるとさらに少ない。本研究の目的は、ローヌ氷河におけるアルベドの空間分布を明らかにし、その空間分布の変動要因を解明することである。これらが明らかになれば、氷河表面アルベドの時空間変動プロセスの解明につながり、モデルによる将来の氷河の融解量や動態の予測の精度向上に貢献できる。

2. 対象地域と方法

2.1　調査地の概要

今回、調査を行った氷河はスイスアルプスに存在するローヌ氷河である(図 2.1)。ローヌ氷河は長さ 9km、面積 16km²(2007 年時)の渓谷氷河である。ローヌ川の源流で、スイス・ヴァレー州の東端にあるジュネーヴ湖の主要な水源としても知られており、近隣に住む人々の生活と強く結びついている氷河である。ローヌ氷河は 1878 年から 2000 年までの間で約 1700m 氷河の末端が後退していることが報告されており、氷河の末端は気温の上昇や氷河流動速度の増加(Tsutaki et al., 2011)、氷河湖への融解や分断化による氷河の消耗量の増加などの影響を受け、加速度的に氷厚が減少している(Sugiyama et al., 2008)。従ってローヌ氷河では、今後の氷河の動態を理解するために、定量的な観測データの取得が急務であると言える。

(a)　(b)

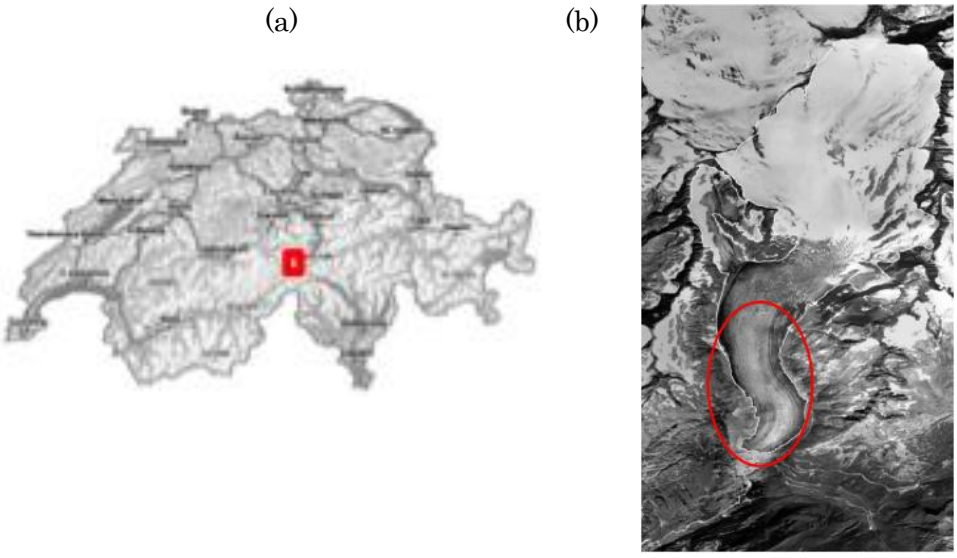

図 2.1

(a) ローヌ氷河の位置(赤で囲まれた位置)

(b) ローヌ氷河の航空写真(赤丸は本研究での観測域)

