

## 酸性雪・雨の化学的特性と森林への影響

田口洋治<sup>\*</sup>・青山清道<sup>\*\*</sup>・加藤皓一<sup>\*</sup>・遠藤治郎<sup>\*\*\*</sup>・中田 誠<sup>\*\*\*</sup>・山本仁志<sup>\*\*\*</sup>・高田 徹<sup>\*\*\*</sup>

### CHEMICAL CHARACTERISTICS OF ACID RAIN AND SNOW AND THE EFFECT ON FORESTS

by

Yoji TAGUCHI, Kiyomichi AOYAMA, Koichi KATOH, Jiro ENDO,  
Makoto NAKATA, Masashi YAMAMOTO and Toru TAKADA

(Abstract)

Acid rain and snow that have fallen in Niigata Prefecture revealed characteristics to measure the pH levels and to analyze the components in the rain and snow. Also, the influence of the acid rain and snow on several kinds of trees, evergreen trees and broadleaf trees in a forest of Sado Island was considered. In addition, in mainly Niigata Prefecture, the influence of such acid rain and snow on the soil was also considered. The conditions of some forests in Czech Republic and former East Germany were reported with respect to social and natural conservation.

From the measurement of the pH levels and the analysis of components of the fallen snow in Niigata Prefecture, the characteristics of the snow were almost the same as those observed in the snow along the coast of the Sea of Japan from Shimane Prefecture to Akita Prefecture. Using the multiple regression analysis method, the cause for the lower value of pH in the fresh snow has become evident as a result of mainly the sulfate ions contained in the snow. By the analysis of the components and the measurement of pH levels in each different depth of the piled snow, small amounts of chloride ions and potassium ions as well as lower pH levels were observed near the surface.

A general characteristic concerning acid rain and snow in the forest, cedar, a kind of evergreen tree, has the capability to include more amounts of acidic deposits than the broadleaf trees because of the cedar's rougher trunk and evergreen leaves. While, the flowdown water of melted snow along the trunks of broadleaf trees was neutralized or relaxed with the basic substances released from the trees.

The influence of acid rain and snow on soil is not such a serious problem at the present time. However, from the results of the pH measurement of soil and the amounts of leached-elements from the soil, e.g., phosphor, aluminum, calcium, etc., 43% of the sample soils gathered in mainly Niigata Prefecture was estimated to be already acidified.

Various field surveys were performed in forests in September 1996. In spite of the limited

---

\*新潟大学工学部  
\*\*新潟大学積雪地域災害研究センター  
\*\*\*新潟大学農学部

area in Czech Republic and former East Germany, as many reporters pointed out, large forests were dead due to the acidic rain fall probably coming from the large consumption of brown coal. A large amount of spruce, a kind of pine tree, was especially to be found dead in various places.

Key words : Acid Rain and Snow, Forest, Soil, Acidification, Phosphate, Coal

キーワード：酸性雨・雪，森林，土壌，酸性化，リン酸，石炭

## I はじめに

新潟県内各地に降った雪（雨）の特性を明らかにするために、そのpHを測定し、さらに硫酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオンなどの陰イオンや二、三の陽イオンを分析し、その結果を報告する。測定で得た値を、日本海側の南は島根県から北は秋田県までの雪のサンプルを集め同様に測定し、比較検討し、新潟県に降った雪（雨）の特徴を議論し、その結果を報告する。

また、酸性降下物の樹木への影響を調べるために、樹体の異なる位置と樹木下の土壌層中での雨や雪解け水を採取しその中の酸性降下物の量を調査した。測定地点は佐渡島北部の新潟大学農学部演習林内である。

さらに、酸性雪（雨）中の酸性降下物が土にしみ込み、土壌を少しずつ酸性化し、樹木・植物に悪い影響を与えている可能性がある。それらを検証するために、主として県内各地の土壌を採取し、それらの酸性化の程度と酸性溶液による溶出元素について検討した。

また東欧・北欧では酸性雪（雨）による森林への被害や湖沼の酸性化が進行していることはかなり広く知られている事実であるが、コンクリート構造物、石造や銅製のモニュメントの被害も顕在化している。ドイツ連邦共和国の東部地区とチェコ共和国の森林を改めて調査し、将来日本でも起こるかもしれない森林被害の現状を報告する。

## II 酸性雪(雨)の化学的特性

### 1 試料採取と分析項目

新雪と雨の採取については研究室で採取した他、各地の研究協力者に依頼して送付して頂いた。分析項目については、塩化物イオン、硫酸イオンおよび硝酸イオンはイオンクロマトグラフ法 (DIONEX Co., Ltd.製)、カリウムイオン、ナトリウムイオンは炎光度法、カルシウムイオンおよびマグネシウムイオンはICP法（誘導結合型プラズマ発光分光分析法、SPS1500V、セイコー電子工業社製）によった。

### 2 新雪と雨の陰イオン成分比

日本海側に降った新雪と雨について、含まれる陰イオンの比について比較すると、島根県から秋田県までを新潟県外の値とし、新潟県内試料と比較した平均値を図-1と図-2に示した。雨と新雪についてみると、新潟県外と新潟内の値にはほとんど差はなかった。これにより、新潟での雪と雨のそれぞれの値は島根県から秋田県までの値を代表していると言える。

### 3 普通新雪と酸性新雪の多変量解析

積雪についての塩化物イオン、硫酸イオンおよび硝酸イオン濃度 (ppm) を説明変量、pHを水素イオン濃度 (ppm) に換算した値を目的変量として多変量解析を行なった。その結果を式(1)と式(2)に示した。

