

氷ノ山における積雪、融雪水中の成分イオン量の変動について

[大気・地球環境室]

田中卓実 尾田喜夫 佐々木順一* 福田明彦**

Fluctuation of ion contents in snow layer and snowmelt efflux at Mt. Hyonosen.

Takumi TANAKA, Yoshio ODA, Junichi SASAKI, Akihiko FUKUTA

Abstract

Mt. Hyonosen (1510m) is located in the eastern part of Tottori Prefecture in the Sanin area where temperatures are relatively high for a heavy snowfall region. In order to assess the possibility of “acid shock” in the Sanin area, we analyzed at a site located at mid-slope of Mt. Hyonosen: 1) the accumulation of each distinct component in the snow layer 2) the amount of each distinct component in the snowmelt efflux. Our results indicate that many components in the snow layer escape prior to the initial spring snowmelt period. Therefore it was inferred that a significant amount of acidic product in the snow layer does not escape during a given snowmelt period; and that consequently this would mitigate damage to the ecosystem. We investigated the rate of component efflux in relation to the composition of components in the snow layer. We conclude that the sea salt component when compared to components derived from human pollution has a tendency to escape more rapidly from the snow layer.

1 はじめに

人為的発生源より排出される大気中の硫黄酸化物や窒素酸化物は降水などを介して環境を酸性化し、様々な影響を及ぼしている。その中でも春先の融雪期に積雪層中に蓄積された酸性物質が濃縮されて土壤中に一気に放出される現象による、生態系等への影響(いわゆるアシッドショック)が懸念されている。

そのため、当所では平成14年度に鳥取県の東部に位置し兵庫県との県境をなす氷ノ山(標高1,510m)の中腹(標高約850m)で融雪出水中の成分量や積雪層中の成分蓄積量などの調査を実施して、豪雪地域としては比較的気温の高い山陰地方におけるアシッドショックの可能性について、積雪層中の含有成分の流出特性の見地から検証を行った。

また、積雪層中の含有成分の流出に関して、成分種により、流出のしやすさ、すなわち流出速度に相違

性が見られるとする研究結果がいくつか報告されているが、研究者により諸説ある。例えば、福崎・大泉¹⁾は妙高山麓におけるフィールド調査の結果から Na^+ や Mg^{2+} などの海塩成分が流出しにくく、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} などは流出しやすい成分であるとし、その原因として、前者は雪結晶の中に核として取り込まれやすいのに対し、後者は主に過冷却雲粒中に存在するため、雪結晶の表面に分布しやすいことと、前者は結晶水を伴った固相化合物として氷粒子中に残存できるのに対し、後者は酸やアンモニウム塩などの形で水相に溶解しやすいこと、の2つをあげている。

一方、皆巳・田野²⁾は Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- は融雪の早い段階で流出しやすく、酸成分はそれに比べて緩やかに流出したことを報告しており、福崎・大泉¹⁾の推論における雪結晶と過冷却雲粒とは組成が逆である事例も存在し得ることで、それは説明できるとしている。すなわち、降雪粒子を形成する氷晶核として黄

* 現総務部 ((財)鳥取県天神川流域下水道公社へ派遣)

**退職

砂エアロゾルに代表される鉱物粒子が多いこと、日本に飛来する黄砂エアロゾルには SO_4^{2-} 、 NO_3^- が多く吸着していること、海塩粒子が大気汚染に由来する二次粒子に比べて粒径が大きいため、(液相の)雲粒として活性化しやすいと考えられることなどを理由に SO_4^{2-} 、 NO_3^- を多く含む降雪粒子が落下中に海塩成分を多く含む過冷却水滴を捕捉し、雲粒付き結晶として地表に達するというメカニズムも発現している可能性がある、というものである。また、成分による流出の差がなかったとする報告もあり、調査場所、調査時期、調査方法により結果が違ってくる性格のものと推測された。

本県を含む山陰地方は日本海側に位置し、中国大陸から距離的にも近いことから他の地方に比べて黄砂エアロゾルを多く含む降雪による積雪の機会も多いと考えられること、大きな大気汚染物質の発生源が少ないため、地表付近に大気汚染に由来する二次粒子も少ないと考えられること、冬季においては強い季節風により地表付近の大気中に含まれる海塩粒子濃度が高いことなど、他地域に無いの特徴を持ち、これらの説を検証する上では好条件であると考えられることから、今回行ったフィールド調査の結果を基に成分種による流出速度の相違性を調べるとともに、カラム実験を行い、これらの説を検証した。

