

酸性雨の陸上生態系への影響

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	金野, 隆光
巻/号	11巻9号
掲載ページ	p. 4-15
発行年月	1988年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



酸性雨の陸上生態系への影響

—研究の現状と問題点—

金野 隆光

1. はじめに

人間活動の拡大ともなつて、工業生産および自動車台数が指数関数的に増加し、化石燃料の消費量も急増大している。その結果、大気汚染が深刻化し、また広域化してきている。今世

紀半ばまでは、大気汚染は工業地帯に限られた局地的問題と考えられており、煙突を高くして汚染物濃度を低下させる解決策がとられていた。このことが大気汚染に拍車をかけた。燃料の消費によって排出された SO_2 や NO_x が大気中を運ばれていく間に酸化されて硫酸、硝酸に変化する。これらが発生源から遠く離れた所で自然

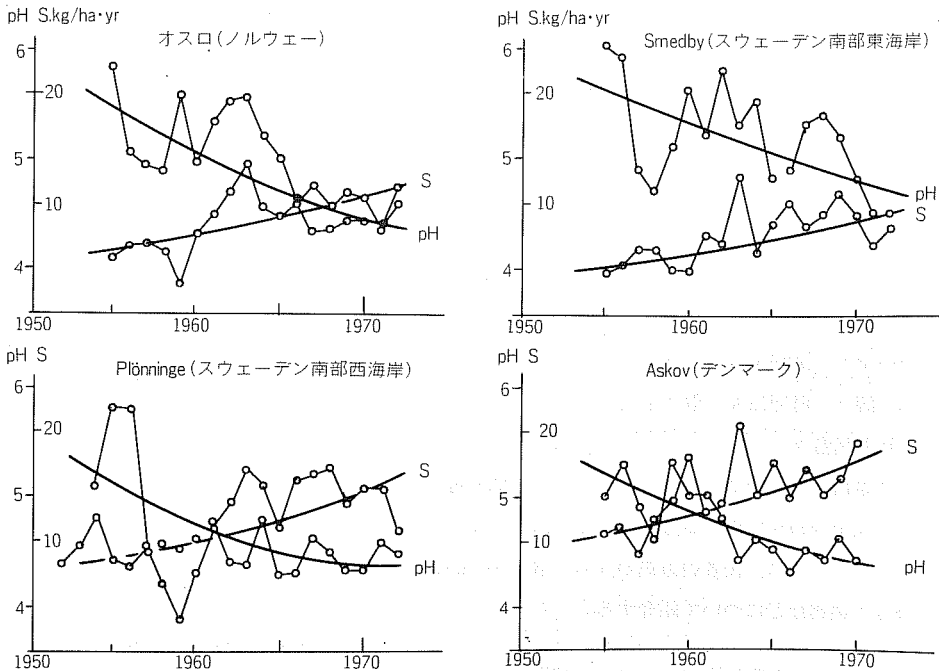


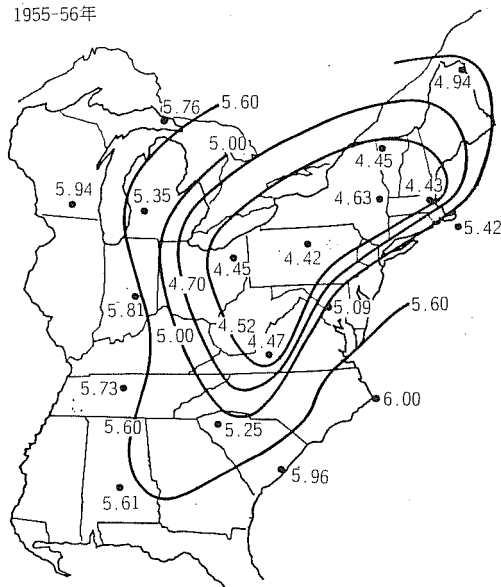
図1 スカンジナビアにおける降水pHと硫黄降下量の経年変化¹⁾

Takamitsu KONNO: Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems—Present situation and problem of study—

落下または雨とともに落下する、いわゆる酸性雨問題が生じた。

1968年にスウェーデンの土壌学者 Od'en は、

1955-56年



1972-73年

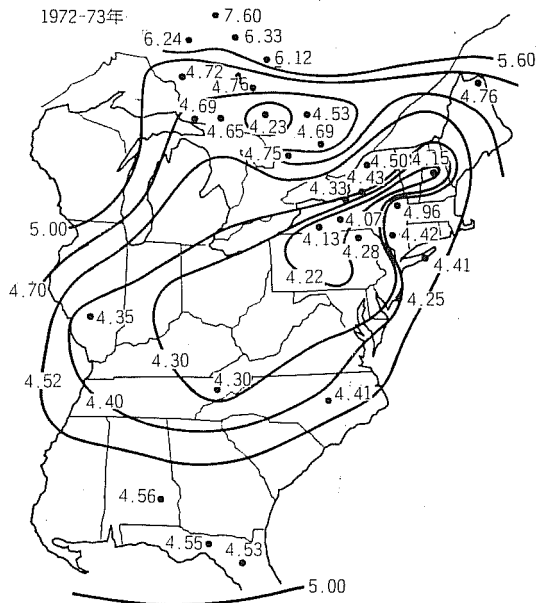


図2 アメリカ東部における降水pHの変化³⁾

1950年以降の約20年間で、Sの降下量が増大し、降水のpHが低下したことを明らかにした(図1)¹⁾。そして、この降水の酸性化は人間活動によるもので、硫黄や窒素の酸化物を大量に大気中に放出した結果であると指摘した。さらに、硫黄や窒素の酸化物などの大気汚染物質が100~2,000kmも長距離輸送されることを示した。

SO₂やNO_xなどの大気汚染物質は、人間活動の他に火山活動などから放出される自然発生によるものもあげられる。しかし、現在問題になっている酸性雨は火山のないヨーロッパに端を発したもので、人間活動に基づく大気汚染、特に硫黄と窒素の酸化物によるものである。

