

第

章

3

森林生態系における酸の  
挙動

### 第3章 森林生態系における酸の挙動 目次

狛江研究所大気科学部 上席研究員 佐藤 一男  
狛江研究所大気科学部 主任研究員 高橋 章  
狛江研究所大気科学部 主任研究員 若松 孝志

3 - 1 森林への酸の総沈着量 .....	35
3 - 2 土壌 - 植生系における酸の収支 .....	37
3 - 3 臨界負荷量とアルミニウムの化学 .....	40
コラム2：窒素飽和の功罪 .....	44



佐藤 一男（1982年入所）  
石炭灰埋立地の環境影響評価，酸性雨の土壌影響評価を行ってきた。現在は，森林生態系の物質循環の研究に取り組んでいる。



高橋 章（1988年入所）  
酸性雨のモニタリング，酸性物質の乾性沈着に関する研究に従事してきた。現在は，森林への化学物質の沈着量評価の研究に取り組んでいる。



若松 孝志（1996年入所）  
酸性雨の土壌影響を評価するため，森林土壌における酸の収支の評価を行ってきた。現在は，森林生態系の物質循環の研究に取り組んでいる。

## 3 - 1 森林への酸の総沈着量

### 3-1-1 はじめに

わが国の国土は、その約7割が森林に覆われている。このため酸性雨による環境影響の中では、森林生態系に及ぼす影響が最も重要な検討課題の一つである。

酸性雨によって、はたしてどの程度の酸 ( $H^+$ ) が森林に負荷されているのか。この問題は生態系への影響を評価するうえで最も基本的な問題であるが、答を得るのはそう簡単でない。 $H^+$ は降水によって森林にもたらされる(湿性沈着)ほかに、酸性ガスの形で樹冠に沈着している(乾性沈着)。湿性沈着量は降水中の $H^+$ 濃度に降水量を乗じることで推計できるのに対し、乾性沈着量を実測することは極めて難しい。このため、わが国では乾性沈着に関する研究が遅れており、沈着量の実態はあまり知られていなかった。

こうした背景のもと、当研究所はインフェレンシャル法と呼ばれるモデルを用いて乾性沈着量の推計を行ってきた。本節では、群馬県のスギ林を対象に $H^+$ の総沈着量(湿性+乾性)を推計した結果を紹介する。

### 3-1-2 実験林における酸性雨調査

当研究所は群馬県から県有林の一部を借り受け、1996年4月から5年間にわたって酸性雨に関する総合調査を実施した。調査の目的は森林生態系における酸の挙動と収支を明らかにすることである。以下では借用した林地を「実験林」と呼ぶことにする。

実験林は群馬県妙義町の大桁県有林内に位置し、面積が11.4 haの集水域をなしている(図3-1-1)。標高は520~720 m、主な植生はスギ(63%)、ヒノキ(27%)、アカマツ(10%)である。集水域の出口から約100 m上流に入ったスギの一斉林内に、20 m × 60 mの調査区を設定し、集中観測を実施した。調査区内のスギ個体数は127本、樹齢は39年、樹高は約20 m、平均胸高直径は23.7 cmであった。

調査区のほぼ中央に高さ約30 mの観測タワーを設置

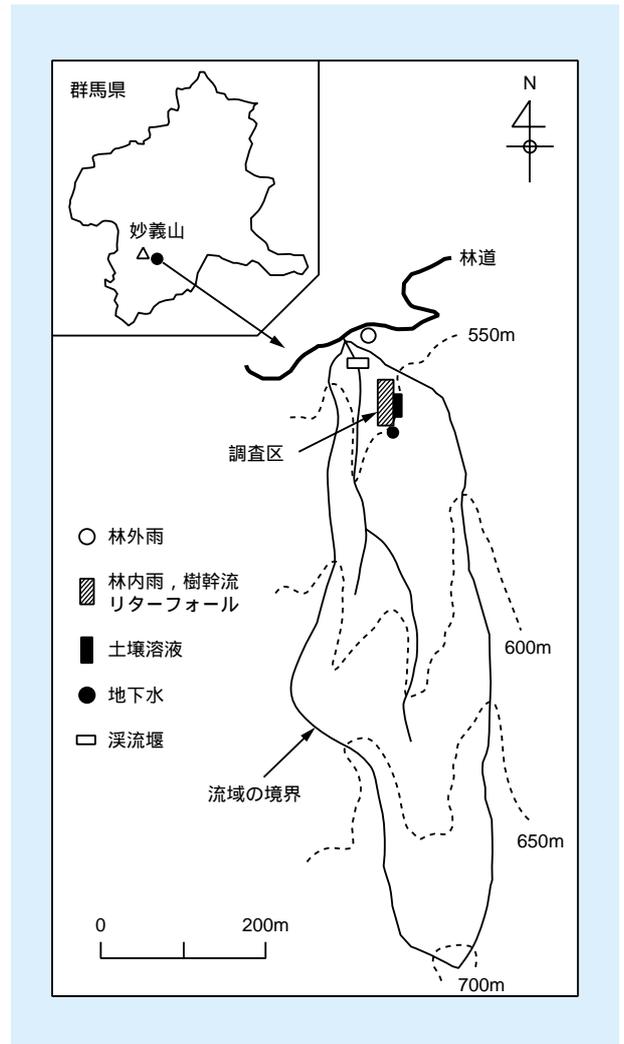


図3-1-1 実験林の位置

し、その塔頂で樹冠より上の気象要素(風向、風速、温湿度、日射量)と大気質( $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $HNO_3$ 、 $HCl$ 、粒子状物質)の連続観測を行った。また、タワー中間の樹冠近傍に結露計を設置し、ぬれ時間の観測を行った。これと併行して、胸高直径が平均的なスギ5本を選び、林内雨と樹幹流の採取を行った。林外雨は集水域出口の平坦地で採取した。土壌溶液や植生調査の概要は3-2を参照されたい。以下に述べる解析では1997年10月~1998年9月の1年間のデータセットを用いた。

