

## 1. はじめに

### 1.1. 背景

#### 1.1.1. 氷河とその役割

淡水は人類の生活において欠くことのできない要素であり、河川流量や地下水面の変動は我々の生活に多大な影響を及ぼす。本来、地球は水の惑星であるが、淡水の存在の空間的、時間的な分布により、十分な量の淡水を得られる地域は限られている。また、人口爆発や気候変動により、水資源の必要量や絶対量は年々変化している。今後、水資源がどの程度必要であり、その分布がどのように変化するのか、定量的な予測が求められる。その中で、氷河もまた水循環や生態系において大切な役割を果たしているが、その立地や表面積の大きさゆえにあまり定量的な評価が進んでいない。

氷河とは自重で流動を続ける氷の固まりのことを指し、主に山頂で毎年降り積もる雪から生成される。また、地球に存在する陸氷のうち、およそ 90%は南極に、10%はグリーンランドに存在し、山岳域に氷河として存在する氷は全体の 1%にも満たない。しかし山岳氷河は気候変動に敏感であるという特徴を持っており、氷河の海面上昇への寄与は、その南極やグリーンランドの氷床の寄与よりも格段に大きく、上昇高さの 1/3 は氷河の融解によるものであることが知られている。また、1/2 は海水自体の熱膨張による。[IPCC AR4, 2007]

山岳氷河は気温に敏感であるため、季節変動も大きい。氷河は雪の降る季節に涵養し、それを融解水として少しずつ下流に流していくため、1年を通して河川流量の増減を緩和する役割を果たしている。乾期の間の河川流量が、ほぼ氷河の融解水に依存している河川も多く存在する。そのため、世界人口のおよそ 1/6 の人々が氷河の融解水を用いて暮らしていると言われている。特にヒマラヤ山脈に存在する氷河は、ガンジス川、インダス川、ブラフマプトラ川、サルウィン川、メコン川、長江、黄河という 7 つの大きな河川へ水を供給しており、氷河下流に暮らす数百万人の人々が氷河の融解水に頼って生活している。[WWF, 2005]

しかしながら、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。氷河の融解速度の増加は、氷河消失に加え、氷河湖決壊による洪水の危険も孕んでいる。2033 年までの完全消失が見込まれているキリマンジャロの氷河をはじめ、今後数十年のあいだに氷河の存在量は大きく変化することは間違いない。ヨーロッパアルプスに存在する氷河も 2100 年までにそのほとんどが消失するという推測結果が発表されている。下流地域の生態系や水資源量、人々の生活に与える影響を考える上で、減少速度や融解水量の定量的な評価が必要とされる。

### 1.1.2. アルベドが氷河融解に与える影響

アルベドとは太陽からの放射エネルギーが地球表面でどれだけ反射したかを表す物理量であり、以下のように求められる。

$$\alpha = \frac{\text{反射エネルギー}}{\text{放射エネルギー}}$$

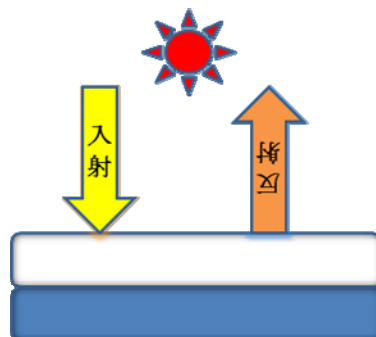


図 1.1 アルベドの仕組み

アルベドの値が低いほど、太陽からの放射エネルギー吸収が多いことを意味する。一般的にアルベドは低い順に、水（海面や湖面）、森林、草原、サバナ、乾燥土、砂漠、氷（氷床）、雪であり、たとえ同じ土壌であっても湿っているものほどアルベドは低い。アルベドは一見、入射と反射の割合を 0 から 1 までの値で示すためだけの指標と捉えられがちであるが、地球に入射する太陽エネルギー（分母）がほぼ一定であることを考慮すると、変化しているのは地表面が日射をどれだけ反射しているかであり、換言すると地表面での日射吸収具合がどれだけ変化しているのか、異なっているのかを表わす物理量として捉えることができる。

さて、氷河の後退へ話を戻すと、その融解量を左右する主な要因として気温と太陽からの放射エネルギーが挙げられる。その放射エネルギーのうち、氷河表面が吸収するエネルギーを算出するためにアルベドを用いる。つまり、アルベドの値を知ることによって日射吸収量を定量的に理解することができ、氷河融解量を定量的に推定することができる。さらにアルベドの値が低く日射による融解が大きくなった場合、日射による氷河表面の融解が促されることが推測される。その融解の分だけ質量が減じ、融解水が氷河底面を流れることでいわば潤滑油の働きをすることで氷河末端の分離融解を引き起こしていることが考えられる。このように、日射はただ単に氷河表面の融解を引き起こすだけでなく、2 次的な融解（衰退）現象として氷河の流動速度増加に寄与している。

氷河上でのアルベドは氷河の表面状態に依存する。氷河の表面状態は気温や天候、氷河の存在する地域などによって様々であり、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、新雪や古雪の存在、氷河表面の融解具合や汚れ具合など氷河表面状態の違いによる日射吸収量の違いを考える必要がある。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

ルベド値の時間発展を知ること、融解量に加え、氷河の衰退メカニズムを考察することも可能であると考えられる。

## 1.2. 過去の研究

### 1.2.1. 氷河の変動に関する研究

世界氷河台帳によると、世界に 70,000 箇所以上の氷河が確認されている[WGI; Haeberli, 1989]。このうち観測値が存在するのはおよそ 300 地点ほどのみである[Lemke et al., 2007]。しかし背景で述べたように、氷河は水循環、生態系、人類の生活等、あらゆる視点からも重要な役割を果たしており、近年その融解速度の推定が求められており、直接観測の他に衛星やモデルを使った質量変動の推定も行われている。重量測定衛星 GRACE を用いたものでは、パタゴニア氷原やアラスカ氷河群の質量減少速度検出が挙げられる[J.L.Chen et al., 2007, Arendt et al., 2008]。また、全球モデルでは初めての氷河質量変動を推定するモデル HYOGA が発表された[Hirabayashi et al., 2010]。

### 1.2.2. アルベドの測定に関する研究

[Sugiyama et al., 2010] は、本研究と同じくスイスのローヌ氷河を対象としている。氷河表面のアルベドは、上流および中央部で比較的高い値を示し、下流および側部において低い値を記録している。

## 1.3. 目的

氷河は貴重な淡水源であり、水資源を蓄え、徐々に放出することから、天然のダムとも言える存在である。そしてその変動は、氷河下流地域に住む人々、およそ世界人口の 1/6 もの人々の生活に影響を与える。しかしその立地や表面積の大きさから定量的な評価が他の水資源に比べ進んでおらず、その定量的な評価が求められている。

先に述べたように、氷河融解量を定量的に評価するために氷河表面のアルベド値を知ることが挙げられる。氷河上のアルベドの観測はあまり多くないため、その値を正確に見積もることは難しく、氷河の質量変動モデルでは一定値で与えられることが多い。

そこで本研究では、スイスのローヌ氷河において 2 日間に渡りアルベドの観測を行い、ローヌ氷河全体における日射吸収量の算定を試みた。また、アルベドを変化させる要因を知り、その時間発展や空間分布の特性の検出を目標としている。さらには、現在全ての氷河検出モデルにおいて、定数で扱われているアルベドの値をなんらかの関数で表現することで、より正確な氷河質量変動の未来予測を考える。

## 2. 方法と結果

### 2.1. Study Site

今回対象としたローヌ氷河はスイスアルプスに位置しており、ローヌ川の源流にあたる、レマン湖の主要な水源となっている氷河である。またローヌ氷河は昔から周辺住民から親しまれてきており、絵葉書などを通して小氷期の氷河について知ることできる。

