

C-4 酸性・酸化性物質に係る陸域生態系の衰退現象の定量的解析に関する研究
(5) キャッチメント・モデル解析手法の開発と総合評価

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部 生態システム研究グループ

北海道大学大学院農学研究科

信州大学理学部

新藤純子・麓多門・大浦典子

波多野隆介・永田修

戸田任重

平成11～13年度合計予算額	24,983千円
(うち、平成13年度予算額	7,983千円)

〔要旨〕奥日光の外山沢集水域(前白根と弓張峠)、茨城県観音台と八郷、北海道雨龍において物質循環調査を実施し、酸性雨による外部起源の酸性物質の負荷と、植物－土壌系における内部循環を評価し、地域による違いを明らかにした。また観音台と八郷および岐阜県の高山で、窒素の除去・負荷実験を行い、窒素負荷量の増減が土壌－植物系の物質循環に与える影響を検討した。

森林衰退地である前白根南斜面に残った樹木は現在成長を続けており、単位面積当たりの窒素の樹体への正味蓄積速度は弓張峠の7、8割に達していた。しかし塩基は不足しており、塩基吸収が供給量により制限されていると考えられた。弓張峠、観音台、八郷では植物－土壌系における内部循環量が大きく、これによるプロトンの収支は、外部起源の酸の負荷と比べて大きい。一方前白根と雨龍では内部循環量が小さいため外部起源の酸の寄与が相対的に大きく、酸性物質負荷の変化の影響が現れやすいと考えられた。キャッチメントモデルを奥日光の集水域に適用してモデルの適用性を検討したところ、前白根と弓張峠では沈着した NH_4^+ の硝化、植物による吸収、および有機態窒素の無機化と硝化が窒素と塩基の循環に大きな影響を与えていると考えられ、これらの過程のモデルをより適切なものに改良することが必要である。

観音台と八郷における1年間の窒素の除去、負荷処理は土壌溶液の濃度や N_2O 発生量に有意な影響を与えなかった。温暖多湿な両調査地では、内部循環起源の窒素の供給量が大きく、外部から加えられた窒素も活性の高い植物や微生物により利用されていると考えられた。一方、高山では人工的な窒素負荷により1年目から濃度の上昇が見られ、2、3年目には土壌層からの顕著な硝酸流出を引き起こし、特に針葉樹林で変化が著しかった。内部循環の大きさの違いが窒素負荷に対する応答の違いと関連していると推測された。

〔キーワード〕酸性雨、物質循環、プロトン収支、キャッチメントモデル、亜酸化窒素

1. はじめに

森林生態系は、大気、植物、土壌の間で栄養塩の供給、養分吸収、有機物としての固定、落葉、分解など、形態の変化を伴いながら物質が活発に循環することにより成立している。化石燃料の燃焼に起因する酸性物質、農業や畜産からの窒素などの人為起源物質、また火山から発生する硫黄化合物など様々な物質の酸性降下物としての負荷は、この物質循環に取り込まれ、長期的に生態系の性質に変化を及ぼす可能性がある。本研究では変化の方向として、(1)土壌や陸水の酸性化

促進の可能性、および(2)窒素の過剰による栄養塩循環の変化の可能性を考える。

物質循環の一環として起こっている生物・化学反応のあるものは酸を消費し、またあるものは酸の生成を伴う。酸性雨による系外からの酸の負荷が、土壌の酸性化や生態系衰退の原因となっているという主張¹⁾や、生態系内での物質循環(内部循環)で生成するプロトンによる酸性化の影響の方が大きいとする主張²⁾など、土壌や表流水の酸性化の原因に関して議論されてきた。この解明のためにプロトン収支^{3,4)}による評価が有用と考えられ、欧米およびわが国のいくつかの生態系について推定されている。わが国の場合、外部起源のプロトンの寄与の比率は、0.05~0.26 の範囲で、欧米の生態系の場合より小さく、植生による塩基吸収が土壌系での重要な酸生成要因で平均で全酸生成量の約 25%を占めている⁵⁾。植生による養分吸収は成長期に生じ、その他の次期は他の要因が土壌の酸性化への寄与するなど、物質循環が各要因の季節変化に影響を受けていると考えられる。

第二の窒素過剰の問題に関しては、本来自然界では一次生産は窒素制限下にあり、窒素供給速度が約 $100 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ までは窒素添加に対して比例して増加する⁶⁾。陸域での生物学的窒素固定量は、 $140 \times 10^{12} \text{ gN y}^{-1}$ 程度とされており、この量は $10 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ に相当する。そのうち、非共生菌による窒素固定は、 $1 \sim 5 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 程度である。乾性降下物を含めた、大気からの窒素酸化物の負荷量は、陸域で $2 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と見積もられ、非共生菌による窒素固定量に匹敵する。窒素の付加は一次生産の増大を促すと考えられているが、樹木成長へのポジティブな影響の直接的な証拠(年輪幅の増大等)は今のところ得られていない。それどころか、欧米では森林衰退や溪流水への硝酸イオン流出(窒素飽和現象)が問題になっている⁷⁾。わが国においても窒素飽和の生態系の存在が報告されている^{8,9)}が、窒素飽和のプロセスや、窒素負荷量と生態系内の窒素動態および窒素飽和との相互の関係など、まだ解明に至っていない。硝酸イオンによる地下水・溪流水の汚染は、森林衰退以上に広域的な問題であり、飲料水を通しての人体への影響、河川、湖沼、内湾等の富栄養化問題を引き起こすことも懸念されている。

奥日光は森林衰退が報告され、衰退の現状調査や大気汚染、酸性雨との関連調査など、主として直接的な影響による原因解明のための研究が行われてきた。一方、酸性沈着が生態系の物質循環をどのように変化させるかは、酸性雨による潜在的な影響と見ることができる。このためには、大気からの酸性物質の負荷と土壌-植物系における内部循環の大きさを定量的に把握する必要があるが、この地域における物質循環の検討は行われて来なかった。

2. 研究目的

本研究では、奥日光外山沢集水域、茨城県(観音台、八郷)、および北海道(雨龍)の森林における物質循環を調査し、各調査地の特徴の比較および大気からの酸性沈着と内部循環の大きさの定量的評価に基づいて、森林衰退の見られる奥日光における、酸性物質の負荷と物質循環の特性を明らかにすることを目的とする。また集水域を対象とするプロセスモデルを適用することにより、調査地の窒素と塩基の動態を明らかにするとともに、モデルの改良の方向を検討する。更に茨城県と岐阜県(高山)の生態系において、降水中の窒素(イオン成分)の除去および、林床への窒素の添加実験を行い、窒素負荷量の変化が、土壌水中濃度や根圏からの窒素流出、および林床からの N_2O の発生など、植物-土壌系の窒素動態に及ぼす影響を推定する。

3. 研究方法

(1) 物質循環調査

① 奥日光

外山沢流域の最上端である前白根尾根南斜面 (36°47'42"N, 139°23'34"E 標高 2300m、湿性ポドゾル化土壌) と南東約 3.5km 川下の弓張峠(標高 1420m、褐色森林土と湿性ポドゾル化土壌との境界)、において 2000 年 7 月～2001 年 10 月の冬季を除く期間、調査を実施した。前白根尾根はダケカンバなどの森林衰退が顕著であり、調査地としてわずかに樹木の残った地点を選定した。弓張峠はハルニレなどの健全な落葉広葉樹林である。両地点で 2 週間に一度、以下の測定を行った。林外雨(各地域 2 点)、林内雨(4 点)は、直径 20cm のロートで捕集し、ポアサイズ 8μm のメンブレンフィルターを通して遮光したポリビンに捕集した。リター層浸透水(3 点)は土壌表面からリター層をはがしてブフナーロート上に置き、採取したリター層が周りの土壌面とほぼ同じ高さになるように設置して浸透水をポリビンに捕集した。土壌水はセラミック製のポーラスカップを深度 20cm と 50cm に各々 3 本ずつ埋設して採取した。90cm×120cm のリタートラップを前白根 2 台、弓張峠 3 台設置してリターフォールを採取した。また、TDR (Time Domain Reflectometry) により 0-20cm、20-50cm の土壌の平均体積含水率を、また雨量計により降水量を毎時間測定し、これらのデータの日変化とサンプリング期間ごとのリター層浸透水量とを用いて土壌からの流出水量を見積もった。樹木の成長は、土木測定用亀裂変換器 (BCD - 5B, 共和電業) を用い、変換器とステンレス製の板 (幅 15mm、長さ 385mm、厚さ 1mm) を繋ぎ合わせ、幹に密着するように取り付け、幹周囲長の変化を調べた (3 本)。

② 茨城県

観音台 (36°1'22"N, 140°6'33"E, 農業環境技術研究所内、標高20m、淡色黒ボク土、30年生アカマツ林) と約30km北方に位置する八郷 (標高380m、花崗岩質褐色森林土、30年生落葉広葉樹林) において、1999年6月から、2週間に一度、奥日光とほぼ同様の測定を行った (リターの採取と樹木の肥大成長の測定は行っていない、土壌水採取深度は20cm、40cm、60cm、100cm)

③ 北海道

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター森林圏ステーション雨龍研究林(44° 30' N, 142° 12' E)で行った。研究林内の 30 年生シラカンバ(*Betula platyphylla* Sukatchev var *japonica* Hara)2 次林(9.7ha)に 0.15ha のプロットを設けて測定を行った。調査地点の土壌は酸性褐色森林土である。降雨は、塩化ビニル製の雨樋(長さ 180cm、巾 10cm)を用い、1 反復で採水した。林内雨も同様の雨樋を林冠の下に 3 反復設置し採水した。樹幹流は、幹にビニルチューブ(径 1cm)を巻き付けて 3 反復で採取した。土壌浸透水は、ステンレス製ゼロテンションライシメーター(長さ 20cm、巾 25cm)を、根圏がほとんど見られなくなる深さ 40cm(B₁ 層直下)の位置に 2 枚埋設し採取した。リターフォールは、採取面積 0.58m² のリタートラップを 4 反復林冠下に設置し採集した。トラップは 8 月下旬から落葉が終了した 10 月末まで設置した。

地上部乾物現存量を推定するため、20m×20mの方形区を設けて、毎木調査を行い、胸高直径(D)、樹高(H)、生枝下高(H_b)の測定を行った。幹材積 (V_s)および枝重(W_b)を次式¹⁰⁾で算出した。

$$\log V_s = 0.932 \log (D^2 H) - 4.215 \quad (r^2 = 0.998)$$

$$\log W_b = 2.473 \log (D) - 1.301 \log (H) + 1.709 \log (H - H_b) - 1.914 \quad (r^2 = 0.987)$$

