

C-2 植物に与える酸性及び酸化性物質の影響に関する研究

(3) 酸性降下物の農業生物に及ぼす影響に関する研究

研究代表者

農業環境技術研究所

原田 二郎

農林水産省 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

土壌保全研究室

麓多門・岩間秀矩・真弓洋一

水質特性研究室

芝野和夫・大嶋秀雄・岡本玲子

環境生物部

植生生態研究室

佐藤光政・小泉博・宇佐見洋三

保全植生研究室

根本正之・大黒俊哉・堀江秀樹

平成2年度～4年度合計予算額 23,906千円

〔要旨〕

人工酸性雨処理による可視被害発現や光合成速度低下の程度に種間差が認められ、光合成低下の主要因はクロロフィルの低下による。

人工酸性雨のpHと収量とのドーズ・レスポンス関係は、pH3.0（水稻は2.5）以上では乾物重低下は認められず、それ以下では、酸性度に従って乾物重が減少する。その低下度合により農作物は4グループに分けられる。

人工酸性雨による可視被害発現は花卉類の花弁部が葉部より感受性が高く、種間差の外に品種間差も認められる。酸性雨と O_3 の短期暴露は、可視被害に関して極度の低pH及び高 O_3 濃度条件下では一部の種で交互作用がみられるものの、現在観測される濃度条件下では O_3 の影響は極めて軽微であると考えられる。

土壌の酸性緩衝能の主体は交換性塩基とのイオン交換であり、塩基飽和度が3%以下に低下した時点で Al^{3+} が溶出する。アロフェン質土壌は SO_4^{2-} 吸着力が強く、非アロフェン黒ボク土と赤黄色土では脱窒による NO_3^- 消失作用が好気的条件下でも認められる。土壌中の酸収支を評価する場合、土壌水の浸透速度や土壌呼吸、植物根の影響を考慮する必要がある。

河川を取水源とする水田灌漑用51農業用水の酸中和能を調査した結果、酸中和能は $139\mu eq/l \sim 2,135\mu eq/l$ の範囲にあり、降水の年平均pHが4に至るまでは農業用水の酸性化の危険は小さいものと考えられる。

〔キーワード〕 酸性雨 光合成 指標植物 土壌 緩衝能

1. 序

近年、北欧、北米等では、酸性雨や霧による森林や陸水圏生態系の急激な破壊や機能低下が深

刻化し、その地球的規模の実態調査や対策研究が推進されてきている。わが国においても、酸性雨や霧が原因と考えられる関東地方のスギ林の枯死・衰退が観測されており、スギ林を始めとする森林調査が行われている。

酸性雨や霧は農業環境においてもきわめて重大な問題を包含しており、特に農業生物への長期的な影響、これらが生育する環境の悪化、環境資源の質的劣化、物質環境機能の低下等の危険性が懸念されている。しかし、これらに関する調査研究はわが国では蓄積が少なく地球的規模の環境問題として、この分野の問題解決が強く求められている。

本研究は、環境庁公害防止関係予算によって1989年度から『湿性酸性降下物の農水産生物に及ぼす影響とその耐性評価に関する基礎的研究』として研究を開始していたものを1990年度からは、同じく環境庁の地球環境研究総合推進費に組み入れて研究を遂行したものである。

2. 研究目的

本研究は、酸性雨や霧による農作物の被害の軽減化や対策技術の確立に資するため、酸性雨が農作物に与える影響のメカニズムを解明し、これらの生育環境に及ぼす影響の評価及び酸性環境に対する指標生物を抽出することを主な目的とするものである。

そのため、各種植物を用いて光合成・呼吸等の生理的機能に及ぼす酸性降下物の影響、pHと生長低下のドース・レスポンス、可視被害を指標とした耐酸性評価と指標植物の類型化、農耕地の土壌及び農業用水の耐酸性緩衝能の評価を行った。

3. 研究方法

(1) 葉の生理的機能に及ぼす影響

ハツカダイコン、インゲンマメ、ソバ、イネ、ホワイトクローバ、トールフェスクの6種の作物とハルジオン、メヒシバ、シロザ、オオイヌタデの4種の雑草の合計10種の植物を用いた。作物は土を詰めたシードリングケースに播種し、ファイトロン（床面の照度約10,200ルクス、気温25/20℃、日長16時間）内で育成した。また雑草は野外から採取した幼植物をシードリングケースに移植し、同様にファイトロン内で育成した。植物が旺盛な生育をしている時期にpH2.5～pH3.5の人工酸性雨を1～2週の間6～8回散布し、その後3日以内に一定葉位の葉の光合成速度、呼吸速度、気孔コンダクタンス、クロロフィル含有率を測定した。なお、対照区では純水を散布し、同様の測定をした。なお、ここでは人工酸性雨が葉の生理的機能に及ぼす直接的な影響を調査しようとしたので、散布に際し土壌中には散布液が入らないようにポットの上面をビニールシートで覆った。

(2) pHと生長低下のドース・レスポンス

多数の個体の植物に同時に、比較的長時間（1時間以上）にわたって人工酸性雨を接触させるための人工酸性雨降雨システムを製作した。このシステムは人工酸性雨を調製するための純水製造装置、人工酸性雨を散水するための人工酸性雨降雨装置及び植物を生育させ人工酸性雨を接触させるための人工酸性雨チャンバーからなる。このシステムを用いて、8種の農作物に人工酸性雨散水実験を行った。用いた農作物は、根菜類のハツカダイコン、カブ、ニンジン、葉菜類のホウレンソウ、チンゲンサイ、サラダナ、豆類のインゲンマメ及び穀物の水稻である。各実験の実施時期等を表1に示した。

