

# 塩沢において観測された降雪の化学的性状と黄砂の影響について

伊豫部勉\*, 和泉 薫\*, 河島克久\*, 飯倉茂弘\*\*, 遠藤 徹\*\*

## Effect of Kosa on the chemical properties of daily snowfall in Shiozawa, southern Niigata, central Japan

by

Tsutomu IYOBE\*, Kaoru IZUMI\*, Katsuhisa KAWASHIMA\*,  
Shigehiro IKURA\*\* and Toru ENDO\*\*

### はじめに

降水に取り込まれる主な化学物質は、硫黄酸化物・窒素酸化物などの人為起源物質や、火山噴出物、生物、そして海洋からの自然起源物質など、さまざまな起源が存在する。新潟県をはじめとする日本海沿岸地方の降雪において主要な割合を占める物質は、海塩起源物質である(和泉, 1984; 上野, 1993; 鈴木・遠藤, 1994)。これは、日本海側の降雪特性のひとつとして、シベリア気団が発達し、海水温の高い日本海上へと吹走し、降雪雲が海洋上で発達することに起因している。しかし、近年では日本海沿岸地方の降雪中に含まれる人為起源の酸性化物質の増加が危惧されている。さらに、大陸の乾燥・半乾燥地域において強風によって舞い上がる近年のダスト多発現象(黒崎・三上, 2002)と、地上付近では黄砂が確認されない場合でも、上空(自由対流圏)では黄砂層が観測されることがあり(渡辺, 2005)、日本海側の大気環境の長期的な変動を予測する上で、複合化する大陸の影響についての見解がますます重要視されている。

また、降雪中の化学成分の供給源や濃度形成を考える際、降雪雲の発達や降雪特性は地形の影響により単純ではないため(力石・登城, 2004)、さまざまな地域における降雪現象と化学物質濃度の知見の蓄積が必要であると考えられる。

本報では、冬季降水の化学的特性についてあまり調査例が存在しない日本海内陸部において、一日単位で降雪を採取・分析し、化学成分の起源について考察するとともに、地上付近で黄砂現象が観測されなくても、黄砂粒子が降雪の化学的特性に影響を与える可能性について検討を行った。

### 調査概要

#### 調査地

調査は新潟県南魚沼市(旧塩沢町)に位置する財団法人鉄道総合技術研究所塩沢雪害防止実験所の露場(以下、塩沢実験所と略す。図-1, 37°27' N, 138°51' E, 170m a. s. l.)において行った。南魚沼市はわが国有数の豪雪地として知られ、

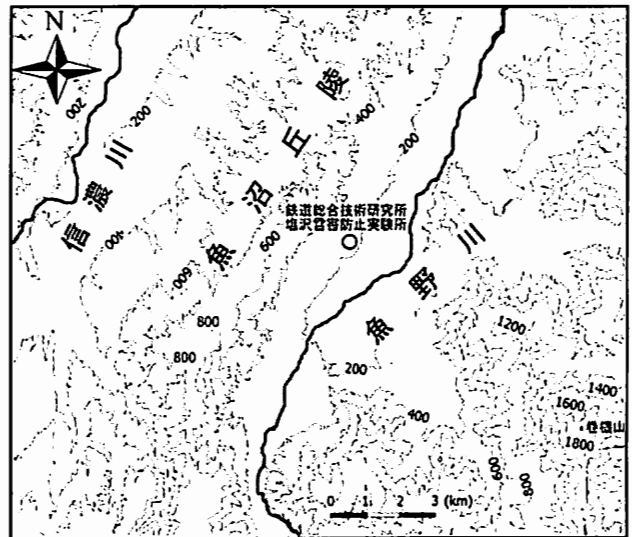


図-1 南魚沼市塩沢周辺の地形図(図中の等高線は200m間隔)

基幹産業は稲作を主体とした農業が盛んな地域である。塩沢実験所は魚野川本川とその支川によって形成された盆地底に位置し、標高600~800mの魚野丘陵と標高2000mの巻機山によって取り囲まれている。1948年~1985年に塩沢実験所において記録された年最大積雪深の平均値は2.3mで、年平均気温は11.6℃、月平均気温の最暖は8月の25.2℃、最寒は1, 2月の-0.5℃である。年間降水量は約1,900mmで、冬季(12月~3月)の降水量は半数を占める(須藤ほか, 1987)。

