論文

スバルバル諸島アウストフォンナ氷帽頂上における 融解による積雪中化学主成分の流出

飯塚 芳徳¹⁾, 五十嵐 誠²⁾, 渡辺 幸一³⁾,
神山 孝吉²⁾, 渡辺 興亜²⁾

要 旨

1998 年3～4月, スバルバル諸島アウストフォンナ氷帽頂上において, 多点積雪断面観測による積雪試料の採取を行なった。試料は化学分析に用いられた。

各積雪断面は, 深さ0.50～0.79 mを境に, 雪質の違いから上部と下部に分けられる。上部はしもざらめ雪としまり雪, 下部は氷板とざらめ雪が層を成している。下部は $\delta^{18}\text{O}$ 値や電気伝導度の変動が保持されていない。これらの結果は, 下部の積雪が融解を経験していることを示す。融解による化学主成分の減少過程は各イオン種ごとで異なる。 Na^+ , Cl^- に比べて Mg^{2+} , SO_4^{2-} は流出しやすい。 K^+ , Ca^{2+} は融雪後も他のイオン種と相関のない鋭いピークを残している。

融解を経験していない積雪の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比が 0.11 ± 0.02 であり海塩比(0.12)とはほぼ一致するのに対し, 融解を経験した積雪の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比は 0.03 ± 0.02 の値をとる。 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比は氷コア中のフィルムの融解の有無を明らかにする指標になると考えられる。

キーワード: スバルバル, 氷河, 化学分析, イオンの再分配

Key Words: Svalbard, glacier, chemical analysis, re-distribution of ions

1. はじめに

スバルバル諸島はグリーンランドの北東方に位置し, 四方を海に囲まれている。グリーンランドの北端とはほぼ同程度の高緯度にありながら, 暖流であるメキシコ湾流の流れ込みの影響を受けるため, その南と西の海域は冬季でも海水に覆われない地域である。この地域は海流の影響を強く受けた気候条件下にあり, 北極地域の海洋性気候における雪氷の堆積環境を明らかにする上で重要な地域である。スバルバル諸島では過去の気候・大気環境の復元のために雪氷コアを用いた研究が行われてきた。(Goto-Azuma *et al.*, 1993; Goto-Azuma *et al.*, 1995; 的場ら, 1995; Watanabe *et al.*,

in press; 渡辺ら, 1999)。過去の気候・大気環境の復元に有効な指標の一つとして雪氷中の化学主成分が挙げられる (Laj *et al.*, 1992; Goto-Azuma *et al.*, 1995; 五十嵐, 1995)。

Goto-Azuma *et al.* (1993) は, スピッツベルゲン島北西部にあるブレッガー氷河の涵養域および消耗域にて夏期と冬期の積雪表層の雪試料を採取し, その雪試料の化学主成分の分析を行っている。その結果, 積雪中の化学主成分濃度は冬期に比べて夏期に小さくなることから, 夏期の融雪期には氷河涵養域でさえも化学主成分の流出が顕著に生じ, 氷河中に保存されないと報告した。

Goto-Azuma *et al.* (1995) は, スピッツベルゲン島北西部にあるスノーフィエラフォンナ氷河において雪氷試料を採取し, その雪試料の化学主成分の分析を行っている。その結果, 夏期の融雪は生じているが, 化学主成分の変動は保持されていることを明らかにし, 42.5 mのコアから過去70

1) 総合研究大学院大学数物科学研究科

〒173-8515 板橋区加賀 1-9-10

2) 国立極地研究所

〒173-8515 板橋区加賀 1-9-10

3) 名古屋大学大気水圏科学研究所

〒464-0814 名古屋市中種区不老町

年の化学主成分濃度の変化を報告した。

五十嵐(1995)はスバルバル諸島のオスゴルド氷河, ブレッカー氷河, ウエストフォンナ氷河の3地点における氷コアの堆積層位解析, 化学主成分解析を行い各氷河中の積雪の化学的特徴について検討した。その結果, 各氷河によって融解の程度が異なることを示した。また, 各氷河に対して「物質定着-氷化モデル」を構築し, 各氷河の融雪の程度に依存する時間スケール(数年)以上のシグナルに対しては過去の気候・大気環境の復元が可能であることを明らかにした。