酸性雪についての多変量解析式 (15試料) :

$$[\text{H}_3\text{O}] \text{ (水素イオン濃度, ppm)} = 0.209 \text{ [塩化物イオン濃度]} \\ - 4.336 \text{ [硫酸イオン濃度]} + 1.826 \text{ [硝酸イオン濃度]} \\ + 3.423 \quad (1)$$

有意水準: 10%以上

決定係数: 0.438

普通雪についての多変量解析式 (19試料)

$$[\text{H}_3\text{O}] \text{ (水素イオン濃度, ppm)} = 0.027 \text{ [塩化物イオン濃度]} \\ - 0.206 \text{ [硫酸イオン濃度]} + 0.235 \text{ [硝酸イオン濃度]} \\ + 1.002 \quad (2)$$

有意水準: 10%以上

決定係数: 0.223

この結果から、塩化物イオン、硫酸イオンおよび硝酸イオンの三つの陰イオンだけではいずれも有意水準が10%以上で、pHへの影響を十分説明できないことが分かる。そのために、カリウムイオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオンおよびマグネシウムイオンを追加した7成分について同様に多変量解析を行なった。その結果を式(3)、式(4)に示した。

酸性新雪についての多変量解析式 (15試料) :

$$[\text{H}_3\text{O}] \text{ (水素イオン濃度, ppm)} = 1.83 \text{ [塩化物イオン濃度]} \\ + 23.47 \text{ [硫酸イオン濃度]} + 2.98 \text{ [硝酸イオン濃度]} \\ - 1.86 \text{ [ナトリウムイオン濃度]} - 0.46 \text{ [カリウムイオン濃度]} \\ - 27.76 \text{ [カルシウムイオン濃度]} - 98.75 \text{ [マグネシウムイオン濃度]} \\ + 3.29 \quad (3)$$

有意水準: 硫酸イオン 1%有意

決定係数: 0.784

普通新雪についての多変量解析式 (12試料)

$$[\text{H}_3\text{O}] \text{ (水素イオン濃度, ppm)} = 0.19 \text{ [塩化物イオン濃度]} \\ - 0.39 \text{ [硫酸塩イオン濃度]} + 0.08 \text{ [硝酸塩イオン濃度]} \\ - 0.20 \text{ [ナトリウムイオン濃度]} + 0.01 \text{ [カリウムイオン濃度]} \\ + 0.66 \text{ [カルシウムイオン濃度]} - 0.45 \text{ [マグネシウムイオン濃度]} \\ + 1.38 \quad (4)$$

有意水準: 塩化物イオン 5%有意, ナトリウムイオン 5%有意

決定係数: 0.922

成分を7つにした結果、決定係数も大きくなった。酸性新雪については有意水準が硫酸イオンについて1%有意であり、普通新雪について有意水準が塩化物イオンおよびナトリウムイオンについてそれぞれ5%有意と計算された。このことによって新雪のpHを下げる原因物質の一つが硫酸イオンであることが分かった。いうまでもなく、硫酸イオンは硫黄酸化物から生じるものであることは知られている。しかしながら、大気中の硫黄酸化物と窒素酸化物の比率をみると硫黄酸化物の方が圧倒的に大きい、都市においてはこの比率が接近しつつあると言われている。

雨  
(平均値)

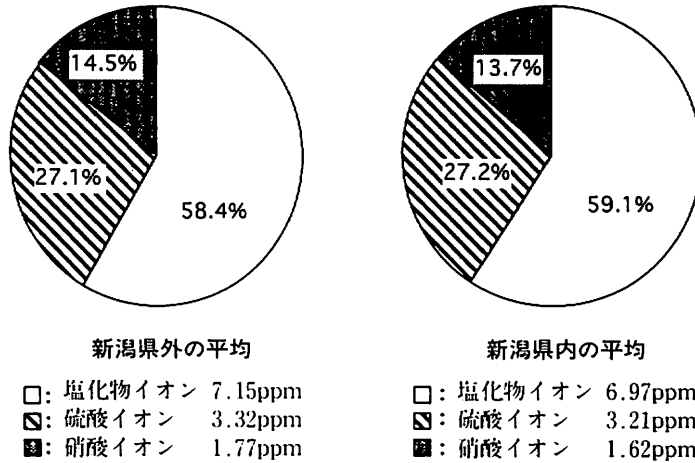


図-1 新潟県内・外における雨の中の塩化物イオン濃度，硫酸イオンと硝酸イオン濃度の組成比

Fig. 1 Ratio of chloride, sulfate and nitrate ions in the rain fallen in Niigata Prefecture and the other places in Japan.

新雪  
(平均値)