表 1. 各人工酸性雨散水実験における農作物の種類、品種、実験時期、期間中平均気温、平均日光量子量および処理 pH

plant	cultivar	period	averaged air temp., °C	averaged daily PAR, E/m ² /day	treatment pH
1 radish	Comet	Apr.20-May 11,1990	15.5	19.2	5.6, 4.0, 3.0, 2.5
2 radish	Comet	May 21-Jun.11,1990	20.4	25.2	5.6, 4.0, 3.0, 2.7
3 spinach	Young Power	May 11-Jun. 8,1990	19.8	24.8	5.6, 4.0, 3.0, 2.7
4 spinach	Viroflay	Oct. 8-Nov.13,1990	16.0	10.9	5.6, 4.0, 3.0, 2.5
5 bush bean	Meal	Jun. 25-Jul. 8,1990	24.0	19.3	5.6, 4.0, 3.0, 2.7
6 radish	Comet	Apr.30-May 21,1991	17.3	22.6	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
7 radish	Comet	Jun.17-Jul.8,1991	23.2	15.5	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
8 radish	Comet	Oct.11-Oct.31,1991	16.2	7.4	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
9 spinach	Young Power	Oct.14-Nov.17,1991	13.7	8.3	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
10 bush bean	Meal	Jun.17-Jul.22,1991	23.6	15.1	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
11 turnip	Kanemachi	Jun.17-Jul.8,1991	23.2	15.5	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
12 chingensai	Aokuki	Oct.11-Nov.7,1991	15.2	7.9	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
13 saradana	Santa Clara	Sep.27-Nov.17,1991	15.4	7.9	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
14 carrot	Shin Kuroda	Aug.28-Nov.10,1991	19.2	9.6	5.6, 3.0, 2.7, 2.5
15 rice	Nihonbare	May 8-Sep.24,1992	22.1	18.0	5.6, 3.0, 2.7, 2.5

人工酸性雨の散水は、植物の全生育期間を通して週3回の割合で行い、1回の雨量は10mm前後であった。水稲では、湛水状態を維持するために水道水により適宜灌漑を行った。他の植物については人工酸性雨散水以外の灌漑は行わなかった。人工酸性雨の組成は、 $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 2 : 1 : 2$ （当量比）とした。この比率は、つくば市周辺の降雨中のそれらイオンの比率にほぼ等しい。人工酸性雨のpHは、pH5.6（純水）をコントロールとし、1990年は、pH4.0, 3.0及び2.7（または、2.7のかわりに2.5）、1991年と1992年はpH3.0, 2.7及び2.5とした。

（3）指標植物の選定と類型化

まず、酸性雨に対する感受性の高い植物をスクリーニングする目的で、温室内で栽培した、農作物（35種）、農耕地周辺雑草・野草（13種）、園芸植物（10種）、花卉類（6種21品種）の茎葉部及び花卉に、人工酸性溶液（ $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 2 : 1 : 2$ ）を散布し、翌日可視被害を観察した。酸性溶液の濃度は、pH2.0～4.0の範囲で数段階に調整し、ハンドスプレー及びマイクロシリンジ等で散布した。

つぎに、乾性大気汚染物質との複合作用が可視被害の発現に及ぼす影響を把握する目的で、 O_3 と人工酸性雨の暴露試験を行った。供試植物には、上述の試験で比較的感受性の高かった8種の植物（メヒシバ、コブナグサ、チヂミザサ、ヨモギ、アオシソ、アカシソ、ノザワナ、コマツナ）を対象とした。温室内で1～2ヶ月栽培し、生育の旺盛な時期に自然光型チャンバー内で O_3 を3日間（9:00～17:00）暴露させた後、温室内で酸性溶液を3日間散布した。 O_3 濃度は0.15, 0.10, 0.05ppmおよび0ppmの4段階とし、酸性溶液はpH2.0, 2.5, 3.0, 3.5および対照区として高純度水（pH5.6）の5段階の溶液を調整し、1個体1日あたり10mlずつハンドスプレーで散布した。酸性溶液散布終了の翌日、葉面積及び被害面積を測定し、単位葉面積あたりの被害面積率を算出した。なお、 O_3 暴露終了の翌日にすでに可視被害のみられた葉は上述の測定対象から除外し、酸性溶液

散布前後の被害面積の変化を測定した。

(4) 農耕地の耐酸性緩衝能

①供試土壌及び人工酸性雨

岩手県前沢町表土（非アロフェン質黒ボク土），愛知県豊橋市表土（赤黄色土），つくば市観音台表土（アロフェン質黒ボク土）の3種の畑土壌を風乾し2mmのふるいを通し供試した。人工酸性雨は H_2SO_4 ， HNO_3 ， HCl を等モル混合し，pHを3.0及び4.0にそれぞれ希釈調整した。

②飽和条件での浸透実験

内径36mmのガラス管に土壌を層厚5cm（ 50cm^3 ）になるように充填し，人工酸性雨をおよそ20ml/hで1日100ml，週5日，積算浸出液量が8000ml（降雨量として8000mm）になるまで浸透させた。浸透中，土壌はほぼ飽和状態にあった。1～3日毎に流出液を捕集しpH，各種イオン濃度を測定した。

また浸透終了後，カラム土壌を上，中，下の3層に分割し，土壌pH，交換性陽イオン量および可溶性Al（pH4.00の1N CH_3COONa 緩衝液を用い固：液＝1：80で3時間振とう抽出）を測定した。

③不飽和条件での浸透実験

畑条件に近い水分状態で浸透実験を行うため，内径13mmのカラムに水頭差による吸引圧をかけつつ浸透できる装置を作製した。土壌充填量は 5cm^3 相当量（つくば土壌：3.5g，前沢土壌：4.0g，豊橋土壌：5.0g）とし，透水性を改善するため同容の石英砂（0.25mm～1.0mm）を混合した。風乾土をカラムに充填し，ローラーポンプを使って蒸留水を10ml/hで約200ml 浸透させた後，人工酸性雨を1ml/h または5ml/hの速度でおよそ200ml浸透させた。流出液を適当な間隔で捕集しイオン濃度を測定した。

(5) 農業用水の耐酸性緩衝能

わが国における農業用水の耐酸性緩衝能の概要を把握する目的で，全国各地の河川を取水源とする水田かんがい用の農業用水を採取し，水素イオン濃度，アルカリ度等を測定した。なお，調査した農業用水の地方別内訳は関東地方8県15，東北地方6県12，中国地方5県10，九州地方7県14の農業用水であった。

4. 結果及び考察

(1) 葉の生理的機能に及ぼす影響

人工酸性雨散布後にハツカダイコン，インゲンマメ，ソバ，イネ，ホワイトクローバ，オオイヌタデでは葉に可視的被害が見られた。しかし，トールフェスク，メヒシバ，シロザではこうした可視害は観察されなかった。

