

# 学 位 論 文

雪氷中金属成分から探る雪氷圏アルベド変動

2017 年 3 月

山形大学大学院理工学研究科

小室悠紀

## Abstract

Change of the cryosphere, existing ice sheets and glaciers, impact heavily on earth's climate and environment. Decrease of snow and ice on earth surface cause surface albedo reduction, accelerate global warming due to increase of surface absorption of solar radiation. The impurity particles in snow and ice have attracted attention as one of the cause accelerating snow and ice melting, because it has potential to decrease snow surface albedo and increase snow surface absorption of solar radiation. However, previous studies have not reached the understanding of quantitative relationship between albedo and impurity particles in snow surface. The information for particles existed on the past surface of ice sheet and glacier can be obtained from ice core drilling. If the relationship of albedo and impurity particles in snow surface becomes apparent, albedo on past snow surface can be restored from particle mass variation held in ice cores.

This study aim to 1) clarify the quantitative relationship between albedo and impurity particles in snow surface from simultaneous observation on snow in Yamagata city, Japan, 2) reveal the variation of aerosol, focusing attention on mineral particles, on the northwest Greenland ice sheet during past several hundred years by analysis of the total concentration of metals in the SIGMA core drilled from northwest Greenland, and 3) reconstruct albedo variation on past snow surface by applying the relationship between albedo and particle mass in snow surface to particle mass variation in ice core. In this study, we reconstructed albedo variation on northwest and south Greenland ice sheet, Grigoriev ice cap, Kyrgyz Tien Shan, and Ushkovsky ice cap, Kamchatka.

From the observation on snow in Yamagata city, Japan, we found strong correlation between albedo and total concentration of Al in snow surface by 66% of contribution ratio. Because the ratio of total concentration of Al and Fe is almost constant and close to the mean crustal composition ratio of both elements, it can be said that most of Al was supplied by mineral particles. Because there is strong correlation between albedo and total concentration of Al in snow surface, it can be said that albedo reduction on snow surface correlate strongly with increase of mineral particles containing in snow.

Total concentration of Al in snow on the northwest Greenland ice sheet acquired

from SIGMA core ranged of 0.269-78.1ppb. From the result of comparing the relationship between concentrations of Ca and Mg of non-sea-salt origin and total concentration of Al, it was shown that mineral particles rich with Ca and Mg contributed to increase of particle mass in snow on northwest Greenland ice sheet. This Mineral particle was likely origin of distant arid region typified by Asia. Mineral particles poor with Ca and Mg also contributed to the particle mass increasing in snow on northwest Greenland ice sheet, however, those origins were unclear. From the result of comparing total concentrations of Al between SIGMA core data, in this study, and other ice cores data, in previous study, it was found that mineral particle mass in snow on northwest and south Greenland ice sheet is much smaller than Grigoriev and Ushkovsky ice cap.

By applying the relationship between albedo and mineral particle mass in snow surface, obtained by this study, to particle mass variation in ice core, we restored the albedo variation on past snow surface in drilling site of ice core. Reconstructed albedo on northwest and south Greenland ice sheet showed the range above approximately 0.7, which close to the range when impurity particles are not much contained in snow. Reconstructed albedo on Grigoriev ice cap, which is frequently lower than northwest and south Greenland ice sheet, ranged of approximately 0.4-0.8. It is considered that surface albedo decreasing on Grigoriev ice cap was caused strongly by a large amount of mineral particles supplied from arid region, because this ice cap is surrounded by vast arid region in central Asia. Reconstructed albedo on Ushkovsky ice cap, which is roughly intermediate between northwest and south Greenland ice sheet and Grigoriev ice cap, varied in the range of approximately 0.4-0.9. Active volcanoes exist near by Ushkovsky ice cap in Kamchatka, thus, it is likely that increase of particle mass and decrease of albedo in snow surface were caused by supply of volcanic product. In the case of Greenland ice sheet, supply of mineral particles to the ice sheet was likely relatively low because the ice sheet is located far away from vast arid region and seems to have no adjacent active volcanoes. Therefore, it is considered that particle mass in snow became small and surface albedo kept relatively high range on northwest and south Greenland ice sheet. In the future, if the variation of factors relating to snow surface albedo other than mineral particle can also be acquired from ice core analysis, there is a possibility to improve the accuracy of reconstructed albedo.

## 要旨

氷河や氷床が存在する雪氷圏の変化は、地球の気候や環境へ大きな影響を与える。地表面の雪氷が減少することは、地表面のアルベド低下を引き起こし、日射による地球の温暖化を加速させると考えられる。雪氷中に含まれる不純物粒子は雪面のアルベドを低下させ、吸収される日射量を増加させる可能性があることから、雪氷融解を加速させる原因の1つとして注目されている。しかし、これまでの研究では雪面アルベドと不純物粒子の定量的な関係を理解するには至っていない。過去の氷河氷床上に存在した粒子に関する情報は、氷コアを掘削することによって得ることが出来る。現在の雪氷上におけるアルベドと不純物粒子の関係が明らかになれば、氷コア中の粒子量変動から過去の雪面アルベド変動を復元できる可能性がある。

本研究では、1) 山形市内の積雪上におけるアルベドと不純物粒子の同時観測から、両者の量的関係を明らかにすること、2) グリーンランド氷床北西部で掘削された SIGMA コアの金属全濃度解析から、同地域における過去数百年間の鉱物粒子を主としたエアロゾル変動を明らかにすること、3) 雪面アルベド-雪中粒子量の相互関係を氷コア中の粒子量変動に適用し、過去の雪面アルベド変動を復元することを目的とした。本研究では、グリーンランド氷床北西部と南部、キルギス天山山脈 Grigoriev 氷冠、カムチャッカ半島 Ushkovsky 氷冠のアルベド変動を復元した。

山形市内の積雪上における観測から、寄与率 66%によって、雪面アルベドと雪中 Al 全濃度に強い相関関係が認められた。Al および Fe 全濃度の濃度比はほぼ一定であり、平均地殻 Fe/Al 比に値が近いことから、Al は主に鉱物粒子由来だと考えられる。雪面アルベドと雪中 Al 全濃度の強い相関関係にあることから、雪面アルベド低下が雪中鉱物粒子の増加と強く関係していると言えることが出来る。

SIGMA コアから得られたグリーンランド氷床北西部の雪中 Al 全濃度は、0.269-78.1ppb の範囲で変動した。非海塩起源 Ca および Mg 濃度と Al 全濃度の関係を比較した結果、グリーンランド氷床北西部における雪中粒子量の増加に、Ca や Mg に富む鉱物粒子の寄与が見られた。この鉱物粒子は、おそらくアジアをはじめとした遠方の乾燥地域が起源だと考えられる。グリーンランド氷床北西部における雪中粒子量の増加には、Ca や Mg に乏しい鉱物粒子も寄与していたが、その起源ははっきりしなかった。本研究で得られた SIGMA コアと先行研究で報告されている他の氷コアの Al 全濃度を比較した結果、グリーンランド氷床北西部および南部は、Grigoriev 氷冠や Ushkovsky 氷冠と比べて、雪中の鉱物粒子量が非常に小さいことがわかった。

氷コア中の粒子量変動に、本研究で得られた積雪上におけるアルベドと鉱物粒子量の



関係を適用することにより、掘削地域における過去の雪面アルベド変動を復元した。グリーンランド氷床北西部および南部の復元アルベドは、おおよそ 0.7 より高い範囲を示し、雪中に不純物粒子があまり含まれていない場合の範囲に近かった。Grigoriev 氷冠上の復元アルベドはおおよそ 0.4-0.8 の範囲で変動しており、グリーンランド氷床北西部と南部よりも低い範囲を示すことが多かった。Grigoriev 氷冠は周辺を中央アジアの広大な乾燥地域に囲まれていることから、乾燥地域から供給された大量の鉱物粒子により、雪面アルベドの低下が強く引き起こされたと考えられる。Ushkovsky 氷冠上の復元アルベドは、グリーンランド氷床北西部および南部と Grigoriev 氷冠の中間的な範囲を示し、変動範囲はおおよそ 0.4-0.9 となった。カムチャッカ半島に位置する Ushkovsky 氷冠は、近傍に活火山が存在するため、火山噴出物の供給によって雪中粒子量が増加し、雪面アルベドの低下が引き起こされたと考えられる。グリーンランド氷床は、大規模な乾燥地域から遠く離れており、ごく近傍に活火山も見当たらないため、供給される鉱物粒子が相対的に少なかったと考えられる。そのため、グリーンランド氷床北西部および南部の雪中粒子量は小さくなり、雪面アルベドは比較的高い値の範囲に維持されたと考えられる。将来、氷コア解析から雪面アルベドと関連する鉱物粒子以外の要素の変動も得ることができれば、より正確にアルベドを復元できる可能性がある。

## 目次

はじめに	1
1. 地球環境と雪氷圏の関わり	1
2. 不純物粒子と雪面アルベド	1
3. 研究目的	1
1 章 雪面アルベドと雪中金属成分の関係	3
1. 観測・分析手法	3
2. マイクロ波酸分解法に関して	4
3. 結果と考察	5
2 章 氷コア解析と雪面アルベド復元	7
1. 各氷コアおよび掘削地域の概要	7
1.1. SIGMA コア	7
1.2. Site-J コア	7
1.3. Grigoriev コア	8
1.4. Ushkovsky コア	8
2. SIGMA コアの分析手法	10
3. SIGMA コアの解析結果	11
3.1. 年代決定	11
3.2. t-Al 年代変動	12
3.3. t-Al と t-Fe の関係	13
3.4. nssCa および nssMg と t-Al の関係	14
4. 各氷コアの t-Al 比較	17
5. 雪面アルベド変動の復元	18
5.1. 使用するモデル式	18
5.2. 復元アルベドの誤差範囲	19
5.3. 各地域の復元アルベド比較	20
5.4. 今後の展望	23
まとめ	24
参考文献	26
謝辞	30