本稿では、酸性雨の農業生態系影響評価に関する研究の現状について述べ、今後の研究の方向を探りたい。

2. 酸性雨・大気汚染の現状

純水のpHは空気中の炭酸ガスと平衡になるとpH5.6となる。pH5.6以下の降水を酸性雨と呼んでいる。

ライシメータ

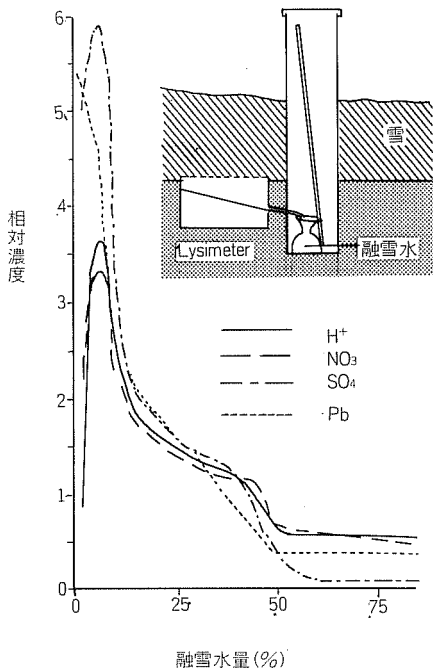


図3 ライシメータで採取した融雪水中の成分濃度変化

北半球の中緯度地帯の工業化された地帯や都市においては、化石燃料の消費によって大量の硫黄と窒素の酸化物が大気中に放出される。これらが化学反応を受けて強い酸(硫酸、硝酸)となり、雨や雪に含まれて地上に落下する。日本、北アメリカおよび西欧での大気汚染度の高い地域では、いずれも降水の年平均 pH は4.2~4.3まで低下している^{2, 3, 4)}。図2にはアメリカ東部の降水 pH を示した。1955—1956年から1972—73年までの17年の間に降水は酸化して、それが西部と南西部に拡大していった様子が示されている。

酸性雨にあたると目が痛むとか、アサガオの花弁が脱色するなど、酸性雨は身近な生活にも影響している。関東地域での酸性雨の年最低 pH は3.4~4.1附近の頻度が高く、pH 3.0という報告もある⁵⁾。

降水中の主要無機成分は、陰イオンとして SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、陽イオンとして H^+ 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} などで、海水由来の塩類も含んでいる。降水の pH は陰イオンだけで決まるのではなく、陽イオンも含めた成分のバランスで決まる。

酸性雨は冬季には酸性雪として降下する。酸性雨や酸性氷とはけ始める際に特異な挙動をする。図3に示したようなライシメータで融雪水を採取して測定すると、とけ始めの融雪水は多量のイオンを含み、pH も低く、雪全体の平均濃度の3~6倍になると報告されている⁶⁾。また湖水の氷が解け始まる時期に一時的に pH が低下し、電気伝導度が高まること、さらに、草地における融雪水の初期の pH が低いことが示された(図4, 5)⁶⁾。

硫黄酸化物や窒素酸化物の農業生態系への影響を考える場合、降水による降下物(湿性降下物)だけでなく、 SO_2 や NO_x などのガスや H_2SO_4 などのエアロゾルの降下物(乾性降下物)をも考慮する必要がある(脚注)。

日本での SO_2 汚染状況は排出規制の強化と燃料の低硫黄化対策、ならびに工場に脱硫装置

を設置する発生源対策などが効を奏して、昭和42年の年平均値0.059ppm をピークとして減少し、58年では0.012ppm まで低下した。他方、 NO_2 の汚染状況は SO_2 とは異なり、大きな変化はなく、年平均値は NO_2 0.02~0.03ppm で経過してきた。

このように SO_2 汚染状況が改善された日本での酸性降下物量が測定され、諸外国の測定値と比較された。群馬県の前橋で測定された例では、乾性降下物を含む1年間の酸性降下物量(1983.9~1984.8)は SO_4^{2-} -S : 1.11, NO_3^- -N : 0.64g/m²・yr であり、両物質とも西ドイツよりも少し低い数値であった。また、アメリカのニューヨーク州や五大湖の東部(SO_4^{2-} 降下量がアメリカで最大の所)より低かった。しかし、森林や湖沼にすでに被害の出ているスウェーデン南部、カナダのオンタリオ州南部とほぼ同程度の数値であった⁷⁾。

日本の酸性雨ならびに大気汚染の現状からみて、また、化石燃料の消費量が今後も増え続けるとすると、酸性雨問題は楽観を許さない状態にある。

3. 陸水系・水生生物への影響

ノルウェーの湖水の調査結果によると、硫黄の降下量分布と湖水中の硫酸イオン濃度分布とはよく対応していた。また、湖水の pH と硫酸イオン濃度とは高い相関があつて、硫黄降下量の多い地域の湖水の pH が低かった。さらに、ノルウェー南部の87の湖水の調査では、1950年以降の20年間に pH が1.5低下した湖水が10%、pH が1.0低下したものが18%、pH が0.5低下したものが34%であつたと報告された⁴⁾。

(脚注) 湿性降下物(Wet deposition)とは地上に降下する降水中の全ての汚染物質をいう。また霧滴(fog-drip: 植物に捕捉される雲粒または霧滴)を含む。乾性降下物(Dry deposition)とは植物、土壌、雪、水面によって吸収または捕捉されるガス状または粒子状の降下物をいう。