#### 調査方法

観測は2004-05年冬季の12月から3月まで行った。採雪は、降雪板上に堆積した日界9:00(降雪捕集期間が当日9:00~翌日9:00)とする1日毎の降雪を清浄なビニール袋に入れ、直ちに塩沢実験所内の冷凍庫に保管した。2004-05年冬季の降雪試料は、計56個得られた。降雪試料は新潟大学積雪地帯災害研究センターに持ち帰り、室温で融かした後、化学分析に供した。

採取した降雪の融解水は、pH・電気伝導度計(D-54, Horiba

\*新潟大学積雪地帯災害研究センター

\*\*鉄道総合技術研究所防災技術研究部

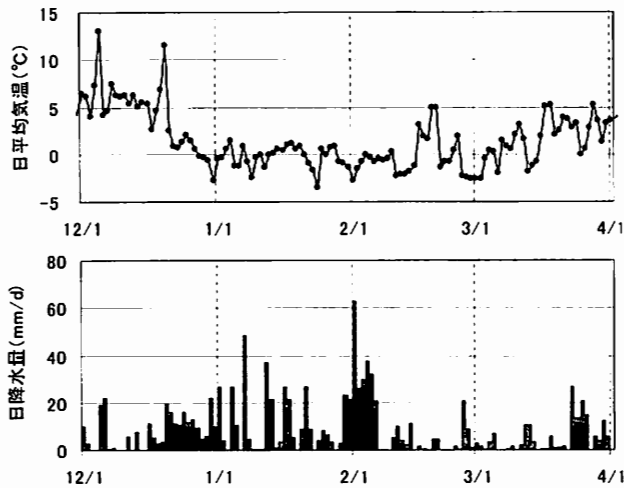


図-2 塩沢雪害防止実験所で観測された2004-05年冬季(12月～3月)の日平均気温および降水量の時系列変化

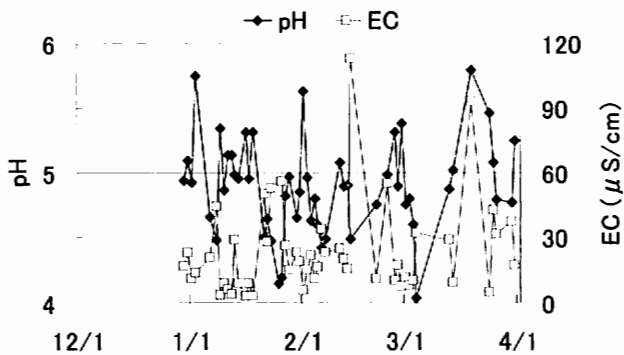


図-3 降雪のpHと電気伝導度(EC)の時系列変化

製)を用いてpHおよびECを、さらに孔径0.45 μmのメンブランフィルターで濾過した融解水についてイオンクロマトグラフ(DX-120, Dionex製)を用いて主要無機イオン濃度(Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)を計測した。

### 結果および考察

#### 塩沢における2004-05年冬季気象の概要

塩沢実験所において計測されている気象データをもとに求めた2004-05年冬季の日平均気温および日降水量の推移を図-2に示す。2004年12月上・中旬は寒気の影響がほとんどなく、移動性高気圧に覆われことが多かった。12月下旬以降、冬型の気圧配置となることが多く、寒気が入るようになった。そのため、日平均気温は2004年12月中旬まで2.7～13.0°Cの間で大きく変動していたが、以後、2005年2月上旬にかけて-3.5～-2.5°Cの範囲で推移した。2月中旬から3月上旬にかけて日本付近を短い周期で低気圧が通過し、また冬型の気圧配置が長続きしなかったため、0°C付近でやや大きな増減を繰り返し、3月中旬以降0°C以上となった。

一方、2004-05年冬季の総降水量は894mmであり、さらに近藤(2000)の雨雪判別式を用いて雨雪を分類すると、その76%の626mmが降雪によってもたらされていることがわかる。2004年12月下旬以降、断続的な寒波の流入や低気圧の通過に伴い降雪が本格化した。1月中旬と2月上旬の2度にわたりまとまった降雪がもたらされ、2月5日～6日にかけて最大積雪深が3mを超える昭和61年以来19年ぶりの豪雪年であった。