最近では、杉山ら(2007)により、航空写真解析や測量をもとにした観測で、過去 100 年間ローヌ氷河の氷厚は約 50m 薄くなっていることが確認されており (図 2.1)、依然として氷河が衰退している傾向は変わっていない。このような背景を持つローヌ氷河の動態を調べることは氷河周辺域に暮らす人々の生活環境という意味を含めた広義な「環境予測」を行うために必要不可欠であり、今回の調査対象と定めた。

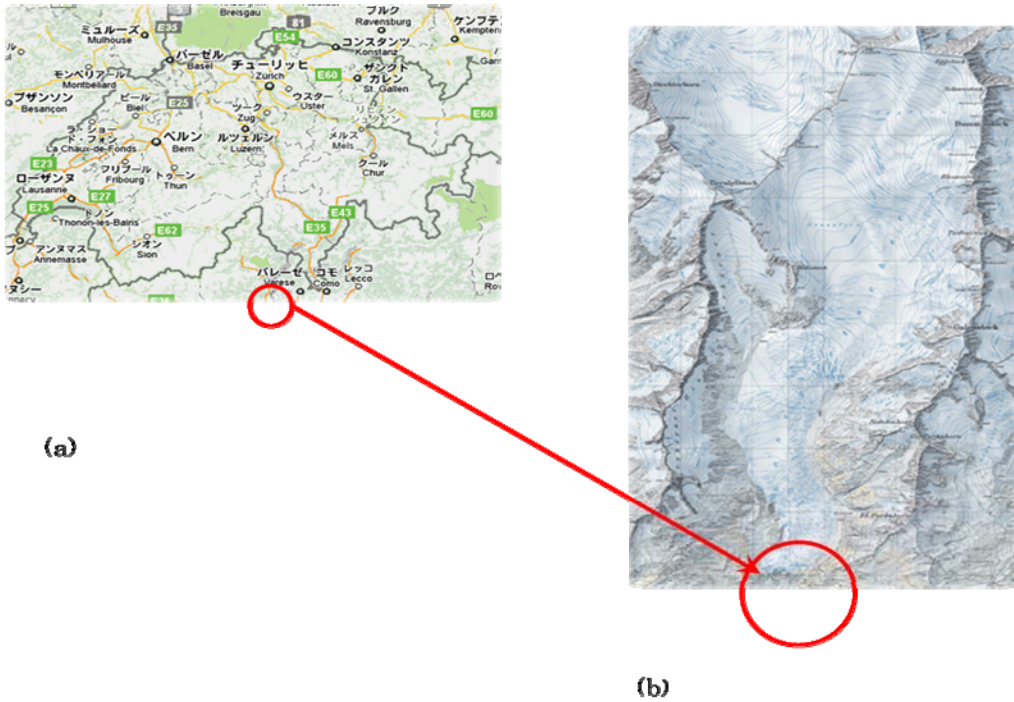


図 2.1 (a) スイスおよび (b) ローヌ氷河の地図  
赤丸はローヌ氷河の位置と氷河上での観測域を示す

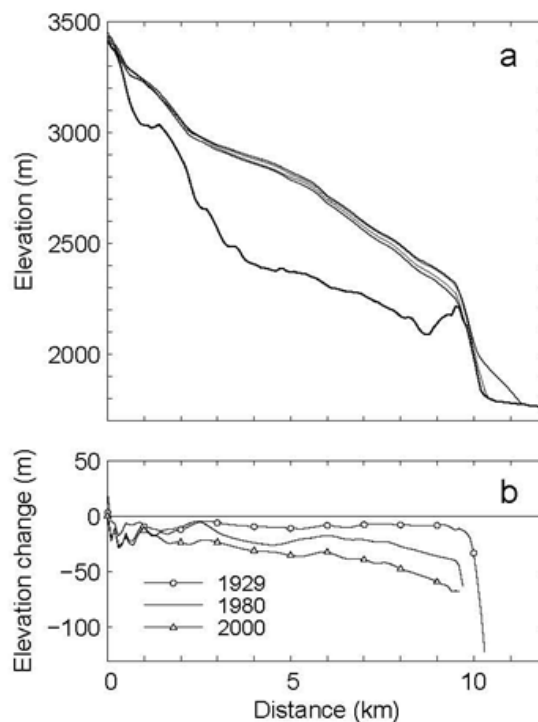


図 2.2

- (a) 1878, 1929, 1980, 2000 年におけるローヌ氷河の流線の表面高度の比較  
 (b) 各年の高度変化 (1878年の高度を 0m とする)

## 2.2. 測定方法

### 2.2.1. アルベドの測定手法

本測定においてアルベドはアルベドメータを使用して測定を行った。図 2.3 に測定の様子を示す。アルベドメータは図 2.2 に示された観測機器であり、上面で太陽からの放射エネルギーを測り、下面で雪面からの反射エネルギーを測る。このアルベドメータで測定された日射量と反射量は mv (ミリボルト) 単位で得られ、メーターに接続されているデータロガーに保存される。測定手法は以下の通りである。

- ① 5 秒毎の計測値をデータロガーに保存するように設定した。
- ② 測定値において、アルベドメータを雪面から約 1 メートルの位置に雪面と平衡にかまえる(図 2.3)。このとき、自分の陰が測定範囲に入らないよう注意する。
- ③ 「日射エネルギーを 30 秒間測定し、その後反射エネルギーを 30 秒間測定」1 セットとし、各地点について 2 セット (計 120 秒間) の測定を行った。



図 2.2 アルベドメーター



図 2.3 測定の様子

### 2.2.2. アルベド算定方法

2.2.1 に示した通り、アルベドの値は 1 地点につき、5 秒ごとに計 120 秒間のデータを有している。このデータは、まず太陽放射側の 60 秒間のデータ（12 データ）から、それらの平均と標準偏差を求めた（表 2.1）。標準偏差が大きい場合はばらつきの具合をグラフ化したもの（付録 5.1）から判断し、全体的にばらつきが大きい場合はそのままの値を、あきらかに 1 つの値が異常である場合は飛び値として除いた。反射側の 60 秒間のデータも同様である。

表 2.1 より、多くの場合、標準偏差は反射量よりも入射量の方が大きい値を示している。入射量測定には、観測者の影や太陽高度に関して十分考慮して行ったが、このように反射量よりも標準偏差が大きいということは、観測方法やその他の要因があるものと推測される。

このようにして得られた放射エネルギー、反射エネルギーを用いて、以下の式よりアルベドの値を算出した。アルベドの値は結果の章に示す。

$$\alpha = \frac{\text{反射エネルギー}}{\text{放射エネルギー}}$$

表 2.1 反射エネルギーおよび入射エネルギーの平均と標準偏差

反射量[mv]			入射量[mv]		
	平均	標準偏差		平均	標準偏差
A1	2.678	0.013	A1	3.515	0.151
A2	2.188	0.017	A2	3.867	0.053
A3	2.613	0.024	A3	3.611	0.118
A4	2.128	0.014	A4	4.049	0.070
A5	0.989	0.012	A5	4.734	0.104
A6	1.238	0.011	A6	4.997	0.263
A7	0.871	0.010	A7	5.184	0.106
A8	3.901	0.013	A8	5.524	0.039
A9	2.765	0.034	A9	5.470	0.010
A10	3.729	0.009	A10	5.614	0.022
A11	2.451	0.029	A11	5.181	0.067
A12	0.244	0.020	A12	2.676	0.061
A13	2.492	0.055	A13	4.198	0.067
A14	1.598	0.034	A14	3.798	0.098
A15	3.363	0.123	A15	5.130	0.231
A16	1.234	0.029	A16	4.797	0.221
A17	2.526	0.058	A17	4.972	0.072
A18	3.242	0.232	A18	5.016	0.113
A19	0.869	0.096	A19	5.388	0.079
A20	0.898	0.159	A20	5.431	0.050
A21	2.148	0.031	A21	5.074	0.138
A22	2.385	0.059	A22	5.039	0.388
A23	3.427	0.060	A23	5.353	0.134
A24	2.099	0.049	A24	4.497	0.170
A25	2.043	0.018	A25	5.373	0.088
A26	0.519	0.048	A26	2.807	0.337