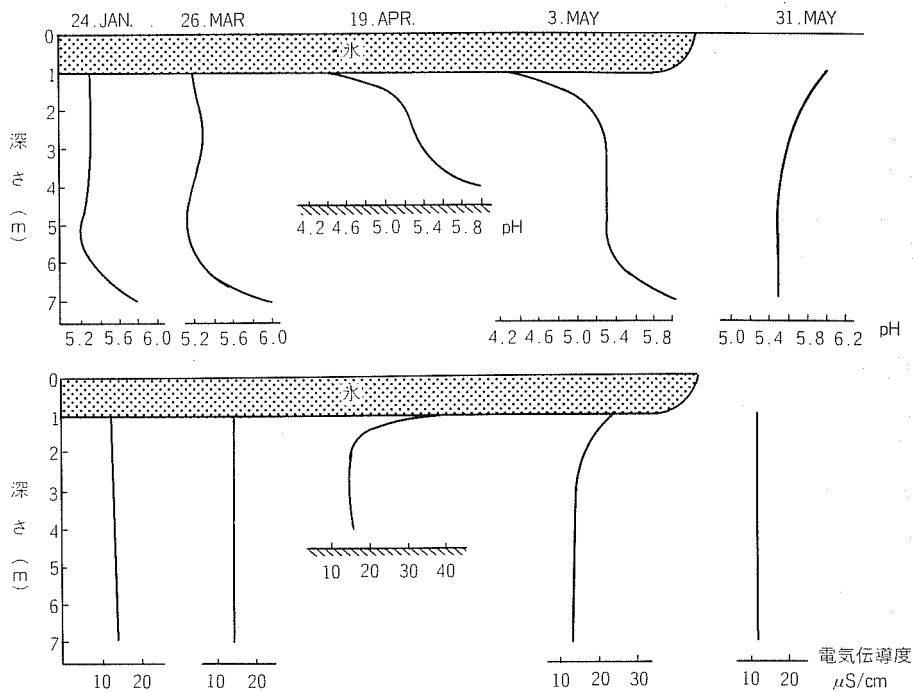


図4 湖水の氷が解ける時期のpHと電気伝導度(1970年)

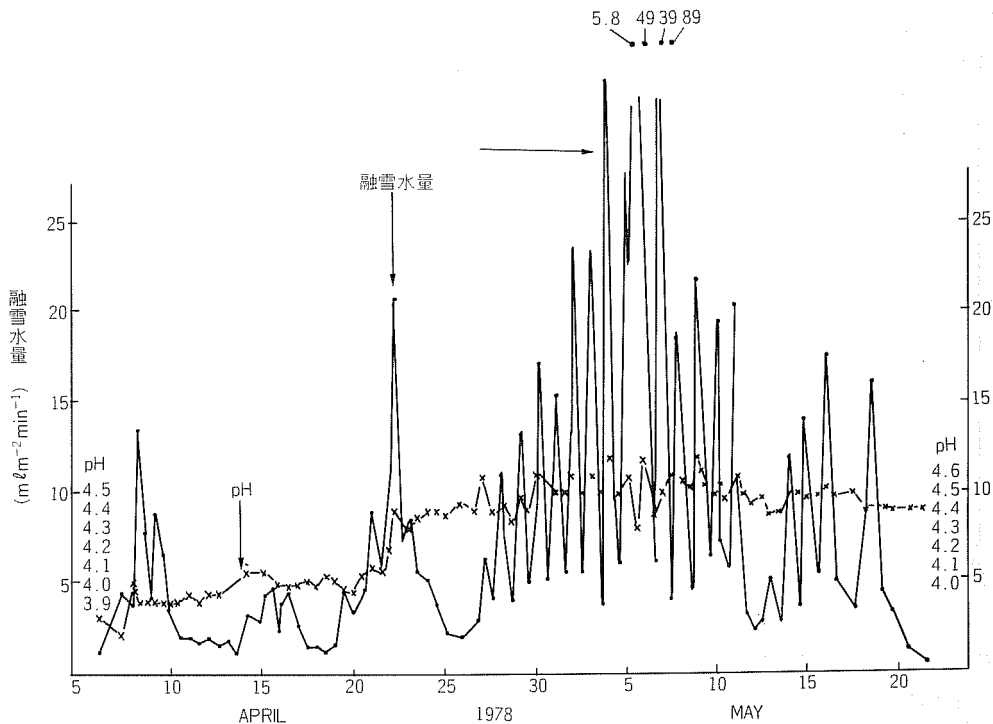


図5 草地の融雪水量とpHの経時変化

湖水の酸性化に対する緩衝能は、pH 6以上では炭酸系であるが、その緩衝能の範囲をこえてpH 6以下に酸性化するとAlイオン濃度が急激に高まり、これが湖水の生態系に影響する。

一次生産者である水生植物は、湖水および河川の酸性化が進むにつれて耐酸性の種が優先してくる。藻類の種類が減り、特に緑藻類が減る。そして、フィラメント状の藻類と苔類が増える。また、酸性化によってクロロフィル単位当りの炭酸同化量が低下する⁸⁾。

植物プランクトンが減るので、動物プランクトンも減少する。ミジンコ (*Cladocera*) は橈脚目 (*Copepoda*) や輪虫類 (*Rotatoria*) に比べて、酸性化に弱い。魚の餌として重要な底生の無脊椎動物については図6に示したように、freshwater shrimpはpH 6以下でいなくなり、snailsはpH 5.2で、small musselsおよびfreshwater louseはpH 5.0付近でいなくなる。これに伴って魚も生存できなくなる。ノルウェー南部の3,000の湖についての鱒の生存調査によれば、1940年以降に次第にいなくなり、1960年以降は急激に減り、現在では半分以上の湖で