ハツカダイコン，インゲンマメでは，pH3.0以下の人工酸性雨の散布により，光合成速度は対照区に比べて有意に低下した。またホワイトクローバ，ハルジオンではpH2.5の人工酸性雨の散布により，光合成速度は対照区に比べて有意に低下した。しかし，ソバ，トールフェスク，メヒシバ，シロザ，オオイヌタデではほとんど変化が見られなかった（表2）。

呼吸速度は対照区に比べて増加する種が多く，ことにpH2.5の人工酸性雨の散布により，測定した各種の呼吸速度は増加した。

葉のクロロフィルa及びbの含有率は人工酸性雨のpHが低下するにつれて，低下する傾向を示す種が多く，特にpH2.5ではほとんどの種で低下したが，イネ科のトールフェスクとメヒシバではあまり変化しなかった。クロロフィルaの含有率の相対値（それぞれの種における対照区のクロロフ

イル含有率に対する人工酸性雨散布区のクロロフィル含有率の比)と光合成速度の相対値との間には一次式で回帰できる関係 ($r=0.539$) があり, イネ科の3種を除いた場合には相関係数 ($r=0.804$) はさらに増加した。

表2. 葉の光合成速度に対する人工酸性雨の影響

	光合成速度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)			
	pH5.6	pH3.5	pH3.0	pH2.5
ハツカダイコン	27.53	24.37	23.48*	18.56*
インゲンマメ	13.70	-----	9.85*	5.97*
ソバ	11.62	12.56	12.50	12.69
イネ	18.07	22.11*	20.21	21.38*
ホワイトクローバ	21.46	21.34	20.77	18.06*
トールフェスク	16.04	-----	-----	16.86
ハルジオン	10.29	-----	-----	7.26*
メヒシバ	29.02	27.71	27.46	29.03
シロザ	11.75	12.53	11.90	11.77
オオイヌタデ	12.88	-----	12.00	11.13

*: t検定の結果, 対照区との間に5%水準で有意差があることを示す。

本実験で用いた10種の植物を, その光合成速度を低下させ始める人工酸性雨のpHとの関係で整理すると, 次の3群に分けられる。すなわち, 対照区に比べてpH3.0で有意に低下したハツカダイコンとインゲンマメ, pH2.5で有意に低下したホワイトクローバとハルジオン, そしてpH2.5でもほとんど低下しなかったソバ, トールフェスク, メヒシバ, シロザおよびオオイヌタデの3群である。このほかイネではpH3.5またはpH2.5で増加した。酸性雨の植物の光合成速度に及ぼす影響については, 減少させたとする報告 (Neufeldら⁵⁾, 1985; Forslineら¹⁾, 1983) がある一方で, 影響が見られなかったとする報告 (Irving²⁾, 1985; Tritesら³⁾, 1987) も見られる。こうした種間差を生じさせる原因としては, 葉の酸緩衝能や葉の表面の形態, とくに葉の表面における毛の存在やクチクラ層の厚さなどが関連すると考えられる。

pH5.6の純水を散布した場合の光合成速度に対する人工酸性雨を散布の場合の光合成速度の相対値と, 同様に求めた葉のクロロフィル含有率の相対値との間には, 一次式で回帰できる相関関係が認められた。酸性雨による光合成速度の変化をクロロフィル含有率の変化から推定する可能性を示すものといえる。

今後の問題点として, 植物の光合成に及ぼす酸性雨の影響を解析すること, とくにその感受性における種間差を生じさせる要因の解析, 及び植物の生産性に及ぼす酸性雨の影響を解析する必要がある。

(2) pHと生長低下のドース・レスポンス

酸性雨が農作物の生長・収量に及ぼす影響についての研究は, 1980年代を中心に主に米国にお

いてさかんに行われた。米国においては、一般の圃場やオープントップチャンバー等において、自動散水装置により比較的長時間（およそ1時間以上）にわたって多数の個体に散水処理を行う人工酸性雨散水実験が数多く行われた（Irving³⁾, 1987）。日本においては、霧吹きなどにより極めて短時間の散水で、しかも少ない個体に人工酸性雨を散水する実験はいくつか行われていたが、自動散水装置を用いた実験はきわめて少ない（野内⁷⁾, 1990）。そこで、この実験は、各農作物について人工酸性雨のpHと収量低下のドース・レスポンス関係を明らかにし、降水のpHがどの程度まで低下すると農作物の収量に影響を及ぼすかを予測することを主な目的として行われた。

その結果pHが3.0以下の処理区で、いずれの農作物についても葉に可視被害が発現した。可視被害の度合は種により、あるいは葉齢や生育段階によっても異なった。生長への影響は、生育段階別にみると、生育初期にpHが3.0以下の人工酸性雨によってpH5.6に比較して生長が低下する場合が多かった。インゲンマメおよび水稻では、生育初期にはそれぞれpH2.7およびpH2.5でpH5.6に比較して有意な個体乾物重の減少がみられたが、生長するにつれ個体乾物重の差は小さくなり、最終的にはインゲンマメの収量（さや重、さや数）、水稻の収量（玄米重やその他収量構成要素）はpH5.6と比較していずれの処理区でも有意差はみられなかった。

