

新潟県における酸性雪(雨)の土壌などに与える影響

田口洋治^{*}・青山清道^{**}・加藤皓一^{*}・遠藤治郎^{***}・山本仁志^{***}

EFFECT OF ACID SNOW AND ACID RAIN ON THE SOILS AND OTHERS IN NIIGATA PREFECTURE

by

Yoji TAGUCHI, Kiyomichi AOYAMA, Koichi KATOH, Jiro ENDO
and Masashi YAMAMOTO

(Abstract)

The pH of snow and rain falling mostly in Niigata City was measured. The anions contained in the snow and rain were also measured. In addition, the influence of such acid snow and rain on the soil, structures and sculptures, and forest and trees was also considered with respect to social and natural conservation.

The pH values of the melted snow were mostly between 4.17 and 6.3. However, most of these values were less than 5.6, the value used to identify acid snow and acid rain. The pH values of the rain, meanwhile, were slightly greater than that of the acid snow. The acids, which caused the pH to decrease, were estimated to be sulfuric and nitric. The concentrations of such salts were larger than those of the acids. The snow and rain falling in Niigata City were strongly influenced by the sea breeze containing the salts coming from the Japan Sea which Niigata City faces.

From observations of construction materials, some buildings damaged by the acidic snowfall and rainfall have been found in and around Niigata Prefecture. Also, in Eastern Europe, many damaged structures and sculptures were easily found due to the acidic rain and snow fall probably coming from the large consumption of coal. From some field surveys in the forests of Niigata Prefecture, few withered trees due to acid snow and rain have been found, although the possibility such damaged trees should exist. One source of this possibility is the acidified soil. From our measurement of soil pH, 36% of the measured soils were acidified. By analysis of the components leached from the soil with a mixed solution of nitric and sulfuric acids, a relatively small amount of leached phosphate was found along with calcium and manganese.

Key words : Acid Snow and Rain, Coal, Bronze Sculpture, Concrete Structure, Forest, Soil,
Acidification, Phosphate

キーワード : 酸性雪・雨, 石炭, コンクリート構造物, 森林, 土壌, 酸性化, リン酸

*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

I はじめに

新潟県内の村上林業事務所、小千谷林業事務所、糸魚川林業事務所の各管内及び新潟大学農学部附属佐渡演習林などで酸性雪（雨）による被害の有無を実地調査し、現地の雪や雨も採取し、それらのpH測定を行い、さらには硫酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオンを分析した結果を報告する。同時に樹木の下の上層土壌も採取し、土壌の酸性化を検証するために、それらの酸性化の程度と酸性溶液による溶出元素を測定した。

また北欧・東欧では酸性雪（雨）によるコンクリート構造物、石造や銅製のモニュメントの被害が顕在化している。新潟県では多くの樹木は冬期間、雪の下にある。春先に、雪は凍結と融解を繰り返す、溶け始めると雪の中の不純物（この中には酸性を示す物質も含まれる）が優先的に溶け出すアンチドショック現象が起こる。酸性雪が新潟県のコンクリート構造物、森林（特にスギ林）などに与える影響も調査した。

さらに、新潟県内でも酸性雪（雨）による森林被害が予想されているので、森林の一般的性格と雪や雨によると考えられる被害について、最近の研究報告をもとに考察した。

II 新潟県の酸性雪(雨)の特徴

1 試料採取と分析項目

県内の村上林業事務所、小千谷林業事務所、糸魚川林業事務所管内及び新潟大学農学部附属佐渡演習林に実地調査に行き、現地の雪、樹木の下の上層土壌などを採取した。また、県内各地の協力者に依頼して雪の試料を送っていただいた。また分析項目としては、pH、塩化物イオン、硫酸イオン及び硝酸イオンを測定した。陰イオンの測定はイオンクロマトグラフによった。

2 酸性雪（雨）の割合

2.1 pH

全国的分布でみると、酸性雨の割合は50%であった。雪に主眼をおいた調査によれば全国的分布では雪の56.8%が酸性、新雪では実に77.8%が酸性であった（図-1）。新潟県内の調査地域では、雪では酸性は42.9%、新雪33.3%、雨で14.3%であった。平均値をとって地域的にみると新雪では新潟市、長岡市で酸性で、雪では佐渡郡、新潟市で酸性となった。

2.2 陰イオン

陰イオンを分析した結果を図-2に示した。雨、新雪、積もった雪の塩化物イオン、硫酸イオン、硝酸イオンの割合を示した。

地域別にみると、図には示していないが、雪の中の塩化物イオンは佐渡郡で非常に多く、他の海岸地域では能生町で多い他は山の中の湯沢町で当然ながら低かった。新雪では長岡市、新潟市、能生町と糸魚川の順で少なかった。硝酸イオンは、そのソースの一つは排気ガスと考えられているが、雪でみると佐渡郡、能生町、湯沢町、新潟市と糸魚川市の順で小さくなっている。新雪では、新潟市、長岡市、能生町と糸魚川市の順で小さくなっていた。硫酸イオンでは、そのソースは産業活動に由来するものと海水からである。雪でみると、圧倒的に佐渡郡で多く、以下能生町、糸魚川市、新潟市と湯沢町の順となっていた。新雪でみると、新潟市が最も多く、以下長岡市、能生町と糸魚川市の順で小さくなっていた。積もった雪では佐渡郡が非常に大きい。

以上の結果より、1) 平均値であるが、糸魚川市以外は沿岸部のpHが5.6以下であった。2) 佐渡郡で

は大規模な工場地帯もないのに、硫酸イオン値が非常に高かった。3)雨、新雪及び積もった雪の陰イオン比には大きな差は認められなかった。

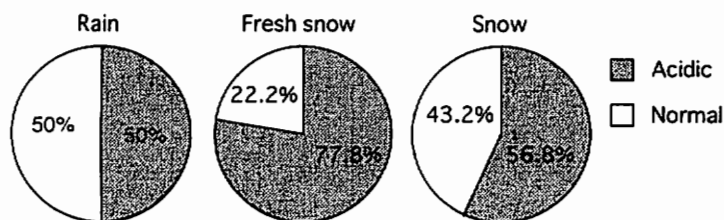


図-1 酸性雪，酸性雨の割合
Fig. 1 Ratio of acid rain and acid snow.