2.2　測定日時と観測地点

観測は 2013 年 9 月 6 日及び 7 日の 2 日間に行った。アルベド測定地点は図 2.2 に示す計 31 地点で行った。

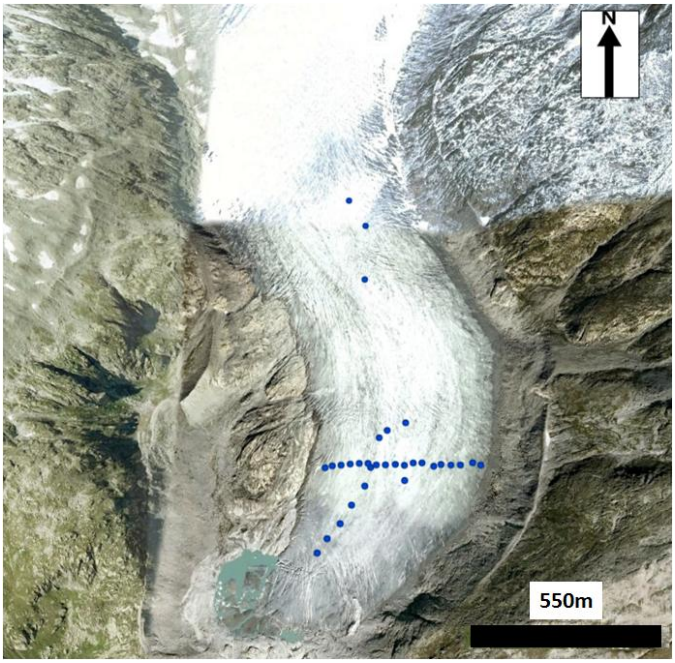

図 2.2　アルベド測定地点の位置(青丸は測定地点)

2.3　アルベド測定

本測定ではアルベドメーターを使用してアルベドの測定を行った。アルベドメーターは図 2.3(a)に示された英弘精機製の計測機器(感度：7.0mV/kW・m^{-2}、測定波長：400nm~1100nm)を使用した。上面で太陽からの入射エネルギー、下面で氷河からの反射エネルギーを測定する。アルベドメーターで測定された入射エネルギーと反射エネルギーは受熱板で熱エネルギーに変換され、さらに熱電対で電気エネルギーに変換され、起電力として出力される。出力された起電力を電圧計で記録した(図 2.3(b))。測定方法は以下の通りである。

1、測定時の時間、天気、雲量、周囲の様子、氷河表面の状態を記載する。
2、アルベドメーターを氷河表面と平行に、雪面から 1m の位置に保つ。このとき、自分の陰が測定範囲に入らないように注意する(図 2.3(c))。
3、表示計のスイッチを入射エネルギー側にして電圧が落ち着くまで最低でも 20 秒間計測を行い、その時の電圧を記載する。その後、スイッチを反射エネルギー側に切り替え同様の操作を行う。この作業を観測地点毎に 2 回繰り返す。

また、アルベドの値と氷河表面の色との関係を調べるため、全ての調査地点で氷河表面の写真撮影を行った。

図 2.3(a)　アルベドメーター

図 2.3(b)　表示計

図 2.3(c)　測定時の様子

3. 結果

アルベドのヒストグラムを図 3.1 に示した。図 3.1 は縦軸に度数、横軸に 0.1 刻みでアルベドをとっている。アルベドの値の範囲が 0.2-0.3 の観測点が最も多かった。また、全観測点におけるアルベドの最小値は 0.17、最大値は 0.42、平均値は 0.29、標準偏差は 0.073 であった。

全観測点の位置とアルベドを図 3.2 に示した。図 3.2 はそれぞれの観測点をアルベドの値ごとに色分けしている。東経 8°23.2-23.3 分、北緯 46°35 分付近でアルベドが 0.3-0.5 と高い値となっていた(図 3.2 青枠線内)。一方、東経 8°23.4 分付近と観測点の最南西端でアルベドが 0.1-0.2 と低い値となっていた(図 3.2 緑枠線内)。

図 3.2 で示した黒実線を横断方向、橙実線を縦断方向と定義し、それぞれの方向のアルベドの空間分布を図 3.3、3.4 で示した。図 3.3、3.4 は縦軸にアルベド、横軸にそれぞれ経度、緯度をとった。エラーバーは 2 回の測定値の差を示している。横断方向は氷河中央部で約 0.3-0.4 という高いアルベドを示す分布となった。また、氷河の西側に比べて東側でアルベドが低かった。横断方向におけるアルベドの最大値は最西端の観測点で 0.42、最小値は氷河東側の東経 8°23.4 分付近で 0.17 だった。最西端は測定値の差も最大になった。縦断方向におけるアルベドは氷河末端付近が 0.18 と最も低く、上流に最も近い観測点で 0.27 と最も高い値だった。

