

酸性雨の土壌への影響について*

九 鬼 貴 弘¹⁾・吉 田 篤 史¹⁾・田 中 長 義³⁾
田 中 卓 実²⁾・尾 田 喜 夫¹⁾

キーワード ①土壌層 ②土壌浸透水 ③人工酸性雨 ④酸性化 ⑤緩衝能 ⑥Al ⑦塩基

要 旨

鳥取県内でも観測されている酸性雨の水系や植物等生態系への影響が懸念されるが、降水は一旦土壌に浸透して水系に流出又は植物に吸収されることから、土壌は生態系への影響を考える上での要であるといえる。そこで、採取してきた土壌を実際の状態(表層から深層へと層状に分かれている)に近づけて充填した「土壌層カラム」を作成し、降水観測データを基に調製した「人工酸性雨」を継続的に降下させ、浸透水の酸性度と溶出成分濃度の推移を追い、以下の知見を得た。

- (1) 浸透水の pH は降下させた「人工酸性雨」の値よりも高く、土壌の緩衝能が示された。
- (2) 土壌から溶出して植物や水系に影響を及ぼすとされるアルミニウムは、表層土壌からの浸透水中に検出されたが、深層(深さ1m前後)からのものは不検出又は低濃度であった。表層で溶解していたものが下方に移動する途中で不溶化したものと考えられた。
- (3) 表層土壌で塩基性陽イオンの溶出・流亡が確認されたが、深層では確認されなかった。
- (4) 今後10年以内の土壌の酸性化は起こりにくいと考えられたが、一部の表層土壌で酸性化と溶存アルミニウム濃度の上昇傾向が認められた。

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、明らかに酸性雨を原因とするような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。

降水の大半は土壌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、土壌は酸性雨の生態系への影響を考える上での要といえる(図1.1)。

ところで、自然の状態の土壌は、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

*Influence of Acid Rain on Soil

¹⁾Takahiro KUKI, Atsushi YOSHIDA, Yoshio ODA (鳥取県衛生環境研究所) Tottori Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science

²⁾Takumi TANAKA (鳥取県生活環境部 水・大気環境課) Tottori Prefectural Government Division of Water and Air Protection

³⁾Osayoshi TANAKA (元・鳥取県衛生環境研究所)

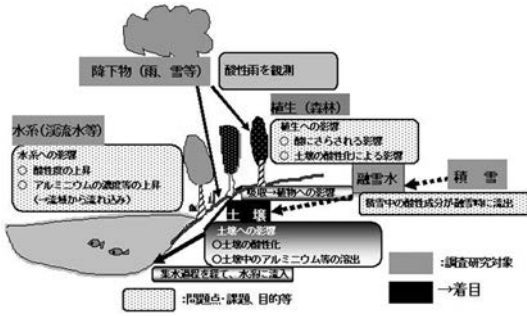


図 1.1 酸性雨の生態系影響における土壌の位置付 (降った雨や雪は、土壌に浸透して植物に吸収又は水系に入流。生態系への影響を考える上で土壌が重要。→着目(室内実験))

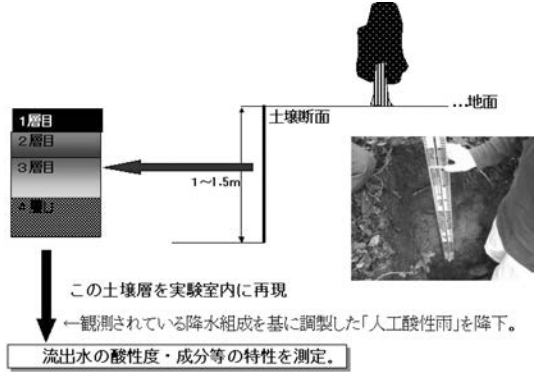


図 1.3 実際の土壌と再現(上～下へと層に分かれ、層位毎に性質が異なる)

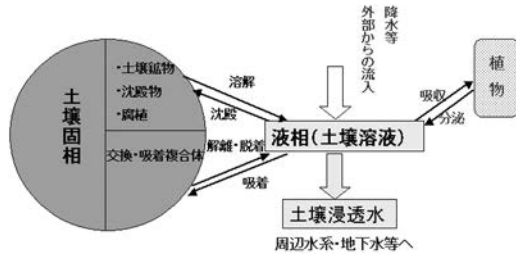


図 1.2 「土壌浸透水」について(土壌浸透水は、土壌浸透の過程で起こる変化を反映するとともに、水系や植物への影響を考える上で、より直接的な情報を与えると思われる)



図 1.4 試料採取地点(現地調査も実施 大山：ブナ林黒ボク土壌(2ヶ所), 氷ノ山：スギ林褐色森林土壌(2ヶ所))

質、成分含有量等)が異なる。一方、地表に達した降水は、土壌表層から深層部へと浸透していき、その過程で土壌との相互作用等による変化を受けると考えられる(土壌の酸緩衝作用もその1つである)。土壌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ると思われる(図 1.2)¹⁾。

また、同じ場所の土壌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壌である黒ボク土壌(大山)、褐色森林土壌(氷ノ山)の「土壌層」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、それぞれの土壌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い、

酸性雨の土壌への影響(緩衝作用と Al, 塩基溶出)に係る若干の知見を得た(図 1.3, 1.4 参照)。

2. 方 法

2.1 供試土壌(図 1.4, 2.2~2.5, 表 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、以下の2地点について、2カ所ずつ計4カ所の土壌を供試した。