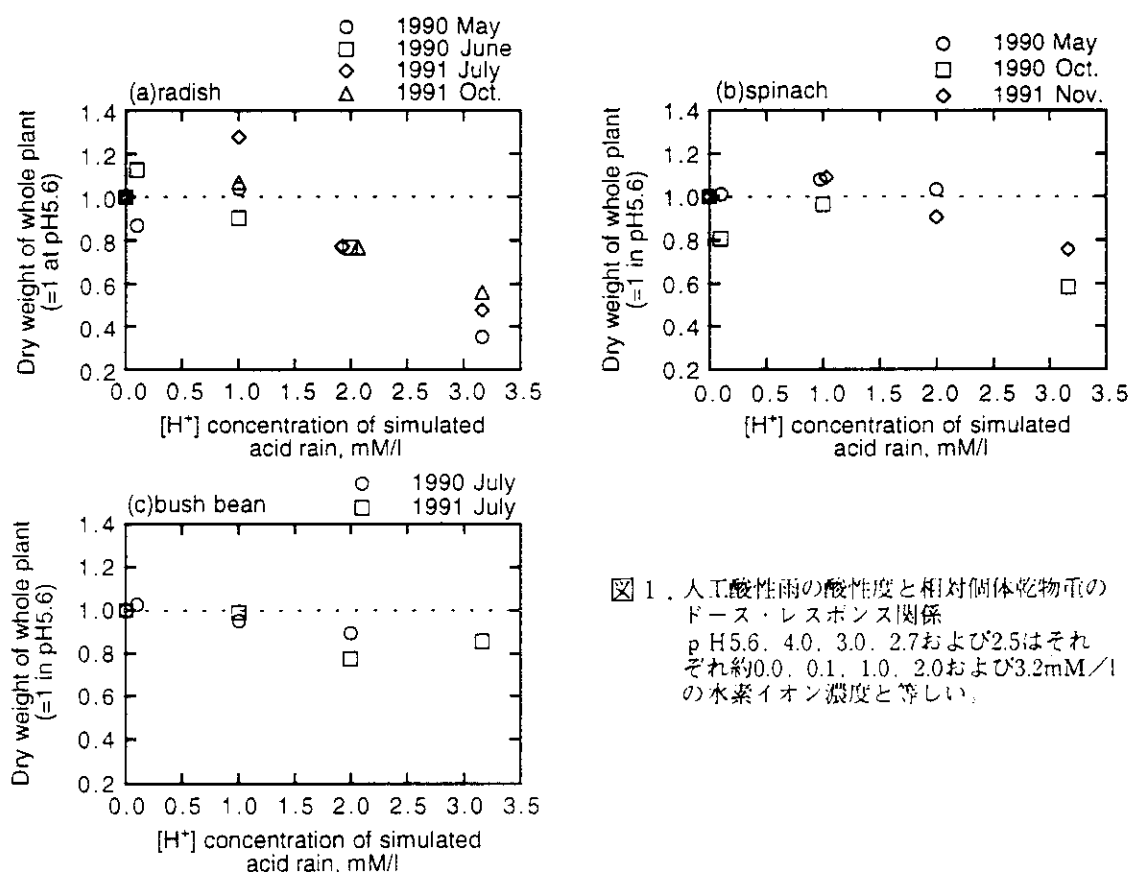


図1. 人工酸性雨の酸性度と相対個体乾物重のドース・レスポンス関係
pH5.6, 4.0, 3.0, 2.7および2.5はそれぞれ約0.0, 0.1, 1.0, 2.0および3.2mM/lの水素イオン濃度と等しい。

各農作物について、人工酸性雨のpHと最終的な収量とのドース・レスポンス関係をまとめると、いずれもpH3.0以上ではpH5.6に比較して乾物重の低下は見られなかった。水稻以外では、pHが3.0以下（水素イオン濃度が1.0mM以上）では、酸性度（水素イオン濃度）に従ってほぼ直線的に乾物重が減少した。水稻では、収量はpH2.5区でも他の区と差がなかった。pHが3.0以下の人工酸性雨による収量低下の度合により、実験した8種の農作物はおおよそ4グループに分けられた。

収量低下の度合いが大きい順に並べると、1番目はハツカダイコンであり、2番目のグループはホウレンソウ、チンゲンサイ、カブおよびニンジン、3番目がインゲンマメとサラダナ、そして4番目が水稲である。図1に、ハツカダイコン、ホウレンソウおよびインゲンマメについての、収穫時個体乾物重と人工酸性雨の酸性度とのドース・レスポンス関係を示す。

今回実験を行った農作物いずれにおいても、常時pH3.0以下の降雨にさらされない限り、酸性雨単独による収量の低下はみられないと予測され、現在我が国で通常みられるような年平均pH4.6程度の降水では、農作物の生長・収量に影響を及ぼすことはないと考えられた。

(3) 指標植物の選定と類型化

①人工酸性雨散布試験による指標植物のスクリーニング

農作物、農耕地周辺植物等では、ダイズ、ノザワナ、ナタネ、メヒシバ、コブナグサ、ベゴニア等の感受性が比較的高かった。花卉類の花弁部を対象とした試験では(表3)、ツツジ、パンジーなどをはじめとして、一般に葉部よりも高い感受性を示した。また、同一種でも品種間で感受性に若干の差異がみられたことから、指標植物を選定する際には品種レベルまで考慮する必要があることが示唆された。

表3. 人工酸性雨による花卉の可視被害

種名	品種名	花色	pH		
			3.5	3.0	2.5
カンナ		red	—	—	++
カンナ		yellow	—	—	++
ゼラニウム		pink	—	—	++
ゼラニウム		red	—	—	++
ゼラニウム		white	+	—	+
ツツジ	キンサイ	violet(l)	—	++	+
ツツジ(ヒラド)	アケボノ	pink	—	—	+
ツツジ(ヒラド)	オムラカシ	violet	—	+	++
ツツジ(ヒラド)	シロタエ	white	—	++	+
ツツジ(ヤエ)		pink(d)	—	—	+
ツツジ(ヤエ)		pink(l)	—	+	—
ハナツグサ	ベニツグサ	blue	—	—	++
ハナツグサ	ベニツグサ	red	—	++	++
ハナツグサ	インペリアル	white	—	—	++
ハナツグサ	ヒメアザミ	yellow	—	—	++
ハナツグサ		blue	—	—	+
ハナツグサ		pink(d)	—	—	++
ハナツグサ		pink(l)	—	+	++
ハナツグサ		red	—	—	+
ハナツグサ		violet	—	—	++
ハナツグサ		pink	—	—	—
ハナツグサ		red	—	—	—
ハナツグサ		white	—	—	—

—:被害なし, +:小班(<1mm), ++:明瞭な斑点(1mm≤)

表4. O₃暴露による被害部位の拡大率
(O₃暴露終了後を1とした値)

O ₃ (ppm)	チヂミザサ		コブナグサ	
	0.10	0.15	0.10	0.15
pH5.6	—	1.51a	—	1.16a
pH3.5	1.09a	1.48a	—	1.17a
pH3.0	1.08a	1.50a	1.16a	1.17a
pH2.5	1.11a	1.52a	1.17a	1.18a
pH2.0	1.25b	1.62a	1.31b	1.29b