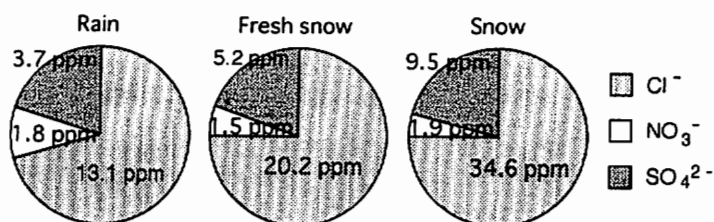


図-2 塩化物イオン，硝酸イオン，硫酸イオンの割合
Fig. 2 Ratios of chloride, nitrate, and sulfate ions.

III 土壌の酸性化とpH3.0溶液による溶出元素

酸性雪（雨）が降り、それが土にしみ込み、大地あるいは土壌を少しずつ酸性化し、さらに酸性化した土壌が樹木・植物に悪い影響を与えているのではないかと懸念されている。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。採取土壌の多くは樹木下の土壌で、地表面より15～20cm程度掘り下げた深さから採取したものである。サンプルの数は全部で61個であった。

1 土壌の酸性化

1.1 土壌のpH測定

土壌の酸性化をみるために土壌が液に懸濁した状態でpHを測定した（田口他；1994）。試料調整と測定方法は、サンプル土壌を1週間位かけて自然乾燥し、小石や根や枯葉を除いて、ミルで粉碎し、篩い分けし、1mm程度以下の粒子とし、その10gを秤量し、共栓付三角フラスコに入れ、イオン交換水（pH≒6.0～6.5）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。また、参考のために硫酸と硝酸とを混ぜてpHを3.0とした酸性溶液の三つの溶液中に土壌を入れてpHを測定したが、酸性溶液は土壌10gに対し50mlを加えたので、25mlを加えたイオン交換水や塩化カリウム溶液に合わせようとする、酸性溶液のpHの結果をlog 2だけ酸性側にシフトする必要があるが、その計算はされてない。

1.2 土壌のpH測定結果

61個の土壌のpHを測定した結果を図-3に示した。0.5間隔に分け度数分布で表示した。水の場合

それらのpHは4.03~7.83の範囲にあった。塩化カリウム溶液の場合、pHは3.30~7.23の範囲に入り、頻度の多い範囲はpHは3.5~4.0の範囲にあった。最大のピークを示したpHの範囲は水の場合に比べ約1程度下がっている。

pH=3.0の酸性溶液で振盪した場合、pHは4.09~7.61（補正すると3.79~7.31）の範囲にあり、最大頻度を示すピークは4.5~5.0の範囲にあり、ピーク位置は水の場合と同じであったが、度数は高くなっている。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る。

1.3 水と塩化カリウム溶液による土壌のpHの比較

さらに上記三者のpHの相互関係を見ると（図-4）、横軸にイオン交換水で振盪後のpHを、縦軸に同一試料の塩化カリウム溶液および酸性溶液で振盪後のpHを示した。上は水と酸性溶液のpHの関係を、下は水と塩化カリウム溶液のpHの関係を示した。直線は最小2乗法で引いたものである。

水の場合と塩化カリウム溶液の場合を比較すると、45度の線より外れていて、差が認められる。塩化カリウム溶液で振盪した場合の方がpHの幅で平均的に最大で0.8位下回っている。下がる理由は、カリウムイオンと土壌表面の水素とのイオン交換によると言われ、その差が大きい土壌表面では本来

あるべき陽イオンが既に水素で置き換えられていて、酸性化しているとみなせる。比較的古いデータ（上質工学会編；1979）と比較すると、pH（水）とpH（KCl）とその差は我々の実測値と殆ど同じであるが、pH（水）とpH（KCl）の個々の値は我々の測定値より高く、我々の実測値には低いものが多かった。

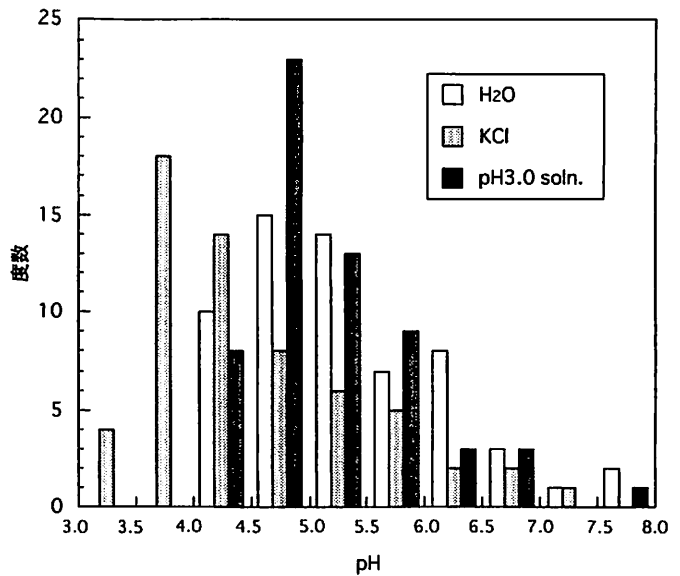


図-3 三つの溶液に接触後の土壌のpHの度数分布（サンプル数61）

Fig. 3 pH - frequency of the soil suspended in three different solutions (61 samples).

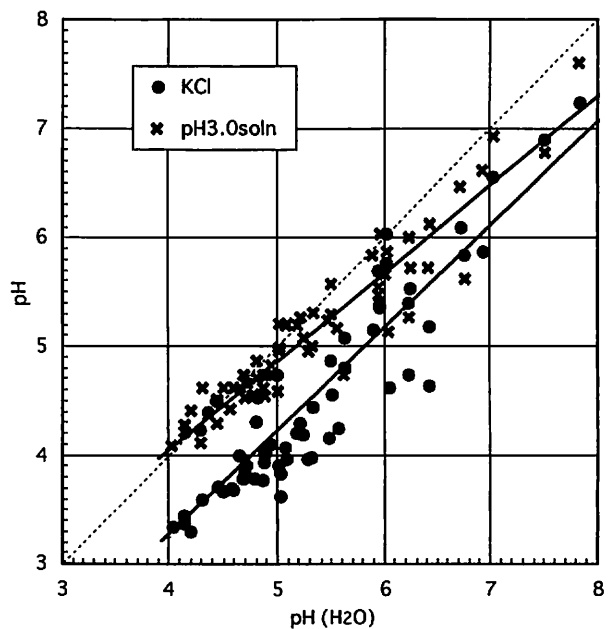


図-4 土壌のpHの比較（H₂O, KCl soln.）

Fig. 4 Comparison of pH among three solutions (H₂O, KCl soln, pH=3.0 soln.)

