

C-3 酸性物質の臨界負荷量に関する研究

(1) 植物における臨界負荷量に関する研究

① 乾性および湿性酸性物質の植物影響評価に関する研究

研究代表者 農業環境技術研究所環境資源部大気保全研究室 野内 勇

農業環境技術研究所

環境資源部 大気保全研究室 野内 勇, 細野達夫
環境管理部 影響調査研究室 鶴田治雄

平成5-7年度合計予算額 14,449千円
(平成7年度予算額 4,819千円)

[要旨] 林地に対する酸性物質の乾性降下量を、林外雨・林内雨の物質収支から推定する方法、および代理表面法の一つである、テフロンチップを用いる方法を用いて推定することを試み、以下の結果を得た。(1)樹木のない場所(農地)に囲まれた比較的小規模な林地内のスギで、林外雨・林内雨の分析から物質収支モデルを用いる方法で乾性降下量を推定すると、乾性降下量は湿性降下量(降雨)の4倍にも達すると見積もられた。また、樹体についての乾性降下物が洗い流され、この物質収支モデルが成り立つためには、10~15mm以上の日雨量が必要であると推察された。(2)模擬枝(テフロンチップ)を用いて、樹木に対する酸性物質の乾性降下量を推定する方法について検討した。模擬枝への付着量と実際の樹木の枝への付着量との関係は直線関係がみられたが、その傾きは成分によって異なった。

山岳地域における霧水・雲水中の過酸化水素濃度の測定を行った結果、最高4ppm程度の濃度を観測した。過酸化水素を高濃度で含む人工酸性雨を農作物に暴露し、その影響について検討した結果、液相中の過酸化水素は環境濃度の数十倍の高濃度においても植物の生長に何ら影響を及ぼさなかった。

スギ苗に対する人工酸性雨散水実験を行い、人工酸性雨の酸性度と生長等との関係を検討した。その結果、1年間あまりのpH2.5程度の人工酸性雨散水によってスギ苗が枯死に至るようなことはなく、また生長量にもあまり影響がみられなかったが、樹体からのカチオンのリーチング量がpH3.0以下の人工酸性雨散水により促進される傾向がみられた。

[キーワード] 乾性降下物、林地、過酸化水素、リーチング

1. 序

「酸性雨」とは、かつては「酸性化した雨」あるいは「雨水の酸性化」を示すだけの言葉であった。その酸性化した雨が生態系に及ぼす影響が懸念され、数多くの研究の対象とされてきた。しかし、近年に至って、「酸性雨現象」とは、雨水の酸性化を含む「環境の酸性化」およびその生態系への影響であるという認識が一般的になってきた¹⁾。

酸性降下物の生態系への影響を考える場合には、酸性雨や酸性霧などの湿性降下物に加えて、ガスやエアロゾルなどの乾性降下物の影響について解明することが必要である。その場合、生態

系への酸性物質の乾性降下量を把握することが必要不可欠である。従来、種々の植生の生態系における、ガスやエアロゾル等の乾性沈着速度の見積もりが数多く行われてきた。しかし、長期・広域的な乾性降下量のモニタリング手法は確立されていない。

また、雨水中の過酸化水素、特に過酸化水素は、酸性雨生成機構における重要な酸化性物質であるという観点から、近年、環境中の過酸化水素の挙動が注目されている。さらに、過酸化水素の生成と樹木衰退との関係についても一部で注目されている²⁾。

本研究では、以上のような背景のもと、酸性物質の乾性降下量推定法や山岳地域における霧水・雲水中の過酸化水素濃度の測定、および過酸化水素の植物への影響などについて検討した。

2. 研究目的

森林生態系への酸性物質の負荷量を知るためには、降雨（湿性降下物）のモニタリングのみならず、乾性降下量の見積もりも必要である。しかし、例えば森林などへの酸性物質の乾性降下量のモニタリング手法は確立されているとはいえない。そこで本研究では、森林に対する乾性降下量を推定する方法のうち、近年報告の多い、林外雨・林内雨の物質収支から推定する方法、また、従来から種々提唱されている代理表面法の一つである、テフロンチップを用いる方法について検討した。

雨水中の過酸化水素は、酸性雨生成機構における重要な酸化性物質であるという観点から、近年、環境中の過酸化水素の挙動が注目され、まだ研究段階ではあるが濃度の測定などがなされ始めている。本研究でも、山岳地域における霧水・雲水中の過酸化水素濃度の測定を行った。また、過酸化水素は植物体内では毒性が強いが、酸性雨中の過酸化水素の植物への影響については明らかにされていない。本研究では、過酸化水素を高濃度で含む人工酸性雨に農作物を暴露し、その影響について検討した。

SO₂やNO_xなどのガス状酸性物質の乾性沈着のうち、葉面など植物表面に吸着する量が気孔から吸収される量に比較してどの程度あるか、特に植物表面が濡れている場合などに、必ずしも明らかではない。そこで、本研究では、同化箱内でスギ苗をNO₂に暴露し、NO₂の収着量のうちの葉表面吸着量の割合、およびそれに及ぼす散水処理の影響を評価することを試みた。

樹木の生長に急性影響を及ぼす限界の酸性度を推定するための一つの資料を得るために、スギ苗に対する人工酸性雨散水実験を行い、人工酸性雨の酸性度と生長等との関係を検討した。また、その際に樹幹流を採取し、樹幹からのカチオン溶脱量等を見積もり、カチオン溶脱量と人工酸性雨の酸性度との関係等について検討した。

3. 試験研究方法

3-1 林内雨・林外雨データを用いた物質収支モデルによる森林への乾性降下量の推定

林内雨（樹冠透過雨・樹幹流）と林外雨の分析データを用いて樹木に対する乾性降下量および樹冠溶脱量を見積もるためのモデル³⁾は以下のものである。成分*i*について、

$$(T_i + S_i) - P_i = (D_i + \Delta A_i) + L_i \quad \dots (1)$$

ここで、*T*：林内降下量、*S*：樹幹流下量、*P*：林外降下量、*D*：樹冠への乾性降下量（洗浄流出量）、 ΔA ：樹冠への蓄積量、*L*：樹冠からの溶脱（吸収）量。 $\Delta A_i = 0$ と仮定し、成分*j*は樹冠から溶脱しないとすると、 $T_j + S_j - P_j = D_j$ であるので、 $D_j / P_j = (T_j + S_j) / P_j - 1$ となる。

この D_j/P_j は、林外降下量すなわち湿性降下量に対する乾性降下量の比率を表す。この比率が、ある成分 i についても同様であると仮定すると、次式が得られる。

$$D_i = \{(T_j + S_j) / P_j - 1\} P_i \quad \dots (2), \quad L_i = T_i + S_i - \{(T_j + S_j) / P_j\} P_i \quad \dots (3)$$

(2)式および(3)式に農環研構内の雑木林における日別の樹冠透過雨、樹幹流データおよび農環研内の別の場所で採取された日別の林外雨データ⁴⁾をあてはめて、各成分のスギ木への乾性降下量および樹冠(樹幹)溶脱量を求めた。溶脱しない成分 j としては、 SO_4^{2-} を用いた。