生存しなくなった⁴⁾。

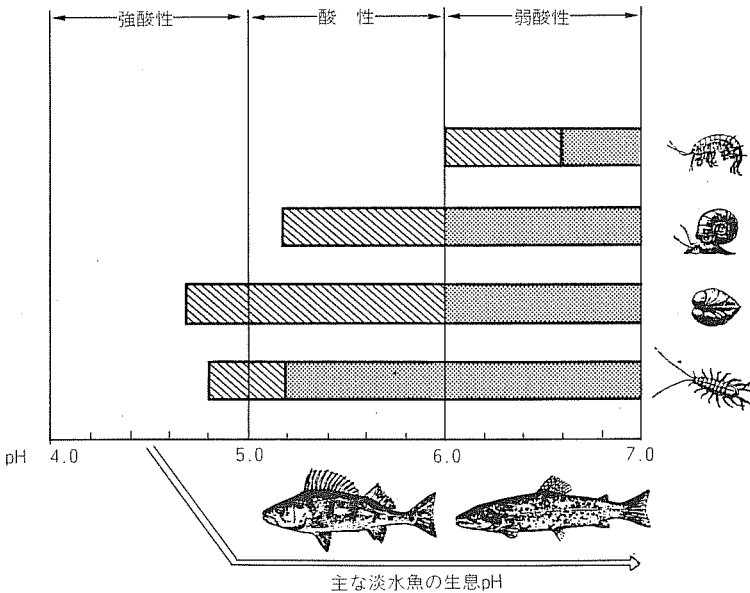
人間活動による外部ストレスに対する自然生態系の反応と外部ストレスが取り去られた後の生態系の回復能を明らかにすることは、自然資源をコントロールするために重要なことである。しかしそのような研究を実施するに当たって、次のような困難がある。

- a) 生態系はその全貌を研究するには大き過ぎるし、複雑すぎる。
- b) 外部ストレスがかかる以前の生態の構造、機能、変動の記録は不十分である。
- c) 個々のストレスは定量化できないし、生態系攪乱効果は他のストレスと区別できない。

カナダのオンタリオ州北西部の湖を使って、人為的に硫酸を散布して1976~1983までの8年の間にpH 6.8から5.0に次第に酸性化させ、その変化が調べられた⁹⁾。

植物プランクトンの変化、魚の繁殖の停止、低生甲殻類の消失、湖岸にフィラメント状の藻類が出現する等の変化は、従来の酸性化した湖についての調査結果と一致した。しかし、この

湖では異なった点があった。それは、植物性プランクトンは減らず、むしろ増えた(図7)。また湖水の養分濃度は変らなかった。それにもかかわらず、鱒の食物連鎖のキー生物であるアミ等 (*Mysis* と *Pimephales*) は予想したより高いpH 5.8でいなくなった。そして、鱒、鯉科の魚 (*Minnow*)、うぐい、かじか、ザリガニ等がいなくなった(図7)。これらの変化は、Alの毒性による二次的なものでなく、H⁺イオン増加のみによるものであった。pH 5.4以下ではどの魚も繁殖でき



注) 上から freshwater shrimp, snails, small mussels, freshwater louse

図6 魚の餌として重要な底生の無脊椎動物が生息できるpH範囲⁴⁾

ないから、10年位で魚がいなくなるであろうと報告された。

4. 森林への影響・土壌への影響

1939年にオンタリオ州 Wawa で操業を開始した工場の排煙による森林影響調査が1963年に実施された。工場から6.5kmは不毛地、19kmまでは枯死、27kmまでは少し生存、38kmまでは何らかの障害が見られた。当時は樹木にSO₂ガスを

を人工的に接触させてSO₂が0.02~0.03ppmであれば植物に被害がでなかったので、その濃度を植物影響の閾値としていた。この考えに基づいて汚染物質を薄めれば公害は回避できると考えられ、煙突を高くする対策が各国で実施されたのである。

しかし、オンタリオ州 Wawa でのその後の調査(1973年)によれば、被害地域は更に広まっており、29kmまで枯死、40kmまで少し生存で、何らかの影響が認められる地域は64kmまで広がっていたのであった。

このような状況と酸性雨の実態が明らかにされるにつれて、酸性雨による森林被害の疑いが持たれるようになった。Tomlinson は次のように述べている¹⁰⁾。“森林被害を考える時、ガス濃度の閾値という概念は間違っている。森林被害は高濃度汚染による急性被害と低濃度による長期的慢性被害とがある。そして慢性被害は主として酸性化による土壌悪化による”と指摘した。

1978年にカナダのトロントで開催された「酸性雨の陸上生態系への影響」会議では、酸性雨の湖沼への影響ははっきりしたが、陸上生態系への影響ははっきり証明されなかったと集約された^{11, 12)}。

森林への酸性雨の影響は気象の年次変動が大きいので検知し難く、また樹種の多様性とターンオーバータイムが長いので微妙な変化を見出し難いのである。森林の慢性被害が土壌の酸性化が原因であると考えられるようになったが、森林土壌の酸性雨による悪化ははっきり証明されていない。その理由は、自然の酸性土壌が広く分布していることと、土壌の緩衝能に寄与する要因が多く、複雑だからである。

自然生態系を保全するために、酸性雨の原因となっている大気汚染をどの程度まで規制したらよいか、そのためにコストをどの程度かけたらよいかの判断をするためには、酸性雨の森林影響、土壌影響を定量的に評価する必要がある。