水、塩化カリウム溶液、酸性溶液で振った後の溶液のpHが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。仮にpHが5以下であったものをピックアップすると、61サンプル中25サンプルにもものほった。

2 pH3.0の酸性溶液による溶出元素

pH3.0の酸性溶液（田口；1994）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 μ mのメンブランフィルターで濾過し、濾液中のP、Al、Mn、Fe、CaをICPで分析し、濾液の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-5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溶出し、樹木などの根系に被害を及ぼし、樹木を枯れさせているという説がかなり有力視されている。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もあり、見方を変える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ようにも考えられる。

2.2 リンの溶出

図-6にリンの溶出を示した。大略0.5mg/l以下の濃度で検出され、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。0.5mg/lの根拠について論述する。

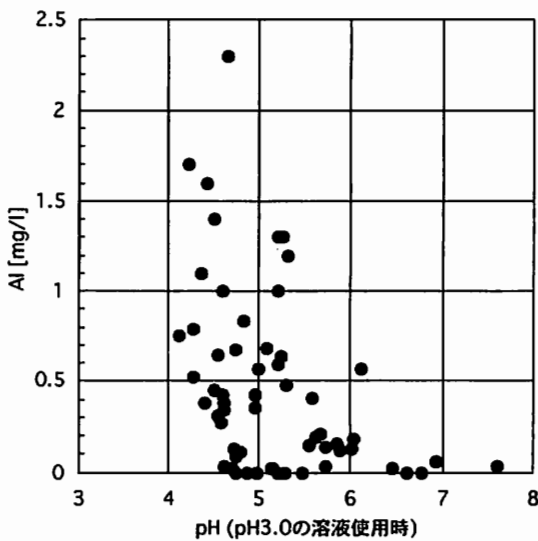


図-5 土壤からのアルミニウムの溶出
Fig. 5 Dissolution of aluminium from soil with a pH3.0-soln.

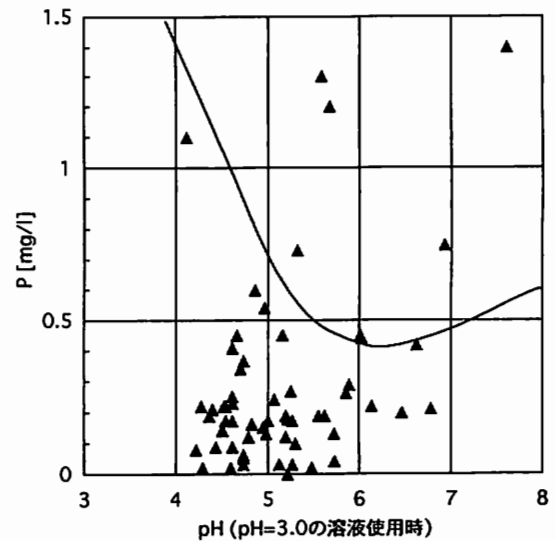


図-6 土壤からのリンの溶出
Fig. 6 Dissolution of phosphor from soil with a pH3.0-soln.

①溶液側からみると、河川、湖沼、下水道水などで検出されるリン濃度はたかだか0.5mg/l程度であることを参考にすると、8試料でこの値を上回り、富栄養化の水とみなせる。しかし、それ以外の大部分の試料では0.5mg/l以下であったので、リンが不足している土壤と言えるかも知れない。

②微生物や植物培養などで用いる培地の一つにMS培地（Murashige and Skoog；1962，化学実験テキスト研究会；1993）がある。植物を育てるに土壤中の好ましいリン濃度の一つの目安と考えられる。試薬などで人工的に調合して作る寒天で固めた一種の土壤である。予め五つの溶液を用意し、

ある割合で混ぜ、最後に1,000 mlとし、寒天で固める。調合する薬品中には、勿論NH₄、K、Pが入っている。その他種々入っているが、0.05g-P/1,000g-土壌（培地）あるいは50ppmの濃度で入っている。10gの試料であれば、0.5mgのリンが含有し、溶出試験で使用した土壌の量は10gで水を50 ml加えているので、仮に0.5mgのリンが50 mlの溶液に全部溶出したと考えると、 $0.5 \times (1,000/50) = 10$ mg/lの濃度となる。その(1/20)以下つまり0.5mg/l以下なら十分P-poorな土壌と考えても良いのではないかと推察される。

③土壌中のリン濃度は一般的には、800ppmと言われている（酸性雨調査法研究会編；1993，環境庁大気保全局；1993）。これはMS培地の16倍高い濃度で、土壌を完全に溶解後の平均値と思われ、地殻における元素の存在度の1,050ppmに近い値である。基準とした50ppmあるいはその(1/20)である2.5ppmは充分低い値であると言える。

④土壌中で存在するリンが全てオルトリン酸で、アルミニウム、鉄、マンガン、カルシウムなどの塩で固定されると仮定し、各種リン酸塩の溶解度（スタム、モーガン著、阿部、半谷訳；1974）をみると、一番低いリン酸アルミニウムの濃度は、pH=6付近で0.4mg-P/l程度で、0.5mg-P/lに近い。

以上四つの観点から判断し、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を基準とすると、それ以下のリンを含有する土壌サンプルは、61サンプル中53がこの濃度以下であった。土壌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以下の土壌サンプル数は26であった。

2.3 その他の金属の溶出

アルミニウム、リンの他にマンガン、鉄、カルシウムのpH3.0溶液からの溶出量も測定した。マンガンと鉄の溶出量はいずれもアルミニウムと同様、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い土壌で、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、アルカリ側で溶出量がやや多くなっている。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を比較すると（図-7）、カルシウムの溶出濃度が他の4つと比べ圧倒的に多い。マンガンの最大値が2.6mg/lであるのに対し、カルシウムの最大溶出濃度は21mg/lにも達している。カルシウムやアルカリ金属の溶出量については今後さらに詳しく検討したい。

3 サンプル土壌の酸性化

酸性雪（雨）による土壌への影響は、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、61サンプル中その36%の22のサンプルはすでに酸性

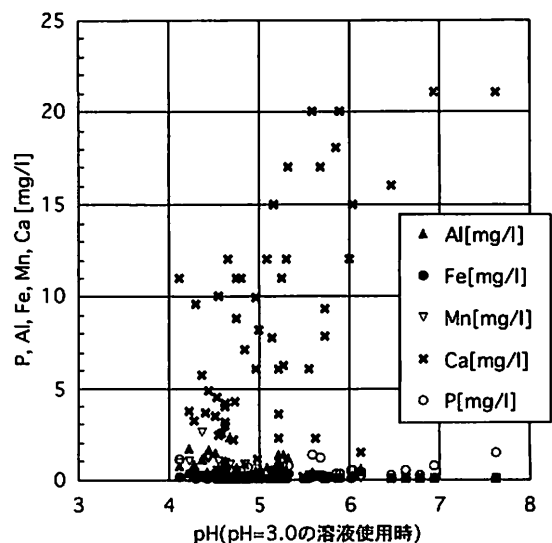


図-7 土壌からのリン、アルミニウム、鉄、マンガン及びカルシウムの溶出

Fig. 7 Comparison of dissolved amounts of phosphorus, aluminum, iron, manganese and calcium from soil with a pH 3.0-soln.

