論文

山岳積雪中の化学成分の空間分布とその成因

田中基樹¹⁾, 鈴木啓助^{1),2)}

要 旨

山岳地域である中央アルプス駒ヶ岳東西尾根において、冬季降水中の化学成分の空間分布を把握するとともに、ひとつの山体を越えてエアロゾルが輸送される過程を、降水中の化学成分の変化を通して明らかにすることを目的として研究を行った。積雪中の nss-SO_4^{2-} (非海塩性の SO_4^{2-}) 濃度と nss-Ca^{2+} (非海塩性の Ca^{2+}) 濃度は、山体西側より東側の方が低い傾向であった。一方、 NO_3^- 濃度は、東西方向による差異は認められなかった。積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、西尾根より東尾根の方で大きい値を示していた。このことは、東尾根における積雪には、日本列島由来のエアロゾルをより多く含む空気塊によって化学成分が供給されていることを示唆している。山体西側や主稜線付近では偏西風の影響により、西よりの風が卓越しているのに対し、東側では上昇気流により、東よりの風が支配的であった。この上昇気流により、東側低空域から日本列島由来のエアロゾルが、山体東側上部まで輸送・沈着されているものと推測される。

キーワード: 中央アルプス駒ヶ岳, 冬季降水, 化学成分

Key words: Mt. Komagatake, winter precipitation, chemical constituents

1. はじめに

山岳地域の冬季降水中の化学成分は、より近傍に化学成分の発生源がないため、広範囲にわたる影響を低地部より感度よく反映していると考えられている。また、冬季間に降雪に取り込まれて地上にもたらされた化学成分は、積雪内に保存された状態で地上に滞留する。その際、積雪表面の融雪による水の移動がなければ、積雪中の化学成分は堆積層に保持される(鈴木, 2000)。つまり、融雪を経験していない積雪には、その年の冬季の湿性沈着物と乾性沈着物の総沈着量および降水量の情報が保存されており(Suzuki, 1991), 山岳積雪の調査から、これらの情報を簡便に得ることができる。しかしながら、山岳地域ではアクセスの困難性から、必然的に研究例は少ない。

降水中の化学成分濃度は、降水をもたらす空気

塊によって異なることが知られている(鈴木, 1983; Watanabe *et al.*, 1986 など)。降水に取り込まれる化学成分は硫酸化合物、窒素酸化合物などの人為起源物質、海塩起源物質、土壌起源物質、火山噴出物などである。上野(1993)は、新潟県直江津から長野県軽井沢にかけて新雪中の化学成分濃度の空間分布を調査し、新雪中の海塩起源物質濃度は海岸から内陸に向かうにつれて減少すると報告している。つまり、降水中の化学成分濃度の空間的な分布は、その化学成分の起源の空間的影響を受けている(鈴木, 1984)。しかし、先に挙げた上野(1993)では、新雪中の NO_3^- 濃度の空間的な分布にばらつきが目立ったことから、新雪中の NO_3^- 濃度の空間分布が、その発生源の位置のみでなく、大気中の NO_3^- の局地循環の影響を受ける可能性を示唆している。降水中の化学成分濃度は分水嶺を境に急激に変化することが知られている(井上ら, 1985)。しかしながら、山地を跨ぐ降水中の化学成分濃度の空間分布は、空気塊の動きが複雑であることから、その分布傾

1) 信州大学理学部物質循環学科

〒390-8621 松本市旭 3-1-1

2) 信州大学山岳科学総合研究所

〒390-8621 松本市旭 3-1-1

向には未知な部分が多く, 解決しなければならない課題でもある. そのためには, まず, ひとつの山体における降水中の化学成分濃度の基本的な空間分布を把握しておく必要がある.