表5. pHおよびO₃濃度を要因とした分散分析の結果

	pH	O ₃	pH×O ₃
メヒシバ	***	N. S.	N. S.
ヨモギ	***	N. S.	N. S.
チヂミザサ	***	***	N. S.
アサギ	***	**	N. S.
アサギ	***	***	N. S.
コブナグサ	***	*	*
ノザワナ	***	**	**
コブナグサ	***	*	**

N. S., p>0.05; * p<0.05; ** p<0.01; *** p<0.001

②O₃と人工酸性雨の暴露試験

メヒシバ、チヂミザサなどでは、0.10ppm以上のO₃暴露終了後に可視被害が発現した。O₃暴露

によって生じた被害部位は、酸性溶液の散布により全処理区で被害面積がやや拡大する傾向を示し、とくにpH2.0処理区で有意に大きくなった（表4）。チヂミザサは、0.15ppm処理区で全体的に被害面積の拡大率が大きくなったが、酸性雨処理とO₃処理との交互作用は認められなかった。また、コブナグサはO₃処理による有意な差は認められなかった。この理由のひとつとして、O₃と酸性溶液で、可視被害の発現部位が異なっていたためと考えられる。とくにコブナグサでは、O₃による被害は葉部全体に斑点状にみられるのに対し、酸性溶液による被害部位は葉縁に沿って発現していたため、酸性溶液は、O₃被害部位の拡大には直接的な影響をそれほど及ぼさなかったものと考えられる。

一方、O₃暴露で被害のみられなかった葉については、すべての供試植物でpH2.0の酸性雨処理により急激に被害面積が増加した。分散分析の結果（表5）、ほとんどの種では、O₃、pHそれぞれ単独の影響を示すにとどまり、交互作用は認められなかった。一方、コブナグサやノザワナなどでは交互作用が認められた。これら一部の種については、短期的な暴露を行った場合でも、潜在的なO₃のストレスは酸性雨の可視被害にある程度影響を及ぼすと考えられる。しかし、顕著な被害面積の増加がみられるのは、0.15ppmO₃およびpH2.0の処理区のような、極度の高濃度条件下に限られており、現在程度の濃度条件下では相加的な作用を示すにとどまると考えられる。

（4）農耕地の耐酸性緩衝能

①塩基性陽イオンの溶脱とAlの溶出

pH3の人工酸性雨による飽和浸透実験において、豊橋土壌では積算酸負荷量8.7meq/100g乾土、つくば土壌では20.7meq/100g乾土の時点で流出液pHが急激に5以下に低下しAlが溶出し始めた。前沢土壌は8,000mm（酸負荷量21.5meq/100g乾土）浸透させた時点でも浸出液pHは6以上でAlの溶出はみられなかった。流出液量とイオン濃度から計算すると、Alの溶出が始まった時点の塩基飽和度は豊橋土壌では3.0%、つくば土壌では0.3%だった。一方、前沢土壌では浸透終了時の塩基飽和度は上層で1.8%、中層で3.6%、下層では24.9%だった（図2）。また可溶性Alは中層で増加しており、上層でのAlの溶出と中層での沈澱が生じていることが示唆された（図3）。したがって前沢

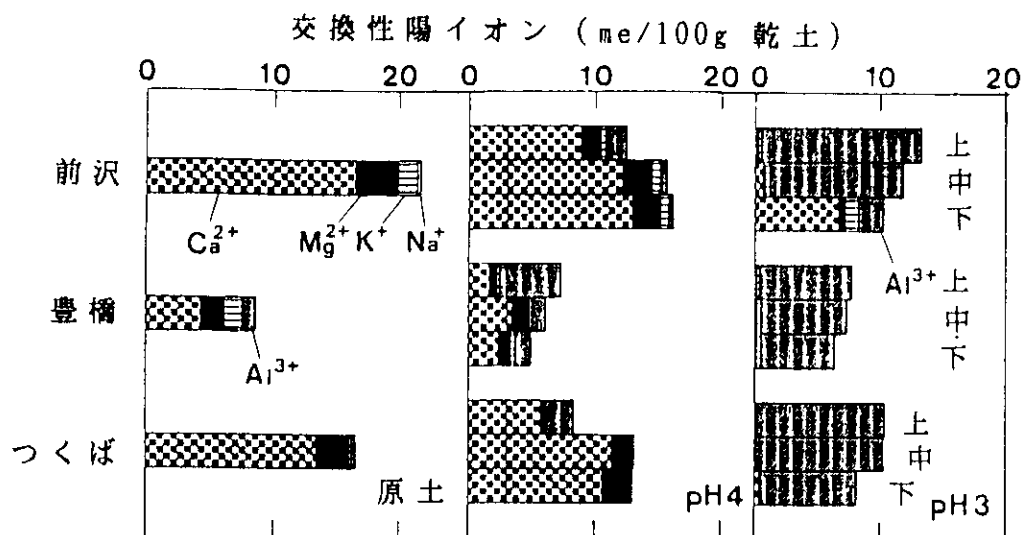


図2. 原土および飽和浸透実験終了後のカラム土壌の層位別交換性陽イオン量

土壤中Alの溶出が起こるのは塩基飽和度が1.8-3.6%まで低下した時点と思われる。以上から、土壤の酸緩衝能の主体は交換性塩基とのイオン交換であり、一般的に塩基飽和度がおよそ3%以下に低下した時点で水溶性Alが溶出すると考えられる。