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の土壌が酸性化しているか特定することは難しく、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である。

IV 酸性雪（雨）による構造物の被害

1 グローバルなコンクリート構造物被害

北欧・東欧では酸性雪（雨）によるコンクリート構造物、石造や銅製のモニュメントの被害が顕在化している。中でもユネスコの文化財保護地域に指定されているポーランドの古都クラクフ（Krakow）の歴史的建造物や石像・銅像の表面が溶け出し、中には修復不可能な状態になっているものもある。ポーランド南部、旧東独、チェコやスロバキアの北部を含む石炭立地の工業地帯一円は「暗黒の三角地帯」と呼ばれるほど酸性雪（雨）による森林や構造物の被害が多数発生している。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、酸性雪（雨）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。これを契機として地球環境問題については国連を中心に世界の人々との協力体制作りが始まった。新潟県では多くの樹木は冬期間、雪の下にある。春先に、雪は凍結と融解を繰り返し、溶け始めると雪の中の不純物（この中には酸性を示す物質も含まれる）が優先的に溶け出すといういわゆるアシッドショック現象が起こる。酸性雪がコンクリート構造物などに与える影響などを調査した。

2 コンクリート構造物への影響

青山が始めて、東ヨーロッパの国々（旧ソ連、ポーランド、旧チェコスロバキア、ハンガリー）を訪れたのは1973年であり、ポーランドへはその後5回訪れ、石炭の大量使用による酸性雪（雨）による構造物被害状況を調査した。その一例を写真-1に示した。火力発電所や工業地帯あるいは旧式の自動車などから排出される多量の亜硫酸ガスや窒素酸化物が大気中で化学変化を起こし、硫酸や硝酸になり、雨や雪に含まれて降下する。降下した酸性原因物質が石材（大理石、花崗岩など）、コンクリートなどへ付着し、被害を与える。天然材料はプラスチックなどの人工材料に比較し耐酸性は低い。コンクリート構造物にひび割れが存在したり、品質の劣る多孔質のコンクリート中に雨水が内部に浸透し、水酸化カルシウムが溶解し、「つらら」を形成する。この「つらら」の正体は主として炭酸カルシウムの結晶である。1995年9月、ルーマニア滞在中にもこの「つらら」を多数確認した（写真-2）。

日本でも10数年前からこの種のものが各地で顕著に現れ始めた。コンクリート構造物では、ビルのベランダ下面（写真-3）、陸橋や跨線橋下（写真-4）などで観察される。つららのX線回折の結果の一例を図-8に示した。

炭酸カルシウム試薬のX線回折パターンと酷似しており、「つらら」の主成分は炭酸カルシウム結晶であると同定された。

一般に酸性溶液は次のようにコンクリート構造物を侵食する。①セメント及びセメント水和化合物の溶解、②コンクリート中に存在する石灰質骨材の溶解、③鉄筋の腐食等である。

3 国際協力の必要性

我が国と比較し、大気環境基準のゆるい中国やロシアなどが排出する大気汚染物質が酸性雪（雨）の原因となり、「西高東低」の典型的な冬型の気圧配置の時に、北西の風で運ばれて、日本海側の森



写真-1 酸性雪(雨)によるクラクフ市内の道路橋被害(1992.9.20撮影)
 Phot. 1 Damage of concrete bridge due to acid snow and rain in Krakow, Poland (Sep.20,1992)



写真-2 ママイアのコンクリート構造物に生じたつらら(1995.9.13撮影)
 Phot. 2 A fringe of calcium carbonate on the eaves, dissolved from a concrete structure in Mamaia City, Romania (Sep.13,1995)



写真-3 湯沢町のコンクリート構造物に生じたつらら(1995.4.22撮影)
 Phot. 3 A fringe of calcium carbonate on the eaves, dissolved from a concrete structure in Yuzawa Town (April 22,1995)

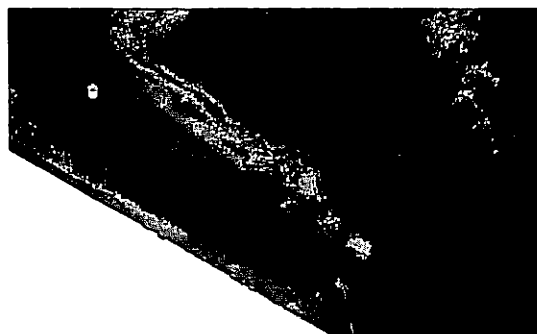


写真-4 JR越後線跨線橋下に生じたつらら(1995.7.21撮影)
 Phot. 4 A fringe of calcium carbonate on the concrete bridge of JR Echigo-line (July 21,1995)

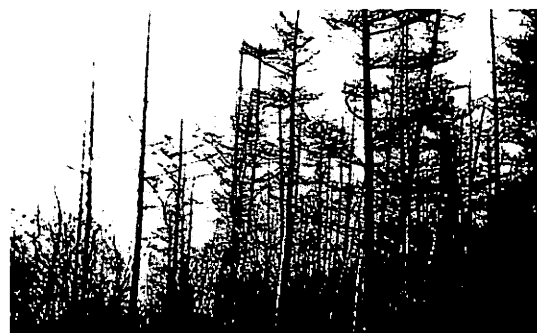


写真-5 赤城山大沼周辺で観察された枯れたからまつ(1994.10.31撮影)
 Phot. 5 Dead larch trees observed in the south of Ohnuma in Mt. Akagi (Oct.31,1994)