幹重は、(乾燥重量/幹材積)比 480kg/m³¹⁰⁾ から算出し、葉重はリターフォールの乾物重量に等し

いとした。細根を除く植生地下部の重量は、地上部現存量(幹、枝、葉)と(地上部重量/地下部重量)比 5.16¹¹⁾ を用いて見積もった。細根(2mm 以下)の現存量は 100mL の採土管で 40cm までの土壌を 5 反復で採取して測定した。塩基現存量は、乾物現存量に塩基含有率を乗じて求めた。

樹木の成長測定は奥日光と同様、土木測定用亀裂変換器を用いた。1 時間毎に記録される電圧の値を長さに変換し、測定開始時の幹周囲長に加算した。測定は 2 本の供試木を選び、1999 年 5 月末から 11 月中旬にかけて行った。土壌からの流出水量はペンマン法による蒸発散量を降水量から差し引いて求めた。

(2) 窒素、塩基の物質収支とプロトン収支の評価

各調査地において取得したデータに基づいて窒素と塩基 (K+Mg+Ca) に関する物質収支を図 1 に示したフローに基づき見積もった。窒素 (アンモニウムおよび硝酸イオン) の場合、樹冠溶脱 (LE) はゼロと仮定し、林内雨と樹幹流による沈着量(TF+SF)と林外雨によるもの(WD)との差を乾性沈着 (DD) とみなした。TF+SFがWDより小さい場合は、葉面から吸収されたと考えた。塩基では、ナトリウムイオンのTF+SFとWDとの差が全て乾性沈着によるもので、乾性沈着のイオン組成が湿性沈着と同じであるという仮定の下に乾性沈着量を見積もった。植物による吸収は、奥日光調査地では、落葉による窒素の還元量(LF)と全吸収量(UP)との間の既存の関係に基づいてUPを推定した。茨城県調査地では、関東地方のアカマツおよび落葉広葉樹の平均的成長量と樹体の元素組成 (文献値) に基づいてGUを推定した。また北海道調査地では毎木調査による現存量と年輪解析による幹の年成長率に基づいてGUを推定し¹²⁾、さらに、亀裂変位計による測定値に基づいて吸収量の季節変化を検討した。土壌有機物や土壌鉱物からの供給量(SS)は(3)式に基づいて計算した。また、リター層や鉱質土壌層におけるプロトン収支を評価した。なお、奥日光、茨城県ではSFを無視し、北海道では塩基のみの収支を考えた。

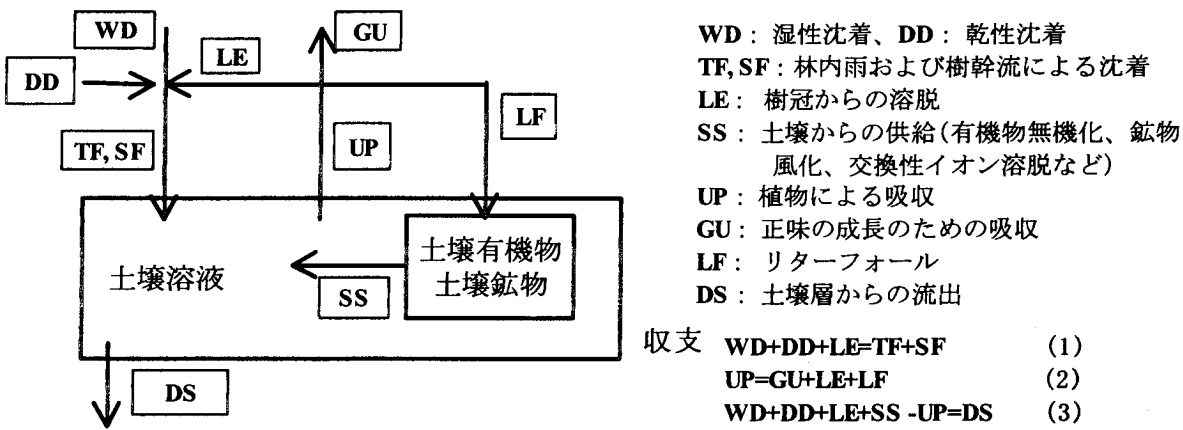


図 1 植物－土壌系における窒素と塩基のフロー

(3) 土壌ガス発生量の測定

奥日光と茨城の調査地で、土壌微生物活性と窒素の形態変化の指標として、林床からのCO₂およびN₂O 発生量を測定した。密閉法を用い、奥日光では直径210mm高さ150mmの塩化ビニル製チャンバー内の空気を8分おきに 4 回、真空バイアル瓶に採取した(前白根、弓張峠各 3 点)。ガスサ

ンプルは、赤外線ガス分析計でCO₂濃度を、ECD付ガスクロマトグラフィでN₂O濃度を測定し、ガスフラックスを求めた。サンプリングは2週間おきに、午前10時から12時の間におこなった。観音台・八郷では50cm四方のチャンバーを用いて、各調査地4点ずつ測定した。

(4) 二酸化硫黄とオゾン濃度の調査

2001年に弓張峠（林外と林内）と前白根（林外および尾根の南側と北側の林内）においてサンプリング期間毎にパッシブ・サンプラー法¹³⁾でガスを捕集した。O₃とSO₂捕集用のNaNO₂含浸ろ紙とHCl、HNO₃、SO₂、NH₃ガス捕集用のN66フィルターを各地点3個設置した。弓張峠でフィルターパック法(4段濾紙法)¹⁴⁾により一定流量で大気を吸引してHCl、HNO₃、SO₂、NH₃ガスなどを捕集し、これらの測定値に基づいて捕集量から濃度へ換算した。またO₃については国立環境研究所日光環境観測所での自動計測データに基づいて換算した。その際、弓張峠と前白根の気圧差と気温差によるガス拡散係数の違いを補正するため、次式（藤田の式）によってガス拡散係数を推定した。前白根におけるガスの拡散係数は、弓張峠の約1.09倍と推定された。

$$D = \frac{6.7 \times 10^{-4} T^{1.833}}{P(V_1^{1/3} + V_2^{1/3})^3} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ここで、 D は拡散係数 (cm² sec⁻¹)、 T は気温 (K)、 P は気圧 (atm)、 V_1 と V_2 はそれぞれガスと空気の臨界分子容 (cm³ mol⁻¹)、 M_1 と M_2 はそれぞれガスと空気の分子量である。

(5) 窒素負荷量変化の影響調査

① 観音台、八郷における窒素除去、添加実験

窒素負荷量変化の影響を調べるため、2000年6月から観音台と八郷に各々窒素除去区、自然区(対照区)、窒素添加区の3区を設けた。除去区は、1m×0.5mのロート型降水除去器で林内雨を捕集し、そのまま各々約25mlの陰イオン交換樹脂(Bio;-Rad AG1-X8)及び陽イオン交換樹脂(同AG500W-X8)を充填して直列に接続されたカラムを通して、林床に散布した(図2)。カラムは25cm×25cm当たり1本セットされ、各々8本の針により同面積に均等に散布されるようにした。近くにロート面積25×25cmでイオン除去装置と同じ構造のものを設置し、イオン交換樹脂を通過した降水を全量採取、分析してイオン除去率を求めた。また、添加区には、林内雨によりアンモニウムイオンと硝酸イオンとして負荷した窒素量の2倍に相当する量の硝酸アンモニウムを、1m×0.5m 当たり2Lの水溶液とし、2週間に一度散布した。各々の処理区において、リター層浸透水、土壌水および林床からの土壌ガスを採取した。

② 高山における窒素負荷実験

長野県-岐阜県境に位置する乗鞍岳の西斜面、標高1300m付近の広葉樹林区(ミズナラ等)と針葉樹林区(ヒメコマツ、ヒノキ)で行った。広葉樹林区と針葉樹林区のそれぞれに10m×10mの実験区を各3区、合計6区設置し、各実験区で窒素負荷量が+0、+20、+40kg N ha⁻¹ yr⁻¹になるように硝酸アンモニウム(NH₄NO₃)を動力噴霧器を用いて均一に噴霧した(写真1)。1999年は8月から11月の4ヶ月間で計9回、2000年は5月から10月までの6ヶ月間で計10回、2001年は5月から8月の4ヶ月間で計6回噴霧した。土壌水は、各実験区で、地表より20cm、40cm、60cm、100cmに設置したポーラスカップ(各深さ3本)からほぼ2週間間隔で採水した。採水した土壌水は、0.45 μm フィ

ルターでろ過し、イオンクロマトグラフ(DIONEX DX-120)を用いて硝酸イオン濃度を測定した。

(6) キャッチメント・モデルによる解析

モデルは既存のプロセスモデル¹⁵⁾を奥日光に適用可能となるよう修正して用いた。モデルで用いている過程は以下の様なものである。集水域へのイオン(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-)の負荷として、湿性沈着と乾性沈着を考え、土壌への負荷は、湿性・乾性沈着および樹冠とリター(落葉落枝)層からの溶脱とする。土壌中でイオンの循環を支配する過程として、植物による吸収、硝化による NO_3^- の生成、イオン交換、鉱物の風化による塩基性陽イオンの供給を考える。土壌水の鉛直移動と水平移動を考え、各イオンは集水域内を土壌水とともに移動するものとする。各イオンについて上記の過程を考慮した物質収支計算を行い、電荷バランスからpHとアルカリ度を計算する。

モデルの適用のために、河川の分岐、地形および植生を考慮して集水域を4つの領域(面積は $1.12 \sim 2.28 \times 10^6 \text{ m}^2$)に分割し、イオンの負荷と植物による吸収は上部の2領域が前白根と同じで、下部2領域は弓張峠と同じと仮定した。2000年に前白根と弓張峠で実測した土壌水のイオン濃度を初期値として、2000年7月から2001年10月までの土壌水のイオン濃度の変化を計算し、観測値と比較した。計算にあたって、各過程は以下のように扱った。

[湿性沈着] サンプルング期間毎に林外雨による沈着量を日降水量(アメダス日光による)に比例させて振り分け、日単位の湿性沈着量とした。

[乾性沈着と樹冠からの溶脱] Na^+ 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- および NO_3^- については樹冠からの溶脱は無いと仮定し、林内雨と林外雨による沈着量の差を乾性沈着量として日降水量に比例させて振り分け、日単位の乾性沈着量とした。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および K^+ については、乾性沈着量と湿性沈着量の比が Na^+ と同じであると仮定し、それぞれの湿性沈着量から乾性沈着量を推定した。樹冠からの Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および K^+ の溶脱量は、林内雨による沈着量から湿性沈着量と乾性沈着量を差し引いて求めた。

