

(9) 積雪内の水質鉛直分布とその経時変化に関する研究

STUDIES ON THE VERTICAL DISTRIBUTION AND
TIME COURSE CHANGES OF WATER QUALITY IN SNOWPACK

一柳 淳一*・後藤 光亀*

Junichi ICHIYANAGI*, Kohki GOTOH*

ABSTRACT; Vertical distribution changes of water quality(pH, Conductivity and turbidity)in snow-pack were investigated at the area of Mt. Gassan in Yamagata prefecture. Snowpack-melting water samples were collected at two different points from January to May in 1993. Ion concentration of new snow was above $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ and it was decreasing with changes of snow type from compacted snow to granular one. Profile of pH and Conductivity (EC) in snowpack had many peaks because of the difference of snow type, existence of ice layers and colored layers. High pH layer with high concentration of turbidity was observed in snowpack, and it contained rich concentration of Ca^{2+} . Its yellow color and high concentration of Ca^{2+} indicated that turbid substance was Kosa aerosol (Yellow sand dust), and increase of pH was attributed to dissolution of Ca^{2+} . Black pollutants were appeared at March investigation on the surface of snowpack and it seemed that main source of supply was stem and branch of trees.

KEYWORDS; snowpack, water quality, Kosa aerosol, acid precipitation

1. はじめに

東北地方では融雪水が重要な水資源になっているが、近年の酸性降下物に関する研究では降水よりも降雪の方がより酸性化しているという報告例もあり、その影響が懸念されている¹⁾。雪は大気からの様々な情報を受け取りながら降り積もる。ただし、それらの情報は融雪時まで保存されるわけではなく、積雪内では雪の質的な変化が進行している²⁾。著者らは、東北地方の中でも比較的遅くまで残雪が認められる山形県月山周辺において、融雪中・後期に相当する5月の残雪融解水の水質について調査し、この時期の雪がイオン濃度からみると蒸留水に匹敵するほど清浄であること、しかし残雪の表層には懸濁成分由来の汚濁物質が多量に存在することを報告した³⁾。イオン濃度の低さは、融雪初期にイオン成分が選択的に流出していることを示唆している⁴⁾。また、残雪表層に蓄積する懸濁成分が融雪に伴って濃縮されたものであるか、あるいは別の機構によるものかは不明であった。

著者らは、降水-森林土壌-河川-貯水池-浄水場-家庭等-下水処理場-海という水の移動過程における質的変換に注目した研究を進めており、降水はそれらの出発点にあたる。ここで、降雨が短時間で土壌に至るのに対して雪は融雪期まで水資源として、また位置エネルギー、熱エネルギーとして保持されており、その間の質的変化を理解しておくことは次の過程に与える影響を考察する上でも重要になると考えられる。そこで、本研究では前報と同じ月山周辺に調査定点を設定し、積雪期から融雪期にかけての積雪融解水の水質鉛直分布特性とその経時変化について測定し、積雪内に保存されている情報とその時間経過に伴う変化について考察した。

* 東北大学工学部土木工学科 (Dep. of Civil Eng., Faculty of Eng., TOHOKU Univ.)

2. 調査内容

2.1 調査地点と調査頻度

月山周辺の概要と調査地点を Fig. 1 に示す。積雪調査は月山（標高1,984m）－姥ヶ岳（1,670m）－湯殿山（1,500m）から大越峠を経る分水嶺の南東側と北西側に定点を設定して実施した。分水嶺の南東側は寒河江川流域であり、寒河江ダムが建設されている。調査地点は志津集落のはずれにある平坦地（標高約720m）に設定した（GSP-S）。分水嶺の北西側は梵字川流域であり、下流には月山ダムを建設中である。調査地点は湯殿山温泉から大越峠方向へ旧道を300m程度入った南西向きの緩斜面のブナ林内（標高約760m）に設定した（YSP-Y）。

調査は1993年1月～5月にかけて、概ね1ヶ月に一度の頻度で計5回実施した。このうち、5月の調査は4月調査を補完する目的の追加調査であり、GSP-S地点のみで実施した。

2.2 調査方法

積雪調査地点では、シャベル等を用いて鉛直方向に幅1.5m程度の雪穴を掘り、雪穴のひとつの壁面の雪を採取した⁵⁾。雪穴は原則として地面に到達するまで掘り、その深さは最大3.8m程度に達した。雪の採取層は厚さ5cmを原則とし、表層部では5～10cmごとに、深部では10～20cmごとに採取した。ただし、採取層の深さと厚さは雪の鉛直分布状況に応じて適宜変更した。また、雪採取時には雪質、雪の密度等も測定した。なお、2回目以降の調査時には以前に掘った雪穴が影響しないように注意した。