写真-6 国道17号線芝原トンネル付近で観察された枯れたスギ(1995.4.21撮影)
 Phot. 6 Dead Japanese cedar observed near Shibahara - tunnel on R-17 (April 24,1995)

林や構造物に被害を与えることが予想されている。日本海側都市の酸性雪（雨）の化学分析値からみた特徴として、冬期間風速が強いほど雪のpHが低くなる傾向がある（加藤，1995）。グローバルな環境問題との関係で各国の協力（Lewis et al. 1993）による早急な調査，研究，対策が必要である。

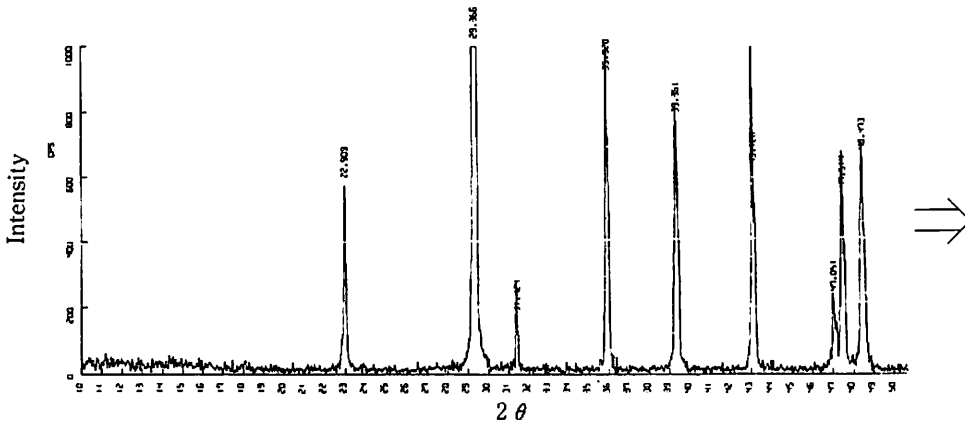
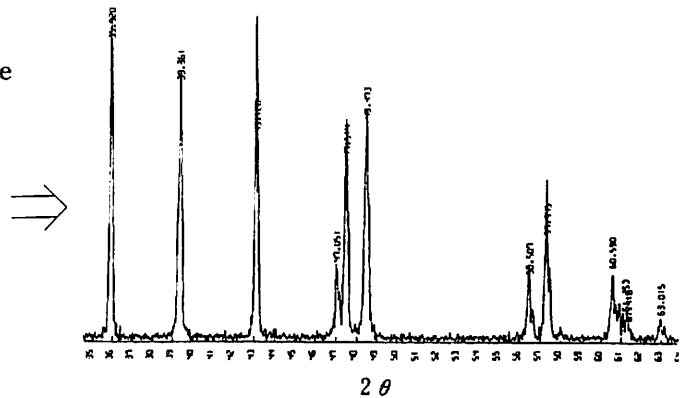


図-8 コンクリート構造物に生じた「つらら」のX線回折図
 Fig. 8 X-rays diffraction of concrete fringe.



V 調査現地の森林（スギ林）の現状

森林の持続と林業活動の活性化という立場から、成長中の森林、木材資源となる森林、特に人工林（スギ林）あるいは水源供給地の山岳林の森林の衰退は、現状の環境変化においては将来危惧される。

1 調査地点の選定

現地調査地を選定したポイントは、①標高の高い所②夏冬行ける場所、夏は土、冬は雪のサンプリング可能な地点③北風の当たる場所、雪が吹き付ける地点④県行造林、民有林の4点である。具体的には、スキー場付近の県行造林地か民有林、そして近くに小、中学校があり、雪の観察を行っている所である。森林の酸性雪による調査は、県北部地区を村上林業事務所管内、中部地区を小千谷林業事務所管内、南部地区を糸魚川林業事務所管内、そして佐渡である。

今回の現地調査は、現状の把握、冬期夏期のアクセスの問題とともに酸性雪による被害か、他の気象的要因、物理的要因、あるいは樹病学的要因かを会員が認識することも含めて実施した。1994年10月に村上地区の若ブナ高原スキー場、葡萄スキー場、群馬県赤城山大沼周辺と1995年1月から6月にかけて糸魚川地区のシーサイドバレースキー場、能生町、小千谷地区の湯沢町スキー場、国道17号線周辺、そして佐渡地区の新潟大学農学部附属演習林、大佐渡、小佐渡の5地区で実施した。

2 調査結果

写真-5は群馬県赤城山大沼を望む斜面の「からまつ林」の枯死状態である。写真-6は国道17号線脇（芝原トンネル手前）で冬期間国道除雪の排雪地でロータリー除雪車で猛烈に雪を吹き付けられたため、杉の枝先や樹皮表面がかきとられた状態で枯死木も見られた。スキー場のリフト脇のスギ林でも同様の状態が見られた。今回の調査では、新潟県内では、特に酸性雪、酸性雨などによる被害が無いという保証はない。特に、市街地周辺の造林地（スギ林）や水源供給地の山岳林に危惧される。

3 直接的影響

スギ苗2、3年生に硫酸と硝酸の1:1の混合液をpHを調整し、pH1、pH2、pH3、pH4で1本当たり約300~400mlを週2回の間隔で15~20回散布し、樹木成分分析（リグニン・セルロース）を行った実験結果（丸尾；1992、久米；1993、小川；1994）をみると、リグニン含有率はpH1~pH4と無処理で、それぞれ34、32、30、30、30%になり、pHが低いところでリグニン含有率が高くなる傾向を認めている。逆にpHが低いところでセルロース含有率は低くなる傾向が見られる。さらに散布終了後約1年経過したものは、リグニン、セルロースともほぼpHに関係なく、同率の含有率を示している。pH2の溶液散布の実験開始から1ヵ月後の実験木で枝葉端部分に異常が明確に認められ、同溶液の2ヶ月後にスギ苗木全体に見られる。このように短期間にスギ苗のリグニンの含有量や外的変化が明らかに認められるのはpH2の溶液であり、自然界で継続的にpH2の酸性雪（雨）が降り注ぐ可能性はない。ただし、pH3やpH4の溶液で、長期間かけた場合にどうなるかは興味深い。