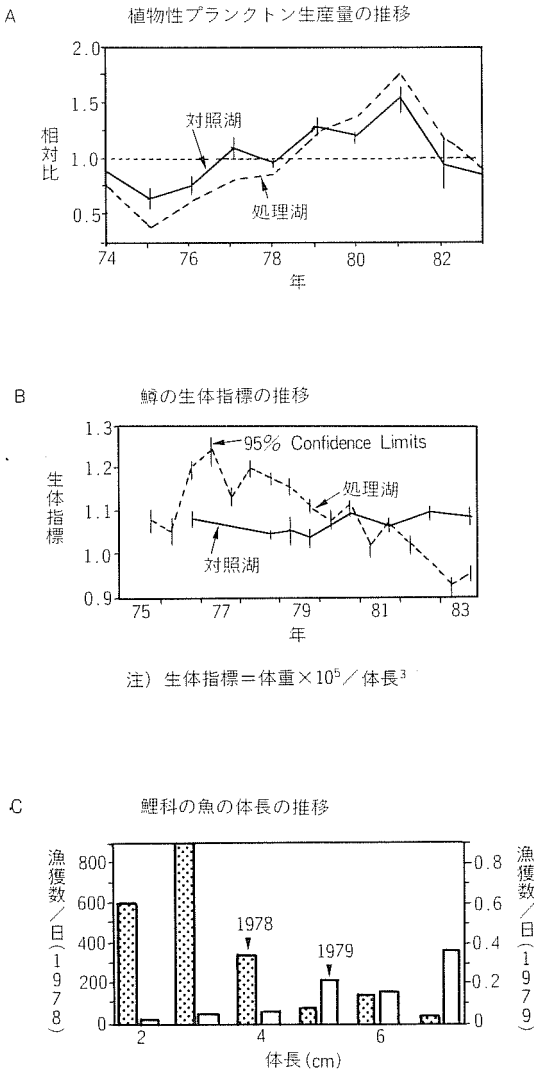
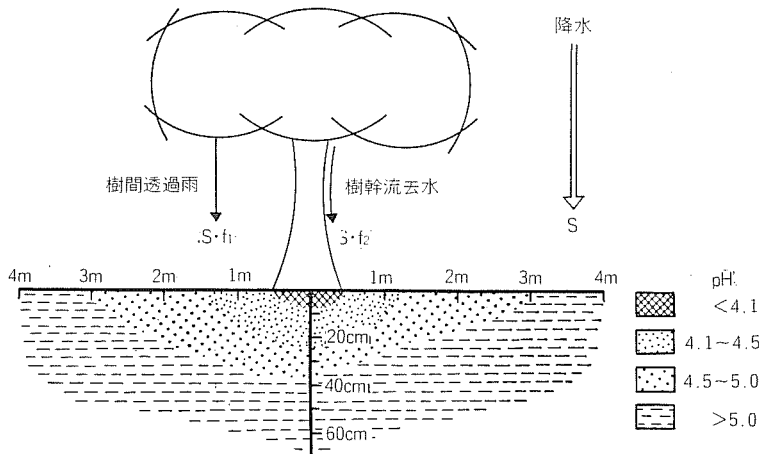


図7 人為的酸性化による湖水生物の変化
(鱈は年毎にやせていく、鯉科の魚では稚魚がいなくなる)



注) S: 降水からの硫黄負荷量, f_1 : throughfall (樹間透過雨) の植被効果,
 f_2 : stem flow (樹幹流去水) の植被効果

図8 森林植生下の雨水の経路と枯死した樹木下の土壌pH分布
 (植被効果があるので、樹木直下の硫黄負荷量が多く、pH低下が大きい)

森林影響については酸性雨危険地域における長期モニタリング、酸性雨感受性の高い指標植物による影響評価と予測等である。土壌影響については、森林土壌への硫黄の年負荷量（乾性降下物も含む）の予測、酸性雨に対する土壌の緩衝能の定量的評価、土壌悪化を判定するための指標の設定、それらに基づく土壌悪化に至る年数予測、土壌タイプ別・地域別の酸性雨耐性評価などである。

(1) 酸性雨による土壌悪化所要年数の概算

土壌悪化の所要年数は実際のフィールドで観測されたデータに基づかねばならないが、大雑把な計算がされている。

Ulrich は中央ヨーロッパの森林土壌への酸負荷量を $3.5 \sim 7 \text{ keq/ha} \cdot \text{yr}$ であるとして、粘土が $5 \sim 10\%$ の土壌の場合には、深さ 50cm の土壌中にある交換性 Ca は 50年ですべて溶脱すると計算した¹³⁾。著者は宝戸らの試験データに基づいて酸性褐色森林土が酸性化して、植物毒性の Al イオン濃度が高まり出す土壌 pH 5 までの硫黄の累積負荷量は $100\text{kg S}/10\text{a}$ であると推定し、酸性雨による硫黄の負荷量を $2\text{kg}/10\text{a} \cdot \text{yr}$ とすれば、約 50年ですべて土壌が悪化すると計算した^{12, 14)}。

(2) 森林土壌への硫黄の負荷量—植被効果—^{12, 14)}

土壌に負荷される硫黄の量は、植被があると植被がない場合より多くなる。図8には森林植生下での土壌への雨水の経路を示した。降水のない時期に SO_2 やエアロゾルなどの乾性降下物が植物の葉や茎に沈着するので、throughfall (樹間透過雨) や stem flow (樹幹流去水) に含まれる硫黄の量は降水中の硫黄より多くなる。これを“植被効果

(the effect of the forest canopy)”と呼んでいる。植被効果があるので、樹木直下への硫黄の土壌負荷量は樹木から離れた土壌よりも多く、pH 低下が大きい。

植被効果は大気汚染程度の低いノルウェーでは雨水の $1.2 \sim 2$ 倍であったのに対し、大気汚染のひどいルール地方では $3.9 \sim 4.5$ 倍と高かった。また、工場周辺の植被効果は工場から離れた地点より高いことが報告されている¹⁰⁾。

表1は西ドイツのルール地方とゾーリング地方における観測値である。トウヒ林への硫黄の降下量は他の樹種より多いこと、針葉樹では夏より冬の方が多量であること、植被があると裸地より多いことが示されている。

表1 森林樹種と季節別の硫黄の降下量
 I. 西独ルール地方

	夏	冬 (kgS/ha・30日)
裸地	2.19	2.56
樹間透過雨, ブナ	2.94	2.61
〃, ナラ	6.14	6.50
〃, マツ	6.17	7.23
〃, トウヒ	8.52	11.60

II. 西独ゾーリング地方 (樹幹流去水を含む)

裸地	1.18	1.13
樹間透過雨, ブナ	4.20	4.25
〃, トウヒ	6.36	8.03

表2 トウヒ林, ブナ林における樹間透過雨からの各種イオン降下量

	(keq·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)									
	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
トウヒ	2.28	0.43	0.23	0.23	1.18	0.25	0.05	0.64	0.48	4.04
ブナ	0.58	0.30	—	0.16	0.78	0.19	0.04	0.45	0.16	1.83
トウヒ/ブナ比	3.95	1.44	—	1.43	1.51	1.36	1.43	1.42	2.97	2.21
ブナの植被効果	1.63	1.89	—	2.78	2.33	2.08	3.85	1.89	1.32	2.27