積雪採取試料はビニール袋に入れて保存し、実験室に持ち帰って自然融解させた。積雪融解水のpH、電気伝導率（以下、ECとする）等はそのまま分析し、イオン成分については0.45μmのメンブランフィルターで濾過した後分析した。

なお、分析方法については既報と同じである³⁾。

本論文では積雪中の水質鉛直分布特性とその経時変化に注目し、検討水質項目はpH、EC、濁度を中心とし、一部イオン成分の特徴にも言及した。

3. 結果および考察

3.1 雪質と密度分布

積雪調査を実施したGSP-S地点およびYSP-Y

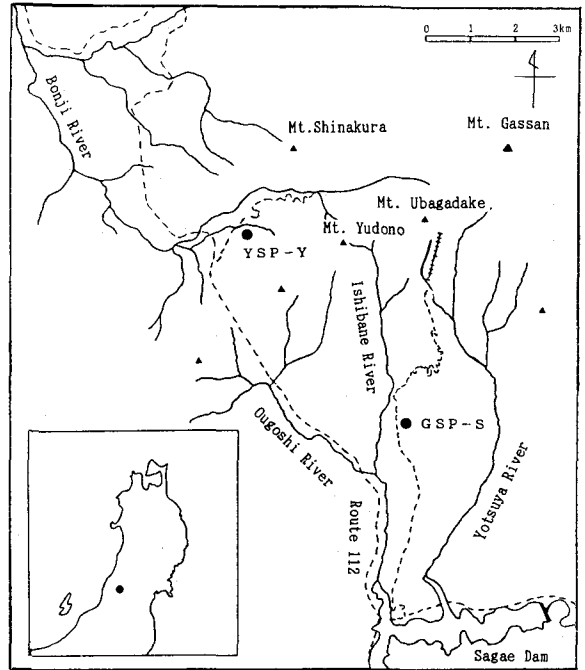


Fig.1 Map of investigation points

Table 1 General condition of investigation points at each month

Date	Point	Start time	Weather	Snow depth (cm)
January 13	GSP-S	8:20	snow	130
January 12	YSP-Y	8:55	snow	168
February 21	GSP-S	9:45	cloudy	317
February 20	YSP-Y	12:35	snow	350
March 31	GSP-S	8:10	fine	342
March 30	YSP-Y	10:45	cloudy	378
April 30	GSP-S	8:20	rain and snow	225
April 29	YSP-Y	10:20	cloudy	272
May 23	GSP-S	11:30	rain	43

Y地点における調査時の概況をTable1に示す。また、雪質を大きく新雪(N)，しまり雪(S)，ざらめ雪(G)に分類し、その鉛直分布をFig.2に示す。

1月～5月までのGSP-S地点の積雪深はそれぞれ130, 317, 342, 225, 43cmとなり、1月～3月にかけて増加し、4～5月には激減した。1月～4月のYSP-Y地点ではそれぞれ168, 350, 378, 272cmであり、GSP-S地点よりも30～40cm多かった。GSP-S地点では1月～3月調査時にかけて表層部に新雪が存在した。1月調査時の深部では既に雪のざらめ化が進行しており、しまり雪はわずかししか認められず、薄い氷板層(I)や黒色、黄色の着色層も認められた。

2月および3月調査時にはバーコード状の層構造が一層複雑になり、また、しまり雪の割合が増加した。なお、氷板層等は積雪の圧密および融雪により地表面近くへと移動しているものと考え