このモデル式が成り立つ仮定は以下の3つである。(1)木についての乾性沈着成分が降雨によって全て洗い流される。(2)乾性降下量に対する湿性降下量の比がある成分と他の成分で等しい。(3)ある成分 j は樹冠・樹幹から溶脱しない。これらの仮定のうち、(1)の仮定は、雨量あるいは降雨強度が小さいとなりたたないと想像される。前記の日別降雨、林内雨データを用いて、樹木に付着した乾性降下物質を洗い流すために必要な降雨量・強度等の条件についても検討した。

3-2 テフロンチップを用いた代理表面法

農業環境技術研究所内雑木林において、カラマツ、スギおよびサワラの枝に対する乾性降下物質の付着量とテフロンチップをネットにつめた物体(以下、模擬枝とよぶ)に対する付着量を調べた。テフロンチップとは、テフロンチューブなどテフロン製品を製造する過程で生じるテフロン⁵⁾の切りくずである。実験手順は竹中とWin⁵⁾に準じ、以下のようなものである。無降雨期間に、(1)上記3樹種について、枝の一部に純水をスプレーして充分洗浄し、表面付着物質を除去する。(2)洗浄した枝の一部には、粒子状乾性降下物が付着しないように透明ポリエチレンフィルム製の筒状の覆い(断面内径105mm、長さ340mm)をつける。と同時に洗浄した枝のそばに模擬枝(ポリエチレン製ネット袋にテフロンチップを約500gつめこんだ物体)を設置する。(3)数日~10日程度放置し、覆いをつけた枝、覆いをつけない枝および模擬枝を回収し、表面に付着した粒子状乾性降下物を純水で洗い流す。その洗浄液量および液中の各種イオン濃度をイオンクロマトグラフで測定して、粒子状物質の付着量を計算する。枝サンプルは枝の先端部分から採取し、大きさは枝の主軸の長さが約20~30cm程度であった。

以上の方法により計算した樹木の枝に付着した物質の量と模擬枝に付着した量を比較し、テフロンチップ製の模擬枝を用いる方法が有効な方法となりうるかどうか検討した。実験は3回おこなった。また、枝サンプルの数は各樹種、覆いつきと覆いなしについて各3とした。

3-3 山岳地域における過酸化水素濃度の測定

水溶液中での H_2O_2 の分析方法は、これまでルミノールと反応させてその生成物質の化学発光量を測定する方法が用いられてきたが、この方法はオゾンによる正の影響を受け、また、 H_2O_2 以外の有機過酸化物質をも同時に測定することがわかってきた。そこで本研究では、酵素を用いた差量法で H_2O_2 濃度を測定する。乗鞍岳の高度約2700mで、1993年夏季に雲水や雨水などの採取を行い、この方法で H_2O_2 濃度を測定した。

3-4 過酸化水素を高濃度で含む人工酸性雨が農作物の生長に及ぼす影響

人工酸性雨チャンバー⁶⁾内で農作物を生育させ、過酸化水素を含む人工酸性雨を散水した。散水液の調製は、純水に過酸化水素水(30%)および硫酸、硝酸、塩酸を適量加えることにより行

った。実験は2回行ったが、1回目は、過酸化水素濃度が0.1、1、10および100ppmの4レベルとなるように純水に過酸化水素水を加えた散水液を散水した。2回目は、コントロールとして純水（過酸化水素0ppm、pH5.6）と、pHが4.0、3.0および2.5で過酸化水素濃度が100ppmの人工酸性雨を散水した。人工酸性雨の組成は硫酸：硝酸：塩酸=2：1：2（当量比）である。

供試植物は、1回目の実験ではハツカダイコン、キュウリおよびインゲンマメ、2回目ではハツカダイコンとチンゲンサイとした。1回目の実験においては、9月3日（播種後2週間目）から9月15日の13日間に10回（10日）の散水を行い、1回の散水時間は1時間でその間の雨量は6.8mmであった。2回目の実験では、10月29日（播種後2週間目）から収穫時（ハツカダイコン：11月21日、チンゲンサイ：12月1日）まで、週3回の頻度で散水を行い、1回の散水時間は1時間で雨量は7mmであった。2回の実験とも、実験終了時に個体葉面積および器官別乾物重を測定した。

3-5 スギ苗表面へのNO₂吸着量/吸収量比の推定

スギ苗は1/5000アールワグネルポットで生育させた3年生実生苗（系統不明）を用いた。実験前に純水を散水して表面の乾性沈着物等を洗浄したスギ苗を、人工光人工気象室内に設置した同化箱（高さ98cm、幅65cm、奥行き36cm）に入れ、通気式で種々の濃度のNO₂を暴露した。地下部（ポットおよび土壌面）はビニールで覆った。実験は明条件（光強度200mol s⁻¹ m⁻²）で行った。同化箱の入口および出口のNO₂濃度を測定することにより、スギ苗に対するNO₂吸着速度を計算した。計算される値には同化箱およびポットへの吸着量が含まれるが、それらを経験式により差し引いて、スギ地上部への吸着速度を求めた。

なお、用いたスギ苗の乾重は、樹幹を除く地上部、樹幹、地下部でそれぞれ、23.3、12.5、16.3gであった。また、樹幹を除く地上部（一次枝、二次枝以上および当年枝に分類）乾重から、推定式によると、葉面積は936cm²であった。

スギ苗表面に対するNO₂吸着量の評価は、スギ苗をNO₂に6～7時間暴露した後、純水に過酸化水素を添加した液（H₂O₂, 100ppm）を900cc（3分間）散水し、スギに接触した液のNO₃濃度を測定することにより行った。また、植物表面が濡れている場合のNO₂吸着速度の増加量を評価するために、暴露時間の中間に上と同じ液を5秒間（約25cc）、スギに散水する処理も行った。

3-6 スギ苗に対する人工酸性雨散水実験

人工酸性雨チャンパー内で、1/5000aプラスチックポットに育成したスギ実生苗（実験開始時、3年生、土壌は園芸用培土）に対して、1992年4月から1993年7月まで、pH 5.6、3.0、2.7および2.5の人工酸性雨（SO₄²⁻：NO₃⁻：Cl⁻=2：1：2、当量比）を週3回（1回1時間、雨量は4.5mm～13.5mm）散水した。土壌表面に覆いはしなかったため、人工酸性雨（樹冠雨、樹幹流を含む）は土壌に付加された。樹高、乾物重、土壌pHの調査を数回おこなった。

また、2週間あるいは4週間おきに樹幹流を採取し、その中に溶存するカチオン（Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺およびNH₄⁺）量をイオンクロマトグラフにより測定した。pH5.6区の一部のサンプルについては、イオンクロマトグラフによりアニオン濃度も測定した。樹幹流の採取は、土壌表面から約10cmの高さの樹幹にガーゼを巻き付けて、それを伝わって落ちる水を回収するという方法で行った。1回の散水によって50cc～200ccの樹幹流が得られた。