## はじめに

### 1. 地球環境と雪氷圏の関わり

氷河氷床をはじめとした雪氷が存在する地域（雪氷圏）の変化は、地球の気候や環境へ大きな影響を与える。例えば、雪氷圏に特徴的な白い地表面は、日射の反射率（アルベド）が高いことから、入射した日射の大部分（80-90%）を反射する。雪氷の減少は、雪氷に覆われていた土壌や海面を露出させるため、地表面のアルベド低下を引き起こす。そのため、雪氷圏の縮小は、地球表面の吸収日射量を増加させ、地球の気温上昇を加速させると考えられる。また、乾燥地域における氷河の縮小は、水資源の枯渇や砂漠化を助長させる可能性がある。雪氷圏変動の要因を明らかにすることは、地球の気候・環境変動を理解する上で必要不可欠である。

一般に、雪氷融解の原因は気温上昇に求められる場合が多い。例えば、近年における氷河氷床の急激な融解（Shepherd et al., 2012）は、産業革命以降の急激な地球温暖化によって説明されやすい。しかし、実際には産業革命よりも以前から縮小・後退する氷河が多数存在することが知られている（Kaser et al., 2004; Akasofu, 2010）。氷河後退と気温上昇の時期が合わないことは、気温の上昇だけが雪氷融解へ寄与するのでは無く、雪氷融解を引き起こす原因が他にも存在することを示している。

### 2. 不純物粒子と雪面アルベド

近年、雪氷融解を引き起こす原因の1つとして、雪氷中に含まれる光吸収性粒子（不純物粒子）の増加による雪氷表面のアルベド（雪面アルベド）の低下が指摘されている（Dumont et al., 2014; Warren and Wiscombe, 1980）。雪面アルベドの低下は、雪氷面の吸収日射量を増加させるため、日射による雪氷融解を加速させる。大気中に含まれる鉱物粒子等のエアロゾル粒子は、雪氷上に降下・沈着することによって、雪氷中の不純物粒子を増加させると考えられる。砂漠化や土壌面積の拡大といった陸域環境の変化は、大気中および雪氷中に供給される鉱物粒子を増加させ、雪面アルベドの低下を引き起こす可能性がある。環境変動に伴う雪中鉱物粒子の増加が、過去や将来の雪氷圏変動へ寄与する可能性が予想される。

### 3. 研究目的

雪氷上でアルベドと不純物粒子を実際に観測した研究例はこれまでにいくつか報告されている（Aoki et al., 2006; Takeuchi et al., 2005）。しかし、観測例自体が少ないこともあり、雪氷上におけるアルベドと不純物粒子の定量的な関係を理解するには至っていない。雪氷面に存在する不純物粒子が、その時代や地域の雪面アルベドへ与える影

響を知るためには、現在の雪氷上におけるアルベドと不純物粒子の関係を明らかにする必要がある。また、過去の雪氷面に存在した粒子に関する情報は、氷河や氷床上であれば氷コアを掘削・解析することで得ることが出来る。雪氷上におけるアルベドと不純物粒子の関係が明らかになれば、氷コア中の粒子量変動から過去の雪面アルベド変動を復元できる可能性も考えられる。そこで本研究では、1) 山形市内の積雪上におけるアルベドと不純物粒子の同時観測から、両者の量的関係を明らかにすること、2) グリーンランド氷床北西部で掘削された **SIGMA** コアの金属全濃度解析から、同地域における過去数百年間の鉱物粒子を主としたエアロゾル変動を明らかにすること、3) 得られた雪面アルベド-雪中粒子量の相互関係と、氷コア中の粒子量変動から、過去の雪面アルベド変動を復元することを目的とした。1 章では、積雪上におけるアルベドと不純物粒子の関係を明らかにするために実施した、山形市内の積雪上における雪面アルベド観測について報告する。雪面アルベドと雪中金属成分の関係を中心とした、比較解析を行った。2 章では、本研究で全濃度解析を行ったグリーンランド氷床北西部 **SIGMA** コアの解析と、**SIGMA** コアおよび先行研究で報告されている氷コアを用いたアルベド復元について報告する。**SIGMA** コアの金属全濃度解析の結果は、油井（2016MS）によって一部報告されているが、本研究ではさらにデータ数を増やして解析を行った。

## 1 章 雪面アルベドと雪中金属成分の関係

本章では、本研究で実施した雪面アルベド観測について報告する。現在の積雪上におけるアルベドと不純物粒子の関係を明らかにするため、山形市内の積雪上においてアルベドと表面雪採取の同時観測を実施した。マイクロ波酸分解法（Suzuki and Sensui, 1991）によって雪中粒状物を分解し、鉍物粒子の指標となる雪中金属成分全濃度（粒子態+溶存態）と雪面アルベドを量的比較した。また、雪中に含まれる不純物粒子は、雪試料の融解液の濁度に影響を与える可能性がある。そのため、融解させた試料の一部から濁度を測定し、雪面アルベドと比較を行った。なお、本章の内容については Komuro and Suzuki (2015) で公表済みである。

### 1. 観測・分析手法

2010-2011 年の冬季、山形県山形市に所在する山形大学構内の積雪上で観測を実施した。観測回数は計 67 回である。アルベド測定には、アルベドメーター（SRA01-J, Hukseflux）を使用した。測定した波長域は可視から近赤外の領域（305-2800nm）である。雪面へ入射する日射量と、反射した日射量を測定し、その比から雪面アルベドを求めた。日射量は 2 秒毎に測定し、その 3 分間の平均値をアルベド算出に使用した。アルベド測定は、13:00-14:00 の間に、ほぼ水平な雪面の上で行った。

各観測で採取した表面雪試料は、50ml 遠沈管に入れ、常温で融解させた。試料の一部から濁度を測定し、残りの試料を金属測定に使用した。濁度測定には、卓上型の濁度計（TN-100, Eutech）を用いた。本測定器の測定原理は、ISO7027 準拠のネフエロメトリック法に基づいている。雪中の金属成分全濃度を得るために、金属測定用試料に含まれる粒状物をマイクロ波酸分解法（Suzuki and Sensui, 1991）によって分解した。分解液につき、山形大学理学部地球環境学科所有の ICP-AES（Seiko, SPS7000A）を用いて Al、Fe の雪中全濃度を測定した。各元素濃度は、多元素標準溶液（SPEC CertiPrep, XSTC-13）を用いた検量線法により決定した。

## 2. マイクロ波酸分解法に関して

本研究では以下の手順で全分解処理を行った。

1. 試料溶液を、テフロン製の分解容器 (San-ai Kagaku, Type DV-7) へ移し、ホットプレート上で蒸発乾固させる。
2. 分解容器内の残渣に超高純度濃硝酸およびフッ化水素酸 (Kanto Chemica Co., the Ultrapure) を加える。添加量は、濃硝酸が 0.3ml、フッ化水素酸が 0.2ml である。
3. 分解容器をマイクロ波分解用の圧力容器 (San-ai Kagaku, Type P-25) へ封入する。
4. 4 個の圧力容器をチャック付きビニール袋で密封し、電子レンジの解凍モードで 5 分間加熱する。
5. レンジ停止後、さらに 10 分間加熱する。
6. 圧力容器を常温で 30 分間冷却する。
7. 圧力容器から分解容器を取り出す。
8. 分解容器の本体と蓋の内壁を超純水 (Millipore, Direct-Q) で濯ぎ、分解液と合わせる。
9. 分解容器をホットプレート上で加熱し、分解液を蒸発乾固させる。
10. 残渣を超高純度濃硝酸 0.1ml で溶解させた後、超純水で 10ml (0.1N 硝酸溶液) に調製する。

### 3. 結果と考察

図 1 に雪面アルベドと濁度の関係を示す。アルベドと濁度の関係は、濁度が高いときほどアルベドが低くなる傾向が見られた。回帰分析における寄与率（相関係数の二乗×100%）は要素間の相関性の強さを示す。アルベドと濁度の場合、対数回帰によって最も大きい寄与率が得られた。そのため、対数回帰を用いて両者の関係をモデル化した。アルベドと濁度は、寄与率 76%によって強い相関関係が認められた。

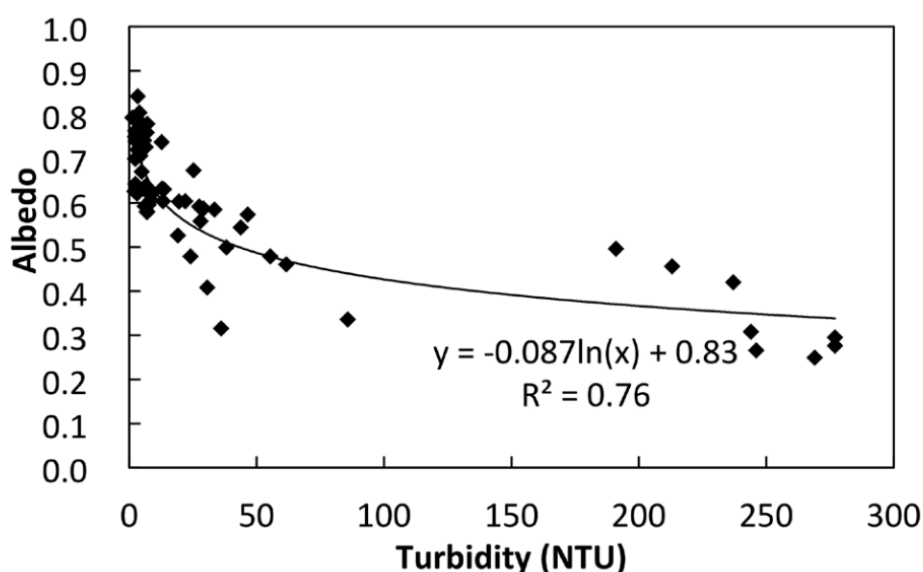


図 1. 雪面アルベドと濁度の関係 (Komuro and Suzuki, 2015)