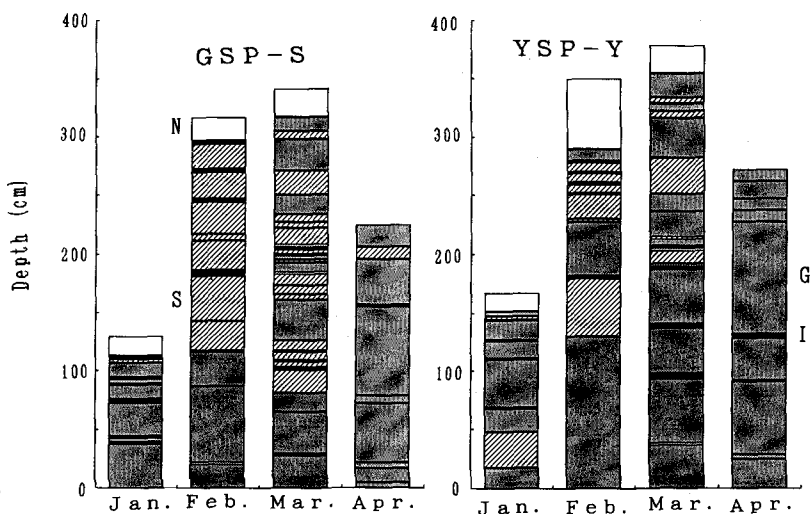


Fig.2 Profile of snow type in snowpack

N: New snow, S: Compacted snow

G: Granular snow, I: Ice layer

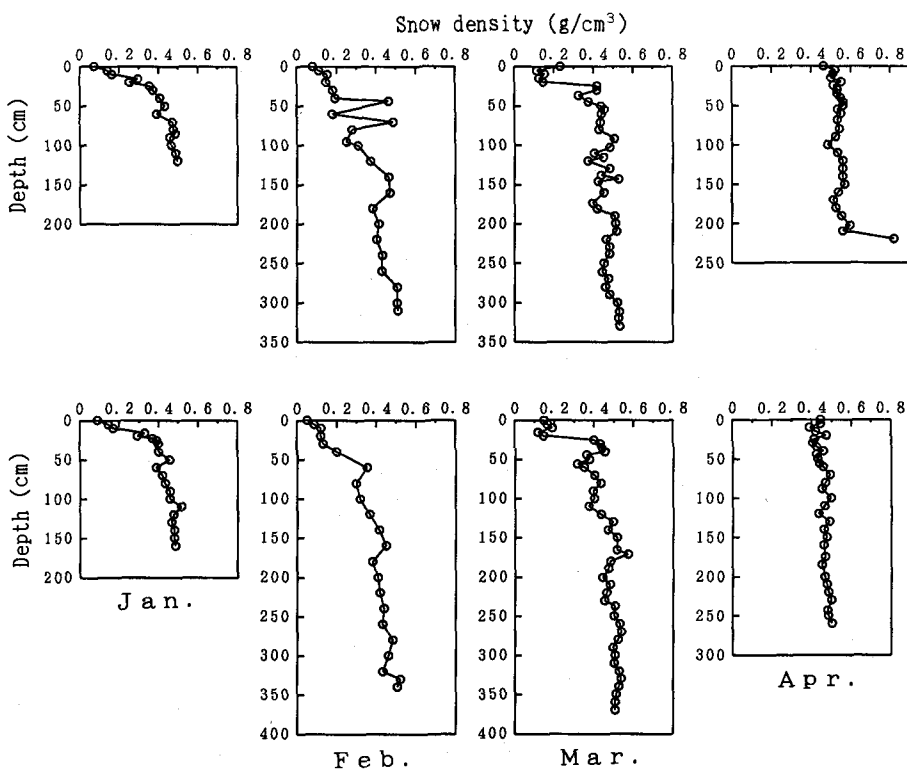


Fig.3 Profile of snow density in snowpack

Upper:GSP-S, Lower:YSP-Y

えられるが、前回の雪穴の影響がない場所を選んでいいることもあり、その移動の様子を特定することはできなかった。その後、4月調査時には大部分がざらめ雪となり、追加調査を行った5月調査時は全層がざらめ雪であった。

YSP-Y地点の雪質鉛直分布をみると、1月調査時には深部にしまり雪層が存在した反面、2月、3月調査時にはGSP-S地点に比べてしまり雪の割合が少なく、ざらめ化の進行はGSP-S地点よりも早かった。

雪の密度の鉛直分布をFig. 3に示す。1月～3月調査時にかけて、表層部の新雪では深くなるにつれて密度も大きくなる傾向を示しており、最表層の密度は $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 前後であった。また、1月調査時においても深部の雪の密度は $0.48\text{g}/\text{cm}^3$ 程度に達しており、経時的に $0.55\text{g}/\text{cm}^3$ 程度まで増加した。4月調査時になると鉛直方向の密度差は比較的小さくなっていった。なお、2月のGSP-S地点に認められたふたつの密度ピークはいずれも氷板を含む層である。また、4月調査時には融雪により最下層がシャーベット状になっており、密度は $0.82\text{g}/\text{cm}^3$ と大きかった。

3.2 積雪の水質特性

1) ECに関する実測値と計算値の比較

筆者らは、EC実測値と当量濃度および当量イオン導電率から算出したEC計算値はほぼ1:1の良好な対応関係になっており、降水中の主要イオン成分と考えられる9物質⁶⁾に HCO_3^- を加えた10物質が融雪期の残雪においても主要イオン成分であることを示した³⁾。Fig. 4は1月～3月調査における代表試料のEC実測値とEC計算値の関係である。やはり両者の関係は良好であり、ECを主要イオン総濃度の指標とすることの妥当性が読み取れる。