2 方法

1) 調査地点、調査回数

調査は、冬期間中に継続的に安定して積雪の採取が行えること、近くに酸性雨採取器を設置されていることで期間中の降雨・降雪データとの比較が可能なることから、鳥取県若桜町つく米地区の1地点で実施した。調査地点を Fig. 1 に示す。調査地点は氷ノ山の西側山腹にある若桜町営「氷ノ山自然ふれあいの里」の敷地内の標高約850mの地点を選定した。

融雪出水、積雪調査は平成14年12月下旬から平成15年3月下旬までの積雪期間中に概ね週1回の割合で計11回実施した。

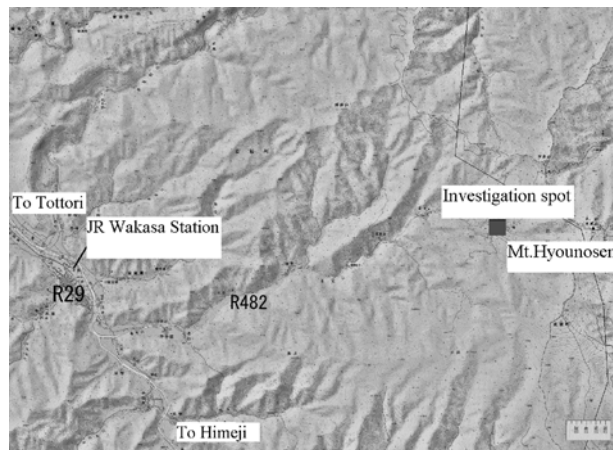


Fig.1 Investigation spot

2) 試料の採取方法等

(1) 融雪出水

融雪出水試料はステンレス製の集水槽を使って採取した。降雪前にこの集水槽を地表面に設置し、積雪後に随時、集水槽に解け出た融雪出水を集水槽の底からパイプで採水容器に流下させ、おおむね一週間間隔で持ち帰って分析試料とした。

(2) 積雪

積雪試料は、積雪を垂直に切り立たせて雪壁を造り、積雪深、雪質、雪質毎の層厚を日本雪氷学会の積雪観測法に従って調査した後、壁面の雪を地表から20cmの間隔で採取した。また、これとは別に密度測定のため、粉雪、しまり雪、粗目雪の雪質による層ごとの採取も行った。

(3) 降水

従来から継続的に実施している地点(融雪出水、積雪調査地点から約500m離れた地点)で積雪試料、融雪水試料採取と同じ日に採取を行った。

なお、試料採取はバルク採取法である降雪採取用ヒーター付きの環境庁仕様酸性雨濾過式採取装置を使用した。

(4) 気温、雪温

調査地点の気温と雪温をT&D製サーモレコーダー (TR-71S) を使って調査期間中、毎正時測定した。なお、気温の測定は地表から1.3mの高さにセンサーを設置し、日よけをかぶせて行った。

3) 試料の測定・分析方法

採取した融雪出水試料、降水試料は重量を量り、密度を 1 g/cm^3 (20°C) として水量とした。

また、積雪試料は室温で融解したのち、融雪出水試料、降水試料と併せてpH、導電率を測定した。次に孔径 $0.45 \mu\text{m}$ のPTFE製イオンクロマトグラフ用前処理フィルターで濾過した後、酸性雨試料と同様に酸性雨等調査マニュアル (環境庁) に準拠して試料の分析を行った。

なお、成分のイオン濃度はすべて当量濃度 ($\mu\text{eq/l}$) を用いて解析を行った。

測定項目及び測定方法を Table 1 に示す。

Table1 Parameters and methods of measurement (dissolving)

parameters	methods of measurement
pH	grass electrode
EC	electric conductivity
SO_4^{2-}	ion chromatography
NO_3^-	//
Cl^-	//
NH_4^+	//
Ca^{2+}	//
Mg^{2+}	//
K^+	//
Na^+	//

3 結果および考察

1) 気温、雪温

Fig. 2 に気温の推移を示す。気温のデータは毎正時の生データを6時間毎に平均化したもの、それぞれをひとつの気温データとして扱った。2月の月上旬頃までは氷点下の時間が長く、昼間と夜間の気温