図 2 に雪面アルベドと雪中 Al 全濃度 (t-Al) の関係を示す。濁度の場合と同様に、t-Al が大きいときほどアルベドが小さくなる傾向が見られた。アルベドと t-Al は、対数回帰によって寄与率は最大の 66%となり、強い相関関係が認められた。t-Al と雪中 Fe 全濃度 (t-Fe) の関係を図 3 に示す。直線回帰によって得られた寄与率は 99%であり、t-Al と t-Fe の濃度比は 0.75 でほぼ一定であることがわかった。この値は平均地殻 Fe/Al 比 (Taylor, 1964) である 0.68 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。t-Al とアルベドに強い相関関係にあることから、積雪上におけるアルベド低下に鉱物粒子の増加が強く関係していると言えることが出来る。

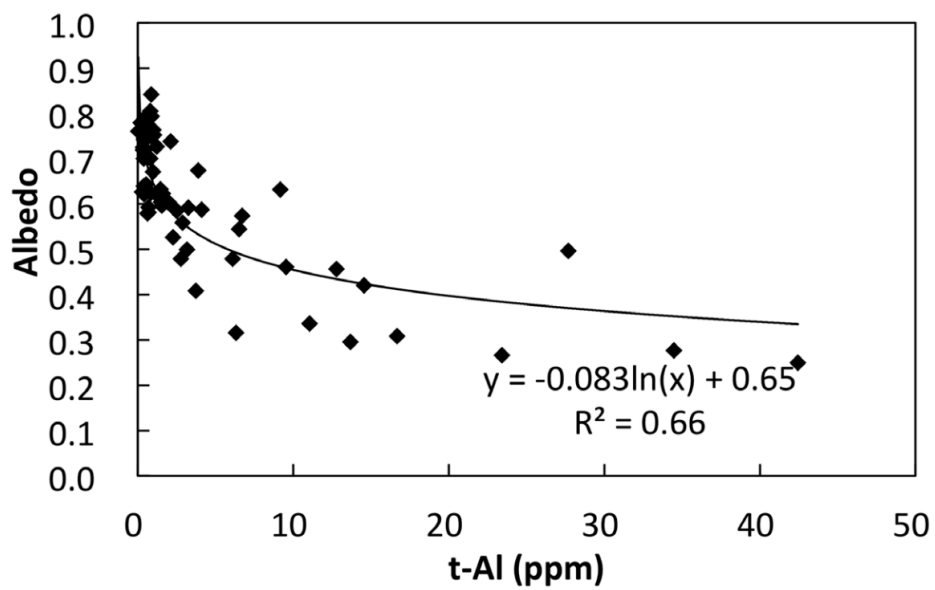


図 2. 雪面アルベドと雪中 Al 全濃度の関係 (Komuro and Suzuki, 2015)

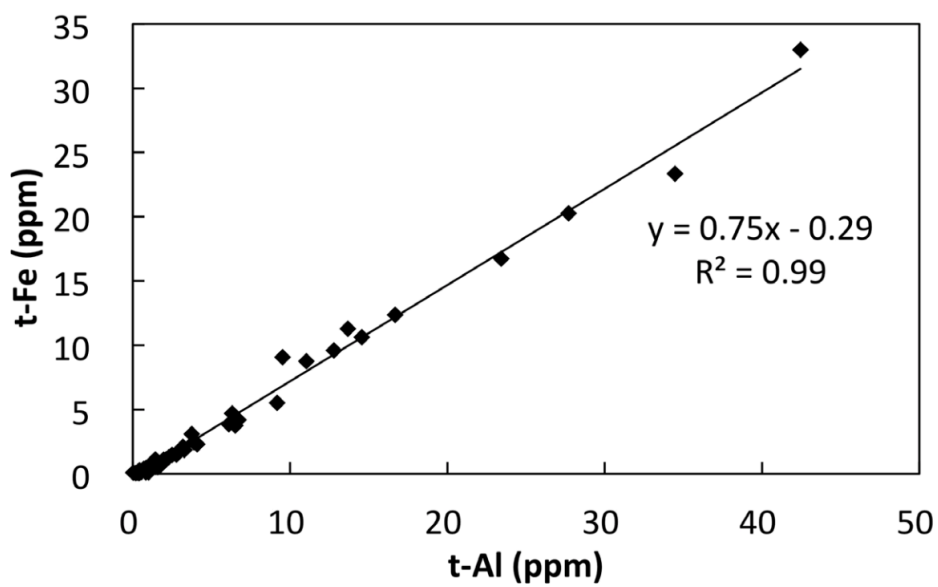


図 3. 雪中 Al および Fe 全濃度の関係 (Komuro and Suzuki, 2015)



## 2 章 氷コア解析と雪面アルベド復元

1 章で示された、積雪上におけるアルベドと  $t\text{-Al}$  の関係は、雪面アルベドと雪中の鉱物粒子量が強く関係していることを示している。大気中や雪氷中の鉱物粒子量は、その地域や時代によって変化する。その為、地域や年代の違いに伴う鉱物粒子量の変化によって、雪面アルベドが時間的・空間的に変化する可能性が考えられる。氷コアから得られる粒子量変動に、1 章で得られたアルベドと鉱物粒子量の関係を適用することにより、過去の雪面アルベド変動を復元できる可能性がある。

氷コア中金属成分の全濃度解析は、氷コアに含まれる鉱物粒子の定量解析を可能にする。本研究では、グリーンランド氷床北西部で掘削された SIGMA コアの全濃度解析を行った。本章の前半では、この SIGMA コアの解析について報告する。先行研究では、グリーンランド氷床南部の Site-J 地点、キルギス天山山脈の Grigoriev 氷冠、カムチャッカ半島の Ushkovsky 氷冠でそれぞれ掘削された氷コアの全濃度解析の結果が報告されている（松橋, 2013MS; 舟本, 2014MS; 鈴木, 2012MS）。本章の後半では、これらの氷コアを用いたアルベド復元について報告する。

### 1. 各氷コアおよび掘削地域の概要

#### 1.1. SIGMA コア

SIGMA コアは、2014 年 5 月にグリーンランド氷床北西部 SIGMA-D 地点（図 4）で掘削された、全長 222m の氷コアである（Matoba et al., 2015）。産業革命前後のエアロゾル変動の解明を目的として、「北極域における積雪汚染及び雪氷微生物が急激な温暖化に及ぼす影響評価に関する研究 (Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic: SIGMA)」プロジェクトの一環として掘削が実施された（Aoki et al., 2014a）。グリーンランド氷床は、偏西風による遠方のアジア地域を起源とする鉱物粒子の供給が予想されている地域である（Bory et al., 2002）。また、よりグリーンランドに近い地域からの供給も指摘されており（Wientjes et al., 2011）、広範囲な地域から飛来した鉱物粒子が、グリーンランド氷床北西部の雪面アルベドに寄与していた可能性が考えられる。

#### 1.2. Site-J コア

Site-J コアは、1989 年 5-6 月にグリーンランド氷床南部 Site-J 地点（図 4）で掘削された、全長 206m の氷コアである（庄司ほか, 1991）。Site-J コアの掘削は、北極域の環境変動および雪氷圏環境の地域特性を復元するために、ノルウェー本土とスバルバール諸島で開始された「北極圏雪氷コア研究計画」の一環として実施された。グリーン

ランド氷床南部は、同氷床北西部と同様に、北半球の広範囲な地域からの鉱物粒子供給が予想される。一方、グリーンランド氷床北西部との地域的な差が、南部の雪面アルベドに影響を与えた可能性も考えられる。

### 1.3. Grigoriev コア

Grigoriev コアは、2007 年 9 月に中央アジアのキルギス天山山脈 Grigoriev 氷冠上(図 4) で掘削された、全長 87m の氷コアである (Fujita et al., 2011)。中央アジアは、タクラマカン砂漠をはじめとした広大な乾燥地域が特徴的な地域であり、乾燥地域を起源とする鉱物粒子が Grigoriev 氷冠上の雪面アルベド低下へ寄与していた可能性が考えられる。

### 1.4. Ushkovsky コア

Ushkovsky コアは、1998 年 6 月にカムチャッカ半島 Ushkovsky 火山の山頂カルデラを覆う Ushkovsky 氷冠上(図 4) で掘削された、全長 212m の氷コアである (Shiraiwa et al., 2001)。このコアは、環オホーツク地域の古気候を復元するために、アムール・オホーツクプロジェクト (白岩, 2010) の一環として掘削された。カムチャッカ半島は、Ushkovsky 火山をはじめとした活火山が多数存在する地域であり、火山噴火によって放出された火山噴出物が、Ushkovsky 氷冠上の雪面アルベドへ影響を与えた可能性が考えられる。