そこで, 本研究では, 中部山岳地域中央アルプスを調査地域として, ひとつの山体を, 主要な風向に沿うように東西方向の多点積雪ピット調査を行った. 本研究では, 中央アルプスにおける冬季降水中の化学成分の空間分布を把握するとともに, ひとつの山体を越えて空気塊が輸送される過程を, 冬季降水中の化学成分の変化を通して明らかにすることを目的とした.

2. 研究方法

2.1 調査地域の概要

調査地域は日本列島のほぼ中央にあたる長野県の南部に位置する中部山岳地域, 中央アルプス駒ヶ岳の山域である (図 1). 駒ヶ岳は標高 2956 m であり, 日本を代表する急峻な山岳といえる. 中央アルプスでは, 主に冬型の気圧配置時と南岸低気圧通過時に降雪がおこる. 調査地域は標高 2000 m 以上に位置し, 自由対流圏の高度, あるいはそ

れに近い高度である. そのため, 冬季を通して, 偏西風の影響を強く受けると考えられる.

2.2 積雪調査および分析手法

2006 年 2 月 22 日から 23 日にかけて, 駒ヶ岳山頂から西方に延びる尾根上 (西尾根) の 4 地点 (2050 m, 2200 m, 2500 m, 2680 m) で, 2006 年 3 月 4 日から 5 日にかけては, 同峰の山頂から東方に延びる尾根上 (東尾根) の 2 地点 (2200 m, 2500 m) において, 積雪ピット調査を行った (図 1). 積雪ピット調査を行った地点名は, 便宜的に, 調査地点の背稜山脈に対する方位と標高を用いて命名した. 例えば, 西尾根における 2500 m の地点では, W2500 と命名する. 積雪ピット調査は, できる限り平坦で付近に樹木などの遮蔽物のない地点で行った. 積雪を地表面まで掘削したあと, 積雪断面の層位観測を行い, 深度 3 cm 毎に雪温, 密度を測定した. さらに, 深度 3 cm 毎に積雪全層を採取した.

積雪試料は密封式のビニール袋 (WHIRL-PAK) に入れて実験室まで運び, 室温で融解させ, 孔径 0.45 μm のメンブレン・フィルターでろ過し, ろ液を化学分析に呈した. ろ液は, 電気伝

図 1 調査地域. 図中の★は, 気象庁による高層気象観測地点 (輪島) を示す. ○は現場での気象観測地点 (千畳敷) を示す.

導度と pH を測定し、イオンクロマトグラフ (DI-ONEX: DX-500) を用いて主要溶存成分濃度 (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) を測定した。これらの作業は、すべてクリーンルーム内で行った。

高層気象データは、気象庁による輪島の測定データを使用し、現地の気象データについては、中央アルプス観光株式会社が背稜山脈の東側にあたる標高 2610 m の千畳敷 (図 1) において午前 9:00 に観測している測定データを使用した。

3. 結果と考察

3.1 降雪の堆積時期の推定

図 2 に 2005 年 11 月 1 日から積雪ピット調査の終了日である 2006 年 3 月 5 日までの千畳敷 (標高 2610 m) における午前 9:00 の気温 (上図) と、駒ヶ岳の西側の山麓にあるアメダス観測点 (木曾福島: 標高 750 m) における気温データから気温の低減率 ($\Delta 0.55^\circ\text{C}/100\text{ m}$) を用いて算出した標高

2000 m における日平均気温 (下図) を示す。千畳敷における午前 9:00 の気温について、11 月初旬までの気温は 0°C 以上の日が多かった。千畳敷において根雪が形成された日は 11 月 11 日であった。11 月中旬から 2 月 14 日までは連日 0°C 以下である。12 月 18 日に今シーズンの最低気温である -21.5°C を観測した。2 月下旬になると気温は上昇傾向となり、2 月 15 日と 2 月 28 日及び 3 月 2 日には、 0°C をわずかに上回った。千畳敷における午前 9:00 の気温と標高 2000 m における平均気温は、類似した変動を示していた。標高 2000 m における平均気温は、11 月上旬と 2 月 15 日に 0°C 以上となるが、これらの日以外は、いずれも 0°C 未満であった。また、すべての積雪ピット調査地点における各積雪層の雪温は、いずれも 0°C 未満であった。さらに、積雪断面の層位観測の結果は、積雪はほぼ全層で新雪からしまり雪であった。これらのことから、根雪の形成日からピット調査実施日までは、調査地域において融雪はほぼ