これまでの研究でスバルバル諸島における各雪氷コアは融解を経験しており, 融解の程度が各氷河によって異なることが明らかにされている。この地域における過去の気候・大気環境の復元のためには, 各氷河の融解の特徴を把握することが必要不可欠であるが, 同時に融解によって引き起こされる各氷河に共通する現象を明らかにすることもまた重要である。

本論文では, スバルバル諸島北東部に位置するアウストフォンナ氷帽頂上において, ピットワークによる積雪試料の採取を行ない, 現在の融解による積雪中の化学主成分の挙動の把握を試みた。

2. 試料採取および分析方法

スバルバル諸島北東部には, グリーンランドを除くヨーロッパで最大面積(8450 km²), 氷厚約600 mを有するアウストフォンナ氷帽が存在する(図1)。アウストフォンナ氷帽における過去数百年の古環境, 堆積環境を明らかにするために, 1998年3~5月アウストフォンナ氷帽頂上(79°48'03"N, 24°00'21"E, 750 m a.s.l.)において氷河掘削が行われた(Watanabe *et al.*, in press)。氷河掘削と同時に積雪断面観測を行い化学分析用積雪試料を採取した(図1)。氷帽頂上の掘削場の付近における積雪断面観測は, 無作為に半径500 m内で4箇所を行った。雪質観察および積雪試料を採取した積雪断面の深さはpit-I, -II, -III, -IVそれぞれ1.21, 1.89, 1.03, 1.80 mである。深さ方向に積雪層ごともしくは厚さ30~40 mmごと連続に積雪試料を採取した。雪試料の採取には予め超純水で洗浄した内径15 mm アクリル管を積雪壁面の試料に突き刺し, アクリル管内に捕獲された積雪を洗浄されたアクリル棒でポリ容器に詰めるという方法を用いた。

雪試料をポリ容器のまま日本に持ち帰り融解し, 各化学分析を行った。イオンクロマトグラフにより化学主成分(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)を分析した。測定にはDionex製イオンクロマトグラフDX500を使用

図1 スバルバル諸島アウストフォンナ氷帽の位置と氷帽頂上における積雪断面観測地点の相対位置。図中のI II III IVはそれぞれ積雪断面観測地点を示す。以後, 各積雪断面を pit-I, pit-II, pit-III, pit-IVと呼ぶ。pit-I, II, III, IVはそれぞれ1998年3月26日, 3月19日, 3月25日, 4月10日に採取された。

し、五十嵐ら (1998) で示されている分析法を用いた。測定誤差は $\pm 5\%$ である。酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) を Finnigan mat 製の質量分析計 Delta E を用いて測定した。測定誤差は $\pm 6\%$ である。電気伝導度は東亜電波製 CM-40 S を用いて試料を 25°C に保ち測定した。測定誤差は、測定値 $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下で $\pm 0.01\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下、 $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上で $\pm 0.1\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下である。pH は、東亜電波製 HM-60 S を用いて試料を 25°C に保ち測定した。測定誤差は ± 0.01 以下である。

3. 結果と考察

3.1 積雪の雪質層構造

図 2 に 4 地点の積雪断面の雪質層構造の深さプ

ロファイルを示す。全ての積雪断面において、定性的な深さ方向の雪質の変化は等しく、上部はしまり雪としもざらめ雪からなり、下部はざらめ雪と氷板からなる。今後、この層構造の特徴が大きく異なる深さを境界面と呼ぶ。境界面より下部はざらめ雪や氷板で構成されていることから、かつて融解を経験した積雪であることが示される。

各々の積雪断面において雪質構造の境界面の深さは pit-I, -II, -III, -IV でそれぞれ 0.50, 0.59, 0.79, 0.77 m とばらつく。これは、各積雪断面からの積雪採取時期が最大約 1 ヶ月の差がありその間の降雪が付加したこと、本研究地域は南極氷床上で見られるようなサスツルギ状の凹凸が存在しており、積雪後の風による運搬、再堆積が生じ雪

図2 pit-I, pit-II, pit-III, pit-IVの雪質の深さプロフィール.