[リター層からの溶脱] リター層浸透水による流入量から林内雨による沈着量を差し引いて求め

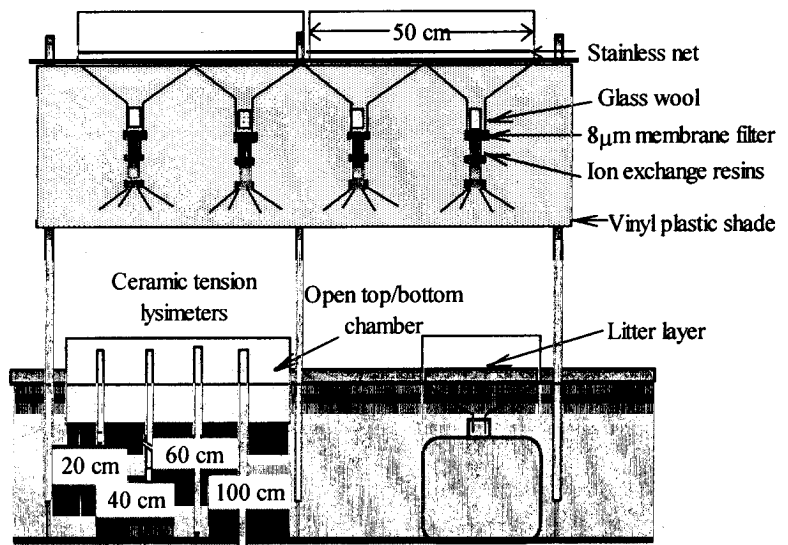


図 2 降水からのイオン成分除去装置とサンプリングシステム



写真 1 人工降雨噴霧状況

た。

[硝化] 土壌水中の NH_4^+ の硝化($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$)と土壌中の有機態窒素の硝化(有機態窒素 $\rightarrow \text{NO}_3^-$)を考えた。各々の反応の速度定数について、地温に応じて7~8月に最高となる季節変動を仮定し、土壌水の NH_4^+ と NO_3^- 濃度の観測値を再現するように校正した。

[鉱物の風化] 鉱物の風化による陽イオンの供給速度 ($\text{mmol}_e \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) は、流紋岩の表層地質を考慮して Ca^{2+} は200、 Mg^{2+} は50、 K^+ は1、 Na^+ は10と仮定した。

[植物による吸収] 樹冠とリター層からの溶脱量の1.5倍と仮定した。

4. 結果・考察

(1) 各調査地における物質収支の推定

① 奥日光における樹木の成長と養分吸収

図3に落葉による窒素還元量と全吸収量の関係、およびこれに基づいた弓張峠(Y)と前白根(M)の窒素全吸収量(UP)の推定値をプロットした。落葉および樹冠溶脱分を差し引いて、正味の成長のための吸収量(GU)は弓張峠が118、前白根が94($\text{mol}_e \text{ m}^{-2}$)と、弓張峠が前白根の1.25倍であった。図4に樹体の体積が胸高直径の3乗に比例すると仮定して、亀裂変位計の指示値(CD)の3乗の時間変化、およびこれに当てはめたロジスティック曲線から計算した各日の相対成長速度(年間の成長量に対する1日当たりの成長量)を示した。図4より1本の木の成長量は弓張が前白根の約5.2倍であるが、樹木密度は弓張が前白根の約1/4なので、単位面積当たりの成長量は1.3倍となり、図3に基づいて求めた比率と同程度であった。前白根は森林衰退地であるが、7月末から9月中旬までの短期間に成長が認められ、成長速度は弓張と比べて極端に小さいわけではない。

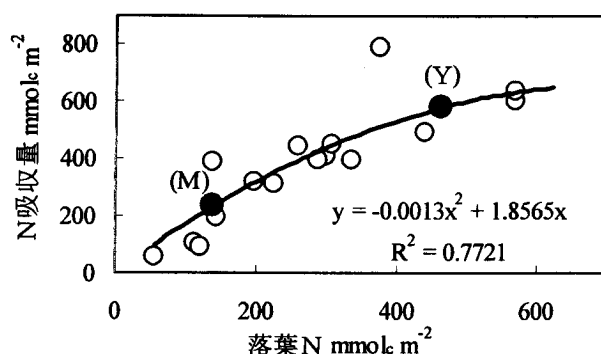


図3 落葉による窒素還元量と全吸収量の関係
(白丸は文献データ等よりプロット)

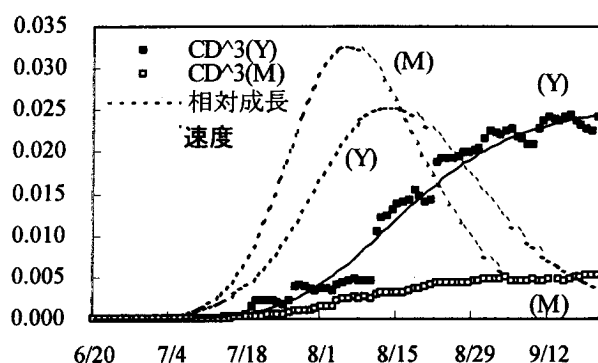


図4 樹木成長速度の季節変化

② 調査期間にわたる物質収支の地域特性

奥日光、茨城、北海道の計5調査地の窒素と塩基の物質収支の推定結果を表1に示す。弓張峠と前白根尾根は2001年6月~10月の5ヶ月間の値、観音台と八郷は1999年6月~2001年5月の2年間のデータに基づいた年間値、また雨龍は1999年6月~10月の5ヶ月間の値である。DSは土壌40~60cm層からの流出量とした。奥日光、雨龍は5ヶ月間の値であり、一年当たりの沈着量や流出量は期間に応じて大きくなると思われるが、調査終了時には既に落葉も終了し、図4に示すように成長もほとんど止まっており、晩秋から春まで雪に覆われることから、その他のパラメータは年間の値も表1に示したものとあまり変わらないであろうと考えられる。それぞれの地域で各項

の推定方法も一部異なっており、厳密な比較はできないが、全体として、(1)前白根と観音台は窒素の乾性沈着(主としてアンモニウムイオン)が多いこと、(2)弓張峠の各フラックスは観音台・八郷に相当する大きさであるのに対して、前白根と雨龍は土壌層からの窒素および塩基の流出(DS)、土壌からの塩基の供給(SS)が他と比較して小さいこと、(3)前白根と雨龍の塩基では正味成長のための吸収は他と同程度であるが、落葉、樹冠溶脱による還元量が少ないこと等の特徴が見られた。また、(4)塩基の収支はいずれの調査地でも土壌系(Δ_{soil})では負で、土壌からの流出を表している。土壌-植物系全体(Δ)では雨龍のみ正(蓄積)であったが他は負であった。この推定では土壌40～60cmを対象としているが、養分吸収など更に深いところで起こっている可能性がある地域もあり、より正確な収支の算定は更に検討が必要であると考えられる。

表 1 奥日光および茨城県の調査地における窒素と塩基の物質収支の推定結果

	Nitrogen									Base cations (K+Mg+Ca)												
	WD	DD	LF	GU	UP	SS	DS	Δ	Δ_{soil}	WD	DD	LE	LF	GU	UP	SS	DS	Δ	Δ_{soil}			
	*1									*4									*2		*3	
弓張峠	128	-62	463	118	580	589	75	-9	-127	78		153	385	101	639	640	233	-154	-255			
前白根	33	42	139	94	233	165	7	69	-25	12	6	37	26	81	145	118	28	-10	-91			
観音台	125	103	123	79	202	129	156	72	-7	12	117	240	431	161	833	787	323	-194	-355			
八郷	107	-12	211	37	248	359	206	-111	-148	34	27	300	387	78	765	708	305	-243	-321			
雨龍										118	11	-6	125	95	214	190	99	30	-65			

*1: 茨城県調査地のLFとしてリター層浸透水からの溶脱量を用いた、*2:土壌-植物系の収支 (WD+DD-DS)
*3:土壌系での収支(WD+DD-GU-DS)、*4:弓張峠のNaはWD>Tであったため塩基の乾性沈着は推定できなかった。