### 2.2.3. 測定日時および地点

2010年9月1日・9月2日の2日間で計26回のアルベド測定を行った。

測定地点は図2.4に示す7地点である。このうち、赤点は同じ地点で数回測定を行った場所（以下、定点観測と呼ぶ）、緑点は他の測定地点である。なお、測定地点および測定値には、測定を行った順にA1からA26という通し番号をつけた。



図 2.3 測定地点

### 2.2.4. アルベドの定点観測

定点観測は氷河表面のアルベドが時間経過にともないどう変化するかを調べるために行った。観測地点は黒色の汚れが顕著なところと比較的汚れていないところの2点である。この観測ではアルベドの経時変化により、定点での日射吸収がどう変動しているかをその表面状態の変化とともに捉えることが目的である。加えてこの定点観測で特に着目すべき点は、観測日前日に積雪があったという状況を活かし、時期的には融解期にあたるが新雪からこれが融解していく過程の中でアルベドがどのように変化するかという点である。



### 2.2.5. 氷河表面状態の違いによるアルベドの観測

アルベドの氷河表面の異なる状態の観測は、新雪面・融解が進んだ氷面・鉱物や有機物で黒く汚れた氷面・再凍結した氷面・氷河上を流れる水面を選択して行った。この観測においては氷河表面を一様な雪氷表面としてではなく、氷河表面が様々な状態であることに鑑み、それに対応したアルベドがどの程度異なるのかを算出し、氷河全体における日射吸収量を見積もることが目的である。

分類は大きく傾向をつかむため白い場所 (White)、黒い場所 (Black) の 2 種類とした。分類方法は本来であれば単位面積当たりに占める鉱物 (黒い物質) の割合などを写真から算定して決定すべきであるが、本観測では大まかな分類であるため主観で判断をした。また備考として表面形状、含水の有無等を地点毎に確認した。

## 2.3. Results

### 2.3.1 アルベドの測定結果

全測定点 26 か所の測定結果を図 2.4 に示す。これによるとアルベドはそれぞれ大きく異なっており、最大で 0.76、最低で 0.17 を観測した。これは雪面の色、状態によって同じ氷河上においても太陽から吸収するエネルギーが異なり、地点毎の氷河融解量が違う可能性が示された。なお terrestrial および surface of lake に関しては雪面との比較検討を行うために測定した。Terrestrial は 0.25 および 0.17、Surface of lake は 0.09 となった。これらは後述するが、水分量を多く含んだ雪面とほぼ同程度のアルベドであった。

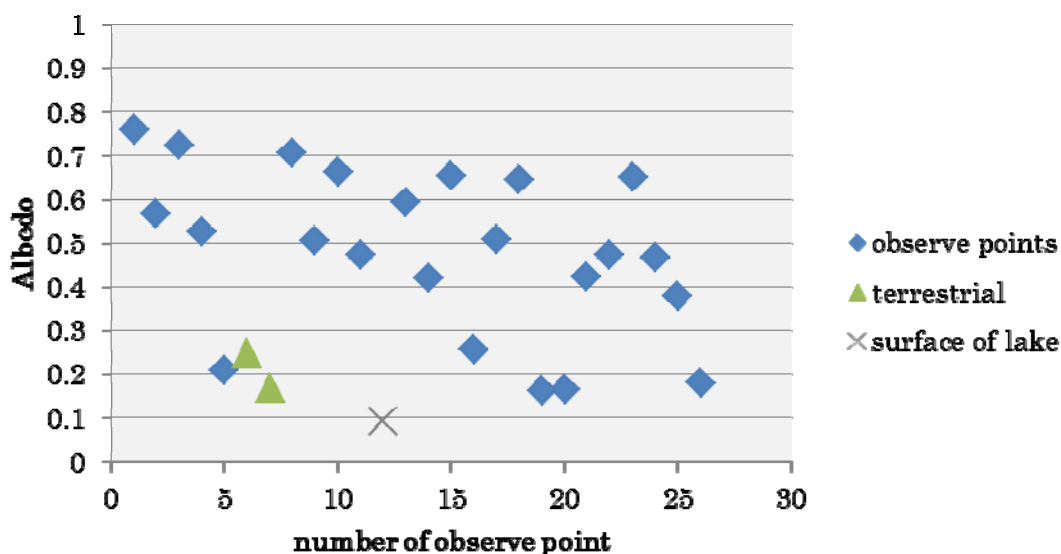


図 2.4 アルベドの測定結果

さらに、表面状態の違いを大別しまとめたものが表 2.2 である。アルベド測定地点の写真は付録 5.1 とする。

表 2.2 表面状態の分類および特徴

観測地点	アルベド	白	黒っぽい	備考
A1	0.76	○		ほぼ新雪で表面は溶けていない
A2	0.56		○	凹凸があり影がある、じゃりじゃり
A3	0.72	○		ほぼ新雪で表面は溶けていない
A4	0.52			凹凸がある。再凍結っぽい。
A5	0.20		○	黒っぽい、粒は細かい、湿り気がある
A6	0.24		○	岩
A7	0.16		○	砂利
A8	0.70	○		多少湿っている
A9	0.50		○	多少湿っている
A10	0.66	○		より湿っている
A11	0.47		○	より湿っている
A12	0.09			水面
A13	0.59	○		ザラついている、表面に小さな凹凸
A14	0.42		○	凹凸が顕著に。
A15	0.65	○		ちょっと溶けている白い雪、きれい
A16	0.25		○	ざらざら、ポコポコ、
A17	0.50	○		白いが凹凸あり、影がある、水分あり
A18	0.64	○		白くてキレイ湿り方は少ない
A19	0.16		○	ボトム黒(鈴木)、かなり表面溶けている
A20	0.16		○	ボトム黄(一色)、かなり表面溶けている
A21	0.42	○		水上、下に川のような流れがある
A22	0.47	○		〃
A23	0.65	○		多少湿っているが白いきれいな場所、夕方
A24	0.46	○		白いが、粒が大きく目立つ、湿っている
A25	0.38		○	かなり湿っている、凹凸が大きい
A26	0.17		○	クリオコナイト、表面に水溜り

	定点観測: 白
	定点観測: 黒

### 3. Discussion

#### 3.1. 地表面の状態

図 2.4 の観測点 (Observation Points) を白っぽい雪 (White)、黒っぽい雪 (Black) に分類し色分けしたものを図 3.1 に示す。これによると白、黒で一様なアルベドを示す結果にはならなかった。以下詳細に考察を進めていくこととする。

White では最大 0.76 (A1) から最低 0.42 (A21) を観測している。White においてアルベドが低い値を示したのは A17, 21, 22, 24 の 4 地点である。これは Black (A2,4 等) と同等かもしくはそれ以下のアルベドである。これら 4 地点に共通しているのは、含水していることである。特に A21,22 については近くに表面を水が流れており (融解水による水流)、一面が水分を多く含む地点であった。

Black についても同様の傾向が見られている。Black は最大 0.56 (A2)、最低 0.16 (A19) であった。特に低い値を示したのは A5, 16, 19, 20, 26 の 5 地点であった。これらも色が黒いだけでなく、表面は融解しており、水分量が特に多い状況となっていた。A19, 20 は雪面であるものの、水面でのアルベド (A12) に近い値を示した。また、A16 および A19 を比較すると A16 の方が水分量は多くないものの、表面がざらついており、凹凸がある状態となっていた。A26 はクリオコナイト (クリオコナイト (cryoconite) とは、氷河の表面に形成される直径 0.2-2.0mm 程度の黒色の粒子である。藍藻や従属栄養性のバクテリア、鉱物質の粒子などから成る。) 上でのアルベドである。Black の場所では黒い岩石が太陽からの日射を吸収することで雪表面の融解が White に比較して進行するのではないかと考えた。特にクリオコナイトホールではその傾向が顕著であり、クリオコナイトがある場所だけ陥没したようなコップ形状を形成し (これをクリオコナイトホールという)、融解水がそこに溜まっていた。A26 のアルベドが氷河湖上でのアルベドに近いのはそのためであると考えられる。