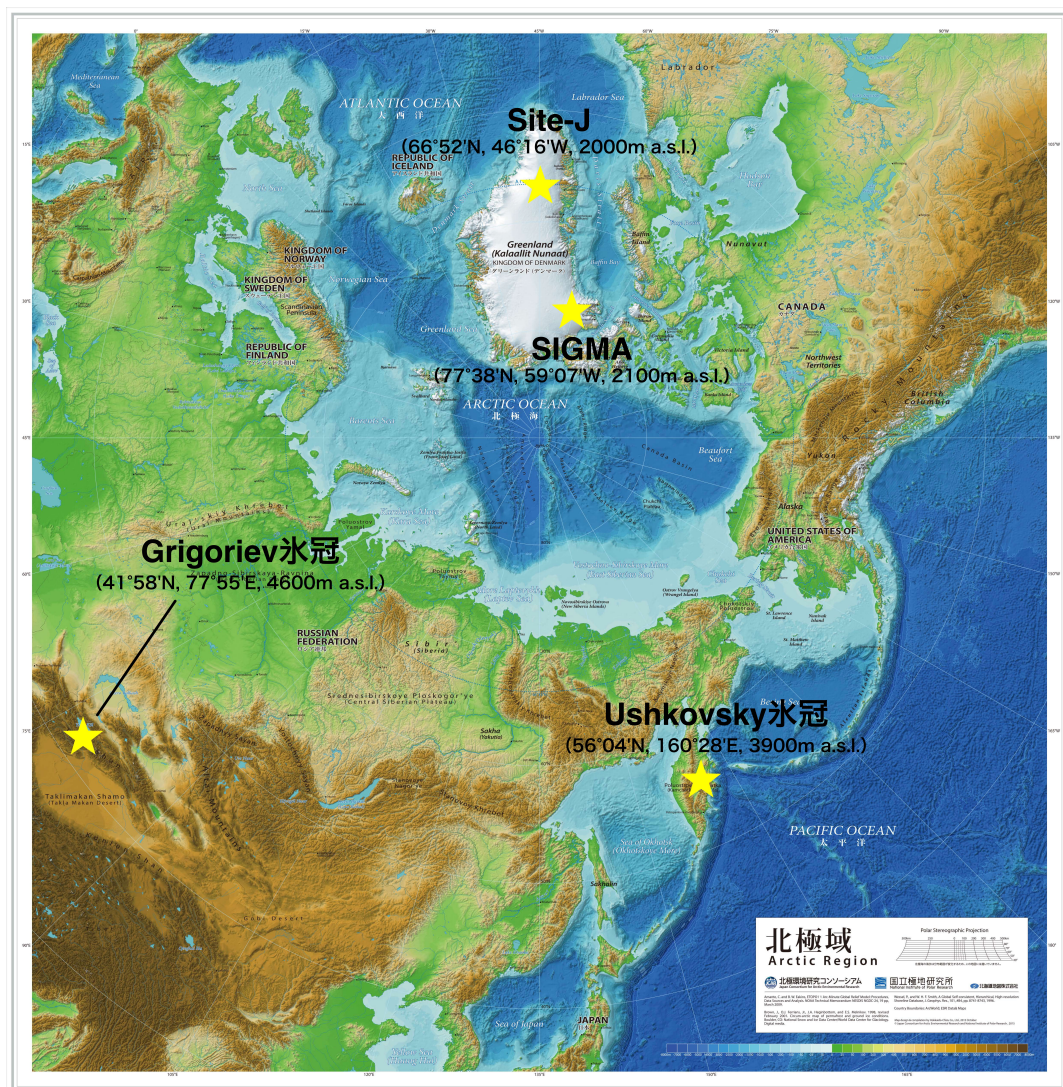


図 4. 各氷コアの掘削地点 (<http://www.nipr.ac.jp>)

## 2. SIGMA コアの分析手法

本研究では、SIGMA コアの深度 113-175m の範囲から約 50-100cm 毎に切り出された、厚さ 5cm の試料を使用した。試料の切り出しは、SIGMA コア掘削期間中に、掘削キャンプ周辺のトレンチ内で行った。試料数は計 84 個である。切り出した試料は、掘削キャンプから国立極地研究所まで冷凍輸送し、同研究所低温室クリーンルームにて試料表面 5mm を除去した。表面除去後の試料は、山形大学まで輸送した後に自然融解させ、マイクロ波酸分解法 (Suzuki and Sensui, 1991) により試料中粒状物を全分解した。分解後の試料溶液から、ICP 発光分析法および質量分析法により金属成分全濃度を測定した。本研究では、全ての試料から測定を行った Al、Fe、Ca、Na、Mg の計 5 元素の結果を使用した。一部試料につき Ba、Sr、Mn、Pb、Cd、Cu、Zn も測定したが、測定した試料数が少ないため、本研究では使用しなかった。各元素の濃度測定には、山形大学理学部地球環境学科所有の ICP-AES (Seiko, SPS7000A) と、国立極地研究所所有の ICP-MS (Hewlett-Packard, HP4500) を使用した。各元素濃度は、多元素標準溶液 (SPEC CertiPrep, XSTC-13) を用いた検量線法により決定した。

### 3. SIGMA コアの解析結果

#### 3.1. 年代決定

本研究では、Dansgaard and Johnsen (1969) による雪の圧密モデル (D-J モデル) を用いて SIGMA コアの年代を推定した。氷床厚を 2000m ice.eq.、平均年層厚を 0.273m ice.eq.と設定して、各試料の年代を推定した。その結果、SIGMA コアは全層で約 800 年前までをカバーしており、今回分析した試料の深度(113-175m)の年代は、約 340-600 年前（西暦 1660-1410 年頃）であることが予想された（図 5）。この年代は、おおよそ小氷期（西暦 1800-1300 年頃）の中頃に相当する。

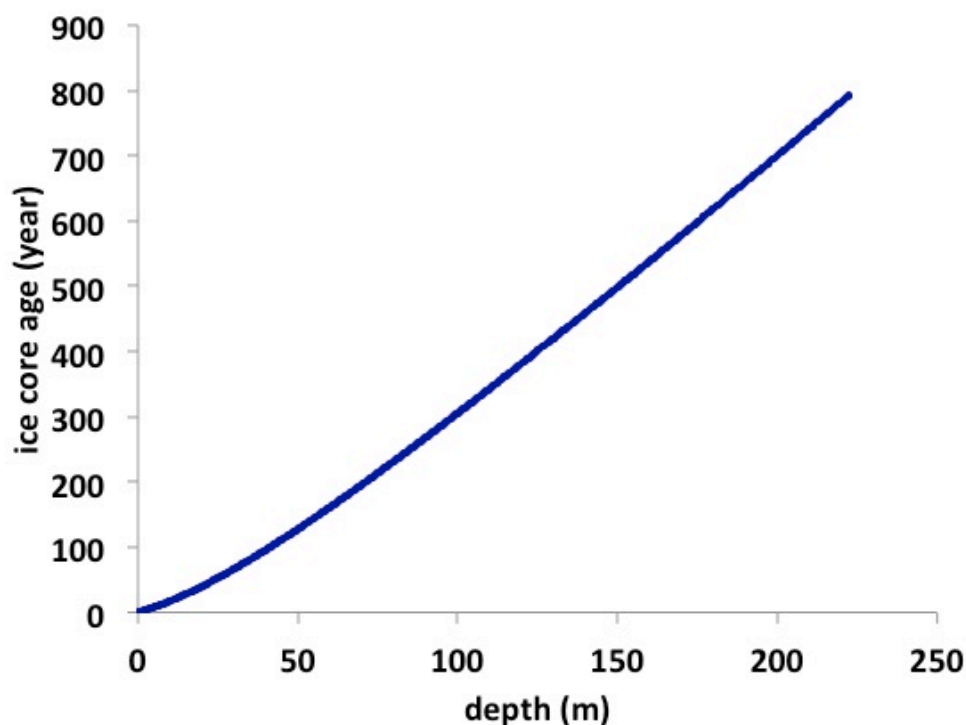


図 5. SIGMA コアの深度と年代の関係

### 3.2. t-Al 年代変動

氷コアから過去の雪面アルベドを復元するためには、鉱物粒子量の指標となる t-Al の年代変動を得る必要がある。図 6 に、SIGMA コアから得られたグリーンランド氷床北西部における雪中 t-Al の年代変動を示す。グリーンランド氷床北西部の t-Al は 0.269-78.1ppb の範囲で変動し、平均値は 11.1ppb となった。グリーンランド氷床北西部における t-Al は、1500-1530 年頃は平均的に高い濃度を示しているが、それ以外の期間では平均値よりも低いデータが多く、突発的に高い濃度が現れる傾向を示した。

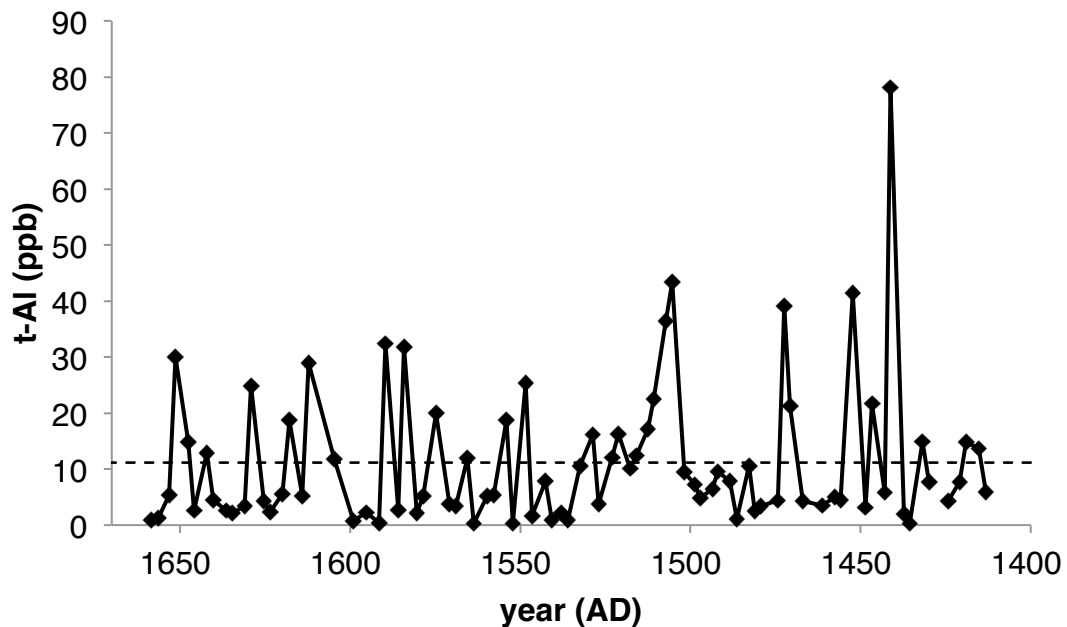


図 6. SIGMA コアの t-Al 年代変動（破線は全期間の平均値）

### 3.3. t-Al と t-Fe の関係

SIGMA コアの年代は過去数百年程度であるため、鉱物粒子由来の Al だけではなく、人間活動によって放出された Al が t-Al に寄与している可能性も考えられる。本研究で得られた t-Al が鉱物粒子由来であることを確かめるために、t-Al と t-Fe の関係を比較した。図 7 に SIGMA コア中の t-Al と t-Fe の関係を示す。t-Al と t-Fe は寄与率 94% によって非常に強い直線的な相関関係が認められた。t-Al と t-Fe の濃度比 (Fe/Al 比) は 0.59 でおおよそ一定であり、平均地殻 Fe/Al 比 (Taylor, 1964) の 0.68 に比較的近い値を示した。そのため、Al と Fe の大部分は地殻表層を起源とする鉱物粒子によって供給されたと考えられる。

