研究ノート

新潟県中魚沼郡中里村における融雪期の積雪中固体微粒子濃度の時間変化

神田 尚子^{1)*}, 東 久美子²⁾, 中尾 正義^{3)**},
宮崎 伸夫⁴⁾, 清水 増治郎¹⁾

要 旨

1995年1月から4月にかけて新潟県中里村において、融雪期の積雪中固体微粒子の時間変化を研究するため、13回の積雪断面観測を行ない、そのうち10回積雪試料を採取した。また降水、及び乾性降下物を毎日採取した。これらの試料中の固体微粒子濃度を測定し、次のような結果が得られた。積雪中に含まれている固体微粒子は融雪期に主要イオンとは異なった挙動を示し、表層付近で高濃度となっていた。これは春先になって降水及び乾性降下物中の固体微粒子が増加し、積雪表面に多量に堆積したためであることが明らかになった。一方、地面に接する層では積雪初期段階から地熱による融雪が生じ、粒径 $0.67 \sim 7 \mu\text{m}$ の固体微粒子は融雪水の流下とともに積雪内から流出した。従来考えられていた、固体微粒子だけが積雪中に残って高濃度になる現象は観測されなかった。逆に、固体微粒子が融雪水よりも優先的に流出する場合もあることが示唆された。

キーワード：固体微粒子，融雪，乾性降下物

Key words: micro-particle, snowmelt, dry deposition

1. はじめに

湿性降下物や乾性降下物として冬期間積雪中に取り込まれた不純物は積雪の変態や融解・再凍結の影響を受けて積雪内で移動する。また、一部は融雪水とともに流下する。本格的融雪期が始まると融雪水とともに一気に流出して河川や湖に流れ込む。融雪期のイオンの挙動については多くの研究報告がなされており (e.g. Johannessen and Henriksen 1978; Suzuki 1982; Davies *et al.*, 1982,

1987; Brimblecombe *et al.*, 1985, 1987, 1988; Bales *et al.*, 1989, 1990; Goto-Azuma *et al.*, 1993 a, 1993 b; 鈴木, 2000), 融雪水の酸性化に寄与する NO_3^- や SO_4^{2-} が Cl^- など他の主要イオンに比べて雪粒子から優先的に融雪水に排出され、融雪期初期の融雪水中では他のイオンに比べて高濃度となり、融雪水の流入した河川水や湖水が酸性化することが知られている。

一方、融雪期の固体微粒子の挙動についてはこれまで研究がほとんど行なわれていない。融雪期に積雪表面に目視できる汚れが出現する現象はよく知られており、固体微粒子が融雪によって濃縮したものであると考えられている (e.g. 高橋ら, 1973; Kohshima *et al.*, 1994) が、その要因や成分等については良く分かっていない。積雪のアルベドは積雪表面の熱収支に大きな影響を与えるため、衛星を利用した広域雪氷圏のアルベド観測が盛んに行なわれているが、衛星データから融雪期

1) 防災科学技術研究所 長岡雪氷防災研究所

〒940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山 187-16

*現在：〒940-2145 新潟県長岡市青葉台 3-19-2

2) 国立極地研究所

〒173-8515 東京都板橋区加賀 1-9-10

3) 名古屋大学 大気圏科学研究所

〒464-0814 名古屋市千種区不老町

**現在：総合地球環境学研究所 (〒602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入高島町 335)

4) (有) クライメットエンジニアリング

〒949-8400 新潟県中魚沼郡中里村西方 541-4

のアルベド変動メカニズムを解明するためには、融雪に伴う固体微粒子の移動を研究する必要がある。

一方、地球規模の過去の気候・環境変動を調べるために世界各地で雪氷コアが掘削され、雪氷コアの酸素同位体比や主要イオン分析などとともに固体微粒子の分析が進められている。しかし、夏期に激しい融解が生じる氷河で採取された雪氷コアでは、分析データをどう解釈すべきか良く分かっていない。融雪に伴う積雪中固体微粒子の移動の様子が明らかになれば、融解の影響を大きく受けた雪氷コアにおいても固体微粒子分析によって雪氷コアの年代決定や過去の気候・環境変動の復元ができる可能性がある。このように、融雪に伴う積雪中固体微粒子の挙動を解明することは非常に重要である。

