

概要書

山形大学理学部地球環境学科 鈴木利孝・小室悠紀

ノースアジア大学教養部 力石國男

氷河の後退や海氷面積の減少など、地球雪氷圏の衰退が注目されている。これらは地球温暖化による気温上昇のためと説明されてきたが、例えば、Kaser et al. (2004)の研究では、温暖化が加速した 1950 年以前から氷河が後退していることが示されており、雪氷圏衰退の主原因の解明が緊急の課題となっている。雪氷が急激に融解する原因として、人間活動起源の不純物や砂漠化による風送塵の増加による雪の汚れの増加に伴う雪面の反射率（雪面アルベド）の減少が注目されている。しかしながら、雪面アルベドと雪面の汚れを同時に測定した研究例は少なく、両者の関係を定量的に把握するには至っていない。そこで本研究では、(1) 山形県の積雪地において雪面アルベドと積雪中粒子量の同時測定を行い、両者の相関を明らかにすること、(2) 北半球氷河コアに記録された粒子量の鉛直分布を測定し、その結果にアルベド-積雪粒子量相関関係を適用して北半球氷河上での過去 1000 年にわたるアルベド変化を復元することを目的とした。

2010~2011 年の冬季、山形大学構内においてアルベドメーターによる雪面アルベド測定と積雪採取の同時観測を行った。観測は日射が安定する 13:00~14:00 の間に、合計 70 回行った。積雪試料は融解後、一部の試料を用いて濁度計により濁度を測定し、残りの試料はマイクロ波酸分解法により雪中粒状物を全分解した後、ICP 発光分析を用いて雪中金属成分全濃度（溶存態+粒子態）を測定した。

雪中濁度が高いほど雪面アルベドは低くなり、両者は寄与率 76%の強い相関関係で対数回帰することができた。また、雪中 Fe および Al 全濃度と雪面アルベドの関係も、それぞれ 75%、67%の高い寄与率で対数式によりモデル化することができた。Fe と Al の濃度比は約 0.75 と一定値を示し、この値は平均鉱物粒子組成比に近いこと、雪面アルベドは雪に含まれる鉱物粒子量と強い相関性があると考えられる。雪中 Na 全濃度と雪面アルベドとの間には有意の相関は見られず、これは、Na 全濃度に対して海塩性・可溶性 Na 濃度が大きく寄与したためであり、雪中にイオンとして含まれる金属はアルベドと無関係であることがわかった。

カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河とグリーンランド氷床から採取した雪氷コア中の濁度を測定し、雪中濁度と雪面アルベドの回帰モデルを用いて、過去の雪面アルベド変化を復元した。両地点とも、アルベドは 0.6~0.9 の範囲で変動し、この数百年間の変化に特定のトレンドは見られなかった。北極圏より、さらに汚染が進行してきたと予想されるアジア山岳氷河コアについて、今後同様の分析を行う予定である。

公益信託エスベック地球環境研究・技術基金

平成 23 年度助成金研究報告書

地球温暖化を加速する雪面アルベド低下と
雪の汚れの関係

山形大学理学部地球環境学科

鈴木利孝・小室悠紀

ノースアジア大学教養部

力石國男

要旨

氷河の後退や海氷面積の減少など、地球雪氷圏の衰退が注目されている。これらは地球温暖化による気温上昇のためと説明されてきたが、例えば、Kaser et al. (2004)の研究では、温暖化が加速した 1950 年以前から氷河が後退していることが示されており、雪氷圏衰退の主原因の解明が緊急の課題となっている。雪氷が急激に融解する原因として、人間活動起源の不純物や砂漠化による風送塵の増加による雪の汚れの増加に伴う雪面の反射率（雪面アルベド）の減少が注目されている。しかしながら、雪面アルベドと雪面の汚れを同時に測定した研究例は少なく、両者の関係を定量的に把握するには至っていない。そこで本研究では、(1) 山形県の積雪地において雪面アルベドと積雪中粒子量の同時測定を行い、両者の相関を明らかにすること、(2) 北半球氷河コアに記録された粒子量の鉛直分布を測定し、その結果にアルベド-積雪粒子量相関関係を適用して北半球氷河上での過去 1000 年にわたるアルベド変化を復元することを目的とした。

2010～2011 年の冬季、山形大学構内においてアルベドメーターによる雪面アルベド測定と積雪採取の同時観測を行った。観測は日射が安定する 13:00～14:00 の間に、合計 70 回行った。積雪試料は融解後、一部の試料を用いて濁度計により濁度を測定し、残りの試料はマイクロ波酸分解法により雪中粒状物を全分解した後、ICP 発光分析を用いて雪中金属成分全濃度（溶存態+粒子態）を測定した。

雪中濁度が高いほど雪面アルベドは低くなり、両者は寄与率 76%の強い相関関係で対数回帰することができた。また、雪中 Fe および Al 全濃度と雪面アルベドの関係も、それぞれ 75%、67%の高い寄与率で対数式によりモデル化することができた。Fe と Al の濃度比は約 0.75 と一定値を示し、この値は平均鉱物粒子組成比に近いこと、雪面アルベドは雪に含まれる鉱物粒子量と強い相関性があると考えられる。雪中 Na 全濃度と雪面アルベドとの間には有意の相関は見られず、これは、Na 全濃度に対して海塩性・可溶性 Na 濃度が大きく寄与したためであり、雪中にイオンとして含まれる金属はアルベドと無関係であることがわかった。

カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河とグリーンランド氷床から採取した雪氷コア中の濁度を測定し、雪中濁度と雪面アルベドの回帰モデルを用いて、過去の雪面アルベド変化を復元した。両地点とも、アルベドは 0.6～0.9 の範囲で変動し、この数百年間の変化に特定のトレンドは見られなかった。北極圏より、さらに汚染が進行してきたと予想されるアジア山岳氷河コアについて、今後同様の分析を行う予定である。