面の堆積環境が異なったことが原因と考えられる。しかし、本地域の年涵養量は水当量で 0.5 ~ 0.6 m/yr であり (Sin'kevich and Tarusov, 1989), 採取時期が 3 ~ 4 月であることを考慮すると, 各積雪断面における境界面は 1997 年の夏期の融解を経験した雪とそれ以後の乾いた雪の境界であることが示唆される。

3.2 積雪の化学的性質

pit- I における雪質, 酸素安定同位体比, 電気伝導度, pH の深さプロファイルを図 3 に示す。酸素安定同位体比, 電気伝導度, pH の値は境界面を境に深さプロファイルの特徴が異なる。境界面より上部の $\delta^{18}\text{O}$ 値は -23.3‰ ~ -11.4‰ であり, 境界面より下部の $\delta^{18}\text{O}$ 値 (-18.0‰ ~ -14.8‰) に比べて変動幅が大きい。これは, 境界面より上部で保存されている季節シグナルなどの降雪時の情報が境界面より下部では保存されていないことを示す。境界面より上部の電気伝導度 ($2.50 \sim 12.9 \mu\text{S}$) は下部の電気伝導度 ($1.61 \sim 5.43 \mu\text{S}$) に比べ, 値が大きくその変動幅も大き

い。また, 境界面より上部の pH ($5.2 \sim 5.3$) は下部の pH ($5.5 \sim 5.6$) に比べて低く, 酸性度が強い。これらの結果は, 境界面より下部において, 季節シグナルなど降雪時の情報が融雪により失われ, 酸や化学主成分が融解水とともに積雪層から排出されたために濃度が減少し, 深さ方向により均質化されたことを示す。

3.3 融雪による各イオン種の移動

以後, 境界面より上部の雪を乾雪, 下部の雪を湿雪と呼ぶ。表 1 に全積雪断面から採取された全サンプル中の各化学主成分種を乾雪 (計 89 サンプル) と湿雪 (計 80 サンプル) の 2 つに分け, それぞれの平均濃度 ($\mu\text{mol/l}$), Na^+ 濃度 ($\mu\text{mol/l}$) から計算された乾雪中の非海塩性成分の割合 (%), 湿雪/乾雪を示す。表 2 に乾雪と湿雪の各イオン種の濃度の相関を示す。乾雪中の Na^+ , Cl^- 濃度の平均値は 23.1 , $26.8 \mu\text{mol/l}$ であり, これらのイオン濃度の和は表 1 に示された主要溶存イオン濃度の 84.3% を占める。表 1 の主要溶存イオン中の海塩性成分は mol 濃度で全イ

図 3 pit- I の雪質, 酸素安定同位体比 (‰), 電気伝導度 ($\mu\text{S/cm}$), pH の深さプロファイル。図中の点線は境界面を示す。記載されている雪質記号は図 2 に準ずる。

オン量の91.2%を占め、乾雪中の化学主成分は主に海塩を起源としていることが示される。乾雪の各イオン種の相関(表2)によると、 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 間は相関がほぼ1であり、かつほとんど全てのイオンが海塩起源(表1)と考えられる。 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 K^+ 間もまた相関がよい。表1によると、 K^+ は90.7%が海塩起源であるために Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} と相関が良いと考えられる。 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ は他イオンとの相関が悪い。 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ の供給源は海塩起源以外であると考えられる。