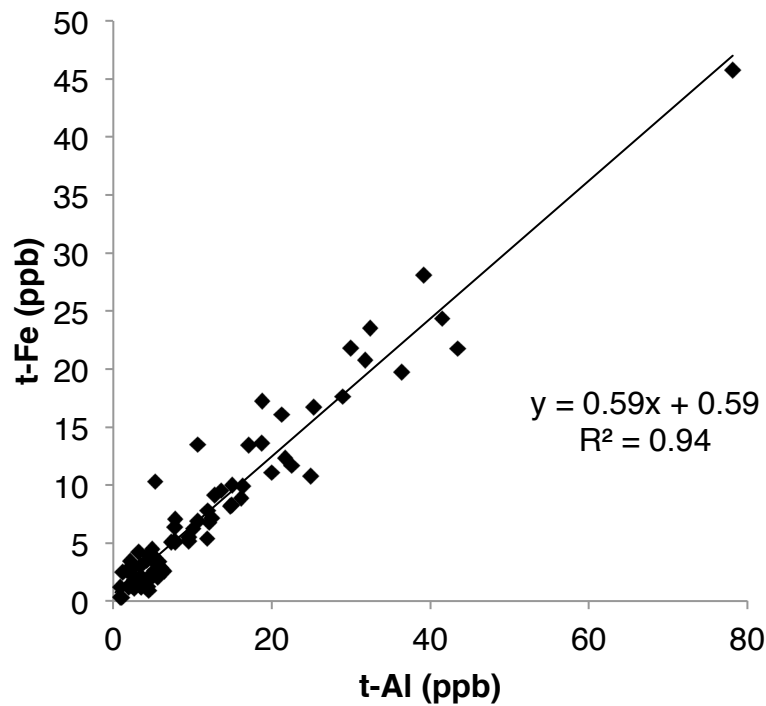


図 7. SIGMA コアの t-Al と t-Fe の関係

### 3.4. nssCa および nssMg と t-Al の関係

雪中に含まれる鉱物粒子量が変化するとき、その原因がどういった環境要因の変化にあるかを探るためには、鉱物粒子の供給源に関する情報が必要になる。鉱物粒子の金属組成に関する解析から、その供給源に関する情報を得られる可能性がある。グリーンランド氷床北西部へ供給された鉱物粒子の金属組成を調べるために、Ca と Mg の非海塩起源濃度（nssCa, nssMg）と t-Al の関係を比較した。SIGMA コアでは突発的に高濃度が現れる傾向が見られることから、t-Al が高い時と低い時にデータを分け、両濃度域における傾向を比較した。

nssCa と nssMg は、Al が全て地殻起源の鉱物粒子から供給されたと仮定し、以下の式から算出した。

$$[ssNa] = [t-Na] - (Na/Al)_{crust} \times [t-Al]$$

$$[nssCa] = [t-Ca] - (Ca/Na)_{sea} \times [ssNa]$$

$$[nssMg] = [t-Mg] - (Mg/Na)_{sea} \times [ssNa]$$

[t-Al] : Al 全濃度

[t-Na],[ssNa] : Na 全濃度と海塩起源 Na 濃度

[t-Ca],[nssCa] : Ca 全濃度と非海塩起源 Ca 濃度

[t-Mg],[nssMg] : Mg 全濃度と非海塩起源 Mg 濃度

(Na/Al)<sub>crust</sub> : 平均地殻 Na/Al 比 (Taylor, 1964)

(Ca/Na)<sub>sea</sub> : 平均海水 Ca/Na 比 (角皆ほか, 1983)

(Mg/Na)<sub>sea</sub> : 平均海水 Mg/Na 比 (角皆ほか, 1983)

nssCa および nssMg と t-Al の関係を図 8-9 にそれぞれ示す。濃度域による傾向の違いを比較するため、t-Al が平均値未満の領域（低濃度域）と平均値以上の領域（高濃度域）に分けて、それぞれの領域で回帰分析を行った。

nssCa と t-Al の関係は、いずれの濃度域においても、寄与率 ( $R^2 \times 100\%$ ) 40%と 23%によって直線的な正の相関を認めることが出来た (図 8)。低濃度域における回帰直線の傾きは 1.5 であり、平均地殻 Ca/Al 比 (Taylor, 1964) である 0.50 よりも 3 倍大きい値を示した。これは、低濃度域では Ca/Al 比の大きい鉱物粒子の供給が nssCa と t-Al の増加に強く寄与していることを示している。一方、高濃度域の傾きは 0.36 で、平均地殻 Ca/Al 比の 0.72 倍の値となった。高濃度域では、Ca/Al 比が小さい鉱物粒子の供



給によって、nssCa と t-Al が増加していることを示している。

nssMg と t-Al の関係は、寄与率が低濃度域では 48%、高濃度域では 69%となり、いずれの領域でも直線的な正の相関を認めることが出来た（図 9）。低濃度域における回帰直線の傾きは 0.46 であり、平均地殻 Mg/Al 比（Taylor, 1964）である 0.28 と比較すると、約 1.6 倍の値を示した。高濃度域における傾きは 0.21 となり、平均地殻 Mg/Al 比の 0.75 倍の値を示した。これは、低濃度域では Mg/Al 比の大きい鉱物粒子が、高濃度域では Mg/Al 比の小さい鉱物粒子が、nssMg と t-Al の増加にそれぞれ強く寄与していることを示している。

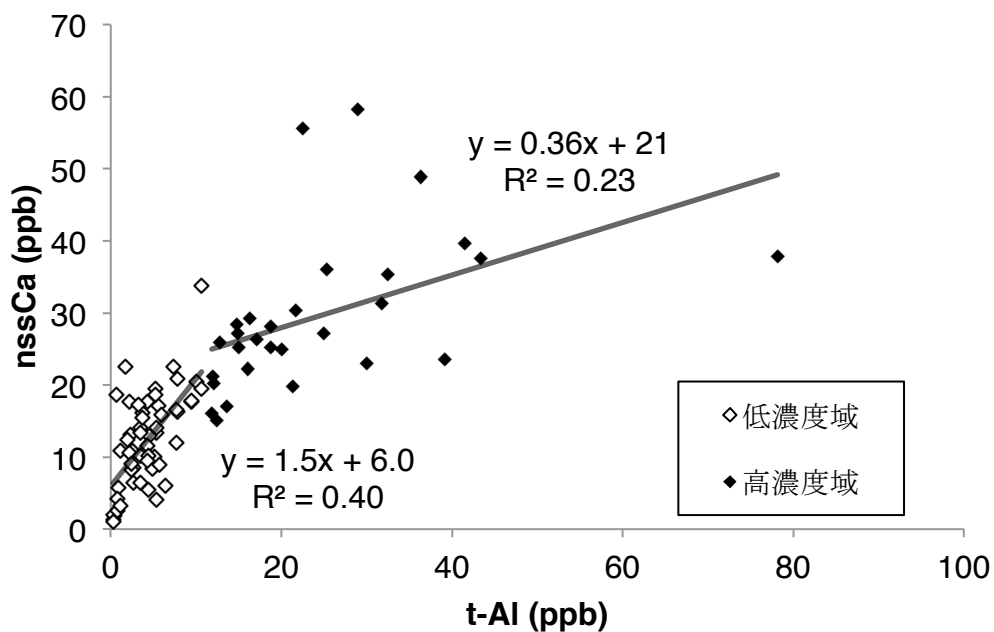


図 8. nssCa と t-Al の関係

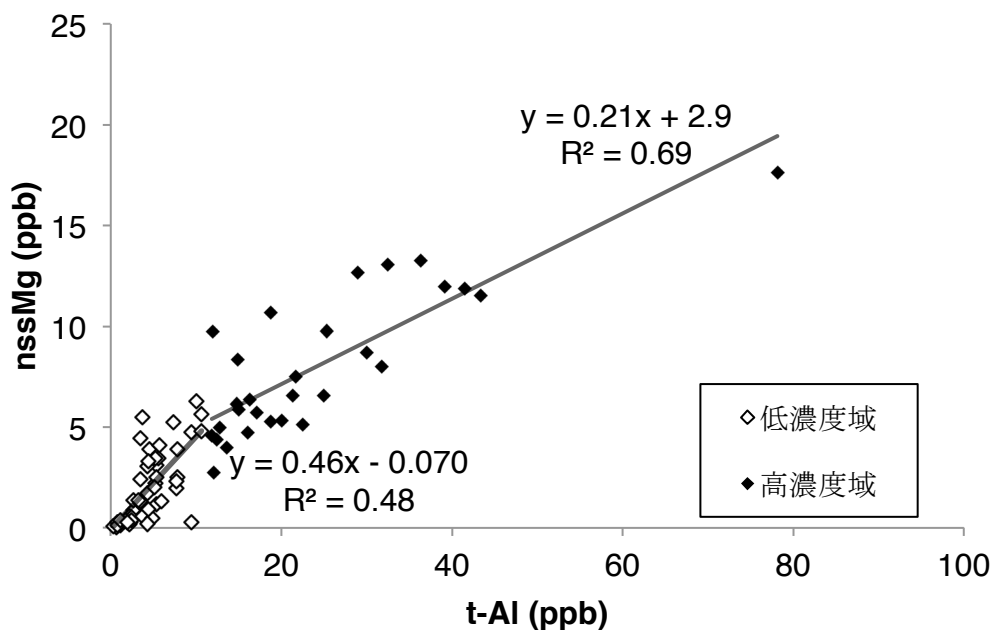


図 9. nssMg と t-Al の関係

nssCa、nssMg および t-Fe と t-Al の関係から、低濃度域と高濃度域では、供給された鉱物粒子の金属組成が異なることがわかった (図 8-9)。特に Ca/Al 比に大きな差があり、Mg/Al 比にも差が見られた。低濃度域における雪中粒子量の増加に強く寄与しているのは、特に Ca や Mg に富む鉱物粒子であった。一般に、乾燥地域を起源とする鉱物粒子は Ca や Mg に富むことが知られている。これは、乾燥地域では降水量より蒸発量が多いことから、石灰集積作用により Ca や Mg の炭酸塩が土壤中へ集積するためである (船引, 1972)。グリーンランド氷床へ供給される鉱物粒子として、偏西風によって輸送される、アジアの乾燥地域を起源とする鉱物粒子の存在がよく知られている (Bory et al., 2003)。北アフリカのサハラ砂漠も供給源の候補として挙げられているが、アジアと比較すると、その寄与はかなり小さいと考えられている (Lupker et al., 2010)。そのため、グリーンランド氷床北西部における低濃度域の粒子量変動は、主にアジアの乾燥地域から輸送された鉱物粒子の影響が強く反映されていたと考えられる。