③ プロトン収支

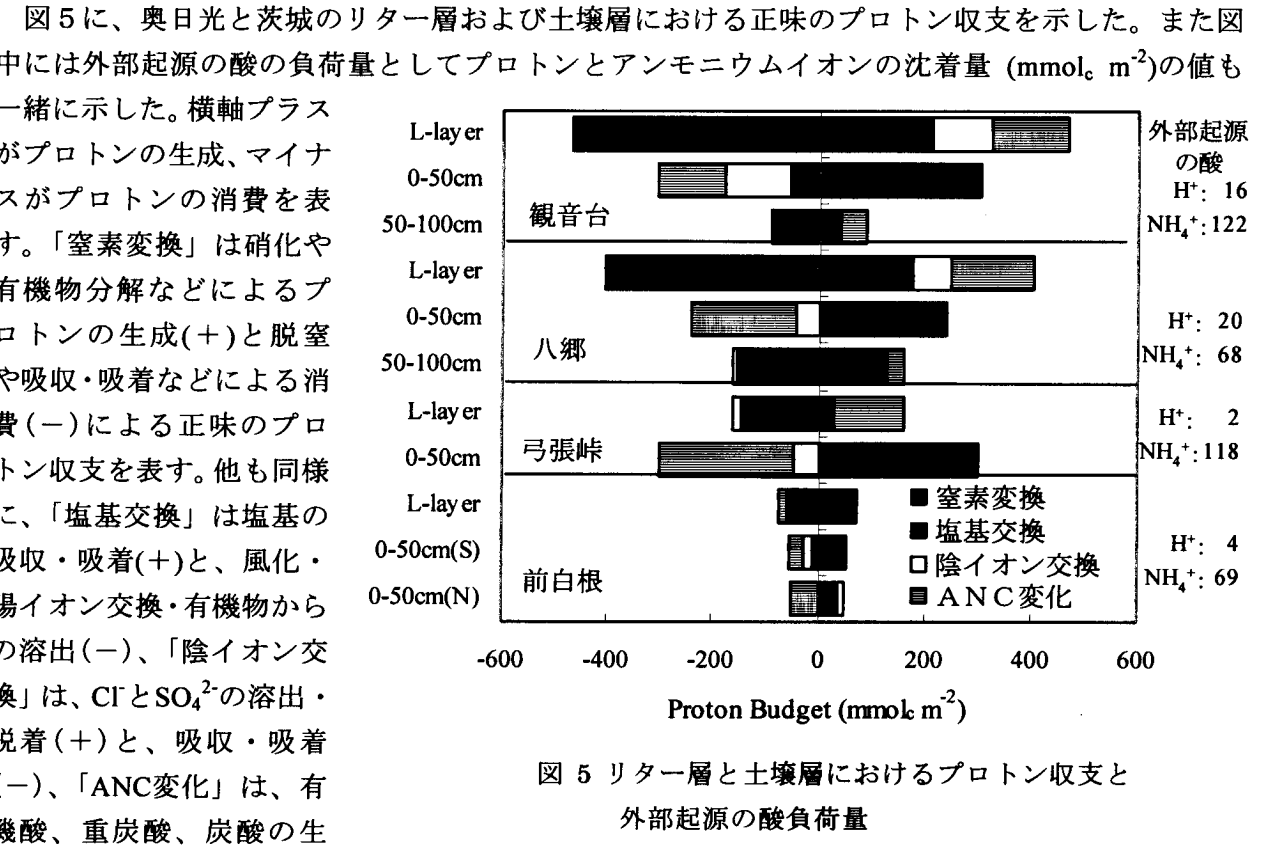


図 5 リター層と土壌層におけるプロトン収支と外部起源の酸負荷量

成・解離(+)と、消失・プロトン化(-)などのプロセスによる正味のプロトンの収支を表す。観音台と八郷ではリター層でのプロトンの生成、消費量が大きく、主として塩基の溶脱により酸が中和され、硝化や有機酸生成により酸が生成されていた。土壌表層におけるプロトンの生成・消費量も大きい、反対に塩基の吸収と有機酸および陰イオンの消失がプロトン収支を支配している。弓張峠では主として働いているプロセスは観音台などと同様であるが、リター層よりも土壌層における酸の生成、消費量の方が大きい。これらの調査地では、リター層と土壌層での酸の生成・消費量は外部起源の酸の負荷量と比べて大きく、土壌-植物系の酸の収支は内部循環による寄与が大きい。一方、前白根では南北両斜面とも、リター層や土壌層における酸の生成・消費量は他の調査地と比較して小さく、外部起源の酸の負荷と同程度であり、ここでは酸性雨による酸の負荷が土壌-植物系の酸の収支に与える影響が相対的に大きいと考えられた。

④ 雨龍における物質循環の季節変化

ア. プロトン

図6に測定期間における降水量および湿性+乾性降水物(WD+DD)、林内雨+樹幹流(TF+SF)、土壌排出(DS)によるプロトンフラックスの季節変化を示した。7月中旬までプロトンの土壌系外への排出はなかったが、8月初旬にDSの値は急激に上昇した。また、同時にWD+DD、SF+TFの値も急激に上昇した。7月24日から31日の8日間で256mmという降水があり、この集中的な降雨によってもたらされたプロトンは、林冠で中和されきれずに土壌系へもたらされ、さらに土壌系においても完全に中和されることなく系外へ排出されたと考えられる。7月中旬までプロトンの排出はみられなかったが、この期間、降水量は他の時期に比べ顕著に少ない。以上のことから、降雨は土壌系外へ流出するプロトンフラックスをコントロールする要因の一つであることが示唆された。DSによるプロトンフラックスは、8月以降も高い値であった。この時期は、集中的な降雨は見られないものの比較的降雨が多い。しかし、WD+DDやSF+TFのプロトンフラックスの上昇は見られない。これは、土壌系内でプロトンが生成され、それが緩衝されずに排出したと考えられる。土壌系外へのプロトン流出に影響をおよぼす要因については、集中的な降雨以外にも土壌系内で生成されるプロトンの季節的变化について考慮に入れる必要があることが示唆された。測定期間全体のプロトンフラックス

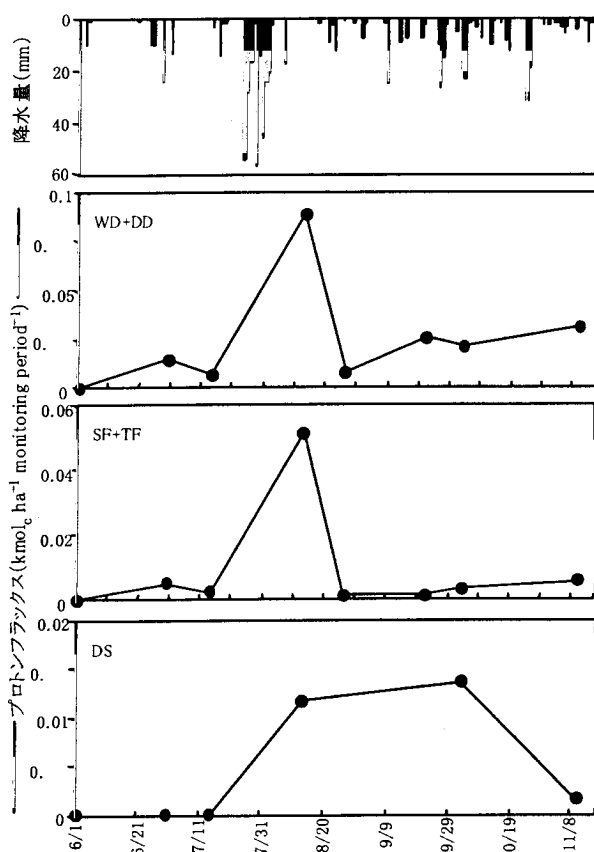


図6 降水量およびプロトンフラックスの季節変化

WD; 湿性降水物, DD; 乾性降水物, TF; 林内雨, SF; 樹幹流, DS; 土壌排出。サンプル採取日にプロットし、サンプリング期間におけるフラックスとして算出6/1は測定開始日としてフラックスは0とした。

(mmol_cm⁻²)は、WD+DD、TF+SF および DS がそれぞれ、20、7、3 であり、大気から流入するプロトンの大部分が植生、土壌系において緩衝されていた。

イ. 塩基

図7に亀裂変位計データに基づいた幹径の季節変化を示す。幹径は6月に入るとともに肥大成長を開始し、7月下旬まで続いた。その後、幹径の変動は、ほぼ横ばいの状態が測定終了時まで続いた。この幹径の季節変化から肥大成長期は6月1日～7月31日までとし、養分吸収もこの期間に起こるものと判断した。図8に降水量、養分吸収フラックスおよび塩基収支の季節変化を示した。塩基は6月、7月の樹木成長期は養分吸収により土壌系から失われ植生系に蓄積された。この養分吸収による塩基フラックスは大気からもたらされる塩基の10倍に達した。8月以降は逆に、リターフォール、林内雨+樹幹流により、塩基は植生系から土壌系へ蓄積された。これは、大気からもたらされる塩基の2倍程度であった。集中的な降雨があった夏期には、養分吸収に匹敵する塩基が土壌系から排出されていた。これらの結果より、植生の成長期における養分吸収が塩基循環を強く支配しているという事が示された。そして、集中的な降雨による土壌からの溶脱がさらに、物質循環にインパクトを与える要因となっているものと考えられる。本研究で調査対象とした地域は北海道でも有数の積雪地帯であることから、集中的な降雨と同様に、排出水量の多くなる融雪期を含めたインパクトを今後見積もる必要がある。

(2) 林床からのN₂O発生量と窒素動態
亜酸化窒素 (N₂O) は脱窒の中間生成物で、また硝化の副産物であり、林床からのN₂O発生量は土壌微生物による窒素の形

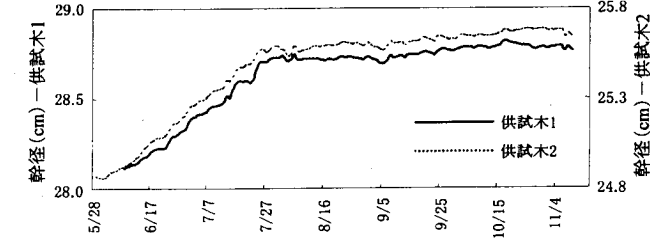


図7 幹径の季節変化

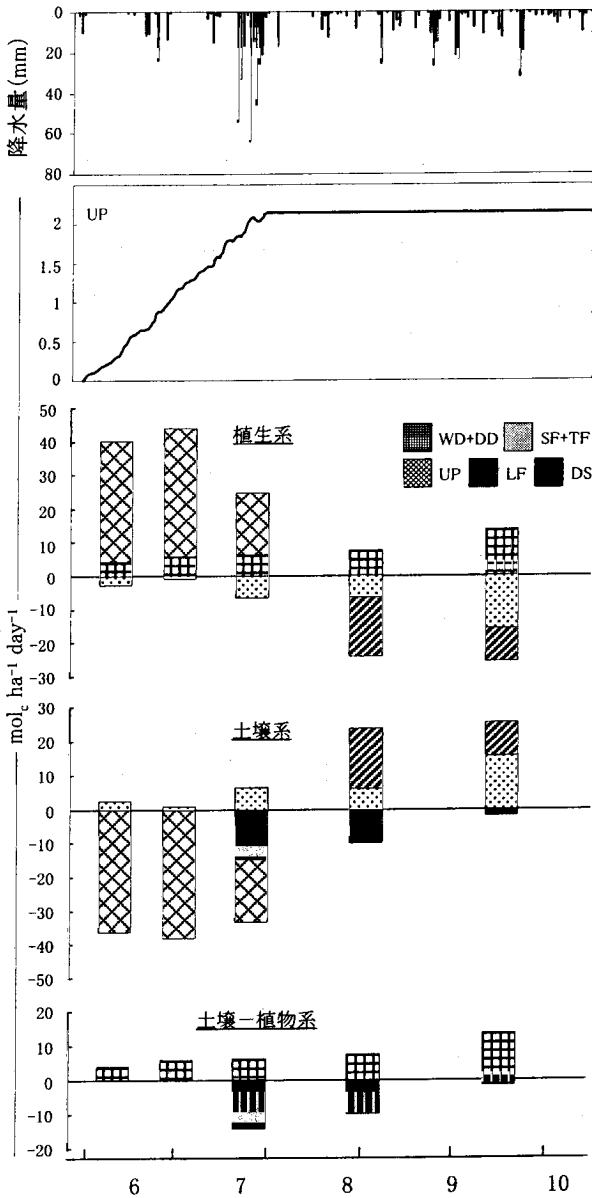


図8 降水量、養分吸収フラックスおよび塩基収支の季節変化
UP; 幹径の季節変化をもとに比例配分し、積算値で示した養分吸収フラックス。WD; 湿性降下物, DD; 乾性降下物
TF; 林内雨, SF; 樹幹流,