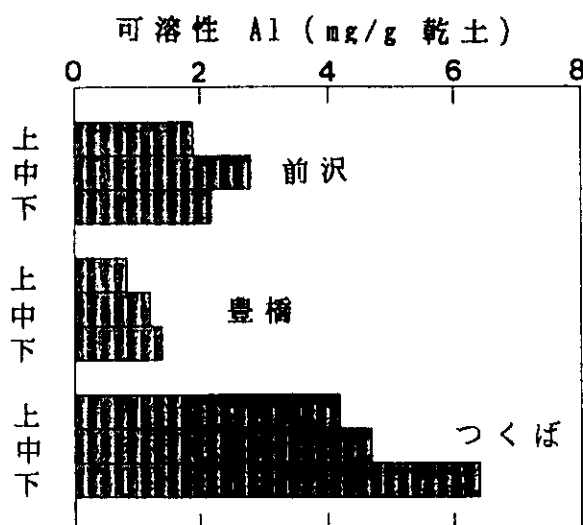


図3. pH3の人工酸性雨による飽和浸透実験終了後のカラム土壤の層位別可溶性Al含量

② SO_4^{2-} の吸着

つくば土壤では飽和・不飽和いずれのpH3人工酸性雨浸透実験においても SO_4^{2-} 流出濃度は負荷濃度の約50%であり、浸透速度による影響も認められなかった。これに対し前沢と豊橋土壤では SO_4^{2-} 濃度の減少は20%程度だった(図4)。また、つくば土壤の SO_4^{2-} 保持量は飽和浸透実験後に顕著に増加していた(表7)。つくば土壤の高い SO_4^{2-} 吸着能は同土壤がアロフェン質であることによると推定される。他方、pH4の人工酸性雨による飽和浸透実験では SO_4^{2-} 全流出量が全負荷量を上回っていた(図4)。これはつくば土壤は既に原土において多量の SO_4^{2-} を吸着しており、低 SO_4^{2-} 濃度溶液による浸出では逆に SO_4^{2-} が溶出したためと推定される(表7)。したがってアロフェン質黒ボク土壤の酸中和能を評価する場合には SO_4^{2-} 吸着能を考慮する必要がある。その場合には更に初期 SO_4^{2-} 吸着量と液相 SO_4^{2-} 濃度の比を考慮する必要がある。

③ NO_3^- の消長 (図4)

飽和浸透実験において前沢および豊橋土壤ではpH4の人工酸性雨中の NO_3^- はほとんど流出液中に認められず、またpH3でも流出液中 NO_3^- 濃度が低く、脱窒能が示唆された。不飽和浸透実験でも、前沢および豊橋土壤ではpH4の人工酸性雨中の NO_3^- はほとんど流出液中から除かれ、pH3の場合も NO_3^- 濃度の低下が認められた。つくば土壤では NO_3^- 濃度減少は小さかった。今回のような加速度的浸透実験では不飽和条件下でも脱窒による NO_3^- 消去作用が認められたが、 NO_3^- 生成の影響については十分評価できず、それらは今後の課題である。

④ HCO_3^- による陽イオンの溶出

飽和浸透実験ではいずれの土壤でも流出液中の塩基性陽イオン濃度は陰イオン濃度を上回った。この濃度差は土壤中 CO_2 発生による土壤溶液中 HCO_3^- 濃度に相当すると考えられるが、前沢土壤で特に大きかった(図4)。前沢土壤はpH4の人工酸性雨では負荷酸濃度の4倍量の塩基性陽イオン

が流出し（図4），中層及び下層のpHはつくば土壤より低くなり交換性Alが現れた（表6，図2）

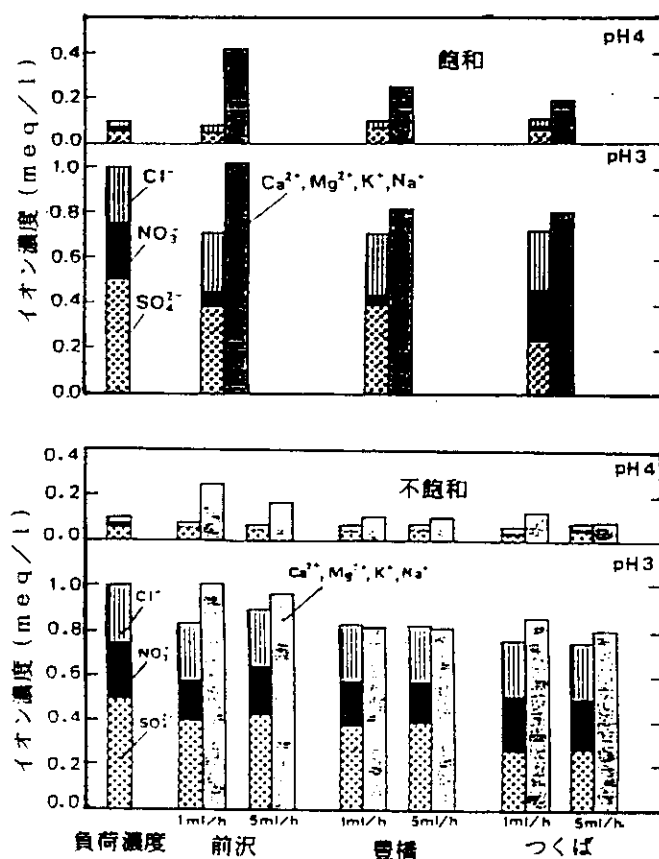


図4. 飽和および不飽和浸透実験における流出液中のイオンの平均濃度（飽和浸透実験でAlが溶出した場合はAlが溶出しない期間の平均値を示す。不飽和浸透実験については人工酸性雨浸透開始後、イオンの流出が定常的になってからの値を示す。）

表6. 飽和浸透実験後の土壤pH (H₂O)

		pH3	pH4	原土
前沢	上	4.00	5.39	6.17
	中	4.20	5.72	
	下	4.71	5.70	
豊橋	上	3.58	4.62	4.80
	中	3.68	5.18	
	下	3.90	5.22	
つくば	上	4.08	5.10	5.89
	中	4.28	5.85	
	下	4.28	5.88	

表7. 飽和浸透実験後つくば土壤のSO₄²⁻保持量 (mg/g乾土)

	原土	pH3	pH4
上層		3.97	-
中層	2.15	4.21	0.22
下層		3.39	0.22

不飽和浸透実験でも前沢土壌は流出塩基濃度が高く、浸透速度による差も大きかった（図4）。以上のことから、土壌の塩基の溶出には土壌呼吸等で発生する HCO_3^- の影響が大きいこと、また HCO_3^- 発生の影響は土壌の種類および浸透速度によって異なることがわかる。したがって生態系における土壌ではさらに植物根による HCO_3^- 発生があるので、土壌中の酸収支を評価するにはそれらの影響をも考慮する必要がある。