高濃度域における雪中粒子量の増加に強く寄与していたのは、Ca と Mg に乏しい鉱物粒子であった (図 8-9)。グリーンランド氷床北西部において雪中粒子量が突発的に大きくなるときは、Ca や Mg に乏しい鉱物粒子の供給が強く寄与していたと考えられる。Ca や Mg に乏しいことは、乾燥地域の土壌と特徴が異なるため、アジアをはじめとした遠方の乾燥地域が起源ではないのかもしれない。しかし、本研究の結果から、その起源を明らかにすることはできなかった。

#### 4. 各氷コアの t-Al 比較

本研究で得られた SIGMA コアの t-Al 分布を、先行研究で報告されている他の氷コアのそれと比較したものを表 1 に示す。SIGMA コアの t-Al は、Site-J コアの値と比較的であった。これは、グリーンランド氷床北西部と南部が地理的に離れている一方で、雪中粒子量には大きな差が無いことを示している。SIGMA コアと Site-J コアの t-Al は、Ushkovsky コアや Grigoriev コアと比べて 2-3 桁小さい値を示した。これは、グリーンランド氷床北西部と南部の雪中粒子量が、Ushkovsky 氷冠や Grigoriev 氷冠と比べて非常に小さいことを示している。

表 1. 各氷コアの t-Al 分布（濃度の単位は ppb）

	t-Al（平均値）
SIGMA コア	0.269-78.1（11.1）
Site-J コア	1.38-50.5（22.0）
Ushkovsky コア	68.9-8340（1190）
Grigoriev コア	85.4-33000（4110）

## 5. 雪面アルベド変動の復元

### 5.1. 使用するモデル式

本研究では、積雪上におけるアルベドと鉱物粒子量の関係を氷コア中粒子量の年代変動へ適用することによって、掘削地域における雪面アルベドの年代変動を復元した。アルベド復元には、本研究の観測結果から得られた雪面アルベドと雪中 t-Al の関係(図 2)を使用した。そのモデル式を以下に示す。

$$\alpha = -0.083 \ln[t\text{-Al}] - 0.65$$

$\alpha$  : 復元アルベド

[t-Al] : 雪中 Al 全濃度 (ppm)

SIGMA コアの t-Al は、油井 (2016MS) および本研究で得られた測定値を使用した。Site-J コアと Grigoriev コア、Ushkovsky コアの t-Al は、松橋 (2013MS) と舟本 (2014MS)、鈴木 (2012MS) によって報告されている測定値をそれぞれ使用した。

## 5.2. 復元アルベドの誤差範囲

雪面アルベドは、雪中に含まれる鉱物粒子の影響を強く受けるが、一方で、雪面の物理的な構造や、気象状況（雲の有無）をはじめとした雪面状態以外の要因によっても変わる可能性がある（鈴木, 2013MS; 青木, 2010）。そのため、雪面アルベドは雪中の鉱物粒子量のみによって決まる一義的な値ではなく、上記の要素に起因したある程度の不確定性（誤差）をもつと考えられる。鉱物粒子以外の要因がアルベドへ及ぼす影響は、雪中の鉱物粒子量が小さい時ほど相対的に大きくなると考えられるため、本研究では復元アルベドがその絶対値から $\pm 25\%$ の誤差をもつと設定した。この設定の妥当性を検証するため、現在の積雪上における雪面アルベドの実測値と、同手法によって得られたモデル値の比較をおこなった。図 10 に、小室（2014MS）によって山形市内の積雪上で観測された雪面アルベドの実測値と、t-Al から算出した復元アルベドを比較した結果を示す。山形市内で実測された雪面アルベドは、t-Al から復元されたモデル値の範囲に全てプロットされた。これは、本研究で設定した誤差範囲がおおよそ妥当なものであることを示している。

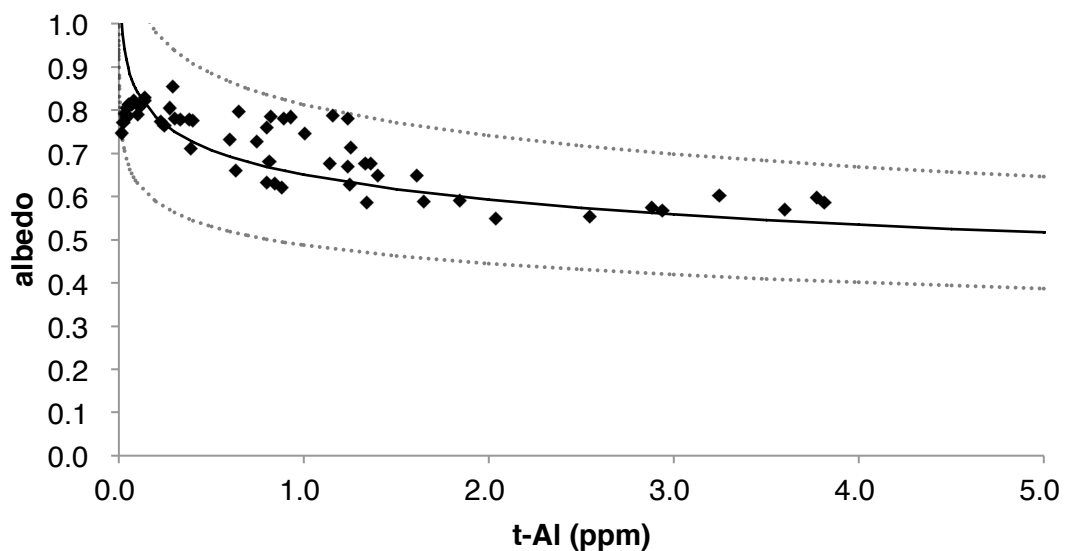


図 10. 小室（2014MS）による雪面アルベドと t-Al の関係（黒点）。t-Al から復元したアルベドの絶対値を実線、上限と下限を点線でそれぞれ示した。

### 5.3.各地域の復元アルベド比較

図 11 に、本研究で得られた SIGMA コアと、先行研究で報告されている Site-J コアおよび Ushkovsky コア、Grigoriev コアの t-Al 年代変動から復元した各地域のアルベド変動を示す。グリーンランド氷床北西部の復元アルベドは、多くのデータで絶対値が 1 を超える結果を示し、同氷床南部でも同様の結果が見られた。これは、アルベド復元に使用した式が対数関数であり、グリーンランド氷床の北西部と南部は雪中粒子量が非常に小さいためである。一般的に、雪面アルベドの上限は 0.95 程度であるため（小倉, 1999）、実際のアルベドとして取り得る範囲は 0.95 以下の領域であると考えられる。グリーンランド氷床北西部および南部の復元アルベドは、おおよそ 0.7 以上の範囲を示している。雪面アルベドが 0.7-0.9 の範囲は、雪中に不純物粒子があまり含まれていない場合の範囲（青木, 2010）と近いこと、雪中粒子量が非常に小さい雪面におけるアルベドとしては、おおよそ妥当な範囲を示していると考えられる。Grigoriev 氷冠の復元アルベドは、おおよそ 0.4-0.8 の範囲で変動した。Grigoriev 氷冠では 2005-2007 年に現地でアルベド観測が行われており、雪面アルベドがおおよそ 0.5-0.9 の範囲で変動したことが報告されている（Fujita et al., 2011）。年代的な差はあるものの、本研究で復元された Grigoriev 氷冠のアルベド変動は、同氷帽上の観測値に比較的近い範囲を示している。Ushkovsky 氷冠の復元アルベドは 0.4-0.9 程度の範囲で変動した。いずれの地域においても、復元されたアルベドに長期的な変動傾向は見られなかった。

Grigoriev 氷冠の復元アルベドは、グリーンランド氷床北西部および南部よりも低く、Ushkovsky 氷冠と比べても低い範囲を示すことが多い（図 11）。これは、Grigoriev 氷冠の雪中粒子量が非常に大きく、鉱物粒子によるアルベドの低下が強く引き起こされていたことを示している。先行研究から、中央アジアの雪氷圏は近傍の乾燥地域を起源とする鉱物粒子の供給を強く受けることが知られている（Zhao et al., 2011; Kreutz and Sholkovitz, 2000）。また、舟本（2014MS）では、Grigoriev コアの金属組成解析から、Grigoriev 氷冠に供給される鉱物粒子の起源が周辺の乾燥地域であることを予想している。中央アジアに位置する Grigoriev 氷冠は、鉱物粒子の顕著な供給源である乾燥地域が近傍に広く存在するため、供給される鉱物粒子が多く、雪中粒子量の増加に伴う雪面アルベドの低下が強く引き起こされたと考えられる。

Ushkovsky 氷冠の復元アルベドは、グリーンランド氷床北西部および南部と Grigoriev 氷冠の中間的な範囲を示す場合が多かった（図 11）。Ushkovsky 氷冠は、Grigoriev 氷冠に次いで雪中粒子量が大きく、雪中の鉱物粒子が雪面アルベドの低下を引き起こしていたと考えられる。カムチャッカ半島は多数の活火山が存在する地域であり、先行研究においても、Ushkovsky コアが火山噴出物の影響を強く受けていること

