

# 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（第2報）

【大気・地球環境室】

田中卓実・九鬼貴弘・吉田篤史・田中長義・尾田喜夫

The research on the fluctuation of the ion component of snow and in the meltwater in Mt. Hyonosen.

Takumi TANAKA, Takahiro KUKI, Atsushi YOSHIDA, Osayoshi TANAKA, Yoshio ODA

## Abstract

Ingredient amount in snowmelt runoff and component accumulation in snow layer, etc. were investigated in the midslope in Mt. Hyonosen (1510m altitude) which was located in the east in Tottori Prefecture in order to verify the possibility of "Acid shock" in the Sanin district where the temperature is comparatively high as a heavy snowfall region. As the features in this fiscal year, it is raised that the neutralization of the snow does not progress in spite of there being the deposition of Asian dust in the spring snowmelt period initial stage. As this cause, the effect of the ice sheet formed in delay and in snow layer of the snowmelt was considered. And, it was proven to escape than the component in which the sea salt component derives from the artificial pollution early, when the difference of the exit velocity by the type of the component in snow layer was examined. This was similar to the preceding fiscal year.

## 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ている。

14年度の調査では積雪層中の含有成分の多くが融雪期に入るかなり前から濃縮しながら徐々に流出していること、海塩由来のイオン成分が人為的汚染に由来するイオン成分に比べて濃縮し易く早く流出する傾向があることなどの知見を得た<sup>1)</sup>。15年度につ

いても14年度と同様の調査を行い、これらの結果について再度検証を行った。

## 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し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ことから、鳥取県若桜町巻米地区の若桜町営「氷ノ山自然ふれあいの里」の敷地内にある宿泊施設「氷太くん」の体育館屋上（標高約850m）で実施した。調査地点をFig. 1に示す。

融雪出水、積雪調査は平成15年12月下旬から平成16年3月下旬までの積雪期間中に概ね週1回の割合で計13回実施した。

### 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、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調査用雪壁を造り、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、塩ビ管を積雪面に対して鉛直方向に打ち込み全層を一括採取した。さらに密度測定のため、新雪、こしまり雪、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、融雪出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(株)大成E&L製サーモリフ(TL-T1)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1.5m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  $1 \text{ g/cm}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ) 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 ( $\mu\text{eq}/\ell$ ) 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。

## 3 結果および考察

### 1) 気温、雪温

Fig. 2に日平均気温の推移を示す。12月下旬の寒波により、かなりの積雪があり気温も氷点下を記録した。その後、気温が上昇し、かなり融雪が進んだが、一部根雪として残った。その後、気温の変動は

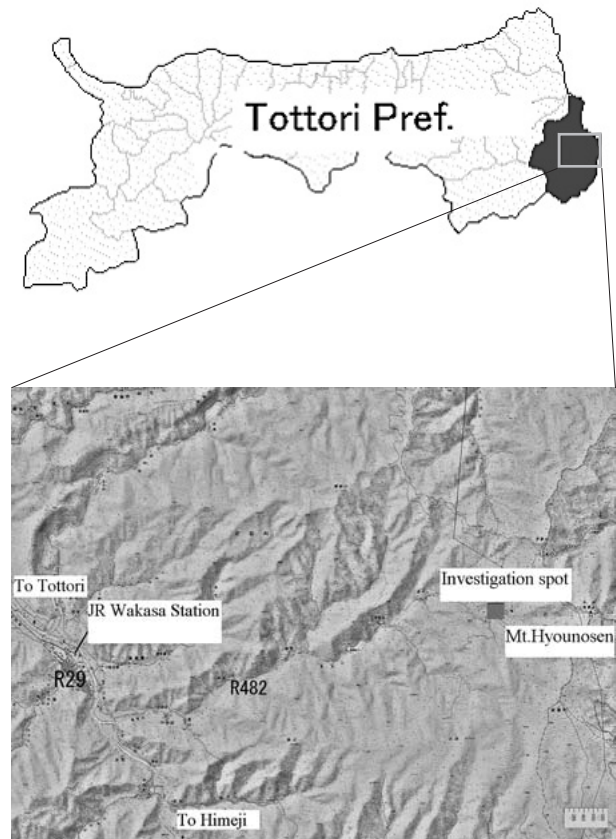


Fig.1 Investigation spot

Table1 Parameters and methods of measurement (dissolving)

parameters	measurement
pH	grass electrode
EC	electric conductivity
$\text{SO}_4^{2-}$	ion chromatography
$\text{NO}_3^-$	〃
$\text{Cl}^-$	〃
$\text{NH}_4^+$	〃
$\text{Ca}^{2+}$	〃
$\text{Mg}^{2+}$	〃
$\text{K}^+$	〃
$\text{Na}^+$	〃