図 2 2005 年 11 月 1 日から 2006 年 3 月 5 日までの千畳敷 (標高: 2610 m) における午前 9:00 の気温 (上図) と標高 2000 m における平均気温 (下図) の変化。

起こっておらず、積雪は降雪堆積時の状態を保持しているものと考えられる。

本研究では、各地点における積雪中の化学成分の空間分布から、ひとつの山体におけるエアロゾルの輸送過程を考察することを目的としている。積雪全層をふたつの期間に分け、それぞれの期間の積雪層から化学成分特性を抽出した。

各積雪ピット調査地点における積雪中の nss-Ca^{2+} 濃度と Na^+ 濃度の鉛直プロファイルを図3に示す。Ichikuni (1978) は、降水中の nss-Ca^{2+} が黄砂によって高濃度になることを指摘している。そのため、降水中の nss-Ca^{2+} 濃度は、大気塵象のよい指標になると考えられる。図3において、すべての地点で nss-Ca^{2+} 濃度の大きなピーク（*で示したピーク）がみられる。これらの積雪深では、積雪断面の層位観測によって汚れ層が

確認された。汚れ層が確認された積雪層は、積雪全層で1層のみであった。また、これらの積雪層中の Na^+ 濃度は高い値を示している。木戸ら (1997) では、汚れ層と気象台や測候所での黄砂観測日とを対応させている。気象庁の黄砂情報では1月2日に黄砂飛来を観測しており、1月3日から積雪調査を行った3月5日まで黄砂飛来は観測されていない。1月2日午前9時には日本海上に寒冷前線を伴った低気圧があり、1月3日午前9時には冬型の気圧配置となった。寒冷前線通過後の寒気の吹き出しによって黄砂と高濃度の Na^+ が日本列島にもたらされたものと思われる。これらのことから、本調査地域における積雪中の汚れ層は1月2日の前後に形成された黄砂層と考えられる。

積雪中の化学成分濃度のピーク形成は、ひとつ

図3 積雪層中の nss-Ca^{2+} 濃度と Na^+ 濃度の鉛直プロファイル。図中の*は nss-Ca^{2+} 濃度が非常に高い層を示す。この層は積雪断面の層位観測での汚れ層と対応していた。図中の各破線の矢印で示した積雪層は、同時期に堆積したことを表し、この積雪層から降雪の堆積期間である Period A と Period B を推定した。

の湿性および乾性の沈着イベントによるものであると考えられるので、降雪の堆積時期として区切る深度はピークを形成する最下部が妥当である。そこで、すべてのピット観測地点において、上述した nss-Ca^{2+} 濃度のピークを形成する最下部で積雪層を区切った。そして、この積雪深の下部に降雪が堆積した期間を Period A、上部に堆積した期間を Period B とした (図 3)。本研究において、積雪全層と Period A の積雪層および Period B の積雪層の 3 つのパターンによる積雪中の化学成分特性について議論することが可能である。

3.2 積雪中のイオン組成

図 4 に各地点における積雪全層と各期間の積雪層中の陰イオン組成を示す。積雪全層の陰イオン組成について、E2500 と E2200 および W2050 では、 SO_4^{2-} の割合が小さく、 NO_3^- の割合が大きい。また、E2200 と W2050 では、 Cl^- の割合が他の地点に比べて大きい。東尾根上のふたつの地点における積雪全層中の NO_3^- の割合は、全 6 地点中で最も大きい値を示している。