1. はじめに

近年、極地や山岳地域における氷河の後退や、北極海における海氷面積の減少に代表されるように、雪氷圏の急激な衰退が問題となり注目を集めている。雪氷圏、すなわち地球表面の白い部分の減少は、地面や海面における日射の吸収が強まり、ひいては温暖化が加速し、地球の気象や気候に大きな影響を与えることを意味する。さらに、山岳氷河の後退は周辺地域の水資源を減少させ、砂漠化を助長することが予測される。雪氷圏衰退の原因は基本的に地球温暖化による気温上昇によって説明されることが多い。しかしながら、山岳氷河は近年始まった地球温暖化以前から縮小していること(Kaser et al., 2004) や、地球温暖化による気温上昇だけでは雪氷の融解速度を説明できないこと(力石, 2009)などが報告されており、これらの研究は、近年の地球温暖化を原因とする説と矛盾する結果を示している。

地球表面における太陽光の反射率(反射エネルギー/入射エネルギー)は白っぽい部分、例えば雪面では0.9程度と高い値を示し、例えば海面など暗い部分では0.1程度である。したがって、雪面は基本的には日射によるエネルギーの大部分を反射する性質を持っているが、土壌粒子や煤など光吸収性の不純物が混入すると、雪面におけるアルベド(雪面アルベド)が低下して日射の吸収量が増えるため融雪が進む。また、積雪中に存在する不純物は融雪によって表面に集積していくため、融雪により、さらに雪面アルベド低下と融雪が加速される。一般に雪面アルベドの低下によって雪面が吸収する熱量は気温上昇によって積雪中に取り込まれる熱量よりも大きいことから、アルベド低下が雪氷の融解に果たす役割は、気温上昇のように体感しにくいものの、その効果は極めて需要であることが予想される。しかしながら、雪面アルベドと雪面の汚れを同時に測定した研究例は少なく、両者の関係を定量的に把握するには至っていない。

そこで本研究では、(1)山形県の積雪地において雪面アルベドと積雪中粒子量の同時測定を行い、両者の相関を明らかにすること、(2)北半球氷河コアに記録された粒子量の鉛直分布を測定し、その結果にアルベド-積雪粒子量相関関係を適用して、北半球氷河上での過去1000年にわたるアルベド変化を復元することを目的とした。

2. 方法

2010~2011年の冬季、山形大学構内において、アルベドメーターによる雪面アルベド測定と積雪採取の同時観測を行った。観測は日射が安定する13:00~14:00の間に、

合計 70 回行った。積雪試料は融解後、一部の試料を用いて濁度計により濁度を測定し、残りの試料はマイクロ波酸分解法により雪中粒状物を全分解した後、誘導結合プラズマ (ICP) 発光分析を用いて雪中金属成分全濃度 (溶存態+粒子態) を測定した。

上記の観測から、雪中濁度および金属成分濃度と雪面アルベドの関係を回帰モデルにより数式化し、カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河とグリーンランド氷床から採取した雪氷コア中濁度の鉛直分布から過去数百年間の雪面アルベド変化を復元した。なお、ウシュコフスキー氷河コアは、カムチャッカ半島中央部に位置するウシュコフスキー火山のクレーターを覆う氷河上の K2 地点 (56°04'N, 160°28'E, 3903m amsl) で採取した (Shiraiwa et al., 1999) ものを、グリーンランド氷床コアは氷床上の Site-J 地点 (66°52'N, 46°16'W, 2030m amsl) で採取したものをを用いた。

2-1. アルベド測定について

雪面アルベドは Hukseflux 製 SRA01-J アルベドメーター (表 1、図 1) を用いて測定した。上向きのセンサー (UP センサー) で入射光のエネルギーを、下向きのセンサー (DOWN センサー) で反射光のエネルギーをそれぞれ測定し、対応する電圧ロガー (日置電機製 3645 電圧ロガー) に 2 秒毎に 3 分間記録した。記録したデータから 3 分間の平均値を求め、UP センサーと DOWN センサーの測定値の比から雪面アルベドを求めた。

表 1 Hukseflux 製 SRA01-J アルベドメーターの仕様

ISO 規格	セカンドクラス
波長範囲	305 - 2800 nm
センサー感度 (代表値)	15 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$
アルベド範囲	0 - 100%
作動温度範囲	-40 から +80 °C
設置用ポール直径	34インチ NPS (max. wall thickness SCH 80) (パイプ外径 26.67mm、内径は 17mm以上)