あるものの、2月下旬頃まで概ね氷点下の期間が続き、それ以降 $0^\circ\text{C}$ をはさんだ周期的変動の期間、氷点下の期間があり、3月中旬頃から $0^\circ\text{C}$ を上回り、夜間の気温も上昇した。一方、雪温の測定を地表から50cm、80cmの層で実施したところ、共に気温に連動した変動を示し、1月下旬頃が最低であった。日

平均値の最低は、気温が約 $-10^{\circ}\text{C}$ に対し、地表から80cmの層が約 $-2.5^{\circ}\text{C}$ 、50cmの層で約 $-1.5^{\circ}\text{C}$ であり、積雪表層からの距離が短いほど気温の変化に対して雪温が敏感に変化しており、積雪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。しかし、両層とも2月上旬頃から概ね $0^{\circ}\text{C}$ に保たれており、2月上旬頃以降については、表層付近以外、融解、再凍結による成分濃縮があまり起こっていないものと思われた。また、地表と積雪層の境界は調査期間中、その温度は $0^{\circ}\text{C}$ で地表からも融雪が進んでいることを裏付けていた。

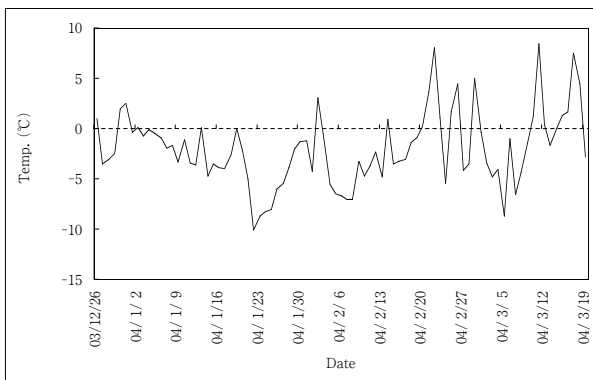


Fig.2 Transition of the temperature

## 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1月下旬から2月上旬であり、最大積雪深は148cmであった。

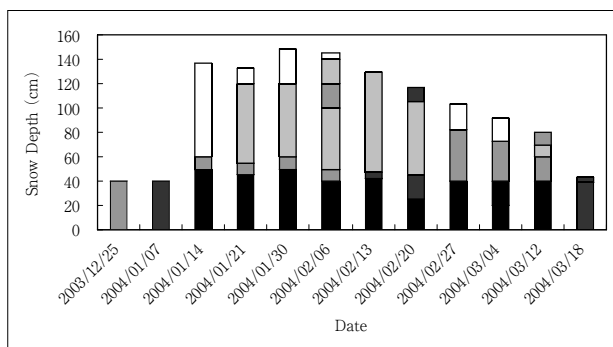


Fig.3 Transition of snow depth and quality of snow

- : Newly fallen snow
- : Settled snow
- : Settled snow and Granulated snow mixed
- : Granulated snow

また、雪質は14年度の調査では2月上旬以降に粗目雪の層が大幅に増えたのに対し、15年度の調査では、しまり雪から粗目雪への変態が遅く、積雪期間の終盤に入ってもしまり雪の層がかなり残っていた。これは積雪深が大幅に増えた1月中旬から2月下旬にかけての気温が低く、この時期に降った積雪の融解が遅れたことによるものと考えられる。しかし、15年度は3月中旬以降の気温が高く14年度に比べ消雪はかなり早かった。

## 3) 積雪水量および積雪層の平均密度

調査期間中の積雪水量および積雪層の平均密度を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20日前後であり、その頃が融雪期の初期と考えられる。