アルベドを測定した氷河表面の写真とアルベドの値を図 3.5 に示した。アルベドが 0.17 と最も低かった写真においては、氷河表面の約 50%以上を黒い堆積物がおおっていた。また、アルベドの値が 0.38 や 0.41 となっている氷河表面においては、雪および氷が大部分を占めており、黒い堆積物が占める割合は約 20%以下となっていた。このように氷河表面の黒い部分の占める割合が大きいほど、アルベドの値が低い傾向を示していた。

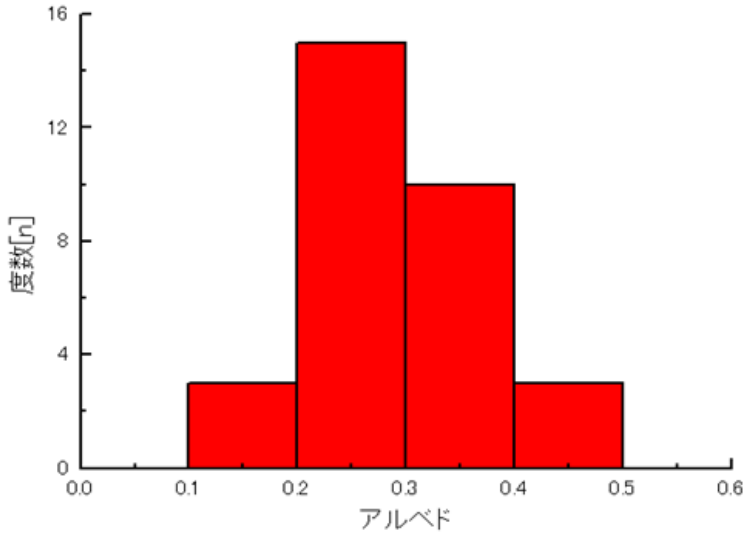

図 3.1　アルベドのヒストグラム

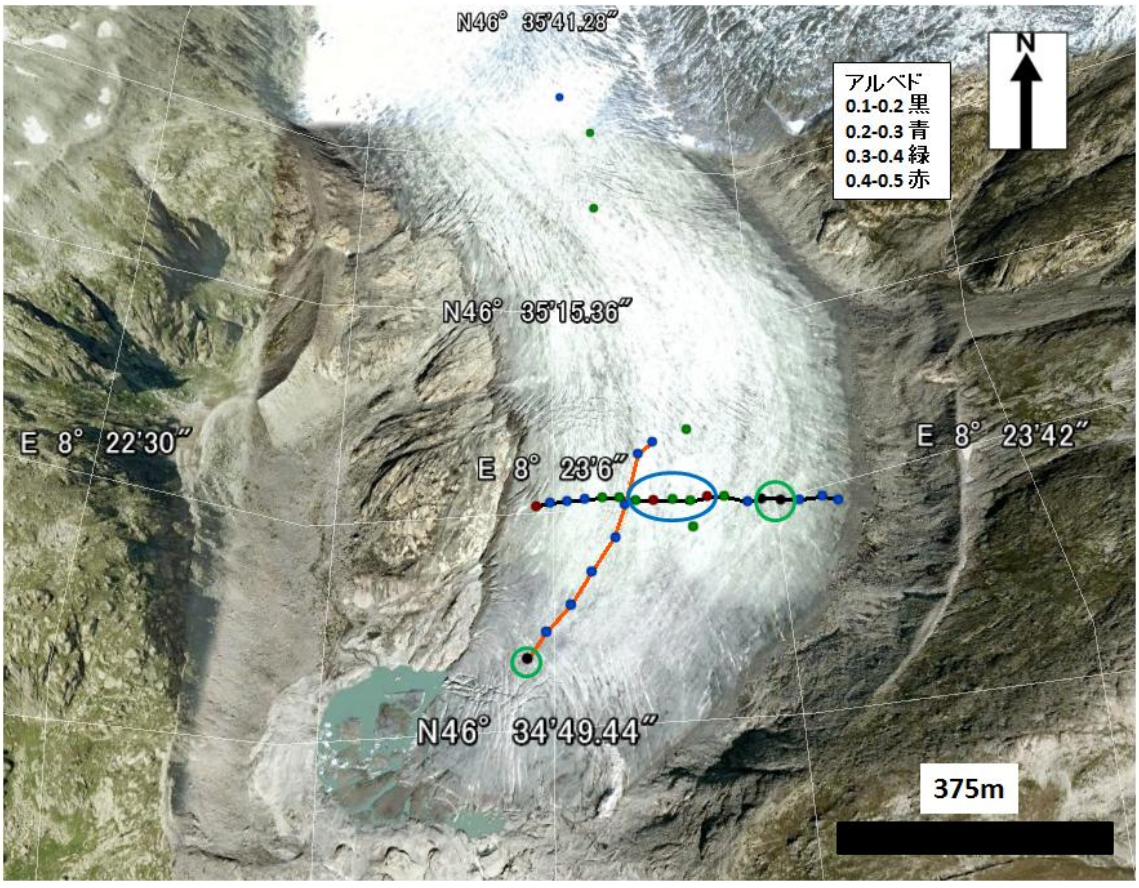

図 3.2　全観測点の位置とアルベド

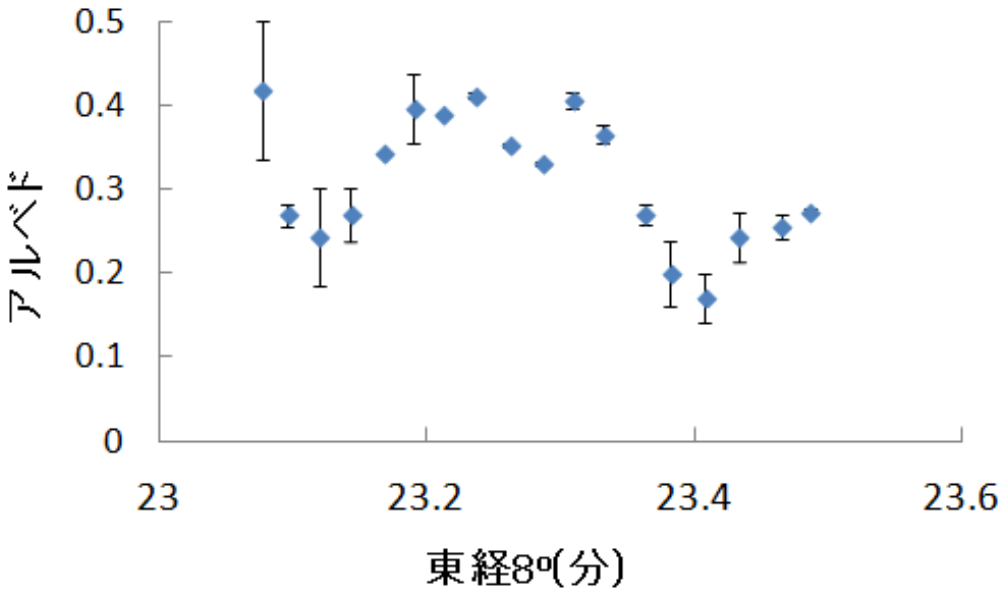

図 3.3　横断方向のアルベド

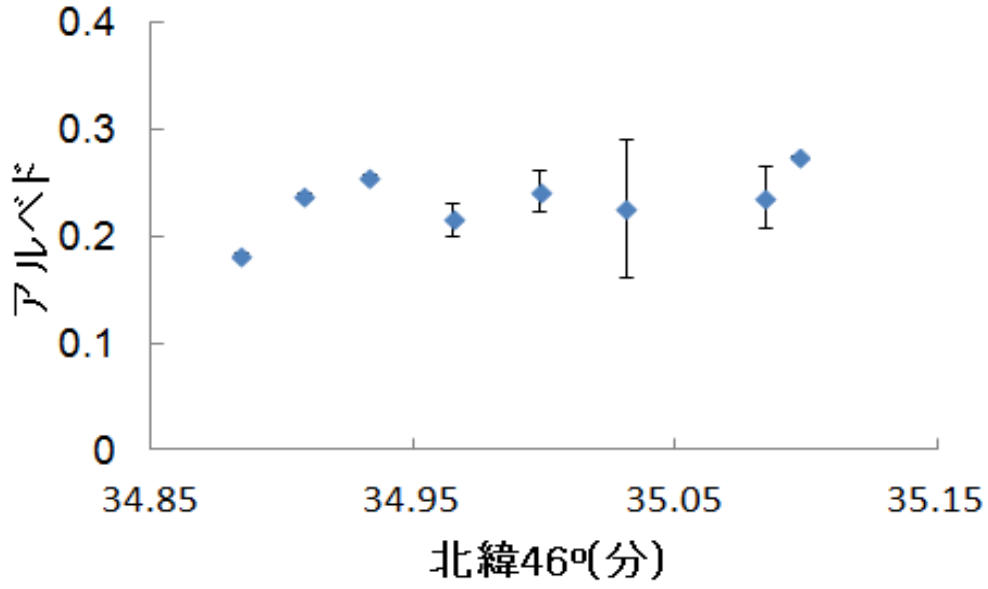

図 3.4　縦断方向のアルベド

0.17

0.24

0.38

0.41

図 3.5　氷河表面の写真とアルベドの値

4. 考察