### 3-1-3 SO<sub>2</sub>の乾性沈着に及ぼす葉面のぬれ効果

はじめに代表的な酸性ガスであるSO<sub>2</sub>の乾性沈着について検討した<sup>(1)</sup>。SO<sub>2</sub>は水に対する溶解性が比較的高い。このため森林への乾性沈着量は、葉面のぬれ具合によって大きく変動することが予想される<sup>(2)</sup>。図3-1-2(下)は結露計で観測した月ごとのぬれ時間の割合を示す。ぬれ時間は冬季から夏季かけて増大する傾向が認められた。観測期間を寒候季(10月~3月)と暖候季(4月~9月)に分けると、寒候季のぬれ時間はわずか17%であったのに対し、暖候季は60%に及んだ。このように観測地点のスギ林は、暖候季に極めて湿潤な状況にあることが分かった。こうしたぬれ時間の変動がSO<sub>2</sub>の乾性沈着量に及ぼす影響をインフェレンシャル法<sup>(3)</sup>を用いて評価した。

インフェレンシャル法は乾性沈着のプロセスを比較的簡易なモデルで表現し、気象データや濃度データを用いて、対象成分の乾性沈着量を推定するものである。既存の気象や濃度のデータを利用すれば、新たなデータの取得は不要であり、また全国規模の沈着量の推定

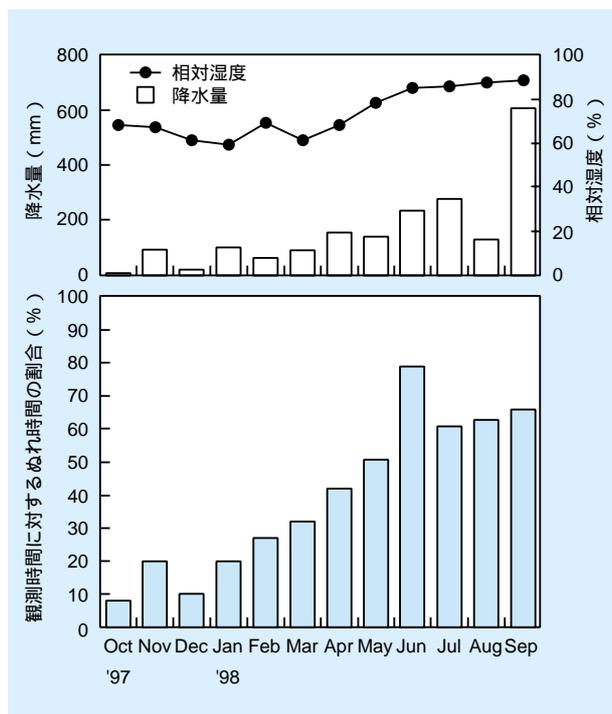


図3-1-2 スギ林におけるぬれ時間(下段)および降水量、相対湿度の観測結果(上段)

も可能である。

推定方法の概要は以下の通りである<sup>(3)</sup>。一般に、大気中のガス状物質の乾性沈着量Fは、大気中の濃度Cと沈着速度V<sub>d</sub>の積の形で推定される。

$$F = V_d C \quad (3.1)$$

大気から沈着面までを3つの輸送過程でモデル化すると、V<sub>d</sub>は各過程での沈着抵抗の和の逆数で表される。

$$V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1} \quad (3.2)$$

ここで、R<sub>a</sub>:空力学的抵抗、R<sub>b</sub>:準層流抵抗、R<sub>c</sub>:表面抵抗である。インフェレンシャル法では、気象データなどから各沈着抵抗を算出し、沈着速度の推定を行う。

この沈着速度に対するぬれの影響を調べるため、ここではぬれ効果なし(ケース1)とぬれ効果あり(ケース2)の2ケースについて沈着速度を計算した。ケース2では、結露計がぬれを検出した期間はR<sub>c</sub>を構成する抵抗の1つであるクチクラ抵抗R<sub>cut</sub>の値を0とした。その結果、ケース1では沈着速度は寒候季、暖候季ともに0.32 cm s<sup>-1</sup>(平均値)となった。一方、ケース2の場合はケース1よりも寒候季に約2倍(0.62 cm s<sup>-1</sup>)、暖候季に約3倍(1.03 cm s<sup>-1</sup>)に増大した。

こうした沈着速度の増大は、当然、乾性沈着量の増大をもたらす。図3-1-3は算出した沈着速度に大気中のSO<sub>2</sub>濃度を乗じてSO<sub>2</sub>の乾性沈着量を推計した結果である。図では各月の積算値を示した。ケース1の場合、SO<sub>2</sub>の年間沈着量は0.15 keq ha<sup>-1</sup>となったのに対し、ケース2では0.22 keq ha<sup>-1</sup>となり、ぬれを考慮することにより1.5倍に増大した。一方、図中の点線はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>のネット林内沈着量(NTF)を表す。NTFとは、林内雨による沈着量(TF)と樹幹流による沈着量(SF)の和から、林外雨による沈着量(PD)を差し引いたものである。樹冠に沈着したSO<sub>2</sub>はすべてH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>に変換され、降雨時にSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の形で林床に降ると仮定すれば、NTFは対象期間の積算乾性沈着量に相当する<sup>(4)-(6)</sup>。図3-1-3に示したように年間のNTFは0.25 keq ha<sup>-1</sup>であり、ケース2の推計結果はこの値にほぼ一致した。