次に、Period A と Period B に堆積した降雪の陰イオン組成の変化を検討する。E2200 を除くすべての地点において、Period B では Period A より SO_4^{2-} の割合が大きくなった。E2200 では、Period B は Period A よりわずかに SO_4^{2-} の割合が小さくなった。W2050、W2500、W2680 における陰イオン組成は、 SO_4^{2-} 主体で変動している。E

2500 と W2200 における積雪層中の陰イオン組成の変動因子は、 SO_4^{2-} と NO_3^- であるが、E2500 では、変動の主因子は SO_4^{2-} より、むしろ NO_3^- である。E2200 では、変動因子は NO_3^- と Cl^- である。このように、西尾根上のすべての地点における積雪層中の陰イオン組成の変動は、 SO_4^{2-} の影響を強く受けている。対して、東尾根上の E2500 と E2200 における積雪層中の陰イオン組成の変動は、地点によって SO_4^{2-} や Cl^- も影響するが、いずれの地点においても、 NO_3^- の影響を強く受けているといえる。これらのことは、西尾根と東尾根において化学成分の供給過程が異なる可能性を示唆している。

3.3 積雪中の化学成分濃度の地形的特性とその成因

積雪全層中と各期間の積雪層中の化学成分濃度と $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の空間分布を図 5 に示す。積雪全層と期間ごとの積雪層中の各化学成分濃度は、高度と明瞭な関係を示していない。積雪全層中と各期間の積雪層中の nss-SO_4^{2-} 濃度は、W2050 を除く西尾根上の各地点より東尾根上の各地点の方が低い値を示している。また、W2050 における積雪中の nss-SO_4^{2-} 濃度は、西尾根上の他の 3 地点に比べて低く、東尾根上の 2 地点と大差ない。東尾根上の 2 地点における積雪全層中と各期間の積雪層中の nss-Ca^{2+} 濃度は、西尾根上のすべての地点におけるそれよりも低い。積雪中の nss-SO_4^{2-} 濃度と nss-Ca^{2+} 濃度は、概ね西尾根よ

図 4 各地点における積雪中の陰イオン組成。(1)積雪全層中の陰イオン組成。(2)期間ごとの積雪層中の陰イオン組成。図中のアルファベットは各期間 (Period A と Period B) を、矢印の向きは時間の経過を示す。

図 5 積雪層中の化学成分濃度および $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比と高度との関係。

り東尾根の方が低い傾向があるといえる。偏西風によって山体に輸送されてきた空気塊は、最初に山体の西側に接触する。空気塊が雲粒子を形成する場合には、空気塊に含まれているエアロゾルは湿性沈着を山体西側で起す。また、雲粒子が形成されていない場合には、山体西側で乾性沈着を起す。そのため、山体を越えて東側に輸送された空気塊に含まれるエアロゾルの濃度は、相対的に山体を越える前よりも低くなるものと考えられる。つまり、西尾根より東尾根において積雪中の nss-SO_4^{2-} 濃度と nss-Ca^{2+} 濃度が低いことは、空

気塊中の nss-SO_4^{2-} 濃度と nss-Ca^{2+} 濃度が、山体西側に比べ東側の方が低いことを示している。しかしながら、積雪全層中の NO_3^- 濃度は、東西方向で違いがみられない。 NO_3^- 濃度は E2200 で最低値を示すが、E2500 では比較的高い値を示している。この傾向は、Period A や Period B における積雪層中の NO_3^- 濃度にもみられる。積雪中の NO_3^- 濃度が東西方向において差異が認められないことは、空気塊が山体西側から東側に輸送される過程において、空気塊中の NO_3^- 濃度が単純に減少するとは言いきれないことを示唆している。