2) 鉛直分布と経時変化

積雪融解水のpH、EC、濁度の鉛直分布をFig. 5～9に示す。

1月調査時の特徴は両地点における新雪の低pH、高ECおよびGSP-S地点の85cm付近に代表されるpHの上昇を伴う高濁度層(黄色に着色していた)の存在である。また、YSP-Y地点の深さ30cm付近ではpHが5.6近くまで上昇し、ECも $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度まで低下していた。表層に近いこの層の雪が既にざらめ化していることから、これはざらめ化の過程で生じるイオン成分の排除とその後の溶

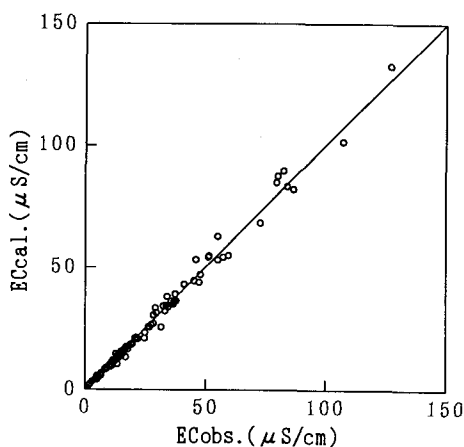


Fig.4 Relationship between observed EC(ECobs.) and calculated EC(ECcal.) of snowpack-melting water

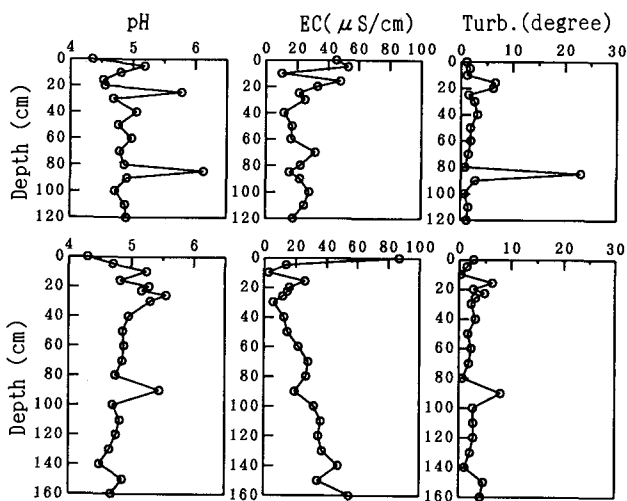


Fig.5 Profile of water quality in snowpack (January)
Upper:GSP-S, Lower:YSP-Y

脱によるものと考えられる。鉛直分布の特徴として、GSP-S地点では深部のpH、ECがあまり変化していなかったのに対し、YSP-Y地点では深くなるにつれてpHが低下しECが増加する傾向、すなわちイオン成分の移動傾向が認められたことも地点間の相違として興味深い。この差はGSP-S地点を平坦地、YSP-Y地点を緩斜面に設定したこと起因しており、YSP-Y地点では高標高域からの水平移動成分が影響していたものと推察される。

2月調査時には新雪の低pH、高ECおよび濁度増加を伴う高pH層の存在に加え、ECの鉛直変化が激しくなり、特にGSP-S地点で顕著であった。これは、積雪内でイオン成分の溶脱と一時的な蓄積、滞留が生じているためと考えられる。また、GSP-S地点の50cm前後の層ではpHが5.0を上回り、ECは2~6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度と昨年の5月調査時なみの値まで低下していた³⁾。それらの層は氷板層をはさんだしまり雪であり、密度も0.2 g/cm^3 以下で濁度の値も極めて小さいことから、溶脱によるイオン成分の移動というよりも降雪そのものが清浄であった可能性が高い。降雪が必ずしも多量のイオン成分を含むとは限らないことは既に報告されており⁶⁾、また、4月調査時にGSP-S地点で採取した降雪もpH5.39、EC4.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と清浄であった。

3月調査時には積雪採取層を増やしたこともあり、pHおよびECはさらに激しい鉛直変化を示した。GSP-S地点では174~176cm層と312~314cm層に濁度のピークが認められ、両層のpHは上昇していた。一方、ECのピークは140cm層前後と240cm前後の層に認められたが（同層ではpHの値も低い）、これらの深さには氷板層が存在しており、氷板が鉛直移動するイオン成分を一時貯留しているために形成されたピークであると推察された。YSP-Y地点では表層から10cmまでの新雪は低pH、高ECの状態を示していたが、その直下層のざらめ雪では

pH、ECの値からみると清浄であるにもかかわらず濁度のみが高いという状態になっていた。これは昨年5月の状況に近いものである³⁾。さらに、50~55cm層のざらめ雪では低pH、高EC、高濁度となっており、ここにはイオン成分や濁質が蓄積していた。また、概ね300cm以深のざらめ雪はpH5.0~5.3程度、EC20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下で安定しており、水質的に均質化している様子が伺えた。