態変化の活性を理解するために重要な物質である。また、窒素飽和に達している生態系で N_2O 発生が増大することも指摘されている¹⁶⁾。酸性雨による酸性物質の負荷や窒素化合物の増加による、土壌-植物系の養分動態や物質循環の変化を把握する一つの指標と考え、奥日光および茨城の調査値で定期的に観測をした。

奥日光における2000年7月末から10月末、2001年5月から10月末までの調査期間中の N_2O 発生量は、弓張峠で $0-0.033 \text{ mg N m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ （メディアン0.0047）で夏季に高く秋に低くなる傾向の季節変化を示したのに対し、前白根では $0-0.0026$ （メディアン0.0013）と測定期間中大きな増減はなく低い値で推移した。ほぼ同期間の観音台と八郷における発生量は各々、 $0.0018-0.011$ （メディアン0.0041）、と $0.0012-0.015$ （メディアン0.0029）であり、弓張峠では観音台や八郷を凌ぐ量の N_2O が発生していた。

図9に4地点の N_2O 発生量および土壌呼吸量と、深度20cmにおける地温との関係を示した。観音台と八郷は冬季のデータも一緒にプロットしてある。地温がおよそ 13°C を越えると N_2O が発生し始め、それ以下の温度では例外を除いて発生量は極わずかであった。前白根で N_2O 発生量が小さい原因は、測定期間にわたって地温が低かったことにあるが、 13°C を越えた日についても同様に低い。このことは図9(2)に示す土壌呼吸が地温と高い相関を持っており、前白根も他の地点と同じように微生物活動が行われていることと対照的である(この図で田印は前白根の値であるが、チャンパー内に草本植物が生えていたので土壌呼吸を過大評価している)。前白根では前節で見たように土壌水のイオン濃度が低く、貧栄養な状態であり、樹木も短い夏の期間の成長のために窒素を必要としているので、微生物による窒素の利用が制限されていることが推察された。

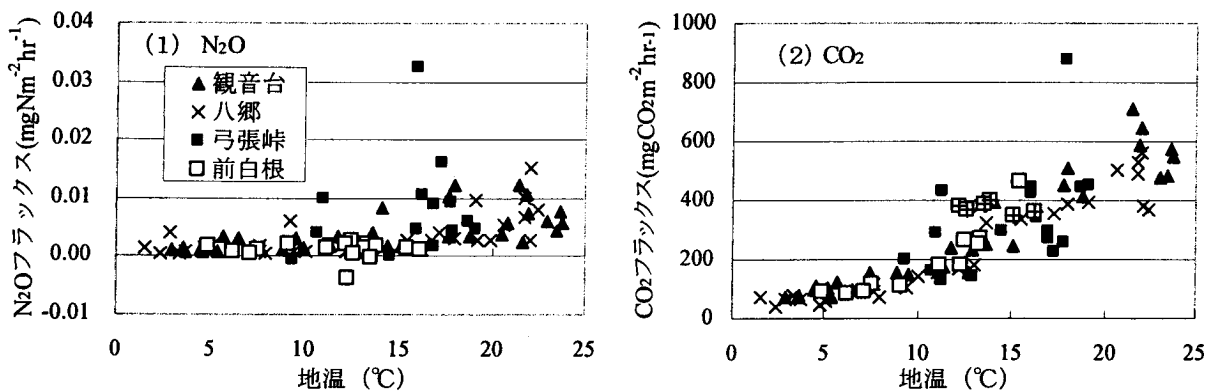


図9 各調査地における N_2O 発生量および土壌呼吸の気温による変化

(3) 奥日光における二酸化硫黄とオゾン濃度

表1に示すように、前白根では弓張峠と比べて降水が樹冠を通過することによる窒素（主としてアンモニウムイオン）の増加量が大きく、この増加を乾性沈着によるものと見なした。このことを確認するために2001年度調査では大気中ガス濃度の測定を実施した。しかしN66フィルターの捕集効率が悪く、窒素化合物の濃度は測定できなかった。NaNO₂含浸ろ紙を用いたSO₂とO₃については、フィルターパック法および自動計測器による濃度と高い相関を示した（相関係数は、O₃が0.93、SO₂が0.96）。観測期間中、前白根のSO₂とO₃濃度が弓張峠の2倍程度になることが多かった（図10）。前白根のO₃濃度は、2週間の平均値が光化学オキシダントの環境基準

(1時間値)である60ppbを超えるときもあったが、ダケカンバの衰退している南斜面と衰退していない北斜面の濃度はほぼ同じで、むしろ北斜面の方が高い傾向が見られた。

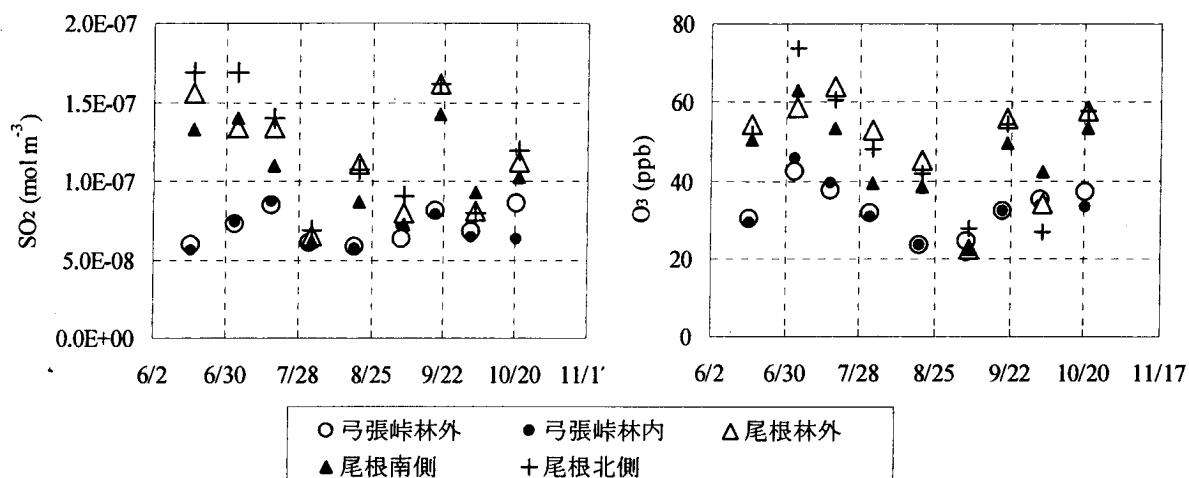


図 10 2001 年の前白根と弓張峠における大気中二酸化硫黄とオゾンの濃度

(4) 窒素除去・添加実験による土壌中の窒素動態と流出量への影響

① 観音台、八郷における窒素負荷量変化が土壌－植物系の窒素動態に与える影響

イオン交換樹脂による除去率は、陽イオンで55～90%、陰イオンは92～97%であり、特に陰イオンの除去率が高く、1年間の林床への窒素負荷量は、自然区では、観音台約32kg ha⁻¹y⁻¹ (228 mmol_c m⁻²y⁻¹)、八郷は13 kg ha⁻¹y⁻¹ (95 mmol_c m⁻²y⁻¹)であったのに対して、除去区では観音台で4.7 kg N ha⁻¹y⁻¹、八郷で1.5 kg N ha⁻¹y⁻¹となった。また自然区の二倍の窒素を人工的に添加した添加区での窒素負荷量は、観音台と八郷で各々101 kg N ha⁻¹y⁻¹ および 43 kg N ha⁻¹y⁻¹となった。

ア. リター層、土壌層からのイオンの浸透フラックスへの影響

リター層浸透水や土壌水のイオン濃度は、処理を行う以前から地点による大きな変動が存在していたので、処理の効果は処理開始前後の濃度変化の大きさで評価することにした。リター層浸透水では、1日あたりの流出フラックスに負荷量の違いに対応した変化が現れた。しかし土壌水(20cm)の場合は、硫酸イオンは処理による違いが見られたが、アンモニウムイオンと硝酸イオンは、除去区で自然区より土壌水中濃度が低くなる傾向が見られたが有意ではなく、添加区でむしろ低濃度になるなど、処理との対応がはっきりしない。八郷は、リター層浸透水の硝酸イオン浸透量にも処理の効果が現れず、土壌水(20cm)の処理による変化も負荷量と全く対応していなかった。土壌中イオン濃度は、自然の状態でも地点による土壌中濃度の違いが非常に大きいこと、同一地点においても数ヶ月から1年以上の周期で著しい濃度変化があることなどを考えると、土壌－植物系における窒素濃度は、有機物の分解や吸脱着など、局所的に進行する内部循環に強く支配されており、大気からの負荷の影響や回復も短期的には現れにくいと考えられた。硫酸イオンは、硝酸イオンと比べて生物による内部循環に取り込まれにくいので、外部からの負荷の変化の影響を受けやすいと考えられる。以上の結果は「処理後」として2000年5月からの1年間の測定結果を用いている。その後も処理を継続しており、2002年2月頃から観音台添加区の深度20cmの土壌水中硝酸濃度が他の処理区と比較して高くなる傾向が見られるが、各地点の濃度は時間的に

大きな周期で変動しており、この変化が有意で継続的なものであるかどうかは現段階では不明である。また、より深い土壌層における変化は検出されていない。

イ. 林床からの N_2O 発生への影響

観音台および八郷で2週間毎に測定した N_2O 発生量へは、窒素添加処理および酸性物質除去処理による顕著な影響は認められなかった。この測定は窒素添加から約10日後に行っているため、窒素添加の直後での N_2O 発生の特徴をとらえるため、窒素添加前日から添加後2、3日間の連日測定を数回実施した。添加区への硝酸アンモニウム溶液の散布時に無処理区には、添加区と同量の脱イオン水を散布した。図11に結果の例を示したが、窒素添加の1~2日後に、 N_2O 発生ピークが現れることが確認された。図中のN () に示した1回当たりの窒素添加量は $0.04\text{--}0.81\text{ g/m}^2$ と林内雨窒素負荷量に対応して変動したが、 N_2O 発生量は窒素添加量と必ずしも対応していない。1月、2月にピークが小さいのは、低温のために微生物活性が低下していたためと考えられた。これらのピークは窒素添加後速やかに発生することから、好氣的な土壌表層での硝化反応に起因すると考えられた。一方2週間ごとの測定による N_2O 発生は土壌に蓄積された窒素を基質とした硝化および脱窒により発生し、土壌水濃度と同様、内部循環が外部起源の物質の負荷に比べて大きいいため、窒素負荷処理の影響が現れにくかったと考えられた。