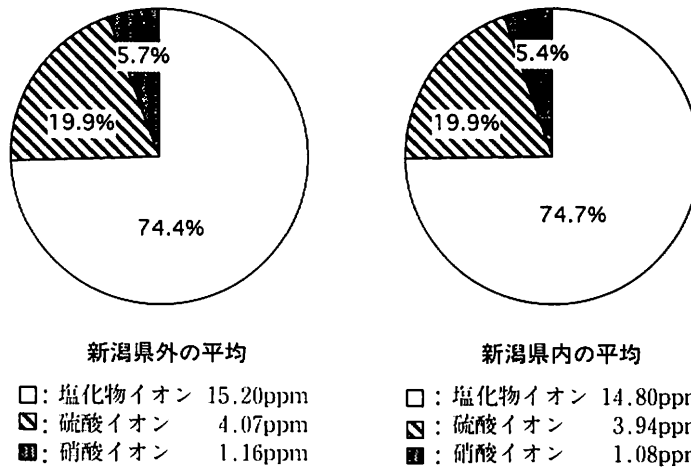


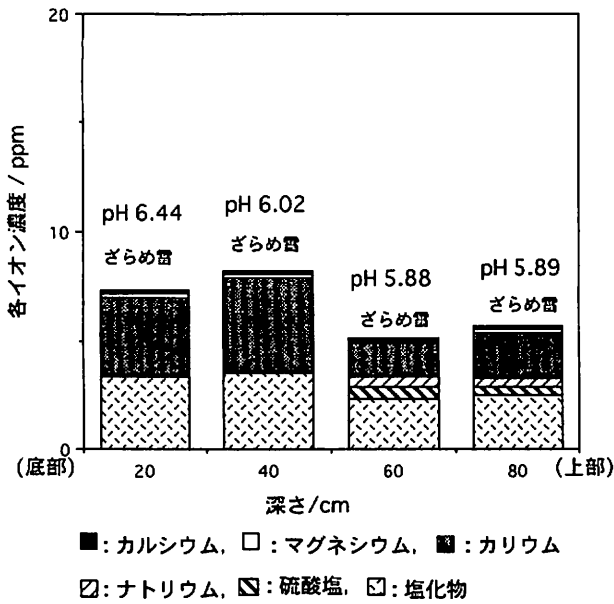
図-2 新潟県内・外における新雪の中の塩化物イオン濃度，硫酸イオンと硝酸イオン濃度の組成比

Fig. 2 Ratio of chloride, sulfate and nitrate ions in the fresh snow fallen in Niigata Prefecture and the other places in Japan.

#### 4 積雪中の各イオン濃度

雪は融雪時において雪の中の不純物が雪表面に濃縮されて、融雪初期において溶け出すことが知られている。積雪の中間においての様子を知る目的で新潟県内の比較的雪の多い地方の一つである湯沢町の積雪について調査した。積雪の深さ80cmの雪について下から20cm毎に掘り出して、その成分を測定した。その結果を図-3に示した。

比較的底部に近い部分（底から40cm以下）と雪表面に近い部分（底から60cm以上）に分けると、カ



図一 3 積雪の中の各イオン濃度  
 (新潟県湯沢町, 1996年5月23日)  
 Fig. 3 Concentration of some kinds of ions included in the piled snow (sampled in Yuzawa, Niigata Prefecture, May 23, 1996).

でも表層部に近いほどpH値が低くなっているのが分かる。このことは、木の芽のふき始める融雪後期よりも、融雪初期の融雪水のpHがより低く観察される事実を説明していると思われる。

### 5 まとめ

- 1) 新潟県の雪は、調査した鳥根県から秋田県までの日本海側の雪とほぼ同一の性質を持つと考えられる。
- 2) 水素イオン濃度を目的変数とし、7種類のイオンを説明変数として多変量解析した結果、酸性新雪が酸性である原因は硫酸イオンの存在で、1%有意であることが分かった。
- 3) 積雪中の深さ別に7種類のイオンの濃度を調べた結果、塩化物イオンやカリウムイオンなどの濃度が積雪表面近くでより低いのは、分析時にイオンクロマトグラムでそれらのイオンが先に溶出することと密接に関係あるものと推定される。
- 4) 積雪を深さ別にpHの測定した結果、表層部に近いほどpH値が低くなっていることから木の芽どきにより融雪初期の融雪水がより酸性になることを裏付けていると思われる。

### III 酸性雪にかかる森林の一般的特性としての酸性降下物の測定

酸性降下物の樹木への影響は、二項目が考えられていて樹木に直接接触することによる障害等の直接的作用と、林内雨が地中に入り、土壌から樹体へ影響する間接的作用とである。従って、酸性降下物の調査では樹体の各種の位置と土壌表層で調査した上で、総合的な判断に進む必要がある。前報(遠藤; 1995)では、主として日本各地での森林区域での酸性降下物分布の実態に触れたが、今回は佐渡島北部での測定成果を報告する。

## 1 調査地と調査方法

新潟県佐渡郡相川町大字小田（林地は大字大倉）の新潟大学農学部演習林において天然スギ・ブナ・イタヤカエデ・ミズナラの4種の調査木を選び、林床部・林冠通過部・土壌A<sub>0</sub>層通過部と樹幹流との4種の位置での流下水を採取した。この他に比較のために、林外での雨水を採取した。サンプルは、pH・ECの測定と、溶存成分としてNO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub>などの濃度測定に供した。また、1996年4月18日には積雪中のサンプルを採取して、上と同様の測定を行った。

## 2 結果と比較

### 2.1 樹種別比較

樹種別によるpHの7月から11月（1995年）までの時期別変化を見ると、スギでは樹幹流（図-4.1）で9月以降に3.5から4.0の低い値となった。ブナなどの広葉樹pHでは、6.0前後の高い値となった。この傾向は、樹冠通過雨（図-4.2）、林床植生通過雨（図-4.3）や土壌A<sub>0</sub>層通過雨（図-4.4）でも同様であった。一方、林外雨では海塩由来を含んで高い値の雨水であった。溶存成分濃度で見ると、NO<sub>3</sub>とSO<sub>4</sub>とでスギが高濃度を示した。従ってスギは広葉樹に比べて乾性降水物の付着能力が大きいと言えよう（塚原他；1994）。他方、Kの濃度は広葉樹で高く、中和能力を持つことがpHを高くしている一因であろうと考えられる。

### 2.2 採取位置別比較

スギでは、樹幹流部分が最もpHが低く、A<sub>0</sub>層ではこれよりも1.0前後高い値となった。他の広葉樹3種では、有為な差がなかった。このことは、A<sub>0</sub>層に基本的に酸性緩和能力がありスギでは顕著に現れるが、もともと酸性度が低い広葉樹ではこのpHを更に緩和する能力ではないものと考えられる。