①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11月採取)：「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(~30cm)では酸性度が強いが、それ以深はまだ弱い。

②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、平成16年6月採取)：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)。

- 2) これら4カ所(調査区域:プロット I, II)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)に土壤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, 各層毎に土壤を採取した。
- 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。

2.2 「土壤層」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)及び土壤(細土)密度・水分含量測定結果を基に, 以下のとおり算出。

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

- ①試料採取時に, 各層毎に不攪乱試料を採取(容積100cm³円筒採土器に採取)して持ち帰った。
- ②①の試料を磁性蒸発皿(恒量測定済)に取り出し, 乾燥機(105~110℃)で1昼夜乾燥後放冷。
- ③②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, デシケータ内で放冷後, 重量測定し, 現地土壤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Lcmと, 作成しようとする土壤層カラムの断面積(内径6cm→ $S=3 \times 3 \times 3.14=28.26\text{cm}^2$)から, 各土壤層がカラム断面積と同じ広さで占める際の体積 $V=L \times S(\text{cm}^3)$ を算出した。

- 3) 2.1で調製した「風乾細土試料」の水分含量を測定し, 1), 2)の結果と併せて, 各土壤層の「風乾細土試料」で現地土壤層を再現するのに必要な各層土壤の「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

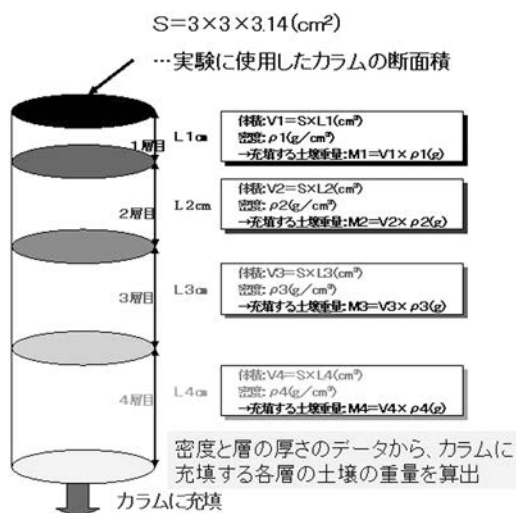


図 2.1 「土壤層」の再現について

表 2.1 土壤層密度と再現に必要な風乾物量

地点	土壤種	プロット No	土壤層	各土壤層の範囲 (cm)	風乾細土試料密度 ρ (g/cm ³)	カラム断面積分の各層の体積 (cm ³)	必要な風乾細土試料の重量 (g)
大山ブナ林	黒ボク土壌	プロット II	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 I	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
	褐色森林土壌	プロット II	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

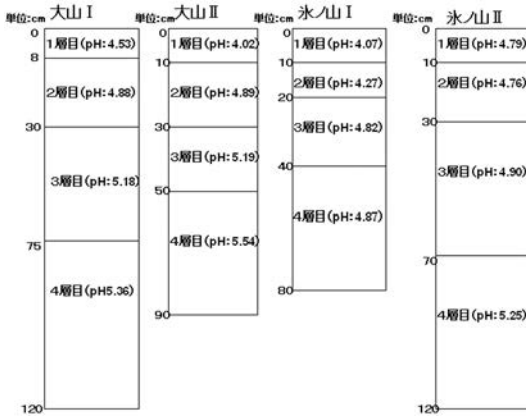


図 2.2 実験に供した大山, 氷ノ山各土壌層の厚さおよび pH(実験前値)

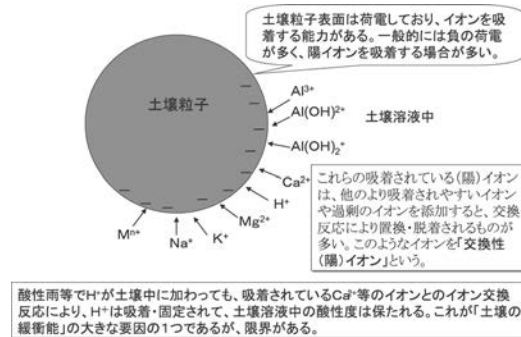


図 2.3 「交換性陽イオン」について

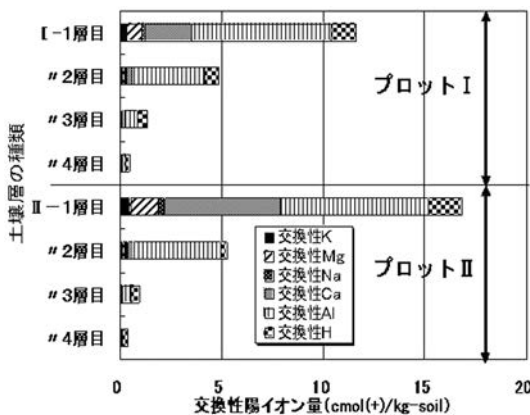


図 2.4 実験前の各土壌層の交換性陽イオン組成(大山ブナ林黒ボク土壌)

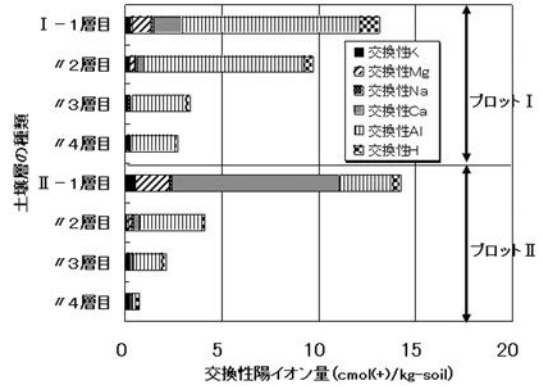


図 2.5 実験前の各土壌層の交換性陽イオン組成(氷ノ山スギ林褐色森林土壌)