4. 結果と考察

4-1 林内雨・林外雨データを用いた物質収支モデルによる森林への乾性降下物量の推定

4-1-1 酸性物質の乾性降下量

図1に、1989年1月1日を起点とした2年間の、 SO_4^{2-} および NO_3^- の累積の乾性降下量を示す。 SO_4^{2-} および NO_3^- の乾性降下量は年間を通してほぼ一定の速度であると推察され、1989年と1990年でもほぼ同様であることを示している。各成分について見積もられた年間乾性降下量と樹冠溶脱量を表1に示した。なお、 SO_4^{2-} と NO_3^- の乾性降下量のほとんどは非海塩由来であり、 Cl^- は約50%が海塩由来であると推定された。

SO_4^{2-} が樹体から溶脱しないと仮定した場合、 SO_4^{2-} の乾性降下量は、平均すると降雨による降下量（湿性降下量）の約4倍と見積もられた。この値は、Beier et al.⁷⁾によって森林縁から5~10m付近で見積もられた値（ Na^+ の樹体からの溶脱が非常に少ないと仮定して求めた）に相当する。本研究で用いた樹冠透過雨・樹幹流データのスギのある場所は畑地に囲まれた雑木林であり、南方は林地の端まで約20m、北方は約5mと近く、その他の方角は端まで比較的遠い。従って本研究で見積もられた乾性降下量/湿性降下量比の値は広い森林の内部の値よりは大きめの値をとっていると推察される。Beier et al.⁷⁾の結果によると、森林縁ではナトリウムの乾性降下量/湿性降下量比が約20にもなっている。森林縁や道路の並木、孤立木などでは酸性物質の負荷量は湿性降下物によるよりも乾性降下物による方がはるかに大きい可能性があるかと推察される。また、図2は NO_3^- の累積樹冠溶脱量の変化を示す。図2によると、1989年は溶脱傾向であり、1990年は吸収傾向であるが、年によってそのように明確に傾向が変化するとは考えにくい。そのような傾向が現れた原因は不明であるが、溶脱（あるいは吸収）量の値は乾性降下量に比較して小さく、濃度測定の影響などに影響されたと想像される。

4-1-2 カチオン成分の乾性降下量および樹冠溶脱量

最も乾性降下量が多いのは Na^+ および NH_4^+ であった。ついで多いのは Ca^{2+} であり、 Mg^{2+} と K^+ は少なかった。 Na^+ はほとんどが海塩由来といわれており、 Mg^{2+} も約30%が海塩由来と推定された。樹冠溶脱量は NH_4^+ を除くと、 $\text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ の順であった。N成分については、あまり一貫した溶脱（吸収）の傾向はみられず、溶脱（吸収）量の推定値は誤差が大きいと推察された。

4-2 樹木に付着した乾性降下物質を洗い流すための条件の検討

SO_4^{2-} の累積の乾性降下量の変化をみると、細かい変動はあるものの、乾性降下量はほぼ直線的に増加していた（図1）。図3は降雨のあった日ごとに計算した1日あたりの硫酸イオンの乾性降下量の変化を示す。値は大きく変動しており、マイナスの場合もある。これは、雨量が小さい場合には、樹木に付着した乾性降下物が洗い流されないということに起因すると推察される。そこで、どの程度の降雨量と降雨強度があれば洗い流されるかということを検討した。図4は、日雨量が10mm以上であれば樹体の乾性沈着物質は洗い流されると想定して、10mm以上の降雨のあった日の翌日から、次に降雨のあった日までの、スギに対する1日あたりの硫酸イオンの乾性降下量の計算値とその日の降水量との関係を示す。図4によれば、日雨量が10mm以下では雨量が多くなるに従って1日あたりの乾性降下量の計算値は大きくなる傾向がみられ、日雨量10mm以下程度の降雨強度では樹木に付着した乾性降下物が十分に洗い流されない可能性がある

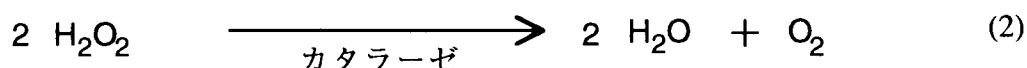
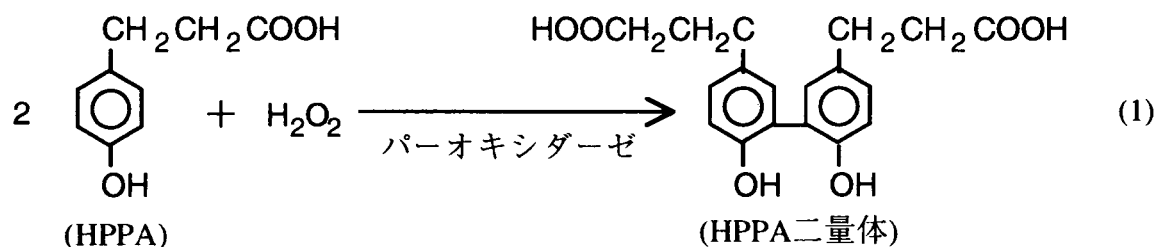
と推察される。したがって、一定以上の強度の降雨がない期間が長く続く状況では、物質収支モデルを用いて乾性降下量、特に月単位程度の短期間の乾性降下量を評価するのはかなり不確実性が高くなる可能性があると考えられる。また、1989年と1990年の間の冬季および1990年の夏季には、小さい降水量に一致して、乾性降下量の計算値が小さくなっている。図5は、降雨があった翌日から、次に降雨のあった日までの日数と、その間の平均の1日あたりの硫酸イオンの乾性降下量の計算値との関係を示す。データは、最初の降雨日と次の降雨日のいずれとも日雨量が10mm以上の場合のみ取り出している。これらのことは、樹体への付着速度は付着量が増えるに
したがって減少することを示している可能性⁸⁾がある。

4-3 テフロンチップを用いた代理表面法

樹木の枝に対する各粒子状成分の1日あたりの乾性降下量を計算したところ、その値にはかなり変動があった(図6)。枝に対する乾性降下量と模擬枝に対する乾性降下量との関係を調べたところ、成分ごとには相関がみられた(図7)。また、成分によって直線の傾きが異なった。この原因は不明であるが、ガスを吸着しにくいなどのテフロン[®]の性質が一因であると想像される。しかしながら、成分毎に樹木の枝に対する乾性降下量と模擬枝に対する乾性降下量の関係式を評価し、樹木あるいは林全体の葉面積や乾物重の推定値が得られれば、模擬枝を用いる方法によって樹木あるいは林に対する各粒子状成分の乾性降下量が推定できる可能性があると考えられる。