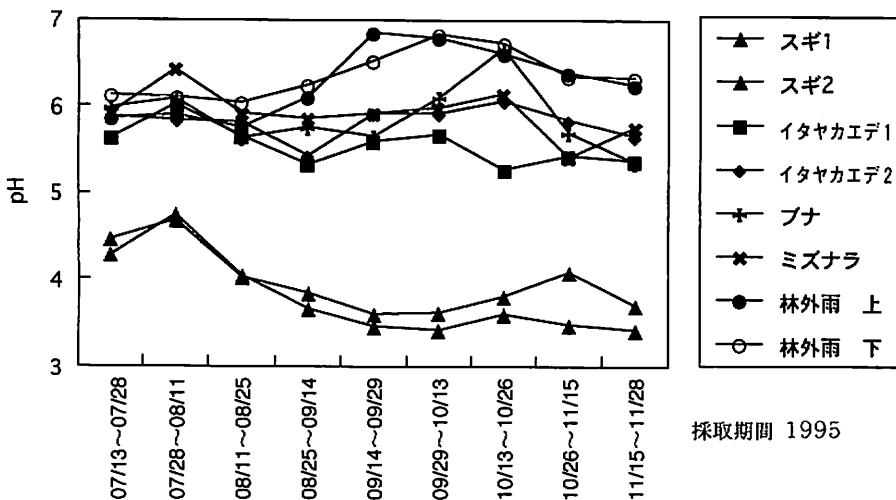


図-4.1 樹幹流pHの樹種別季節変化

Fig. 4.1 pH variation of flow down water along the trunks of trees by seasons.

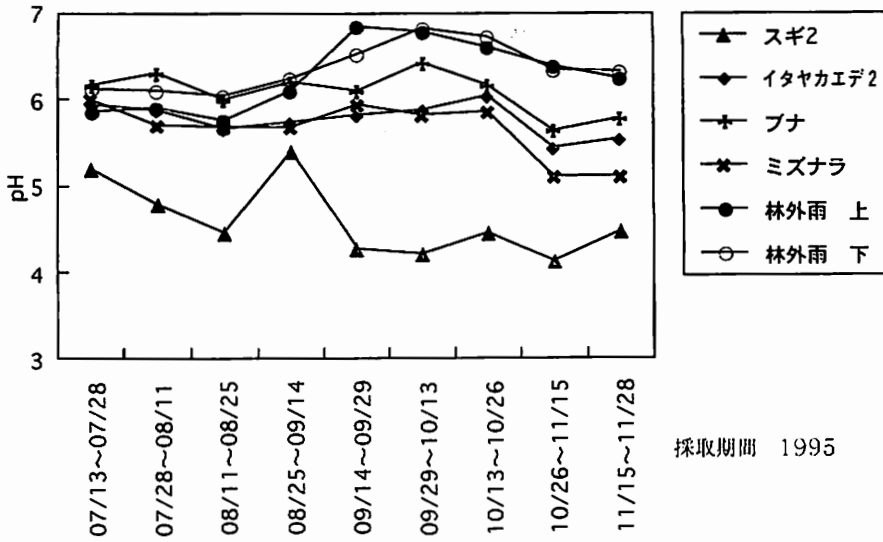


図-4.2 樹冠通過雨pHの樹種別季節変化  
 Fig.4.2 pH variation of fallen rain through tree canopies by seasons.

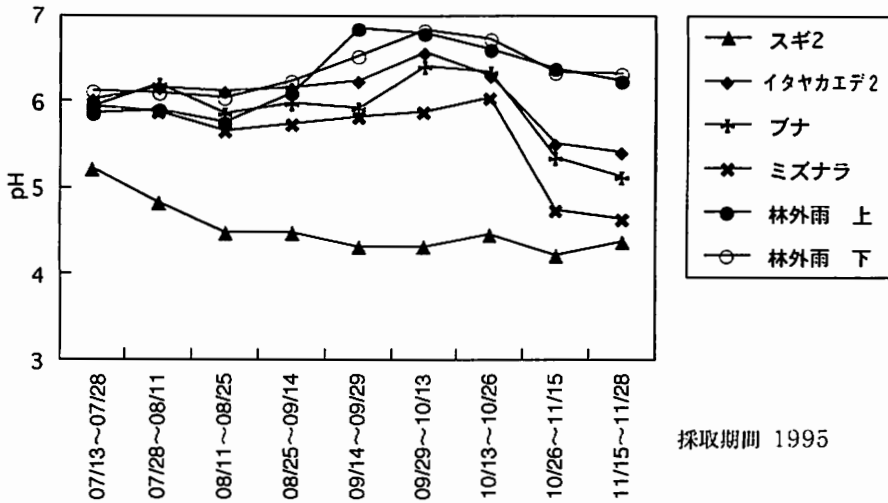


図-4.3 林床植生通過雨pHの樹種別季節変化  
 Fig.4.3 pH variation of the rain passed through the vegetation under trees by seasons.