表 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	交換性	交換性	交換性	交換性	交換性
	K	Mg	Na	Ca	Al	H
単位: (cmol(+)/kg)						
I-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
II-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

表 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	交換性	交換性	交換性	交換性	交換性
	K	Mg	Na	Ca	Al	H
単位: (cmol(+)/kg-土壌)※						
I-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
II-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

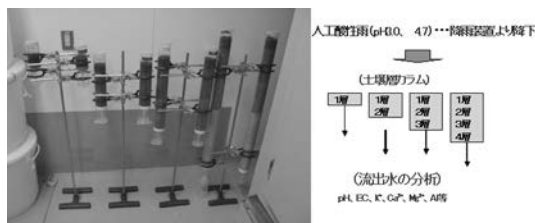
…イオンの吸着量は自身と土壌表面の電荷に依存するのでイオンの価数(→電荷数)を考慮

Iに係る密度データが得られなかったため、プロットII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。

2.3 装置の組み立て

- 市販の亚克力樹脂製パイプ(長さ1m, 内径6cm)を、配管切断機を用いて適当な長さ(組み立てる土壌層の厚さに応じて決定)に切断。
- 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。
- 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6cm)を挟んで接着剤で接合させた。
- 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(2.2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)。
- 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(図2.6参照)²⁾。
 - 1層目
→降水が1層目通過後の浸透水に係る知見
 - 1層目+2層目
→降水が2層目通過後の浸透水に係る知見



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)→(d)
 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

図 2.6 土壌層カラムの組立(各層毎の土壌を順に充填し、深さの異なる土壌層を再現)

- 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I-a)~d), 氷ノ山褐色森林土壌II-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II-c), d), 大山黒ボク土壌I, II)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100g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。

2.4 人工酸性雨の調製

県内の最近10年間の降水データ(表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(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。

- 若桜町の観測地点の降水データ(酸性度、成分組成)の最近10年間の加重平均を算出。
- 1)を基に、以下のとおり人工酸性雨の濃度設定を行った。

①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1)の数値を使用。

②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→1)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

① $[H^+]$ は全て H_2SO_4 , HNO_3 由来として、添加する H_2SO_4 , HNO_3 量を決定。

表 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
NCO ₃ ⁻	($\mu\text{eq/l}$)	0.25	2.99	5.99	3.1	1.47	2.3
陽イオン合計	($\mu\text{eq/l}$)	324.0	234.7	286.6	281.8	120.7	201.2
陰イオン合計	($\mu\text{eq/l}$)	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た「人工酸性雨」は、山間部の若桜町の降水データを基に調製。

②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①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。

③特級試薬を用いて②の濃度の1000倍溶液(原液)を調製し、これを蒸留水で希釈(25ml→25L重量希釈)して目的濃度の人工酸性雨を調製。

2.5 人工酸性雨の降下・浸透水の回収・量算定

人工気象室の2組の降雨装置を用い、2.2、2.3で作成した「土壌層カラム」に2.4 3)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：1)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 m₀(g))に集めた。
- 降水量の算定：2)の土壌浸透水入りポリ瓶の重量 m(g)を測定し、重量差 m-m₀(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。

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

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、3)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。

$$\begin{aligned} Y(\text{年分}) &= X(\text{mm}) \times 10^{-3.0} / 10^{-4.7} \div 2000(\text{mm/年}) \\ &= \{V(\text{cm}^3) / S(\text{cm}^2) \times 10(\text{mm/cm})\} \\ &\quad \times 10^{-3.0} / 10^{-4.7} \div 2000(\text{mm/年}) \end{aligned}$$

5) 降下した人工酸性雨の実測：土壤を詰めないカラムからの浸透水(2.3 5)参照)を測定し、各土壤に降下した「人工酸性雨の実測値」として解析した。

2.6 土壤浸透水の分析(項目・方法)

2.5で得られた浸透水を、以下のとおり分析。

- 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・考察

3.1 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図3.1に、pH3.0による結果を図3.2に示す。

- 1) どの土壤浸透水も、降下させた人工酸性雨よりもpHが上昇しており、土壤の種類・層によって差があるものの、土壤が酸(酸性雨)を中和する能力があることが示された。
- 2) どの土壤の浸透水も、第1層目(深さ0~10cm)を通過した段階で、pH実験前の土壤pH値を超える程度まで上昇している。これは、1層目土壤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層目以深の土壤層からの浸透水について、大山黒ボク土壤では浸透に伴って中和が進んでpHが上昇(第4層目土壤の浸透水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壤では、それ以上の中和の進行はほとんど無かった。
- 4) 第4層目土壤(今回の実験土壤層の最深部、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によらず、その箇所の実験前の土壤pH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、氷ノ山褐色森林土壤Iの第1層目土壤の浸透水pHが4.0付近まで低下した。なお、これ以外の土壤層浸透水のpH低下は観測されなかった。
- 6) 供試した土壤は、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(図2.2, 2.4, 2.5, 表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、氷ノ山の土壤については、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。

3.2 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壌中には固体として多量に存在する。これが土壌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、土壌からの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図3.3に、pH3.0のものによる結果を図3.4に示す。