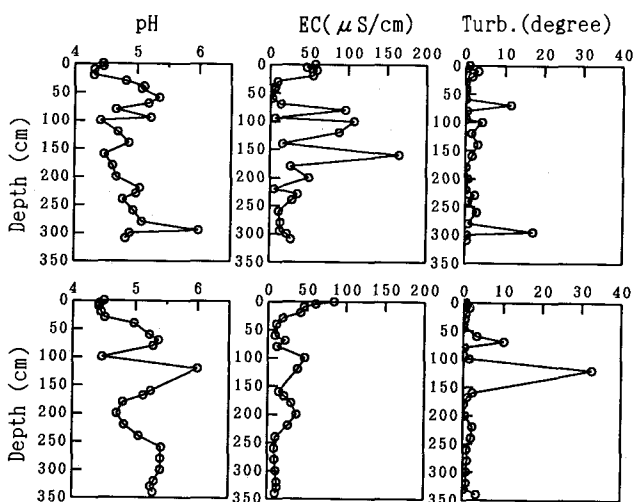


Fig.6 Profile of water quality in snowpack (February)
Upper:GSP-S, Lower:YSP-Y

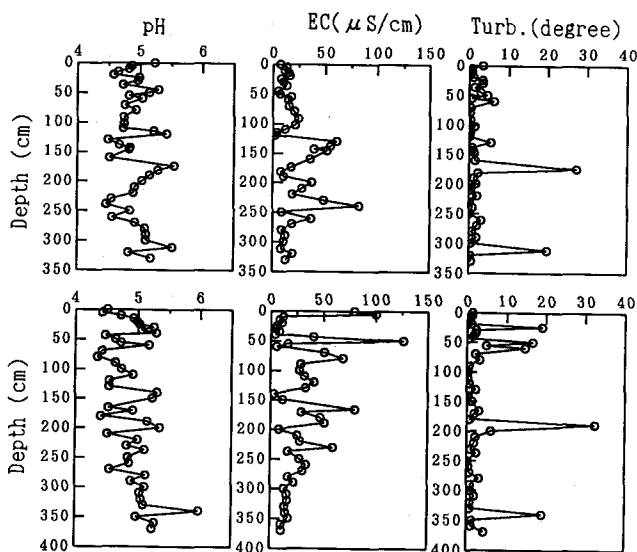


Fig.7 Profile of water quality in snowpack (March)
Upper:GSP-S, Lower:YSP-Y

4月調査時になると、両地点ともに表層部の濁度が著しく増加し、0~5cm層では100度を越えた。ただし、pHは両地点とも5.0を上回っており、ECも6 μ S/cm程度と低く、昨年5月と同様な「イオン成分の少ない濁り水」の状態を呈していた³⁾。また、全般的にpHは高く、ECは低くなっており、イオン成分の溶脱が進行していたが、GSP-S地点では3層、YSP-Y地点では4層のイオン成分蓄積層が認められた。なお、YSP-Y地点の243~247cm層ではpHが5.82に達し、濁度もその上下層の1.0以下に対して6.2と高かったが、これも先月までと同様な黄色い着色層であった。

4月調査時にはまだ水質の鉛直変化が認められたため5月に追加調査を実施したが、GSP-S地点の積雪深は43cmにすぎなかった。Fig. 9をみるとわかるように、pHは全層にわたり5.0を上回り、ECも0~5cm層を除くと2 μ S/cmとイオン濃度の極めて低い雪になっていた。しかし、表層の濁度は439度に達しており、4月調査時よりもさらに濁質の蓄積が進行していた。

3) 黄砂の影響

積雪の水質鉛直分布で認められた濁度増加を伴うpH上昇層は肉眼的に黄色に着色していた。この黄色い懸濁粒子の正体として、その地理的条件から中国大陆から飛来した黄砂が考えられる。黄砂エアロゾルは中国の砂漠や黄土地帯で発生し、朝鮮半島、日本を越え、時には中部太平洋地域まで飛来することが知られている。また、多地点同時観測や空気塊の流跡線解析により、通常、黄砂エアロゾルは日本の西南域から東北域へと移動することが確認され、その飛来頻度は3~5月が最も多い⁷⁾。ただし、黄砂現象の確認は地上における観察員の視覚によるものであり、地上では観察できない黄砂エアロゾルの移動はより頻繁に起きており⁸⁾、それらが雪・雨とともに降下することも有り得る。