が報告されている (Matoba et al., 2014) 。 Shiraiwa et al. (2001) では、全長 211m の Ushkovsky コア中に計 328 層の火山灰層が見られたことを報告している。そのため、近傍の活火山から供給された火山噴出物が、Ushkovsky 氷冠上の雪中粒子量を増加させ、アルベド低下を引き起こしたと考えられる。

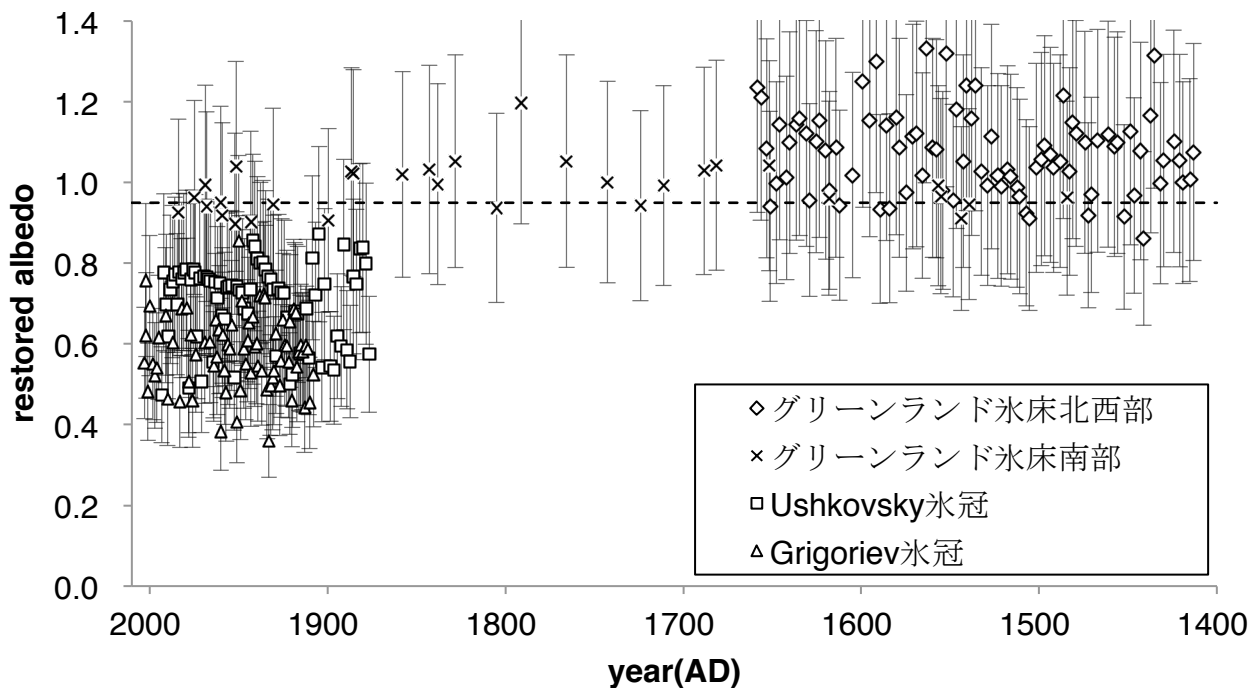


図 11. 氷コアから復元した各地域の雪面アルベド変動。実線は各地域の復元アルベドの誤差範囲を、黒の破線はアルベドが 0.95 のラインをそれぞれ示す。

グリーンランド氷床北西部における復元アルベドの変動範囲は、同氷床南部と同程度であり、Grigoriev 氷冠や Ushkovsky 氷冠のそれよりも高い範囲を示している (図 11)。SIGMA コアの金属組成解析の結果 (図 8-9) は、アジアの乾燥地域を起源とする鉱物粒子が、Grigoriev 氷冠と同様、グリーンランド氷床北西部における雪中粒子量の増加へ寄与していた可能性を示している。しかし、グリーンランド氷床北西部は、Grigoriev 氷冠よりも雪中粒子量が小さく、その変動がアルベド低下へあまり影響を与えていないように見える。グリーンランド氷床北西部および南部の雪中粒子量が、Grigoriev 氷冠や Ushkovsky 氷冠よりも小さい理由として、鉱物粒子の顕著な供給源となる地域からの地理的な距離が考えられる。グリーンランド氷床は、アジアや北アフリカなどに存在する広大な乾燥地域から遠く離れており、Ushkovsky 氷冠ほど近傍に活火山も見当た

らない。そのため、供給される鉱物粒子が相対的に少なく、グリーンランド氷床北西部および南部の雪中粒子量があまり大きくならなかったと考えられる。

図 8-9 で示した SIGMA コアの金属組成解析の結果は、グリーンランド氷床に供給される鉱物粒子が、アジアをはじめとした遠方の乾燥地域だけではない可能性を示唆している。本研究で得られたグリーンランド氷床北西部および南部の雪中粒子量は、その供給源がどこであるにしても、雪面アルベドへ大きな影響を与えていないように見える。しかし、陸域の雪氷圏は、地表面に存在する雪氷が融解・消失することによって、雪氷に被覆されていた土壌面が露出する特徴をもっている。グリーンランド周辺で陸域の雪氷融解が進めば、雪氷によって隠されていた土壌面が露出し、グリーンランド近傍域に鉱物粒子の供給源が新しく出現する可能性がある。そのため、過去や将来において、グリーンランド周辺の雪氷融解が顕著に進むことがあれば、グリーンランド氷床へ供給される鉱物粒子がより多くなる可能性は考えられる。



#### 5.4. 今後の展望

本研究で使用した SIGMA コア試料の年代は西暦 1660-1410 年頃であるため、およそ 1900 年以降の年代をカバーする Grigoriev コアや Ushkovsky コアとは年代が重ならなかった。1900 年以降をカバーする SIGMA コアのデータが得られれば、Grigoriev および Ushkovsky コアと同じ年代範囲で復元アルベド等を比較することが出来る。また、SIGMA コアの全層データを得ることが出来れば、中世温暖期（900-1300 年頃）の終わりから小氷期（1300-1800 年頃）、そして現在までの期間におけるグリーンランド氷床北西部のアルベド変動や、グリーンランド周辺の気候記録を復元できる可能性がある。

雪面アルベドは、雪中粒子量の変化に強く依存するが、雪中粒子量が小さい場合は鉱物粒子以外の要因による影響が相対的に大きくなると考えられる。積雪の物理的な構造の違いは、雪中粒子量から復元された雪面アルベドの誤差を大きくする要因の 1 つとして考えられる。過去の積雪構造や雪質に関する情報の一部は、氷コア中に物理構造として保存されているかもしれない。氷コアの物理解析結果と合わせることが出来れば、復元アルベドがもつ誤差の一部を解消できる可能性が考えられる。また、雪面アルベドを低下させる不純物粒子は、鉱物粒子の他に、人為起源の炭素粒子なども考えられる。人間活動の影響が強くなる地域または年代の場合は、氷コア中の炭素粒子量も考慮する必要があるかもしれない。将来的には、雪面アルベドと関連する可能性がある他要素の解析結果も合わせ、より正確なアルベド復元を目指す必要がある。

## まとめ

- ✓ 山形市内の積雪上における観測から、寄与率 66%によって、雪面アルベドと雪中 t-Al に強い相関関係が認められた。t-Al と t-Fe の関係から、Al は主に鉱物粒子由来だと考えられる。そのため、積雪上におけるアルベド低下に鉱物粒子の増加が強く関係していると言えることが出来る。
- ✓ SIGMA コアから得られたグリーンランド氷床北西部の t-Al は、0.269-78.1ppb の範囲で変動し、平均値は 11.1ppb となった。Fe/Al 比は 0.59 でおおよそ一定であり、平均地殻 Fe/Al 比に比較的近いことから、Al と Fe の大部分は鉱物粒子によって供給されたと考えられる。
- ✓ グリーンランド氷床北西部の t-Al は、1500-1530 年頃は平均的に高い濃度を示したが、それ以外の期間では平均値よりも低いデータが多く、突発的に高い濃度が現れる傾向を示した。
- ✓ SIGMA コア中の nssCa および nssMg と t-Al の関係から、グリーンランド氷床北西部における雪中粒子量の増加に、Ca や Mg に富む鉱物粒子の寄与が見られた。この鉱物粒子は、おそらくアジアをはじめとした遠方の乾燥地域が起源だと考えられる。
- ✓ グリーンランド氷床北西部における雪中粒子量の増加には、Ca や Mg に乏しい鉱物粒子の寄与も見られたが、その起源ははっきりしなかった。
- ✓ グリーンランド氷床北西部の雪中粒子量は、グリーンランド氷床南部と近く、Ushkovsky 氷冠や Grigoriev 氷冠と比べると 2-3 桁小さい値を示した。グリーンランド氷床北西部および南部は、他の地域と比べて雪中粒子量が非常に小さいことがわかった。
- ✓ グリーンランド氷床北西部および南部の復元アルベドは、おおよそ 0.7 よりも高い範囲を示し、雪中に不純物粒子があまり含まれていない場合の範囲に近かった。
- ✓ Grigoriev 氷冠上の復元アルベドは、おおよそ 0.4-0.8 の範囲で変動しており、グリーンランド氷床北西部と南部のそれよりも低い範囲を示すことが多かった。周

辺の乾燥地域を起源とする鉱物粒子により、雪中粒子量の増加と雪面アルベドの低下が強く引き起こされたと考えられる。

- ✓ Ushkovsky 氷冠上の復元アルベドは、グリーンランド氷床北西部および南部と Grigoriev 氷冠の中間的な範囲を示すことが多く、変動範囲はおおよそ 0.4-0.9 を示した。近傍に存在する活火山を起源とした火山噴出物の供給により、雪中粒子量の増加に伴う雪面アルベドの低下が引き起こされたと考えられる。
- ✓ 乾燥地域や活火山といった顕著な供給源から遠くはなれているために、グリーンランド氷床北西部および南部の雪中粒子量は小さく、同地域の雪面アルベドが比較的高い範囲に維持されたと考えられる。
- ✓ 今後の氷コア解析から、雪面アルベドと関連する鉱物粒子以外の要素の変動も得ることができれば、より正確にアルベドを復元できる可能性がある。