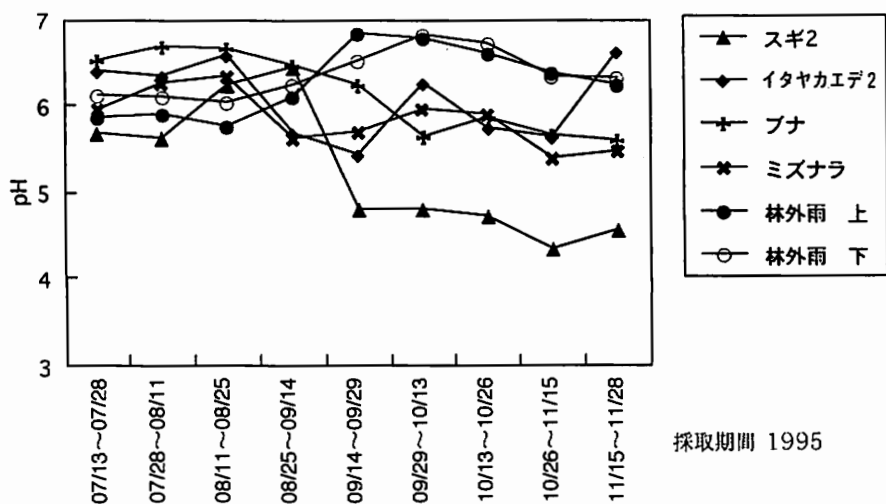
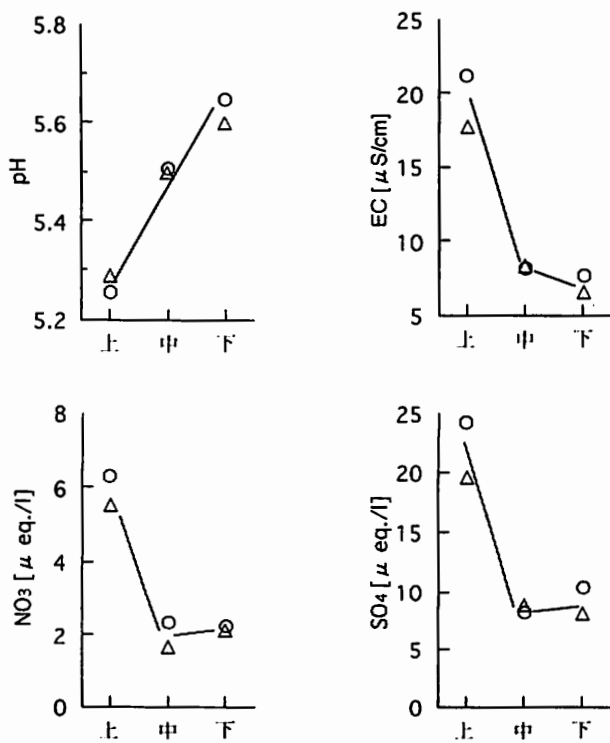


図-4.4 A<sub>0</sub>層通過雨pHの樹種別季節変化  
 Fig. 4.4 pH variation of fallen rain through A<sub>0</sub> layer of soil under the trees by seasons.



○ B1ブナ 樹幹から80cm, 積雪107~117cm, △ B2ブナ 樹冠下, 積雪94cm

図-5 森林内の積雪の性質  
 Fig. 5 Characteristics of piled snow in forest.



## 2.3 積雪の場合

ブナの例を見ると、図-5に示すように、積雪表層でpHが低い傾向がある。この時期の積雪ではNO<sub>3</sub>やSO<sub>4</sub>の濃度値が表層で大きく、酸性降水物によるpHの低下が伺われる。

## 3 まとめ

以上の測定結果から、酸性降水物は、樹皮が粗く常緑樹として降雪期にも樹葉をつけているスギに多く取り込まれ、一方、塩基類の溶脱が多い広葉樹ではこのために酸性が緩和されるものと考えられる。また、スギ樹下の土壌では、微生物の活動によって酸性の緩和が指摘される。

## IV 土壌からの溶出元素

酸性雪（雨）による土壌への影響を検証するために、主として新潟県内の土壌を採取し、それらの酸性化の程度と酸性溶液による溶出元素について検討した（加藤，田口；1996）。採取土壌の多くは樹木下の土壌で、15～20cm程度掘り下げた深さから採取したもの（田口，青山他；1995）である。サンプルの数は77個であった。

### 1 土壌の酸性化

#### 1.1 土壌のpH測定法

土壌の酸性化をみるために土壌のpHを測定した。土壌試料の調整と測定方法（田口，青山他；1994）は、サンプル土壌を1週間位かけて自然乾燥し、millで粉碎し、篩い分けし、1mm以下の粒子とし、その10gを秤量し、共栓付三角フラスコに入れ、水（イオン交換水）又は塩化カリウム溶液（pH=5.86）を25ml加え、かき混ぜ1時間程度接触振盪後、pHを測定した。pHはいずれも土壌が懸濁した状態で測定した。さらに硫酸と硝酸と2.5対1.0の割合で混ぜてpH3.0とした混合酸性溶液を調製し、同様にサンプルを入れ、そのpHも測定した。

#### 1.2 土壌のpH測定結果

77個の土壌のpHを測定した結果を、0.5間隔毎の度数分布で描き、図-6示した。水で振盪した場合、全サンプルのpHは4.03～7.83の範囲にあり、最大頻度を示すピークは4.5～5.0の範囲にあった。塩化カリウム溶液の場合、pHは3.08～7.23の範囲に入り、頻度の高い範囲はpH3.5～4.0であった。最大ピークを示したpH範囲は水の場合に比べ約1下がっている。pH=3.0の酸性溶液で振盪した場合、pHは3.79～7.31の範囲にあり、最大頻度を示したピーク位置は4.0～4.5で、ピーク位置は水の場合とKCl溶液の場合の中間に位置した。pH3.0の溶液を用いていながらも3.0以下にならず、土壌の緩衝能力の大きいことが推察された。

三つのピーク位置は、溶液のpHが低

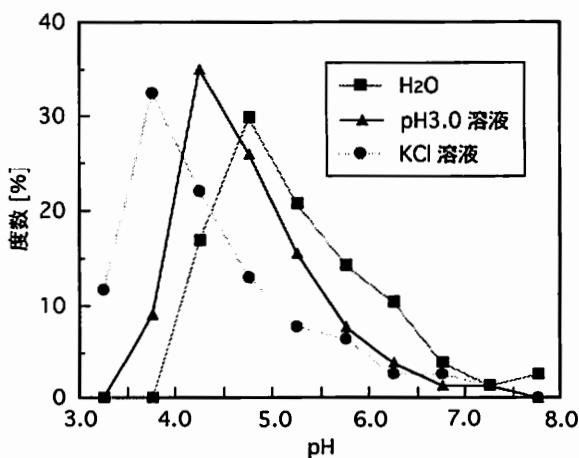


図-6 三つの異なる溶液に接触後の土壌のpHの度数分布(サンプル数77)

Fig. 6 pH-frequency of the soil suspended in three different solutions (77 samples).