- 1) どの土壤も表層部(第1層目、2層目)の浸透水で2~3mg/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

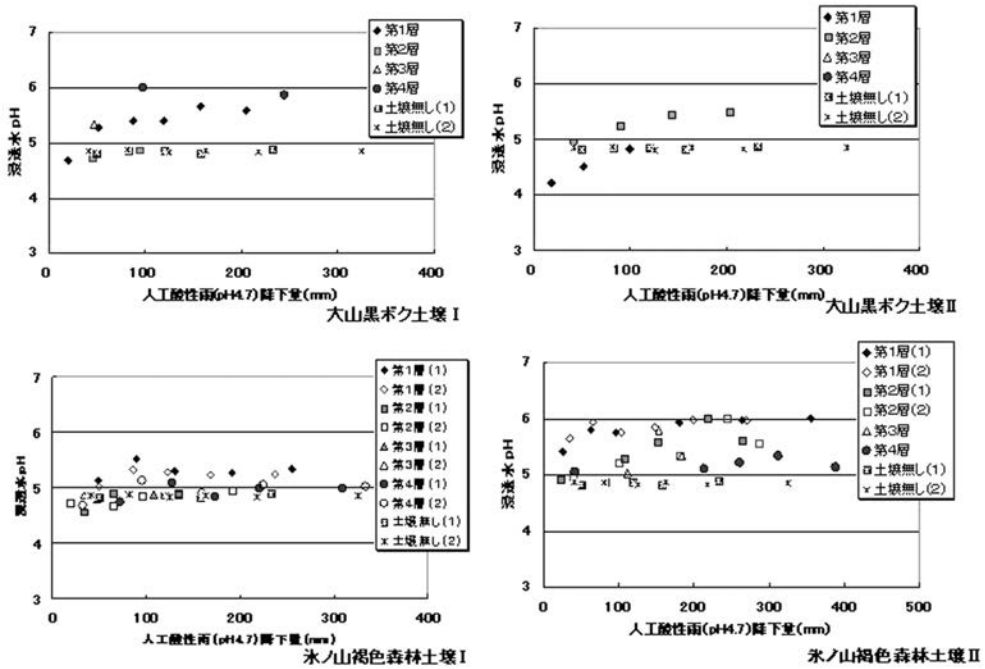


図 3.1 人工酸性雨 (pH 4.7) を降下させたときの土壌各層の浸透水 pH の推移

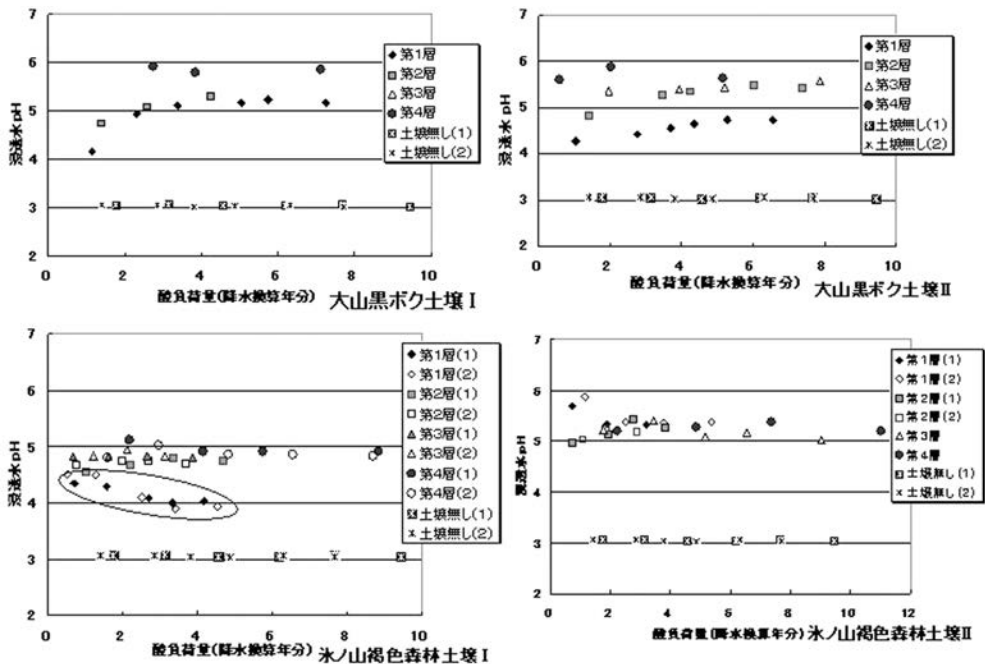


図 3.2 人工酸性雨 (pH 3.0) 降下による酸負荷量と流出水 pH の推移

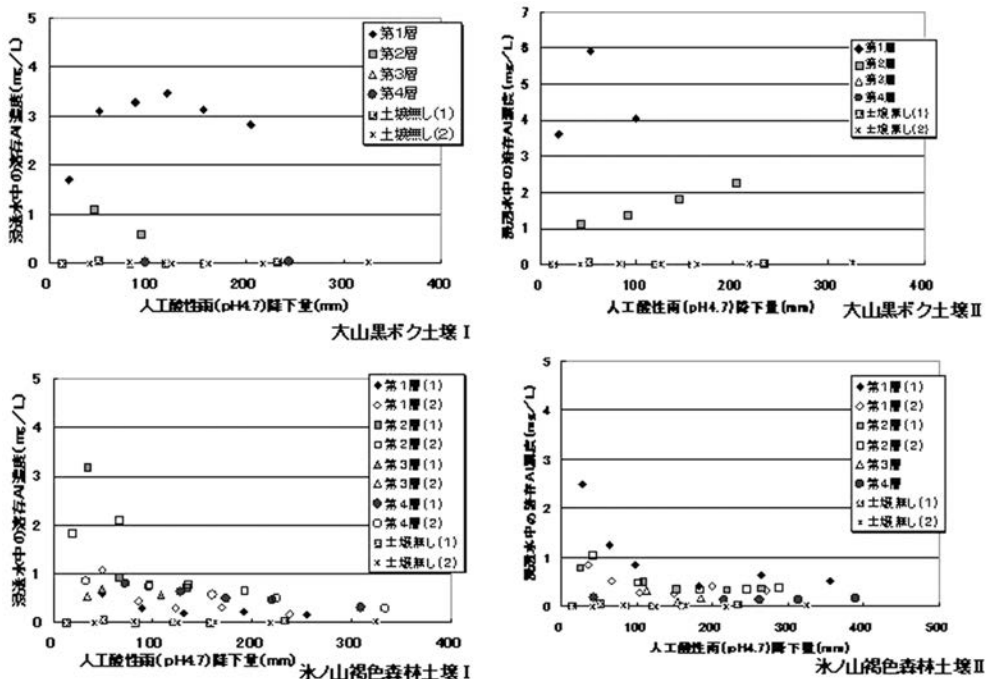


図 3.3 人工酸性雨(pH 4.7)降下時の浸透水の溶存 Al 濃度の推移

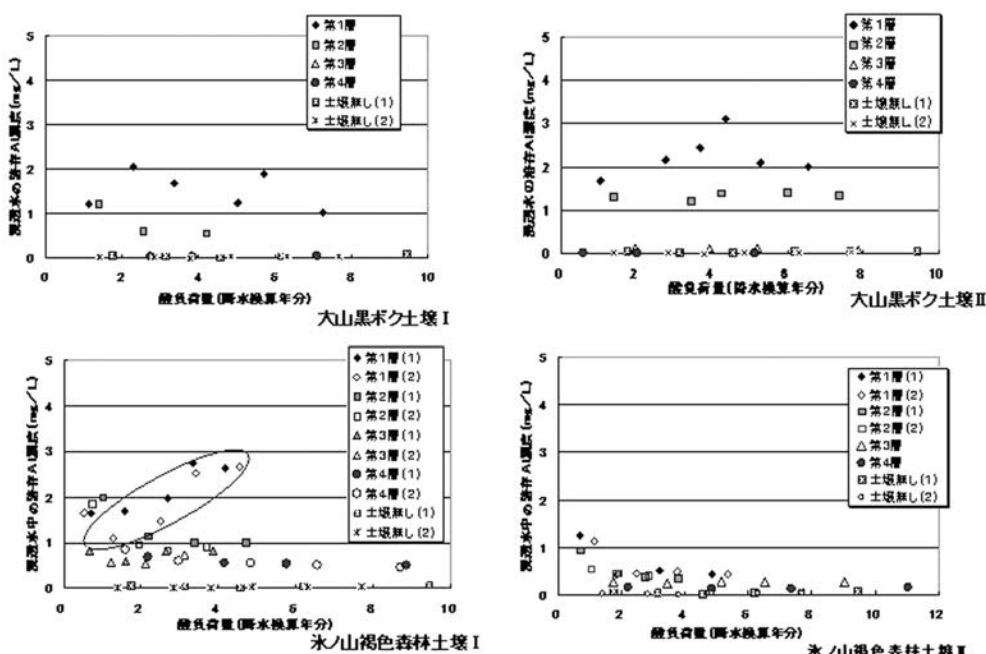


図 3.4 人工酸性雨(pH 3.0)降下時の浸透水の溶存 Al 濃度の推移

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氷ノ山褐色森林土壌 I 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。当該土壌は、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「土壌浸透水」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(特に氷ノ山褐色森林土壌 I)。

3.3 土壌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図3.5～3.7に、pH3.0によるものを図3.8～3.10に示す。

- 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・溶出が生じにくいためであると考えられる。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),5)}。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、**図 3.11, 3.12**に示した。

①人工酸性雨(pH4.7)による結果(図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、人工酸性雨降水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、氷ノ山褐色森林土壌 I 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。

②人工酸性雨(pH3.0)による結果(図3.12)

- a) 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①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①よりも高かった。
- b) 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壌の栄養状態の悪化傾向が示唆された。なお、3層目以降では確認されなかった。