差は小さかったが、それ以降は気温差が大きくなっていった。

一方、雪温は地表から50cmの層が調査の初期からほとんど 0°C を保っているのに対し、地表から80cmの層では2月の月上旬頃まで気温に連動した変動を示しており、表層に近い層ほど融解、再凍結の繰り返しによる成分濃縮が頻繁に起こっているものと推測された。また、地表と積雪層の境界は $0 \sim 1^\circ\text{C}$ で地表からも融雪が進んでいることを裏付けていた。

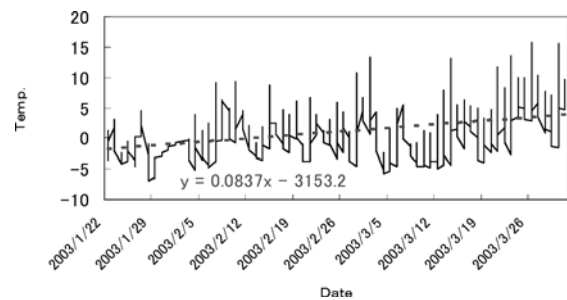


Fig.2 Transition of the temperature

2) 積雪深、雪質

調査期間中の積雪深および雪質を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より積雪深のピークは2月上旬であり最大積雪深は130cmであった。また、2月上旬以降、粗目の層が大幅に増えた。

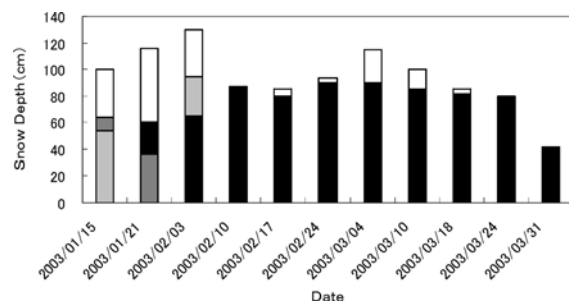


Fig.3 Transition of snow depth and quality of snow

□ : Newly fallen snow ■ : Settled snow
 ■ : Settled snow and Granulated snow mixed
 ■ : Granulated snow

3) 積雪層の平均密度および積雪水量

調査期間中の積雪層の平均密度および積雪水量を Fig. 4 に示す。積雪水量は雪質ごとの密度と層の厚

さから雪質毎に積雪水量を算出し、それらを積算したものである。Fig. 4より積雪水量のピークは2月の下旬から3月の月上旬であり、その頃が融雪期の初期と考えられる。

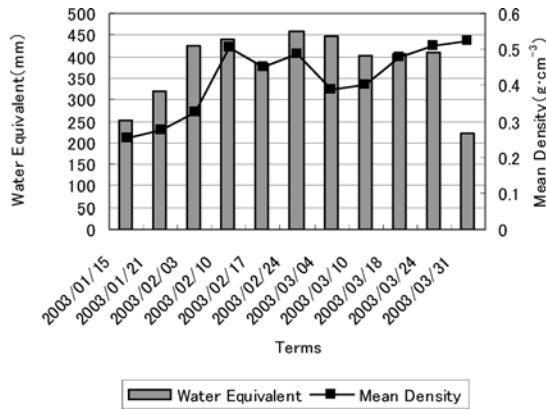


Fig.4 Water equivalent and mean density

4) 積雪層中の成分蓄積量

融雪出水の生態系への影響等を評価する上では融雪出水の成分濃度よりも成分量で評価すべきである。そこで、融雪出水と密接な関係にある積雪層中の成分蓄積量について、酸性雨調査における沈着量の計算と同様に単位面積上の積雪層中に蓄積される成分量として計算した。

その結果、特に蓄積量の多い海塩成分の Na⁺ と Cl⁻ は、調査の初期から蓄積量の変動が大きく、降水の影響によるものと推測された。

一方、酸性物質、アルカリ性物質の指標となる非海塩性の4成分とH⁺の蓄積量の推移を Fig. 5に示す。積雪層中のH⁺、非海塩性(nss-) SO₄²⁻、NO₃⁻の蓄積量は積雪期間初期に多く、漸次減少する傾向が見られ、融雪期初期の頃に最小となったが、その時の積雪の平均pHは7であった。