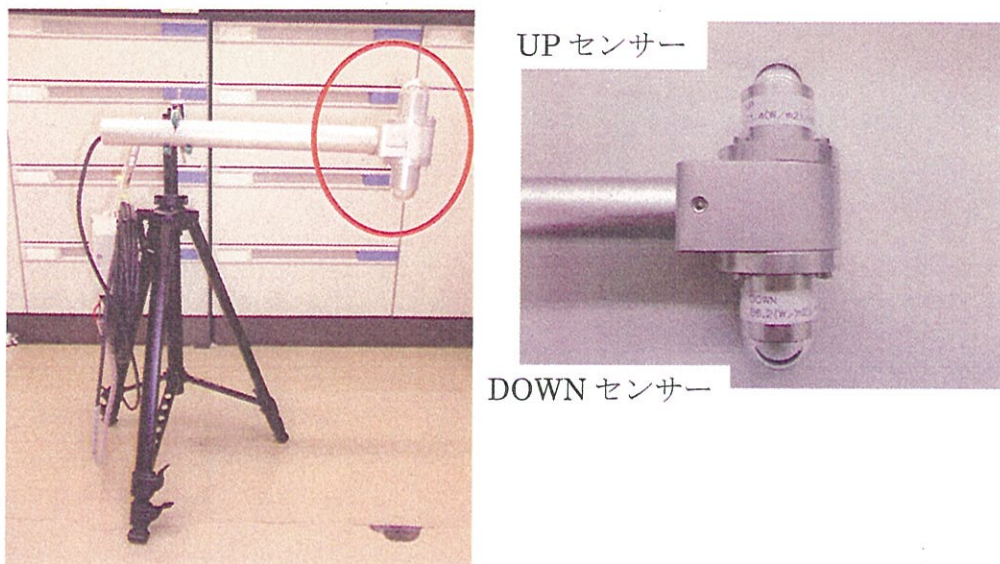


図1 Hukseflux 製 SRA01-J アルベドメーター写真。左側写真赤丸部がセンサー部で右側に拡大写真を示した

2-2. 濁度測定について

濁度とは不溶解性物質の存在によって液の透明性が失われる度合いのことである (DIN EN 27027)。濁度の単位は NTU (Nephelometric Turbidity Unit) であり、溶液に入射させた光の透過光強度や散乱光強度から値を算出する。本研究ではラコムテスター製 TN-100 濁度計 (図 2) を使用して雪中濁度を測定した。本測定器の原理は、赤外線放射ダイオード(波長 800nm)を光源、ホルマジン溶液を標準物質とした、ISO7027 非対称投下散乱光方式に準拠している。



図2 ラコムテスター製 TN-100 濁度計 (中央) とサンプルバイアル (右)

2-3. 金属全濃度測定について

雪中の金属成分全濃度（溶存態+粒子態）を得るためには、雪に含まれる粒状物を全て溶解させてイオンにし、光分析法により溶液中の濃度を測定するのが正確かつ簡便な方法である。本研究では、粒状物の分解法としてマイクロ波酸分解法（Suzuki and Sensui, 1991）を、溶液中金属濃度測定法として ICP 発光分析法を適用した。マイクロ波酸分解容器は、三愛科学製 P-25 と DV-7（図 3a、b）を用い、硝酸とフッ化水素酸は関東化学製超高純度試薬 Ultrapur を用いた。ICP 発光分析装置はセイコー電子工業製 SPS7000A を用い、SPEX 製 XSTC-13 を標準物質とした検量線法により金属濃度を測定した。



図 3a 三愛科学製 P-25 マイクロ波酸分解容器



図 3b P-25 マイクロ波酸分解容器と DV-7 小容器。DV-7 に試料と酸を入れ、P-25 に密閉して電子レンジで加熱分解する

3. 結果と考察

3-1. 雪面アルベドと雪中濁度の関係

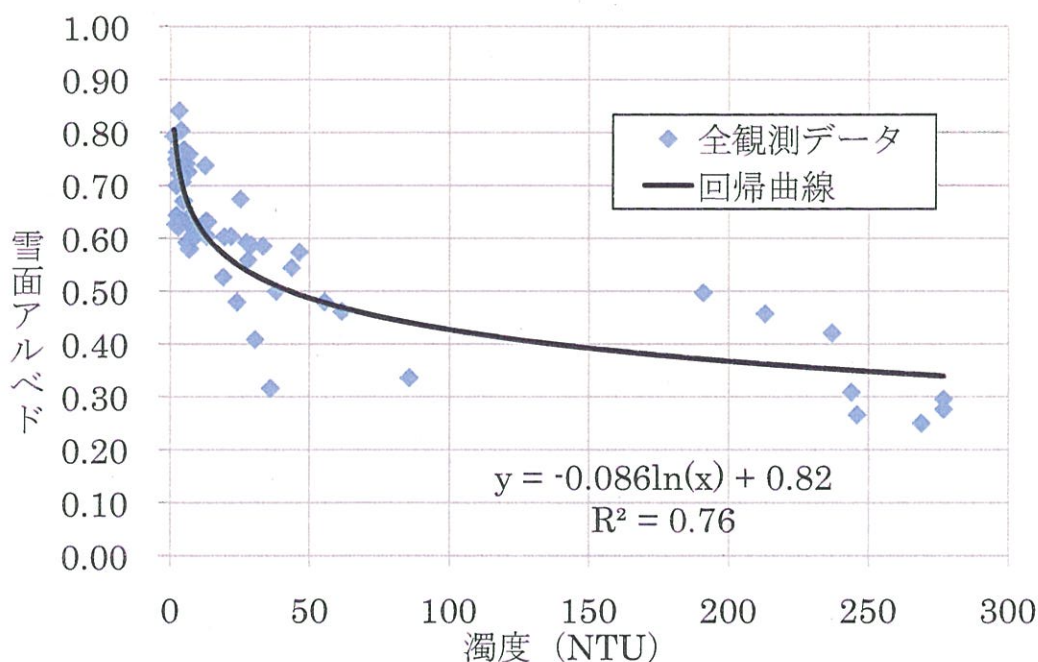


図4 雪面アルベドと雪中濁度の関係

図4に全ての観測についての雪面アルベドと雪中濁度の関係を示す。観測した雪面のアルベドが低いほど雪中濁度が高くなる傾向が見られた。相関性の強さを示す回帰分析の寄与率（相関係数の二乗×100%）が最も大きいのは対数回帰モデルの場合だったため、雪面アルベドと雪中濁度の関係は、対数回帰によりモデル化した。寄与率が76%であることから、雪面アルベドと雪中濁度の間には高い相関性があることがわかる。

図4にプロットしたデータに関して、人為的攪乱が見られなかった観測雪面で得たデータと人為的攪乱が見られた観測雪面で得たデータとに分けて示したのが図5と6である。人為的な攪乱が見られない場所のデータ（図5）は、全体としてアルベドが高く、濁度は低かった。これは、人の靴や車のタイヤなどによって雪面に汚れが持ち込まれることが無く、積もった雪がより自然な状態であるためと考えられる。アルベドと濁度の間の寄与率は58%であった。人為的攪乱が無いことから、後述する氷河コアによる過