冬季になると日本海に面した地域において降水中の nss-SO_4^{2-} の沈着量が増加することから、冬季にアジア大陸から日本へ偏西風に乗って化石燃料起源物質が輸送されていると推測されている (Satake and Yamane, 1992; Fukuzaki *et al.*, 1999 など). 大陸では、日本ほど排煙脱硫装置が普及しておらず、大気中への硫黄酸化物の放出量が多いと考えられている (Satake and Yamane, 1992). つまり、日本列島由来の空気塊に含まれる nss-SO_4^{2-} は、大陸由来のものに比べ相対的に低濃度である. そのため、日本列島由来の空気塊の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、大陸由来のものに比べ大きい値を示す. この $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の特性を利用して、柳沢ら (1996) は、山形県蔵王において積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比が低いことから、大陸の化石燃料起源物質が日本に飛来していることを示唆した. また、水上ら (2002) では、大陸からの大気汚染物質の輸送状況を把握するために、降水中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比を指標として用いている. 日本全国の低地部の 123 地点における冬季降水中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の平均値は 0.42 であった (Fukuzaki *et al.*, 1999).

本研究の調査地域における積雪全層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の平均値は 0.45 であり、日本の冬季降水中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の平均値である 0.42 に近い値を示す. しかし、Period A と Period B における積雪層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の平均値は、それぞれ 0.61 と 0.35 であり、日本の冬季降水中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の平均値と大きく異なる値を示す. Period A の積雪層は、Period B に比べ、相対的に日本列島由来のエアロゾルを多く含む空気塊によって形成されたと考えられる. しかし、本研究では、詳細な積雪層の形成時期を推定できなかったため、この $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の時間的な変動の原因を明らかにすることはできなかった. 原因のひとつとして、降雪時の気象条件の違いが空気塊へのエアロゾルの供給過程の違いを生じさせている可能性がある. 気象条件にともなう降雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の違いを解明することは、今後の課題である.

調査地域内の各地点における積雪層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、空間的なばらつきがみられる. 積雪全層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、W2050

図 6 2005 年 11 月 1 日から 2006 年 3 月 5 日までの午前 9:00 の輪島における 700 hPa での風向と千畳敷 (2610 m) における風向の割合の比較.

において最大値である 0.60 を示している (図 5). W2050 は各地点の中で最も高度が低く、空気塊に日本列島由来のエアロゾルを相対的に多く含むためであると考えられる. W2200 と W2500 および W2680 における積雪全層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、それぞれ 0.28, 0.38, 0.35 であり、E2500 と E2200 では、それぞれ 0.54 と 0.52 を示している. すなわち、本調査地域における積雪全層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、日本の冬季降水中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の平均値である 0.42 よりも、西尾根の W2200 と W2500 および W2680 では小さく、西尾根の W2050 と東尾根のふたつの地点では大きくなる. また、Period A と Period B における積雪層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の空間分布も、積雪全層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の空間分布と類似しており、W2050 と E2200 および E2500 における積雪層中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は西尾根の W2200 と W2500 および W2680 より大きい値を示している. このことは、山体東側では、高高度まで日本列島由来のエアロゾルを多く含む空気塊が輸送されていることを示唆している. 図 6 に 2005 年 11 月 1 日から 2006 年 3 月 5 日までの輪島における 700 hPa での風向と千畳敷 (2610 m) における風向の割合を示した. 輪島における風向

は、偏西風の影響により 60% 以上が西南西から西北西である。そのため、中央アルプスの主稜線は、連日のように西よりの風が吹く。一方で、風裏に位置する千畳敷(図 1)では、西南西から西北西の風はほとんど観測されず、25% が東北東から東南東、20% が東南東から南南東の風、25% が南南東から南南西の風と、東よりの風が卓越する。石原・日比(2000)は、急峻な山体を越える風を 3 次元的にシミュレートした。それによると、山体の登り斜面では風の流れは上昇を示し、山頂を越えると剥離流がみられる。この剥離流は開いた流線を形成する。すなわち、山体背後に形成され

る剥離流は、鞍部などから山体の背後に回り込んだ風が、山体の風下斜面に生じた上昇気流によって山頂まで持ち上げられた後に下流方向に流れる形をとる。本研究地域では、山体の西側や主稜線付近では西よりの風であるの対し、風下斜面上に位置している千畳敷では上昇気流が生じるため、東よりの風が卓越すると推測される。