一方、NH₄⁺の蓄積量はその期間、大きな減少はなく、nss-Ca²⁺は逆に増加の傾向が見られ、融雪期の初期の頃に最大となった。

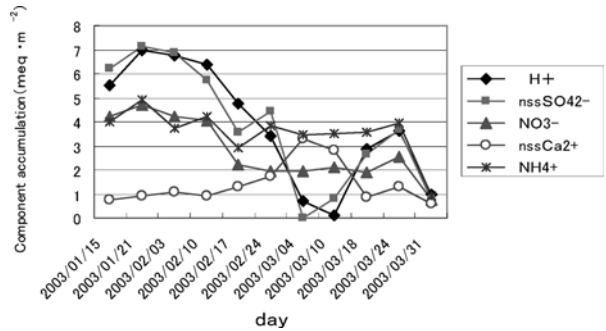


Fig.5 Component accumulation in the snow layer (index 5 components)

この積雪のpHの上昇の原因は積雪層中の酸性物質、特に硫酸の流出により積雪層中の酸性物質量が極めて少ない状況になる中、アルカリ性の黄砂エアロゾルなどが積雪層中に沈着したことによるものと考えられる。

5) 分率酸性度でみた積雪中の中和の進行度について

積雪期間をとおして、積雪層中でのアルカリ性物質による中和の進行を調べるため、以下の式で定義される分率酸性度(Fractical Acidity)の経時変化を調べた。

$$\begin{aligned} \text{Fractical Acidity} &= \frac{[\text{H}^+]}{([\text{nss- SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])} \\ &= \frac{(\text{H}^+)_{\text{stoc}}}{\{(\text{nss- SO}_4^{2-})_{\text{stoc}} + (\text{NO}_3^-)_{\text{stoc}}\}} \end{aligned}$$

[H⁺] : 水素イオン濃度(μ eq・l⁻¹)
 [nss- SO₄²⁻] : 非海塩性硫酸イオン濃度(μ eq・l⁻¹)
 [NO₃⁻] : 硝酸イオン濃度(μ eq・l⁻¹)
 (H⁺)_{stoc} : 水素イオンの蓄積量(meq・m⁻²)
 (nss-SO₄²⁻)_{stoc} : 非海塩性硫酸イオンの蓄積量 (meq・m⁻²)
 (NO₃⁻)_{stoc} : 硝酸イオンの蓄積量(meq・m⁻²)

Fig. 6は、積雪全層の平均成分濃度による分率酸性度およびアルカリ性物質と酸性物質の濃度比の経時変化を示したものである。分率酸性度は期間の初期から上昇し、2月中旬頃、最高値を示した。この時の分率酸性度は約0.8で積雪層中の酸性物質は大部分が中和されない状態で保持されていたと思われる。Fig. 7は、さらに詳しく見るために分率酸性度

を積雪深別にわけたものであるが、積雪表層と地表から20cm 以外の箇所では値が1まで上昇しており、 nss-SO_4^{2-} 、 NO_3^- の濃度減少が H^+ の濃度減少に比べて相対的に大きいことが要因として考えられた。以後、3月の月上旬まで分率酸性度は0近くまで低下していくが、積雪層中の酸性物質に対するアルカリ性物質の濃度比が次第に大きくなっていき、中和が進んだことによるものと考えられる。このアルカリ性物質と酸性物質の濃度比の上昇の原因については、積雪層中の硫酸の流出量がこの時期に特に多かったことが考えられる。また、3月上旬以降、分率酸性度は回復してゆくが、これは一時的な寒気に伴う降水によりイオン成分が補給されたためと考えられる。