VI 森林の一般的性格と酸性雪（雨）による被害の考察

酸性雪に注目しての調査研究は、近年少しずつ発展してきており特に森林被害との関連で進展しつつあるとの実感である。ここでは、まずなぜ森林に注目すべきか、森林に注目したときなぜ森林保護であるべきか、従来は森林保護の視点がどこにあったか、等を総合的に考え、ついで、酸性雪または酸性雨を森林保護の立場でどう理解してきたかについて触れる。また、近年、進みつつある酸性雪調査の内容を事例的に述べる。

1 森林の一般的性格

森林の存在と人間の生活との関係は、森林が人間の生存とそのための生産活動の維持発展に重大な関係があると認識されてきた所に出発している。人間にとって森林から得られる木材がとにかく便利な素材であった。そこで、その木材供給源としての森林は現在でも重要さを減らしてはいない。木材の代替品はあるが、木材需要は増加の傾向である。

一方、森林には土地保全機能がある。具体的には斜面植性による土壌侵食防止、根系緊迫による山地崩壊の防止、時には地すべりや土石流の発生防止にも一定の範囲で貢献する所がある。加えて、洪水と渇水に対し森林からの流出一様化の過程を通して洪水軽減と水供給維持の効用が認められる。

ところが、世界的規模では森林面積もその蓄積も歴史的には現象の傾向にある。例えば、世界文化の発祥地とされる中近東では砂漠化が進み、古くは文化文明を支えたレバノンスギも殆ど壊滅し小面積の痕跡を残すに過ぎない。中国でも黄河の濁りは以前から著名であったが、森林の喪失に伴って長江でも流砂汚濁が顕著である。アフリカの砂漠の変動に加えて、エジプトの荒廃も激しい。例のピラミッドは素材の大部分が石であるにせよ要所に木材が使われていて築造時には、例えばレバノンスギ

などが使用されたと思われるし、また、富裕者の墓地には木造船が副葬されてるように木材が貴重品であったことが窺われる。他方、ヨーロッパでは産業革命に伴って鐵の精錬用に木炭の需要が増加したと相俟って森林の減少が憂慮された時代を経て、森林の復興に力を尽くし現在では見事な林帯を備えるが、これも近年300年前後のことに過ぎない。要するに、森林は文化発展に貢献すると同時に、文化によって損耗してきたという経過をたどる。

上記のように、森林には木材生産・国土保全に加えて文化資源の側面があり、人類の生存と発展の周辺環境のとしての重要さが今改めて認識されるべきである。

2 森林の保護

このような森林は天然自然のものであるが、また、周辺の状況に敏感に反応するものである。森林群系の分布図（東京農工大学編；1992）をみると、西南日本でカシ・シイなどの暖温帯林があり東日本にブナを主とする落葉広葉樹の冷温帯林がある。北ではエゾ・トドなどの亜寒帯林が存在するように、森林が気候などの環境条件に強く支配されていることが分かる。なお、スギのような人工林では落葉樹林帯から照葉樹林帯まで広く分布するがやはり環境に依存し寒地や熱帯では良く成育しない。森林の永続性を保証するには計画的な伐採と育林が重要で、とくに従来は森林破壊が人間活動としての利用伐採に限られていたので、この限りでは森林計画が大きな力をもっていた。

しかし、他の人間活動が森林の存在に影響するような場面、例えば酸性雪被害への対応などは従来考えていないことであるので、このような環境変化にどう対応するかが今後の課題である。

従来も、森林被害については森林が周辺状況に良く反応し、いわば弱みを持つと認識しての森林保護の理念は定着してはいた。例えば、まず雨と風への対応であるが、雨では地表流による土壌侵食やリル・ガリー発生、また、地中水の増加による山崩れ・地すべりなどマスマーブメントの発生が、例えば樹木成育基盤の破壊となるのでそれらの防止対策と発生予知が考えられてきた。風では強風による風倒木の発生があり、ヨーロッパでのドイツウヒ被害、わが国でも3年前の台風9号被害などが著名であり、一方、積雪地では、吉野スギに見られる冠雪害、なだれによる倒木や折損、根曲がり材の発生が目立ってきた。

しかし、いずれも物理的無機的被害であり、近年認識されつつある大気汚染のような化学的扱いを必要とする場面は誠に不慣れという実態であった。

3 酸性雪・雨の被害

3.1 酸性物質

大気中に汚染物資が供給されると、雨水中にSOx, NOxが含まれて酸性化し、pHが5.6より低い状態で降雨となる。森林に対しては以下の障害を引き起こし環境維持上大きな問題となる。とくに、1950年代に北欧で顕著となった。その主な原因は、①樹木に対しての組織破壊・生理障害②土壌では陽イオンの減少・金属の可溶化・根の活性低下で、樹木は枯死に至り、森林は破壊される。この現象は主として北アメリカとヨーロッパに認められ、現在中部ヨーロッパで100万haの被害があるとされる。日本では、しかし、それほど顕在化していない。四方を海に囲まれているという事情も関係しているように、いずれは問題化するであろう。例えば、スギの衰退の観察もある（四出井綱英編，山家；1990）。衰退は東京から北西方面に拡大している。スギだけでなくケヤキでも枯れ枝増加・年輪幅減少が目立つ。この衰退が酸性雨に起因するかどうかはなお未解決である。

3.2 森林被害（東京農工大学編；1992）

ヨーロッパにおける酸性雨被害は、旧チェコスロバキア・オランダ・イギリス・デンマーク・ポーランドで葉の損失率が大きい。世界の雨の酸性度分布では東ヨーロッパ・中国・アメリカ東部にpHが小さく、森林被害分布と関係があると見られる。日本では関東のスギ梢端枯損・神奈川県丹沢山塊のモミ林立ち枯れが注目されるが、現在のところ酸性雨との因果関係は明らかではない。

日本の酸性雨調査（環境庁；1984～1988）で得られた雨水のpHは4.4～5.5平均4.7である。酸性雨によって森林被害が生ずるとすれば、酸性雨の樹木への直接被害と、酸性雨が森林土壌を酸性化して間接的に被害を与える場合が考えられる。①直接的影響：スギの幼苗に2～3回/週の割合で2か月間酸性水を散布した結果では、pH4.5（成長に変化なし）、pH3.0（成長は低下、しかし可視的障害なし）、pH2.0（葉の先端に赤褐色の障害あり）のようであった。従って、pH4～5の酸性雨では今の所直接影響は出ないと思われる。②間接的影響：大気汚染物質が地表面へ沈着する様相は次の三つに分類される。即ち、直接（ガスや微粒状にて、乾性沈着）、植物体から流下（樹幹流など、乾性沈着）、降水とともに（湿性沈着）。