横断方向のアルベドは氷河中央部で高い値を示していた。これは氷河中央部において融解水が多く流れており、氷河表面の堆積物を洗い流すことによるものであると考えられる。また、多くのクレバスが存在していた氷河の両端では、クレバスが少ない氷河中央部に比べ、氷河表面が入射エネルギーをより多く閉じ込め吸収するため、アルベドが低い可能性が示唆される(図 4.1)。他の要因としては、側部の方が周囲の山からの堆積物が供給されやすく、氷河表面がより岩屑などに覆われやすいためであると考えられる。縦断方向のアルベドは氷河末端で最も低い値を示しており、この要因としては横断方向と同様に氷河末端では多くのクレバスが存在していたことがあげられる(図 4.1)。

また、氷河表面の色によるアルベドの値の違いも明らかになった。同一観測点の氷河表面の色によるアルベドの値の違いを表 4.1 で示した。表 4.1、図 3.5 より氷河表面の形状などでアルベドの値の差は異なるものの、氷河表面が黒いほどアルベドの値が低くなっていた。これは氷河表面が黒いほど入射エネルギーを多く吸収するためであると考えられる。氷河表面の黒い堆積物は氷河表面の雪氷中に含まれる暗色の物質クリオコナイトである。クリオコナイトとは主に大気由来の鉱物粒子と雪氷上で繁殖する微生物、その他の有機物で構成される(竹内, 2012)。クリオコナイトによる氷河表面の暗色化は氷河の融解に大きく影響を与えている。黒い表面は入射エネルギーを多く吸収し、そのことにより氷河の融解が促進される。