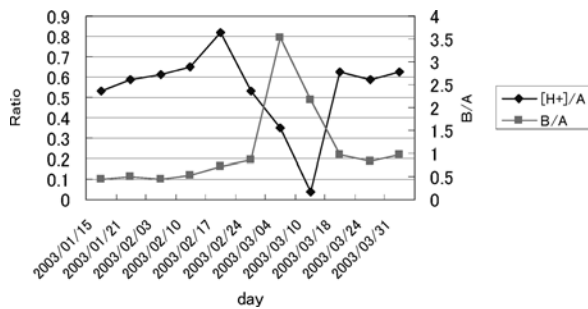


Fig.6 Average of Fractical Acidity of all snow layers

A: $[\text{nss-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$

B: $[\text{nss-Ca}^{2+}] + [\text{NH}_4^+]$

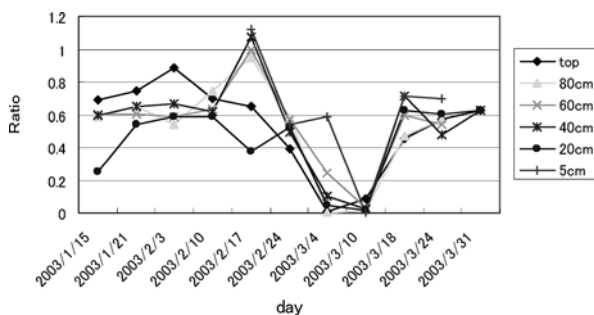


Fig.7 Fractical Acidity of each snow layer

6) 融雪出水中の成分量

一方、融雪出水として流出する成分量についても、単位面積上の積雪層から流出する成分量として計算した。

その結果、融雪期の前(～3月上旬)までに既に多

量の成分が一時期ではなく、分散して流出しており、特に蓄積量の多い海塩成分の Na^+ と Cl^- は、その傾向が強いことがわかった。

また、酸性物質、アルカリ性物質の指標となる非海塩性4成分と H^+ の流出量と融雪出水量の推移を Fig. 8に示すが、海塩成分と同様、融雪期の前(～3月上旬)までに既にかんりの量が分散して流出していることがわかった。

成分別に総流出量に占める融雪期前の流出量の割合を見ると、融雪出水量が約14%であるのに対し、 H^+ が約37%、 SO_4^{2-} が約47%(nss-SO_4^{2-} は約45%)、 NO_3^- が43%、 Na^+ が約54%、 Cl^- が約48%であった。なお、この成分量のうち、3/31～の成分量は、積雪中の3月31日現在の成分蓄積量から算出したものである。

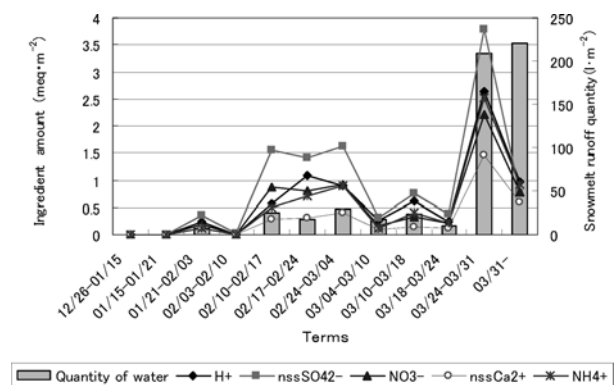


Fig.8 Ingredient amount in snowmelt runoff
(index 5 components)

7) 融雪出水と積雪層中の成分濃度の比較

上記の結果は積雪期間に積雪層に蓄積された成分が融雪の初期に高濃度で流出する傾向があることを示しているが、その傾向が成分によって異なるかどうか検証した。方法としては、前回の採取日における積雪層中の平均成分濃度(単位面積当たりの成分量を単位面積当たりの貯水量で除して算出した濃度)と期間中に採取した降水の成分濃度の加重平均をとり、当日の積雪層中の平均成分濃度とし、当日採取した融雪出水の成分濃度を除して濃縮度を算出した。ただし、最初に流出した融雪出水の濃縮度については、その融雪出水と積雪当初からその時期ま

での降水、それぞれに含まれる成分濃度から濃縮度を算出した。

Fig. 9 は調査期間中の濃縮度について成分別の経時変化を示したものである。最初に流出した融雪出水の場合を例にあげると、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- の濃縮度は4以上であったが、 NH_4^+ や NO_3^- 、 SO_4^{2-} は1～2程度であり、主に海塩に由来する成分の方が酸成分や NH_4^+ といった、主に人為的汚染に由来する成分に比べて濃縮度が高かった。

Fig. 9 より各成分の濃縮度は時期により異なるが、 H^+ 以外の成分は同様の推移を示しており、また、調査期間をとおして見ても全般に自然由来の成分の方が人為的汚染に由来する成分に比べて濃縮度が高い傾向が見られた。

この成分の濃縮度は、積雪層中の成分の流出速度に対応しており、今回の調査結果から全般に海塩由来の成分の方が人為的汚染由来の成分に比べて流出速度が大きく、皆巳・田野の説を支持する結果と言える。