黄砂エアロゾルの発生源である中国乾燥地帯では、雨水による鉱物の化学的風化作用が生じにくく、また鉱物から溶け出したアルカリ、アルカリ土類金属元素も石灰集積作用によって表層土中に蓄積されやすい。このため、黄砂エアロゾルにも多くのアルカリ、アルカリ土類元素が含まれており、これが黄砂エアロゾルの特徴になっている。

また、黄砂エアロゾルを蒸留水あるいは模擬酸性雨水(pH 4.1~5.1)に浸漬させた実験では、著しいカルシウムイオンの溶出とpHの中性化が認められており、黄砂エアロゾルのカルシウム含有量に依存した酸中和能力が示唆されている^{7,9)}。

そこで、1月~3月までの積雪増加期を対象とし、濁度5度以上の層で主要イオン成分を測定している13試料について、Ca²⁺/T-Cation(当量濃度比)とpHの関係を整理し、Fig.10に示した。ここで、T-Cationと

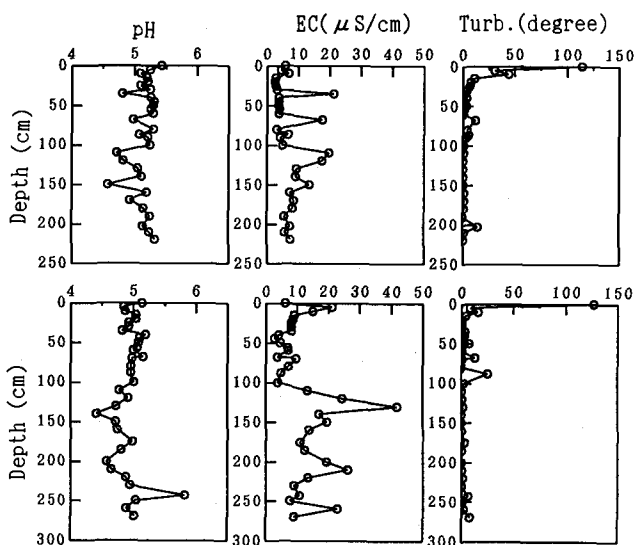


Fig.8 Profile of water quality in snowpack (April)

Upper:GSP-S, Lower:YSP-Y

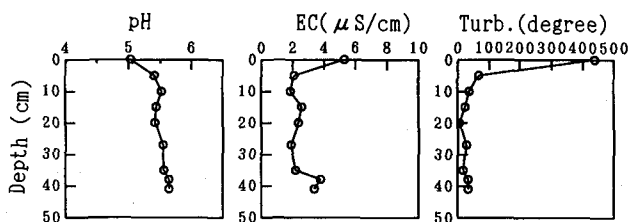


Fig.9 Profile of water quality in snowpack (May, GSP-3)

は H^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ の当量イオン濃度合計値であり、図中の○印は肉眼的にも黄色く着色している様子が確認された試料、*印は黒褐色を呈していた試料である。また、黄色い着色層付近における $Ca^{2+}/T\text{-cation}$ の鉛直分布例をFig.11に示す。

Fig.10には $Ca^{2+}/T\text{-cation}$ の増加に伴ってpHも高くなる傾向が認められており、高pHの試料は肉眼的にも黄色い着色層であった。また、Fig.11の鉛直分布でも黄色い着色層のみで $Ca^{2+}/T\text{-cation}$ の著しい増加が認められている。現在、懸濁物の鉱物組成、化学組成等の検討を進めているところであるが、今回見られた濁度増加を伴うpH上昇層の生成原因が堆積した黄砂の影響であることはほぼ間違いなく、黄砂に酸性降下物を中和する能力があることを確認した事例になるものと考えられる。

4) 雪のざらめ化と氷板層

積雪は新たな降雪による圧密を受けるとともに、凍結・融解によってざらめ雪へと変質することが知られている¹⁰⁾。このざらめ化の過程で再凍結時にイオン成分の排除が起こり、ざらめ雪の中心部は純水に近く、外側にイオン濃度の高い部分ができる。そして融雪初期にざらめ雪の外殻部が融解することで積雪内から

イオン成分が選択的に流出すると考えられており、イオン成分の70~80%が融雪水の初めの30%に含まれているという報告もある⁴⁾。今回の調査においても、全般的にざらめ雪の方がしまり雪よりもpHは高く、ECは低かった。特に、2月調査時のYSP-Y地点では、深さ80~240cmにかけてのECの変化が雪質の変化と良く対応していた。

1月~4月調査時における積雪の密度、各層の厚さおよび水質濃度から積雪相当水量、平均水質濃度等を求め、Table2に示す。なお、試料を採取しなかった積雪層の値についてはその上下層の平均値を与えて計算した。