表-1 塩沢雪害防止実験所で採取された降雪の化学成分濃度の概要

	加重平均値	標準偏差	変動係数	最小値	最大値
pH	4.9	0.4	0.1	4.0	5.8
EC	20.6	21.4	0.9	3.1	112.8
Na <sup>+</sup>	85.9	125.1	1.3	1.0	705.3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	9.0	17.5	1.2	1.0	100.5
K <sup>+</sup>	2.9	4.6	1.2	0.0	19.0
Mg <sup>2+</sup>	17.3	27.8	1.3	0.7	139.5
Ca <sup>2+</sup>	10.3	14.5	1.0	3.1	93.3
Cl <sup>-</sup>	97.9	155.6	1.4	2.3	880.8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.6	20.1	1.1	5.4	111.1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	35.3	29.9	0.7	8.8	137.4
EC: μS/cm					ion: μeq/L

#### 降雪の化学的特性

表-1に降雪の化学成分濃度の概要を示す。さらに、観測期間中に採取された全ての降雪のpHと電気伝導度(EC)の変動を図-3に示す。冬季内での顕著な変動傾向は、pH・電気伝導度ともに認められなかった。pHの加重平均値は4.9であり、大気中の炭酸ガスが溶解し平衡状態に達した時に示すpH5.6を超えた降水はわずか3試料(1月2日, 2月1日, 3月19日)に過ぎなかった。このことから、当該地域における殆どの降雪は、酸性雪であることがわかる。一方、電気伝導度の加重平均値は20.7 μS/cmであり、2月14日と3月19日には100 μS/cmに達する高濃度の化学物質を含んだ降水も見られた。降雪中に含まれる主要な化学成分は、Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>であり、Na<sup>+</sup>およびCl<sup>-</sup>の標準偏差は他のイオン種と比較して著しく大きいことから、この2種の変動量は特に大きいことがわかる。

#### 降雪中の化学成分の起源

##### 海塩起源物質

海水中の海塩濃度は場所や深さにより多少変化するものの、化学成分間の存在比はほとんど一定である。ここでは、日々の降雪中に取り込まれている各化学成分の起源を推定するため、まず海水に含まれるNa<sup>+</sup>を基準とした他の化学成分の濃度比を求め、次に降雪中の濃度比とを比較することで、降雪中の海水起源物質の含有量の推定を行った。

図-4に降雪中のNa<sup>+</sup>濃度とCl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度との関係を示す。図中の実線は、海水中のNa<sup>+</sup>と各化学成分との濃度比を表す。図-4から、降雪中のNa<sup>+</sup>に対するCl<sup>-</sup>およびMg<sup>2+</sup>の濃度比はほぼ一定で、海水での濃度比を表す実線に乗っていることがわかる。従って、これらの化学成分は海洋性起源であると考えられる。次に、Na<sup>+</sup>濃度とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>およびCa<sup>2+</sup>濃度との関係について大まかに見ると、両者の濃度の関係は調和がとれている傾向が見られ、これは海水起源の塩分(例えば、CaSO<sub>4</sub>)が降雪の一部に含まれていることを示す。しかし、ほとんどの試料においてSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>およびCa<sup>2+</sup>濃度が海水比から期待される値よりも上回っていることから、いずれの降水にも非海塩性起源(non-sea salt, nss-)のnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>およびnss-Ca<sup>2+</sup>が含まれていることを示唆する。以上の結果から、降雪中の主要なイオンであるNa<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>は海塩起源であると言える。これは、降雪粒子が落下する際に、季節卓越風によって日本海から供給される海塩粒子を取り込むこと