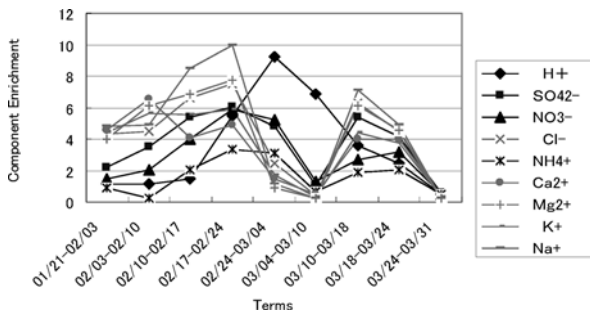


Fig.9 Aging variation of component enrichment

thick color : mainly derives from the artificial pollution.

thin color : mainly derives from sea salt or soil

intermediate color : derive from for both(SO_4^{2-})

8) カラムによる融雪実験

皆巳・田野の説では海塩由来の成分の流出速度が人為的汚染由来の成分の流出速度に比べて大きくなる場合の条件として雪結晶中での成分の偏在があった。そこで融解・再凍結していない新雪約25gを内径15mm、長さ290mmのカラムに詰め、融雪実験を行った。新雪は平成14年12月下旬に調査地点で採取

して -20°C の冷凍室に密閉保存していたもので、それを冷凍室内で速やかにカラムに詰めた後、 4°C の冷蔵室内で6時間程度かけてゆっくり溶出させた。なお、融雪出水はフラクションコレクターを使って約2m1ずつ分画した。Fig.10に代表的な5成分についての実験結果を例として示す。

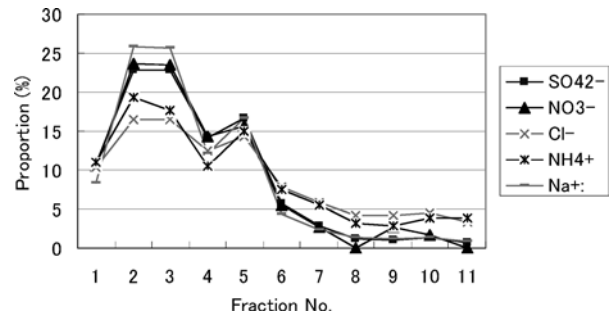


Fig.10 Proportion occupied for all outflows

thick color : mainly derives from the artificial pollution.

thin color : mainly derives from sea salt or soil

このグラフより SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ のグループと NH_4^+ 、 Cl^- のグループに分けることができ、前者の方が後者に比べて流出しやすいことから、雪結晶内での成分の分布という点では後者の方が中心部付近の分布割合は大きいものと推測される。

今回の実験からは、フィールドにおける、成分の流出速度と雪結晶内での成分の分布との直接的な関係は見いだせなかった。

4. まとめ

鳥取県の東部に位置し兵庫県との県境をなす氷ノ山の中腹（標高約850m）で積雪層中の成分蓄積量、成分の動態調査、融雪出水中の成分量などの調査を実施したところ、以下のような知見が得られた。

1) 積雪層中の酸性成分の蓄積量は積雪期間初期に多く、融雪期前まで漸次減少する傾向が見られ、アルカリ性成分は逆に微増の傾向が見られた。

2) 融雪期前までの融雪出水量は比較的少ないが流出する成分量は多く、総流出量に占める割合は nss-SO_4^{2-} が約45%、 NO_3^- が約43%、 Na^+ が約54%、 Cl^-

が約48%であった。

このことから積雪層中の酸成分が融雪期初期の一時期に多量に流出することはなく、アシッドショックのような生態系への影響被害は、気温が低く、成分がほぼ全量保持される地域に比べて、かなり緩和されているものと推測された。

3)積雪層に対する融雪出水の成分濃縮度は、時期によって異なるが、 H^+ 以外はどの成分も同様の経時変化を示した。また、期間をとおして全般に海塩成分の方が酸成分など人為的汚染に由来する成分に比べて濃縮度が高いことから海塩成分の方が早く流出する傾向があると言える。

参 考 文 献

- 1) 福崎紀夫, 大泉毅(1995)妙高山麓地域の積雪中における化学成分の移動および溶出, 大気汚染学会誌, 30(2),94-103
- 2) 皆巳幸也, 田野信博(2002)積雪の融解に伴う溶存無機成分の選択的流出, 水環境学会誌, 25(11),653-656