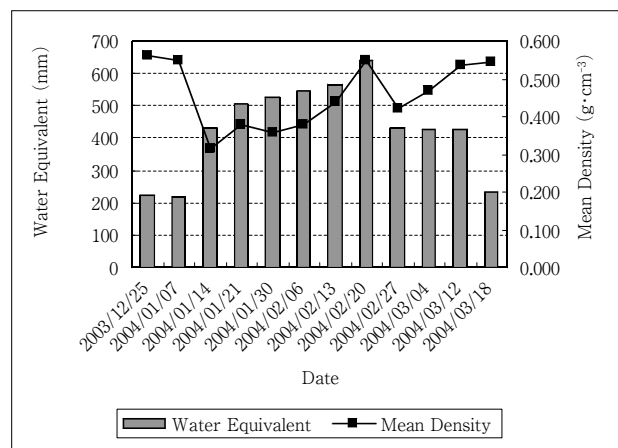


Fig.4 Water equivalent and mean density

## 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 $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ 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 $\text{H}^+$ の蓄積量の推移をFig. 5に示す。積雪層中の $\text{H}^+$ 、非海塩性(nss-)  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ の蓄積量は概ね積雪水量と良い相関が

認められ、期間中期の寒波による積雪量増加の影響で山型の推移を示した。そのため、これらの成分蓄積量は中期の頃最大となったが、nss-Ca<sup>2+</sup>のみは融雪期の初期の頃が最大となり、黄砂の影響と考えられた。積雪層中の酸性物質量は融雪期初期に大きく減少したが、14年度と違い積雪の中性化は起こらなかった。

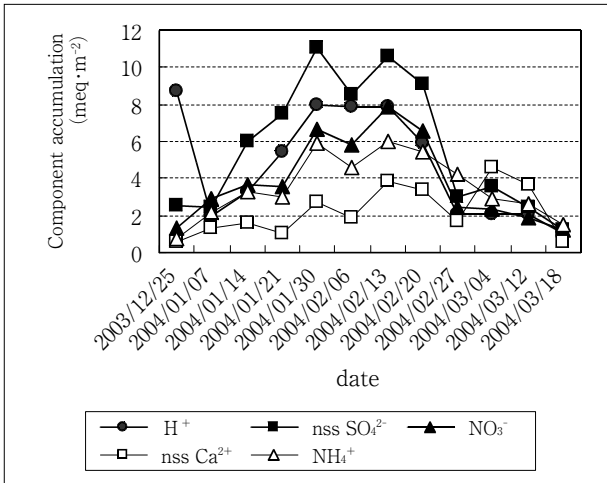


Fig.5 Component accumulation in the snow layer (index 5 components)

### 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。

$$\text{Fractical Acidity} = \frac{[H^+]}{([nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-])} = \frac{(H^+)_{\text{stoc}}}{\{(nss-SO_4^{2-})_{\text{stoc}} + (NO_3^-)_{\text{stoc}}\}}$$

[H<sup>+</sup>] : 水素イオン濃度 (μeq·l<sup>-1</sup>)

[nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : 非海塩性硫酸イオン濃度 (μeq·l<sup>-1</sup>)

[NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] : 硝酸イオン濃度 (μeq·l<sup>-1</sup>)

(H<sup>+</sup>)<sub>stoc</sub> : 水素イオンの蓄積量 (meq·m<sup>-2</sup>)

(nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)<sub>stoc</sub> : 非海塩性硫酸イオンの蓄積量 (meq·m<sup>-2</sup>)

(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)<sub>stoc</sub> : 硝酸イオンの蓄積量 (meq·m<sup>-2</sup>)

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  $([nss-Ca^{2+}] + [NH_4^+]) / ([nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-])$  の経時変化を示したものである。分率酸性度は積雪期間中、概ね0.4~0.6の範囲で推移した。14年度の調査では融雪期に入った頃に黄砂の

沈着によると思われる分率酸性度の大幅な低下が観測された。15年度も2月20日から3月4日までの期間の積雪層中に厚さ2~3mmの黄砂の層が観察され、その影響と思われる  $([nss-Ca^{2+}] + [NH_4^+]) / ([nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-])$  値の増加が認められたが、分率酸性度の低下は認められなかった。この原因としてこの時期に積雪表層付近に形成された氷板の影響が考えられた。この氷板は積雪後気温の上昇により融雪が進んで水分を多く含んだ粗目雪の層が気温の急激な低下により板状に凍って形成されたものと考えられるが、これが不透水層となり含有成分の下方への移動を阻害することが知られており、黄砂に含まれるアルカリ成分の積雪下層への移動を阻害したものと推測された。