4-4 山岳地域における過酸化水素濃度の測定

酵素を用いる過酸化水素濃度の測定法は、(1)式の反応に示すように、パーオキシダーゼ(POD)を触媒として用いて、試料中の H_2O_2 および他の有機過酸化物をp-ヒドロキシフェニルプロピオン酸(HPPA)と反応させ、生成する6,6'-ジヒドロキシ-3,3'-ビフェニルプロピオン酸(HPPA二量体(i))のケイ光強度を、アルカリ側(pH>10)で測定するものである。次に(2)の反応式に示すように、試料中の H_2O_2 だけをカタラーゼで選択的に分解した後に、前述した(1)式に示す同様の操作を行い、生成したHPPA二量体(ii)のケイ光強度を測定する。そして、HPPA二量体(i)とHPPA二量体(ii)のケイ光強度の差から、試料中の H_2O_2 濃度を測定することができる。降水中の H_2O_2 濃度は、 $3\mu g/ml$ 以上で精度よく測定することができた。



乗鞍岳で夏季に雲水や雨水などを採取し、この酵素法を用いて H_2O_2 などを分析し、遠隔地域での濃度を測定した。測定した雲水中の H_2O_2 濃度をpHなどととも、図8に示した。前半は、 $2.5\sim 4\mu g/ml$ と高く、後半は $2\mu g/ml$ 以下と低くなった。これは、異なった大気塊によるもの

と推測される。もし、大気中の H_2O_2 が全量溶け込んでいるとすれば、前半の濃度は、大気中の H_2O_2 濃度にするると約2~3ppbと推定され、光化学反応モデルから求めた計算値とよく一致することがわかった。

4-5 過酸化水素を高濃度で含む人工酸性雨が農作物の生長に及ぼす影響

純水に過酸化水素水を添加した液を散水する実験においては、過酸化水素濃度により個体葉面積および器官別乾物重の差は全くみられなかった。雨水・霧水中の過酸化水素濃度は、例えば本研究で1993年度夏季に乗鞍岳で測定した値でみると、数ppmのオーダーであり、都市部などでは通常1ppm以下のことが多い。北米の山岳地域でも最高4ppm以上になることがあるという報告もある⁹⁾が、本実験で用いた100ppmというのは非常に高濃度といえる。その過酸化水素水の連続的な散水によっても生長に影響がみられず、また、可視被害も全く観察されなかった。従って、過酸化水素自体の毒性は、植物体の外にある場合には発揮されないと考えられ、また、植物体の中に入り込むということも少ないと推察された。

人工酸性雨に過酸化水素を添加して散水する実験においては、pH3.0およびpH2.5で葉に可視被害が観察された。被害症状、被害程度は、人工酸性雨のみ散水する実験の場合⁶⁾と同様であった。生長への影響は、pH3.0では全くみられなかった(図9)。pH2.5においてはpH5.6と比較して個体乾物重は減少傾向であったが、過去の人工酸性雨散水実験におけるpH2.5の人工酸性雨処理の場合¹⁰⁾と比較して個体乾物重の減少の割合は小さい傾向であった。今回の実験は、実験の時期が晩秋から初冬にかけての気温・日射の小さい時期であり、過去の人工酸性雨散水実験の場合と環境条件が異なるため比較は難しいが、高濃度の過酸化水素を含むことにより、人工酸性雨による農作物の生長低下が助長されることはないとは推察された。

4-6 スギ苗表面への NO_2 吸着量/吸収量比の推定

スギ苗に対する NO_2 収着速度は、散水処理により高まった(図10)。散水液はスギにのみかかるようにしたので、収着速度が増加した分はスギ表面に付着した過酸化水素を含む散水液に溶けたものと考えられる。散水処理後、スギに付着した水滴は徐々に蒸発してなくなったが、散水による収着速度の増加効果があるように見える散水後1時間の、同化箱入口の平均 NO_2 濃度と平均収着速度との関係を図11に示した。これによると、散水により収着速度は1.2~1.3倍程度に増加するとみられた。しかし、暴露終了後の洗浄液中の NO_3 量はスギへの総 NO_2 収着量と相関がなく、洗浄液中の NO_3 量がスギ苗表面に吸着した NO_2 であるとしても、収着量に対する表面吸着量の比率は評価できなかった(表2)。また散水処理による効果も検出できなかった(表2)。従って、散水による収着量の増加分がスギ苗表面に吸着したという証拠も得られなかった。

洗浄液中の NO_3 量はスギへの総 NO_2 収着量と相関がなかったことから、洗浄液中の NO_3 はスギ樹体からの溶脱である可能性がある。結局、 NO_2 については、気孔からの吸収に比較して表面への吸着は低い割合であると推察される。

乾性降下量のうち、ガスが気孔を通じて植物体内にとりこまれる量を推定するには、微気象的方法や、樹幹流・樹幹透過雨測定にガス濃度測定を組み合わせる方法¹¹⁾などが必要である。日本においては、 SO_2 濃度は排出規制により充分小さい状況であるが、 NO_x については濃度が上昇傾向であるので、今後、 NO_x の乾性降下量を推定することは重要である。

4-7 スギ苗に対する人工酸性雨散水実験

4-7-1 (1) スギ苗の生長に及ぼす人工酸性雨の影響

樹高、個体乾物重については、pH 2.5区で生長期間の初期にコントロールに比較して生長速度が小さい傾向がややみられたが、生長期の終わりの時点では、いずれのpHの人工酸性雨処理によってもコントロール(pH 5.6)と有意な差はみられなかった(図12、13)。実験終了時の苗の部位別の乾物重をみると、樹幹と地下部はコントロールで大きく、一方、枝、特に当年枝はpH 2.5で大きいという傾向がみられた。従って、個体乾物重に占める枝の割合、あるいは乾物重の地上部/地下部比がpH 2.5の人工酸性雨処理区で大きいという傾向があった。土壌pHは、表層5cmでは、人工酸性雨のpHが低いほど低下した。中層、下層では土壌pHに顕著な差はみられなかった。

人工酸性雨散水により、当年枝の生長の促進傾向がみられた。この原因としては、硝酸が窒素肥料としてはたらいたことなどが推察される。一方、地下部の乾物重がpH 2.5処理区で減少したことは、土壌表層のpHが低下したことに起因すると推察される。人工酸性雨散水により、枝・幹・根の乾物重の比率が変化し、根の割合が低下することは、スギの水分生理特性¹²⁾を考慮するならば、長期的にはマイナス要因である可能性がある。

4-7-1 (2) スギ苗の樹幹流中へのカチオンおよびアニオンの溶出

図14に、樹幹流中に溶出した Ca^{2+} の量とその年変化について示す。樹幹流に溶出した Ca^{2+} はpHが3.0、2.7および2.5の人工酸性雨処理区ではpH 5.6に比較して明らかに多いという結果であった。pH 3.0、2.7、2.5の間ではあまり差がなかった。溶出量の季節変化は、当年葉の生長が最も盛んな時期に樹体からの溶脱量が最も多いと解釈される。 NH_4^+ についても同様の傾向であった。 K^+ および Mg^{2+} でも同様の季節変化の傾向がみられたが、pH 5.6と酸性雨処理区との間の差はあまり多くはなかった。