本研究では、新潟県中魚沼郡中里村西方において積雪期から融雪期にかけて積雪試料及び湿性降水物と乾性降水物を採取し、その中に含まれる固体微粒子の濃度を測定した。融雪期における固体微粒子濃度の変動とその原因について検討を行ない、主要イオン濃度の変動と比較した。

2. 研究方法

2.1 積雪断面観測及び雪試料採取

新潟県中魚沼郡中里村西方（北緯 36°55′ 東経 138°44′ 標高 445 m）において、付近に民家等のない平坦な田地を観測地点とし、1995 年 1 月 10 日から 4 月 11 日にかけて、雪面から地面までピットを掘って積雪断面観測を実施した後、ピット壁面から雪試料を採取した。本観測地点は積雪期にも融雪が生じることがある温暖な積雪地帯にある。人口密集地帯から離れており、付近に人為的汚染源がほとんどない。

観測地点には積雪層構造を乱さないように作業用通路を設け、掘り進んだ通路の前面で積雪断面観測を実施した。観測項目には積雪層位観測、サーミスターによる雪温測定、密度測定等が含まれている。積雪断面観測は 1 月 10 日、2 月 6 日、2 月 10 日、2 月 21-22 日、2 月 27 日、3 月 3 日、3 月 13 日、3 月 21 日、3 月 26 日、4 月 4 日、4 月 11 日、4 月 20 日、4 月 24 日の計 13 回実施（図 1）、そのうち積雪を採取したのは 2 月 6 日、2 月

図 1 積雪深と気温・降水量の変化

(a) 図の内部の日付は積雪中にマーカーを設置した日を表し、A～E はマーカーによって区別した層、縦線は断面観測を実施した日を表す。Nakawo *et al.* (2000) より引用。雪温の変化は次のように表した。

□: -0.1°C 以下 □: $-0.1^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ ■: 0°C
(b) 折れ線グラフは日最高、日平均、日最低気温を、棒グラフは日降水量を表す。

10 日、2 月 22 日、2 月 27 日、3 月 3 日、3 月 13 日、3 月 21 日、3 月 26 日、4 月 4 日、4 月 11 日の計 10 回であった。なお、積雪断面観測は前回の観測地点から約 2 m 離れた場所で行なった。さらに各積雪層の変化を追跡するため、1 月 10 日、1 月 26 日、2 月 6 日、2 月 20 日、3 月 3 日の計 5 回、積雪表層にトイレットペーパーを敷いてマーカーとした。断面観測時には積雪中のマーカーの位置を確認してその深度を測定した。

積雪試料は、雪面から地面までの全層を 5 ～ 10 cm 毎に採取した。同じ深さからポリ袋とポリカップを用いて次の 2 つの方法で積雪を採取した。1 つは固体微粒子の分析を目的として、250 ml のポリカップを積雪断面に対して垂直に差し込んで、積雪をすくい取った。もう 1 つは主要イオン濃度を分析する目的で、超純水で洗浄したステンレス製の雪べらを用いてポリ袋に採取し

た。本研究で使用した超純水はすべて Milli-Q システム (ミリポア社) で製造した電気抵抗 18 M Ω 以上のものである。雪べらは 1 試料採取毎にその採取深の積雪に数回差し込んで共洗いた。

本研究で使用したポリカップ (Becton Dickinson 社 Falcon コンテナ) は個別包装されたポリプロピレン製カップ (ポリエチレン製ふた付き) である。また、ポリ袋 (Nasco 社 Whirl-Pak Sampling Bag) は開口部にワイヤーとタブが取り付けられた密閉型ポリ袋で、開口部のミシン目部分を切り離して使用するタイプのものであるから、どちらも使用以前に外部からの汚染を防止することができる。本研究では、これらの容器が未洗浄で使用可能であるか否かを検討するため、観測開始前に以下のようなブランクテストを実施した。ポリカップとポリ袋それぞれ 5 個ずつに超純水を約 200 ml 詰めて一晩以上放置した後、それぞれの容器内の水に含まれている固体微粒子と主要イオンの濃度を測定した。容器に詰める前の超純水において 0.67 ~ 18 μm の固体微粒子の濃度は 2×10^5 個/kg 以下、また各主要イオン濃度は検出限界以下であった。なお、固体微粒子及び主要イオンの濃度の測定方法、検出限界については次節で述べる。容器に詰めて一晩放置した水を分析した結果、主要イオンについてはポリ袋及びポリカップともに濃度が検出限界以下で、積雪試料に比べてはるかに低く、未洗浄での使用が可能であることが分かった。固体微粒子数については、ポリ袋に詰めた水の濃度は高く (0.67 ~ 18 μm の粒子の濃度が 10^7 個/kg 以上)、未洗浄での使用は不適切であることが分かった。一方、ポリカップに詰めた水の場合は固体微粒子濃度が積雪試料に比べてはるかに低かった (0.67 ~ 18 μm の粒子が 10^6 個/kg 以下)。しかし、ポリカップだけでは主要イオンと固体微粒子の両方の分析のために必要な積雪量が得られないため、上で述べた 2 つの採取方法を用いた。