くなればより左側にシフトしKCl溶液の分布に近づき、シフトした分のpHまたは面積が全サンプル土壤の酸性化示す指標になると期待される。水、塩化カリウム溶液、酸性溶液で振った後の溶液のpHは低ければ酸性化が多少なりとも進んだ土壤と推定される。いずれのpHも5以下であったものをピックアップすると、77サンプル中33サンプルであった。

## 2 pH3.0の酸性溶液による溶出元素

77個の土壤を用い、pH3.0の酸性溶液による溶出元素の分析結果を示す。溶出方法・分析方法は、土壤試料10gにpH3.0の酸性溶液を50ml加えて振盪し、遠心分離機と0.2 $\mu$ mのメンブランフィルターでろ過し、ろ液中のAl, P, Ca, Fe, MnをICPで分析し、ろ液のpHと溶出濃度との関係を求めた。

### 2.1 アルミニウムの溶出

図-7にアルミニウムの溶出量を示した。横軸は平衡時の濾液のpHで、縦軸には溶出量を濃度で示した。アルミニウムは、土壤の酸性化に伴い土壤中からの溶出し、樹木などの根系に被害を及ぼし、樹木を枯らすという説がかなり有力視されている(中川;1992)。確かにpHが低い程、アルミニウムの溶出量は大きい。しかしpHが低いところでも、溶出量の少ないサンプルが多数ある。見方を変えたとこれらの土壤からは既にアルミニウムの一部が溶出した後の土壤の可能性もある。

### 2.2 リンの溶出

図-8にリンの溶出量を示した。大略0.5mg/l以下の濃度で検出された試料が多い。その濃度以下であればリンが不足している土壤と推定される。50mg/kg-Soil(即ち0.5mg-P/10g-Soil)又は液側で0.5mg/l当たりを基準にとるのが妥当ではないかと考える。0.5mg/lを基準にすると、それ以下のリンを含有する土壤サンプルは、77サンプル中61個がこの濃度以下であった。土壤からの溶出元素測定時のpHが5.0以下で、かつリン濃度が0.5mg/l以下の土壤サンプル数は33であった。

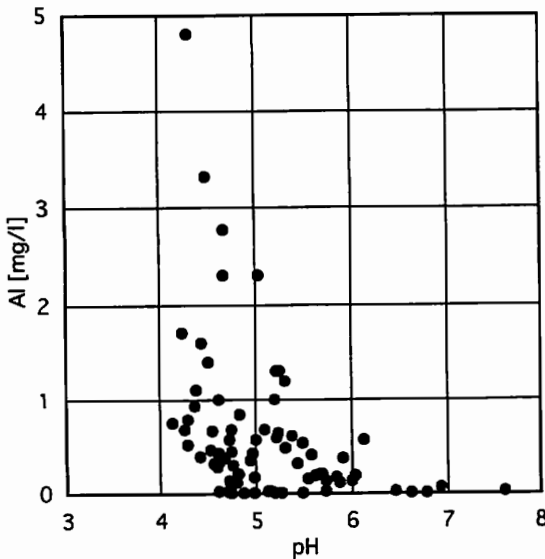


図-7 土壤からのアルミニウムの溶出  
Fig. 7 Aluminium leached from soil with a pH3.0 soln.

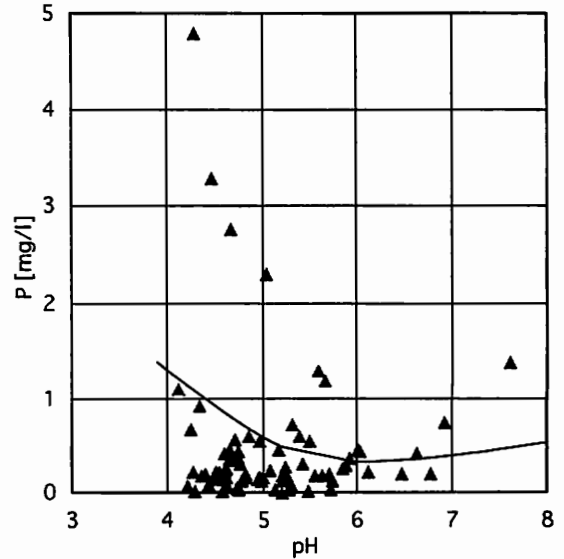


図-8 土壤からのリンの溶出  
Fig. 8 Phosphor leached from soil with a pH3.0 soln.