## 参考文献

1. Akasofu, S., On the recovery from the Little Ice Age. *Natural Science*, 2, 1211-1224, 2010.
2. Aoki, T., Motoyoshi, H., Kodama, Y., Yasunari, T. J., Sugiura, K., Kobayashi, H., Atmospheric Aerosol Deposition on Snow Surfaces and Its Effect on Albedo. *SOLA*, 2, 13-16, 2006.
3. 青木輝夫, 極域における雪氷中の光吸収性エアロゾルとその光学特性. *エアロゾル研究*, 25, 240-246, 2010.
4. Aoki, T., Matoba, S., Uetake, J., Takeuchi, N., Motoyama, H., Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 3-20, 2014.
5. Bory, A. J. -M., Biscaye, P. E., Svensson, A., Seasonal variability in the origin of recent atmospheric mineral dust at NorthGRIP, Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 196 (3-4), 123-134, 2002.
6. Bory, A. J. -M., Biscaye, P. E., Grousset, F. E., Two distinct seasonal Asian source regions for mineral dust deposited in Greenland (NorthGRIP). *Geophysical Research Letters*, 30 (4), 1167, 2003.
7. Dansgaard, W. and Johnsen, S. J., A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland. *Journal of Glaciology*, 8 (53), 215-223, 1969.
8. Dumont, M., Brun, E., Picard, G., Michou, M., Libois, Q., Petit, J-R., Geyer, M., Morin, S., Josse, B., Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009. *Nature Geoscience*, 7, 509-512, 2014.
9. Fujita, K., Takeuchi, N., Nikitin, S. A., Surazakov, A. B., Okamoto, S., Aizen, V. B., Kubota, J., Favorable climatic regime for maintaining the present-day geometry of the Gregoriev Glacier, Inner Tien Shan. *The Cryosphere*, 5 (3), 539-549, 2011.
10. 船引真吾, 新編土壌学講義. 養賢堂, 東京, pp194-197, 1972.
11. 舟本達海, テンシャン山脈グレゴリア氷河中の金属成分から探るエアロゾル環境変動. 山形大学理学部地球環境学科平成 25 年度卒業論文, 2014MS.
12. Kaser, G., Hardy, D. R., Mölg, T., Bradley, R. S., Hyera, T. M., Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts.

International Journal of Climatology, 24, 329-339, 2004.

13. 国立極地研究所 HP. <http://www.nipr.ac.jp>
14. 小室悠紀, 雪面アルベド低下における大気降下粒子の役割-雪面アルベドと雪中金属濃度の関係-. 山形大学理工学研究科平成 25 年度修士論文, 2014MS.
15. Komuro, Y. and Suzuki, S., Relationship between the Concentration of Impurity and Albedo in Snow Surface. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5, 426-432, 2015.
16. Kreutz, K. J. and Sholkovitz, E. R., Major element, rare earth element, and sulfur isotopic composition of a high - elevation firn core: Sources and transport of mineral dust in central Asia. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 1, 2000.
17. Lupker, M., Aciego, S. M., Bourdon, B., Schwander, J., Stocker, T. F., Isotopic tracing (Sr, Nd, U and Hf) of continental and marine aerosols in an 18th century section of the Dye-3 ice core (Greenland). *Earth and Planetary Science Letters*, 295 (1-2), 277-286, 2010.
18. Matoba, S., Shimbori, K., Shiraiwa, T., Alpine ice-core drilling in the North Pacific region. *Annals of Glaciology*, 55 (68), 83-87, 2014.
19. Matoba, T., Motoyama, H., Fujita, K., Yamasaki, T., Minowa, M., Onuma, Y., Komuro, Y., Aoki, T., Yamaguchi, S., Sugiyama, S., Enomoto, H., Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. *Bulletin of Glaciological Research*, 33, 7-14, 2015.
20. 松橋勇太, グリーンランド氷床コアの金属成分測定による大気古環境解析. 山形大学理学部地球環境学科平成 24 年度卒業論文, 2013MS.
21. 小倉義光, 一般気象学第 2 版. 東京大学出版会, 東京, pp110-113, 1999.
22. Shepherd, A., Ivins, E.R., Geruo, A., Barletta, V. R., Bentley, M. J., Bettadpur, S., Briggs, K. H., Bromwich, D. H., Forsberg, R., Galin, N., Horwath, M., Jacobs, S., Joughin, I., King, M. A., Lenaerts, J. T. M., Li, J. L., Ligtenberg, S. R. M., Luckman, A., Luthcke, S. B., McMillan, M., Meister, R., Milne, G., Mouginot, J., Muir, A., Nicolas, J. P., Paden, J., Payne, A. J., Pritchard, H., Rignot, E., Rott, H., Sorensen, L. S., Scambos, T. A., Scheuchl, B., Schrama, E. J. O., Smith, B., Sundal, A. V., van Angelen, J. H., van de Berg, W. J., van den Broeke, M. R., Vaughan, D. G., Velicogna, I., Wahr, J., Whitehouse, P. L., Wingham, D. J., Yi, D. H., Young, D., Zwally, H. J., A Reconciled Estimate of

- Ice-Sheet Mass Balance. *Science*, 338 (6111), 1183-1189, 2012.
23. Shiraiwa, T., Murav'yev, Y. D., Kameda, T., Nishio, F., Toyama, Y., Takahashi, A., Ovsyannikov, A. A., Salamatina, A. N., Yamagata, K., Characteristics of a crater glacier at Ushkovsky volcano, Kamchatka, Russia, as revealed by the physical properties of ice cores and borehole thermometry. *Journal of Glaciology*, 47 (158), 423-432, 2001.
  24. 白岩孝行, アムール川とオホーツク海-陸海境界・国境を越えた環境システムの発見と保全-. 境界研究, 1, 181-185, 2010.
  25. 庄司仁, 成田英器, 神山孝吉, グリーンランド Site J におけるコアの現場処理, 解析および輸送の方法について. 南極資料, 35 (1), 129-141, 1991.
  26. 鈴木健太, 北極圏氷河コアから復元するエアロゾル輸送の記録-カムチャッカ半島ウシュコフスキー氷河コアの金属成分解析-. 山形大学理学部地球環境学科平成 23 年度卒業論文, 2012MS.
  27. 鈴木ちさと, 雪面アルベド低下における大気降下粒子の役割-雪面アルベドと雪中粒子の長期間同時観測-. 山形大学理学部地球環境学科平成 24 年度卒業論文, 2013MS.
  28. Suzuki, T. and Sensui, M., Application of the microwave acid digestion method to the decomposition of rock samples. *Analytica Chimica Acta*, 245, 43-48, 1991.
  29. Takeuchi, N., Matsuda, Y., Sakai, A., Fujita, K., A large amount of biogenic surface dust (cryoconite) on a glacier in the Qilian Mountains, China. *Bulletin of Glaciological Research*, 22, 1-8, 2005.
  30. Taylor, S. R., Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28 (8), 1273-1285, 1964.
  31. 角皆静男, 乗木新一郎, 西村雅吉, 海洋化学-化学で海を解く. 産業図書, 東京, pp54-58, 1983.
  32. Warren, S. G. and Wiscombe, W. J., A Model for Spectral Albedo of Snow. II: Snow Containing Atmospheric Aerosols. *Journal of the Atmospheric Chemistry*, 37 (12), 2734-2745, 1980.
  33. Wientjes, I. G. M., Van de Wal, R. S. W., Reichert, G. J., Sluijs, A., Oerlemans, J., Dust from the dark region in the western ablation zone of the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, 5, 589-601, 2011.
  34. 油井綾, グリーンランド氷床コア中金属成分から探る雪氷圏エアロゾル変動-

2014SIGMA-DS コアの解析-. 山形大学理学部地球環境学科平成 27 年度卒業論文,  
2016MS.

35. Zhao, H., Xu, B., Yao, T., Tian, L., Li, Z., Records of sulfate and nitrate in an ice core from Mount Muztagata, central Asia. *Journal of Geophysical Research*, 116, D13304, 2011.

## 謝辞

本論文の作成にあたり、主指導教員である鈴木利孝教授には多大なる御指導をいただきました。研究に関する様々な御助言は、自分に取り組んできた研究内容に対する自信や、研究活動の励みへと繋がりました。鈴木教授の存在無くして、本論文作成に至るまでの研究活動を続けることは出来なかったと思います。SIGMA コアの掘削隊として北極圏観測に参加させて頂いたことは、極地研究の最前線へ触れると共に、最先端の研究者の方々と関わる機会となりました。それらの中で得られた経験や繋がりは、自分のこれからの人生にとって、かけがえのない価値があるものになると思います。深く感謝いたします。

副指導教員である柳澤文孝教授と日野修次教授には、本論文の作成にあたり、多くの御助言を頂きました。深く感謝いたします。

研究室メンバーの皆様には、日頃の研究活動の中で大変御世話になりました。SIGMA コアに関わる実験等では、油井綾学士と高宮圭学士の御助力を頂きました。皆様から頂いた多くの御支援が、本論文作成の大きな支えになりました。皆様に深く感謝いたします。

岡山大学の青木輝夫教授をはじめとした SIGMA プロジェクトメンバーの皆様には、大変御世話になりました。特に、掘削隊メンバーである国立極地研究所の本山秀明教授や名古屋大学の藤田耕史准教授、北海道大学の的場澄人助教、犬ぞり北極探検家の山崎哲秀さんには、掘削をはじめとした現地でのフィールドワークや、その後の研究活動の中で、様々な御指導・御助言を頂きました。北海道大学の飯塚芳徳助教や国立極地研究所の東久美子教授と平林幹啓特任助手には、SIGMA コアの解析に関して様々な御助言を頂きました。皆様に深く感謝いたします。

最後に、これまで自分を支えてくれた家族に心から感謝します。