本研究ではピット断面の積雪採取に加えて降水と乾性降下物を次の方法で採取した。超純水で洗浄した直径 300 mm の円筒型ポリバケツを用意し、午前 9 時に雪面に設置し翌日午前 9 時に回収、新たに洗浄したポリバケツと交換するという作業を繰り返して試料を採取した。試料はポリバケツ

を設置した日を採取日と決め、次のバケツと交換するまでの 24 時間分を 1 試料とした。採取した試料は観測地点から 20 m 程離れた作業所で融解した後、超純水で洗浄したポリプロピレン製ビン (Nalgene 広口瓶) に移し換えた。また、無降水の日に回収した空のポリバケツは作業所において超純水で洗浄し、その洗浄水をポリビンに移し取り、乾性降下物の試料とした。試料を移し取った後のポリバケツは超純水で全体をすすぎ、クラス 10 対応のクリーンルーム用ワイパー (ベンコットリントフリー) で内側をていねいに拭いた後、ふたをして保管した。作業は 2 月 10 日から 4 月 12 日まで実施し、53 日分の試料が得られた。このようにして得られた試料はすべてピット断面の積雪試料とともに長岡雪氷防災研究所の低温室へ移送し冷凍保存した。

2.2 分析方法

積雪試料、再凍結した降水試料、乾性降下物の試料はすべて分析直前に長岡雪氷防災研究所の低温室からクリーンルーム (クラス 100) に移し室温で融解させた後、超純水で洗浄したポリビンにそれぞれ移した。その融解試料中の固体微粒子、主要イオンの分析を行なった。

固体微粒子濃度分析にはコールターカウンター (Coulter 社 Coulter Multisizer II) を用いた (雪氷化学用語解説, 2000)。分析に用いたアパーチャーの径は 30 μm であり、このアパーチャーを用いた場合の粒径計測範囲は 0.67 ~ 18 μm である。融解試料はアパーチャーのつまりを防止するために、あらかじめ孔径 12 μm のメンブレンフィルタ (野村マイクロサイエンス N1200 CR02500) で濾過して粒径 12 μm 以上の径の粒子を除去した後、その濾液に 1.7% 食塩水を等量混合して分析を行なった。従って実際の粒径計測範囲は 0.67 ~ 12 μm であった。コールターカウンターによる固体微粒子濃度の検出限界は 10^4 個/kg、測定精度は約 10% であった。

主要イオンのうち Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度は原子吸光分光光度計 (セイコー社 SAS7500) を用いてフレイム分析により測定し、 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 濃度はイオンクロマトグラフ (DIONEX 社 DX-500) を用いて測定した。 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 濃度の検出限界はそ

れぞれ4, 1, 3, 7, 1, 1, $0.5 \mu\text{eq/kg}$ で、測定精度は10%であった。このうち Ca^{2+} については測定値が検出限界値に近かったため、測定結果は使用しなかった。イオン濃度分析用試料は汚れが目視できるもののみをあらかじめ孔径が $12 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルタで濾過した。

2.3 気象観測データ

本研究では、本観測点に隣接する気象観測施設で測定した気温及び積雪深のデータを利用した。気温は3線式PT100温度計（白山工業HS151LS変換器）を、また、積雪深は超音波式積雪深計（キーエンス）を用いて測定し、データロガー（白山工業LS3000PtV）で自動記録したデータである。