（5）農業用水の耐酸性緩衝能

①農業用水のpHの度数分布

調査した農業用水の平均pHは7.44を示し、範囲は6.79～8.51にあつて、農業用水基準（pH6.0～7.5，農林省公害研究会⁶⁾，1970，）の下限値を下回るものはなく，調査した全農業用水の90％がpH7～pH8の範囲に入った（図5）。

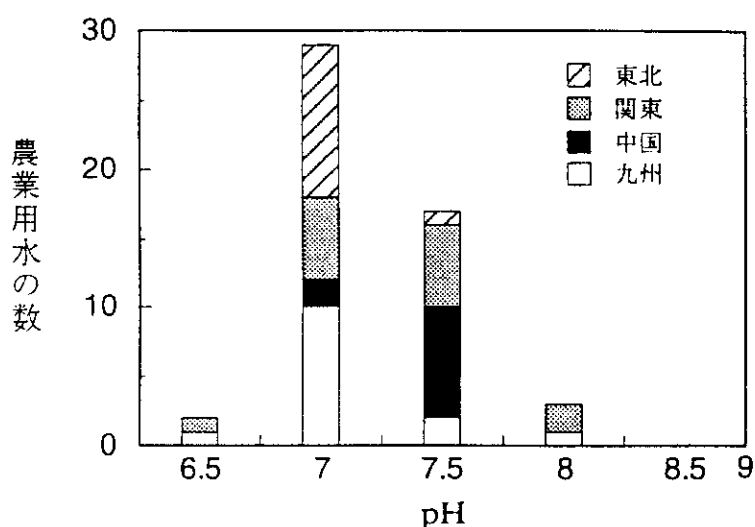


図5. 農業用水のpHの度数分布

②人工酸性雨の添加による農業用水のpHの変化（滴定曲線）

人工酸性雨（0.001N混酸，pH3， $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{HCl} = 2 : 1 : 2$ ）による滴定曲線の勾配はpH6付近までは緩く，pH緩衝能を示したが，pH6付近から急となり，pH4付近から再び緩くなった（図6）。

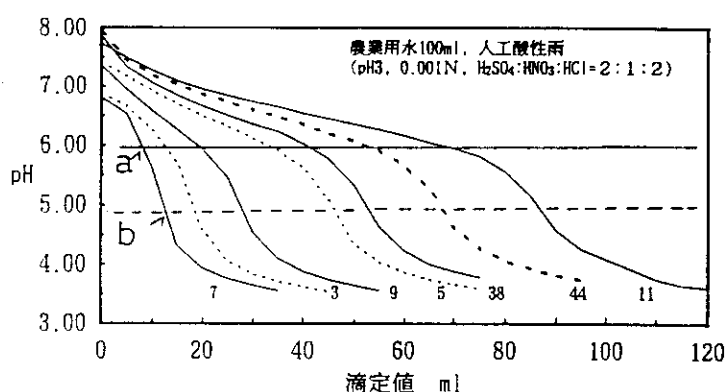


図6. 人工酸性雨の添加による農業用水のpH変化（滴定曲線）

a: pH6終点酸滴定量 b: pH4.8終点酸滴定量（アルカリ度）
図中の数値は農業用水の試料番号

どの用水もほぼ類似のパターンを示した。農業用水基準の下限値であるpH6は農業用水が緩衝能を失い始める境界値とほぼ一致し、農業用水の耐酸性緩衝能を求める際の滴定終点としてアルカリ度の終点であるpH4.8よりも適切であると考えられた。

pH6に至るまでの酸滴定量（ $y \mu\text{eq/l}$ 、以後pH6終点酸中和能と記す）とpH4.8に至るまでの酸滴定量（アルカリ度、 $x \mu\text{eq/l}$ ）の関係は次式に示すとおりであった。

$$y = 0.837x - 41.2 \quad r = 0.996$$

③農業用水のpH6終点酸中和能の度数分布

調査した農業用水のpH6終点酸中和能は $139 \mu\text{eq/l} \sim 2135 \mu\text{eq/l}$ の範囲にあり、平均値は $502 \mu\text{eq/l}$ を示した。その度数分布を地方別にみると、東北地方及び中国地方が関東地方及び九州地方に比べて低い傾向にあった（図7）。また、地方や集水域の面積によらず、石灰岩地帯を上流域とする4農業用水のアルカリ度は一様に高い値を示した。

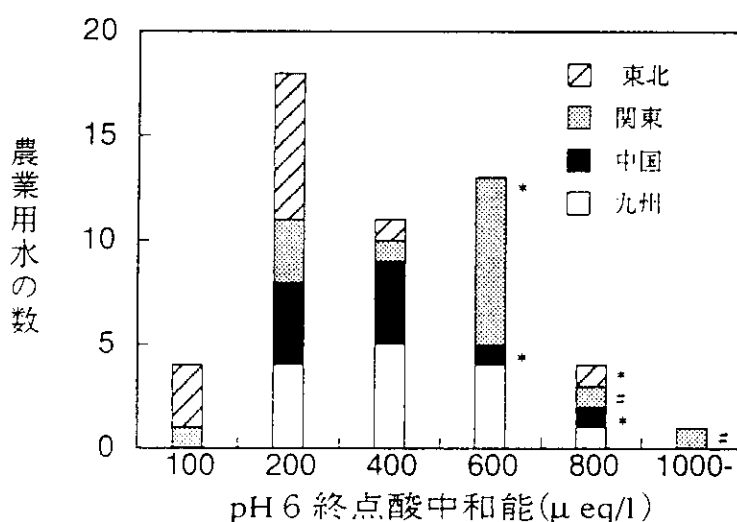


図7. 農業用水の酸中和能の度数分布

1)：農業用水のpHが6.0に至るまでの酸滴定量。

*印：取水河川上流部が石灰岩地帯に属する。

#印：取水河川上流部の面積が広く、都市域を含む。

なお、アルカリ度がアニオン合計（主としてアルカリ度、 SO_4 、 Cl ）に占める割合は、全平均の53%に対し、石灰岩地帯で68%と高いこと及び東北地方において37%と低いことが特徴的であったが、中国地方は関東、九州地方と大差は認められなかった。Caがカチオン合計（主としてCa、Mg、Na）に占める割合は全平均の59%に対し、石灰岩地帯で73%と高く、東北地方及び中国地方において50%程度で低いことが認められた。小林ら⁴⁾は、東北地方の河川水のアルカリ度が低い原因を集水域の新第三紀層の地質と結びつけて考えている。