非海塩性成分が50.5%を占める SO_4^{2-} は、ほとんど全てが海塩起源と考えられる Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} と相関が良い。一例として、図4に乾雪の Mg^{2+} と SO_4^{2-} の関係を示す。 SO_4^{2-} の切片は1.0であり、標準偏差はこの回帰直線に対して ± 0.86 である。この結果は非海塩性成分の SO_4^{2-} が $1.0 \pm 0.86 \mu\text{mol/l}$ (1σ) という一定範囲の濃度をとることを示し、アウストフォンナ地域への非海塩性 SO_4^{2-} の沈着濃度がほぼ一定であることを示唆する。そのため、 Mg^{2+} と SO_4^{2-} の回帰直線の傾き(0.70)は Mg^{2+} と SO_4^{2-} の標準海水の比の傾き(0.70)とほぼ一致し、 SO_4^{2-} と Mg^{2+} の間で相関が良いと考えられる。他方、ほとんどの海塩性 SO_4^{2-} 濃度は $5 \mu\text{mol/l}$ 以下であり、計算上非海塩

性成分の割合は高い。これらの理由のため、 SO_4^{2-} は非海塩性成分を多く含むにもかかわらず Mg^{2+} (Na^+ 、 Cl^-)と相関が良いと考えられる。

化学主成分の特徴は湿雪と乾雪において大きく異なる。湿雪の Na^+ 、 Cl^- 濃度の平均値は6.25、 $6.67 \mu\text{mol/l}$ である。季節間において降雪中の化学主成分の濃度に大きな変化がないと仮定すると、残存率の指標となる Na^+ 、 Cl^- 濃度の湿雪/乾雪はそれぞれ0.27、0.25であり(表1)、湿雪中の化学主成分は融解により約1/4しか保存されていないと考えられる。これらのイオン濃度の和は表1の主要溶存イオン濃度の87.7%を占め、化学主成分の第一位をとることについては乾雪と変わり

図4 乾雪における Mg^{2+} と SO_4^{2-} の関係、図中の実線は海塩比、点線は回帰直線を示す。

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
乾雪平均濃度($\mu\text{mol/l}$)	26.81	1.48	2.82	23.12	0.98	0.56	2.59	0.84
湿雪平均濃度($\mu\text{mol/l}$)	6.67	0.31	0.35	6.25	0.62	0.16	0.18	0.19
非海塩性成分(%)	0 (-0.54)	—	50.5	—	—	9.3	0 (-1.1)	39.6
湿雪/乾雪	0.25	0.21	0.12	0.27	0.64	0.28	0.07	0.22

表1 乾雪、湿雪の各イオン種の平均濃度 ($\mu\text{mol/l}$)、湿雪の平均濃度/乾雪の平均濃度 (以後、湿雪/乾雪とする) および乾雪中の非海塩性成分の割合 (%)。

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Cl^-		0.09	0.88	0.99	0.72	0.97	0.99	0.63
NO_3^-	-0.10		0.33	0.12	0.12	0.15	0.15	-0.03
SO_4^{2-}	0.57	0.42		0.89	0.78	0.90	0.91	0.53
Na^+	0.98	-0.12	0.53		0.74	0.98	0.995	0.63
NH_4^+	0.16	0.04	0.21	0.08		0.77	0.75	0.51
K^+	0.16	0.10	0.41	0.20	-0.10		0.99	0.64
Mg^{2+}	0.70	0.29	0.82	0.68	-0.01	0.39		0.65
Ca^{2+}	0.03	0.11	0.23	0.02	-0.02	0.39	0.34	