3. 結果及び考察

3.1 気温、積雪層構造と相当水量の変化

1月1日から4月30日までの積雪深の変化と気温、降水量の日変化を図1に、また、積雪層位の観測結果を図2に示す。マーカーによって区別された層を下層から、A, B, C, D, E層と名づけた。積雪深は1月から2月下旬にかけて大きく増加し、2月22日に1994/1995年冬季の最大積雪深3.45mを記録した。3月6日にこの冬2番目の積雪深を記録したが、その後数回降雪があったものの、融雪が急速に進行し、4月26日には積雪が消失した。

1995年1月1日から4月30日までの気温の変化をみると、最寒期の1月から2月でも日平均気温が 0°C を上回った日数は16日間あり、1月9日には月最高気温 10.9°C を記録した。

1月10日の積雪深は1.25mであり、しまり雪層を一部含むザラメ雪層の上に0.4mの厚さの新雪が見られた（A層）。2月6日の断面観測ではA層はしまり雪とザラメ雪の層が互層になっていた。1月10日から1月26日にかけて堆積したB層はザラメ雪でそのほとんどが帯水層であった。B層の厚さは1月12日から17日にかけて増加したが1月21日～24日の気温の上昇によって急激に減少している。21～23日の日平均気温は 0°C を上回っており、特に22, 23日には日最低気温も 0°C を上回り、一時的な融雪が生じて帯水層が形成されたと考えられる。

2月の気温は日最高気温が2月10日と18日を除いて 0°C を上回っていたが、日最低気温は 0°C 以下であった。最大積雪深を記録した前後の2月21～22日に観測した積雪断面はザラメ雪としまり雪の複雑な互層構造を示し、A層、B層では帯水層が、C層、D層では氷板がみられた。D層の下部が形成された期間（2月6日から2月16日にかけて）は、降雪量は比較的少なく日中の最高気温も 0°C を上回った日が多いことから少量の降雪と積雪の融解・再凍結が繰り返し生じたものと考えられる。積雪深は2月16日に極小になった後、急上昇したが、2月22日以降、再び減少した。2月27日の雪温の測定値は $-0.1 \sim 0^\circ\text{C}$ であったが、雪温の測定に用いたサーミスターの精度が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度であったため、温度の測定値が $-0.1 \sim 0^\circ\text{C}$ であった雪の温度が実際には 0°C であった可能性がある。2月6日のB層に顕著な帯水層が見られることから、その可能性は非常に高い。図1の雪温 $-0.1 \sim 0^\circ\text{C}$ の部分の雪が実際には 0°C であったと考ええると、2月27日には全層が 0°C になった可能性が高い。また、1月から2月下旬までの積雪期にも融雪が生じていたことが分かる。

3月に入ると日最低気温が 0°C を上回る日が増加し、3月13日には帯水層や氷板が各層にみられる。これは、積雪の融解・再凍結が激しく生じていることを示している。3月6日頃から積雪深の減少速度が大きくなり、この頃から融雪期に入ったと考えられる。3月21日になるとほぼ全層がザラメ雪になっていた。

図3に積雪相当水量の時間変化を示す。積雪試料毎の積雪水量を計算し、層毎の和をとったものである。密度データの無い試料については、その前後の試料で雪質が同じ試料の密度を用いた。データのバラツキはあるもののB, C, D, E層では融雪期に入ってもその層が表面に露出して消失する直前まで積雪相当水量に大きな変化は見られなかった。しかし、地面に接するA層は常に地熱の影響を受け、融雪期に入る前から減少傾向を示した。

3.2 積雪中固体微粒子、主要イオンの時間変化

積雪中固体微粒子濃度及び Na^+ , K^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} 濃度の鉛直プロファイルの時間変化を図4に示す。図中の実線はマーカーで区別した積雪層

図2 積雪層位の変化

各観測日の層位図をつなぐ実線は積雪内のマーカー位置の変化を表す。3月26日はD層上部のマーカーが確認されなかったため、マーカーの推定位置を破線で示し、実線と区別した。

の位置、破線は積雪表面の位置を表す。固体微粒子の粒径計測範囲は $0.67 \sim 12 \mu\text{m}$ であったが、本研究で採取した積雪試料では、固体微粒子の総個数のうち 99.9 % 以上が粒径 $7 \mu\text{m}$ 以下であった。従って図4に示した固体微粒子の濃度プロファイルは実際は粒径 $0.67 \sim 7 \mu\text{m}$ のもののプロファイルであると考えて良い。図に示したイオンの他、 Mg^{2+} 、 Cl^- 濃度の測定も行なったが、どの観測日にも Na^+ 濃度と非常に良い相関を示したため（相関係数 0.90 以上）図4には示さなかった。