以上の結果から、湿潤な気候条件に立地するわが国

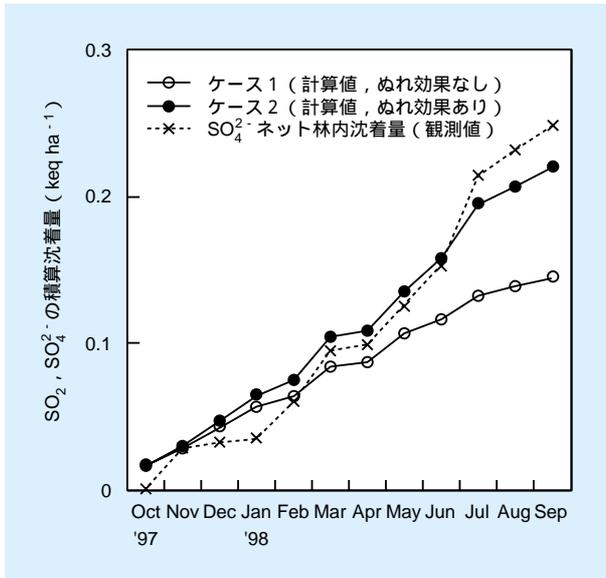


図3-1-3 推定したSO<sub>2</sub>の乾性沈着量とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>のネット林内沈着量の比較(積算値)

の森林においては、SO<sub>2</sub>の乾性沈着量は葉面のぬれの影響を大きく受けること、R<sub>cut</sub>の値を0とすることでぬれ効果を考慮できることがわかった。

### 3-1-4 酸の総沈着量

つぎにSO<sub>2</sub>以外の酸性ガス(NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl)についてもインフェレンシャル法を用いて乾性沈着量の推定を行い、森林へのH<sup>+</sup>の総沈着量を評価した<sup>(7)</sup>。H<sup>+</sup>の乾性沈着量を計算する際、樹冠に沈着したSO<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>

表3-1-1 スギ林へのH<sup>+</sup>の湿性・乾性沈着量 (keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

総沈着量	湿性沈着量	乾性沈着量			
		SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	HCl
1.24	0.52	0.72			
		14%	19%	6%	19%

はすべてH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>とHNO<sub>3</sub>に変換されると仮定した。H<sup>+</sup>の湿性沈着量は、林外雨の観測結果から算出した。

推定されたH<sup>+</sup>の総沈着量は1.24 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>となった(表3-1-1)。この値は欧米の森林での沈着量に匹敵するものである<sup>(8)~(10)</sup>。総沈着量に占める乾性沈着量の割合は58%であり、湿性沈着量を上回った。4種のガス成分の中ではHClの寄与が最大(19%)であった。こうした高い寄与率は欧米では報告例がない。HClの寄与が高くなった原因は、HClの沈着速度が大きいことに加え、大気中のHCl濃度がSO<sub>2</sub>やHNO<sub>3</sub>に匹敵するレベルにあったためである。

その背景には関東地方の煙源の特異性がある。一般に、HClの主要な排出源は焼却場と考えられている<sup>(11)</sup>。関東全域では、ごみ焼却場のHCl排出量は30~40 kt yr<sup>-1</sup>にのぼる<sup>(7)(12)</sup>。この値は、同地域におけるSO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>の排出量(当量ベース)と同じオーダーである<sup>(7)</sup>。一方、西欧諸国におけるHCl排出量はSO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>の排出量よりも約2桁小さい<sup>(11)</sup>。このように関東地方ではHClの排出量が特異的に多い。このことがHClの寄与率を増大させた主要因と推定される。

## 3-2 土壌 - 植生系における酸の収支

### 3-2-1 はじめに

前節では大気から森林へ酸(H<sup>+</sup>)が沈着するメカニズムと年間の総沈着量について述べた。こうしたH<sup>+</sup>の負荷が仮になくても、森林生態系の内部では自然のプロセスでH<sup>+</sup>がつねに生産されている。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の硝化、植生による陽イオン吸収、土壌中のCO<sub>2</sub>、土壌有機酸などがそのメカニズムである。したがって、酸性雨は外部

からH<sup>+</sup>を上乗せしている「外乱」と位置づけられよう。

本節では、こうした外乱が森林生態系におけるH<sup>+</sup>の収支にどの程度影響を及ぼしているかについて、前節と同じ群馬県の実験林(スギ林)を対象に評価した結果<sup>(13)</sup>を紹介する。

### 3-2-2 酸の収支の推定方法

欧米では1980年代からH<sup>+</sup>収支の研究が行われてき

た<sup>44)5)</sup>。それらの多くは流域全体を対象としたものであるが、酸性雨が土壌の酸性化や養分循環に及ぼす影響を評価するには、土壌 - 植生系に焦点を当てる必要がある。本研究では土壌 - 植生系を①樹体、②土壌表層（落葉層 + 0 ~ 10 cm）、③土壌下層（10 ~ 100 cm）の3つのコンパートメントに分け、それぞれのH<sup>+</sup>収支を推定した。これにより土壌 - 植生系内部でのH<sup>+</sup>循環の様子を可視化することができる。