アニオンの樹幹流への溶出については、人工酸性雨処理区においては人工酸性雨に SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- が高濃度で含まれているために測定不能である。pH 5.6(純水)散水区において樹幹流中に溶出したアニオン量の変化を図15に示す。これらアニオン、特に SO_4^{2-} は樹体からの溶脱がほとんどないと考えられるので、 SO_4^{2-} 溶出量の変化は乾性降水量の変化によると考えられる。

人工酸性雨チャンバー内においても、乾性沈着がある程度あると推察される。スギ苗樹幹流中に溶出した成分を乾性降水物と樹体からの溶脱に区別することは不可能であるので、人工酸性雨によるスギ苗からの各種成分の溶脱量の季節変化を把握するためには、密閉式の温室(浄化空気導入温室等)で実験を行う必要がある。

5. まとめ

本サブサブテーマの最終的目標は、酸性物質が植物に及ぼす影響に関して、湿性・乾性両方の降水量の比率を考慮しつつ、それが植物に急性的な障害を引き起こす限界的な酸性度を推測することであった。湿性酸性降水物の植物に対する影響に関して、これまで多くの研究者により行われた多くの植物についての結果を総合すると、急性影響を引き起こす限界酸性度はpH 3.0程度であることが推察される¹⁴⁾。本研究では、広域の森林などへの乾性降水物量の見積もりは達成されなかった。また、ガスの吸収量の見積もり方法についても課題を残した。しかし、従来から

示されていることでもあるが、本研究の結果からも、乾性降下物による酸性物質の樹木等への負荷量は、樹木のおかれた立地環境によっては極めて大きい場合があることが示唆された。日本や欧米先進国においては降雨のpHが現在より著しく低下することが予想されないとしても、乾性降下物を含めた酸性降下物の生態系への降下量とその影響を監視していくことが必要であろう。

6. 本研究により得られた成果

- (1) 林外雨・林内雨の分析から物質収支モデルを用いる方法で森林に対する乾性降下量の短期的な変化を推定する場合には、降雨量・強度に留意する必要があると考えられた。
- (2) 模擬枝（テフロンチップ）を用いて、樹木に対する酸性物質の乾性降下量を推定する方法について検討した結果、模擬枝への付着量と実際の樹木の枝への付着量との関係は成分によって異なることが示唆された。
- (3) 同化箱を用いた実験の結果、定量的評価はほとんどできなかったものの、NO₂の収着量のうち葉表面への吸着の割合は表面が濡れているいないに関わらず低いと推察された。
- (4) 山岳森林地域（乗鞍岳の高度2,700m）で、1993年度夏期に雲水や雨水などの採取を行い、水中の過酸化水素濃度を測定した。その結果、最高4ppm程度の濃度を観測した。
- (5) 過酸化水素を高濃度で含む人工酸性雨を農作物に暴露し、その影響について検討した結果、液相中の過酸化水素は環境濃度の数十倍の高濃度においても植物の生長に何ら影響を及ぼさないことが示唆された。
- (6) スギ苗に対する人工酸性雨散水実験を行った結果、1年あまりのpH2.5程度の人工酸性雨散水によっては、枯死に至るようなことはなく、また生長量にもあまり影響がみられなかったが、樹体からのカチオンの溶脱量がpH3.0以下の人工酸性雨散水により促進される傾向があることがわかった。

7. 引用文献

- 1) 原 宏, 1995: 2. 酸性雨とは?: 定義とその生成機構 (1994年度日本気象学会春季大会シンポジウム「酸性雨—地球環境問題として—」の報告). 天気, 42, 264-271.
- 2) 畠山史朗, 1996: 酸性雨だけでなく「オゾン」も原因だった. 山と溪谷, 1996年1月号, 151-152.
- 3) 小林禧樹・中川吉弘・玉置元則・平木隆年・正賀 充, 1995: 森林樹冠への酸性沈着の影響評価—乾性沈着と溶脱の分別評価法の検討—. 環境科学会誌, 8, 25-34.
- 4) 岡本玲子・大嶋秀雄・山口武則・尾崎保夫・川上一夫・藤井國博, 1992: 筑波地区における降雨の化学的性状に関するモニタリングデータ (1985年~1990年). 農環研資料, 第13号.
- 5) 竹中千里・Win Ko Ko, 1994: 林内における乾性沈着物採取法. 第35回大気汚染学会講演要旨集, 318.
- 6) 細野達夫・野内 勇, 1992: ハツカダイコン, ホウレンソウおよびインゲンマメの生長に及ぼす人工酸性雨の影響. 大気汚染学会誌, 27, 111-121.
- 7) Beier, C., Gundersen, P. and Rasmussen, L., 1992: A new method for estimation of dry deposition of particles based on throughfall measurements in a forest edge. *Atmos. Environ.*, 26A, 1553-1559.

- 8) 佐久間敏雄・堂本弘之・佐藤冬樹・小林 信・田中夕美子, 1994: 鉢植えした若木を用いた洗浄法による乾性沈着の測定. 土肥誌, 65, 378-384.
- 9) Olszyna, K. J., Meagher, J. F. and Bailey, E. M., 1988: Gas-phase, cloud and rain water measurements of hydrogen peroxide at a high-elevation site. *Atmos. Environ.*, 22, 1699-1706.
- 10) 細野達夫・野内 勇, 1994: 人工酸性雨が数種の農作物の生長・収量および光合成速度に及ぼす影響. 農業気象, 50, 121-127.
- 11) Okita, T., Murano, K., Matsumoto, M. and Totsuka, T., 1993: Determination of dry deposition velocities to forest canopy from measurements of throughfall, stemflow and the vertical distribution of aerosol and gaseous species. *Environ. Sci.*, 2, 103-111.
- 12) 松本陽介・丸山 温・森川 靖, 1992: スギの水分生理特性と関東平野における近年の気象変動—樹木の衰退現象に関連して—. 森林立地, 34, 2-13.
- 13) Wood, T. and Bormann, F. H., 1975: Increases in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. *AMBIO*, 4, 169-171.
- 14) 野内 勇, 1990: 酸性雨の農作物および森林木への影響. 大気汚染学会誌, 25, 295-312.

[国際共同研究等の状況] なし

[研究発表の状況]

- 細野達夫・野内 勇・山田健四, 1993: 人工酸性雨によるスギ苗からの陽イオンの溶脱. 第34回大気汚染学会講演要旨集, 534 (口頭発表).
- 細野達夫・野内 勇, 1994: 1年間の人工酸性雨散水がスギ苗の生長に及ぼす影響. 農業気象学会1994年度全国大会・日本生物環境調節学会第32回集合同大会講演要旨, 390-391 (口頭(ポスター)発表).
- 細野達夫・野内 勇, 1994: 人工酸性雨が数種の農作物の生長・収量および光合成速度に及ぼす影響. 農業気象, 50, 121-127.
- Hosono, T. and Nouchi, I., 1994: Effect of simulated acid rain on rice. 6th International Congress of Ecology, (口頭(ポスター)発表).
- 細野達夫・野内 勇・鶴田治雄, 1995: 過酸化水素水散布が農作物の生長に及ぼす影響. 環境科学会1995年会講演要旨集, 181 (口頭(ポスター)発表).
- 細野達夫・野内 勇, 1995: 日別の樹冠透過雨、樹幹流データを用いた乾性降水量推定. 第36回大気環境学会講演要旨集, 362 (口頭発表).