続いてアルベドの空間分布について考察する。A5 は氷河の右岸、A16, 19, 20 は氷河左岸である。これは氷河の左右両端が中央付近と比較して非常に多く太陽の日射を吸収していることを示している。この理由として、左右の岸壁から岩石多く落下が見られ全体的に色が黒くなり表面が融解しやすくなることが挙げられる。また太陽の日射が真上からだけでなく岸壁からの放射による影響を受けているのではないかと考えた。

全体を通しての傾向を考察すると色、表面形状 (凹凸の有無)、含水の有無の条件でアルベドが変化していると考えられる。そしてアルベドへの影響の度合いが以下となっていると考えられる。

【含水の有無】 > 【表面形状】 > 【色】

しかしながら色は時間軸を考慮すると含水の有無に非常に関連があると考えられるため一概には言えないが、アルベドへ大きく影響を与えるのが水分量であることが今回の観測から示唆された。

今回の観測では、上記にある含水の有無、表面形状および色に関し、定量的に議論をす

ることができていない。しかしながらアルベドの値がこれらの因子により大きく影響を受けてしまう可能性があることから、今後の観測では地点毎の含水量の定量、凹凸の大きさをレベル分けする、単位面積に占める鉱物の割合等が必要になると考えられる。このようにアルベドに強く影響を与える因子を明確にすることおよびその定量化は今後の課題である。

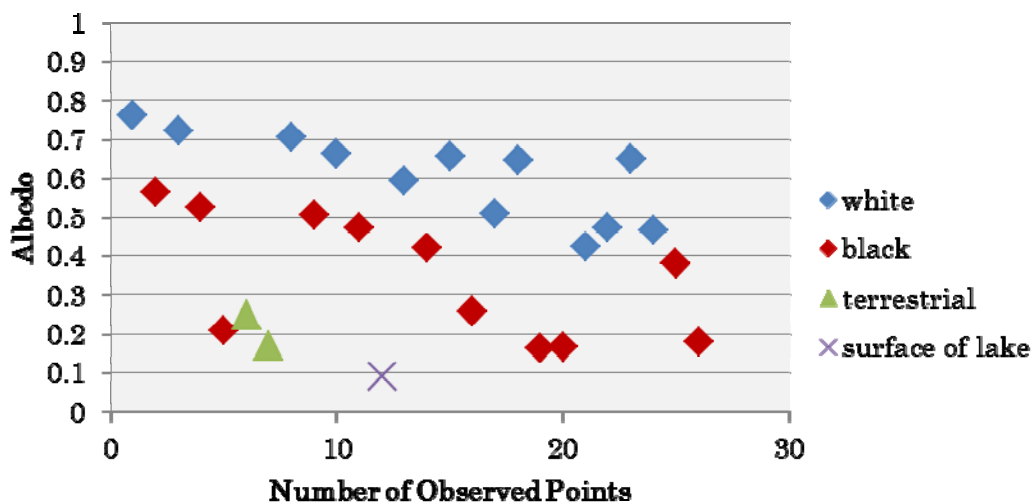


図 3.1 測定結果

### 3.2. 定点観測

定点観測の結果のみを抜き出したものを図-に示す。これらから太陽の日射の影響を考察する。観測は A1～A11 を観測一日目、A12～A26 を観測二日目に行っている。観測一日目の前日に降雪が確認されていることを考慮に入れると、本観測は降雪からのアルベドの経時変化を表していると考えられる。また観測一日目、二日目は共に晴天であり、太陽の日射が多くあった。

この観測から、アルベドが徐々に減少していくことが **White, Black** とともに確認された。太陽の日射を吸収することで表面が融解、場合によっては夜のうちに再凍結、そして再度融解、これらのプロセスを繰り返すことで表面形状が降雪直後と比較して凹凸が目立つざらざらの表面へと劣化していくことが確認できた。また **White** と **Black** でアルベドの減少を比較すると、**White** では A1 から A24 で 39%減、**Black** では A2 から A26 で 33%減という結果になった。**Black** の方が太陽からの日射をより多く受け取ることで、融解水の量や劣化の程度が多いと考えられるが、今回の観測結果からは確認できなかった。

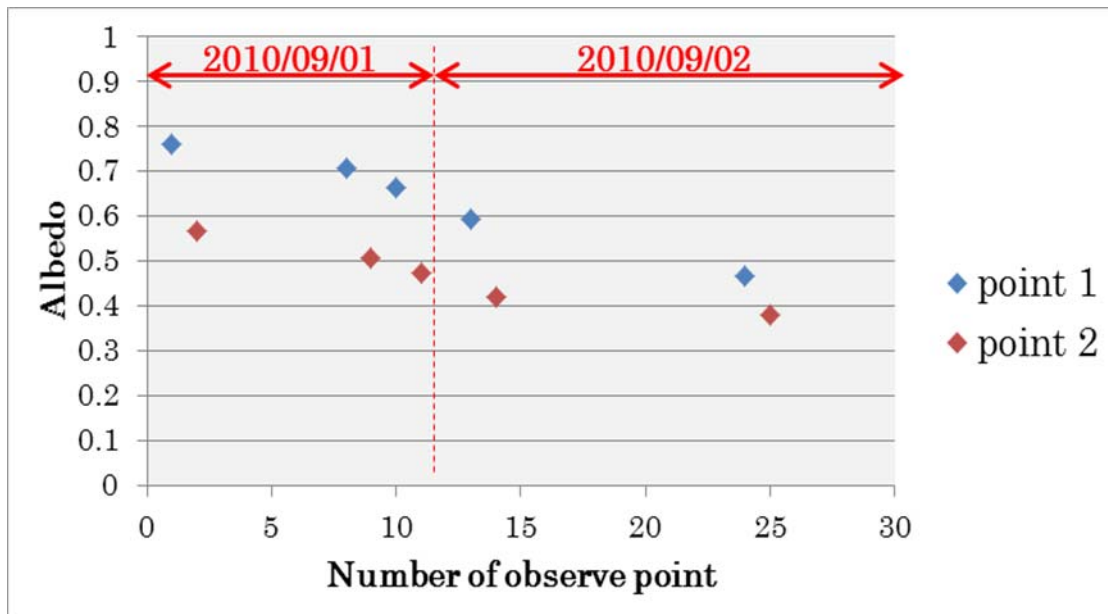


図 3.2 定点における観測結果

### 3.3. 誤差要因

#### 3.3.1. Yellow Pants Effect

アルベドの測定を行うにあたり観測者のズボンからの反射がどの程度影響するかに関する調査を行った。この調査では黄色パンツと黒色パンツの2つを用いて比較を行った。結果、アルベドは各々A19 (黒) が 0.161、A20 (黄) が 0.165 であった (図 3.3)。そこで A19 を真値と考えると、相対誤差は

$$\begin{aligned} \text{相対誤差} &= (\text{絶対誤差}) / (\text{真値}) \\ &= (0.165 - 0.161) / (0.161) \\ &= 0.025[\%] \end{aligned}$$

であった。一方、これまで見てきたように地表面の状態によるアルベドの違いや、時間経過に伴う雪の劣化によるアルベドの変化などは、この値と比較すると 100~1000 倍程度大きいことが分かる。そのため本測定においてパンツの色の違いにより、アルベドの測定結果はほとんど変わらないということが明らかになった。

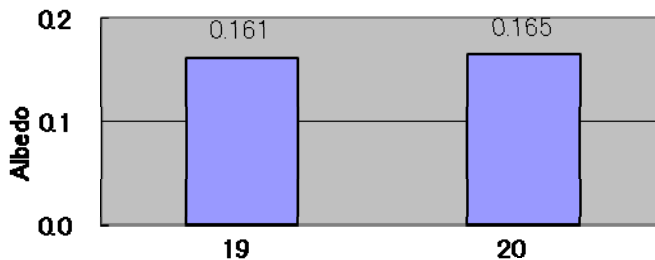


図 3.3 A19 と A20 におけるアルベド値の比較

### 3.3.2. その他考えられる誤差要因

今回のアルベド測定にあたりその他の誤差要因としては、2.2.3 で示された表-より入射量の測定が大きく関与していると考えられる。考えうる理由としては、まず本測定でも十分考慮したつもりであったが、アルベドメータより上にある観測者の上半身部が、影が無くても日射の入り具合に影響を与えていることが考えられる。というのは、アルベドメータを観測表面に平行にする際に棒を短く持っていた場合、上半身に近いため、その影響を十分受けることが考えられるという意味である。本測定では、その長さに関しては十分考慮していなかった。そのため、次年度以降への留意点として挙げたい。