野外観測のうち、林外雨、林内雨、樹幹流は3-1で述べた通りである。これらに加え、土壌溶液（深さ10、100 cm）とリターフォールの通年観測を行った。また樹体への元素の蓄積量を推定するため、大・中・小の3本のスギを伐倒し、化学分析を行った。以上のデータをもとに、前記の3コンパートメントにおける各種イオン（Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、org<sup>n</sup>）の収支をそれぞれ算定し、その結果に基づきH<sup>+</sup>収支を推定した。その際、つぎの仮定を設けた。(1)樹木が根から陽イオンを吸収した場合は、当量のH<sup>+</sup>が根から放出される（陰イオンが吸収された場合はH<sup>+</sup>が消費される）、(2)土壌から陽イオンが溶出した場合は、当量のH<sup>+</sup>が消費される（陰イオンが溶出した場合はH<sup>+</sup>が供給される）、(3)樹木が根から吸収する窒素はすべてNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の形態とする。最後の仮定は、土壌溶液中の窒素は97%以上がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>であったという観測結果に基づいている。大気からのH<sup>+</sup>の総沈着量は3-1で推定した値を用いた。

以下では、イオンの収支の例として窒素と塩基の収支を紹介し、最後にH<sup>+</sup>収支の推定結果について述べる。

### 3-2-3 窒素の収支

図3-2-1は土壌 - 植生系における窒素の収支を示す。図の要旨はつぎの通りである。(1)大気からの総沈着量は2.1 kmol ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であり、ほぼ同量が林内雨と樹幹流によって林床に負荷されている。(2)樹木による全吸収量は4.9 kmol ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であり、その90%がリターフォールとして林床に還元されている。(3)林内雨が土壌表層を浸透する間に、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>フラックスが著しく増大している（増分：3.8 kmol ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）。これは主に有機態窒素の無機化によるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の生成とその硝化に起因する。(4)こうしたNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の生成は土壌下層でも起こり、

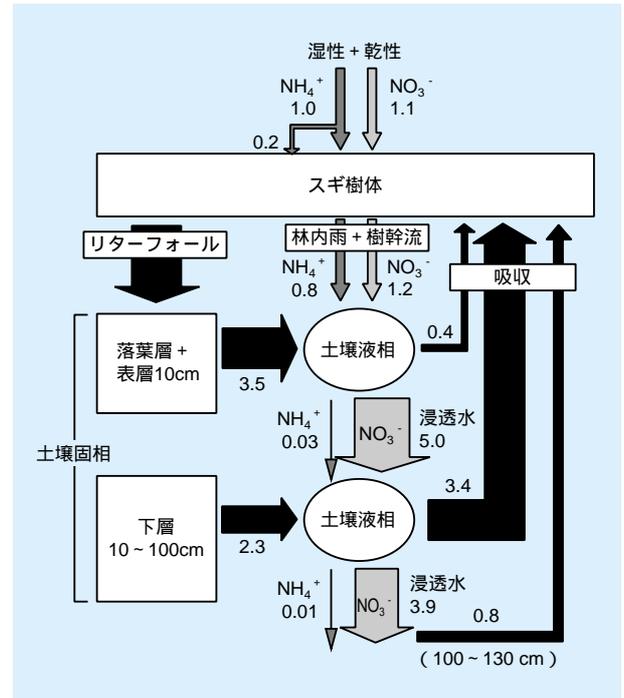


図3-2-1 土壌 - 植生系における窒素の収支  
(単位：kmol ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

表層から流入したNO<sub>3</sub><sup>-</sup>との含量は樹木によって完全には吸収されず、3.9 kmol ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>が系外に流出している。

窒素が植生によって十分に吸収されずに、根域土壌層から流出している状態を「窒素飽和」と呼び、欧米では陸水酸性化の原因として問題視されている（コラム2参照）。

### 3-2-4 塩基の収支

図3-2-2は土壌 - 植生系における塩基（Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>）の収支を示す。前記にならって要約するとつぎの通りである。(1)大気からの総沈着量は0.7 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であり、これに樹冠からの溶脱が加わって、2.4 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>の塩基が林床に負荷されている。(2)樹木による吸収量は10.8 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>であり、その93%がリターフォールと樹冠溶脱により林床に還元されている。(3)林内雨が土壌表層を浸透する間に、塩基のフラックスが著しく増大している（増分：4.8 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>）。これは土壌固相からの供給に起因する。(4)こうした供給は土壌下層でも起こり、表層から流入

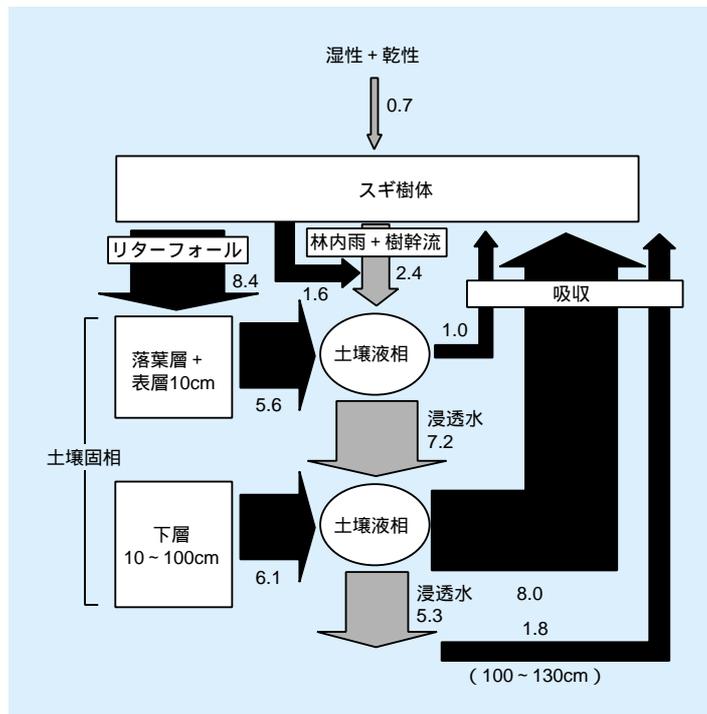


図3-2-2 土壌 - 植生系における塩基の収支 (単位:  $\text{keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ )

した塩基との含量は  $13.3 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  に達する。そのうち 60% は樹木に吸収され、40% は系外に流出している。(5) その結果、この土壌 - 植生系では  $4.6 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  の塩基が正味で流亡している。

以下で述べるが、土壌から多量の塩基が溶出していることが、土壌浸透水の酸性化を阻止しているのである。

### 3-2-5 $\text{H}^+$ の収支

図 3-2-3 は土壌 - 植生系における  $\text{H}^+$  の収支を示す。図の要旨はつぎの通りである。(1) 大気から樹冠への総沈着量は  $1.2 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  であり、内訳は湿性 42%、乾性 58% である (3-1 参照)。樹冠では塩基溶脱による中和が起こり、林床に到達する前に大部分の  $\text{H}^+$  が消失している。(2) 厚さがわずか 10 cm の土壌表層で  $6.7 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  の  $\text{H}^+$  が生産されている。その 76% は  $\text{NH}_4^+$  の硝化に由来し、とりわけ土壌有機物由来の  $\text{NH}_4^+$  の寄与が大きい。供給された  $\text{H}^+$  は土壌からの塩基放出などによって完全に中和されている。(3) 土壌下層における全生産量は  $10.5 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  であり、その 76% は植

生の塩基吸収に起因する。供給された  $\text{H}^+$  は、土壌からの塩基放出と植生の  $\text{NO}_3^-$  吸収によって完全に中和されている。

大気由来の  $\text{H}^+$  量を①酸性雨 (湿性 + 乾性)、②樹冠での  $\text{NH}_4^+$  吸収、③大気由来の  $\text{NH}_4^+$  の硝化による  $\text{H}^+$  負荷量の合計とみなせば、その値は  $3.1 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  である。これに対し、土壌 - 植生系の内部では  $15.9 \text{ keq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  の  $\text{H}^+$  が生産されている。大気由来のじつに 5.2 倍である。換言すれば、 $\text{H}^+$  の全供給量に対する大気降水物の寄与は 16% となる。

森林生態系はこうした外乱を系内の物質循環のプロセスに取り込んで、完全に消化吸収し、系外への流出 (土壌浸透水の酸性化) を防いでいる。その担い手は土壌による豊富な塩基の放出である。おそらく、外乱が加わった分だけ、鉱物風化による塩基供給量は増大しただろう。大気降水物による  $\text{H}^+$  負荷量が現在のレベルを推移するならば、こうしたバランスは維持されるだろう。仮に将来、塩基の放出で賄いきれないほど  $\text{H}^+$  負荷量が増大すると、系外への流出が不可避となる。そうした  $\text{H}^+$  負荷量は「臨界負荷量」と呼ばれている。

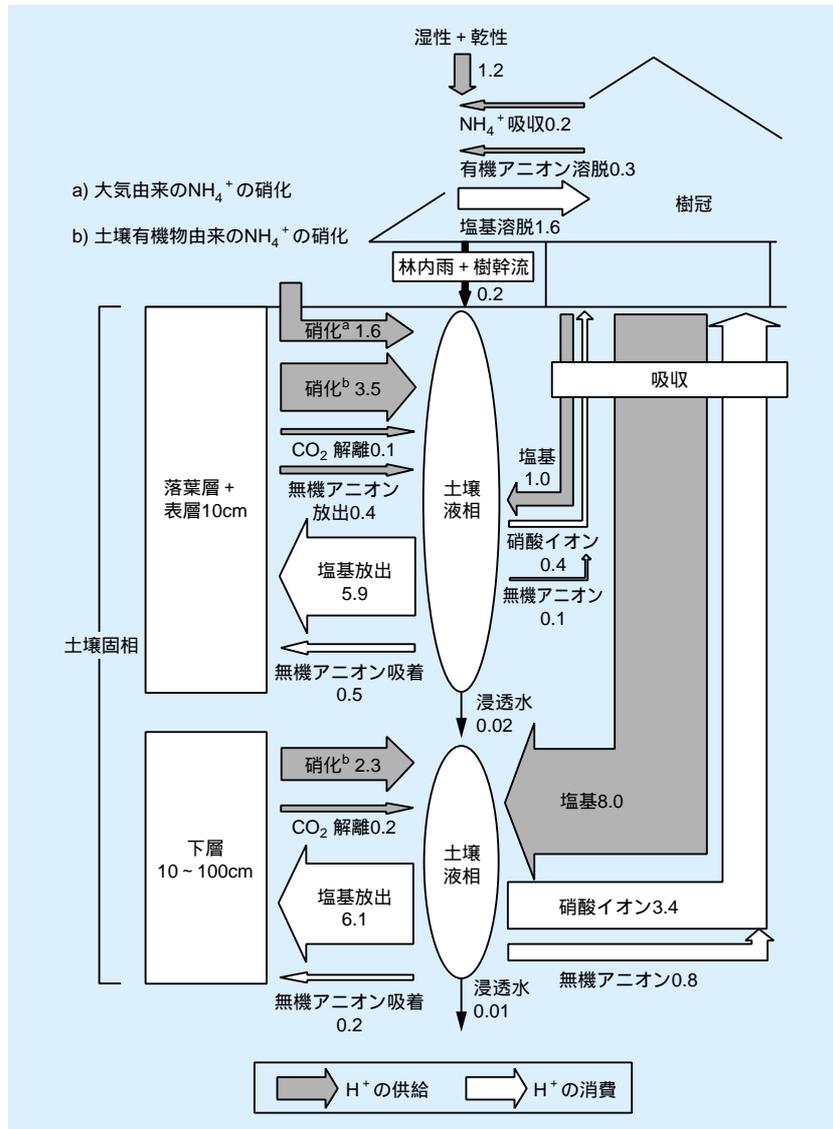


図3-2-3 土壌 - 植生系におけるH<sup>+</sup>の収支 (単位: keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)