4. ま と め

4.1 酸性度の進行について

各土壌層からの流出水 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。

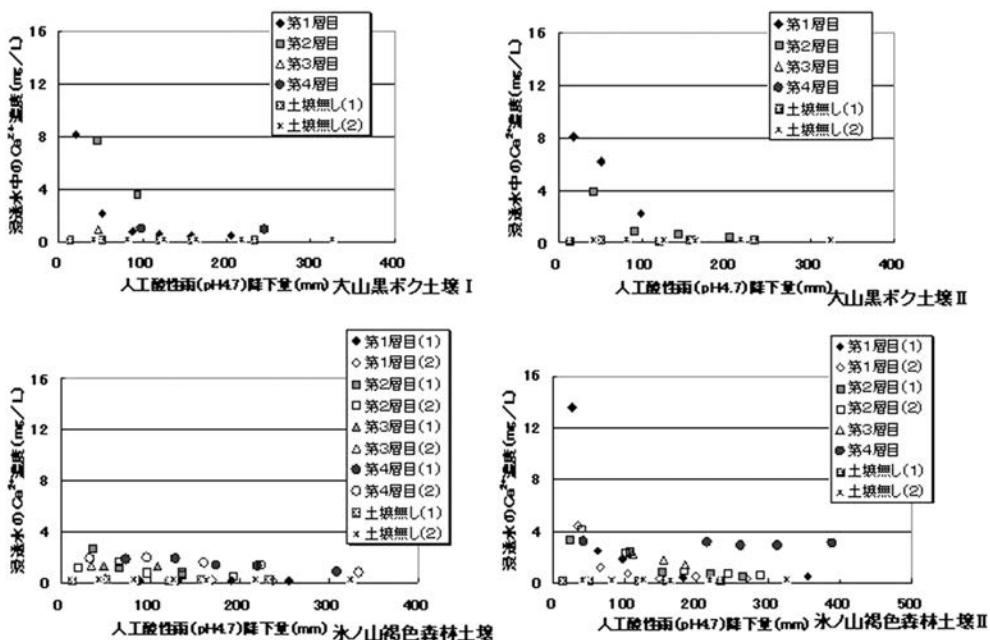


図 3.5 人工酸性雨(pH 4.7)降下時の浸透水の Ca 濃度の推移

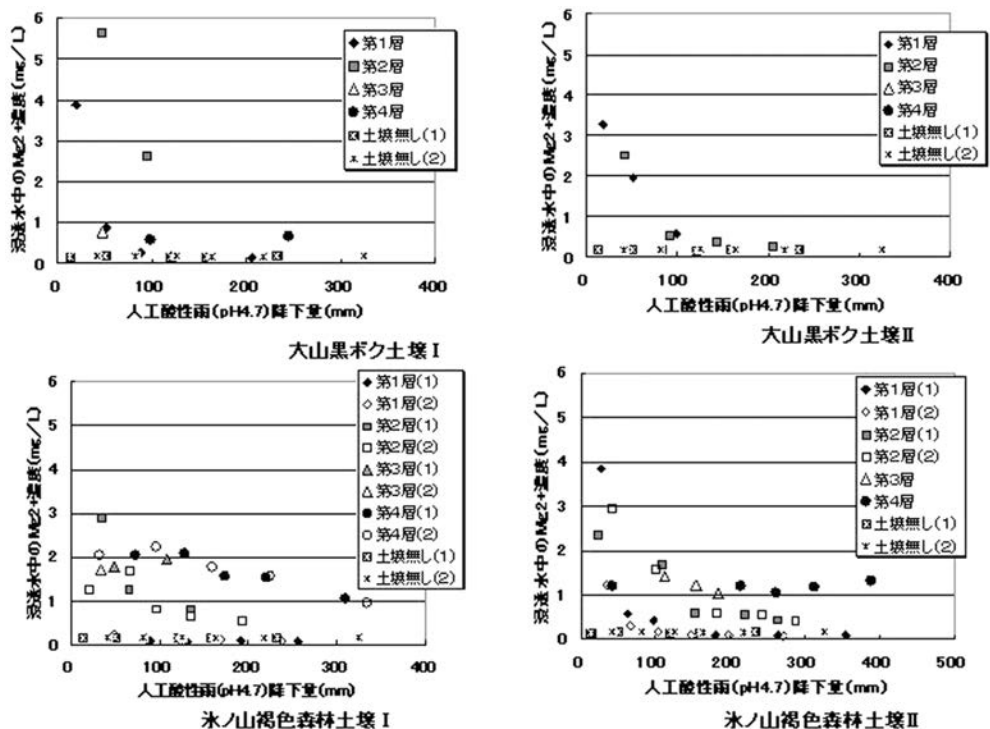