融雪初期にあたる3月調査時と4月調査時を比較すると、積雪深はGSP-S地点で34%、YSP-Y地点で28%減少したものの積雪相当水量は18%程度の減少に過ぎず、融雪の程度を積雪深で判断することの不十分さが伺える。平均ECはGSP-S地点で75%、YSP-Y地点でも52%減少しており、やはり多量のイオン成分が融雪初期に流出していることがわかる。ただし、平均水素イオン濃度の減少率はGSP-S地点で39%、YSP-Y地点では11%とECに比べて小さく、この差の意味するところは現時点では不明である。

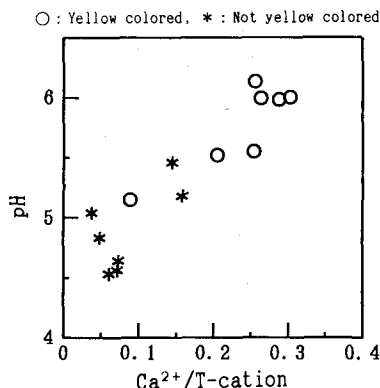


Fig.10 Relationship between pH and $Ca^{2+}/T\text{-cation}$ about turbid snowpack-melting water collected at the period of January to March

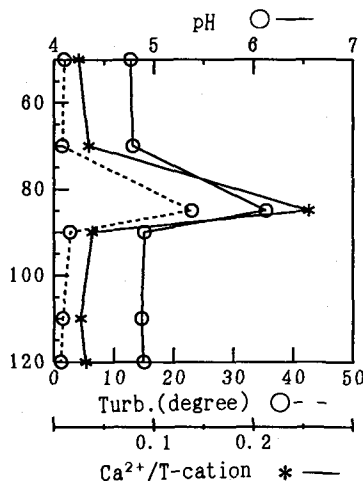


Fig.11 Vertical distribution of $Ca^{2+}/T\text{-cation}$ and other water quality about yellow colored layer

雪穴を掘るとその断面には複数の氷板層が認められる。氷板層も急激な融解と再凍結により形成されると考えられるが、降水による水分および熱エネルギーの供給も重要な要因になり得る。氷板層はその形成過程からみてざらめ雪と同様にイオン成分の少ない雪質であると考えられるが、堅固な氷板層は上層から移動してきたイオン成分等を一時滞留、蓄積する機能を有する¹⁾。

今回の調査で氷板層に明確なイオン成分の蓄積が認められたのは3月のGSP-S地点であり、ECが50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を越えた2つのピークはいずれも氷板層であった。これ以外の調査時にも氷板層は認められたが直上下層とのECの差は小さかった。これは氷板層が必ずしも平面的に完璧なものでないことや雪えくぼと呼ばれるくぼみによって生じた「水みち」を通じてイオン成分が流出していることと、融雪水は鉛直方向と水平方向に同時に移動しており、氷板層でも水平方向の移動が可能な場合には蓄積しにくいことなどによると考えられる。今回の調査においてGSP-S地点は平坦地、YSP-Y地点は緩斜面に設定している。この違いがGSP-S地点における氷板層のイオン成分蓄積、4月調査時における最下層のシャーベット化やYSP-Y地点における3月～4月にかけての平均EC減少率の鈍さ（高標高域からの水平方向の供給による）にあらわれているとすれば説明がつく。

Table 2 Water equivalent of snow and average water quality in snowpack

Month	Inv. Point	Snow depth (cm)	Water equivalent of snow (g/cm^2)	pH	H ⁺ ($\mu\text{eq}/\text{l}$)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbidity (degree)
January	GSP-S	130	51.2	4.85	14.0	21.8	2.6
	YSP-Y	168	69.4	4.81	15.5	29.4	3.0
February	GSP-S	317	117.6	4.77	17.0	41.8	2.2
	YSP-Y	350	128.9	5.03	9.4	20.1	4.3
March	GSP-S	342	151.3	4.85	14.3	23.2	2.6
	YSP-Y	378	170.4	4.82	15.3	28.0	3.6
April	GSP-S	225	122.9	5.06	8.7	8.2	6.6
	YAP-Y	272	141.3	4.86	13.9	13.4	5.0

5) 積雪表面の汚れ

積雪表面への黒褐色の汚れ（懸濁成分）の蓄積は4月調査時以降に認められた。3月調査時のYSP-Y地点でも新雪の直下層の濁度は19.0度まで増加していたが、昨年5月調査時のような状況を示したのは4月調査時からであった。3月から4月にかけて、積雪深はGSP-S地点で117cm、YSP-Y地点では106cm減少している。そこで、3月調査時に表層からそれらの深さまでに存在していた濁度成分が4月調査時の表層5cmの雪に全て蓄積したものとして濁度を計算してみると、GSP-S地点は15.4度、YSP-Y地点では33.8度となり、実測値114度、127度の1/3にも満たない。さらに、5月調査時のGSP-S地点では0～5cm層で400度を越えており、融雪時に残された濁質成分の蓄積のみでそれらの説明することはできない。