### 3 - 3 臨界負荷量とアルミニウムの化学

#### 3-3-1 はじめに

臨界負荷量 (critical load) の概念は1980年代中ごろにヨーロッパで創出された<sup>16)</sup>。1990年代初頭にはヨーロッパ全域を網羅する臨界負荷量のマップが作成され、それに基づく国際交渉によって二酸化硫黄の排出量削減に関する第2次議定書 (オスロ議定書) が1994年に

調印された<sup>17)</sup>。その時期、わが国でも臨界負荷量は酸性雨研究のキーワードの1つとなりつつあった。ところが、1996年に臨界負荷量の科学的妥当性について数多くの問題点を指摘する論文<sup>18)</sup>がお膝元のヨーロッパで発表された。わが国でもそれを追認する論文<sup>19)</sup>が出された。ついには、アジアを舞台としたRAINS-Asiaプロジェクトの1998年ワークショップにおいて、今後は臨界負荷量という用語を用いないことが合意されるに至った<sup>19)</sup>。

このように臨界負荷量に対する評価はこの10年間でめまぐるしく変遷した。批判の主旨は、用いられた推定方法（モデル）が複雑な森林生態系をあまりにも単純化しているため、推定された「臨界負荷量」は真の意味での臨界負荷量ではあり得ないというものである。これは正鵠を射たものであるが、森林生態系を忠実に再現するモデルを開発することはほとんど不可能であろう。とすれば、いろいろな切り口で生態系を多面的に捉えることが必要であり、いわゆる臨界負荷量もその一つである得る。こうした視点に立ち、当研究所でも臨界負荷量に関わる研究を進めてきた。

本節ではヨーロッパで採用された臨界負荷量の推定方法とその問題点について述べ、当研究所が行ってきた研究の一部を紹介する。

### 3-3-2 臨界負荷量の推定方法とその問題点

ヨーロッパでは定常物質収支モデルと呼ばれる方法で臨界負荷量が数値化された<sup>(17)(20)</sup>。基本的な考え方は、森林生態系に被害が現れない範囲で最も土壌の酸性化が進んだ状態を臨界状態と定義し、ある1つの化学的指標を用いて臨界状態を表わす。前記モデルでは、土壌溶液中の塩基（ $BC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}$ ）とAlのモル濃度比BC/Alが化学的指標とされた。樹木にとって塩基は栄養成分、Alは有害成分であるから、両者の濃度比が小さいほど樹木の生長は阻害される<sup>(21)</sup>。BC/Al比の閾値は苗木を用いた実験結果から1とされた。また、土壌溶液中のAl濃度はギブサイトの溶解平衡で規定されると仮定された。

表3-3-1 定常物質収支モデルによる臨界負荷量推定の問題点

<b>土壌の非定常性</b>
・土壌はフィールド条件下では定常状態にない
・評価地点の履歴や季節変化などを考慮できる非定常モデルによる評価のほうがより現実的な解を与える
<b>生物指標</b>
・樹木を単一の指標とすることは疑問
・樹木根に養分を供給する菌根菌、植物死骸の分解者であるミミズ、大気質に敏感な地衣類なども指標となり得る
<b>化学的指標</b>
・BC/Al比が植物の生長を支配する唯一の土壌特性ではない（温度、湿度、窒素やリンの濃度なども重要）
・根の塩基吸収に及ぼすAlの影響はフィールド条件下では未解明
・BC/Al比は季節的にも空間的にも大きく変動するから、閾値を1に固定するのは不適当
・Al濃度がギブサイトの溶解平衡で規定されるとする仮定は非現実的

文献18をもとに作成

こうした臨界負荷量の推定方法に対し、数多くの問題点が指摘されている。その一例<sup>(18)</sup>を表3-3-1に示した。これらの指摘はどれももっともである。しかし、Alが樹木根に有害であることは事実である。また土壌溶液のBC/Al比が低下すると、樹木の生長が阻害されることも実験で証明されている<sup>(21)</sup>。しがたって、定常物質収支モデルで推定される「臨界負荷量」を全面的に否定する必要はないだろう。少なくとも森林衰退のリスクを表す一つの指標であり得る。

### 3-3-3 当研究所の取り組み

以下では当研究所が進めてきた研究のうち、広島県の林地の土壌溶液におけるAlの形態とBC/Al比の調査結果、および $H^{+}$ の許容沈着量の試算結果を紹介する。

#### (a) 土壌溶液におけるAlの形態

森林の土壌溶液においては、Alは $Al^{3+}$ のほかにも各種の無機錯体や有機錯体の形で、また多核体としても存在し得る。これらのうち植物毒性の中心は $Al^{3+}$ であり、有機錯体の毒性はきわめて弱いといわれている<sup>(22)</sup>。

図3-3-1は酸性岩（花崗岩、流紋岩）を母材とする土壌が分布する広島県南部の25地点における土壌溶液のpHとAlの形態を示す。地点番号に下に植生を示した。土壌溶液はその樹種の樹冠下でポーラスカップ法<sup>(23)</sup>で採取した。深さは50 cm（根域）である。Alは高速液体クロマトグラフ/ホルモガリオン蛍光法<sup>(24)</sup>で定量した単核 $Al$ （ $Al_m$ ）である。棒グラフがない地点では $Al_m$ は検出されなかった。