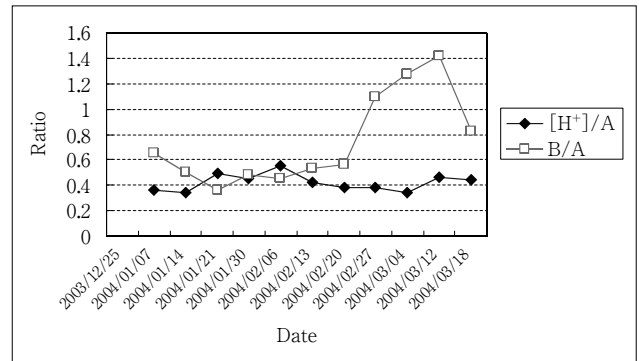


Fig.6 Average of Fractical Acidity of all snow layers

A:  $[nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-]$

B:  $[nss-Ca^{2+}] + [NH_4^+]$

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。分率酸性度の変動が上層では大きく、下層では比較的小さい傾向にあること、融雪期初期の中和の進行が上層ではかなり急激であることなどの知見が得られた。

また、最下層 (地表から5cmの層) における分率酸性度の一時的上昇の原因については、成分濃縮度の大きい初期融雪水の滞留が考えられた。

### 6) 積雪層中に形成された氷板の影響

15年度の調査で観察された氷板は厚さ2~3mmで2月中旬頃に5~6枚形成され、そのうち下層に形成した2枚は調査期間中残存していた。



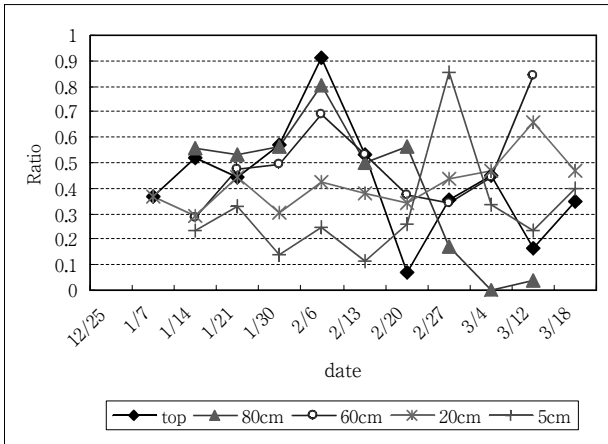


Fig.7 Fractal Acidity of each snow layer

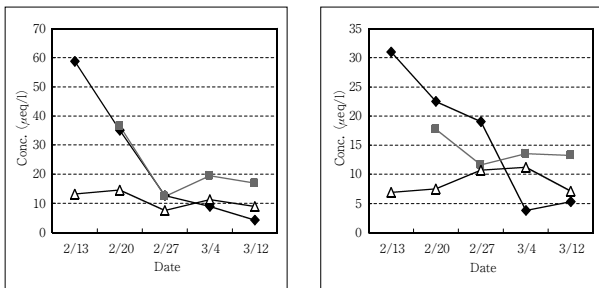


Fig.8 Fractal Acidity of each snow layer

left :  $[nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-]$   
 right :  $[nss-Ca^{2+}] + [NH_4^+]$

◆ : 氷板上    ■ : 氷板間    △ : 氷板下

Fig. 8はこの2枚の氷板のすぐ上の層、氷板に挟まれた層、すぐ下の層の成分濃度の推移を示したものである。氷板のすぐ上の層では酸性物質濃度、アルカリ性物質濃度とも大きく減少していったが、氷板のすぐ下の層では濃度が一定していた。このことから氷板に沿った水平方向での融雪水の移動も疑われるが原因は不明である。

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、積雪期間の初期(～1月上旬)に既に多量の成分が流出していたが、積雪が本格化した1月中旬から2月中旬にかけては成分流出が全く無く、融雪期に入った頃から継続的な成分流出が始まった。