測定値の差は横断方向の最西端の観測点で最大となっており、アルベド値に約 0.2 の差が生じた(図 3.3)。これは同じ観測点においても雲量や日射など異なる気象条件下で観測した可能性が示唆される。より正確にアルベドを測定するためには、測定ごとの気象条件を合わせる必要がある。

2009 年 8 月(図 4.2)および 2011 年 9 月(石渡ら, 2011)に行われたアルベド観測の結果と本観測結果を比較すると、横断方向においては氷河中央部で高いアルベドという同じ傾向を示していた。このことから 2009 年 8 月と 2011 年 9 月においても氷河中央部に比べて氷河の両端でクレバスが多く存在していた可能性が示唆される。また、縦断方向においては 2009 年 8 月の結果(図 4.2)も同様に氷河末端部で低い値となっていた。このことから 2009 年 8 月においても氷河の末端部で上流部に比べてクレバスが多かった可能性が示唆される。

今後の展望としては次のようなことがあげられる。同じ地点、手法でアルベドを継続して測定することでアルベドの年変動や空間分布がより明確になり、そのことがローヌ氷河の融解に伴う変動の理解や将来予測につながる可能性があると考えられる。また、氷河表面の色の違いを定量化することで氷河表面の色からアルベドの推定を行える可能性がある。