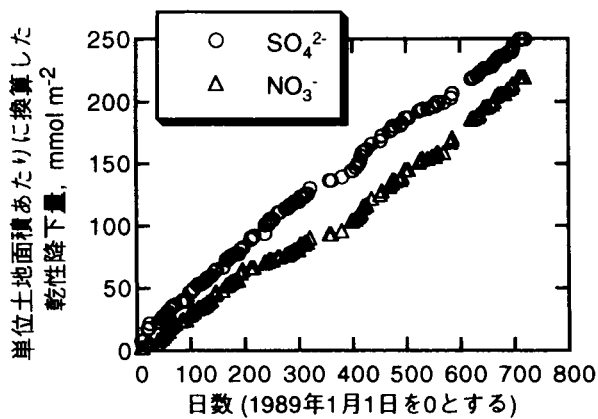


図1 スギ木のある範囲における SO_4^{2-} および NO_3^- の乾性降下量の計算値 (累積)

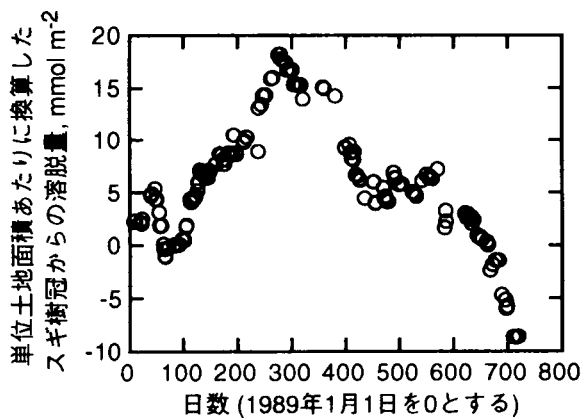


図2 スギ木のある範囲におけるスギ木からの単位土地面積あたりの NO_3^- 溶脱量の計算値 (累積)

表1 スギ木のある範囲における単位面積当たりの各種成分の乾性沈着量および樹冠からの溶脱量 (mmol m^{-2})

	1989		1990	
	D.D.	L.	D.D.	L.
SO_4^{2-}	136	0	113	0
NO_3^-	93	15	126	-24
NO_2^-	3	-2	2	0
Cl^-	317	-31	274	2
NH_4^+	250	-21	162	80
Ca^{2+}	61	28	62	23
Mg^{2+}	25	16	23	23
Na^+	176	-83	163	-48
K^+	63	70	24	72

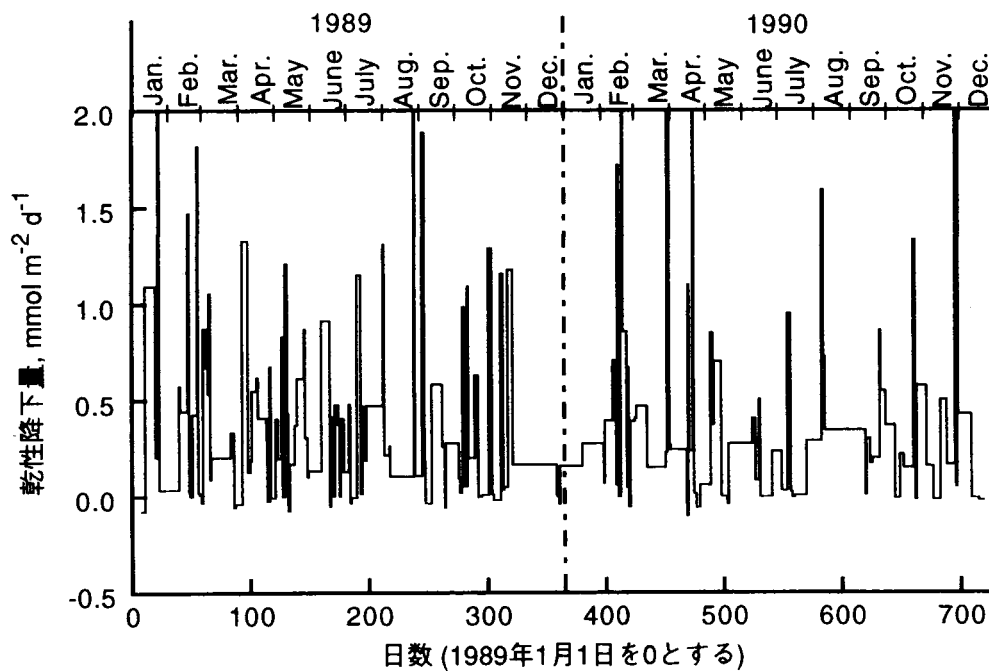


図3 スギ木のある範囲における硫酸イオンの1日あたりの乾性降下量の計算値の経時変化 (降雨のあった日毎に計算)

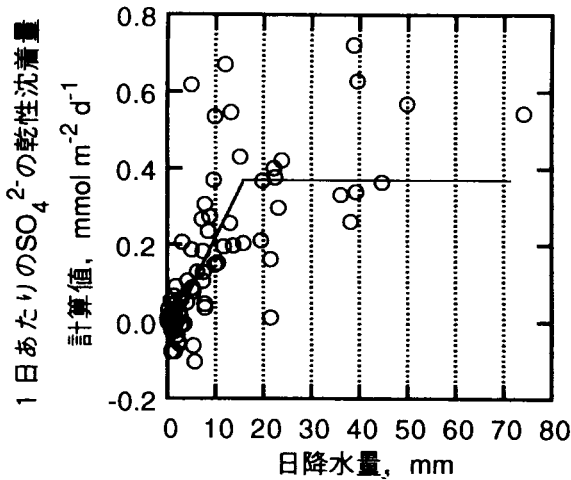


図4 スギ木に対する硫酸イオンの1日あたりの乾性沈着量の物質収支モデルによる計算値に及ぼす日降水量の影響。10mm以上の日降水量があった日の後、最初に降水のあった日までの計算値。