図 3.6 人工酸性雨(pH 4.7)降下時の浸透水の Mg 濃度の推移

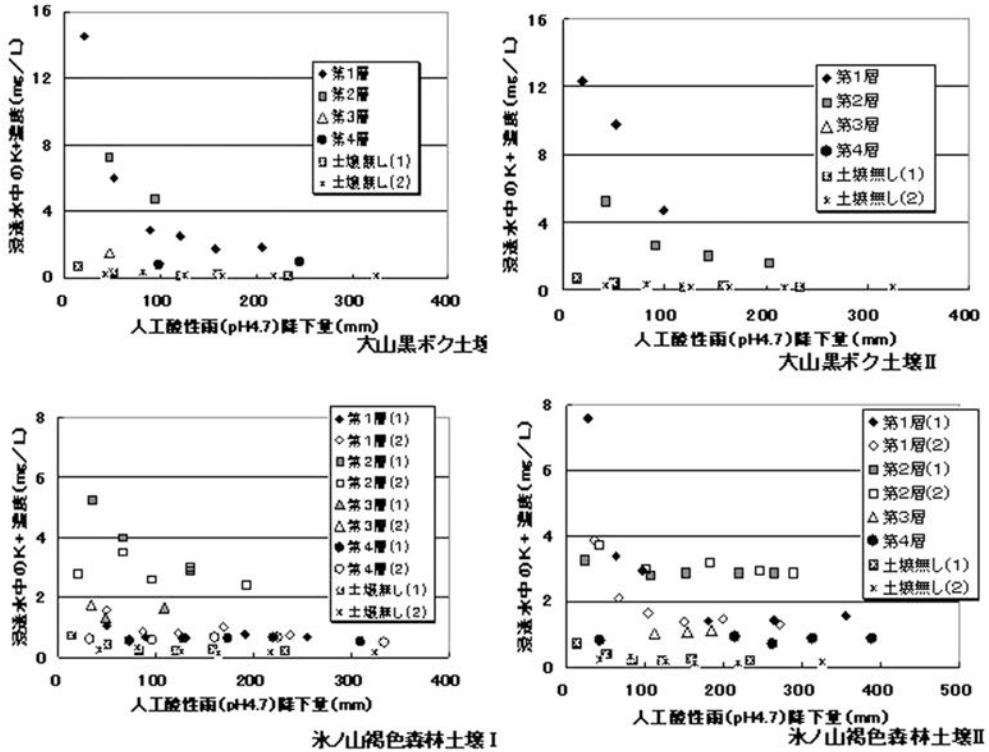


図 3.7 人工酸性雨 (pH 4.7) 降下時の浸透水の K 濃度の推移

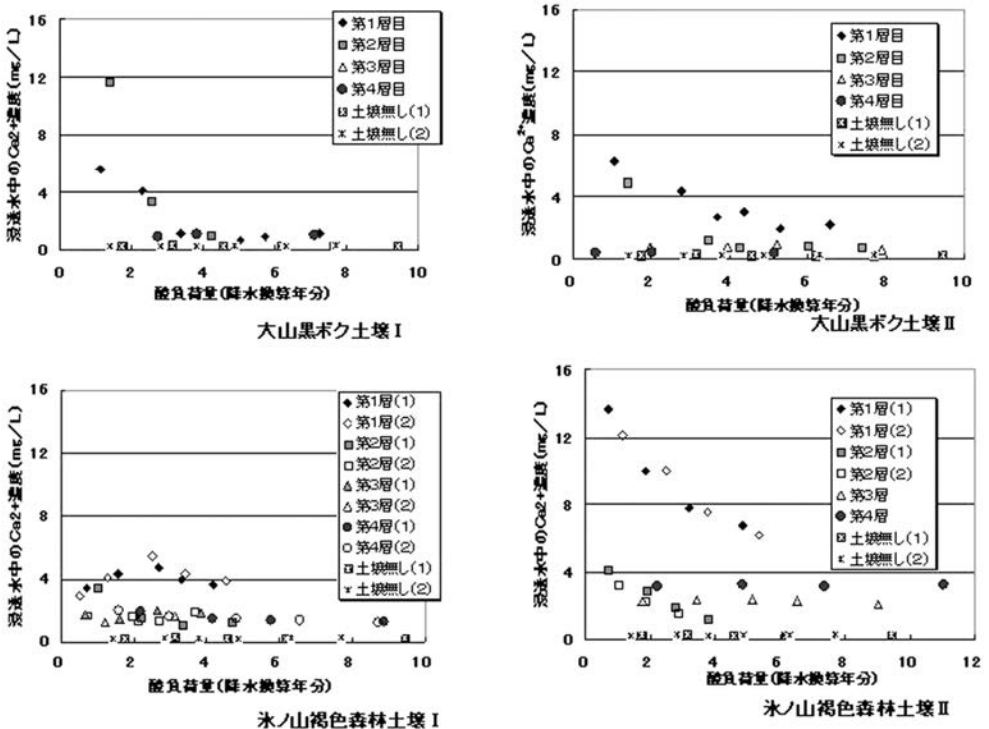


図 3.8 人工酸性雨 (pH 3.0) による酸負荷に伴う浸透水の Ca 濃度の推移

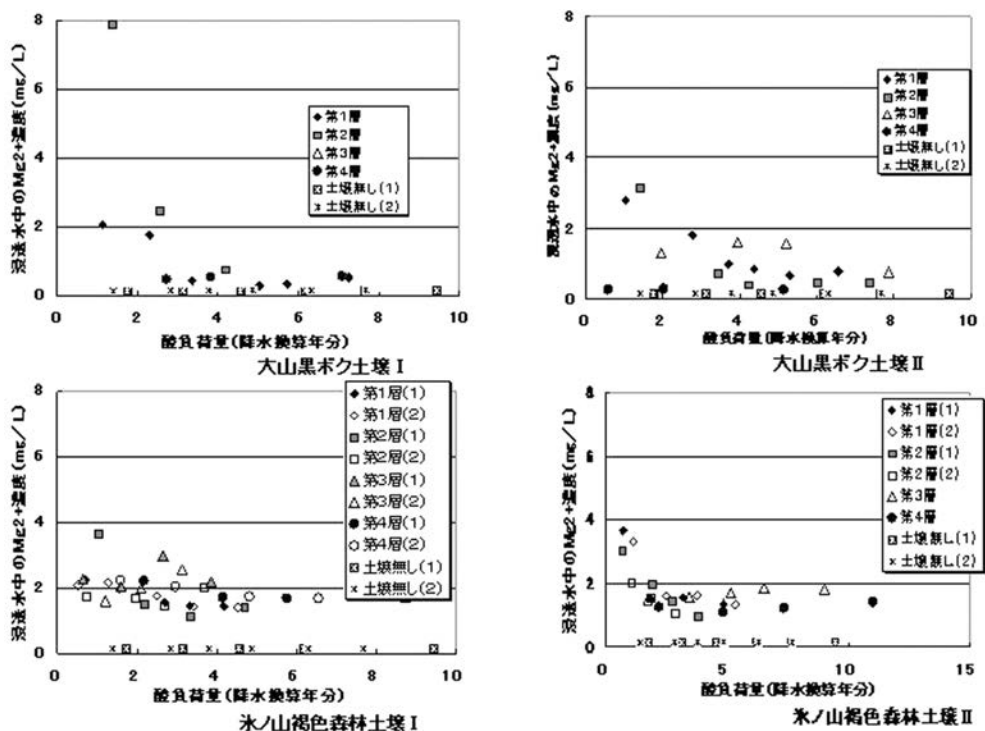