図 4.1　ローヌ氷河上のクレバス

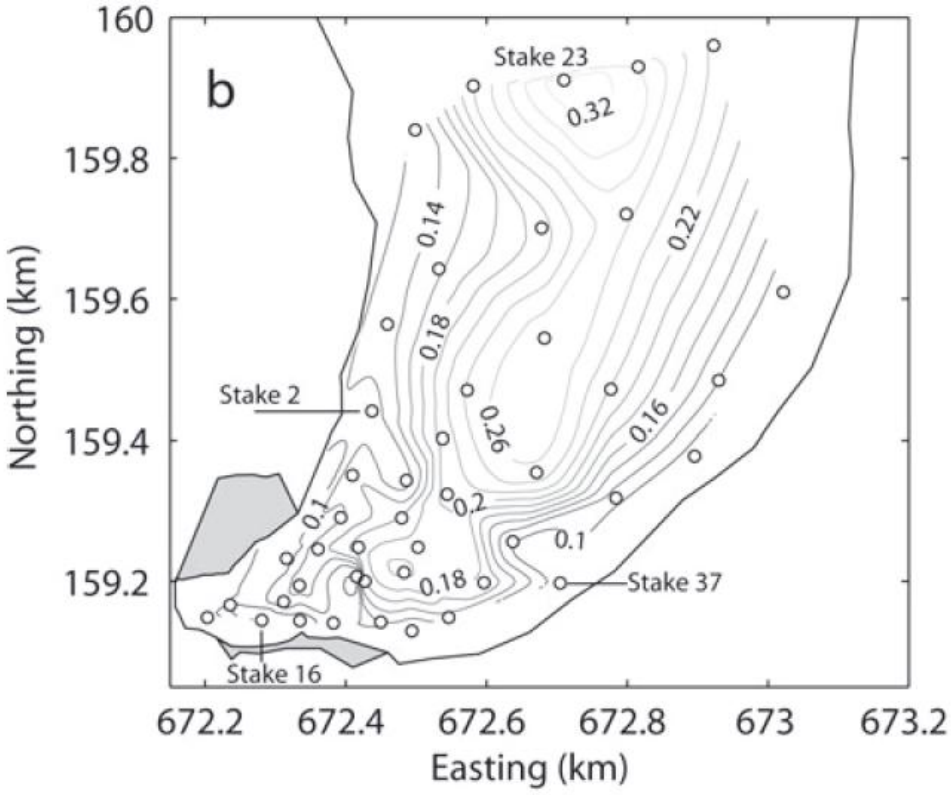

図 4.2　2009 年 8 月のローヌ氷河表面アルベドの水平分布(Sugiyama et al., 2011)

表 4.1　ローヌ氷河表面の色によるアルベドの違い

北緯46°(分)	東経8°(分)	アルベド(黒)	アルベド(白)
34.933	23.122	0.23	0.26
35.097	23.239	0.10	0.27

5. まとめ

ローヌ氷河表面のアルベドの空間分布は次のようになっていた。横断方向は 2009 年 8 月、2011 年 9 月の観測結果と同じ傾向を示し、氷河中央部でアルベドが高くなっていた。中央部はクレバスが両端に比べて少なく、氷河の融解水が氷河表面の堆積物を洗い流す可能性が示唆された。縦断方向では、2009 年 8 月と同じ傾向を示し、氷河末端部でアルベドが低くなっていた。末端部はクレバスが多く、クレバスの存在により氷河表面が入射エネルギーを多く吸収する可能性が示唆された。全観測点の平均アルベドは 0.29、最大値は 0.42、最小値は 0.17 であった(表 4.1 で示された同一観測点の色の違いによるアルベド値は除く)。

氷河表面の色によるアルベドの違いが明らかになった。氷河表面が黒いすなわちクリオコナイトが多く存在すると、アルベドが小さくなり、氷河の融解を促進させる可能性が示唆された。