また推測の域を出ないが、測定時の太陽高度とアルベドメータの雪面からの高さに関しても少なからず効いてくるものと考えられる。まず、太陽高度についてである。これはアルベドメータに対して太陽が垂直であれば、雪面での反射は半球を考えた場合、等方的である。しかし、太陽高度が低くなるにつれて雪面への入射は斜めに入ってくるため、雪面での反射は前方反射する。そのため、アルベドメータは垂直の場合と比べて反射を強く捉えてしまうことが予想される。次にアルベドメータからの高さについてである。この高さの変化はアルベドメータがとらえる反射の面積の変化を意味している。そのため、より正確な測定を行うためには観測ごとに高さを測り、可能であれば同じ観測者にする必要があると考えられる。

### 3.4. ローヌ氷河全体におけるアルベド算定

今回観測を行ったのはローヌ氷河の中でも末端下部である。しかしながら今回得られた観測データをローヌ氷河全体に拡張することで、ローヌ氷河全体のアルベドを算定した。なお、本算定は図 3.4 および図 3.5 から推定を行っている。

#### 仮定

- ・ 写真で見えているのは氷河全体の 1/3
- ・ 残りの 2/3 は全て白 (White)
- ・ 写真で見えている部分の 40%が White →  $1/3 \times 0.4$
- "                                60%が Black →  $1/3 \times 0.6$

#### 定義

- ・  $\alpha_{all}$  : 全体のアルベド
- ・  $\alpha_W$  : 白い部分のアルベド (平均)
- ・  $\alpha_B$  : 黒い部分のアルベド (平均)

以上の仮定および定義の上、ローヌ氷河全体のアルベドを以下のように算出した。

$$\begin{aligned}\alpha_{ALL} &= (\text{White} \times \alpha_W + \text{Black} \times \alpha_B) / (\text{White} + \text{Black}) \\ &= \{ (2/3 + 1/3 \times 0.4) \times 0.66 + (1/3 \times 0.6) \times 0.37 \} / 1.0 \\ &= 0.62\end{aligned}$$



図 3.4 ローヌ氷河下流 1/3 程度写真 (右が下流)



図 3.5 ローヌ氷河の地図



本研究の目的の一つである氷河全体の日射吸収量を明らかにすることができた。ここでアルベドの意義に立ち返ると、数値モデルへの回帰が必要であることが挙げられる。つまりアルベドは将来を予測する気候モデル等に用いられる値であるということだ。今回算出した値は、現在の気象予測モデル等で用いられている氷河のアルベド値 0.8 と比較すると 23% も低いものとなった。この 0.8 という値は、アラスカやカナダといった巨大氷河群が存在する高緯度地域の氷河は白く表面も美しいため、0.9 というような高いアルベドの値を示すことに由来している。しかしながら、本研究で対象としたローヌ氷河ではそのような高い値は考えにくい。が、ローヌ氷河のような下流に街が栄えている低緯度の氷河こそ正確な未来予測を必要としていると考える。つまり、個々の氷河のアルベドを観測することは今後の氷河変動および、その融解水が下流に与える影響に関する未来予測の精度を上げる上で有用な情報であることがわかる。

また、今回のアルベド観測から、アルベドが時間と共に変化していることが明らかになった。これは個々の氷河の進退を予測するモデルへ有力な情報となりえる。

## 4. Conclusion

1. アルベドは場所、経過時間および表面の状態（特に湿気の有無）により大きく変化する  
氷河表面のアルベド測定は新雪・古雪・黒色有機物や鉱物で汚れた雪面・融解が激しい雪面で行い、この測定から氷河表面の状態が異なるとそれにもないアルベドも大きく異なっているという結果が得られた。そして特に定点観測では、新雪（汚れていない雪）が、時間が経つとどのように変化するかが結果として得られ、そこから融解水等による水分がより日射の吸収を促している可能性が伺えた。ただ、本測定で行うことはできなかったが、水分の起源としてその融解水が日射由来なのか、気温由来であるのかについては、今後の更なる測定によって解明されなければならない課題のように感じている。そして他の課題としては、経時的なアルベドと氷河表面の粒形（再結晶過程）がどう関係しているのか、また気象条件に恵まれれば降雪する雪自体がどの程度の湿り具合にあるか、そしてそのときの湿度はどのくらいあるかも同時に観測するとアルベドと水分（湿り気）の関係が一層明らかになると考えている。本測定では、氷河表面の違いによるアルベドが異なること及びその経時変化が水分量によって変化する結果として得た。これは氷河上でアルベドがこういった性質をもち、日射による熱収支の観点から氷河の融解にどう寄与するかという研究に関して大きな一歩を示し、これからの研究に発展に大きな期待がもてるものを示したと確信している。
2. ローヌ氷河全体のアルベドは約 0.62 であった  
本測定の大きな目的のひとつに氷河の融解が、どの程度日射の影響を受けているのかを見積もることを定めた。これを調べるために、氷河表面の異なる様々のアルベドを測定した。その測定で得られたアルベドをローヌ氷河全体の写った写真から、大きく **white**(白いところ)と **black**(黒いところ)に分類し、ローヌ氷河全体のアルベドの算出を行った。その計算方法は 3.4 に示されている通りである。それより、我々は氷河全体のアルベドを 0.64 と結論づけた。ただ、解析において **white** と **black** の分類がやや主観的であることや、2 種類の分類にしかできなかったこと等やや精度に欠けたところがあると考えている。そのため、0.64 という値はあくまで見積もりの域を出ないことに注意したい。そのため、次年度以降は氷河写真や衛星画像等をもとに画像解析を手法に取り入れるとより精度の高い値が得られると考える。これらを今後の課題として挙げたい。
3. アルベドを関数化できる可能性がある  
本研究より、アルベドをより正確に表現するために、何らかの関数で示すことができる可能性があると考えた。日が経つにつれて表面状態が劣化し、アルベドの値は低くなっていく。しかし、今回の測定では 0.2 程度の値が最小値であった。また、雪が降って数日間は劣化が激しく、ある程度再凍結を繰り返せばアルベドが下がる速度もゆ

るやかになると考えられる。これは指数関数による減少状態によく似ており、アルベドの計日劣化を簡単な関数で表す可能性を感じた。あるいは、アラスカやカナダの氷河がその気温の低さから真っ白であり、ゆえに高いアルベド値を示すことを考えれば、全球モデルにおいて緯度を変数としてアルベド値を与える方法も考えられる。

本研究のみでは、それを実際に行うことはできなかったが、今後の研究によりそれができる可能性を見ることができた。航空写真等で氷河全体の表面状態を知り、アルベド測定により表面状態によるアルベド値を求めれば、その氷河全体のアルベドを算定することは難しくない。しかし全 200,000 箇所 of 氷河でそれを行うことは難しいため、緯度による関数が現実的ではないかと考えた。