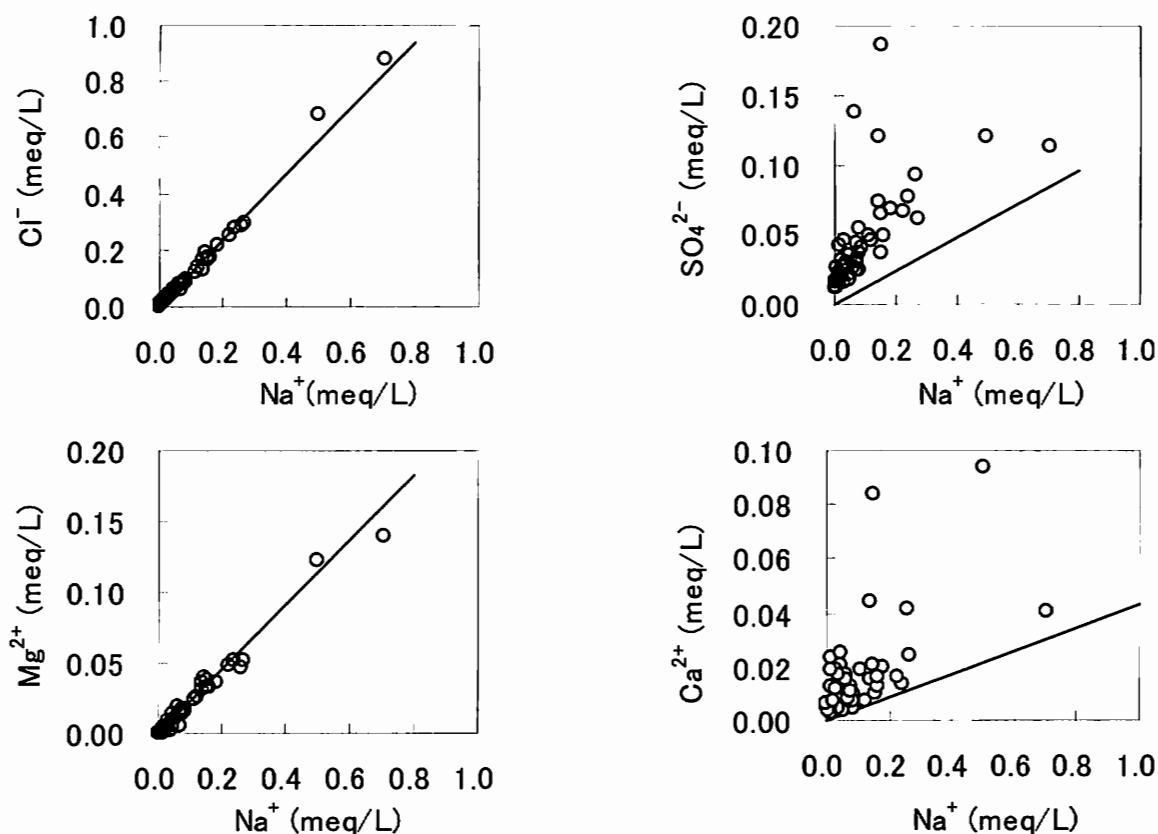


図-4 降雪中のNa<sup>+</sup>濃度と各化学成分濃度との関係(図中の実線は、海水中のNa<sup>+</sup>と各化学成分との濃度比を表す)

(wash-out)や、降雪雲中の雪片の形成過程において、海塩が凝結核として氷晶核が付着すること(rain-out)に起因していると考えられる。

また、表-1で示した海塩を起源とする物質の濃度の変動が大きい理由のひとつとして、降雪時の気象擾乱が降雪時の海塩起源物質の濃度に影響を及ぼしている可能性が考えられる。鈴木・遠藤(1994)は、十日町において1991年～1993年冬季に降水を採取してNa<sup>+</sup>濃度と気象条件との関係を検討した結果、冬季降水中に含まれるNa<sup>+</sup>濃度が、季節風時の降雪および低気圧時の降雪、さらに対流混合層の高度によって異なることを指摘している。すなわち、冬型の気圧配置時の寒気の吹き出しによる降水ではNa<sup>+</sup>濃度が高く、輪島での対流混合層も高くなるのに対して、日本付近を低気圧が通過した際の降水の場合には、対流混合層の高さも低く、Na<sup>+</sup>濃度も小さくなる。この現象は、降雪中の海塩起源物質の濃度の形成要因として重要であると考えられる。