## 2.3 その他の金属の溶出

鉄とマンガンの溶出量はいずれも平衡時のpHが低い程、高い値を示した。しかし、低い領域でも溶出量の少ないサンプルも多く、既に溶出が進んだ後か最初から含まれてなかった土壤中、いずれにしろ溶出量が少なく、酸性化を裏付けているデータと思われる。カルシウムの場合は、アルカリ側の溶出量が多い。カルシウムの溶出が緩衝作用に寄与している可能性が高い。リン、アルミニウム、マンガン、鉄およびカルシウムの溶出濃度の比較すると、カルシウムの溶出濃度が他の4つと比べ圧倒的に高い。他のアルカリ金属の溶出量も今後検討したい。

## 3 サンプル土壤の酸性化

酸性雪（雨）による土壤への影響は、現段階では深刻であるとは考えずらいが、pH測定とリンなどの溶出試験の結果から、主に新潟県内で採取した77サンプル中その43%の33のサンプルはすでに酸性化が進んでいる可能性が高い。どの地域の土が酸性雪（雨）によって酸性化が進んでいるか、どのような種類の木の下での土壤が特に酸性化が進んでいるかも特定することは難しい。また、山の北斜面に多いとか、海岸線と山側でどちらが多いということも特定することは困難で、万便なく酸性化が進みつつあると結論するのが妥当と思われる。

## V ドイツ、チェコにおける酸性雪(雨)による森林被害の現状

自然環境が地球的規模で侵されつつあると国連の場で最初に警告されたのは、1972年のストックホルムでの人間環境会議の場である。そこでは特に、酸性雨（雪）に起因する森林の枯死や湖沼からの魚類の消滅が取り上げられた。

この酸性雨（雪）は、旧東ヨーロッパでエネルギー源として大量に使用されている石炭から発生する硫酸化合物や、自動車の排気ガスに含まれる窒素化合物と言われている。

酸性雨（雪）は工場や火力発電所の周辺だけに降下するわけではなく、多くの場合、国境を越えて広がる。筆者らは、1973年以来、ポーランド、チェコ、旧東ドイツの酸性雨（雪）による森林被害の様子を見聞してきた。

青山は1996年9月2日から9月21日まで国際会議の出席の間にチェコ、ドイツの酸性雪（雨）による森林被害の現状を視察（図-9）した。チェコはチェコ地質調査所のパーチェス教授（T.Paces）とチェルニー博士（J.Cerny）の案内で東部のモスト（Most）の石炭火力発電所と旧東ドイツとの国境のNacetinおよびJezeriの森林被害の様子を調査した（写真-1、写真-2、写真-3）。チェコや旧東ドイツの主力エネルギー源の褐炭は硫黄含有率が高く、旧体制下の火力発電所の石炭ボイラーの大半が、排煙から硫黄分を除去する脱硫装置を備えていなかったため、森林枯死の原因となった。

ドイツはマグデブルグ大学（Otto-von-Guerike-University of Magdeburg）のゾンターク博士（R.Sontag）の案内で、Nacetinのドイツ側の森林被害および旧東ドイツのスキー場を視察した（写真-4、写真-5）。ゾンターク博士によれば、1994年時点での、旧東ドイツおよび旧西ドイツのエネルギー構成は図-10、図-11のようであり、ドイツ全体では図-12のようになっている。これより、旧東ドイツでは硫黄分の多い褐炭へのエネルギー依存率が高いことが判る。現在、旧西ドイツの経済技術援助により石炭火力発電所の脱硫装置の整備を急ピッチで進めているので、これ以上森林被害は拡大しないとのことである。

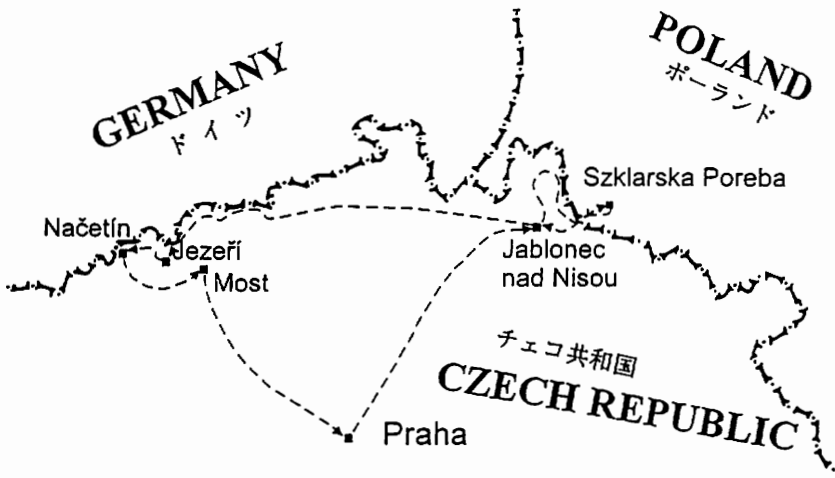


図-9 酸性雨(雪)による森林被害の調査地点  
 Fig. 9 Investigation spots of damaged forest by acid rain and snow.



写真-1 褐炭を使用したチェコの火力発電所  
 Phot. 1 Electric power station used brown coal in Czech Republic.

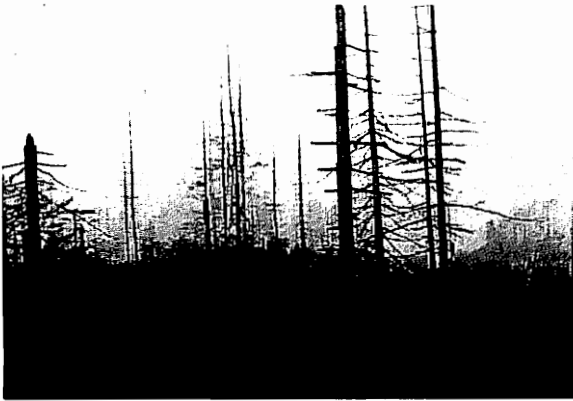


写真-2 チェコと旧東ドイツの国境地帯の酸性雨(雪)による森林被害  
 Phot. 2 Deforested areas between Czech Republic and Germany.