$Al_m$ 濃度は地点によってかなり異なっていたが、概してpHが低い地点で高かった。 $Al_m$ の形態も地点間の差が大きく、すべてが有機態 $Al_m$ の地点もあれば、No.23地点のようにすべてが無機態 $Al_m$ の地点もあった。この結果から、Al濃度が同じでも、樹木根に対する有害性は相違し得ることが理解できる。

#### (b) BC/Al比

図3-3-2は同地点におけるBC/Al比を示す。分母のAlには、植物毒性が強い $Al^{3+}$ とその加水分解種の総和（ $Al_t = Al^{3+} + AlOH^{2+} + Al(OH)_2^{+} + Al(OH)_3^0$ ）、およびICP発光分析法で定量された全Al（ $Al_t$ ）の2種類をと

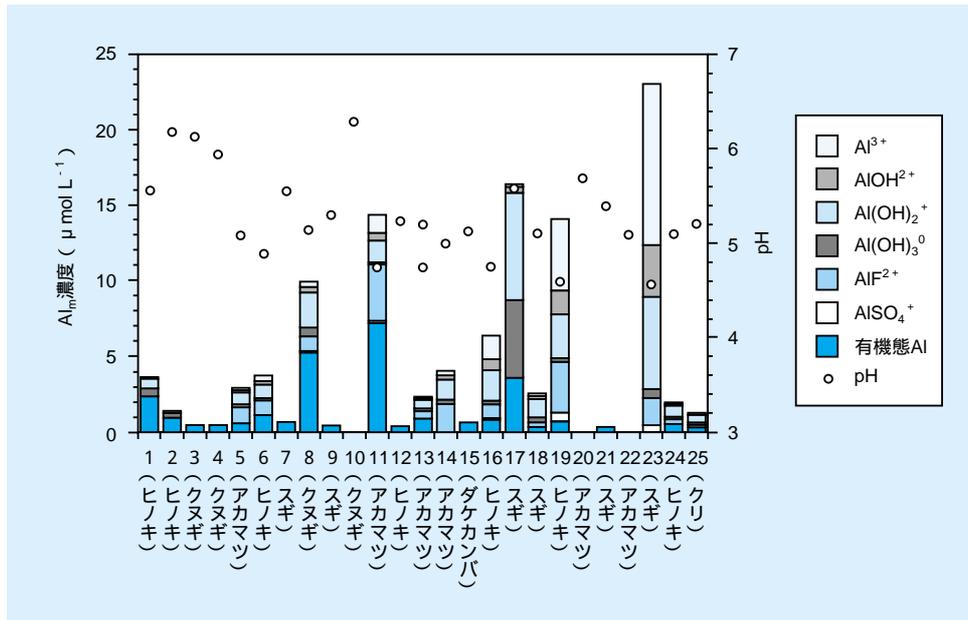


図3-3-1 森林の土壌溶液におけるAl<sub>m</sub>の濃度と形態（深さ50cm）

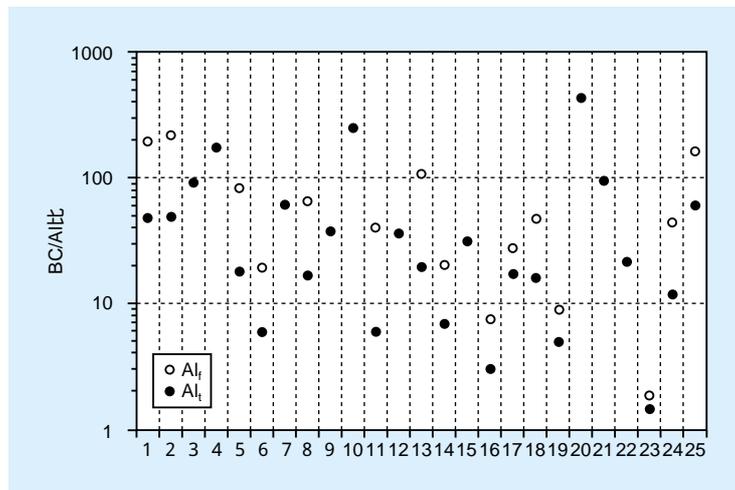


図3-3-2 森林の土壌溶液のBC/Al比（深さ50cm）

った。Al<sub>t</sub>にはAl<sub>m</sub>のほかに多核Al種が含まれる。Al<sub>f</sub>が不検出であった10地点はBC/Al<sub>f</sub>のみを示した。

Al<sub>f</sub>はAl<sub>t</sub>の一部であるから、BC/Al<sub>f</sub>はBC/Al<sub>t</sub>よりもつねに大きくなる。Al<sub>f</sub>が検出された15地点についてみるとBC/Al<sub>f</sub>の方が1.3～6.8倍（平均3.5倍）大きかった。逆にBC/Al<sub>t</sub>はBC/Alの最小値である。その値は1.5～440の範囲にあり、いずれの地点もヨーロッパでの閾値1を上回った。

この閾値は、苗木を用いた膨大な数の実験結果を既往文献から蒐集し、BC/Al比と相対生長率の関係をプ

ロットして求められたものである<sup>21)</sup>。Alの内容については記述がないためAl<sub>t</sub>が用いられたと推定されるが、植物毒性との関係があいまいである。今後、BC/Al<sub>f</sub>あるいはBC/無機態Al<sub>m</sub>を指標とした場合の閾値が解明されることを期待したい。さらに、5-2で述べるが、樹種による閾値の違いについても検討が必要である。

(c) 酸の許容沈着量の試算

BC/Al<sub>f</sub>を指標とし、その閾値を1とした場合、上記の25地点はいずれも臨界状態に到達していない。では、

今後大気からどの程度のH<sup>+</sup>が上乘せされたら臨界に達するであろうか。図3-3-3はその値を当研究所が考案した簡易な定常物質収支モデルを用いて試算した結果である。許容上乘せ量は0.77 ~ 15.8 (幾何平均2.90) keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>の範囲にあった。環境庁<sup>25</sup>が広島県の倉橋島で観測したH<sup>+</sup>の湿性沈着量は0.355 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> (平