表2 乾雪、湿雪の各イオン種の相関。

注：右上半分が乾雪の相関、左下半分が湿雪の相関を示す。表中の灰色の枠は相関0.9以上(乾雪)、相関0.8以上(湿雪)を示す。

はない。

融雪による化学主成分の減少の挙動は各イオン種によって異なる。Davies *et al.* (1982) はノルウェーにあるフォルゲフォンニ氷帽の60 m 氷コアの化学主成分を分析し、融雪の際に生じる各イオン種ごとの流出過程について考察した。彼らは相対的に高いイオン濃度を持つ再凍結水の部分（厚さ3 m）のイオン濃度と深さ20 mまでのイオン濃度の比を移動指数とした。移動指数は Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- それぞれ1.4, 1.9, 3.5, 3.8, 2.5である。Brimblecombe *et al.* (1985) はスコットランドにおいて、連続した2日間の積雪断面観測を行い、融雪による各イオン種の流出の程度を比較した。その結果、 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^-$ の順番で各イオン種が流出されやすいことを示唆した。Davies *et al.* (1987) は実験的に各イオン種の流出の程度を定義しようとした。その結果、 $\text{Ca}^{2+} = \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^-$ という式を得た。また、積雪の融解の状況や雪質構造の違いが各イオン種の流出しやすさに重要であると結論づけた。

図5に示されている陽イオンの深さプロファイルによると、湿雪の K^+ や Ca^{2+} は Na^+ や Mg^{2+} に比べて、他のイオン種と相関のない鋭いピークを残している。また、表2によると湿雪の Na^+ 、 Cl^- 間・ Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 間の相関は0.98・0.82であり、乾雪における相関とともに高い。もともと相関の良いイオン種が、融雪による再分配を経験した後においても相関が良いということは、 Na^+ 、 Cl^- 間および Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 間において融雪による再分配時に引き起こされるイオンの排出の挙動が同じであることを示唆する。表1によると、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} の湿雪/乾雪は0.07, 0.12であり Na^+ (0.27)、 Cl^- (0.25) に比べて低い。これは、 Na^+ 、 Cl^- に比べて Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} が早く排出されることを示唆する。Davies *et al.* (1982)、Brimblecombe *et al.* (1985)、Davies *et al.* (1987) らの結果もまた Na^+ 、 Cl^- に比べて Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} が流出しやすいことを示唆しており、本解析結果を支持する。

アウストフォンナ積雪における融雪による化学主成分の排出過程をまとめると、 Na^+ 、 Cl^- 間と

Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 間では取り除かれ方が類似しており、 Na^+ 、 Cl^- とくらべて Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} が流出しやすい。他方、 K^+ 、 Ca^{2+} は他のイオン種と相関のない鋭いピークを残している。

3.4 融解の指標としての $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比

各イオン種の供給源、湿雪による再分配の挙動に着目し、融解の指標について考察する。表3に $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比、 Cl^-/Na^+ 比、 $\text{K}^-/\text{Mg}^{2+}$ 比の乾雪と湿雪それぞれの平均値と標準偏差を示す。また、図6に乾雪と湿雪ごとと $\text{K}^-/\text{Mg}^{2+}$ 比、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比のヒストグラムを示す。乾雪と湿雪の $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比の標準偏差（乾雪で±0.08、湿雪で±0.05）は平均値（乾雪で0.05、湿雪で0.04）と比較して大きい。 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比のようなもとの供給源が異なるイオン種間の比は乾雪の標準偏差が大きく、融解の指標としては適さない。

Cl^-/Na^+ 比の平均値は乾雪（1.18）と湿雪（1.07）ではほぼ同じ値を示し、平均値と比較して標準偏差が小さい（乾雪で±0.11、湿雪で±0.15）。これは、全ての乾雪の Na^+ 、 Cl^- が海塩起源であり降雪起源が単一であること、 Na^+ 、 Cl^- が流出の程度に差がないことが理由であると考えられる。 Cl^-/Na^+ 比のように流出の程度に差がないと乾雪と湿雪のイオン種間の比は同じ値を示すため、融解の指標としては適さない。