④農業用水の耐酸性緩衝能の評価

酸性雨に対する農業用水の緩衝能に関する検討はア。森林、原野から集水されて水の水質が形成される場面、イ。湛水期間中に田面水が直接降水の影響を受ける場面、ウ。水田中で水と土壌が関係する場面、それぞれにおいて行われるべきである。しかし、ここではイ。を単純化し、pH6終点酸中和能が小さい用水1000mm（減水深分）と強い酸性雨1,000mm（湛水期間中の降水量）の中和を考えると、pH6終点酸中和能 $100 \mu\text{eq/l}$ の中和に対応する降水の酸度はpH4である。この観点

だけからみれば、降水の酸性化が進み年平均pHが4に至るまでは農業用水の酸性化の危険は小さいものと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

人工酸性雨処理による各種植物の葉の可視被害の発現、光合成速度の低下程度に明かな種間差が認められた。クロロフィル含量（相対値）と光合成速度（相対値）との間に有意な相関関係が認められることから酸性雨による光合成低下の主要因はクロロフィルの低下によるものと推定された。

各種農作物における人工酸性雨のpHと収量とのドース・レスポンス関係は、pH3.0（水稻では2.5）以上では乾物重の低下は認められず、それ以下では、酸性度に従って直線的に乾物重が減少した。その低下度合により、農作物はハツカダイコン、ハウレンソウ、チンゲンサイ、カブ、ニンジン、インゲンマメ、サラダナ、水稻の4グループに分けられた。

人工酸性雨による可視被害発現は、花卉類の花弁が葉部よりも高い感受性を示し、種間差の外に品種間差も認められた点から、指標植物選定にあたっては、品種レベルをも考慮する必要がある。酸性雨と O_3 を短期的に暴露した場合、可視被害に関しては、極度のpH及び高 O_3 濃度条件下では一部の種で交互作用がみられるものの、現在観測される濃度条件下では O_3 の影響はほとんど受けないか、相加的な作用を示すにとどまると考えられる。

土壌の酸緩衝能の主体は交換性塩基とのイオン交換であり、一般的に塩基飽和度がおよそ3%以下に低下した時点で Al^{3+} が溶出するものと考えられる。アロフェン質土壌は SO_4^{2-} 吸着力が強く、 SO_4^{2-} 負荷濃度が 0.25mmol/l では約50%を吸着した。ただし土壌の SO_4^{2-} 吸着による酸中和能を評価する場合には初期 SO_4^{2-} 吸着量と液相 SO_4^{2-} 濃度の比を考慮する必要がある。加速度的浸透実験では非アロフェン質黒ボク土と赤黄色土で脱窒による NO_3^- 消失作用が湛水条件下だけでなく好気的条件下でも認められた。一方、 NO_3^- 生成の影響については十分評価できなかった。酸濃度が低い負荷条件では土壌からの塩基溶出には土壌内で発生する HCO_3^- の影響が大きく、 HCO_3^- 発生量は土壌の種類および土壌水の浸透速度によって異なった。したがって土壌中の酸収支を評価しようとする場合は土壌水の浸透速度や土壌呼吸、植物根の影響を考慮する必要がある。

全国各地の河川を取水源とする水田灌漑用の農業用水51点を採取して水素イオン濃度、アルカリ度等を測定し、耐酸性緩衝能を調べた。その結果、平均pHは7.44を示し、範囲は6.79～8.51にあって、農業用水基準（pH6.0～7.5）の下限値を下回るものはなかった。また、pH6終点酸中和能は $1.39\mu\text{eq/l}$ ～ $2,135\mu\text{eq/l}$ の範囲にあり、降水の年平均pHが4に至るまでは農業用水の酸性化の危険は小さいものと考えられた。

6. 引用文献

- 1) Forsline, P. L., R. J. Dee, and R. E. Melious.: J. Amer. Soc. Hort. Sci., 108, 202～207, 1983.
- 2) Irving, P. M.: Environ. Exp. Bot., 25, 327～338, 1985.
- 3) Irving, P. M.: In: National Acid Precipitation Assessment Program (NAPAP). Interim assessment: the cause and effects of acidic deposition, Vol. IV, Washington, D. C., 6.1～6.50, 1987.

- 4) 小林純・森井ふじ・村本茂樹・中島進・浦上佳子・西崎日佐夫・寺岡久之・長尾憲人：農学研究, 55(3), 125, 1976.
- 5) Neufeld, H. S., J. A. Jernstedt, and B. L. Haines: New Phytol., 99, 389~405, 1985.
- 6) 農林省公害研究会：昭和44年度公害研究会報告, 1970.
- 7) 野内勇：大気汚染学会誌, 25, 295~312, 1990.
- 8) Trites, L. F., R. G. S. Bidwell: Can. J. Bot., 65, 1121~1126, 1987.

国際共同研究等の状況

共同研究名：牧草の生育に及ぼす酸性雨の影響

カウンターパート：チェコスロバキア草地研究所 N. Gaborcik 研究員

研究発表の状況

M. Satoh and N. Gaborcik: Influence of acid rain on photosynthesis and growth of tall fescue cultivars. Proceedings of the 14th General Meeting of the European Grassland Federation 141~143, 1992.

佐藤光政：雑草および作物葉の生理機能に対する人工酸性雨の影響。雑草研究 38(別1), 54~55, 1993.

大黒俊哉・根本正之・野内 勇：人工酸性雨とオゾンの暴露が数種雑草および農作物の可視被害の発現に及ぼす影響。雑草研究 38(3), 223~229, 1993.

麓多門・真弓洋一：湿性酸性降下物（酸性雨）に対する土壌の緩衝能について。日本土壌肥料学会新潟大会, 1992.

麓多門・岩間秀矩：弱い酸の負荷による土壌からの陽イオン溶出。日本土壌肥料学会沖縄大会, 1993.