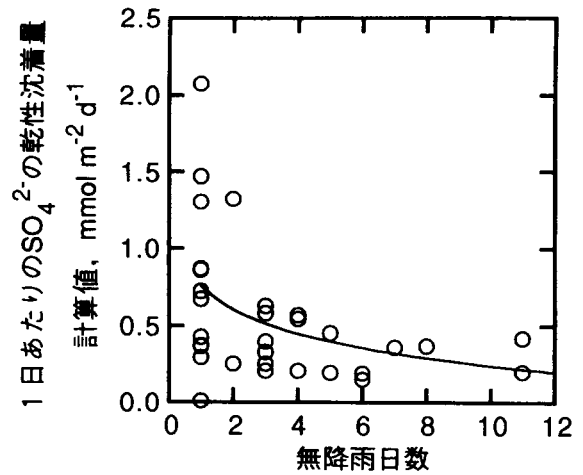


図5 スギ木に対する硫酸イオンの1日あたりの乾性沈着量の物質収支モデルによる計算値に及ぼす無降水日数の影響。

10mm以上の日降水量があった日の後、最初に降水があった日（日降水量が10mm以上に限る）までの計算値。

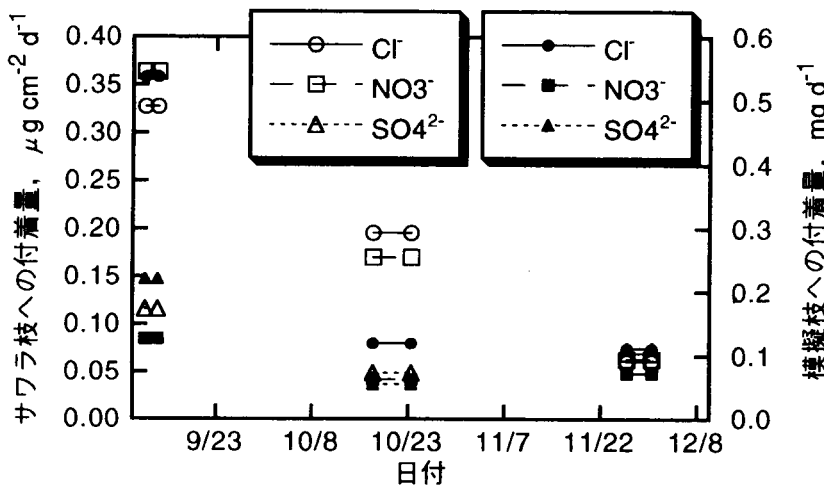


図6 サワラ枝および模擬枝に対するアニオン付着量

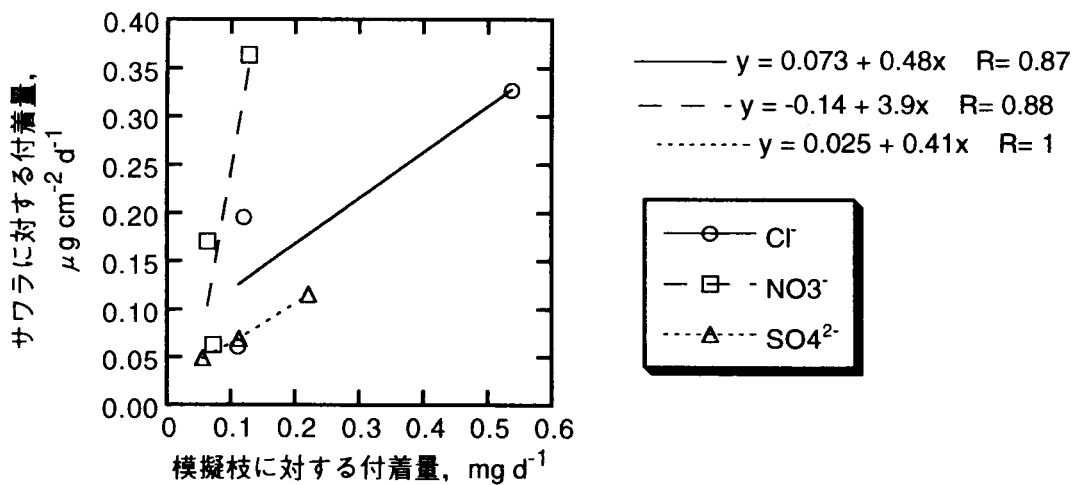


図7 模擬枝に対する付着量とサワラに対する付着量との関係

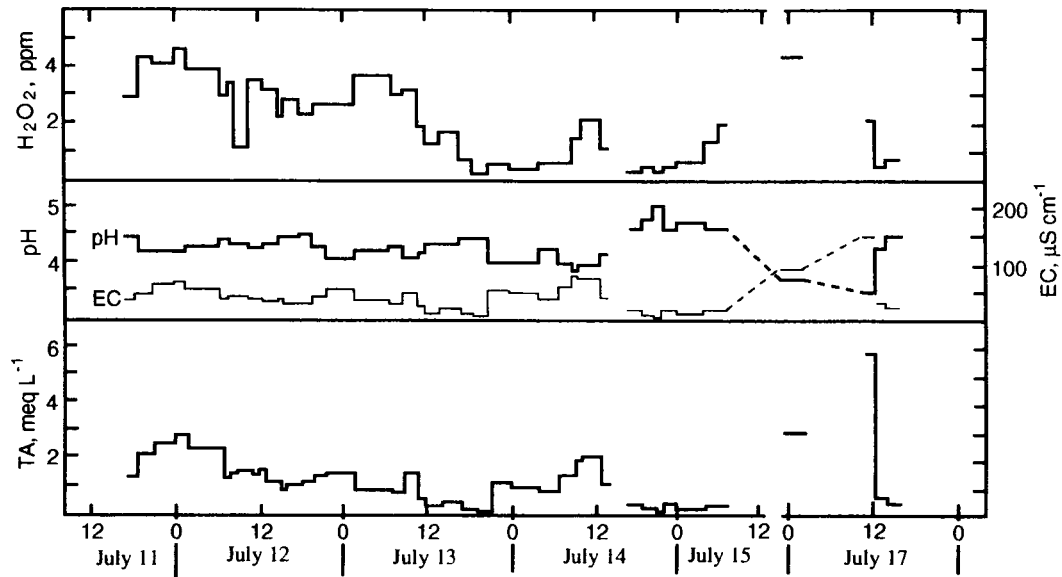


図8 乗鞍岳における雲水中の H_2O_2 濃度、pH、ECおよび全イオン濃度（1993年7月11日～7月17日）

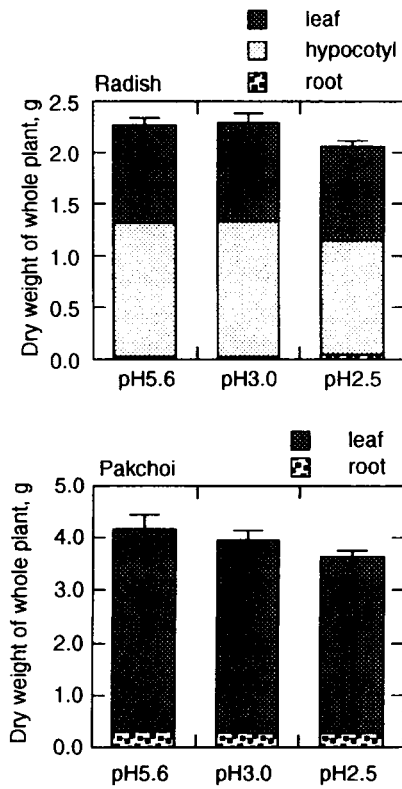


図9 ハツカダイコンとチンゲンサイの乾物重に及ぼす過酸化水素を含む人工酸性雨散水の影響。
pH3.0と2.5は100ppmの酸化水素を含む。エラーバーは個体乾物重の標準誤差を示す。