注) 植被効果=樹間透過雨降下量/雨水降下量

表3 カン林における各種イオンの湿性および乾性降下量 (eq·10a⁻¹·yr⁻¹)

	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	H ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺
湿性降下物(雨水)	70	20	69	12	12	0.9
乾性降下物						
微粒子 (< 2 μm)	7	0.1	2.0	3.6	1.0	0.1
粗粒子 (> 2 μm)	19	8.3	0.5	0.8	30	1.2
ガス状	62	26	85	1.3	0	0
合計	158	54	157	18	43	2.2

雨水が植被に接触して流れる過程での各種イオン濃度の変化が調べられた(表2)¹⁵⁾。

樹間透過雨中のトウヒ/ブナ比についてみると、エアロゾル由来のNa, Ca, Mg, Clの乾性沈着量はトウヒの方がブナより約50%多かった。NH₄とNO₃は植物に吸収され、植被効果は過小に評価された。KとMnはH⁺により置換溶出され、植被効果は過大に評価された。SO₄の挙動は他のイオンとは異なることから、SO₂ガス沈着が示唆された。

最近では森林植生に負荷される各種成分について、乾性降下物の寄与率が調べられている(表3)¹⁶⁾。SO₄²⁻, NO₃⁻, H⁺はガス状の乾性降下物の寄与率が高く、NH₄⁺では微粒子状(2 μm以下)が、Ca²⁺, K⁺では粗粒子状(2 μm以上)の寄与率が高いと報告された。

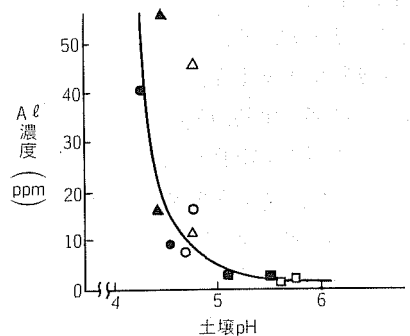
要するに、森林では植被効果があり、この効果は大気のSO₂汚染度、樹種ならびに季節によって異なるので、今のところ硫黄の負荷量を予測することができない。酸性雨の森林影響を定量的に評価するためには、外部インパクト量すなわち硫黄の負荷量の正確な予測が必要である。そのためには樹間透過雨、樹幹除去水を長期的に観測して、乾性降下物の植被効果への寄

与を明らかにし、広域の負荷量予測法を確立することが大切である。

(3) 土壌悪化の指標と土壌の緩衝能

土壌が酸性化して、あるpH以下になるとAlが溶けはじめて、土壌溶液中のAlイオン濃度が急に高まってくる。図9にはpH 5以下になるとAl濃度が急に高まる様子が示されている¹⁷⁾。Alイオンは植物毒性が強い。従って、土壌悪化の指標として、“Al溶出が始まる土壌pHを限界点(critical point)とする”のが一般的である。

この指標は土壌化学的観点からのものである



注) 6月中旬施肥後1週間目、0~2cm土層
○: 硫安, △: 塩安, □: 尿素N12, 黒つぶしは各N24, 1975~76年

図9 土壌pHとAl溶出量¹⁷⁾

表 4 土壤の酸中和能とそれに伴う土壤の酸性化

種類	酸中和能の要素	酸性化の要素
I	炭酸塩・重炭酸塩による中和	
II	交換性塩基による中和	
- 1	弱酸的な交換基の塩基	交換性Hの増加
- 2	強酸的な交換基の塩基	交換性H・A ^ℓ の増加
III	二次鉱物による中和	
- 1	酸吸着	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ の吸着
- 2	Al ₂ O ₃ の溶解	A ^ℓ の溶出
IV	岩石および造岩鉱物の風化に伴う塩基の放出	

が、その他に植物学的観点、土壤微生物学的観点、土壤動物学的観点等の立場からの指標が、今後の研究の深化によって提出されることが期待される。

多雨気候帯では土壤中の塩基が溶脱されるので、酸性土壤が広く分布していることが知られており、日本もその気候帯に属している。しかし土壤には酸性化をやわらげる能力すなわち緩衝能があり、緩衝能は土壤の種類によって大きく異なる。

酸性雨に対する土壤の緩衝能は次のように定義される¹⁸⁾。「酸性雨の影響に対する土壤の緩衝能は土壤のもつ酸中和能力と酸消去能力の総和である。酸中和能は4種の要素に基づき(表4)、また酸消去能は土壤生物(根を含む)の吸収同化または還元作用による硫酸および硝酸の消去に基づく」。

酸中和能の4要素とは、I. 炭酸塩・重炭酸塩による中和、II. 交換性塩基による中和、III. 二次鉱物による中和、IV. 岩石および造岩鉱物の風化に伴う塩基の放出である¹⁹⁾。

酸性雨の土壤影響を定量的に評価するためには、土壤の中和能を要素別に評価する方法を確立する必要がある。特にII-1の弱酸的な交換基の塩基による中和能は、その交換基が変異荷電であるために、公定法のpH7の陽イオン交換容量(CEC)が過大に測定されるので、実際の中和能測定法を明らかにする必要がある。また、III-1の二次鉱物による中和能は陰イオン

を吸着することによって中和する部分とA^ℓの溶出による部分である。我が国にはアロフェン質の火山灰土壤の分布が多い。アロフェンは硫酸イオンを吸着するので、土壤の硫酸イオン吸着能の性質および測定法を明らかにする必要がある。

(4) 土壤別・地域別の酸性雨影響予測の現状

諸外国における酸性雨の土壤影響評価に関する研究は端緒についたばかりで、総説も数編しか発表されていない^{20, 21, 22)}。従って土壤別の酸性雨影響予測も、今のところ実用の段階に至っていない。