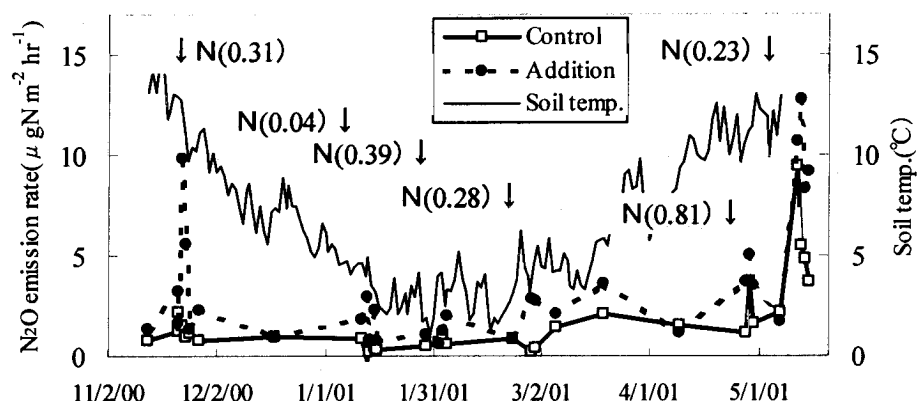


図 11 窒素添加処理後の N_2O フラックス

② 高山における人為的窒素負荷が森林土壌からの硝酸溶脱に及ぼす影響

ア. 調査地の物理化学特性

調査した広葉樹林区では、Ao層が5-6cm、A層が30-40cm、針葉樹林区では、Ao層が6-7cm、A層が6-13cmであり、針葉樹林区ではA層が極めて薄かった。土壌A層の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は、広葉樹林区で4.4-4.7、針葉樹林区では3.5-4.0であり、針葉樹林区の方がやや酸性が強かった。土壌A層のC/N比は、広葉樹林区で16-19、針葉樹林区で16-22であり、ヨーロッパの森林で窒素飽和の閾値⁷⁾とされている $\text{C/N}=25$ を下回っていた（硝化促進、窒素飽和が起きてもよいC/N比であった）。

イ. 土壌水の硝酸イオン濃度

土壌水の硝酸イオン濃度は、針葉樹林区では、実験開始1年目（1999年）は、施肥開始（8月初旬）から2ヶ月後の10月に $+40\text{ kg N ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 施肥区の20cmと40cm深で、2年目は8月および9月に $+20$ 、 $+40\text{ kg N ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 施肥区の各深度で、3年目には8月に $+40\text{ kg N ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 施肥区の各深度

で対照区を上回る硝酸イオン濃度を観測した（図12）。針葉樹林区の土壤水の硝酸イオン濃度は年々増加傾向を示し、特に+40 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ 施肥区の3年目には非常に高い濃度（27.9 mgN l⁻¹）を観測した。一方、広葉樹林区では、1年目は+40 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ 施肥区の20cm深で、2年目は+40 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ 施肥区で9月以降、さらに3年目には+20、+40 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ 施肥区で8月に対照区を上回る硝酸イオン濃度がみられた。広葉樹林区の土壤水の硝酸イオン濃度も年々増加傾向を示したが、針葉樹林区ほど顕著ではなかった。大類¹⁷⁾が国内の森林について指摘したように、本実験区でも、高濃度の硝酸イオン濃度は樹木の生育の活発な夏(8月、9月)にみられることが多かった。欧米に比べ夏季に比較的降水量が多く、負荷した硝酸イオンあるいは土壤中で生成された硝酸イオンが夏季に流出しやすいのであろう。

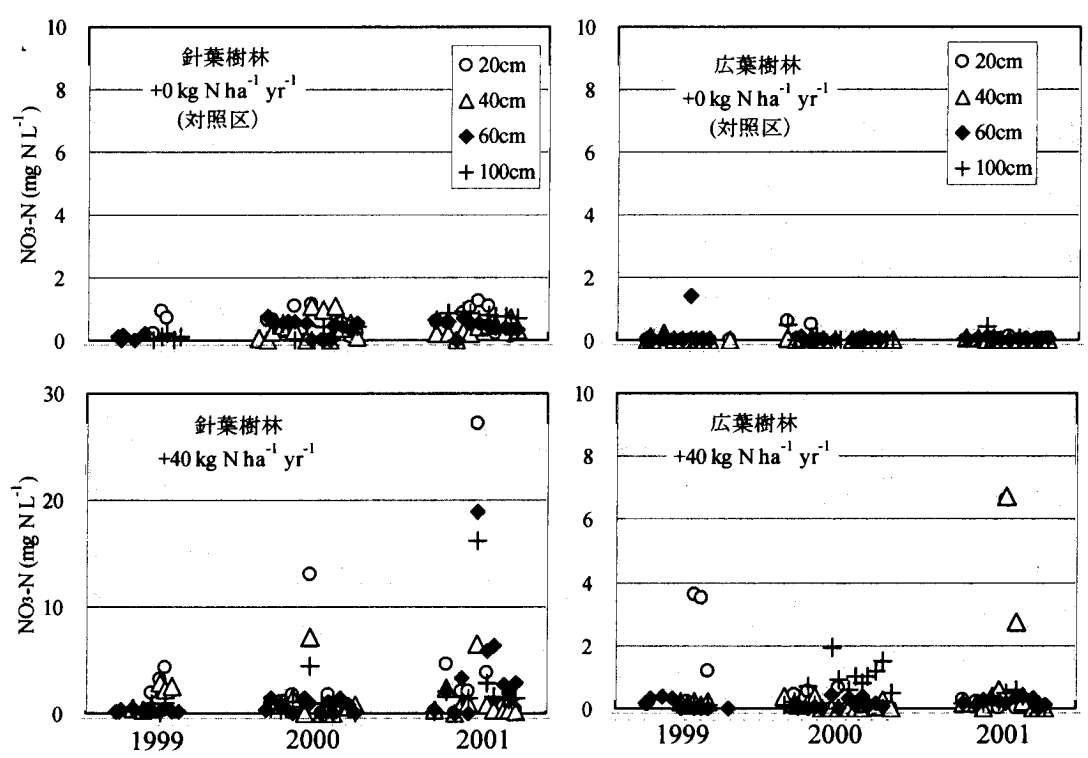


図 12 高山の針葉樹林区および広葉樹林区の土壤水の硝酸イオン濃度

ウ. 窒素溶脱量の見積もり

根圏よりも深い深度60cmの土壤水の硝酸イオン濃度と、降水量から蒸発散量を差し引いて求めた浸透水量を用いて、2001年5月から11月までの無雪期の溶脱量を推定した。推定した窒素溶脱量は、針葉樹林区で2.7～18.2kgN ha⁻¹（施肥量の13～45%）、広葉樹林区で0.9～1.3kgN ha⁻¹（施肥量の2～6.5%）であり、針葉樹林区の方が広葉樹林区に比べ大きな溶脱量を示した(表 2)。本来、窒素制限下にあり、窒素は内部循環で保持され、系外への流出はほとんどないといわれている森林で、今回程度の窒素負荷で、負荷

表 2 針葉樹林区と広葉樹林区における
窒素溶脱量 (kgN ha⁻¹ 7month⁻¹) の推定

	施肥量 (kgN ha ⁻¹ yr ⁻¹)		
	+0	+20	+40
針葉樹林区	1.62	2.67	18.16
広葉樹林区	0.16	1.30	0.85

2001年5-11月の7ヶ月間、針葉樹林区、広葉樹林区ともに60cm深の硝酸イオン濃度で計算

量の数～数十%もの窒素流出が引き起こされたことは驚きである。これが本調査地特有の現象なのか、今後より多くの地点での検証が必要であろう。

図13に窒素の林内雨を通してのインプットと土壌1 m層からのアウトプットの関係を、NITREX調査による結果¹⁸⁾と比較した。凡例に示したマークが何も処理をしていない場合を示し、+が添加処理、×が除去を表す。またNITREXサイトに関しては、処理の効果が顕著だったもののみ、変化の大きさと方向を矢印で表した。

NITREXサイトのうち既に窒素飽和状態である2地点はインプットの減少によってアウトプットも急激に減少し、

一方、観音台と同程度のインプットであったAberは、窒素の付加によりアウトプットも大きく増加した。これに対して観音台と八郷は、インプットの大きな変化にも係わらず、アウトプットはほとんど変わらない。温暖多湿な観音台、八郷は、NITREXの一部のサイトと比較して、植物吸収や土壌微生物の同化、脱窒などの活性が高く、窒素負荷に対する許容量が大きいと考えられた。一方高山の針葉樹林区の1m土壌層からの窒素流出量は窒素添加によって顕著に増加した(高山の自然の窒素負荷量は既存の資料を参考に $10\text{kgN ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 程度と推定した)。高山での物質循環は明らかでないが、無処理区での土壌各層の窒素濃度は前白根と同程度と低く、高山でも内部循環が小さいことが想像できる。窒素負荷に対する流出の応答が異なる要因を更に解明する必要がある。

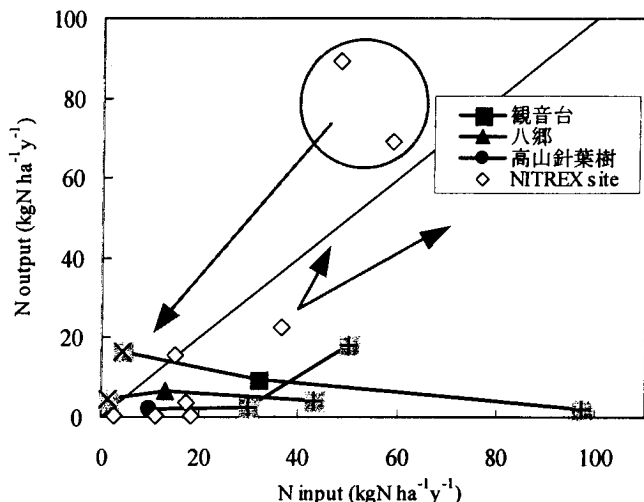


図13 大気からの窒素の負荷量と根圏からの窒素流出量

(5) キャッチメント・モデルによる解析

図14に、前白根と弓張峠について、2000年7月から2001年11月までのA層(20cm)とB層(50cm)の土壌水イオン濃度のモデルによる予測値と実測値を示した。