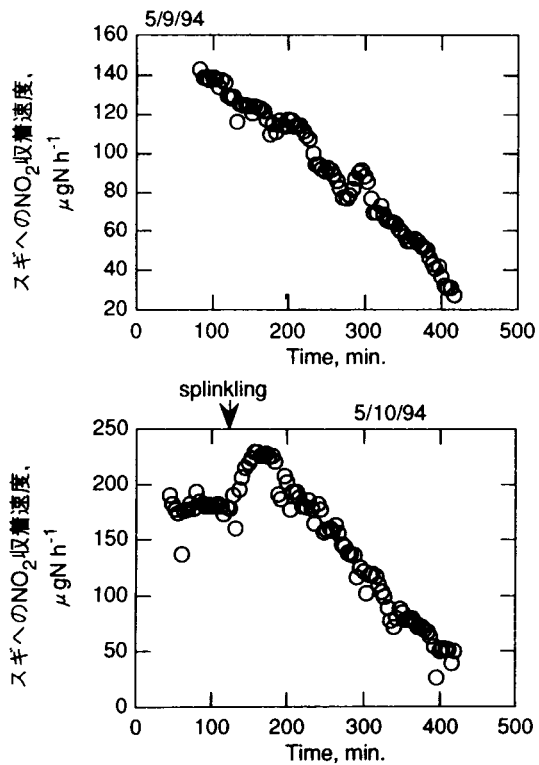


図10 スギ苗の NO_2 収着速度の経時変化
同化箱入口 NO_2 濃度が時間とともに減少していた。5月9日は途中散水なし、5月10日は途中散水あり。

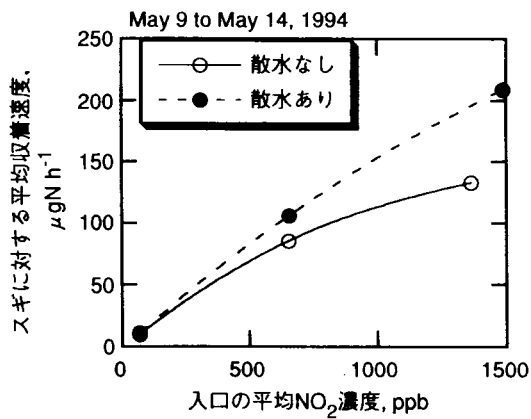


図11 スギ苗へのNO₂収着速度に及ぼす散水の影響.

散水ありの場合は散水後1時間、散水なしの場合は散水ありの場合と同化箱入口NO₂濃度が同程度である1時間の平均同化箱入口NO₂濃度とNO₂収着速度の関係.

表2 スギへの総NO₂収着量と実験終了時の散水によるNO₃洗脱量.

Date	総NO ₂ 収着量, NO ₃ 洗脱量,	
	μgN	μgN
5/9/94	644.1	143.3
5/10/94*	1172.9	42.0
5/11/94	493.6	43.9
5/12/94*	609.5	20.5
5/13/94	81.0	31.4
5/14/94*	75.7	39.9

*5月10、12および14日は実験途中の散水あり.

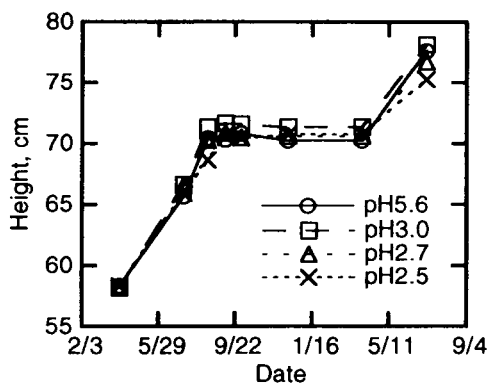


図12 各人工酸性雨処理区の樹高の変化

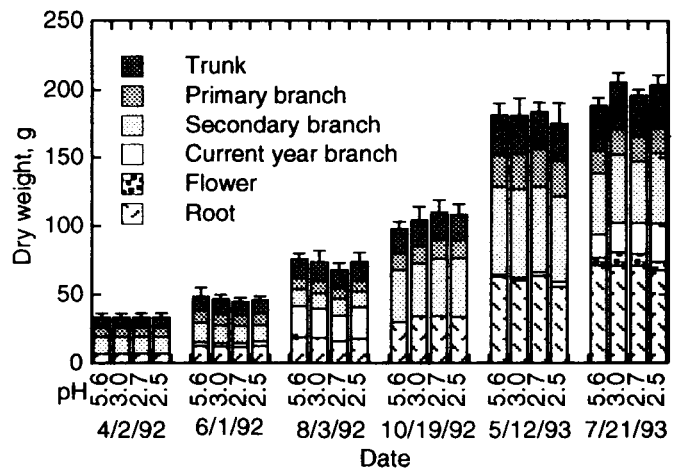


図13 スギの個体乾物重におよぼす人工酸性雨の影響

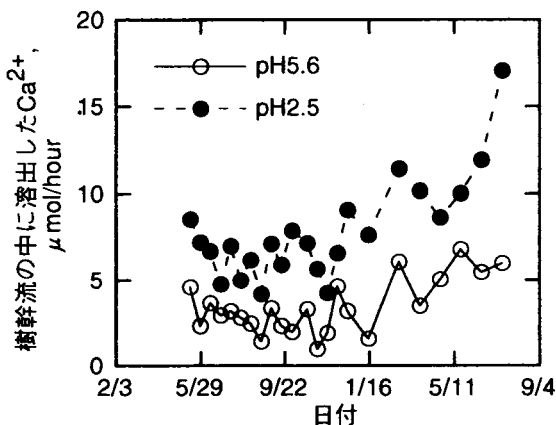


図14 樹幹流中に溶出したカルシウムイオン量の季節変化

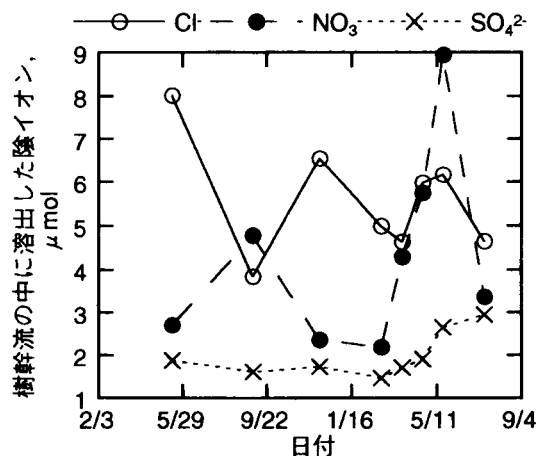


図15 pH5.6区の樹幹流中に溶出した陰イオン量の季節変化