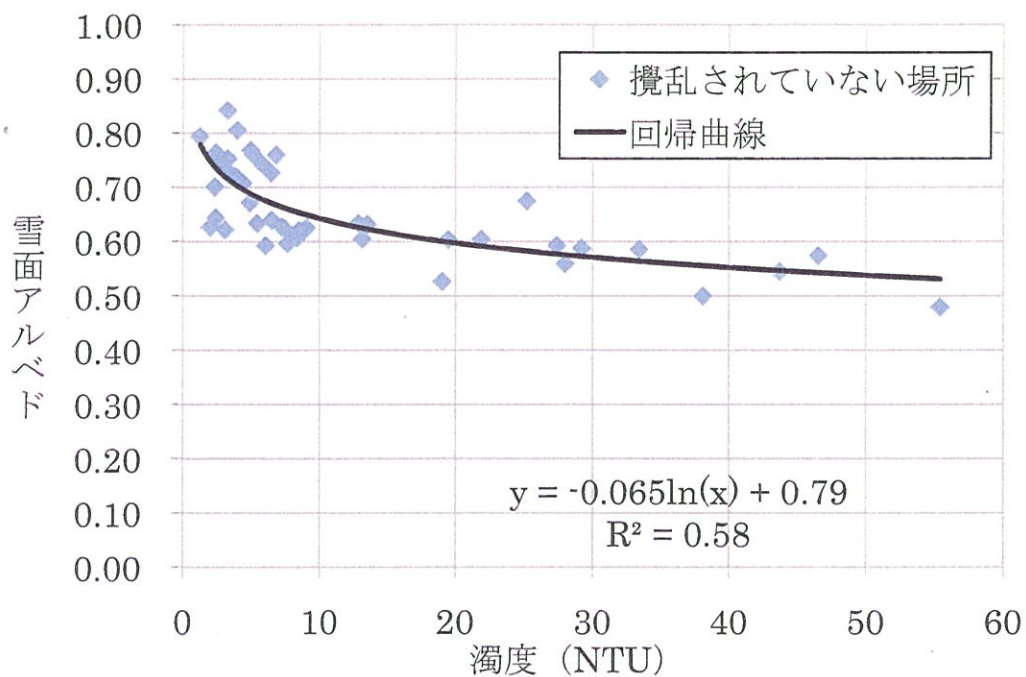


図5 雪面アルベドと雪中濁度の関係（攪乱されていない場所）

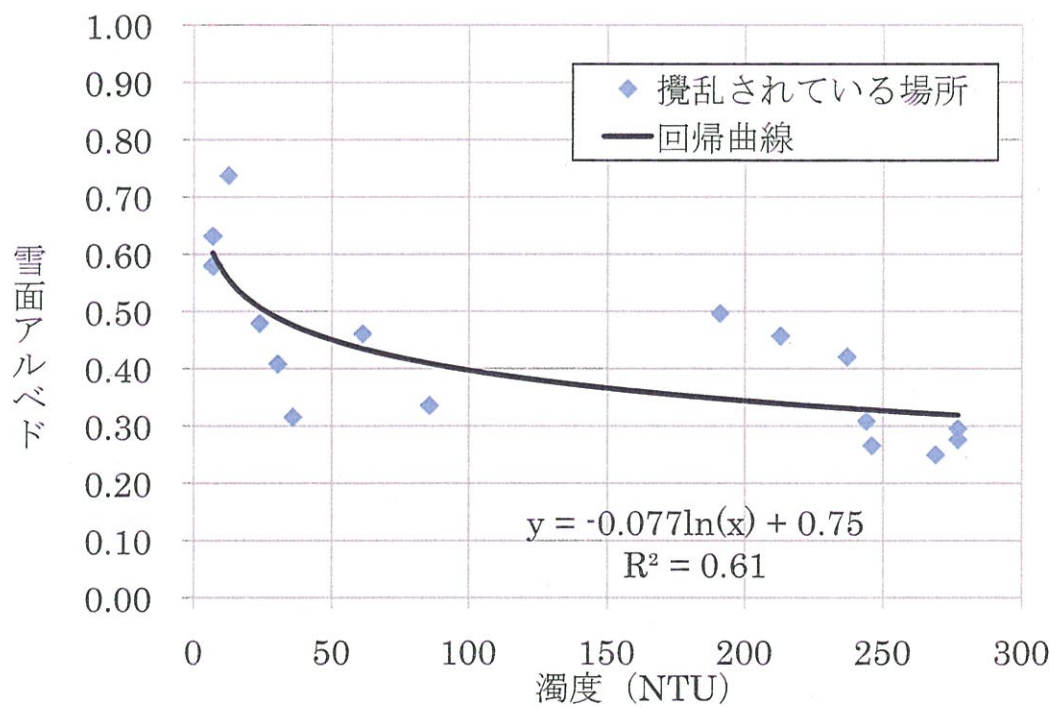


図6 雪面アルベドと雪中濁度の関係（攪乱されている場所）

去のアルベド変化の復元には、図5に示す回帰式により行うこととした。人為的攪乱が

見られた場所では、全体としてアルベドは低く、濁度は高くなる結果となった(図6)。観測地点は、駐車場などの人や車の出入りが多い場所であり、人為的な影響によって雪面の汚れが増えたためであると考えられる。また、人や車に踏み荒らされることによってできた雪面の凹凸が多かったこともアルベドが低くなった原因として考えられる。アルベドと濁度の間の寄与率は58%であった。