降雪中の全イオンに対する海塩起源の割合について平均値を求めると、63%が得られる。塩沢における冬季降水中に含まれる化学成分の約6割が海塩を起源とすることがわかる。鈴木・遠藤(1994)は十日町において冬季に降水を採取した結果、降水中に占める海塩起源物質の割合として68%(3冬季平均値)を得ている。本研究で得られた塩沢の値は、13km北西方向に離れた十日町での値よりも若干小さい。特に季節卓越風時の降雪中に見られる海塩起源物質の空間分布について、上野(1993)は海塩粒子を中心として形成された雲粒が、海岸平野に沿った一番目の山脈の地形性降水で降下してしまい、内陸での降水には雪粒子の発達に海塩核の働きがほとんどな

いことを指摘している。事実、塩沢と日本海の間には、冬季卓越する北西風ならびに雪雲の侵入方向に対して直交する東頸城丘陵と魚沼丘陵とが存在し、ちょうど塩沢は魚沼丘陵の背域に位置する。そのため、季節風が1つ目の東頸城丘陵で上昇して降雪をもたらした際に雪雲中の海塩核が消費されてしまうため、降雪中の海塩起源物質は少なくなる。さらに、魚沼丘陵による雪雲の活性化効果によって降雪が起こっても、その背域に位置する塩沢の降雪中の海塩起源物質濃度は、十日町のそれと比較して少なくなると推察される。

#### 非海塩起源物質

海塩起源物質が降水に取り込まれた際に酸性化を引き起こすことは無い。それ故、前節で示した降雪中の非海塩性起源物質の存在とそれらの多寡は、pHの時系列変化(図-3)を解釈する上で重要な指標となる。pHを下げる酸性化物質としてnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>およびNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、中和する塩基性物質としてNH<sub>4</sub><sup>+</sup>およびnss-Ca<sup>2+</sup>が主に挙げられる。そこで、観測期間中に採取された降雪の分析結果をもとに、酸性化物質(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)と塩基性物質(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>+nss-Ca<sup>2+</sup>)の残差とpHとの関係を図-5に示す。酸性化物質と塩基性物質とが相殺し、それらの残差が0付近を示す試料は1例のみで、全体的に酸性化物質が過剰(残差が0以上)となる傾向が見られた。

一方、塩基性物質の方が酸性化成分よりも若干多い試料が2例ほど見られ、それらの残差は0以下、すなわちアルカリ側に位置していることがわかる。ちなみに、今回の観測結果から、pHの最大値:5.79は、3月18日9:00～19日9:00の降雪試料に見られ、2番目に高い値は1月1日9:00～2日9:00の降水に相当する(図-3)。この高いpHを示す降水試料

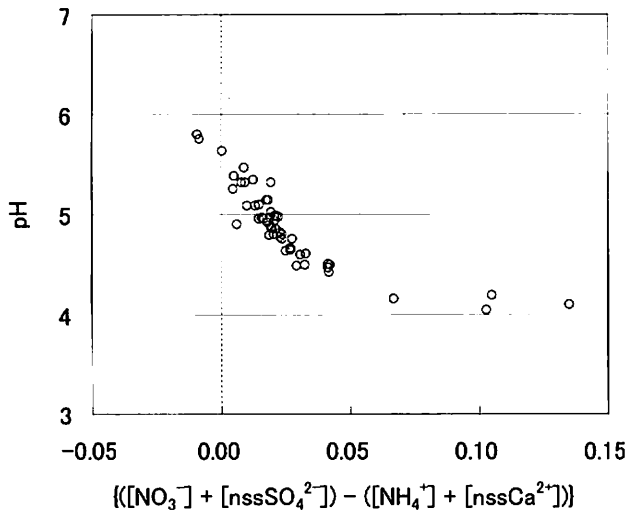


図-5 酸性化物質と塩基性物質の残差とpHとの関係

が化学組成にどのような違いが見られるのかを評価するため、図-6に非海塩起源物質( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ )の時系列変化をpHと併せて示す。