積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の値が山体西側より東側で高いことと、山体西側と東側で風向が異なるから、ひとつの山体におけるエアロゾルの輸送過程は次のようになると考えられる。大陸由来のエアロゾルを多く含む空気塊は、偏西風によっ

図 7 nss-SO₄²⁻ と NO₃⁻ および nss-Ca²⁺ の沈着量ならびに積雪水量 (SWE) と高度との関係。

て、まず山体西側に接触する。その際、エアロゾルの多くは湿性あるいは乾性沈着を起し、空気塊中のエアロゾル濃度は減少する。山体を越えて東側に輸送された空気塊は、上昇気流によって山体東側の低空域から輸送されてきた日本列島由来のエアロゾルを多く含む空気塊と混合を生じる。混合した空気塊中のエアロゾルは山体東側で湿性あるいは乾性沈着を起す。混合した空気塊は、混合する前より日本列島由来のエアロゾルを多く含むので、積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は東側で高くなるものと推測される。

3.4 沈着量と積雪水量の空間分布

図 7 に積雪全層および Period A と Period B の積雪層における nss-SO_4^{2-} 、 NO_3^- および nss-Ca^{2+} の沈着量ならびに積雪水量と高度との関係を示す。各地点において、積雪水量は高度が上がると増加する傾向を示す。このことは、これまで一般的に知られている積雪水量は高度と直線的な増加を示すことに合致している (Yamada, 1982; 松山, 1998)。積雪全層および期間ごとの積雪層における nss-SO_4^{2-} と NO_3^- の沈着量は高度とともに増加する傾向を示すが、 nss-Ca^{2+} の沈着量は、高度と明確な関係を持たない。一般に、 nss-SO_4^{2-} や NO_3^- は乾性沈着をあまり起こさず、主に湿性によって沈着し、 nss-Ca^{2+} は乾性・湿性の両方の形態によって沈着することが知られている (鈴木, 1983)。つまり、積雪中への nss-SO_4^{2-} や NO_3^- の沈着量は、積雪水量に影響される。一方、各地点の積雪中の nss-SO_4^{2-} 濃度と NO_3^- 濃度は高度との明確な関係を示さない (図 5)。以上のことから、各地点における nss-SO_4^{2-} と NO_3^- の沈着量は、これらの濃度ではなく、積雪水量によって決定されているといえる。一方、 nss-Ca^{2+} は乾性でも沈着するので、沈着量は積雪水量や高度と明確な関係を持たなかったであろう。

nss-SO_4^{2-} の沈着量は、東西で明確な違いを示さなかった。 NO_3^- の沈着量は、E2500 において積雪全層、期間ごとの積雪層で最大値を示す。また、 NO_3^- の沈着量は E2200 と W2200 で大きな違いは認められない。積雪中の nss-SO_4^{2-} 濃度は西尾根で高い値を示すのに対し、 NO_3^- 濃度の東西方向における差異は認められない (図 5)。これらのことから、 nss-SO_4^{2-} と NO_3^- の沈着量の東