乾雪と湿雪の $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ 比の平均値は乾雪で0.23、湿雪で1.33であり、乾雪と湿雪を平均値の上では区別することができる。しかし、湿雪の標準偏差が大きく（乾雪で±0.06、湿雪で±1.25）、乾雪と湿雪を完全に区別することはできない（図6）。これは、湿雪の K^+ が他のイオン種と相関のない鋭いピークを残していることが原因であると考えられる。 $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ 比のように湿雪中に他のイオン種と相関のない鋭いピークを残しているイオン種を用いた比は、融解の指標としては不十分である。

以上の結果と考察に基づき、融雪後の他のイオン種と相関のない鋭いピークを残さず、両者の間で流出の程度に差があり、ほぼ全てが海塩起源である Na^+ 、 Mg^{2+} の比を乾雪と湿雪を識別する指標に用いた。表3によると、乾雪の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比の平均値は0.11であり、標準偏差±0.02である。

図5 pit-I, pit-II, pit-III, pit-IVの Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比の深さプロフィール. 図中の点線は境界面を示す. 図中の矢印は湿雪中の他のイオン種と相関のない鋭いピークを示す.

乾雪	Mg^{2+}/Na^+	Ca^{2+}/Na^+	Cl^-/Na^+	K^+/Mg^{2+}
平均	0.11	0.05	1.18	0.23
標準偏差	0.02	0.08	0.11	0.06
湿雪	Mg^{2+}/Na^+	Ca^{2+}/Na^+	Cl^-/Na^+	K^+/Mg^{2+}
平均	0.03	0.04	1.07	1.33
標準偏差	0.02	0.05	0.15	1.25

表3 Mg^{2+}/Na^+ 比, Ca^{2+}/Na^+ 比, Cl^-/Na^+ 比, K^+/Mg^{2+} 比の乾雪と湿雪それぞれの平均値と標準偏差.

図6 乾雪と湿雪の K^+/Mg^{2+} 比(上图), Mg^{2+}/Na^+ 比(下图)のヒストグラム. 横軸は K^+/Mg^{2+} 比, Mg^{2+}/Na^+ 比の値を示し, 階級はそれぞれ0.2, 0.01ごと連続に区切られている. 縦軸は各階級に含まれるサンプルの個数を示す. 乾雪と湿雪はそれぞれ灰色, 黒色の棒グラフで描かれている.

湿雪の Mg^{2+}/Na^+ 比の平均値は0.03であり, 標準偏差 ± 0.02 である. すべての Na^+ , Mg^{2+} イオンが海塩起源ならば降雪の Mg^{2+}/Na^+ 比は一定の値約0.12を取る. この値はほぼすべてが海塩起源と考えられている本分析結果の乾雪中の Mg^{2+}/Na^+ 比の値(0.11 ± 0.02)とほぼ一致する. これは, 乾雪が降雪時の情報を保存していることを示唆する.

図5に示された Mg^{2+}/Na^+ 比の深さプロファイルによると, 乾雪と湿雪の Mg^{2+}/Na^+ 比はそれぞれある範囲を持った一定値をとる. 図6に示された Mg^{2+}/Na^+ 比のヒストグラムによると, 乾雪中の Mg^{2+}/Na^+ 比は0.07~0.16の値(全89サンプル中2サンプルのみ0.19, 0.20)をとり, 湿雪中の Mg^{2+}/Na^+ 比は0.07未満の値をとる. ま

た, 乾雪の Mg^{2+}/Na^+ 比の最小値は湿雪の Mg^{2+}/Na^+ 比の最大値より高い. これらの統計処理の結果は乾雪と湿雪の Mg^{2+}/Na^+ 比がそれぞれ独立したある一定範囲値を持つことを示し, Mg^{2+}/Na^+ 比が積雪断面試料中の乾雪と湿雪を識別する指標になることを示す.

3.5 Mg^{2+}/Na^+ 比の氷コアへの応用

Mg^{2+}/Na^+ 比の指標は, 本地域の氷コアなど, 融解を経験している氷河で掘削された氷コアに適用できると考えられる. その際, 降雪の Mg^{2+}/Na^+ 比が常に一定である(たとえば降雪の Mg^{2+} が Na^+ を基に計算してほぼすべてが海塩起源であるなど)という条件を満たしていることが要求される.