前白根では、2001年に観測されたA層土壌水の塩基性陽イオン濃度は2000年より低い傾向があったが、モデルはそれを再現できず、2001年の濃度を過大評価した。これは、植物による塩基性陽イオンの吸収速度をモデルが過小評価していることを示唆する。また、モデルは土壌水の NH_4^+ と NO_3^- 濃度を過大評価していることから、 NH_4^+ の硝化速度と植物による NO_3^- 吸収速度を過小評価していると考えられる。モデルでは植物によるイオン吸収量を樹冠とO層からの溶出量の1.5倍と仮定しているが、2001年は塩基性陽イオンと NO_3^- の吸収がそれより多かったと考えられる。弓張峠に関しては、モデルは2001年のA層土壌水の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ および NO_3^- 濃度を過小評価した。これは、有機態窒素の硝化速度と、それにとまう塩基性陽イオンの溶脱を過小評価していることを示唆する。また、B層土壌水中のこれらのイオン濃度も、計算では8月上旬にピークがあるが観測値は7月上旬にピークがあり、硝化速度の季節変動を正しく予測していない。

モデルによる計算では、2001年の観測期間中のA層での NH_4^+ と有機態窒素の硝化による H^+ 生成量は図15のようになった。観測期間中の NH_4^+ の硝化による H^+ 生成量は $25\text{ mmol}_e\text{ m}^{-2}$ であるのに対

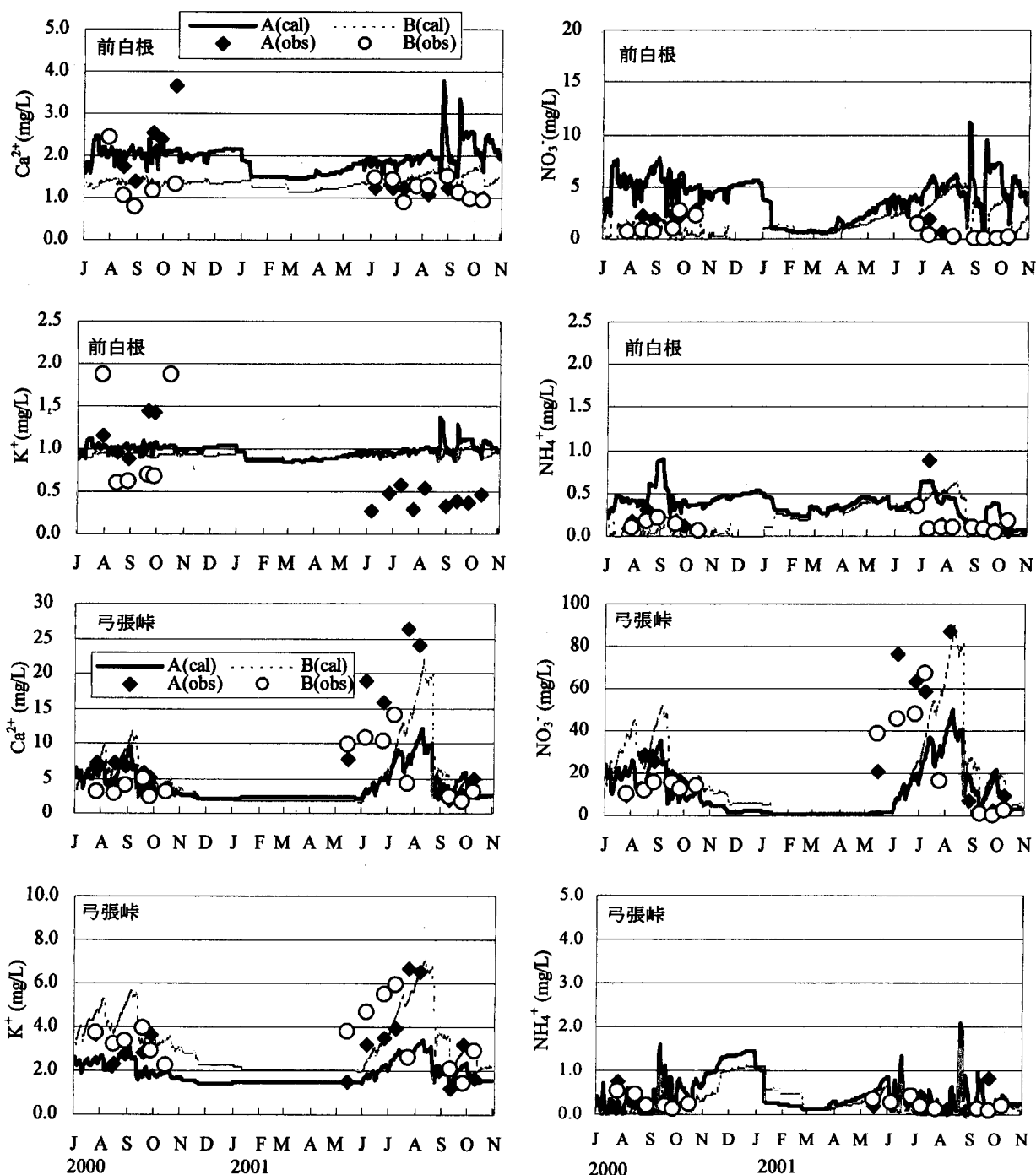


図 14 土壌水イオン濃度のモデルによる予測と実測値の比較

して、有機態窒素の硝化による H^+ 生成量は $138 \text{ mmol}_e \text{ m}^{-2}$ だった。前述のように現在のモデルは有機態窒素の硝化速度を過小評価していると考えられるが、それでも、有機態窒素の硝化による H^+ 生成量は、沈着した NH_4^+ の硝化によるものの5倍以上と推定される。

塩基性陽イオンと窒素の循環に対して影響が大きい過程は、前白根では沈着した NH_4^+ の硝化と植物による吸収であり、弓張峠では有機態窒素の硝化であると考えられる。現在のモデルは、イ

オン濃度の観測値によってパラメータを校正してこれらの速度を推定することはできるが、将来の予測能力は十分ではない。窒素などの負荷のシナリオに対する集水域の物質循環を予測するためには、植物によるイオン吸収速度や有機態窒素の硝化速度のモデルを改善する必要がある。

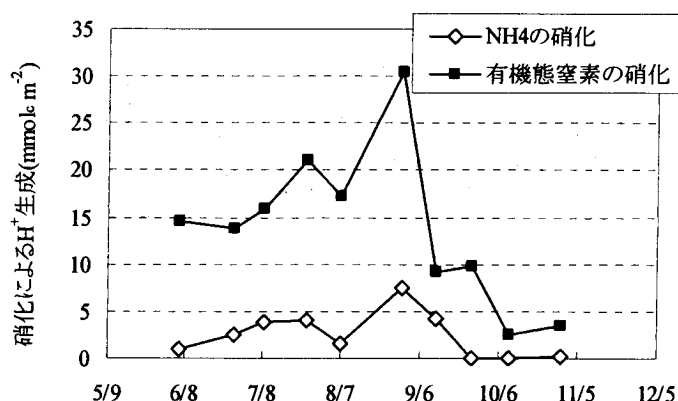


図 15 モデル計算による弓張峠A層土壌での硝化によるプロトン生成量（サンプリング期間毎の値）

5. 本研究により得られた成果

(1) 森林衰退地である前白根尾根を含む外山沢を対象に酸性雨の沈着から土壌

浸透までの物質循環や土壌ガス発生量の調査結果およびキャッチメントモデルの適用により以下のことが推察された。

- ① 森林が衰退している前白根尾根南斜面では、下部の弓張峠と比較してアンモニアの乾性沈着が多く、大気中SO₂やO₃濃度はも2倍近く高かった。SO₂やO₃濃度は森林の衰退していない北斜面も同様に高かった。
- ② 前白根尾根南斜面には既に樹木はほとんど存在しない。しかし残った樹木は成長を続けており、単位面積当たりの窒素の樹体への正味蓄積速度は弓張峠の7、8割に達していた。しかし前白根の塩基は不足しており、樹冠溶脱、リターとしての還元、土壌からの流出量がいずれも小さく、塩基吸収が供給量により制限されていると考えられた。
- ③ 弓張峠では植物－土壌系における内部循環量が大きく、これによるプロトンの収支は、外部起源の酸の負荷と比べて大きい。一方前白根では内部循環量が小さく、外部起源の酸の寄与が相対的に大きく、酸性物質負荷の変化の影響が現れやすいと考えられる。
- ④ 現在のモデルは奥日光の物質循環を記述するのに十分な精度を持っていない。前白根と弓張峠の窒素と塩基の循環に大きな影響を与えている過程は、沈着したNH₄⁺の硝化と植物による吸収、および有機体窒素の無機化と硝化と考えられ、これらの過程のモデルをより適切なものに改良する必要がある。

(2) 北海道雨龍における物質循環調査により、塩基の循環は季節により大きく異なり、植物の成長期における養分吸収により強く支配されていること、集中的な降雨による土壌からの塩基溶脱が物質循環に影響を与える要因であることが示された。

(3) 窒素除去・負荷実験に基づき、次のことが推察された。

- ① 観音台と八郷における1年間の窒素の除去、負荷処理は、窒素添加の直後(1～2日後)に林床からのN₂Oの短期的な発生量増大が見られたものの、定常的には両調査地とも土壌溶液の濃度やN₂O発生量に有意な影響を与えなかった。温暖多湿な両調査地では、内部循環起源の窒素の供給量が大きく、また外部から加えられた窒素も活性の高い植物や微生物により利用されていると考えられ、欧米の生態系に比べて窒素許容量が大きいと考えられた。

② 一方、高山における実験的研究では、現状の国内の降水にともなう窒素負荷の2～4倍程度の窒素負荷によって、わずか2～3年で森林からの窒素流出が引き起こされることが判明した。これは人為的窒素負荷により森林からの窒素流出が引き起こされることを示した国内では初の研究事例であり、長期間にわたる窒素負荷は、国内でも森林からの窒素流出をもたらす可能性を示唆している。内部循環の大きさの違いが窒素負荷に対する応答の違いと関連していると推測されたが、解明のためには、より詳細な研究が必要である。