図4から、固体微粒子及び濃度測定を行なったすべてのイオンについて、表層以外では融雪がかなり進行した3月下旬になるまで鉛直濃度プロファイルには大きな時間変化が生じなかったことが分かる。たとえば、2月6日の固体微粒子濃度プロファイルに見られる 0.5 m 深付近と 1.5 m 深付近のピーク、また、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 濃度プロファイルに見られる 0.5 ~ 1 m 深付近のピークは、融雪期に入って約2週間を経た3月21日頃まで

図3 積雪相当水量の変化

見ることができる。また、 K^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} で 2月22日にD層とE層の境界に見られる濃度のピークは、3月13日まで見ることができる。同じ観測日の積雪でも固体微粒子やイオンの分布に水平方向のバラツキがあるため、融雪期が始まる

図4 積雪中固体微粒子とイオンの鉛直プロファイル

……: 積雪表面位置, —: 各マーカーの位置

3月26日D層上部の破線はマーカー推定位置を表す。固体微粒子径は $0.67 \sim 7 \mu\text{m}$ である。

以前でも観測日によって濃度ピークの高さが多少変化しているが、このような空間的不均一性を考慮すれば、融雪期に入って1週間近くを経過した3月13日ごろまでは、固体微粒子及び主要イオンの最初の濃度プロファイルが殆ど変化せずに保存されていたといえる。このことから、積雪期に融雪が殆ど生じない地点 (Goto-Azuma *et al.*, 1993 b) だけでなく、中里村西方のように積雪期に融雪が生じる地点でも、表層以外では融雪がかなり進行するまで積雪中のイオン濃度プロファイ

ルが変化しないことが明らかになった。

本格的融雪期に入った後、固体微粒子濃度が表層付近で非常に高くなっているが、 K^+ 以外の主要イオン濃度にはこのような傾向は全く見られない。 K^+ の場合も表層の濃度が高くなっているのは4月4日だけで、3月21日以降のすべての観測日において表層の濃度が高い固体微粒子とは異なっている。

空間的バラツキを持つ固体微粒子や主要イオンの時間変化を追跡するため、図5に各層の固体微

粒子（粒径 $0.67 \sim 7 \mu\text{m}$ ）とイオンについて単位面積当りの堆積量と平均濃度の時間変化を示した。固体微粒子の単位面積当りの堆積量（個/ m^2 ）は各試料の固体微粒子濃度と相当水量（ kg/m^2 ）の積を計算し、その層全体についての和をとることによって求めた。また、層毎の固体微粒子の平均濃度（個/ kg ）は層毎の固体微粒子堆積量を層毎の相当水量で除することにより求めた。主要イオンについても同様に求めた。ただし、データの欠落が多い層については図から省いた。また、 Mg^{2+} と Cl^- は Na^+ と良い相関を示したため図には示さなかった。

主要イオンの時間変化を見ると、表層に近いD層において NO_3^- 、 SO_4^{2-} は3月3日以降に濃度、堆積量ともに急激に減少したが、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 及び積雪水量には急激な減少が見られなかった。このように NO_3^- 、 SO_4^{2-} はD層において他のイオンや融雪水より先に層内から抜け出しており、これまでの報告と良く一致している（Brimblecombe *et al.*, 1985, 1987, 1988; Goto-Azuma *et al.*, 1993 b）。

一方、表層付近で固体微粒子は主要イオンとは全く異なる挙動を示した。D層で固体微粒子が3

月21日以降、堆積量、濃度とも高い値を示している。これは図4で表層付近に見られる大きな濃度のピークに対応している。表層の固体微粒子増加の原因としては、融雪による濃縮（e.g.高橋ら, 1973; Kohshima *et al.*, 1994）と降水量の増加の両方が考えられる。前者は、融雪の際に融雪水だけが流下して固体微粒子が後に取り残されるために固体微粒子の濃度が増加するという仮説である。後者は多量の固体微粒子が大気中から積雪表層に降下するという仮説である。

積雪表層の固体微粒子増加の原因解明のため、降水及び乾性降下物中の固体微粒子濃度の時間変化を解析した。固体微粒子及び Na^+ 、 K^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 各イオンの単位面積当たりの降下量、降水中の固体微粒子濃度、及び降水量を一日毎に示したのが図6である。降水と乾性降下物の試料を採取したのは、2.2節で述べたように1日1回、合計53日間であったが、その内訳は雪が27日間、雨が9日間、雨と雪両方の日が3日間、無降水の日が14日間であった。無降水の日の試料を乾性降下物の試料とした。なお、雨や雪が降った日でも無降水の時間があるため、雨や雪の試料には乾性降下物も混在しているが、観測の時間分解能が

図5 各層のイオンと固体微粒子の平均濃度と単位面積当りの堆積量
左縦軸は平均濃度、右縦軸は堆積量、横軸は日付を表す。図左のA～Eはマーカーで区別した層を表す。

図6 降水・乾性降下物中のイオン，固体微粒子の日降下量，降水中固体微粒子濃度，及び日降水量の変化
 降水量とは1日1回回収する降水採取用バケツ内に捕集された降水の量を示す。
 ▲：乾性降下物，□：降雪，○：降水

1日であるため，降水が少しでもあった日の試料を雪または雨として定義した。また，雨と雪両方の日は雨とした。

2月21日前後の降雪において固体微粒子降下量及び主要イオン降下量は高い値を示したが，これはこの時期の降雪中の濃度が高かったためではなく，降水量が多かったためである。2月22日の積雪試料採取を開始した午前9時の観測点の気温は -1°C ，前日午前9時からの24時間の降雪深が0.44 mであった。前日17時以降の気温が氷点下であることから採取した表層の雪は融解の生じ

ていない新雪であることが分かる。新潟地方気象台発表によると2月16日に始まった強い冬型の気圧配置は22日まで続き，23日に低気圧が日本海を東進した。また16日には強風が記録されている。これらのことから多量の高塩粒子や大陸起源の固体微粒子などが新潟に輸送されて降雪中に取り込まれたため，この時期の降下量が高くなったものと考えられる。2月21～22日の積雪断面観察においても積雪2.74～2.79 m深に汚れ層が記録されている（図2）。

融雪期において主要イオン降下量の増加傾向は

見られなかったのに対し、固体微粒子降下量は降水中及び乾性降下物中の両方で3月中旬頃から急増していた。この時期の降水量は少ないが、降水中の固体微粒子濃度は高く、また、乾性沈着による固体微粒子降下量も大きいことから、この時期に空気中の固体微粒子濃度が高くなっていたことが分かる。これはこの時期に大陸からの黄砂が飛来したり (eg. 上田・岩田, 1991), 路面の消雪による粉塵の放散等に起因する多量の固体微粒子が積雪表層に降下するためであると推定できる。

次に融雪による固体微粒子の積雪表層での濃縮効果について考察する。D層において固体微粒子の濃度と堆積量が急激に増加した3月13日から3月21日までの間、D層の積雪水量は減少していないことから、D層の融雪による固体微粒子の濃縮はほとんど生じていないと考えられる。この期間中、D層の上部にあるE層の一部とE層よりも上にあった層が融雪により消失しており、消失した部分に含まれていた固体微粒子がD層に流下した可能性はあるが、図5で観測開始時からすでに融雪を生じ積雪水量が時間とともに減少していたA層に着目すると、固体微粒子の濃度が時間とともに減少する傾向が見られた。融雪末期まで積雪水量がほとんど変化しなかった積雪内部のB、C層における固体微粒子もA層と同様の傾向を示した。このことは固体微粒子が融雪水よりも優先的に流出したことを示唆している。従って、3月中旬以降の積雪表層付近の固体微粒子の増加が、融雪による濃縮が原因である可能性は低い。春先には晴れた日が多くなり、固体微粒子の乾性降下量が増加すること、また少量の降水中に高濃度で固体微粒子が含まれるようになることによって、固体微粒子の積雪表層への降下量が増加することが主な原因であると考えられる。

固体微粒子が融雪水よりも優先的に流出するという現象はこれまで報告がない。しかし、Goto-Azuma *et al.* (1994) は氷河上で融解・再凍結により上積み氷が形成されるときに固体微粒子が融雪中の積雪層内で沈むことを示唆する観測結果を得ている。これは、融雪中の積雪層において固体微粒子が表層付近に集積する現象とは逆の現象であり、固体微粒子が融雪水よりも優先的に流下する可能性があることを示す結果である。