今後の展望としては継続して同一観測点および手法でアルベド測定を行うことで氷河の融解に伴う変動の理解や将来予測につながる可能性が考えられる。

6. 付録

表 6.1　観測点の位置とアルベド

北緯46°(分)	東経8°(分)	アルベド
35.031	23.077	0.42
35.034	23.096	0.27
35.035	23.119	0.24
35.037	23.143	0.27
35.038	23.167	0.34
35.038	23.190	0.40
35.035	23.212	0.39
35.035	23.236	0.41
35.036	23.262	0.35
35.034	23.286	0.33
35.038	23.309	0.41
35.038	23.332	0.36
35.032	23.363	0.27
35.035	23.382	0.20
35.034	23.408	0.17
35.034	23.433	0.24
35.038	23.465	0.26
35.034	23.486	0.27
34.884	23.066	0.18
34.908	23.090	0.24
34.933	23.122	0.26
34.965	23.150	0.22
34.998	23.183	0.24
35.031	23.197	0.23
35.084	23.218	0.24
35.097	23.239	0.27
35.007	23.287	0.36
35.111	23.288	0.37
35.502	23.166	0.30
35.555	23.116	0.25
35.389	23.168	0.37

Reference

1) Atsumu Ohmura, Mass Balance of Glaciers and Ice Sheets during the Observational Period and Climate Change Journal of Geography, **119(3)**,466-481, 2010

2) IPCC AR4 (Intergovernmental Panel on Climate Change fourth assessment report) (2007): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdam and New York, NY, USA, 1996

3) Schaefli B., B. Hingray and A. Musy. 2007 Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modeling uncertainties. Hydrol. Earth Syst. Sci., **11(3)**, 1191-1205, 2007

4) Huss, M., A. Bauder, M. Funk and R. Hock. Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *J. Geophys. Res.,* **113(F1),** F01015. (10.1029/2007JF000803.), 2008a

5) Huss, M., D. Farinotti, A. Bauder and M. Funk. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrol. Process.,* **22(19),** 3888–3902, 2008b.

6) Huss, M., M. Funk and A. Ohmura. Strong Alpine glacier melt in the 1940s due to enhanced solar radiation. *Geophys. Res. Lett.,* **36(23),** L23501. (10.1029/2009GL040789.) 2009.

7) S. Gascoin, A. Ducharne, P. Ribstein,E. Perroy, and P. Wagnon, Sensitivity of bare soil albedo to surface soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia), *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 36, L02405, doi:10.1029/2008GL036377, 2009.

8) T. J. Yasunari, P. Bonasoni, P. Laj, K. Fujita, E. Vuillermoz, A. Marinoni, P. Cristofanelli, R. Duchi,G. Tartari, and K.-M. Lau1Estimated impact of black carbon deposition during pre-monsoon season from Nepal Climate Observatory – Pyramid data and snow albedo changes over Himalayan glaciers Atmos. Chem. Phys., **10**, 6603–6615, /doi:10.5194/acp-10-6603-2010

9) M. Dumont, P. Sirguey, Y. Arnaud, and D. Six1 Monitoring spatial and temporal variations of surface albedo on Saint Sorlin Glacier (French Alps) using terrestrial

photography The Cryosphere Discuss., **5**, 271-305, doi:10.5194/tcd-5-271-2011

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

11) Brock, B.W., I.C. Willis and M.J. Sharp. Measurement and parameterization of albedo variations at Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *J. Glaciol.,* **46(155),** 675–688, 2000.

12) Lemke, P. , Ren, J. , Alley, R. B. , Allison, I. , Carrasco, J. , Flato, G. , Fujii, Y. , Kaser, G. , Mote, P. , Thomas, R. H. and Zhang, T. (2007): Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. , Titel: Climate change 2007 : the physical science basis ; summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. Part of the Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN: 92-9169-121-6 .

13) Tsutaki, S., D. Nishimura and S. Sugiyama. Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. *Ann. Glaciol.,* **52(58)** (see paper in this issue), 2011.

14) Sugiyama, S., S. Tsutaki, D. Nishimura, H. Blatter, A. Bauder and M. Funk. Hot water drilling and glaciological obser- vations at the terminal part of Rhonegletscher, Switzerland in 2007. *Bull. Glaciol. Res.,* **26,** 41–47, 2008.

15) 竹内　望. クリオコナイトと氷河の暗色化. *低温科学***70**, 165-172, 2012.

16) 石渡沙織, 毛利信吾, 渡辺恵. ローヌ氷河における短波放射のアルベド現地観測. *スイス氷河実習レポート*, 2011.