5. 付録

5.1. データのばらつき

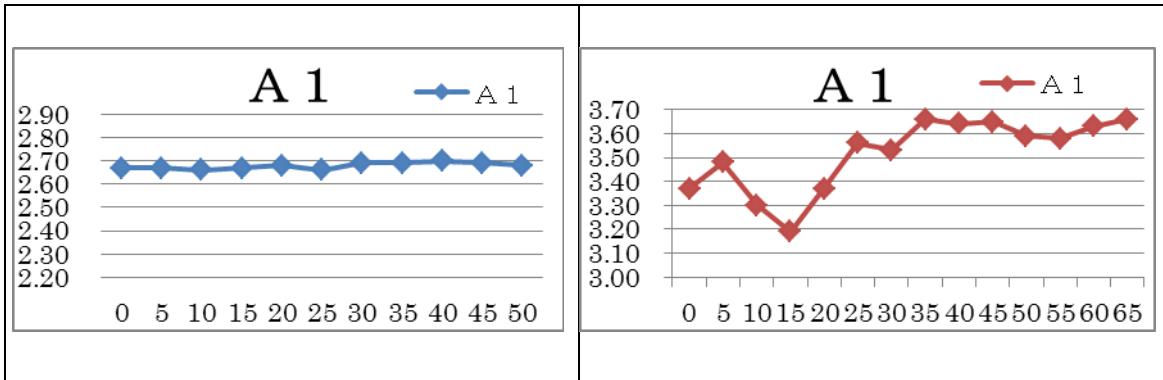


図 5.1 地点 A1 (反射：青，日射：赤)

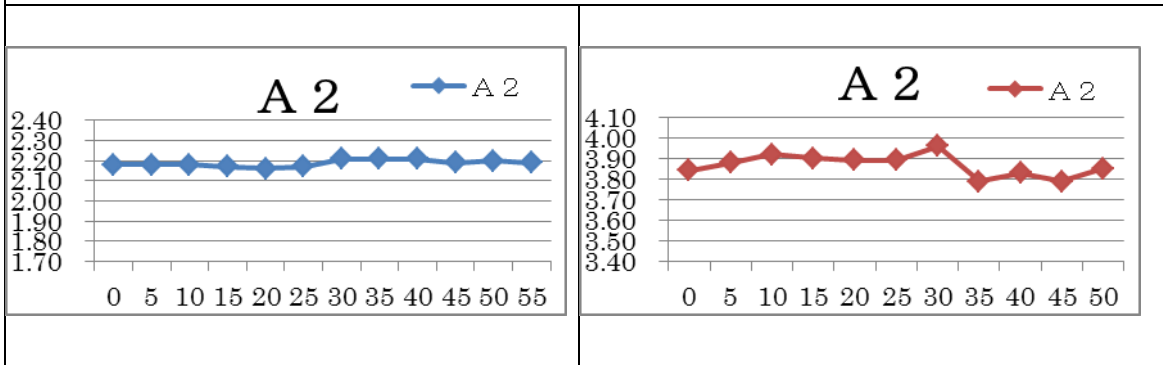


図 5.2 地点 A2 (反射：青，日射：赤)

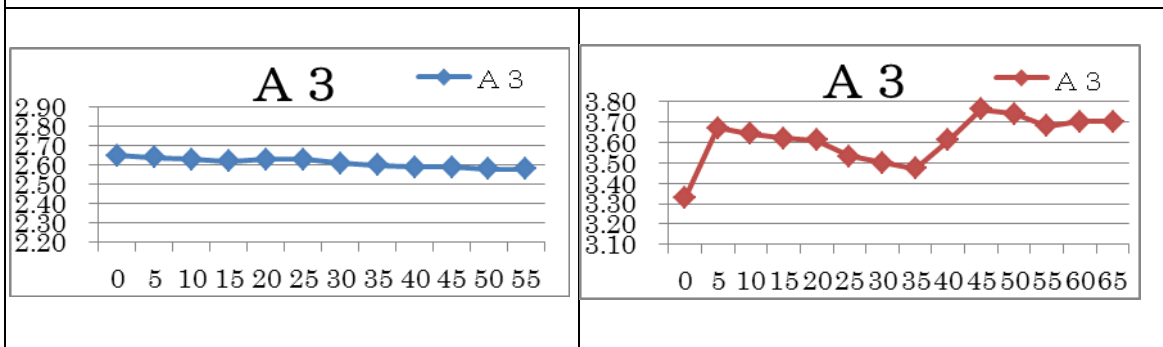


図 5.3 地点 A3 (反射：青，日射：赤)

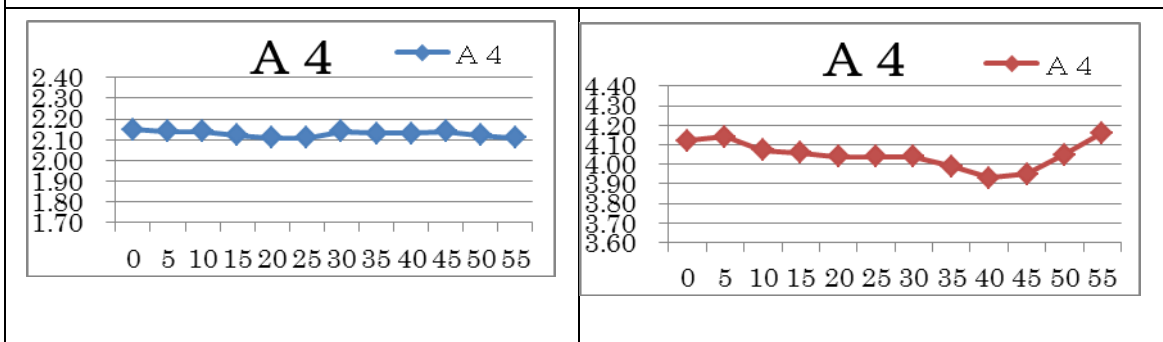


図 5.4 地点 A4 (反射：青，日射：赤)

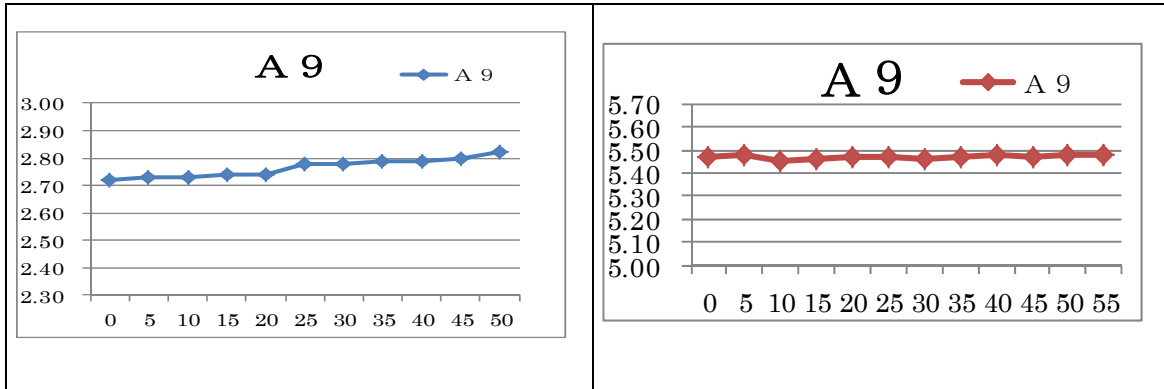


図 5.9 地点 A9 (反射：青，日射：赤)

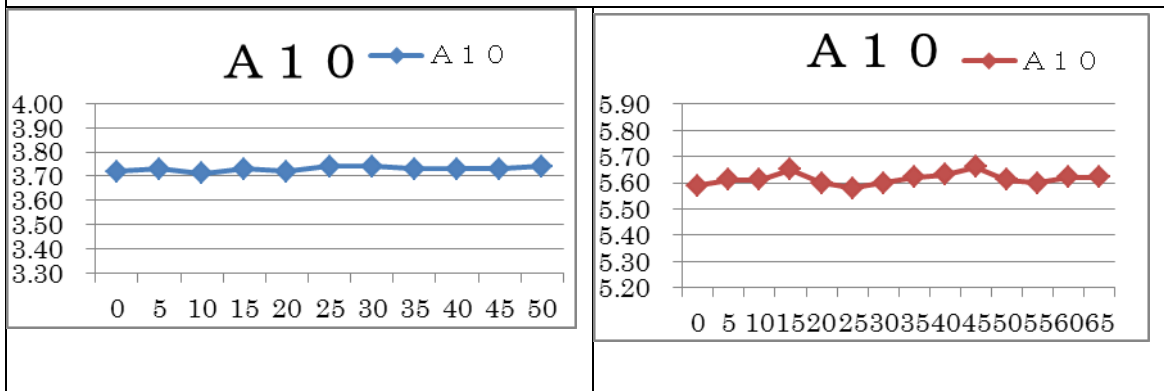


図 5.10 地点 A10 (反射：青，日射：赤)