Fig. 9に酸性物質、アルカリ性物質の指標となる非海塩性4成分とH<sup>+</sup>の流出量及び融雪出水量

の推移を示すが、積雪期間初期に流出した成分量がかなり多いことがわかる。成分別に調査期間中の総流出量に占めるこの期間初期の流出量の割合を見ると、融雪出水量が約12%であるのに対し、H<sup>+</sup>が約38%、nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が約35%、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>が33%、nss-Ca<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>がそれぞれ約27%であった。

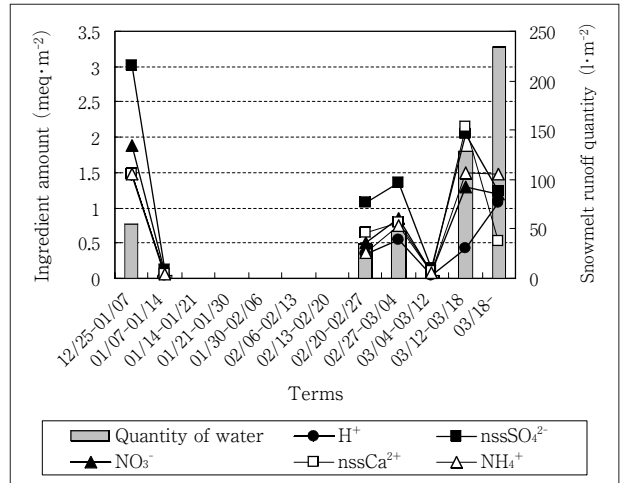


Fig.9 Ingredient amount in snowmelt runoff (index 5 components)

また、Fig.10は流出成分の調査期間初期からの積算流出率(%)の推移を融雪期について示したものであるが、このグラフから成分の違いによる流出率の違いが見られ、海塩成分が人為的汚染由来の成分に比べて早い時期に流出する傾向が見られた。これは成分により積雪への沈着が多い時期や積雪からの

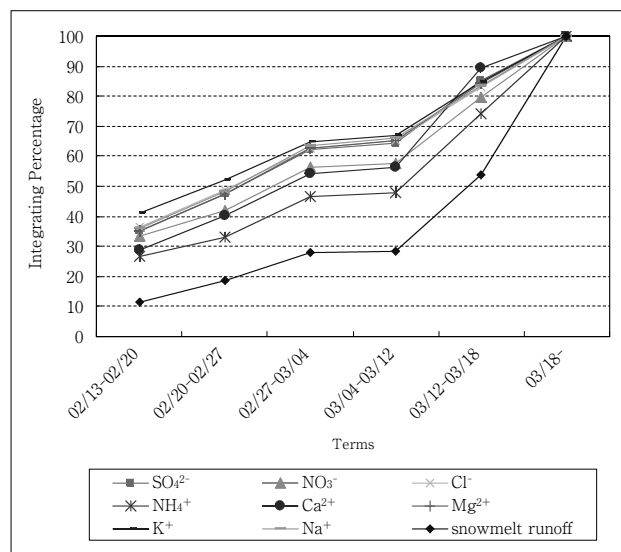


Fig.10 Estimation runoff rate of the runoff component.

溶出のし易さが違うことを反映しているものと考えられる。

7) 融雪出水と積雪層中の成分濃度の比較

Fig.10の結果は各成分の積雪への沈着が多い時期の相違も反映しており、成分の「積雪からの溶出のし易さ」すなわち流出速度の違いのみを反映したものではない。そこで融雪出水と積雪層中の成分濃度を比較し、濃縮度を算出することにより、流出速度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。

Fig.11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。特に濃縮度が高かった時期（3/4～3/12）の場合を例にあげると、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、の主に海塩に由来する成分の濃縮度が10前後と高く、以降 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ の順に高かった。各成分の濃縮度は時期により異なるが、14年度と同様、全般に海塩成分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、今回の調査結果は14年度同様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いことを意味し、皆巳・田野の説を支持する結果と言える。