先ず塩基性物質に注目すると、2種類の濃度には明瞭な差が見られなかったのに対して、酸性化物質では $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 濃度が $\text{NO}_3^-$ に比べて相対的に高く推移していることがわかる。このことから、大きな汚染源が周辺に存在しない塩沢でも降水の酸性化は、主として $\text{nss-SO}_4^{2-}$ によるところが大きいと言える。一般に硫黄の発生源として硫化物系燃料の燃焼、火山、微生物等が考えられている(太田, 1990)。特に、日本海沿岸地域の冬季降水中の $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 濃度は、太平洋地域に比べると高く(酸性雨対策検討会, 2003)、季節風の卓越時に大陸から輸送されている可能性が示唆されている(大泉ほか, 1991)。

1月25日・26日に見られたイオン成分の大きなピークは、低いpHと一致していることがわかる(図-6)。さらにイオン組成を詳しく見ると、酸性化物質の方が塩基性物質よりも多く含まれている。両日の気象概況は、24日～25日前半にかけて日本海上を低気圧が通過し、25日は一時的に冬型の気圧配置となるが、26日には本州南岸を低気圧が通過した。

これまで、降雪の化学的特性に影響を及ぼす要因として、降雪時の気圧配置や風向について議論されてきた(和泉, 1984; 泉ほか, 1996; Ogawa, *et al.*, 1998)。泉ほか(1996)は、1月中旬から2月中旬にかけて札幌市内の大気環境の異なる3地点で、降雪の採取を短期間で行い、降雪の酸性度と気圧配置の違いについて調べた。その結果、低いpHは低気圧性の雪雲からの降雪であり、この理由として、低気圧は擾乱規模が大きく、発生・発達・移動過程で季節風による降雪より多くの酸性化物質を取り込むことを指摘している。本観測で得た1月25・26日の低いpHも同様の機構であることが予想され、同時期の高層天気図からも低気圧の発生や発達段階で大陸からの吹き込みがあり、大陸を起源とする酸性化物質が雲内に取り込まれ長距離輸送があった可能性はある。勿論、大陸ばかりでなく、風系によっては日本各地の都市圏から放出された汚染物質を取り込んでいることも考えられるので、全ての酸性化物質が大陸起源とは一概には言えない。

一方、3月19日に見られる非海塩起源物質のピークは、高

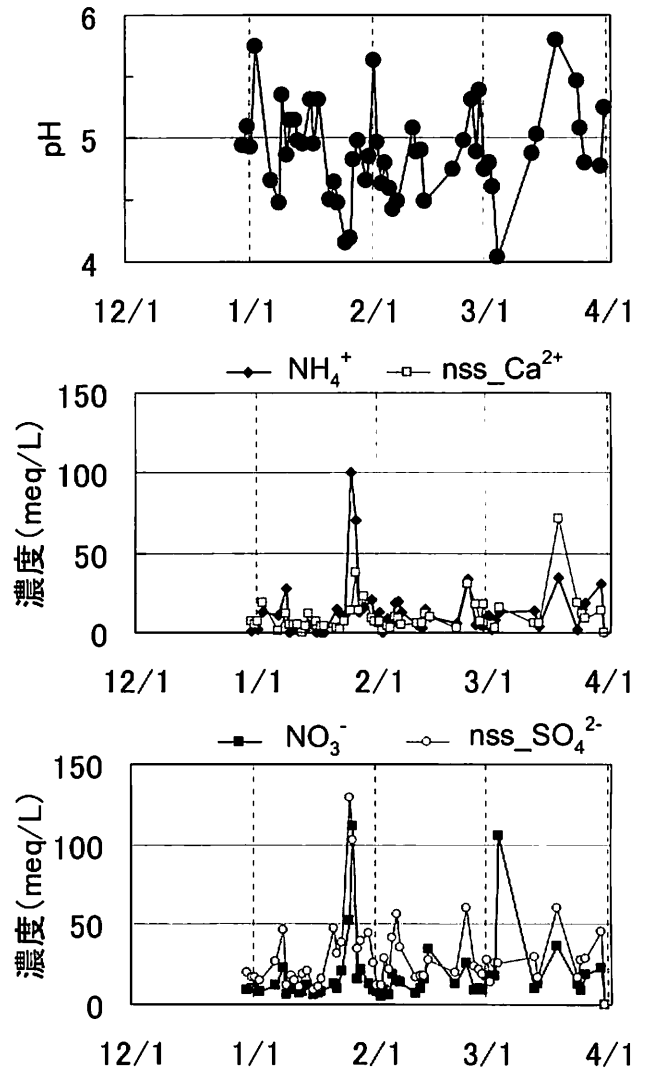


図-6 塩基性物質( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$ )および酸性化物質( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ )の時系列変化