3-2. 雪面アルベドと雪中金属成分濃度の関係

図7および図8に、雪面アルベドと雪中FeおよびAl全濃度の関係を示した。濁度に関する結果と同様、雪面アルベドが低いデータほど、FeやAl濃度も高くなる傾向が見られた。対数回帰分析の結果、アルベドとFe濃度の寄与率は75%、アルベドとAl濃度のそれは67%となり、雪面アルベドと雪中FeおよびAl全濃度との間には、強い相関性があることがわかった。

図9に雪中Fe全濃度と雪中Al全濃度の関係を示す。直線回帰により得られた寄与率は99%であり、FeとAlの濃度比は0.75で、ほぼ一定であることがわかった。この値は、Taylor(1964)による平均地殻組成比に近い値であり、FeとAlの大部分が地殻表面を起源とする鉱物粒子由来であることを示している。図7および8で示したとおり、雪中FeおよびAl濃度は雪面アルベドと強い相関関係にあることから、雪面アルベドは地殻起源の鉱物エアロゾル負荷量と強い相関性があるとも言える。

図10に雪面アルベドと雪中Na全濃度の関係を示した。FeやAl濃度と雪面アルベドの関係とは異なり、両者の間に特定の関係は見られなかった。さまざまな関数を用いて回帰分析を行ってみたが、寄与率が1%を上回ることはなかった。そこで、全データを、アルベドの減少に伴い濃度が増加しているグループ(赤で示した領域)と、アルベドが減少してもあまり濃度の変化が見られないグループ(青で示した領域)とに分け、さらに、地殻起源のNaの寄与を除いて考察を進めてみることにした。図11に示したのは、雪面アルベドと地殻起源の寄与を除いた雪中Na濃度(noncrustalNa濃度)の関係である。noncrustalNa濃度は、雪中のAlは全て地殻起源であると仮定し、以下の式によって求めた。

$$[\text{noncrustalNa}] = [\text{totalNa}] - (\text{Na/Al})_{\text{crust}} \times [\text{totalAl}] \quad \dots (1)$$

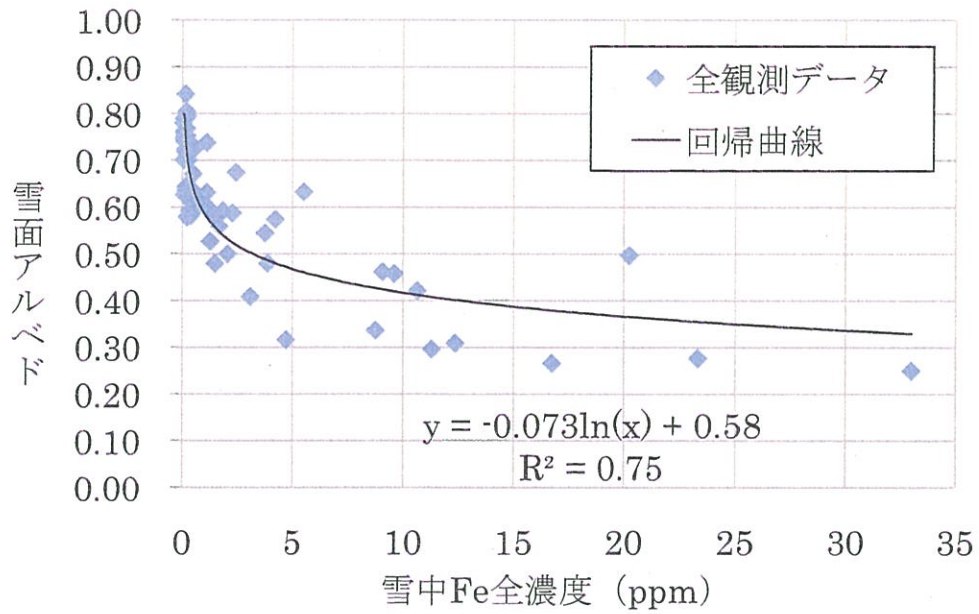


図7 雪面アルベドと雪中 Fe 全濃度の関係

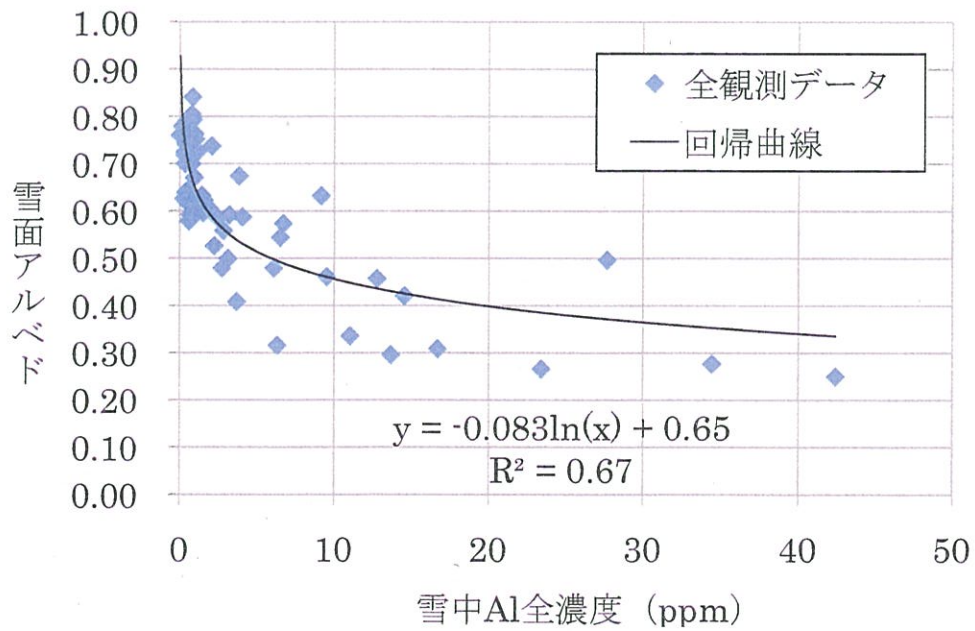


図8 雪面アルベドと雪中 Al 全濃度の関係

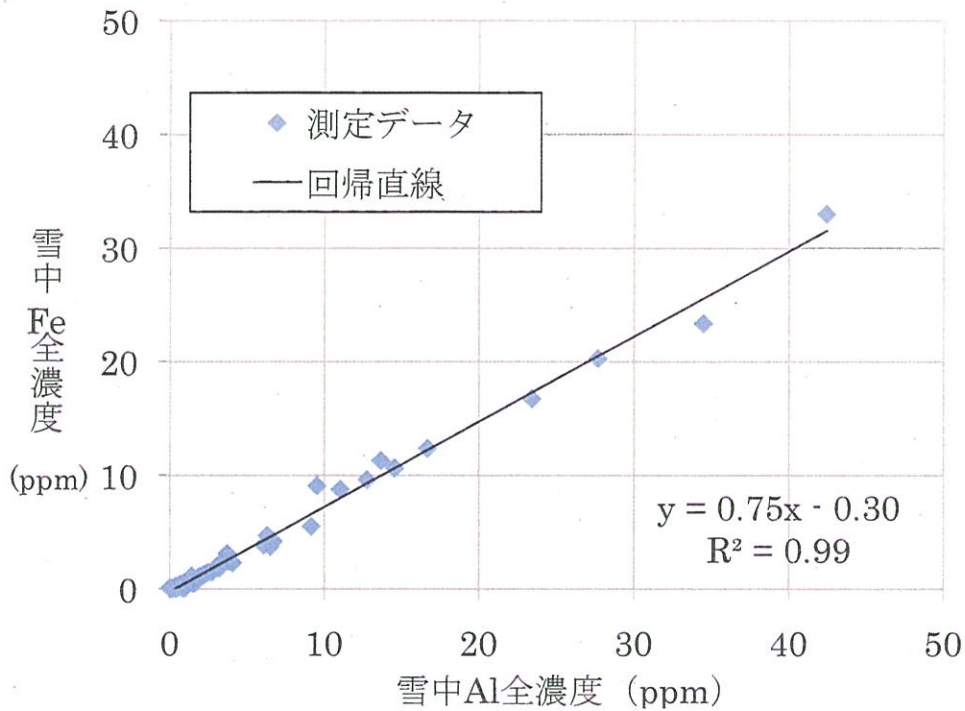


図9 雪中 Fe 全濃度と雪中 Al 全濃度の関係

(1) 式において、[totalNa]、[totalAl]はそれぞれ Na 全濃度、Al 全濃度、(Na/Al)_{crust} は平均地殻 Na/Al 組成比 (Taylor, 1964) である。図 10 で赤色の領域にプロットされていたデータについて、noncrustalNa 濃度が 0 あるいはそれ以下となったデータは、図 11 にプロットしなかった。Na 全濃度が相当量あったにもかかわらず noncrustalNa 濃度がほとんど 0 であるということは、含まれている Na のほとんどが地殻起源の Na ということであり、赤色の範囲にプロットされていた Na のほとんどは鉱物粒子を主とする地殻起源物質によって供給されていたと考えることができる。

一方、青領域のデータについては、Na 濃度の結果 (図 10) と noncrustalNa 濃度の結果 (図 11) は、ほとんど変わらなかった。これは、青領域にプロットされたデータの Na 濃度は、そもそも、その大部分が地殻起源以外の Na に起因するということを意味している。そして、青領域に多くプロットされる noncrustalNa 濃度は、その値が増加することに伴いアルベドが低下するという傾向が見られないため、noncrustalNa は雪面アルベド低下に寄与しないと言うことができる。雪中における地殻起源の Na、すなわち岩石破砕物以外の Na の供給源として有為なのは海洋起源の海塩物質であり、そ

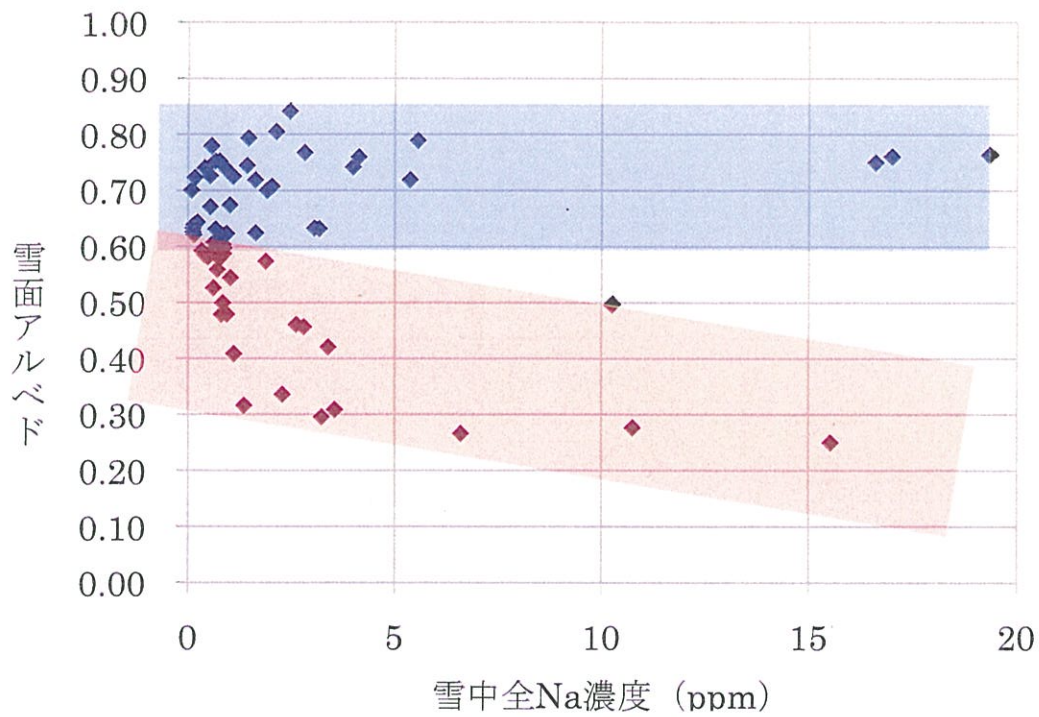


図 10 雪面アルベドと雪中全 Na 濃度の関係

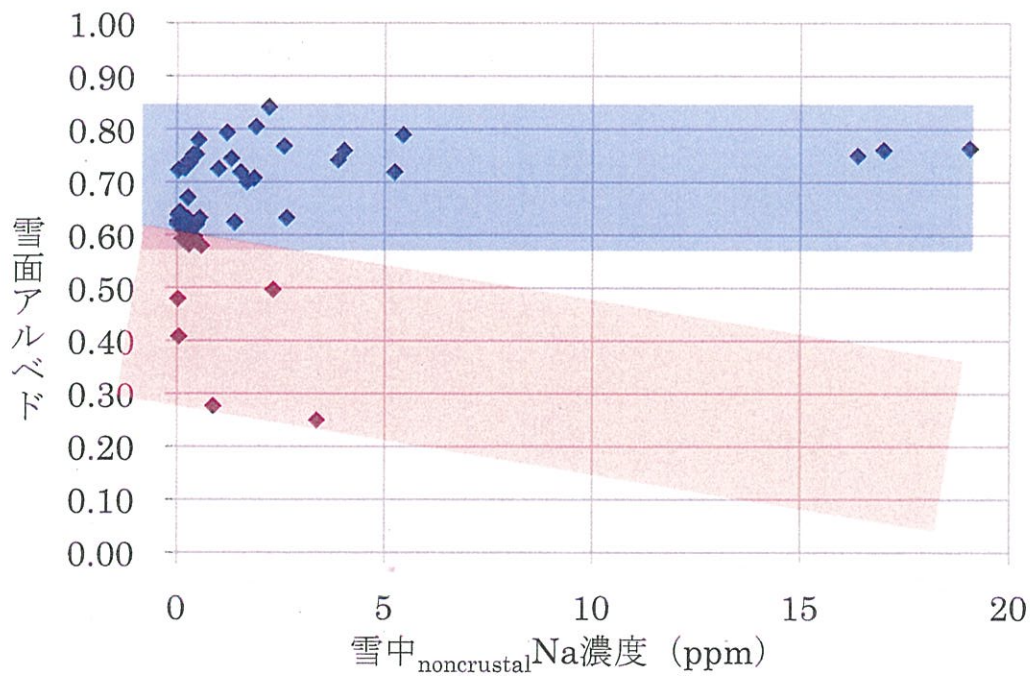


図 11 雪面アルベドと雪中 $_{ncr}$ Na 濃度の関係

れは雪中においては溶存成分（イオン）として存在している。本研究で得られた noncrystalNa 濃度の大部分が可溶性の海塩起源 Na であったと考えると、雪中の溶存 Na は雪面アルベドに寄与しないと結論することができる。そして、この結果は、Na 以外の溶存態成分についても同様の結果をもたらす可能性を示唆している。

3-3. 北極雪氷圏における過去の雪面アルベド変化の復元

カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河とグリーンランド氷床から採取した雪氷コア中の濁度の鉛直分布を測定し、図 5 における雪面アルベドと雪中濁度の関係式を用いて、両地点における過去数百年間の雪面アルベド変化を復元した。ウシュコフスキー氷河における結果を図 12 に、グリーンランド氷床における結果を図 13 に示す。

ウシュコフスキー氷河における復元アルベドは、1877 年から 1993 年にかけて 0.6～0.9 の値を示しており、一般的な雪面アルベドの変動範囲にあることがわかった（図 12）。また、過去から現在にかけて、特定の変化傾向は見られなかった。グリーンランド氷床における復元アルベドは、1484 年から 1984 年にかけて 0.7～0.9 の範囲にあった。また、ウシュコフスキー氷河での結果と同様、過去から現在にかけて系統的な変化傾向は示さなかった。今後は、北極圏よりも人為起源エアロゾルの寄与が大きいことが予想される中緯度山岳氷河コアを用いて過去のアルベド復元を行う予定である。