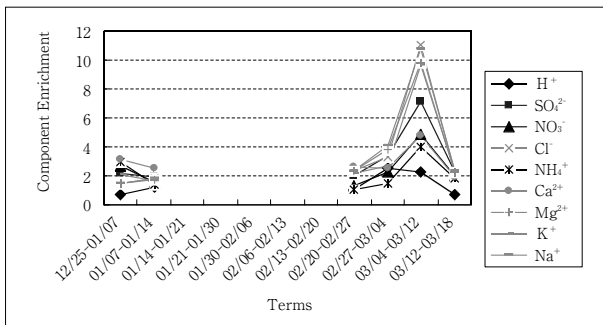


Fig.11 Aging variation of component enrichment  
 thick color: mainly derives from the artificial pollution.  
 thin color: mainly derives from sea salt or soil  
 intermediate color: derive from for both ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

8) 室内での融雪実験

皆巳・田野の説によると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条件（理由）として雪結晶中での成分の偏在があった<sup>2)</sup>。そこで融解・再凍結していない新雪約50gを内径85mm、深さ220mmのデュワー瓶に詰め、融雪実験を行った。新雪は平成16年1月30日に調査地点で採取して-20℃の冷凍室に密閉保存していたもので、それを冷蔵室内で速やかにカラムに詰めた後、コルク栓を半分ほど開放し、雪と外気(15℃程度)を接触させ上層から融雪させた。瓶壁面からの融雪の影響とガラスからの $\text{Na}^+$ 溶出の影響を小さくするため、瓶の内径に対する雪の厚みの比が小さくなるよう雪量を制限して実験を行った。融雪出水は瓶の底からポンプによってフラクションコレクターに送液し、5ml程度ずつ分取した。分取液はpH測定後、孔径0.45 $\mu\text{m}$ のフィルターで濾過し、イオンクロマトグラフィーにより陽イオン5種、陰イオン3種について測定した。Fig.12に代表的な5成分についての実験結果を例として示す。

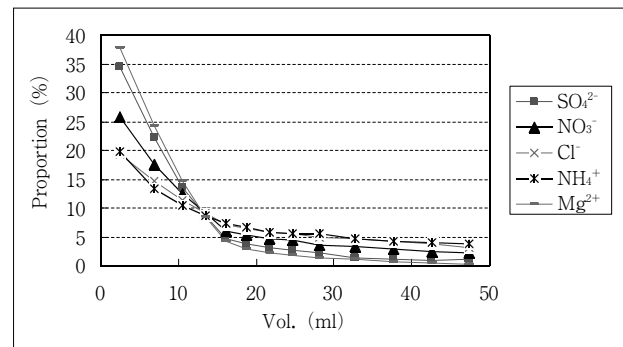


Fig.12 Proportion occupied for all outflows

thick color: mainly derives from the artificial pollution.  
 thin color: mainly derives from sea salt or soil

このグラフより $\text{Mg}^{2+}$ と $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ と $\text{NH}_4^+$ 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傾向が見られた。このことから、雪結晶内での成分の分布という立場でとらえると後者の方が中心部付近の分布割合が大きいものと推測される。

今回の実験結果とフィールドでの結果 (Fig. 9) を比較すると $\text{Cl}^-$ 以外の成分の流出順は一致しており、雪結晶内での成分の分布が成分の流出速度に

影響を及ぼしている可能性は大きいものと推測される。

#### 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) 15年度は期間中期の気温が低く融雪が遅れたため、積雪が本格化した1月中旬から融雪期に入る前まで融雪水の流出はなく、成分の多くが積雪中に保持された。成分の最大保持量を $\text{nss-SO}_4^{2-}$ と比較すると14年度が約7 meq/m<sup>2</sup>であるのに対し、15年度は約11 meq/m<sup>2</sup>とかなり多かった。
- 2) 融雪期に入った頃に黄砂の沈着が認められたにもかかわらず、積雪の中和は進行しなかった。この原因として融雪の遅れと積雪層中に形成された氷板の影響が考えられた。
- 3) 積雪層に対する融雪出水の成分濃縮度は、14年度と同様、全般に海塩成分が酸成分など人為的汚染に由来する成分に比べて高かった。この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。
- 4) 成分による流出速度の違いは雪結晶内での成分の分布のしかたに起因している可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 田中卓実, 尾田喜夫ほか: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. 鳥取県衛生環境研究所報, 43, 55-61(2003)
- 2) 皆巳幸也, 田野信博: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(2002)