4. まとめ

1995年1月から4月にかけて新潟県中魚沼郡中里村西方において積雪断面観測を行ない、積雪と降水・乾性降下物試料を採取した。得られた試料の化学分析と固体微粒子分析により、次の結果が得られた。

積雪期から融雪の生じる中里村西方においても、寒冷地と同様に表層以外では積雪中の固体微粒子と主要イオンの濃度の鉛直プロファイルが本格的融雪期が進行するまで保たれていた。これは、ある程度融雪が生じる氷河の雪氷コアを用いて過去の気候・環境が復元できることを意味している。

積雪層内に取り込まれた粒径 $0.67 \sim 7 \mu\text{m}$ の固体微粒子は本格的融雪期になると表層で濃度が増大していた。一方、地面に接する層及び内部層では固体微粒子が融雪水よりも優先的に流出する傾向が見られた。これは本研究によって初めて観測された現象である。融雪による積雪層内の固体微粒子の移動は、微粒子の粒径や形状、密度に大きく依存すると考えられるので、今後はこれらの要素をさらに検討する必要がある。

本格的融雪期に表層の固体微粒子が高濃度となる原因について、これまで積雪の融解による濃縮が主な原因であると考えられてきたが、中里村西方においては春先に湿性及び乾性降下物中の固体微粒子が大きく増加し、積雪表面付近に沈着するためであることが明らかになった。しかし、固体微粒子の粒径や形状によっては融雪による濃縮が生じる場合もあると考えられるので、今後詳しい研究が必要である。

本研究では、積雪融解期に表層付近のマーカー位置が特定できない日があったことや、積雪表層部分の試料の一部が欠落していたこと等により、融雪期の積雪表面の固体微粒子及び主要イオンの時間変動を明確にできない場合があった。また、積雪断面観測では、時間変化と空間変化の影響を同時に受けるので、両者を区別できない場合があった。このため、固体微粒子と主要イオンの収支を定量的に論ずることができなかった。

今後は、時間変化をより詳細に研究するために、積雪断面試料を複数列採取することによって固体微粒子や主要イオンの濃度の水平分布について統

計的検討を行なう必要がある。また、融雪期の積雪中固体微粒子の移動について、自然条件の異なる積雪地域において積雪断面観測を実施し、本稿で述べた温暖積雪地域の積雪中固体微粒子と同様の結果が得られるか比較検討する必要がある。

謝 辞

積雪断面観測、試料採取では以下の方々のご協力をいただきました。名古屋大学大気水圏科学研究所の瀬古勝基さん、藤田耕史さん、門田勤さん、ビルバル・ラナさん、ローレル・グッドリッジさん（当時客員研究官）、坂井亜規子さん、矢吹裕伯さん、気象研究所の青木輝夫さん、東京農工大学の窪田順平さん。以上の皆様には深く感謝申し上げます。また、本稿を執筆するに当り、国立極地研究所気水圏グループ、長岡雪氷防災研究所変動観測研究室の皆様には大変お世話になりました。

本研究では採取した雪氷試料のイオン及び固体微粒子の分析は科学技術庁海洋開発等試験研究費「地球温暖化の原因物質の全球的挙動とその影響等に関する観測研究」の研究費の一部を用いて実施しました。

文 献

- 上田豊・岩田修二, 1991: 世界の風送塵発現地域。大気水圏の科学－黄砂（名古屋大学大気水圏科学研究所編）, 東京, 古今書院, 3-8.
- Bales, R. C., Davis, R. E. and Stanley, D. A., 1989: Ion elution through shallow homogeneous snow. *Wat. Resour. Res.*, **25**, 1869-1877.
- Bales, R. C., Sommerfeld, R. A. and Kebler, D. G., 1990: Ionic tracer movement through a Wyoming snowpack. *Atmos. Environ.*, **24A**, 2749-2758.
- 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. *Ann. Glaciol.*, **7**, 141-147.
- Brimblecombe, P., Clegg, S. L., Davies, T. D., Shooter, D.