いpHと一致する。冬季間、 $\text{NH}_4^+$ 濃度と明瞭な差が見られなかった $\text{nss-Ca}^{2+}$ 濃度は、3月19日に $\text{NH}_4^+$ を上回り、さらに2つの酸性化物質の濃度よりも大きかった。このことは、酸性汚染物質とは別に、高濃度の $\text{Ca}^{2+}$ をもたらす新たな供給源が降雪時に存在した可能性を示唆する。なお、降雪時の気象概況は冬型の気圧配置であった。この高濃度の $\text{Ca}^{2+}$ をもたした要因として、同時期に日本各地で記録された黄砂現象の影響の可能性が示唆された。

#### 降雪の化学的性状に及ぼす黄砂の影響

2004年12月～2005年3月の間、日本各地の気象台において記録された黄砂に関連する煙霧・砂じんあらし等の現象を調べたところ、2月23日～25日と、高濃度の $\text{nss-Ca}^{2+}$ が出現した3月18日に確認できた(財気象業務支援センター編, 2005)。3月18日の場合、関東・北陸地方以西のエリアにある15地点の気象台において、煙霧・砂じんあらし等の現象が記録されている。なお、当日と前後数日を含めて新潟県内の気象官署(新潟, 高田, 相川)では黄砂現象が観測されていない。この関東以西の地上付近で記録された大規模な黄砂が、塩沢の降雪中に含まれる高濃度の $\text{nss-Ca}^{2+}$ の起源であるのか現時点では不明である。

非海塩性のCa<sup>2+</sup>の発生源に関して、鶴田(1986)は都市域の降水に道路ダスト中のCa<sup>2+</sup>が含まれていることを指摘しており、鈴木(1984)は札幌郊外の積雪の化学組成の分析から過剰なCa<sup>2+</sup>の起源とセメント工場の立地との関係を示唆している。観測期間中に見られた高濃度のnss-Ca<sup>2+</sup>は、塩沢のように農業を主体とした地域を中心に排出されたとは考えにくい。

一方、降水のアルカリ化と黄砂現象との関連性について、渡辺(2005)が中部山岳域(標高:2770m)で発生する霧水を、松木ほか(2005)が山形県蔵王(標高:1661m)で過冷却水滴が樹木に衝突して形成された着氷を採取し化学分析した結果、観測期間中、頻繁に見られる酸性試料とは別に、アルカリ性試料が一部含まれていることを報告している。この原因のひとつとして、渡辺(2005)は霧が発生していた期間の後方流線解析を行った結果、山岳域の上空を覆う空気塊が、大陸の乾燥地域(ゴビ砂漠や黄土高原上空、タクラマカン砂漠)を起源としていることから、地上付近において黄砂現象が観測されない場合でも、上空(自由対流圏)では弱い黄砂層が存在し、それが降水のアルカリ化に寄与している可能性を指摘している。

通常、気象官署が記録する大気塵象は目視による観測結果(視程が10km未満のもの)に基づいており、降水時には観測されにくく、同じ新潟県内でも黄砂や煙霧の影響を受けている降水が観測されることはあると思われる。いずれにせよ、3月18日に関東以西の地上付近で記録された大規模な黄砂粒子が、塩沢の降雪中に含まれる高濃度のnss-Ca<sup>2+</sup>の起源であるのか現時点では不明である。今後、上空の黄砂層と降雪をもたらし降雪雲との位置的対応、さらに異なる高度での降雪を採取することにより、雲内、雲底下での黄砂粒子の取り込み過程について解明する必要がある。

## まとめ

本報では、冬季降水の化学的特性についてあまり調査例が存在しない日本海内陸部において、一日単位で降雪を採取・分析し、化学成分の起源について考察するとともに、地上付近で黄砂現象が観測されなくても、黄砂粒子が降雪に含まれる可能性について検討を行った。その結果得られた知見は以下の通りである。