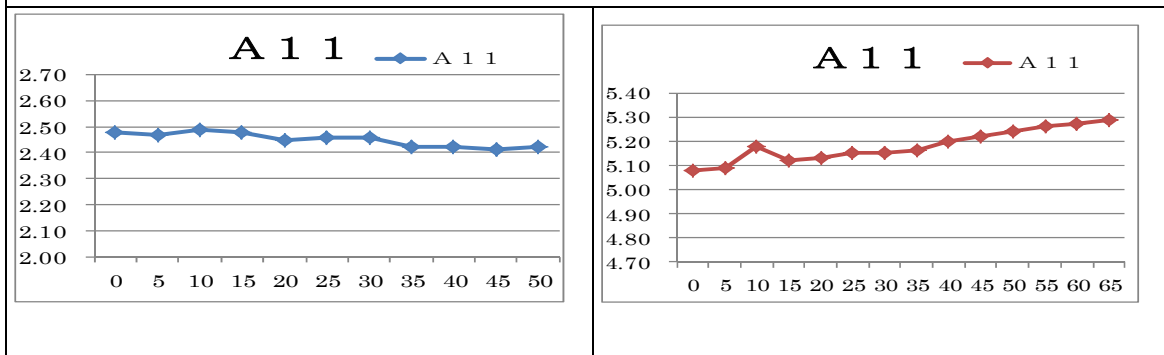


図 5.11 地点 A11 (反射：青，日射：赤)

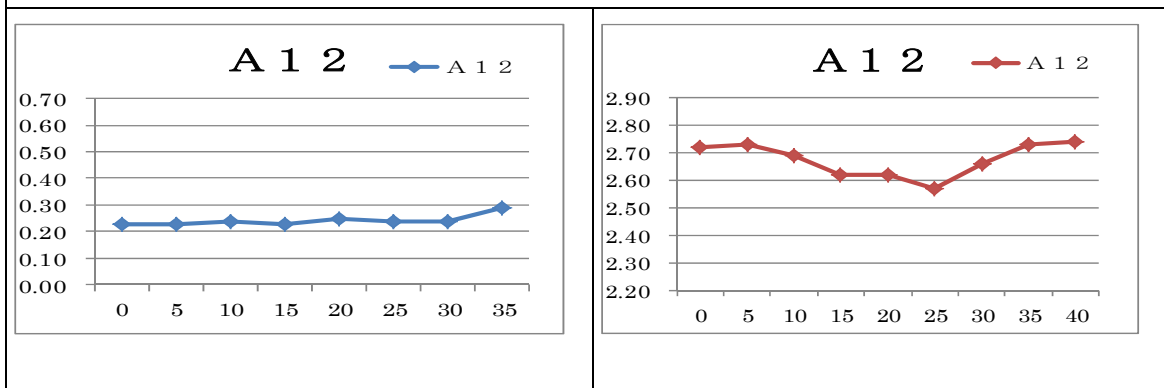


図 5.12 地点 A12 (反射：青，日射：赤)

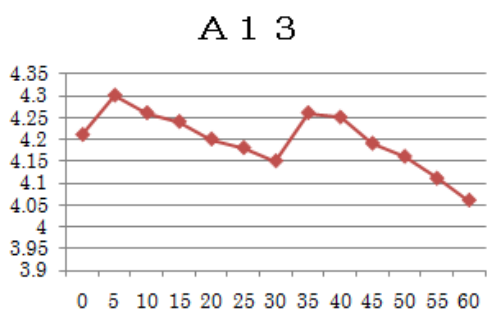


図 5.13 地点 A13 (反射：青, 日射：赤)

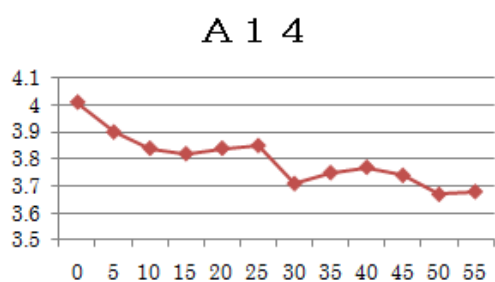


図 5.14 地点 A14 (反射：青, 日射：赤)

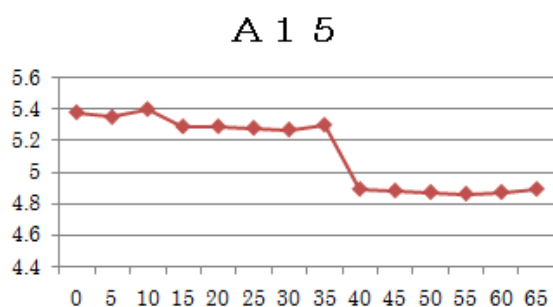


図 5.15 地点 A15 (反射：青, 日射：赤)

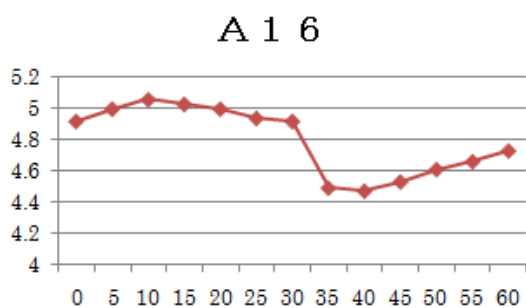


図 5.16 地点 A16 (反射：青, 日射：赤)

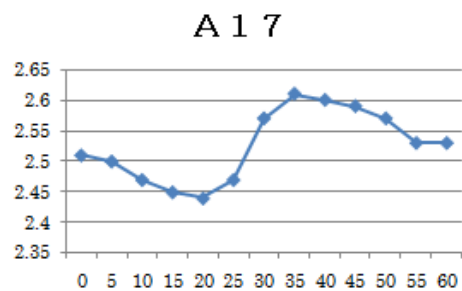


図 5.17 地点 A17 (反射：青，日射：赤)

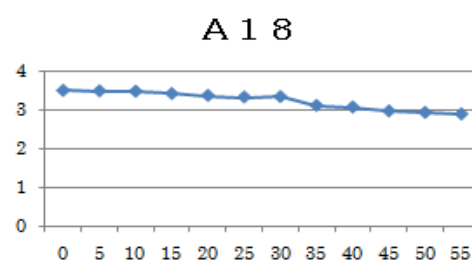
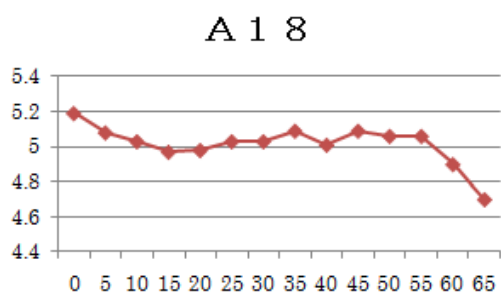


図 5.18 地点 A18 (反射：青，日射：赤)

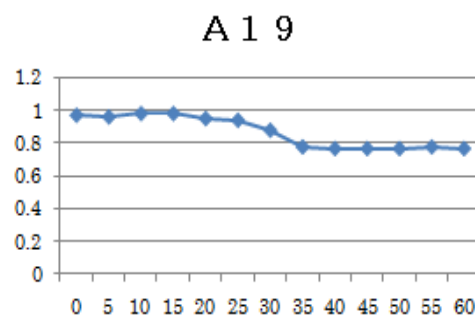
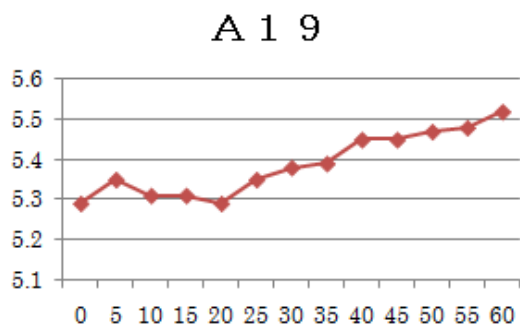