写真-3 ナツェンにおけるチェコ地質調査所のドイツトウヒ森林調査地点  
 Phot. 3 The research site (spruce forest in Nacetín) for investigation on air pollution effect.



写真-4 枯死した森林を見渡すことの出来る  
旧東ドイツのスキー場  
Phot. 4 Deforested areas view from the  
upper part of the ski field.



写真-5 酸性雨(雪)により枯死したドイツウヒ  
を指差すドイツ、マグデブルグ大学のゾ  
ンターク博士  
Phot. 5 Deforested areas and Dr.Sontag  
(University of Magdeburg, Germany).

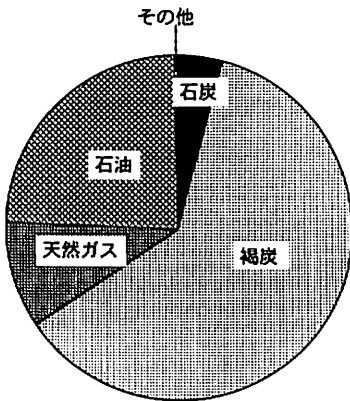


図-10 旧東ドイツにおけるエネルギー構成  
(82.5 Mio.t)  
Fig.10 Energy consumption former East  
Germany (82.5 Million Tons).  
(Primary Energy Consumption in  
million tons Hard Coal Units)

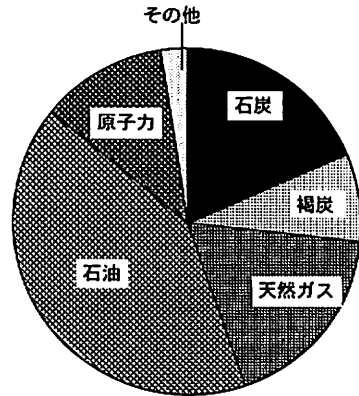


図-11 旧西ドイツにおけるエネルギー構成  
(408.5 Mio.t)  
Fig.11 Energy consumption former  
West Germany (408.5 Million  
Tons).  
(Primary Energy Consumption in  
million tons Hard Coal Units)

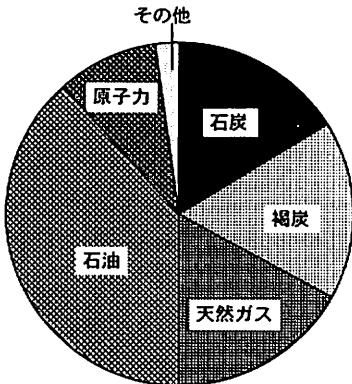


図-12 全ドイツにおけるエネルギー構成  
(491 Mio.t)  
Fig.12 Energy consumption in whole  
Germany (491 Million Tons).  
(Primary Energy Consumption in  
million tons Hard Coal Units)

チェコは自国エネルギー源の約60%を、旧東ドイツは約65%、ポーランドは約90%を石炭に依存している。これらの硫黄酸化物が北欧の湖沼や森林に被害を与えたように、日本も経済発展の著しい中国などの東アジアからの影響を受けて、同様の被害が出るのではないかと懸念されるデータが既に得られている。中国の硫黄酸化物の排出量は現在年間約2000万トンと日本の約20倍に近い。このまま対策が不十分で経済発展が続けば、20年後には約2倍の4000万トンになるという議論が国際会議 (Satake et al. ; 1996) の席でなされた。

## VI お わ り に

主として新潟県内に降った雨や雪のpHやその成分分析、森林に降った雨や雪の特性、土壌のpH及び幾つかの溶出元素の分析、チェコやドイツにおける野外調査の結果、以下のことが明らかとなった。

1) 新潟県の雪は調査した島根県から秋田県の日本海側の雪としてほぼ同一の性質を持つと考えられる。多変量解析の結果から、新雪のpHが特に低いのは硫酸イオンの影響であることが確認された。積もった雪を深さ別に幾つかのイオン分布を調べたところ、表層ほど塩化物イオンやカリウムイオンが少ないことが判明したが、pHは表層ほど低い値であった。

2) 酸性雪にかかわる森林の一般的特性として、酸性降下物は、樹皮が粗く常緑樹として降雪期にも樹葉をつけているスギに多く取り込まれ、一方、塩基類の溶脱が多い広葉樹ではこのために酸性が緩和されるものと考えられる。

3) 酸性雨や雪による土壌への影響は、現段階では深刻ではないが、pH測定とリンなどの溶出試験の結果から、主に新潟県内で採取した77サンプル中その43%はすでに酸性化が進んでいる可能性が高い。

## 文 献

武藤義一、及川紀久雄(1983)：イオンクロマトグラフィー、講談社、p.32.

同上、p.44.

山口東吾、田口洋治、加藤皓一(1996)：球状氷結晶中の硫酸イオンの濃度分布と溶出元素、環境化学、6巻、2号、203-210.

遠藤治郎(1995)：1995酸性雪シンポ要旨集、9-10.

塚原初男他(1994)：日林論105、407-410.

加藤皓一、田口洋治(1996)：酸性雪の特性と最近の動向について、PPM、27巻、7月号、59-65.

田口洋治、青山清道、加藤皓一、遠藤治郎、山本仁志(1994)：酸性雪および酸性雨に関する二、三の考察、新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報、No.16、37-48.

田口洋治、青山清道、加藤皓一、遠藤治郎、山本仁志(1995)：新潟県における酸性雪(雨)の土壌などに与える影響、新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報、No.17、83-98.

中川千枝(1992)：大気汚染物質による降水及び陸水の酸性化現象における無機化学的成分の化学的挙動、学位論文、10月.

K. Satake et al. edited (1996)：Proceedings of the International Symposium on Acidic Deposition and its Impacts