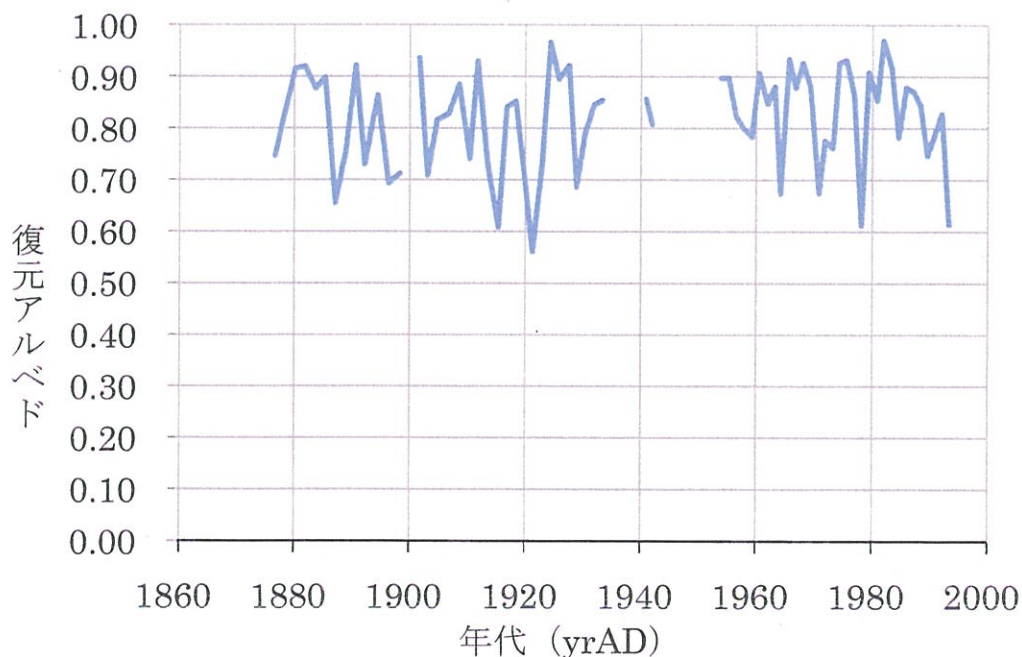


図 12 カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河における復元アルベド

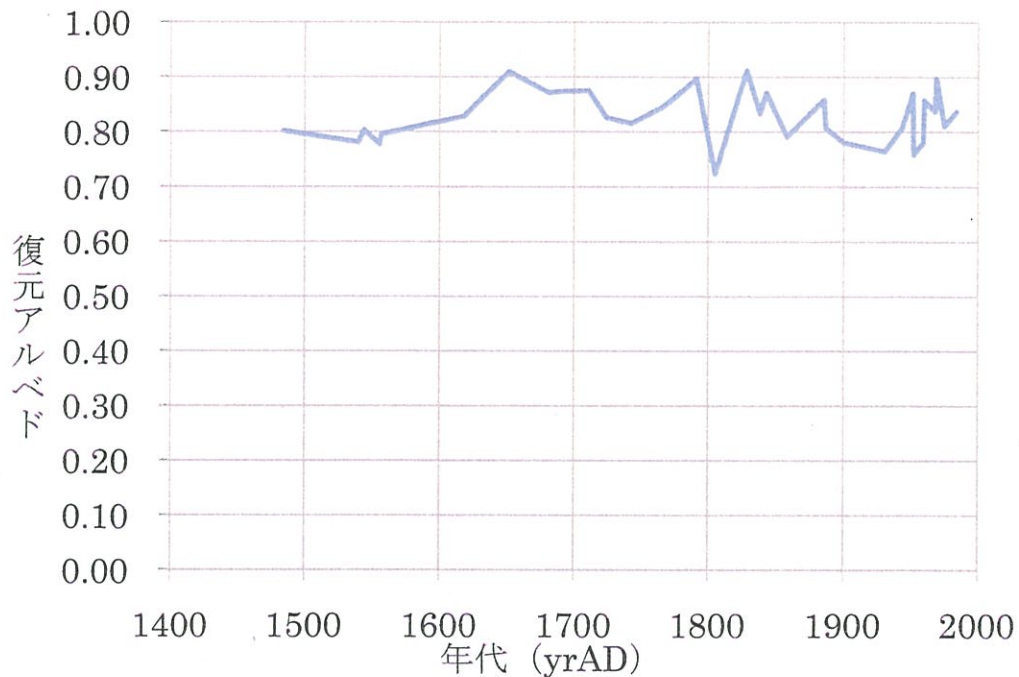


図 13 グリーンランド氷床における復元アルベド

4. まとめ

山形県山形市において雪面アルベドと積雪中粒子量の同時測定を行い、両者の相関性を調べた。雪中の濁度が高いほど雪面アルベドは低くなり、両者は寄与率 76%の強い相関関係で対数回帰することができた。また、雪中 Fe および Al 全濃度と雪面アルベドの関係も、それぞれ 75%、67%の高い寄与率で対数式によりモデル化することができた。Fe と Al の濃度比は約 0.75 と一定値を示し、この値は平均鉱物粒子組成比に近い。そのため、雪面アルベドは雪に含まれる鉱物粒子量と強い相関性があると考えられる。雪中 Na 全濃度と雪面アルベドとの間には有意の相関は見られず、これは、Na 全濃度に対して海塩性・可溶性 Na 濃度が大きく寄与したためであり、雪中にイオンとして含まれる金属はアルベドと無関係であることがわかった。

カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河とグリーンランド氷床から採取した雪氷コア中の濁度を測定し、雪中濁度と雪面アルベドの回帰モデルを用いて、過去の雪面アルベド変化を復元した。両地点とも、アルベドは 0.6~0.9 の範囲で変動し、この数百年間の変化に特定のトレンドは見られなかった。北極圏より、さらに汚染が進行してきたと予想されるアジア山岳氷河コアについて、今後同様の分析を行う予定である。

謝辞

本研究の立案と実施にあたって、公益信託エスぺック地球環境研究・技術基金（エスぺック環境研究奨励賞）から多大なご支援をいただきました。ここに記して深く謝意を著します。

参考文献

1. Kaser, G., D. Hardy, T. Molg, R. Bradley and T. Hyera (2004) : Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: Observation and fact, *International Journal of Climatology*, 24, 329-339.
2. 力石國男 (2009) : 雪面アルベドの季節変化・経年変化から見た最近の雪氷圏の衰退, 第32回極域気水圏シンポジウム講演要旨集, 24.
3. Shiraiwa, T., Y. Muravyev, K. Matsuoka, A. Salamantin, S. Horikawa, A. Ovsyannikov, T. Fujikawa and N. Tanaka (1999) : Geophysical and paleoclimatic implication of the Ushkovsky ice cap in Kamchatka, *Cryospheric Studies in Kamchatka II*, 8-19.
4. Suzuki, T. and M. Sensui (1991) : Application of the microwave acid digestion method to the decomposition of rock samples, *Analytica Chimica Acta*, 245, 43-48.
5. Taylor, S. R. (1964) : Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table, *Geochimica. et Cosmochimica. Acta*, 28, 1273-1285.