McFeeは既知の知見を表5のように整理して、酸性雨による長期影響予測図の作成を試みた^{23, 24)}。予測図作成に当たって次のようにして土壤の耐酸性区分を作成している。

年平均降水量を1,000mm、土壤の仮比重を1.3g/c・cとして、pH3.7の酸性雨によって25年間に土壤表層(25cm)から溶脱する塩基量がCECの10%、25%に相当するCECを計算すると、CEC15.4と6.2m・e/100gという数値が得られる。これに基づいて表6のように酸性雨耐性を区分し、ニューヨーク州等の5つの州についての250万分の1の長期影響予測図を作成した。

Klopatekは土壤の酸性雨耐性区分を作成し、東アメリカの土壤データベースを用い、降水からのH⁺の年平均負荷量のマップに重ね合わせて、酸性雨による危険地域図を作成した。その結果、

表5 酸性雨による土壤影響についての知見

- 1) 湿润地域における自然の土壤生成作用は酸性化過程であり、酸性雨はこの過程を促進する。
- 2) 土壤の酸性雨に対する感受性は土壤の緩衝能とpHに依存している。非石灰質で、CECが低く、pH5以上の土壤が最も酸性化し易い。
- 3) すでに酸性化した土壤は酸性雨影響が小さい。しかし、養分のわずかな溶脱は植物に有害である。
- 4) 酸性雨は置換性の養分の溶脱量を増加させる。
- 5) 酸性化は窒素固定、有機物分解および硝酸化成等の土壤微生物活動を低下させる。
- 6) 酸性雨はAlの溶脱量を増加させ、水系に悪い影響を及ぼす。
- 7) 作物生産に使用される資材類は土壤酸度に大きな影響を与えているので、耕地における酸性雨影響は遮蔽される。
- 8) 緩衝能の小さい未耕地土壤の地域が広く分布しており、そのような地域で酸性雨影響がでる可能性がある。

表6 土壤の酸性雨耐性の区分

(強)	a) 表層土(25cm)に炭酸塩を含む土壤
	b) しばしばたん水する土壤
	c) CEC 15.4me/100g以上
(中)	CEC 6.2~15.4me/100gで、上記a), b)ではない土壤
(弱)	CEC 6.2me/100g以下で、上記a), b)ではない土壤

1572郡中117郡だけが酸性雨影響が顕在化する可能性があると判定された²⁵⁾。

土壤グループ別の耐酸性評価区分について、日本およびアメリカで作成されているが、これらはいずれも実用の段階に至っていない^{26, 27)}。

(5) 土壤溶液論的立場からの定量的予測

酸性雨の土壤影響評価は予測の立場に立って、土壤の特性把握を実施しシミュレーションする研究を重視すべきである。

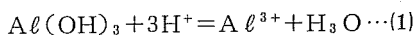
Reussは土壤溶液論的立場に立って、カチオン溶脱への酸性雨影響を予測するモデルを作成して研究をしている^{21, 28)}。これは、lime potential (pH-1/2pCa)、塩基飽和度、CO₂分圧とH⁺とHCO₃⁻の平衡式、Al(OH)₃の見かけの溶解度積(KAl)、溶液中のカチオンとアニオンの平衡、SO₄²⁻の吸着等温式、固相と液相におけるAl/Ca比の特性を表す選択係数(Ks)等を使用したモデルである。

シミュレーションした結果から、土壤溶液中のCa-Alのバランスは、①交換基上のCaのモル分率(Eca)、②Alの見かけの溶解度積(KAl)、③交換基の熱力学的特性値(Ks)によって決まると結論した。KAlとKsは土壤溶液の平衡を考える際に、

これまで考慮されなかったパラメータである。この研究から、交換基上のCaのモル分率が20%以下になると土壤溶液中のAl/Ca比が大きくなると指摘した。また、硫酸濃度が25から250μeq/Lに高まった時の土壤溶液中のH⁺、HCO₃⁻、Al³⁺、Ca²⁺濃度のシミュレーションが実施された(図10)。

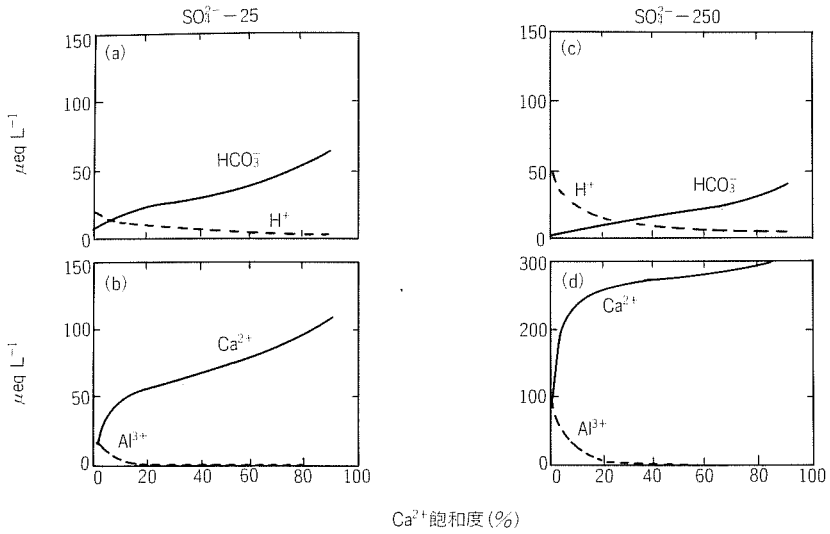
ここで、

- ECa, EA_l : 交換基上のCa, Alのモル分率
- KAl : (1)式における見かけの溶解度積
- Ks : 選択係数 : (2)式に示したように、固相のAl/Ca比と溶液中のAl/Ca比の特性を表す係数