- and Tranter, M., 1987: Observations of the preferential loss of major ions from melting snow and laboratory ice. *Wat. Resour. Res.*, **21**, 1279-1286.
- Brimblecombe, P., Clegg, S. L., Davies, T. D., Shooter, D. and Tranter, M., 1988: The loss of halide and sulfate ions from melting ice. *Wat. Resour. Res.*, **22**, 693-700.
- Davies, T. D., Vincent, C. E. and Brimblecombe, P., 1982: Preferential elution of strong acids from a Norwegian ice cap. *Nature*, **300**, 161-163.
- 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 snow-packs. *Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology*, eds, H. G. Jones and W. J. Orville-Thomas, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 337-392.
- Goto-Azuma, K., Enomoto, H., Takahashi, S., Kobayashi, S., Kameda, T. and Watanabe, O., 1993a: Leaching of ions from the surface of glaciers in western Svalbard. *Bull. Glacier Res.*, **11**, 39-50.
- Goto-Azuma, K., Nakawo, M., Shimizu, M., Azuma, N., Nakayama, M. and Yokoyama, K., 1993b: Temporal changes in chemical stratigraphy of snow cover. *Ann. Glaciol.*, **18**, 85-91.
- Goto-Azuma, K., Nakawo, M., Han, J., Watanabe, O. and Azuma, N., 1994: Melt-induced relocation of ions in glaciers and in a seasonal snowpack. *Publication of the International Association of Hydrological Sciences*, **223**, 287-297.
- Johannessen, M. and Henriksen, A., 1978: Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting. *Wat. Resour. Res.*, **14**, 615-619.
- Kohshima, S., Yoshimura, Y., Seko, K. and Ohata, T., 1994: Albedo reduction by biotic impurities on a perennial snow patch in the Japan Alps. *Publication of the International Association of Hydrological Sciences*, **223**, 323-330.
- Nakawo, M., Hashimoto, S., Ageta, Y. and Miyazaki, N., 2000: Isotope studies of a snow layer in a temperate region- isotope balance and temporal change. *Physics of Ice Core Records*, ed, T. Hondo, Sapporo, Hokkaido University Press, 141-154.
- Suzuki, K., 1982: Chemical changes of snow cover by melting. *The Jpn. J. Limnol.*, **43**, 102-112.
- 鈴木啓助, 2000: わが国における雪氷化学研究。雪氷, **62**, 185-196.
- 高橋修平・藤井俊茂・石田完, 1973: 雪面の亀甲模様の発生及び発達。低温科学, 物理編, **31**, 191-207.

Temporal changes of micro-particle concentration in snow cover during snowmelt

Hisako KANDA^{1)*}, Kumiko GOTO-AZUMA²⁾, Masayoshi NAKAWO^{3)**},
Nobuo MIYAZAKI⁴⁾ and Masujiro SHIMIZU¹⁾

1) *Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, Suyoshi, Nagaoka 940-0821*

**Present address: Aobadai 3-19-2, Nagaoka 940-2145*

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

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

***Present address: Research Institute for Humanity and Nature, Kamigyo-ku, Kyoto 602-0878*

4) *Climate Engineering, Co., Saiho-jin 541-4, Nakazato, Naka-uonuma, Niigata 949-8400*

Abstract: In order to study the temporal variation of micro-particle concentration in snow during a thaw, we carried out 13 series of snow-pit observations and 10 series of pit-wall sampling at an observation site in Nakazato Village, Niigata Prefecture during January-April 1995. We also collected precipitation and dry deposition every day during the observation period. Results of micro-particle analysis of these samples indicate that micro-particle concentrations became high in the surface snow during the snowmelt season, in contrast with the concentrations of ions. We find that the high concentrations in the surface snow resulted from high concentrations in both wet and dry deposition during this season. In the spring, the number of clear days increased, the amount of precipitation decreased, and a large number of micro-particles were deposited by dry deposition, which greatly contributed to the high deposition flux of micro-particles on to the snow surface. On the other hand, we also find that micro-particles in the lowermost layer, which has been in contact with the ground and melting during the whole observation period, moved downward and were released from this layer. Our observation suggests that this downward movement of microparticles was faster than that of meltwater. Against our expectation, we did not find any facts suggesting that micro-particles become concentrated during the thaw by their slower movement compared to melt water.

(2002 年 4 月 8 日受付, 2002 年 8 月 2 日改稿受付, 2002 年 8 月 14 日受理, 討論期限 2003 年 3 月 15 日)