西での違いは、東西における積雪中の各化学成分濃度の違いによるものであると考えられる。積雪水量は、西尾根より東尾根の方が多い傾向を示した。主稜線付近は森林限界高度以上に位置し、防風林の役目を果たす森林が存在せず偏西風の強い影響を受けるため、降雪の堆積が起こりにくく、雪は山体の東側に輸送されているものと考えられる。そのため、山体東側の積雪には、主稜線付近から輸送されてきた雪が含まれている。特に、E2500 は主稜線に距離的に近いため、その積雪水量は非常に多い。つまり、山体東側における化学成分の沈着量は、主稜線付近から輸送されてきた雪と東側の降雪に含まれる化学成分量の総和であるといえる。なお、ここで述べている降雪とは、再堆積を起していない雪のことである。W2200 と W2500 および W2680 は、調査地域内でも標高が高く、偏西風を直接受ける山域の西側に位置している。これらの地点における積雪は、他の地点より $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比が低い (図 5)、大陸由来のエアロゾルの割合がより多い空気塊によって沈着を起していると考えられる。そこで、調査地域内で最も高度が高い主稜線付近の降雪も、大陸由来のエアロゾルを多く含み、降雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の値は小さいものと推測される。この主稜線付近の降雪の一部が、山体東側で再堆積を起す。つまり、山体東側における積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の値は、主稜線付近から輸送されてきた雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の影響を受けていると考えられる。主稜線付近から輸送されてきた雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の値は、山体東側における積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比の値よりも小さいので、山体東側における降雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比よりも大きい値を示すものと予想される。3.3 で述べたように、山体東側の空気塊は、山体東側の低空域からの上昇気流によって日本列島由来のエアロゾルを多く含むと考えられるが、山体東側での降雪中の化学成分は、積雪中の化学成分によって示される以上に日本列島由来のエアロゾルの影響を受けている可能性がある。

4. まとめ

山岳地域である中央アルプス駒ヶ岳東西尾根に

において、冬季降水中の化学成分の空間分布を把握するとともに、ひとつの山体を越えてエアロゾルが輸送される過程を、冬季降水中の化学成分の変化を通して明らかにすることを目的として研究を行った。その結果、以下の事が明らかになった。

- 1) 積雪中の $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 比は、西尾根より東尾根の方で高い値を示していた。このことは、東尾根における積雪には、日本列島由来のエアロゾルをより多く含む空気塊によって化学成分が供給されていることを示唆している。山体西側や主稜線付近では偏西風の影響により、西よりの風が卓越していた。風裏となる千畳敷では上昇気流により、東よりの風が支配的であった。
- 2) 東尾根上、特に E2500 における積雪水量は、西尾根に比べて、非常に多かった。東尾根では、主稜線付近からの雪の輸送による再堆積が起こっていると考えられる。
- 3) 1) と 2) の結果から、ひとつの山体におけるエアロゾルの輸送過程は次のようになると考えられる。大陸由来のエアロゾルを多く含む空気塊は、まず山体西側に接触し、エアロゾルの多くを湿性あるいは乾性によって沈着させる。そのため、空気塊中のエアロゾル濃度は減少する。山体を越えて東側に輸送された空気塊は、上昇気流によって山体東側の低空域から輸送されてきた日本列島由来のエアロゾルを多く含む空気塊と混合する。これらのエアロゾルは山体東側に供給される。一方、山体東側には、偏西風によって、主稜線付近から大陸由来のエアロゾルを多く含むと予想される雪が輸送される。

ひとつの山体において、降雪には、アジア大陸から長距離輸送されてきた化学成分のほかに、極めて局地的な化学成分も無視できない程度取り込まれていることがわかる。また、山体東側へのエアロゾルの輸送は、西側に比べ、複雑な過程を経ているといえる。本研究において、今まで、モデル上でのみ表現されていた山体風下側の上昇気流を積雪中の化学成分から示した事は、今後の山岳雪氷化学の研究、特に大気汚染物質の定量的な評価に関して重要な知見になるものと思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、千畳敷における貴重な気象データを中央アルプス観光株式会社から提供していただきました。また、査読者と編集委員の方々から本論文に対し迅速かつ適切な助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

文 献

- Fukuzaki, N., Oshio, T., Noguchi, I., Matsumoto, M., Morisaki, S., Oohara, M., Tamaki, M. and Hiraki, T., 1999: Spatial differences of chemical features of atmospheric deposition between rainy season and winter in the areas facing to the Japan Sea, Japan. *Chemosphere*, **38**, 411-423.
- Ichikuni, M., 1978: Calcite as a source of excess calcium in rainwater. *J. Geophys. Res.*, **83**, 6249-6252.
- 井上治郎・奥山和彦・渡辺興亜・伏見硯二, 1985: 中国地方、山岳地域の降雪特性。雪氷, **47**, 97-104.
- 石原 孟・日比一喜, 2000: 急峻な山を越える乱流場の数値予測。日本風工学会誌, **83**, 175-188.
- 木戸瑞佳・長田和雄・矢吹裕伯・飯田肇・瀬古勝基・幸島司郎・対馬勝年, 1997: 立山・室堂平における積雪層の堆積時期の推定。雪氷, **59**, 181-188.
- 松山 洋, 1998: 日本の山岳地域における積雪水当量の高度分布に関する研究について。水文・水資源学会誌, **11**, 164-174.
- 水上昭弘・鳥山成一・島田和保・大西勝典, 2002: 酸性降水物の影響因子に関する研究 (第 5 報)。富山県環境科学センター年報, **30**, 1-8.
- Satake, H. and Yamane, T., 1992: Deposition of non-sea salt sulfate observed at Toyama facing the Sea of Japan for the period of 1981-1991. *Geochem. J.*, **26**, 299-305.
- 鈴木啓助, 1983: 札幌における降雪の化学的特性—とくに海塩起源物質濃度の成因について—。地理学評論, **56**, 171-184.
- 鈴木啓助, 1984: 札幌における積雪中の化学物質濃度変動の空間分布。地理学評論, **57**, 349-361.
- Suzuki, K., 1991: Influence of urban areas on the chemistry of regional snow cover. Seasonal snow-packs, eds. Davies, T.D., Tranter, M. and Jones, H. G., Springer-Verlag, Berlin, 303-319.
- 鈴木啓助, 2000: 我が国における雪氷化学研究。雪氷, **62**, 185-196.
- 上野健一, 1993: 日本海沿岸から脊梁山脈にかけた新雪中の主要化学組成の分布。地理学評論, **66A**, 401-415.
- Watanabe, O., Kanamori, N., Sugimoto, A., Iida, H. and Higuchi, K., 1986: Regional characteristics

snow cover in the mountain region of central Japan. J. Earth Sci. Nagoya Univ., **34**, 67-108.
Yamada, T., 1982: Studies on accumulation-ablation processes and distribution of snow in mountain

regions, Hokkaido. Contr. Inst. Low Temp. Sci., A **31**, 1-33.
柳沢文孝・中川 望・安部博之・矢野勝俊, 1996: 山形蔵王の積雪と着氷の化学組成. 雪氷, **58**, 393-403.

Spatial variability of snow chemistry in Mt. Komagatake, Japanese Central Alps

Motoki TANAKA¹⁾ and Keisuke SUZUKI^{1), 2)}

*1) Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University,
Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621*

*2) Institute of Mountain Science, Shinshu University,
Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621*

Abstract: The spatial variability of the chemical constituents of the snow layers on the east-west ridge in the high mountains of the Japanese Central Alps was examined. A comparison of the nss-SO_4^{2-} and nss-Ca^{2+} concentrations in the snow layers on the eastern and western ridges revealed that the chemical concentrations were higher on the western ridge. On the other hand, the NO_3^- concentration in the snow layers on the eastern ridge was comparable to that on the western one. In addition, the $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ ratio for the snow layers on the eastern ridge was greater than that on the western one. Furthermore, the prevailing westerlies raged at the western and alpine parts of the study area throughout the snowy season. In contrast, the easterlies were predominant in the eastern part of this study area. Therefore, we infer that the snow on the eastern ridge, in comparison to that on the western one, is under relatively greater influence of the local emission of the chemical constituents.

(2006 年 10 月 26 日受付, 2006 年 12 月 13 日改稿受付, 2007 年 1 月 19 日再改稿受付, 2007 年 1 月 22 日受理
討論期限 2007 年 11 月 15 日)