著者ら³⁾は、この汚れ成分について顕微鏡観察およびエネルギー分散分析を実施しており、有機物主体であることを確認している。4月調査時のYSP-Y地点で周辺を観察してみたところ、ブナやその他の樹木の根元に多くの黒褐色の汚れ成分が落ちており、その中にはかなり大きな樹皮片も認められた。また、この汚れ成分はビニール袋やポリビンに付着しやすいことから疎水性であるものと思われる。地元住民の話によれば、「雪のしぶ」と呼ばれる汚れ成分は昭和初期には既に観察されており、4月頃から目立ち始めることからみて、活動を始めた樹木由来の乾性降下物が主な汚れ成分であると考えられる。

4. まとめ

山形県月山周辺に定点を設定し、1993年1月～5月における積雪内の水質鉛直分布とその経時変化を調査し、次の結果を得た。

- 1) 積雪期の表層雪(新雪)のpHは4.3～4.5と低く、ECも50 μ S/cmを越えることが多かったが、積雪内でしまり雪からざらめ雪へと雪質を変化させるにつれてイオン濃度を低下させた。融雪初期にあたる3月調査時から4月調査時にかけてみると、積雪相当水量の減少率は約18%に過ぎなかったにもかかわらず平均ECは52～75%減少しており、融雪初期の選択的イオン流出の様子が伺えた。
- 2) 積雪融解水の水質は、雪質や氷板層、着色層の有無により著しい鉛直変化を示した。この鉛直変化は積雪ピークから融雪前期にあたる2月～4月調査時に顕著であった。
- 3) 積雪内には濁度増加を伴うpH上昇層が認められた。その層は肉眼的には黄色く着色しており、融解水のカチオン成分としてカルシウムが多いという特徴を有していることから、中国大陸から飛来した黄砂エアロゾルが堆積したものと考えられた。これは、黄砂による酸性降下物の中和能の確認事例であると言えよう。
- 4) 積雪内の氷板層が鉛直移動するイオン成分を一時滞留、蓄積する例もいくつか認められたが、多くの氷板層ではその影響は軽微であった。これは氷板層の平面的な分布の乱れなどによる「水みち」の存在や斜面の積雪における流出水の水平移動などによるものと考えられた。
- 5) 積雪表面への汚れ成分の蓄積は4月調査時から顕著になり、その量は融雪に伴う残留濁度成分の蓄積のみでは説明できなかった。調査地点周辺の観察結果では樹木の根元の残雪上に多くの汚れ成分が落ちていたことなどから、これは主に活動を開始した樹木由来の乾性降下物であると考えられた。

本研究を行うにあたり、東北大学工学部土木工学科の牛尼修央氏、大住真一郎氏および株式会社環境科学コーポレーションの方々に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上木勝司・飯田俊彰・上木厚子・石田朋靖・塚原初男・桑原英夫：山形県日本海沿岸地域における降水中の酸性降下物の実態，山形大学紀要(農学) 第11巻 第1号 PP.143-148, 1990
- 2) 飯田俊彰，上木勝司：融雪期の積雪内における酸性汚染物質の移動，環境科学シンポジウム講演要旨集，PP.79, 1991
- 3) 後藤光亀・一柳淳一・野田修二：残雪および融雪水の水質特性に関する基礎研究，環境工学研究論文集，第29巻，PP.93-101, 1992
- 4) (社)ゴルフアーの緑化促進協力会：酸性雨－生態系に与える影響－，1989
- 5) 日本雪氷学会北海道支部(編)：雪氷調査法，1991
- 6) 北海道・東北ブロック公害研究連絡会議：北海道・東北ブロック酸性雨合同調査結果報告書(降雪期) 平成2年度降雪期
- 7) 西川雅高：黄砂エアロゾルによる物質輸送とそれに伴う化学組成変化，名古屋大学学位論文
- 8) Uchiyama M., Mizuochi M., Yano K. and Fukuyama T.: Chemical composition of the winter precipitations at Mt. Zaoh, Eorozeru Kenkyu, 7(1), 44-53, 1992
- 9) 西川雅高・溝口次夫・金森悟・金森暢子：黄砂エアロゾル中の水溶性成分間のイオンバランス，エアロゾル研究，第6巻，第2号，PP.157-164, 1991
- 10) 日本雪氷学会編：雪氷辞典，1990