氷コアにおける Mg^{2+}/Na^+ 比の解釈の際に問題となるのは相対的に高い Mg^{2+}/Na^+ 比を持つ融解水がどこで再凍結するかである. 夏季の融解を経験する地域の氷コアは幾層にもなる氷板を含んでいる. 氷板のうちの一部は相対的に Mg^{2+}/Na^+ 比が高い水が流れ込み, 再凍結することによって形成されていると考えられる. この場合, その氷板中の Mg^{2+}/Na^+ 比は高くなり, Mg^{2+}/Na^+ 比が融解の指標として成り立たなくなる. しかし, 氷板が存在しているということそのものが融解が生じたことを示しているため(Kameda *et al.*, 1995), 氷板についてはこの Mg^{2+}/Na^+ 比を用いる必要はない. むしろ Mg^{2+}/Na^+ 比が有効になるのはコア中のフィルムの部分である. コア中のフィルムがかつて融解したことを示す指標はなく, 今までは単にフィルムと氷板を区分し, melt feature percentageという指標を用いて議論してきた(Kameda *et al.*, 1995). しかし, この Mg^{2+}/Na^+ 比を用いることにより, 同じように見えるフィルムでもかつて融解があったか, あるいは, 乾雪のまま保存されているのかを区分できると考えられる.

4. まとめ

半径500 m内4個所の全ての積雪断面において雪質が異なる境界面が存在した. 境界面より上部はしまり雪としもぎらめ雪からなり, 下部はぎらめ雪と氷板からなる. 境界面より下部はぎらめ雪や氷板で構成されていることから, 融解を経験し

ており、積雪の再配分が起きている。

融解による化学主成分濃度の減少の挙動は各イオン種ごとで異なる。 Na^+ 、 Cl^- 間と Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 間では取り除かれ方が類似しており、 Na^+ 、 Cl^- にくらべて Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} が流出しやすい。 K^+ 、 Ca^{2+} は他のイオン種と相関のない鋭いピークを残している。

融解を経験していない積雪の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比が 0.11 ± 0.02 であるのに対し、融解を経験した積雪の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比は 0.03 ± 0.02 の値をとる。この結果は $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比がアウストフォンナ地域の積雪において、融解の有無の指標になることを示唆する。 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比一定の降雪を持つ地域において、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比は氷コア中のフィルムの融解の有無を明らかにする指標となると考えられる。

謝 辞

本積雪断面調査を行うにあたり、研究環境・生活環境において多大なるサポートを頂いた1998年日本北極圏氷河学術調査隊(JAGE98)の隊員に感謝申し上げます。本研究の一部は、文部省科学研究費補助金国際学術研究(課題番号08041114代表者渡辺興亜および課題番号09041200代表者藤井理行)によって実施された。また、2人の査読者から多くの有益なコメントを頂いた。ここに記して、感謝します。