植物体から流下する乾性沈着量は裸地に降る湿性沈着量よりも多い。また、乾性沈着量は樹種により異なり、スギ・トウヒなど針葉樹がクヌギ・ブナなどの広葉樹よりも2～3倍も多い。土壌に汚染物質が集積すると、土壌を酸性化させ、栄養分が溶出する。酸性化でAlやMnが溶出して樹木の根の力を弱め、土壌中の微生物の働きを弱める。特にAlは毒性が大でpH4.5以下で急増する。土性によって反応の度合いは異なるが、近い将来に日本でも酸性雨被害の発生が危惧される。

3.3 緩衝作用（只木良也，吉良竜夫編；1991）

滋賀県東南部にある京都大学桐生試験地での測定例（只木良也，吉良竜夫編，堤，岩坪；1991）では、降水のpHは3.4～6.0であったが流出水ではpH5.8～6.8に変化している。降水にくらべ流出水のpHは高くなり変動も少ない。降水中の水素イオンが森林土壌を通過する時に塩素性の金属イオンと置換されるからで、降水中的の水素イオンに対し森林は緩衝作用を持つといえる。今の所酸性雨の影響は明白でないが、次第に塩基成分の溶脱・森林全体の活性低下が懸念される。

4 森林地帯での測定例

4.1 積雪中の酸性降下物（上野清隆，塚原初男ら；1992）

1972年生スギを対象にして林内2か所，林外2か所のpH，EC，アニオンを1991年に測定している。全層pHは2月以降に増大し中性化傾向がある。ザラメ雪化の割合は，3月には全層にザラメ雪化が進み，雪質変化と中性化に関係が認められる。断面毎でのpHは，ザラメ雪でpHが高い傾向にある。EC，アニオン， Cl^- もシーズン後期に低下しており，森林内外の差は小さい。なお，72年生スギ林内の SO_4^{2-} ， NO_3^- では初期のみに林内のイオン濃度が小さい。又，同スギ林内の雪層別の NO_3^- は，最高イオン濃度は林内で下層にある。これはザラメ雪化で溶出のためであろう。スギの総アニオン量はスギによる遮断と樹幹流での溶出によって初期には林内で少ないものと考えられる。

4.2 場所の違い（塚原初男，飯田俊彰ら；1992）

1991年2月に海岸から約100km地点まで内陸に向かって8か所を選び，3ℓのスノウサンプラーで採雪しpH，ECを測定した。断面観測結果ではザラメ雪でのpHが高い。新雪での封じ込め，ザラメ雪での溶出が考えられるが，しかし，全層では異なるので他の要因の影響を検討する必要がある。なお，ECは海に近い程たかく，カチオン・アニオンは西高東低であった。

4.3 樹幹流 (塚原初男, 保坂良悦ら; 1994)

1993年にスギ80年生, カラマツ34年生, オニグルミ72年生, ブナ52年生等の樹幹流を測定した。樹幹にガーゼを巻き付ける方法で雨水流を採取した。採集されたサンプルを用い, EC, pH, イオン濃度の測定結果では, ECは林内の方が林外より大きく樹体からのイオン類の溶脱や乾性沈着物の洗脱が認められる。pHでは, ブナ・オニグルミで高く中性化傾向であり, スギは低く針葉樹の酸性化傾向が見える。又, ブナの高い位置でのpHが高く, ブナの酸性緩和作用がクローネによると思われる。アルカリ金属・アルカリ土類金属のアニオン濃度に対する比は一般に樹種別にある傾向を持ち, 相関性がある場合が多い。結局, スギでは H^+ の値から見てイオン流下量に関係するので樹幹流が土壌を酸性化し, ブナ樹幹流は中性化の傾向があると指摘される。

4.4 選択的溶出 (塚原初男, 山谷陸; 1994)

新雪など未融解積雪層では, ザラメ雪など旧雪層よりもEC値が高くイオン総量も多い。新雪ではpHが低く酸性が強い。これは雪の変態でイオンの溶出が起こるためと思われる。また, SO_4^{2-} が早くClが遅い選択的溶出があるとされる。1994年に新雪をポリエチ・バッグに詰め, 室内で融解し経時的に雪解け水(フラクション)をとってEC, pH, イオン濃度を測った。融雪後期ほどECは下がり, pHは上がった。融雪率とイオン濃度の変化は, H^+ 濃度の低下が酸性度を弱めると解される。即ち, pHについて旧雪よりも新雪のインパクトが大きいと言える。溶出速度の速さから新雪溶出率には SO_4^{2-} のインパクトが大きい結果であった。

4.5 酸性降下物の特性 (飯田俊彰, 上木勝司ら; 1995)

酸性降下物の直接的影響としては農作物やコンクリート構造物への作用があり, その降水負荷は土壌・水域の酸性化が上げられている。日本の東北地方南部での観測例の空白を埋めるために若干の測定が示されている。1990年1月から1992年12月にかけて1降水ごとの湿性沈着物87試料をとり, pH, EC, イオン濃度を測定し, 非海水由来NSSの SO_4 , Ca^{2+} を海水の値から計算してある。その結果は, ①pH季節変動を見ると冬に酸性度が高く雨よりも雪が問題である。②陰イオンの総イオンへの割合の変動も冬に多い。③NaとClの比は, 降水中の勾配が海水のものと同じでこれらは海塩由来と考えられる。④NSS- SO_4 , NO_3 が高いグループはpHが低く, 非海塩成分でもそれらが降水の酸性化に貢献していると考えられている。

ところで, 中国での観測地で SO_4^{2-} が高いが, 同時に Ca^{2+} や NH_4^+ も高く中和されてpHが6.28~6.80になる。日本までは遠いので大粒径の浮遊粒子である Ca^{2+} に比べて微細な SO_4 が長距離輸送され易いと考えられる。以上により日本海沿岸部でも雪の時期に酸性化が進みつつあり, これは中国大陸からの汚染物資に起因するものと考察できる。

4.6 富山の酸性雪 (とやまの雪研究会; 1995)

富山県内で常願寺川沿いに内陸に向かって35kmの地域をとり, 新雪のpH, ECを測定した結果, 内陸ほどpHが低かった。しかし, 逆に河口即ち海岸部ほどpHが低く, きわめて複雑な様相を呈している。ただし, いずれも相当の酸性度を示している。