成6 ~ 9年度の平均値)である。乾性沈着量もそれと同レベルと仮定すれば、現在のH<sup>+</sup>の総沈着量は0.710 keq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>のオーダーである。したがって、許容上乘せ量が最も低い地点でも、現在の沈着量と同程度の上乗せが許容されると推計される。

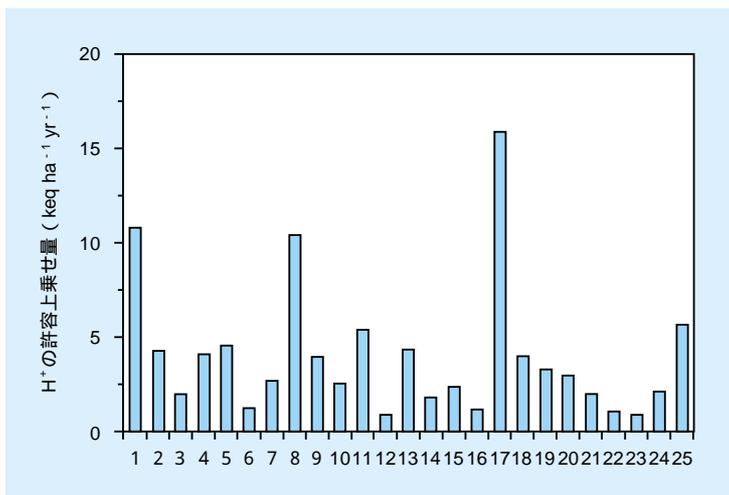


図3-3-3 大気からのH<sup>+</sup>の許容上乘せ量

## コラム2 窒素飽和の功罪

大気降水物は森林生態系への重要な窒素の供給源である。しかし植生が要求する以上の窒素が供給されると、余剰分が根域土壌層から下層に流出する。こうした状態は「窒素飽和」と呼ばれている。

欧米のいくつかの生態系では、過剰な窒素の負荷により、根域土壌層からNO<sub>3</sub><sup>-</sup>が流出している<sup>(26)(27)</sup>。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は陰イオンであるから、陽イオンを同伴して行動する。欧米で問題になっているのは、同伴陽イオンがH<sup>+</sup>やAlであり、土壌浸透水の酸性化をもたらしている点である(罪)。これは土壌が酸中和能力に乏しいことに起因する。したがって、浸透水の酸性化はNO<sub>3</sub><sup>-</sup>に限らずSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やCl<sup>-</sup>が大量に負荷された場合でも起こり得る。

群馬県の実験林(スギ林)でも、土壌-植生系からNO<sub>3</sub><sup>-</sup>が流出しており、飽和状態になっている。しかし土壌から十分な塩基の供給があるため、塩基(主にCa<sup>2+</sup>)がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>に同伴し、H<sup>+</sup>やAlの流出

は起っていない(図3-2-1~3-2-3参照)。つまり、窒素飽和に特段の罪状は認められないのである。

逆に陸水のアルカリ度(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)の形成に重要な役割を果たしていることが調査の結果分かった<sup>(28)</sup>(功)。根域土壌層から流出したNO<sub>3</sub><sup>-</sup>は下層土壌を浸透して地下水帯に流入する。そこでNO<sub>3</sub><sup>-</sup>は著しく減少し、その減少量に見合う量のHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が生じていることが分かった(図1)。こうした量論関係は、地下水帯で微生物による脱窒(次式)が起っていると考えれば説明がつく。



この反応が起れば、地下水中の硝酸態窒素の安定同位体比(<sup>15</sup>N)が上昇する。実際、地下水の<sup>15</sup>N値は土壌溶液に比べて3~4パーミル上昇しており、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の生成は脱窒に起因することが裏づけられた。

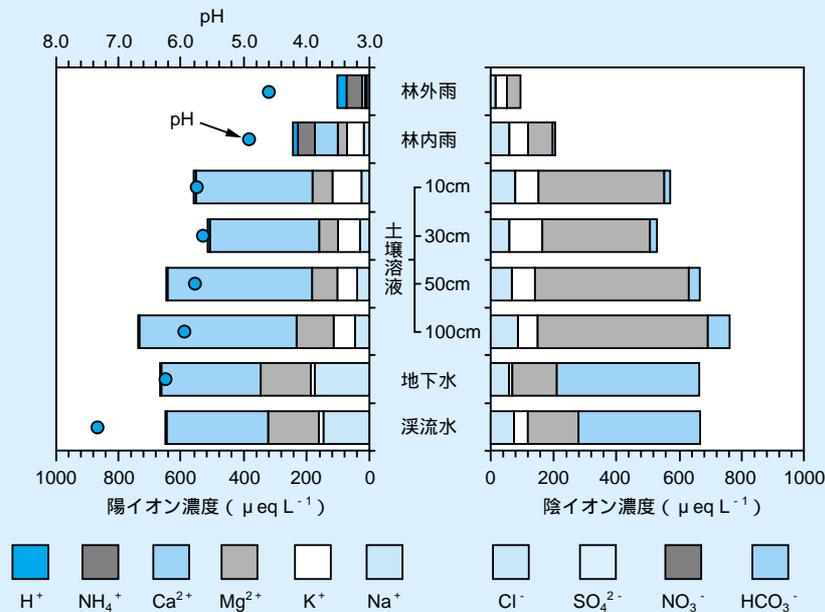


図1 群馬県のスギ林における降水と陸水の年平均化学組成