- 1) 塩沢における降雪のpHの平均値は4.9であり、周囲に人為的汚染源の影響が見られない塩沢でも降水は酸性化していた。
- 2) 降雪に含まれる化学物質の63%がNa<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup>などの海塩起源物質であり、鈴木・遠藤(1994)が十日町において得た値(68%)よりも小さい。これは、塩沢と日本海の間、冬季卓越する北西風および雪雲の侵入方向に対して直交する東頸城丘陵と魚沼丘陵が存在するため、季節風が1つ目の東頸城丘陵で上昇して降雪をもたらし際に、雪雲中の海塩核が消費されてしまうことに起因していると推察される。
- 3) 非海塩起源物質のうち、酸性化物質であるnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>に比べて相対的に大きく、降雪の酸性化は、主にnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>によるところが大きい。汚染源が周辺に存在しない当該地域へ輸送される汚染物質の影響が示唆された。

4) 観測期間中、高濃度のnss-Ca<sup>2+</sup>が含まれていた降雪のpHは最大値:5.79を示した。この降雪が観測された日は関東以西で黄砂現象が記録された日と一致することから、黄砂や煙霧の影響を受けた降雪が塩沢で観測された可能性はあると考えられる。

今後の課題として、本報ではあまり言及しなかった当該地域の降雪特性(山雪、里雪、低気圧型)と降雪の化学的特性を、より短時間の降雪採取により明らかにし、さらに塩沢の地形的特徴でもある盆地における大気の大気鉛直構造(安定層の発達や冷気湖の形成)が及ぼす局地的スケールでの物質輸送の研究について取り組みたい。

## 謝辞

塩沢雪害防止実験所において降雪試料を採取するにあたり、南魚沼市塩沢の高橋正夫氏に多大なご協力をいただいた。ここに記し、深甚なる謝意を表する次第である。

## 文献

- 和泉 薫(1984)新潟における新積雪の密度と電気伝導度。新潟大災害研年報, 6, 103-109.
- 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成分の分布。地理学評論, 66A-7, 401-415.
- 鈴木啓介・遠藤八十一(1994)冬季降水中の海塩起源物質濃度と気象条件。雪氷, 56, 233-241.
- 黒崎泰典・三上正男(2002)東アジアにおける近年のダスト多発現象とその原因。地球環境, 7, 233-242.
- 渡辺幸一(2005)山岳域における霧水中の化学成分にみられた夏期のバックグラウンド黄砂の影響。天気, 52, 533-538.
- 力石國男・登城ゆかり(2004)秋田県横山盆地における降雪特性。雪氷, 66, 567-580.
- 須藤伊佐夫・藤井俊茂・遠藤 徹・蛭沢勝三・今井俊昭(1987)塩沢の降雪、積雪。鉄道技術研究所速報, A-87-98, 1-47.
- 近藤純正(2000)水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—。朝倉書店, pp348.
- 太田幸雄(1990)大気エアロゾル。大気の化学, 日本化学会編, 学会出版センター編, 123-145.
- 酸性雨対策検討会(2003)第3次酸性雨全国調査報告。全国環境研会誌, 28, 1-30.
- 大泉 毅・福崎紀夫・森山 登・漆山佳雄・日下部実(1991)硫黄同位体から見た大気降下物中硫黄の供給源—新潟県の場合—。日本化学誌, 5, 675-681.
- 泉 裕明・菊地勝弘・加藤禎博・高橋暢宏・上田 博・遊馬芳雄(1996)。降雪機構からみた北海道の酸性雪。天気, 3, 147-158.
- Ogawa N., T. Adzuhata and M. Kajikawa (1998) Chemical characterization of acid snowfall in the coast and inland areas of Akita Prefecture in Japan. 雪氷, 60, 143-156.
- 財気象業務支援センター(2005)気象庁月報CD版, 平成16年12月。
- 鶴田治雄(1986)酸性雨の調査研究の現状。環境研究, 61, 70-85.
- 鈴木啓介(1984)札幌における積雪中の化学物質濃度の空間分布。地理学評論, 57A-5, 349-361.
- 松木兼一郎・山下千尋・柳沢文孝・阿部 修(2005)山形県蔵王山で採取した着氷の化学組成と粒子組成。雪氷, 67, 23-32.