6. 引用文献

- 1) Ulrich, B., R. Mayer, P.K. Khanna (1980) Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe, *Soil Science* **130**(4), 193-199.
- 2) Krug, E.C. and C.R. Frink (1983) Acid rain on acid soil: A new perspective, *Science* **221**, 520- 525.
- 3) Van Breemen, N., J. Mulder, C.T. Driscoll (1983) Acidification and alkalization of soils, *Plant and Soil* **75**, 283-308.
- 4) Van Breemen, N., C.T. Driscoll, J. Mulder (1984) Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters, *Nature* **307**, 599-604.
- 5) 徳地直子・大手信人 (1998) 森林生態系におけるH⁺収支、*日本生態学会誌* **48**, 287-296.
- 6) Schlesinger, W. H. , 1997, *Biogeochemistry-An Analysis of Global Change- 2nd ed*, Academic Press
- 7) Emmett, B. A., D. Boxman, M. Bredemeier, P. Gundersen, O. J. Kjonaas, F. Moldam, P. Schleppi, A. Tietema, and R. F. Wright, 1998, Predicting the effects of atmospheric nitrogen deposition in conifer stands: Evidence from the NITREX ecosystem-scale experiments, *Ecosystems* **1**: 352-360.
- 8) Ohnishi, K. and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds, *Ecological Applications* **7**, 391-401.
- 9) Mitchell, M.J., Iwatsubo, G., Ohnishi, K. and Nakagawa, Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation, *Forest Ecology and Management* **97**, 39-51.
- 10) 渋谷正人・松田彊 (1993) シラカンバの地上部器官量の推定, *北大演報*, **50**, 207-218.
- 11) Takahashi, K., Yoshida, K., Suzuki, M., Seino, T., Tani, T., Tashiro, T., Ishii, T., Sugata, S., Fujito, E., Naniwa, A., Kudo, G., Hiura, T. and Kohyama, T. (1999) Stand biomass, net production and canopy structure in a secondary deciduous broad-leaved forest, Northern Japan, *Res.Bull.Exp.For.Hokkaido Univ.*, **56**, 70-85.
- 12) 細淵幸雄・波多野隆介 : 火山放出物未熟土に立地する落葉広葉樹林生態系における酸性降水物の影響と塩基の循環, *土肥誌*, **70**, 505-513 (1999)
- 13) 西川義範・田口圭介・井上香織・吉村健一郎 (2000) 大気中ガス成分のパッシブ簡易測定法の検討, *環境化学* **10**:281-289.
- 14) 松本光弘・村野健太郎 (1998) インフレンチアル法による樹木等への乾性沈着量の評価と樹木衰退の一考察—奈良市における通年観測—, *日本化学会誌* 1998 年 7 号:495-505.
- 15) Kutsukake, H. et al. (2000) Modeling acidification buffering mechanisms in Lake Kamakita Catchment, Japan, *Acid rain 2000 Abstract book*, 228.
- 16) Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P. and Melillo, J. M.(1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. Excess nitrogen from fossil fuel combustion may stress the biosphere, *BioScience* **39**, 378-386.

- 17) 大類清和 (1997) 森林生態系での"Nitrogen Saturation"—日本での現状—、森林立地 39: 1-9.
- 18) Wright, R.F., Roelofs, J.G.M., Bredemeier, M., Blanck, K., Boxman, A.W., Emmett, B.A., Gundersen, P., Hultberg, H., Kjonaas, O.J., Moldan, F., Tietema, A., van Breemen, N. and van Dijk, H.F.G. (1995) NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen,

[国際共同研究等の状況]

なし

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① T. Fumoto and H. Sverdrup: Journal of Environmental Quality 29:1284-1290(2000)
"Modeling of sulfate adsorption on Andisols for implementation in the SAFE model."
- ② T. Fumoto and H. Sverdrup: J. Environ. 30, 45-57 (2001)
"Implementation of sulfate adsorption in the SAFE model"
- ③ 新藤純子・麓多門・高松武二郎：土壌肥科学雑誌、72, 394-402 (2001)
酸性沈着による土壌化学性変化のダイナミックモデルによる予測—野外調査結果への適用による酸緩衝機構に関する検討—
- ④ J. Shindo, T. Fumoto, N. Oura, T. Nakano and T. Takamatsu : Water Air and Soil Pollution 130, 259-1264(2001)
"Estimation of mineral weathering rates under field conditions based on base cation budget and strontium isotope ratios"
- ⑤ T. Fumoto, J. Shindo, N. Oura and H. Sverdrup: Water Air and Soil Pollution 130:1247-1252(2001)
"Adapting the PROFILE model to calculate the critical load for East Asian soils by including volcanic glass weathering and alternative aluminum solubility system"
- ⑥ N. Oura, J. Shindo, T. Fumoto, H. Toda and H. Kawashima: Water Air and Soil Pollution 130:673-678(2001)
"Effects of nitrogen deposition on nitrous oxide emissions from the forest floor"
- ⑦ J. Shindo, T. Fumoto, N. Oura, H. Toda and H. Kawashima: The Scientific World、1 (S1)・472-479 (2001)
"Input-output budget of nitrogen and effect of experimentally changed deposition on it in the forest ecosystems in the central Japan"
- ⑧ T. Nakano, Y. Yokoo, R. Anma and J. Shindo: Water Air and Soil Pollution 130:733-738(2001)
"Ca depletion in the soil column on a granite substrate on the island of Yakushima, a world natural heritage site."
- ⑨ T. Nakano, S.R. Jeon, J. Shindo and T. Fumoto: Water Air and Soil Pollution 130:769-774(2001)
"Sr Isotopic signature on plant-derived Ca in rain"

- ⑩ 切替眞智子・波多野隆介：土肥誌，71，63-71（2000）
「外部 NH_4^+ が各種森林土壌A層の硝酸化成に及ぼす影響」
- ⑪ 永田修・波多野隆介：土肥誌，72，147-157（2001）
「土壌条件の違いがアカエゾマツの成長および物質循環に与える影響－泥炭土，灰色台地土に成立するアカエゾマツ林における比較」
- ⑫ M. Kirikae, H. Shibata, Y. Tanaka, T. Sakuma and R. Hatano : Soil Sci. Plant Nutr. 47, 253-264 (2001)
“Significance of nitrification and vegetation uptake in proton budgets in forest surface soil”
- ⑬ M. kirikae, R. Hatano, H. Shibata and Y. Tanaka : Water, Air, and Soil Pollut. 130, 697-702 (2001)
“Analysis of proton generation and consumption of forest surface soils in Hokkaido, northern Japan”
- ⑭ O. Nagata, A. Managi, Y. Hayakawa, R. Hatano, H. Shibata and F. Satoh: Water, Air, and Soil Pollut. 130, 691-696 (2001)
“Seasonal dynamics of biogeochemical proton and base cation fluxes in a white birch forest in Hokkaido, Japan”

（2）口頭発表

- ① 新藤純子・麓多門・中野孝教・高松武次郎：環境科学会1999年年会(1999)
「塩基の収支と Sr 同位体比に基づいた鉱物風化速度の推定」
- ② 新藤純子：大気環境学会酸性雨研究会（2000）
「土壌の酸緩衝機構とその定量化」
- ③ 大浦典子、新藤純子、麓多門、戸田任重*、川島博之：環境科学会 2000 年会（2000）
「窒素負荷が林床からの N_2O 発生量に及ぼす影響」
- ④ J. Shindo, T. Fumoto, N. Oura, T. Nakano, T. Takamatsu : Acid rain 2000（2000）
“Estimation of mineral weathering rates on field conditions based on base cation budget and strontium isotope ratios”
- ⑤ N. Oura, J. Shindo, T. Fumoto, H. Toda*, H. Kawashima : Acid rain 2000（2000）
“Effects of nitrogen deposition on nitrous oxide emissions from forest soil”
- ⑥ T. Fumoto, J. Shindo, N. Oura, H. Sverdrup : Acid rain 2000（2000）
“Adapting the PROFILE model to calculations of the critical loads for East Asian soils by including volcanic glass weathering and alternative aluminum solubility system”
- ⑦ H. Kutsukake*, J. Shindo, S. Ikeda*, T. Hakamata : Acid rain 2000（2000）
“Modeling acidification buffering mechanisms in Lake Kamakita catchment, Japan”
- ⑧ N. Oura, J. Shindo, T. Fumoto, H. Toda*, H. Kawashima : Global Change and Sustainable Development in Southeast Asia: A Regional Science-Policy Conference（2001）
“Effect of nitrogen deposition on the nitrogen budget in forest ecosystem”
- ⑨ 新藤純子、大浦典子、麓多門、戸田任重、川島博之：環境科学会 2001 年会(2001)
「森林における土壌－植物系の窒素循環と大気沈着量変化の影響」
- ⑩ 大浦典子、新藤純子、麓多門、戸田任重、川島博之：環境科学会 2001 年会(2001)
「窒素添加が土壌からの N_2O 発生量に与える影響」
- ⑪ Shindo, J., N. Oura, T. Fumoto, H. Toda, H. Kawashima : N2001 The Second International Nitrogen Conference(2001)

“Nitrogen cycle in East Asian ecosystems affected by increasing emission of anthropogenic nitrogen compounds”

- ⑫ Shindo, J., T. Fumoto, N. Oura : 7th International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere(2001)

“Effect of atmospheric nitrogen deposition on nitrogen budget in the forest ecosystems in Central Japan”

- ⑬ 永田修・波多野 隆介：土壤肥料学会講演要旨集, 45, p344 (1999)

「異なる土壤に生育するアカエゾマツおよびシラカンバの幹直径の変動の比較」

- ⑭ 永田修・馬男木文子・早川泰彦・佐藤冬樹・波多野隆介：土壤肥料学会講演要旨集, 46, 216(2000)

「樹木の成長段階の違いが物質循環におよぼす影響」

- ⑮ M. Kirikae, R. Hatano, H. Shibata and Y. Tanaka : 6th International Conference on Acidic Deposition Abstract book, 105 (2000)

“Analysis of proton generation and consumption of forest surface soils in Hokkaido, northern Japan”

- ⑯ O. Nagata, A. Managi, Y. Hayakawa, R. Hatano, H. Shibata and F. Satoh : 6th International Conference on Acidic Deposition Abstract book, 105 (2000)

“Seasonal dynamics of biogeochemical proton and base cation fluxes in a white birch forest in Hokkaido, Japan”

- ⑰ 高津知明・戸田任重・加藤憲二：日本陸水学会第65回大会講演要旨集, 149 (2000)

「酸性雨に伴う森林土壌からの硝酸溶脱と土壌細菌群集の動態」

- ⑱ 若原健治・高津知明・戸田任重：日本陸水学会甲信越支部会報 26 号, 6 (2000)

「人工酸性雨による窒素負荷が森林浸透水の水質に及ぼす影響」

- ⑲ 金子洋樹・高津知明・若原健治・戸田任重：日本陸水学会甲信越支部会報27号, 5 (2001)

「森林土壌からの窒素流出に及ぼす人為的窒素負荷の影響」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① NHKサイエンスアイ (2001年11月3日、酸性雨として負荷した硝酸、硫酸イオンの土壌中での消長と酸性雨影響の現れやすさについて3分ほど紹介)
- ② 毎日新聞 (2000年4月12日、地方版) (窒素の施肥効果を含む酸性雨の影響に関する研究の紹介)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし