

人工気象室を利用した酸性雨影響模擬実験 －酸性雨の土壌への影響（第2報）－

【大気・地球環境室】

九鬼貴弘、吉田篤史、田中長義、田中卓実、尾田喜夫

The influence of acid rain on soil

Takahiro KUKI, Atsushi YOSHIDA, Osayoshi TANAKA, Takumi TANAKA, Yoshio ODA

Abstract

Acid rain (acid deposition) in Tottori Prefecture has been detected and recorded for many years now. Although the effects of acid rain are recognizable, the exact influences on the ecosystem are not well-understood. Moreover, although the ecosystem is known to express many buffer functions against acid rain, the mechanisms and limits of these buffer functions are relatively unknown. Furthermore, we are unable to predict the trajectory of the impact of acid rain on ecosystems. The soil system is the key point of consideration when researching the influence of acid rain on ecosystems. Before rainwater filters into the water system or is absorbed by plants, it must permeate through soil (Fig1-1).

Actual soils have separate layers, are in the range of depth 0cm to about 100cm, each layer has different properties (physical properties, or components), exists in different atmosphere, and influenced each factors. After arriving at the surface of the earth, rainwater is thought to change its properties by interaction in process of infiltrating through the soil, and the changes are seem to be inflected in "Infiltration water of soil", and that seems to supply the information about the influences of acid rain against inland water system and plant (Fig1-2).

Taking things described above into consideration, we made experiment columns simulated "the soil layers", described above, of Andisol in Mt. Daisen and Brown forest soil in Mt. Hyonosen, and sprinkled "Artificial Acid Rain" made on basis upon the rainfall components data (Fig2-6). Then we measured the acidities and the concentrations of components of "Infiltration water of soil" from the each layer, and obtained some knowledge about the influences of acid rain on soil (the buffer effect by soil against acid, elution of Al and basic cations from soil), that following;

- 1) According to the pH data of "Infiltration water of soil", the soils have buffer abilities, and there seems to be little possibility that the acidification on the experimented soils occurs in 10 years from now.
- 2) The dissolved Al, elutes from soil and influence plant and inland water system, was detected in "Infiltration water of soil" from 1st soil layer, but was no detected or detected very low level in it from the soil layer (depth : about 1m). It seemed to be at the result of becoming insoluble on its way of infiltration.
- 3) In a part of the 1st layer of the soil in Mt. Hyonosen, it is suggested that acidification of the soil and increase of dissolved Al may occur.
- 4) Although it is observed that the wash away of basic action from soil in the 1st soil layer, is not in deeper layer.

1 はじめに

酸性雨は県内各地で観測されているが、現在のところ、明らかに酸性雨が原因である生態系への影響は確認されていない。生態系の緩衝能が大きいことによると言われるが、その機構や限界について不明な点が多く、また将来的にどうなるか判っていない。

降水の大半は土壤に浸透して水系に流れ込み、また植物に吸収されることから、土壤は酸性雨の生態系への影響を考える上での要といえる (Fig. 1 - 1)。

これを念頭に、県内の代表的な土壤 (黒ボク土壤、マサ土、砂丘未熟土) の表層土 (深さ 0 ~ 20cm) への人工酸性雨降下実験と大山黒ボク土壤についての調査を実施し、黒ボク土壤の表層部の酸性度が強いこと等が判った。¹⁾

ところで、自然の状態の土壤は、表層から深層へと何層かに別れていて、層毎に性質 (物理的性質、成分含有量等) が異なる。一方、地表に達した降水は、土壤表層から深層部へと浸透していき、その過程で土壤との相互作用等による変化を受けると考えられ (土壤の酸緩衝作用もその1つである)、土壤浸透水はそれを反映し、また、水系や植物への影響を評価する上でより直接的な情報を与えらると思われる (Fig. 1 - 2)⁵⁾。

また、同じ場所の土壤でも層毎に受ける作用や置かれる状況が異なり、浸透した降水も深層まで達するものもあれば、比較的浅い部分を流出するものもある。

以上のことを踏まえ、当所に設置されている人工気象室内に、県内山岳部の代表的な土壤である黒ボク土壤 (大山)、褐色森林土壤 (氷ノ山) の「土壤層」をカラムで再現し、降雨装置を用いて降水観測データを基に成分組成を調製した「人工酸性雨」を降下させ、それぞれの土壤層からの浸透水の酸性度・成分濃度を測定してその推移を追ひ、酸性雨の土壤への影響 (緩衝作用とAl、塩基溶出) に係る若干の知見を得た (Fig. 1 - 3)。

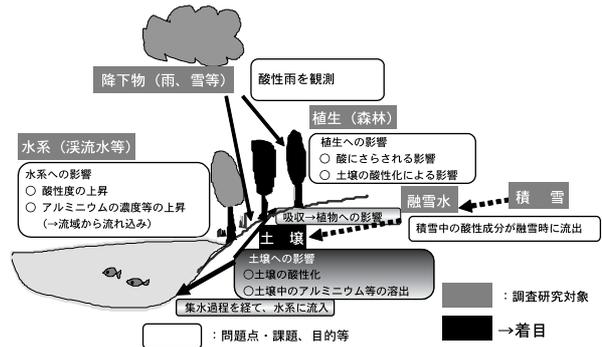


Fig. 1 - 1 酸性雨の生態系影響における土壤の位置付
降った雨や雪は、土壤に浸透して植物に吸収又は水系に流入。
生態系への影響を考える上で土壤が重要。
着目 (室内実験)。

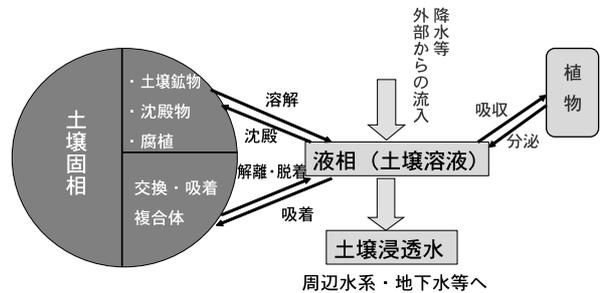


Fig. 1 - 2 「土壤浸透水」について
土壤浸透水は、土壤浸透の過程で起こる変化を反映するとともに、水系や植物への影響を考える上で、より直接的な情報を与えらると思われる。

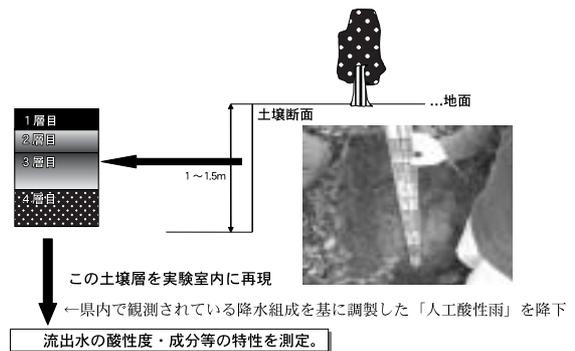


Fig. 1 - 3 実際の土壤と再現
...上~下へと層に分かれ、層位毎に性質が異なる

2 方法

- 1) 供試土壤 (Fig. 2 - 2 ~ 2 - 5、Table 2 - 2、2 - 3 参照)
- (1) 酸性雨の影響を受けやすいと思われる山岳部で、現地調査データを得た以下の2地点の、2ヶ所/地点 × 2地点 = 4ヶ所の土壤を供試した。

大山山麓ブナ林黒ボク土壌（鳥取県西伯郡大山町地内）：「平成15年度環境省酸性雨モニタリング調査（土壌・植生）」実施地点の土壌。表層部（～30 cm）では酸性度が強いが、それ以深はまだ弱い。

氷ノ山スギ林褐色森林土壌（鳥取県八頭郡若桜町地内、兵庫県境付近）：土壌・植生の影響実態調査実施地点の土壌。周辺で降水、水系（渓流水）調査も実施。表層部の酸性度は大山と同程度であるが、深層部で大山より酸性度が強かった（酸性雨が原因であるか否かは未解明）。

大山プロット の深さ90cm以深及び氷ノ山プロット の深さ80cm以深では、岩石層となっていた。

- (2) これら4ヶ所（調査区域：プロット、）で、中心部に幅約1m×奥行約2m×深さ約1mの穴を掘り、その一面（斜面上方側）に土壌調査断面を作成して現地調査・層位分け（土性・土色等で分ける）し、各層毎に土壌を採取した。
- (3) (2)を風乾・粉碎、ふるい通し（孔径2mm）して調製した「風乾細土試料」を供試した。

2) 「土壌層」の再現に必要な「風乾細土試料量」の算出・秤取

現地調査結果（層分類、層厚）及び土壌（細土）密度・水分含量測定結果を基に、以下のとおり算出。

- (1) 現地土壌各層の土壌（細土）密度（g/cm³）を以下のとおり測定した。

試料採取時に、各層毎に不攪乱土壌試料を採取（容積100cm³の円筒採土器に採取）して持ち帰った。

の不攪乱試料を磁性蒸発皿（恒量測定済）に取り出し、乾燥機（105～110℃）で1昼夜乾燥後放

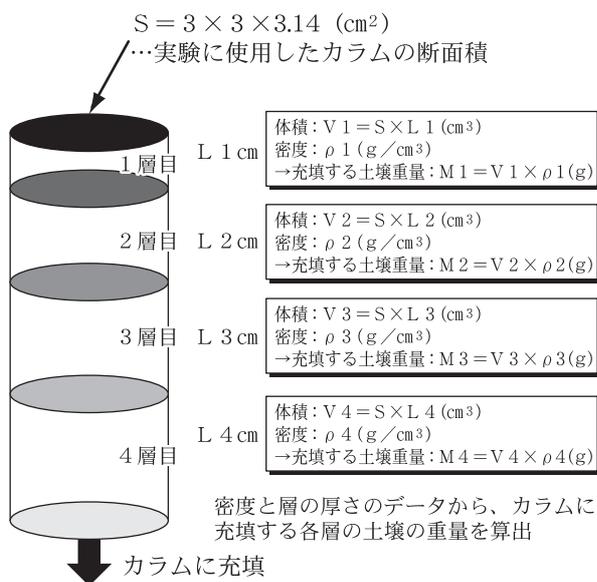


Fig. 2 - 1 「土壌層」の再現について

冷。

を孔径2mmのふるいに通したものを先の蒸発皿に戻し、乾燥機で1晩乾燥、デシケーター内で放冷後、重量測定し、現地土壌の単位体積当たりの粒径2mm以下の細土の乾物重量を算出。

- (2) 現地調査で、1層目、2層目…、のように層分けする際に決定する各層の厚さL cmと、作成しようとする土壌層カラムの断面積（内径6 cm $S = 3 \times 3 \times 3.14 = 28.26 \text{ cm}^2$ ）から、各土壌層がカラム断面積と同じ広さで占める際の体積 $V = L \times S \text{ (cm}^3\text{)}$ を算出した。
- (3) (1)で調製した「風乾細土試料」の水分含量を測定し、ア、イの結果と併せて、各土壌層の「風乾細土試料」で現地土壌層を再現するのに必要な各層土壌の「風乾細土試料」の重量を算出した（図2 - 1、表2 - 1参照。大山プロット に係る密度データが得られなかったため、プロット のデータを代用して算出）。
- (4) (3)で算出した必要量の各場所・各層の「風乾細土試料」をビニール袋（ジッパー付）に測り取り、カラムの透水性を確保するため、供試土壌の重量の1/10量のテフロン製沸騰石を添加・混合した。

Table 2 - 1 各層の土壌密度と再現に必要な風乾物量

地 点	土 壌 種	プロット	土 壌 層	各 土 壌 層 の 範 囲	風 乾 細 土 試 料 密 度	カラム断面積分の各層の体積	必要な風乾細土試料の重量
				(cm)	(g // cm ³)	(cm ³)	(g)
大山ブナ林	黒ボク土壌	プロット	1層目	0～10	0.229	283	65
			2層目	10～30	0.652	565	369
			3層目	30～50	0.751	565	424
			4層目	50～90	0.847	1130	957
氷ノ山スギ林	褐色森林土壌	プロット	1層目	0～10	0.292	283	82
			2層目	10～20	0.520	283	147
			3層目	20～40	0.512	565	289
			4層目	40～80	0.629	1130	711
			1層目	0～10	0.334	283	94
			2層目	10～30	0.418	565	236
			3層目	30～70	0.468	1130	529
			4層目	70～120	0.575	1413	812

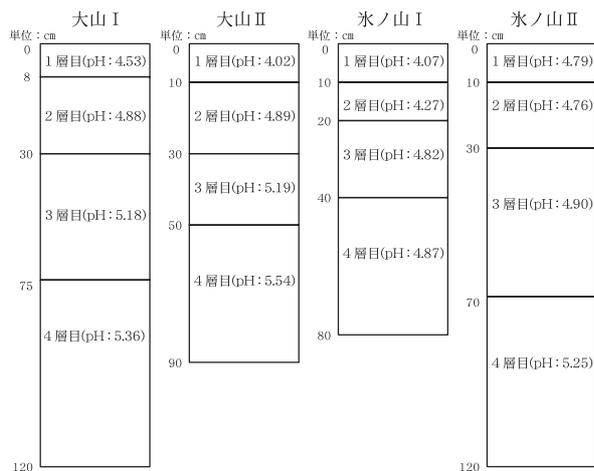
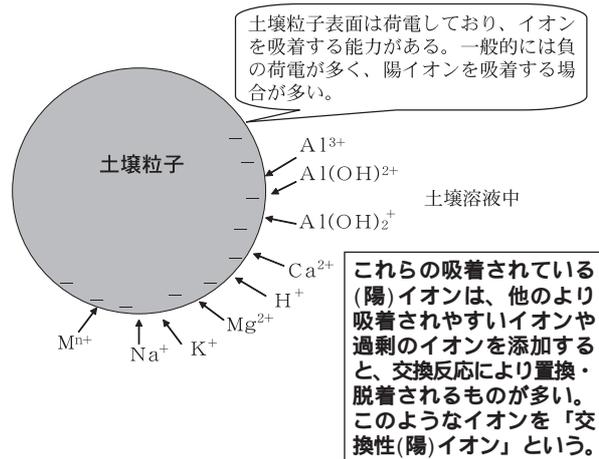


Fig. 2 - 2 実験に供した大山、氷ノ山各土壌層の厚さ、及びpH（実験前値）



酸性雨等でH⁺が土壌に加わっても、吸着されているCa²⁺等のイオンとのイオン交換反応により、H⁺は吸着・固定されて、土壌溶液中の酸性度は保たれる。これが「土壌の緩衝能」の大きな要因の1つであるが、限界がある。

Fig. 2 - 3 「交換性陽イオン」について

Table 2 - 2 実験前の土壌の交換性陽イオン測定結果（大山ブナ林黒ボク土壌）

土壌層	交換性K	交換性Mg	交換性Na	交換性Ca	交換性Al	交換性H
	単位：(cmol(+))/kg					
- 1層目	0.350	0.720	0.159	2.32	6.88	1.22
" 2層目	0.113	0.140	0.097	0.241	3.61	0.679
" 3層目	0.059	0.032	0.102	0.043	0.631	0.498
" 4層目	0.057	0.014	0.042	0.023	0.130	0.220
- 1層目	0.536	1.36	0.334	5.67	7.33	1.61
" 2層目	0.112	0.136	0.131	0.323	4.25	0.316
" 3層目	0.031	0.024	0.055	0.0093	0.434	0.388
" 4層目	0.058	0.013	0.062	0.0029	0.000	0.236

Table 2 - 3 実験前の土壌の交換性陽イオン測定結果（氷ノ山スギ林褐色森林土壌）

土壌層	交換性K	交換性Mg	交換性Na	交換性Ca	交換性Al	交換性H
	単位：(cmol(+))/kg - 土壌					
- 1層目	0.375	0.938	0.145	1.48	9.18	1.01
" 2層目	0.237	0.262	0.104	0.347	8.27	0.511
" 3層目	0.117	0.082	0.088	0.093	2.78	0.197
" 4層目	0.099	0.056	0.078	0.056	2.30	0.100
- 1層目	0.539	1.71	0.171	8.67	2.75	0.398
" 2層目	0.177	0.152	0.101	0.311	3.21	0.169
" 3層目	0.098	0.062	0.072	0.154	1.50	0.201
" 4層目	0.123	0.047	0.077	0.094	0.191	0.191

cmol(+)/kg - 土壌 = mmol(+)/100g - 土壌 = meq/100g - 土壌
 ...イオンの吸着量は自身と土壌表面の電荷に依存するのでイオンの価数（電荷数）を考慮

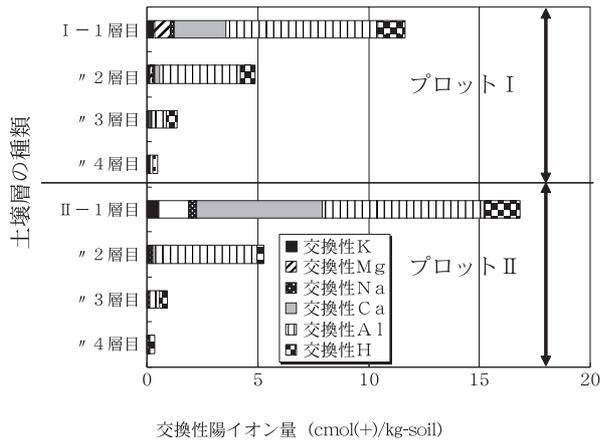


Fig. 2 - 4 実験前の各土壌層の交換性陽イオン組成 (大山ブナ林黒ボク土壌)

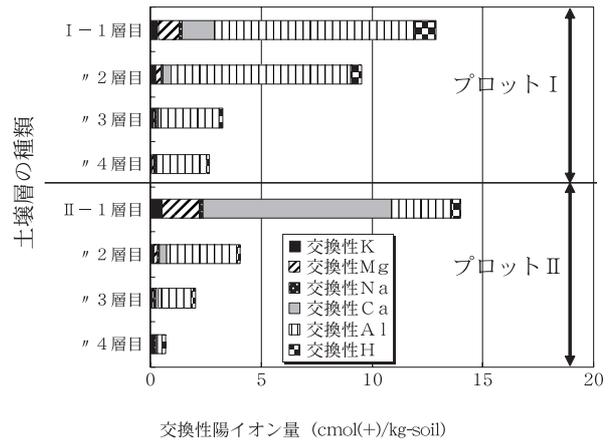


Fig. 2 - 5 実験前の各土壌層の交換性陽イオン組成 (氷ノ山スギ林褐色森林土壌)

3) 装置の組立

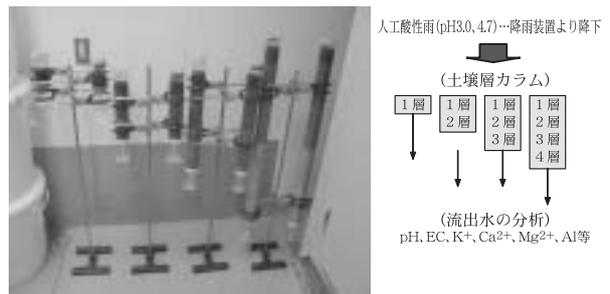
- (1) 市販の亚克力樹脂製パイプ (長さ 1 m、内径 6 cm) を、配管切断機を用いて適当な長さ (土壌層充填部用) 組み立てる土壌層の高さに応じて決定) に切断。
- (2) 人工酸性雨が確実に土壌を通過するように(1)の内壁にテフロン製グリースを塗布して撥水性を与えた。
- (3) (2)のパイプ2個 (土壌層充填部用 + 雨よけ部用) を、樹脂製ウールを載せた同じ内径 (受け部分の内径) のポリプロピレン製漏斗 (内径 6 cm) を挟んで接着剤で接合させた。
- (4) (3)を実験用クランプ、スタンドを用いて固定させ、大型漏斗にテフロン製チューブを繋げたものを用いて、各層の土壌試料(2)のとおり必要量を算出、調製したものを攪乱しないよう注意しながら、下層から順に充填した。
- (5) 層毎の情報を得るため、4層に層位分けした各土壌について、以下のとおり土壌層を再現した (Fig. 2 - 6 参照)²⁾。

- a) 1層目
降水が1層目通過後の浸透水に係る知見
- b) 1層目 + 2層目
降水が2層目通過後の浸透水に係る知見
- c) 1層目 + 2層目 + 3層目
降水が3層目通過後の浸透水に係る知見
- d) 1層目 + 2層目 + 3層目 + 4層目
降水が4層目到達後の浸透水に係る知見

このような実験系 (土壌層) を、氷ノ山褐色森林土壌 - a) ~ d)、氷ノ山褐色森林土壌 - a)、b) については2連組み立てた。他の実験系 (氷ノ山褐色森林土壌 - c)、d)、大山黒ボク土壌、) については、試料の都合上1連とした。なお、ブランク試験 (降雨装置や雰囲気及びカラムの材質の影響を確認) を行い、降

下した人工酸性雨の実測値を得て解析に供することを目的として、テフロン製沸騰石100 gのみを詰めたカラムを2連作成した。

- (6) (1)~(5)を2種の人工酸性雨 (pH3.0、4.7) の実験系両方について行った。



深さ別の情報を得るため、以下のとおり土壌層を再現。写真左から順に a) b)

- a) 1層目
降水が1層目を通過後の浸透水を測定
- b) 1層目 + 2層目
" 2層目を通過後の "
- c) 1層目 + 2層目 + 3層目
" 3層目を通過後の "
- d) 1層目 + 2層目 + 3層目 + 4層目
" 4層目に到達後の浸透水を測定

Fig. 2 - 6 土壌カラムの組立

...各層毎の土壌を順に充填し、深さの異なる土壌層を再現

4) 人工酸性雨の調製

県内の最近10年間の降水データ (Table 2 - 4 参照) を基に調整した。

実験に用いる土壌が、大山黒ボク土壌、氷ノ山褐色森林土壌 (いずれも山岳地帯の土壌) であることを踏まえ、この実験に用いる「人工酸性雨」は、県内4地点の降水データのうち、山間部である若桜町の (氷ノ山スキー場) の降水データを基に、2種類のもの (pH4.7、pH3.0、共存する他のイオン濃度は同じ) を調製し、別々に降下させた。濃度設定の考え方、及び調製方法は以下のとおり。

- (1) 若桜町の観測地点の降水データ (酸性度、成分組成)

Table 2 - 4 鳥取県内の降水データ平均 (1994~2003年度平均)
...観測地点毎・項目毎に加重平均したもの

項 目		平野部				山間部	平均
		鳥取市	倉吉市	米子市	平野部平均	若桜町	
年降水量	(mm)	1797	1641	1493	1644	2082	1863
pH		4.64	4.80	4.78	4.73	4.73	4.73
H ⁺	($\mu\text{eq/l}$)	22.9	15.9	16.7	18.5	18.6	18.5
NH ₄ ⁺	($\mu\text{eq/l}$)	30.5	36.1	46.2	37.6	17.3	27.4
Ca ²⁺	($\mu\text{eq/l}$)	30.1	28.1	37.4	31.9	12.5	22.2
Mg ²⁺	($\mu\text{eq/l}$)	49.9	33.8	42.4	42.0	14.9	28.5
K ⁺	($\mu\text{eq/l}$)	6.46	6.82	8.14	7.14	3.16	5.2
Na ⁺	($\mu\text{eq/l}$)	203	147	169	173	58.6	115.9
SO ₄ ²⁻	($\mu\text{eq/l}$)	73.1	64.7	66.7	68.2	37.6	52.9
NO ₃ ⁻	($\mu\text{eq/l}$)	27.3	25.9	27.1	26.8	15.6	21.2
Cl ⁻	($\mu\text{eq/l}$)	237	172	195	201.3	66.4	133.8
HCO ₃ ⁻	($\mu\text{eq/l}$)	0.25	2.99	5.99	3.1	1.47	2.3
陰イオン合計	($\mu\text{eq/l}$)	324.0	234.7	286.6	281.8	120.7	201.2
陽イオン合計	($\mu\text{eq/l}$)	329.1	272.5	311.1	304.2	125.2	214.7
nss-SO ₄ ²⁻	($\mu\text{eq/l}$)	50.1	47.0	49.1	48.7	30.6	39.7
nss-Cl ⁻	($\mu\text{eq/l}$)	-1.2	-0.3	-1.4	-1.0	-1.9	-1.4
nss-Ca ²⁺	($\mu\text{eq/l}$)	24.6	21.7	30.1	25.5	10.0	17.7
nss-Mg ²⁺	($\mu\text{eq/l}$)	3.8	4.0	4.0	3.9	1.63	2.8
nss-K ⁺	($\mu\text{eq/l}$)	2.3	3.7	4.6	3.5	1.92	2.7
nss-SO ₄ ²⁻ / NO ₃ ⁻	当量比	1.83	1.82	1.81	1.82	1.96	1.89

今回、大山黒ボク土壌、氷ノ山褐色森林土壌 (いずれも山岳地帯の土壌) について行う実験に用いる「人工酸性雨」は、山間部の若桜町の降水データを基に調製。

の最近10年間の加重平均を算出。

- (2) (1)を基に、以下のとおり人工酸性雨の濃度設定を行った。

人工酸性雨 (pH4.7) : 実際の状態に関する知見を得るために設定。成分濃度、酸性度ともアの数値を使用。

人工酸性雨 (pH3.0) : 他の共存イオン濃度を実際レベルに保ちつつ、酸性度を高めて調製。酸の継続負荷による変化を捉え、将来の影響予測等に関する知見を得るため設定。成分濃度 アの数値を使用、酸性度 pH3.0 (降雨装置の限度値) とする。

- (3) 具体的調製方法等

[H⁺] は全てH₂SO₄、HNO₃由来として、添加するH₂SO₄、HNO₃量を決定。

塩として存在するイオン濃度の設定、調製は以下のとおり。

- 降水データと の算出結果から、塩として存在するNO₃⁻、SO₄²⁻濃度を算出。
- a) を海塩性 (ss) のものと非海塩性 (nss) のものとに分類。
- a) と b) の結果とを合わせて算出。他の溶存陽・陰イオンについても決定。

特級試薬を用いて の濃度の1000倍溶液

(原液) を調製し、これを蒸留水で希釈 (25ml 25 L重量希釈) して目的濃度の人工酸性雨を調製。

- 人工酸性雨の降下・土壌浸透水の回収・量算定
人工気象室2室の2組の降雨装置を用い、2)、3) で作成した「土壌層カラム」に4) で調製した2種の人工酸性雨 (pH4.7、3.0) をそれぞれ別々に降下させ、浸透水を装置に取り付けたボトルに回収した。降下方法・浸透水の回収方法等は以下のとおり。
 - 人工酸性雨の降下 : 1回の実験につき、人工酸性雨を40mm/hの強度で3~5分間連続降下させる操作を約10分間隔で約2~3時間にわたって繰り返した。
 - 土壌浸透水の回収 : アの操作終了後約1夜放置し、土壌層カラムを通過・浸出してきた「土壌浸透水」を、あらかじめ取り付けておいた重量既知の500ml細口ポリ瓶 (重量mo (g)) に集めた。
 - 降水量の算定 : イの土壌浸透水入りポリ瓶の重量m (g) を測定し、重量差m - mo (g) をポリ瓶に回収された浸透水量 (降水量) V (g ml = cm³) とし、土壌カラムの断面積S (cm²) から、降水量 (「土壌層カラム」を通過した人工酸性雨量) X (mm) を以下のとおり算定した

$$X \text{ (mm)} = V \text{ (cm}^3\text{)} / S \text{ (cm}^2\text{)} \times 10 \text{ (mm/cm)}$$

(4) 酸負荷量 (降水年分) の算定

pH3.0の人工酸性雨降下実験での解析の際、ウで算定した降水量を基に、降下させた酸負荷量を実際の降水 (pH4.7) ベースで何年分になるかを以下のとおり算出し、以降の解析の際の尺度とした。

$$Y \text{ (年分)}$$

$$= X \text{ (mm)} \times 10^{-3.0} / 10^{-4.7} \div 2000 \text{ (mm/年)}$$

$$= \{ V \text{ (cm}^3\text{)} / S \text{ (cm}^2\text{)} \times 10 \text{ (mm/cm)} \}$$

$$\times 10^{-3.0} / 10^{-4.7} \div 2000 \text{ (mm/年)}$$

(5) 降下した人工酸性雨の実測：土壌を詰めないカラムからの浸透水(3) - (5)参照) を測定し、各土壌に降下した「人工酸性雨の実測値」として解析した。

6) 土壌浸透水の分析 (項目・方法)

5) で得られた浸透水を、以下のとおり分析した。

- (1) pH：得られた浸透水をガラス電極法で測定。
- (2) EC：同上 導電率法で測定。
- (3) 溶存イオン類 (Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺等)：得られた浸透水をディスク型メンブランフィルター (MILLIPORE MillexR-LH孔径0.45μm) で濾過し、イオンクロマトグラフ法で測定。

(4) 溶出金属類 (Al等)：

得られた浸透水をディスク型メンブランフィルター (MILLIPORE MillexR-LH孔径0.45μm) で濾過し、ICP発光分析法で測定。

3 結果及び考察

1) 浸透水の酸性度について

pH4.7の人工酸性雨を降下させた結果をFig. 3 - 1に、pH3.0による結果をFig. 3 - 2に示す。

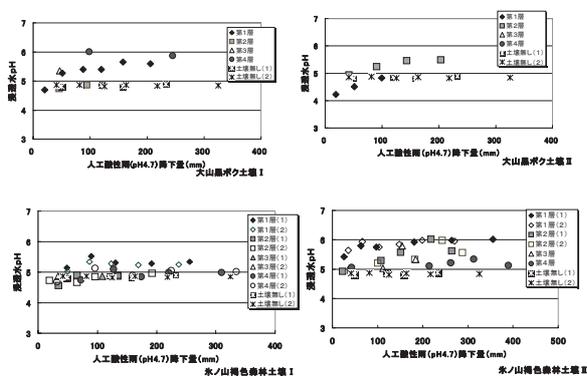


Fig.3-1 人工酸性雨 (pH4.7) を降下させたときの土壌各層の浸透水pHの推移

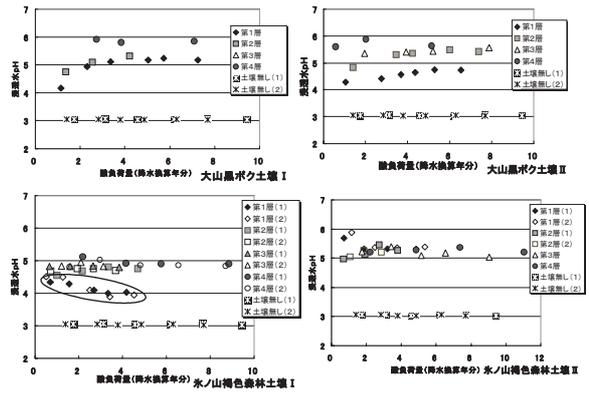


Fig.3-2 人工酸性雨 (pH3) 降下による酸負荷量と流出水pHの推移

- (1) どの土壌浸透水も、降下させた人工酸性雨よりもpHが上昇しており、土壌の種類・層によって差があるものの、土壌が酸 (酸性雨) を中和する能力があることが示された。
- (2) どの土壌の浸透水も、第1層目 (深さ0~10cm) を通過した段階で、pH実験前の土壌pH値を超える程度まで上昇している。これは、1層目土壌に交換性陽イオンのうちの塩基性のもの (Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺) が多く含まれており、添加された酸 (H⁺) がこれらとのイオン交換反応で浸透水中から取り去られるためであると考えられる。
- (3) 第2層目以下深の土壌層からの浸透水について、大山黒ボク土壌では浸透に伴って中和が進んでpHが上昇 (第4層目土壌の浸透水pHで5台後半まで上昇) していたが、深層部の酸性度も比較的強い氷ノ山褐色森林土壌では、それ以上の中和の進行はほとんど無かった。
- (4) 第4層目土壌 (今回の実験土壌層の最深部、深さ80~120cm) を通過した浸透水は、降下させた人工酸性雨のpH値によらず、その箇所の実験前の土壌pH値前後の値となっていた。
- (5) 人工酸性雨 (pH3.0) によって、降水ベースで10年前後分の酸を降下させたところ、氷ノ山褐色森林土壌の第1層目土壌からの浸透水のpHが4.0付近まで低下した。なお、これ以外の土壌層浸透水のpH低下は観測されなかった。
- (6) 供試した土壌は、表層部は実験前の状態 (現在の状態) で酸性度が強い状態である (Fig. 2 - 2、2 - 4、2 - 5、Table 2 - 2、2 - 3) が、(5)よりそれ以上の酸性化は少なくとも今後数年以内には起こりにくいものと思われる。また、ある程度以上の深い部分はまだ比較的酸性化が進行しておらず、酸緩衝能もあると思われる。ただ、氷ノ山の土壌については、pH低下が認められたものもあり、また、大山よりも深層

部の酸性度が強く、酸性化が進行しやすい状況にあると考えられ、フィールド調査も含めて今後も注視する必要がある。

3) 土壤浸透水中の溶存Alについて

元来Al化合物は、土壤の骨格となる粘土鉱物を構成することから土壤中には固体として多量に存在する。これが土壤の酸性化に伴って溶出し、生育する植物に影響を及ぼし、さらに水系に流入して魚類等の水生生物に影響を及ぼすとされることから、本実験でも、土壤からのAl溶出に着目した。

pH4.7の人工酸性雨を降下させた結果をFig. 3 - 3 に、pH3.0のものによる結果をFig. 3 - 4 に示す。

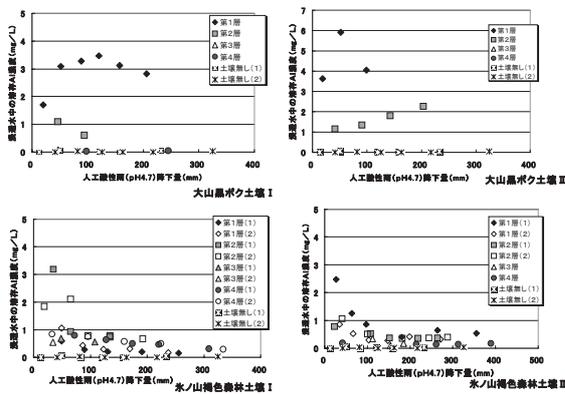


Fig.3-3 人工酸性雨(pH4.7)降下時の浸透水の溶存Al濃度の推移

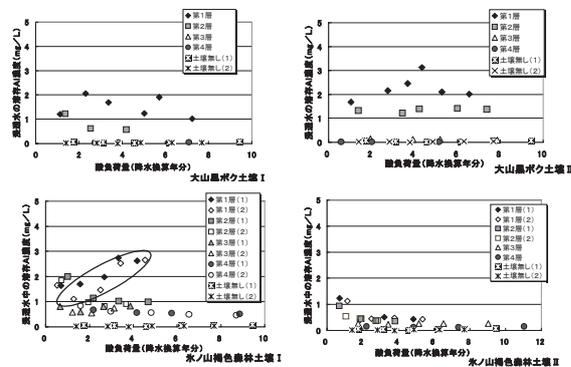


Fig.3-4 人工酸性雨(pH3.0)降下時の浸透水の溶存Al濃度の推移

(1) どの土壤も表層部(第1層目、2層目)の浸透水で2~3 mg/L前後の濃度の溶存Alが検出されたが、3層目、4層目の浸透水では不検出又は低濃度となっていた。今回実験に供した土壤は、1層目、2層目で、実験前の時点で酸性度が強く、溶出しやすい交換性Alが多く存在している。これが溶出しても第3、第4層まで降下していないことが判った。その理由について判らないが、下層に移動する途中で、沈殿や吸着等によって不溶化したものと考えられる。

(2) 人工酸性雨(pH3.0)による実験でpH低下傾向が認められた水ノ山褐色森林土壌 第1層の浸透水で、

これに対応した溶存Al濃度の上昇傾向が確認された。当該土壤は、深層部でも交換性Al量が高いので、注視する必要がある。

(3) 溶存Al濃度10mg/Lで植物の地下部(根)の成長が抑制されると報告されているが^{3),4)}、今回の実験で現在のところ得られている「土壤浸透水」の濃度は、いずれもその値よりも低かった。

(4) Alが深層部まで高濃度で溶出する可能性は低いが、表層部(~30cm)では溶出しやすい形態(交換性Al)のものが多く存在しており、浸透水の溶存Alも継続して検出されていることから(特に大山)、植物への影響以外にも、豪雨時等に降水が深層部まで浸透せずに表層部を通過して一気に流出する場合の水系への影響等についても検討する必要がある。また、酸を20年分、30年分添加していった場合の推移を注視する必要がある(特に水ノ山褐色森林土壌)。

3) 土壤浸透水中の溶存塩基(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)について pH4.7の人工酸性雨を降下実験結果をFig. 3 - 5 ~ 3 - 7 に、pH3.0によるものをFig. 3 - 8 ~ 3 - 10 に示す。

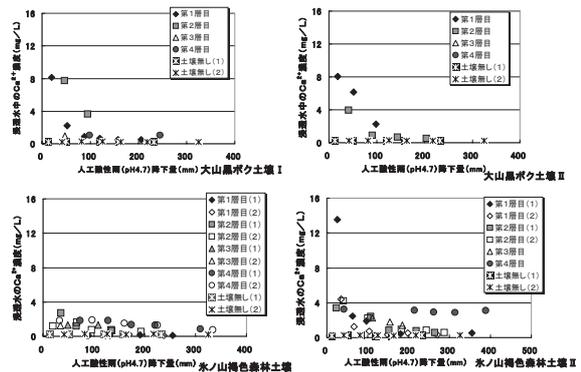


Fig.3-5 人工酸性雨(pH4.7)降下時の浸透水のCa濃度の推移

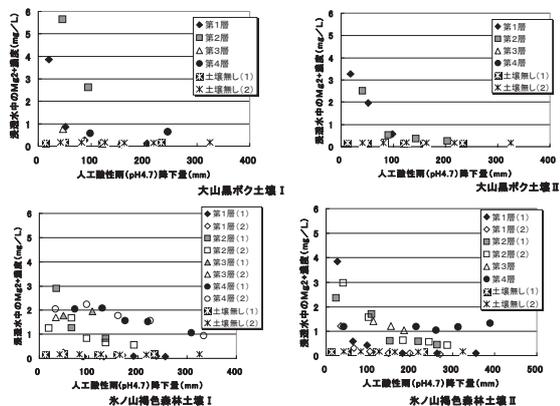


Fig.3-6 人工酸性雨(pH4.7)降下時の浸透水のMg濃度の推移

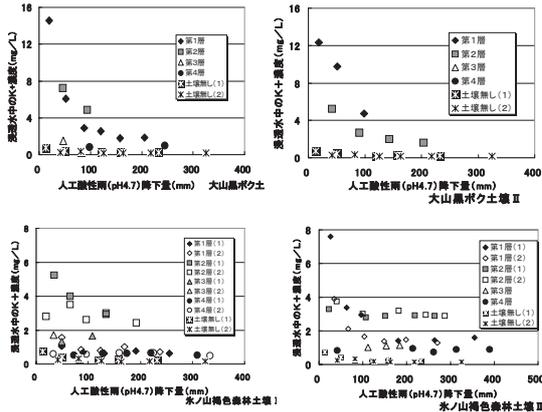


Fig.3-7 人工酸性雨(pH4.7)降下時の浸透水のK濃度の推移

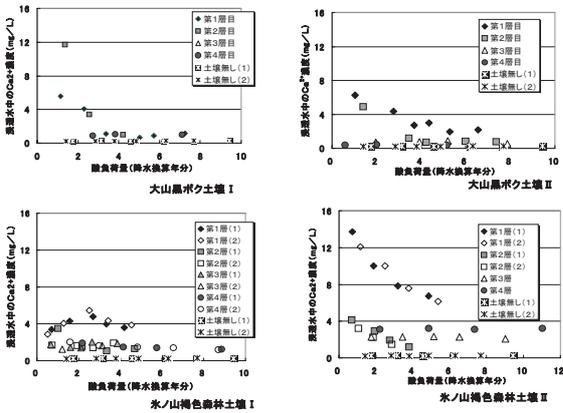


Fig. 3-8 人工酸性雨(pH3.0)による酸負荷に伴う浸透水のCa濃度の推移

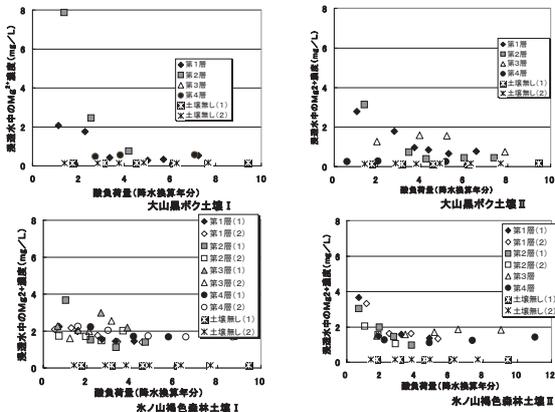


Fig. 3-9 人工酸性雨(pH3.0)による酸負荷に伴う浸透水のMg濃度の推移

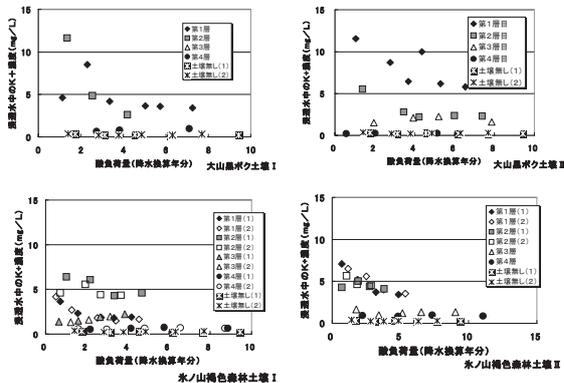


Fig. 3-10 人工酸性雨(pH3.0)による酸負荷に伴う浸透水のK濃度の推移

- (1) いずれの土壌も第1層目～2層目で高い濃度となり、これが(1)の陽イオン交換反応による酸緩衝作用に対応しているものと思われる。なお、酸の添加量増加とともに減少していくことから、酸緩衝作用に伴って表層の塩基が溶出・流亡することが示唆された。
- (2) 一方、深層部土壌の浸透水中のこれらの濃度は比較的強く変動も小さかった。第3層目～4層目土壌では交換性陽イオン量が比較的少ないことに加え、表層部で陽イオン交換反応による酸緩衝の結果、浸透水がこの位置に達する段階では流れてくる流出水の酸性度が低くなっており、H⁺によるこれらの陽イオンの新たな交換・溶出が生じにくいと考えられる。また、表層部で溶出したこれらの陽イオンが移動する途中で吸着されたり、分散する影響も考えられる。
- (3) これらは、酸の緩衝作用以外にも植物の栄養成分としても欠くことができないが、土壌中の栄養状態 (Ca、Mg、K量) とAlの影響に係る指標として、「土壌溶液 (土壌の液相)」中の (Ca + Mg + K) / Alモル比が多く用いられ、この値が1を下回ると、植物成長に影響が生じる (成長抑制) とされている^{4), 6)}。この実験で得られた「土壌浸透水」の結果は「土壌溶液」の状態を反映すると考えられることから、その結果から当該モル比を算出し、Fig. 3 - 11、3 - 12に示した。

人工酸性雨 (pH 4.7) による結果 (Fig. 3 - 11)

- a) 上述の考え方で現在の状況を推測するため、実際の降水レベルの人工酸性雨の実験結果から求めた当該数値は1層目<2層目<3層目<又は4層目となり、人工酸性雨降下量の増加に伴う変動は小さかった。
- b) どの土壌層についても>1で、現在の状態が植物成長に影響を生じる状態ではないと考えられるが、水ノ山褐色森林土壌の表層部で低い状況であり (第1層目: 0.94~1.71、第2層目: 2.1~2.7)、注視する必要がある。

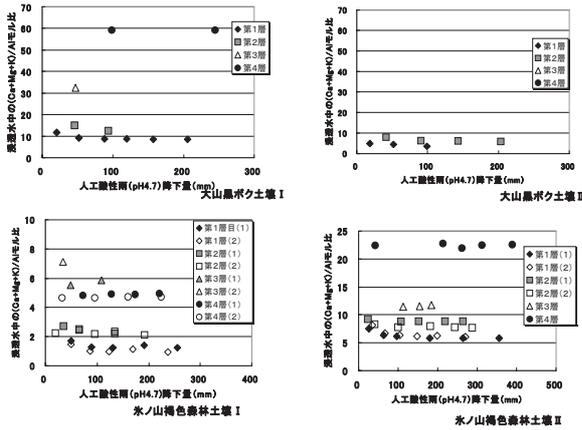


Fig. 3-11 人工酸性雨(pH4.7)降下時の浸透水中の溶存(Ca+Mg+K)/Alモル比の推移

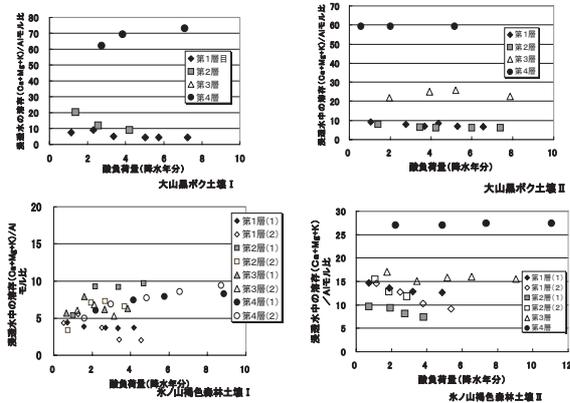


Fig. 3-12 人工酸性雨(pH3.0)による酸負荷に伴う浸透水中の溶存(Ca+Mg+K)/Alモル比の推移

人工酸性雨 (pH3.0) による結果 (Fig. 3 - 12)

- 上述の考え方で、将来の状況を予測するため、酸性度の高い人工酸性雨の実験結果から求めた当該数値は、表層で低く深層で高いという傾向はと同じであったが、降下させる人工酸性雨の酸性度が強いことでCa、Mg、Kの溶出が促進されると考えられることから、数値はよりも高かった。
- 氷ノ山の第1層目で当該値が低下傾向となり、酸性雨が継続した場合の土壤の栄養状態の悪化傾向が示唆された。なお、3層目以下では確認されなかった。

4 まとめ

1) 酸性度の進行について

各土壤層からの流出水pHの推移より、現在以上の酸性化は今後10年以内には起こりにくいと考えられたが、氷ノ山表層土壌では酸性化の可能性も示唆された。

2) 溶存Alについて

- 表層土壌 (第1層目、2層目) の浸透水で比較的高

濃度の溶存Alが検出されたが、深層部では不検出又は低濃度であり、表層付近で溶解していたAlが下層に移動する過程で、酸性度が低下して沈殿又は吸着等されたものと考えられる。ただ、酸が継続添加されて下層部も酸性化した場合の再溶出も考えられる。なお、表層部の検出濃度は植物の生長を抑制するレベルではなかった。

- 大山黒ボク土壌表層部で比較的高い濃度のAlを検出し、氷ノ山土壌の第1層目は酸負荷に伴い濃度の上昇傾向が認められたことから、酸が継続添加された場合の濃度推移 (下層部も含めて) や、水系への流出による影響についても知見を得る必要がある。

3) 塩基類 (Ca, Mg, K)、及び栄養状態について

- 表層部土壌で塩基の溶出・流亡が確認されたが、深層部では確認されなかった。
- Al影響と栄養状態を示す指標値である「(Ca + Mg + K) / Al (モル比)」を算出したところ、実験に供したほとんどの土壌で、現在のところ植物の生長に影響を及ぼす状況ではなく、また数年後もそのような状況になる可能性は低いと考えられたが、氷ノ山の一部の表層部土壌では、実際レベルの人工酸性雨による実験データで算出した当該値が影響が出始めるとされる値 (< 1) に近い値であり、またpH3.0の人工酸性雨による実験データで算出した当該値が低下傾向であることから、注視する必要がある。

4) 実験データ適用に向けての留意点

- 現在、降水ベースで約10年分酸を負荷した状態 (10年後の状況) までのデータを得ているが、酸性雨の影響が長期的なものであることを踏まえ、さらに先の状態のデータを得る必要がある。特に、酸性化の影響の可能性が示唆された氷ノ山土壌の経過を注視し、継続実験で確認するとともに、土壌の変化を捉える必要がある。
- この研究では、夾雑物を除去して均一化・風乾・粉碎・篩通した土壌についての、水平な条件での実験データを得たこととなるが、実際の土壌では、植物の影響や、地形の影響等がある。

今後は、このような要素も押さえ、この実験結果を実際の場の予測・評価に適用する。

参考文献

- 九鬼貴弘他 (2004) 「鳥取県衛生環境研究所報第44号」 p82~87
- 飯村康二・本名俊正他 (1994) 「酸性雨の日本海沿岸における実態と砂丘地の土壌 - 植物生態系に及ぼす

- 影響 (平成3～5年度科学研究費補助金研究成果報告書) p42～88
- 3) 佐竹研一編 (2000) 「酸性雨研究と環境試料分析 - 環境試料の採取・前処理・分析の実際 -」 愛智出版 p92～114
- 4) 佐竹研一編 (1999) 「酸性環境の生態学 - 酸汚染と自然生態系を科学する -」 愛智出版 p135～154
- 5) 一國雅己・岡崎正規編 (1989) 「土の化学 - 季刊化学概説 4」 学会出版センター p96～109
- 6) 環境庁地球環境部監修 (1997) 「地球環境の行方 酸性雨」 中央法規