文 献

- Brimblecombe, P., Tranter, M., Abrahams, P. W., Blackwood, I., Davies, T. D. and Vincent, C. E., 1985: Relocation and preferential elution of acidic solute through the snowpack of a small, remote, high-altitude Scottish catchment. *Annals of Glaciology*, **7**, 141-147.
- Davies, T. D., Brimblecombe, P., Tranter, M., Tsiouris, S., Vincent, C. E., Abrahams, P., and Blackwood, L.L., 1987: The removal of soluble ions from melting snowpacks. H. G. Jones and W. J. Orville-Thomas (eds.), *Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology*, 337-392.
- Davies, T. D., Vincent, C. E. and Brimblecombe, P., 1982: Preferential elution of strong acids from a Norwegian ice cap. *Nature*, **300**, **11**, 161-163.
- Goto-Azuma, K., Enomoto, H., Takahashi, S., Kobayashi, S., Kameda, T. and Watanabe, O., 1993: Leaching of ions from the surface of glaciers in western Svalbard. *Bulletin of Glacier Research*, **11**, 39-50.
- Goto-Azuma, K., Kohshima, S., Kameda, T., Takahashi, S., Watanabe, O., Fujii, Y., Hagen, J. O., 1995: An ice-core chemistry record from Snøfjellaonna, northwestern Spitsbergen. *Annals of Glaciology*, **21**, 213-218.
- 五十嵐誠, 1995: スバルバル諸島亜極地型氷河における堆積環境指標シグナルの特性に関する研究. 総合研究大学院大学博士論文. 73 pp.
- 五十嵐誠・金森暢子・渡辺興亜, 1998: 少量の極域雪氷試料のイオンクロマトグラフィーによる化学分析. 南極資料, **42**, 64-80.
- Kameda, T., Narita, H., Shoji, H., Nishio, F., Fujii, Y. and Watanabe, O., 1995: Melt features in ice cores from Site J, southern Greenland: some implications for summer climate since AD 1550. *Annals of Glaciology*, **21**, 51-58.
- Laj, P., Palais, J. M. and Sigurdsson, H., 1992: Changing sources of impurities to the Greenland ice sheet over the last 250 years. *Atmospheric Environment*, **26A**, **14**, 2627-2640.
- 的場澄人・神山孝吉・本山秀明・成田英器・宮原盛厚・Arkhipov, S., 渡辺興亜, 1995: Svalbard北東島Vestfonna氷コアの現場解析(要旨). 1995年度日本雪氷学会講演予稿集. 7 p.
- Sin'kevich, A. and Tarusov A. V., 1989: Peculiarities of snow accumulation on Austfonna (Svalbard). *Materiialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*, **67**, 1989, 190-194.
- Watanabe, O., Kamiyama, K., Kameda, T., Takahashi, S. and Isaksson, E., 1999: Activities of the Japanese Arctic Glaciological Expedition in 1998 (JAGE98). *Bulletin of Glacier Research*, (in press).
- 渡辺興亜・本山秀明・五十嵐誠・宮原盛厚・永崎智晴・山崎哲秀・Karlof, L. and Isaksson, E., 1999: 北極圏学術調査隊(JAGE99-Svalbard)活動報告(1)―調査・観測の概要(要旨). 1999年度日本雪氷学会講演予稿集. 25 p.

Re-distribution of chemical compositions in the snowpack at the dome of Austfonna ice cap, Svalbard

Yoshinori IIZUKA¹⁾, Makoto IGARASHI²⁾, Koichi WATANABE³⁾,
Kokichi KAMIYAMA²⁾, Okitsugu WATANABE²⁾

1) The Graduate University for Advanced Studies, Itabashi-ku, Tokyo, 173-8515

2) National Institute of Polar Research, Itabashi-ku, Tokyo, 173-8515

3) Institute for Hydrospheric-Atmospheric Science, Nagoya University, Nagoya, 464-0814

Abstract: Snowpack samples were collected from the dome of Austfonna ice cap, Svalbard, in the spring of 1998. Snowpack samples were analyzed for anions, cations, pH, EC and $\delta^{18}\text{O}$. The results showed that the concentration levels in melted and refrozen snowpack were much lower than those in non-melted snowpack. It is suggested that the ions were flushed out from the snowpack during the thaw. A clear difference of $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ ratio between the melting-experienced snowpack (0.03 ± 0.02) and the non-melted snowpack (0.11 ± 0.02) was detected. We propose that the $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ ratio become an indicator to distinguish whether firn in the ice core has experienced of melting or not.

(1999 年 12 月 20 日受付, 2000 年 2 月 10 日改稿受付, 2000 年 3 月 22 日再改稿受付, 2000 年 3 月 24 日受理, 討論期限 2000 年 11 月 15 日)