雪質との関係では, ザラメ雪でpHが高く中性化傾向にあり, しまり雪では酸性傾向が顕著である。ひまわりによる人工衛星写真から空気の流れを解析した例では, 華北や東北区から来る雲による降雪はpHが高い。一方, 除州から釜山の経路の流跡線ではpHが低い場合が多かった。

5 森林被害の予知能力

以上、森林の酸性雪被害に関係する一般的な知見を中心に、現在の考え方と今までに得られた知識を述べた。雪の場合には酸性物質の選択的溶出のような現象があり、天然現象としても複雑であるとの感は免れない。しかし、一般的には雨よりも問題は大きいとの実感である。一方、現在のところ森林・樹木の直接的被害を記載するに至っていない。汚染物質の存在量の蓄積が当面の問題と思われる。というのは、被害確認に至らない状況下で酸性物質の降下は確実に測定されているからである。ただし、もし被害が各地で確認されるようではこれは大変な事態である。その前に被害を回避し得るよう現状でのデータを蓄積し、被害の予知能力を高めることが是非必要である。現在の知見でも、若干の不一致はあるが、大局的には測定結果とその解釈にかなり良い一致が見られる。例えば、雪質による酸性化の度合いの一致、原因物質の由来の一致などである。ただ観測例は何と言っても少ないので今後事例の集積を測る必要があるだろう。

Ⅶ お わ り に

新潟県内を中心に、雪や雨のpHやその成分分析、土壌のpH及びいくつかの溶出元素の分析、コンクリート構造物から生成される「つらら」の成分分析、森林調査の結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 主に日本海側で降った雪や雨のpHを測定した結果、雨、積雪、新雪の順に低いことが分かった。それらのイオンクロマトグラフによる成分分析の結果、佐渡で採取した雪の硫酸イオン濃度が異常に高いことが判明した。新雪、積雪、雨の中の陰イオンの成分比（硫酸イオン、硝酸イオン、塩酸イオン）には大きな差はなく、満遍なく降り注いでいる。
- 2) 土壌分析の結果、主として新潟県内で採取したサンプル土壌のうち36%が酸性化が進んでいると判断された。
- 3) 酸性雪（雨）による「つらら」の主成分は炭酸カルシウムであることがX線回折の結果明らかとなった。
- 4) 森林への直接的被害は、今のところ新潟県内における酸性雪（雨）が原因によると思われるものは確認出来なかった。
- 5) 酸性雪（雨）からみた森林の一般的特性と調査の現状をレビューし、森林被害の予知能力の可能性について議論した。

最後に、この論文を平成8年3月31日新潟大学を定年退官する青木 滋教授に捧げます。

文 献

- 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(1994)：新潟県の酸性雪（雨）に関する一考察、第11回日本雪工学会大会論文報告集、177-180.

- 土質工学会編(1979)：土質試験法，218.
- T. Murashige and F. Skoog (1962)：Revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue culture, *Physiol. Plant*, vol.15,473-497.
- 化学実験テキスト研究会(1993)：図解化学実験シリーズ4，バイオテクノロジー，産業図書，23-24.
- 酸性雨調査法研究会編(1993)：酸性雨調査法，ぎょうせい，268.
- W.スタム，J.J.モーガン（安部喜也，半谷高久訳）(1974)：一般水質化学，下巻，共立出版，477-488.
- 日本化学会編(1989)：季刊化学総説，No.4，土の化学，学会出版センター，5.
- 加藤皓一(1995)：日本海側都市の酸性雪（雨）の化学分析値からみた特徴，1995酸性雪（雨）シンポジウム講演要旨集，5-6.
- A. J. Lewis, K. Goto, K. Aoyama and S. Aoki (1993)：Environmental Assessment of Coal Waste Mounds in Japan Using Remote Sensing Techniques, *Proc. of the 4th Int. Symp. on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes*, Krakow, Poland, vol.1, 389-402.
- 遠藤治郎(1995)：酸性雨にかかわる森林の一般的特性，1995酸性雪（雨）シンポジウム講演要旨集，9-10.
- 東京農工大学編(1992)：地球環境と自然保護，培風館，77-88.
- 四出井綱英編(1990)：森林保護学，朝倉書店，164-174.
- 環境庁編(1994)：環境白書 総説，6月，306-309.
- 只木良也，吉良竜夫編(1991)：ヒトと森林，共立出版，151-155.
- 上野清隆，塚原初男ら(1992)：積雪に含まれる酸性降水物(III)，東北の雪と生活7，45-50.
- 塚原初男，飯田俊彰ら(1992)：積雪に含まれる酸性降水物(V)，東北の雪と生活7，55-60.
- 塚原初男，保坂良悦ら(1994)：樹幹流の化学特性に関する研究(I)，日林論105,407-410.
- 塚原初男，山谷睦(1994)：融雪フラクションのEC，pH及び主要イオン濃度の融雪遅速別変異，東北の雪と生活9，39-42.
- 飯田俊彰，上木勝司ら(1995)：東北地方日本海沿岸地域における湿性酸性降水物の特性，農業土木学会論文集，175，47-56.
- とやまの雪研究会(1995)：富山の酸性雪に関する調査研究報告書，279.
- 丸尾克行(1992)：酸性汚染物質による樹木成分に対する影響について，新潟大学農学部卒業論文
- 久米直哉(1993)：酸性汚染物質による樹木成分（リグニン・セルロース）に対する影響について，新潟大学農学部卒業論文
- 小川 裕(1994)：酸性汚染物質による樹木成分に対する影響について，新潟大学農学部卒業論文
- 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.
- 長谷川武司，伊藤駿(1992)：日本雪工学会誌，vol. 8 ,No.3 ,206-211.
- J. T. Turk, D. H. Campbell and N. E. Spahr (1993)：Use of chemistry and stable isotopes to determine sources of trends in sulfate of Colorado Lakes, *Water, Air and Soil Pollution*, vol.67, 415-431.
- 青山清道(1994)：酸性雪（雨）による構造物の被害，日本雪工学会誌，vol.10,71.
- 林 野 庁(1994)：酸性雨による森林被害の中間報告，6月27日.
- 戸塚 績(1994)：気象研究ノート，182号

- 村野健太郎, 畠山史郎(1994) : 酸性霧の実態, 化学工学会つくば大会研究発表講演要旨集, SD101, 206-207,
7月27日.
- 戸塚 績(1990) : 森林に対する酸性雨の影響, 現代科学, No235, 55-61.
- 土質工学会編(1990) : 土質試験の方法と解説, 125-130, 160-173.