図 5.19 地点 A19 (反射：青，日射：赤)

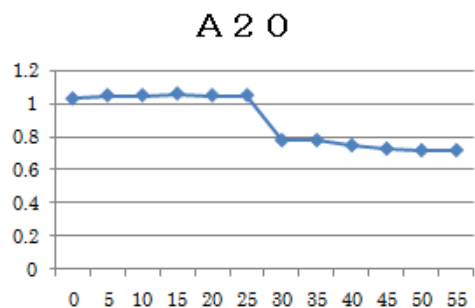
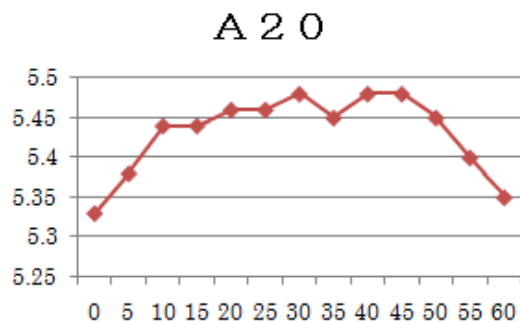


図 5.20 地点 A20 (反射：青，日射：赤)

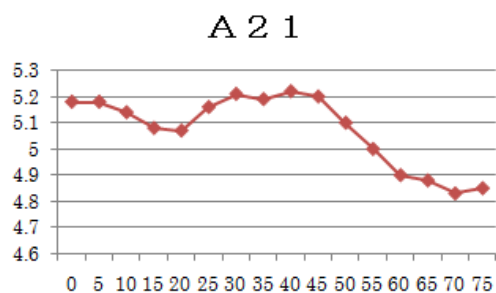


図 5.21 地点 A21 (反射：青，日射：赤)

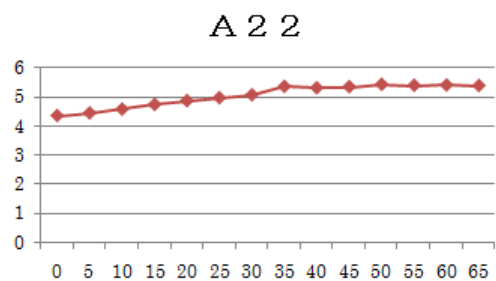


図 5.22 地点 A22 (反射：青，日射：赤)

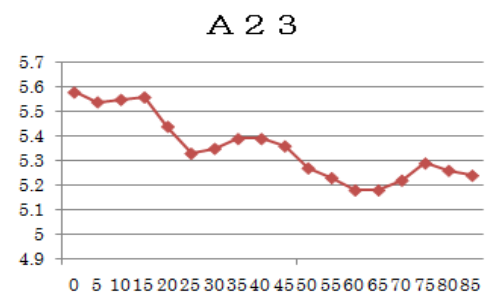


図 5.23 地点 A23 (反射：青，日射：赤)

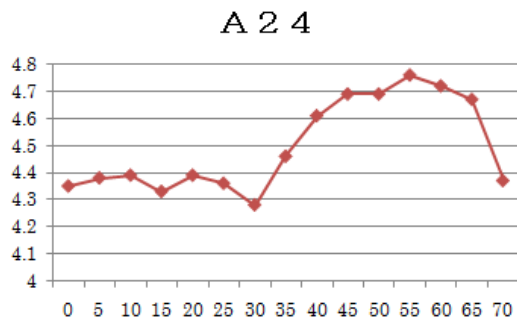


図 5.24 地点 A24 (反射：青，日射：赤)



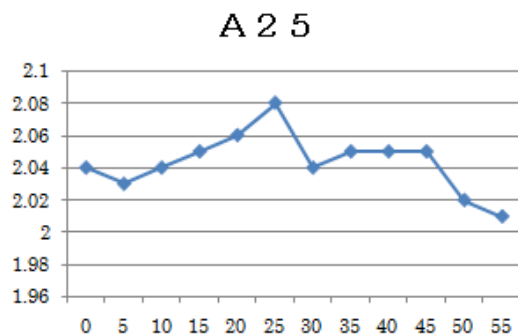
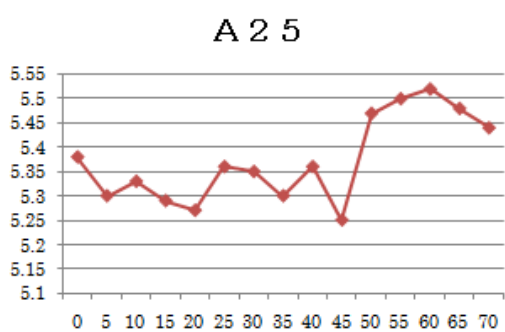


図 5.25 地点 A25 (反射：青，日射：赤)

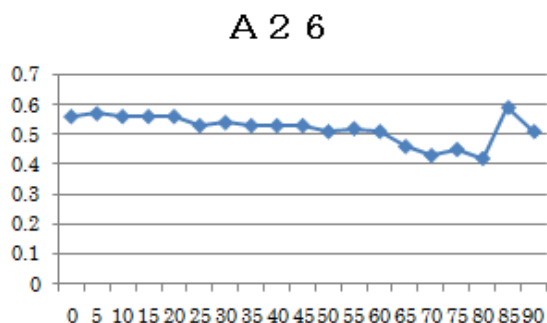
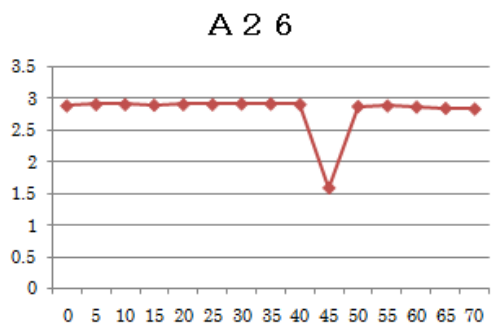


図 5.26 地点 A26 (反射：青，日射：赤)

## 5.2. 測定位置における氷河表面の写真

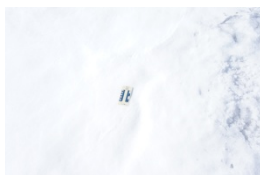
以下に、測定地点における氷河表面の写真を示す。なお、A19 と A20, A21 と A22 は服の色の違いに起因する誤差をさぐるため、同地点・時刻で観測したため同一の写真となっている。



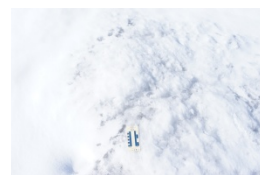
A1 : 定点 1



A2 : 定点 2



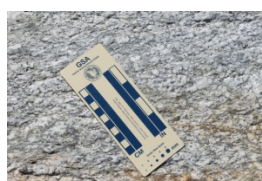
A3



A4



A5



A6 (岩)



A7 (砂利)



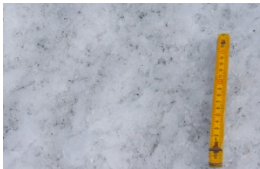
A8 : 定点 1



A9 : 定点 2



A10 : 定点 1



A11 : 定点 2



A12 (水面)



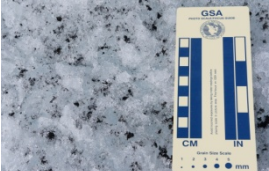
A13 : 定点 1



A14 : 定点 2



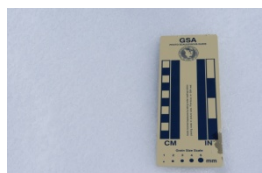
A15



A16



A17



A18



A19, A20



A21, A22



A23



A24 : 定点 1



A25 : 定点 2



A26