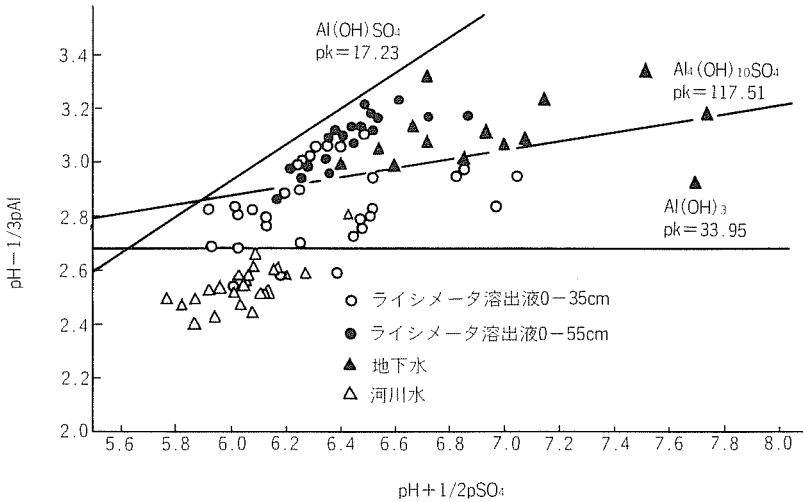
$$Ks \cdot \frac{(Al^{3+})^2}{(Ca^{2+})^3} = \frac{EA_l^2}{Eca^3} \dots \dots \dots (2)$$

また、溶液平衡ダイアグラムの手法は実用的である。図11はスウェーデンのGordsjön湖畔



注) (a) (b) は $25 \mu\text{eqSO}_4^{2-}/\text{L}$
 (c) (d) は $250 \mu\text{eqSO}_4^{2-}/\text{L}$

図10 化学平衡モデルから予測した石灰飽和度に対する各種イオン濃度



注) スウェーデンの Gordsjön 湖畔での実験結果で、
 gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$, jurbanite $\text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4$, basaluminite $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4$ の溶液平衡ダイアグラムである

図11 溶液平衡ダイアグラム

の実験例である²⁹⁾。図から各プロットが jurbanite のラインに平行して、その下に集まっていることがわかる。このことから SO_4^{2-} と Al^{3+} の濃度は jurbanite 様物質に規制されていると考えられる。このことから予測も可能である。

(農業研究センター プロジェクト研究第5チーム長)

参考文献

- 1) S. Odén: Water, Air & Soil Pollution, 6, 137 (1976).
- 2) 大喜多敏一: 環境情報科学, 13(4), 11(1984).
- 3) H. Babich, D.L. Davis & G. Stotzky: Environment, 22, 6(1980).
- 4) L.N. Overrin, H.M. Seip & A. Tollan: Final Report of the SNSF-Project 1972-1980, 2nd ed. Oslo-As.(1981).
- 5) 関東地方湿性大気汚染調査データ集, 昭和56・57年度, 関東地方公害対策推進本部大気汚染部会, 一都三県公害防止協議会(1985).
- 6) H.M. Seip: in "Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems", ed. by T.C. Hutchinson and M. Havas, PLENUM, p.77(1980).
- 7) 関口恭一: 第26回大気汚染学会講演要旨集, 217(1985).
- 8) J.N. Galloway: in "Sulfur Oxides", National Academy of Science, p.63 (1978).
- 9) D.W. Schindler, K.H. Mills, D.F. Malley, D.L. Findlay, J.A. Shearer, I.J. Davies, M.A. Turner, G. A. Linsey, D.R. Cruikshank: Science, 228, 1395(1985).
- 10) G.H. Tomlinson: Environ. Sci. Technol., 17, 246 (1983).
- 11) T. C. Hutchinson & M. Havas ed.: Effect of Acid Precipitation on Terrestrial ecosystem, PLENUM, (1980).
- 12) 金野隆光: 第4回農業環境シンポジウム, 農業環境技術研究所, p.1(1987).
- 13) B. Ulrich: in "Acid Deposition", ed. by S. Belike and A.J. Elshout, p.31 (1982).
- 14) 金野隆光: 化学と生物, Vol.24, 591 (1987).
- 15) R. Mayer & B. Ulrich: in "Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems", ed. by T.C. Hutchinson and M. Havas, PLENUM, p.173 (1980).
- 16) S.E. Lindberg, G.M. Lovett, D.D. Richter and D.W. Johnson: Science, 231, 141 (1986).
- 17) 昭和58年度北海道農業試験会議資料, 北海道立天北農試土壌肥料科 (1984).
- 18) 吉田 稔 (岩手大学): 私信.
- 19) 吉田 稔, 川畑洋子: 土肥誌投稿中
- 20) J.E. Rechcigl & D.L. Sparks: Soil Sci. Plant Anal., 16, 653 (1985).
- 21) J.O. Reuss & D.W. Johnson: Acid deposition and the Acidification of soils and waters, Ecological Studies, V.59, Springer-Verlag, New York Inc.(1986).
- 22) M. A. Tabatabai: CRC Critical Rev. Environmental Control, 15,65 (1985).
- 23) W.W. McFee: in "Atmospheric Sulfur Deposition", ed. by D.S. Shriner, et al., Ann Arbor Science, p.495 (1980).
- 24) W.W. McFee: Env. and Exp. Botany, 23, 203 (1983).
- 25) J.M. Klopatek, W.F. Harris & R.J. Olson: in "Atmospheric Sulfur Deposition", ed. by D.S. Shriner, et al., Ann Arbor Science, p.539 (1980).
- 26) "酸性雨の土壌への影響予察図", 環境庁水質保全局, 日本土壌肥科学会 (1984).
- 27) L. Peterson: in "Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems", ed. by T.C. Hutchinson and M. Havas, PLENUM, p.573 (1980).
- 28) J.O. Reuss: Ecological Modelling, 11, 15 (1980).
- 29) S.I. Nilsson & B. Bergkvist: Water Air Soil Pollut., 20, 311 (1982).