図 3.9 人工酸性雨 (pH 3.0) による酸負荷に伴う浸透水の Mg 濃度の推移

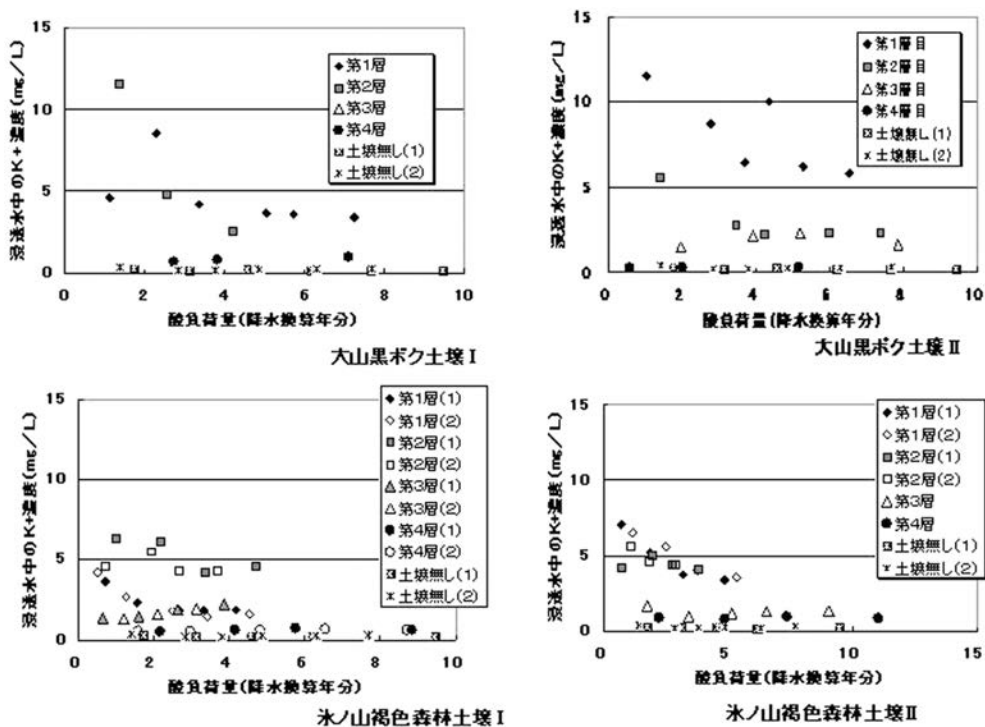


図 3.10 人工酸性雨 (pH 3.0) による酸負荷に伴う浸透水の K 濃度の推移

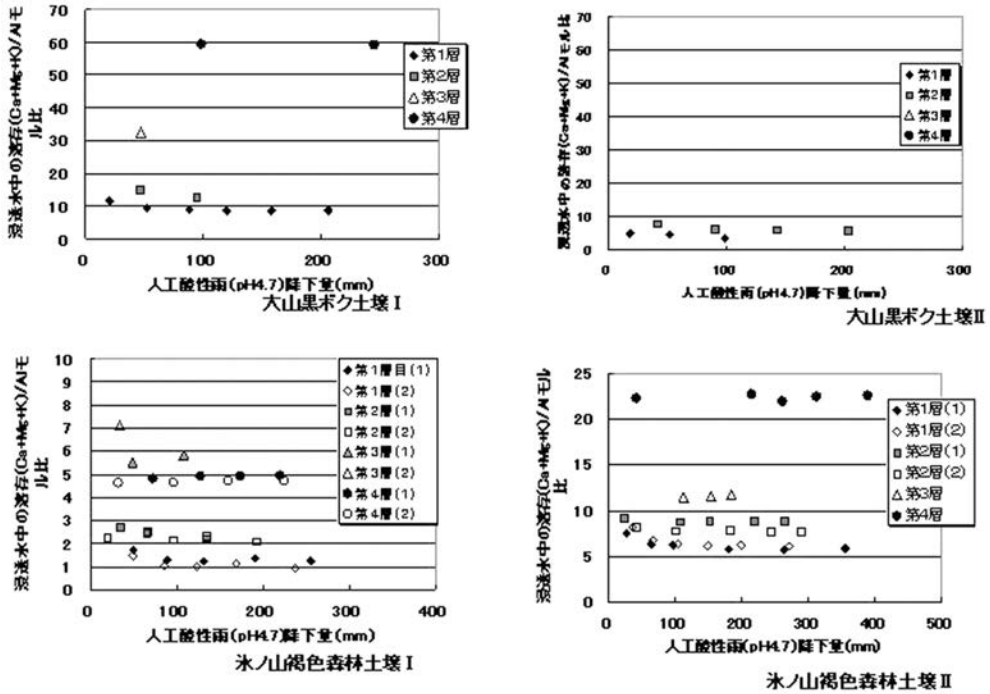


図 3.11 人工酸性雨 (pH 4.7) 降下時の浸透水中の溶存 (Ca+Mg+K)/Al モル比の推移

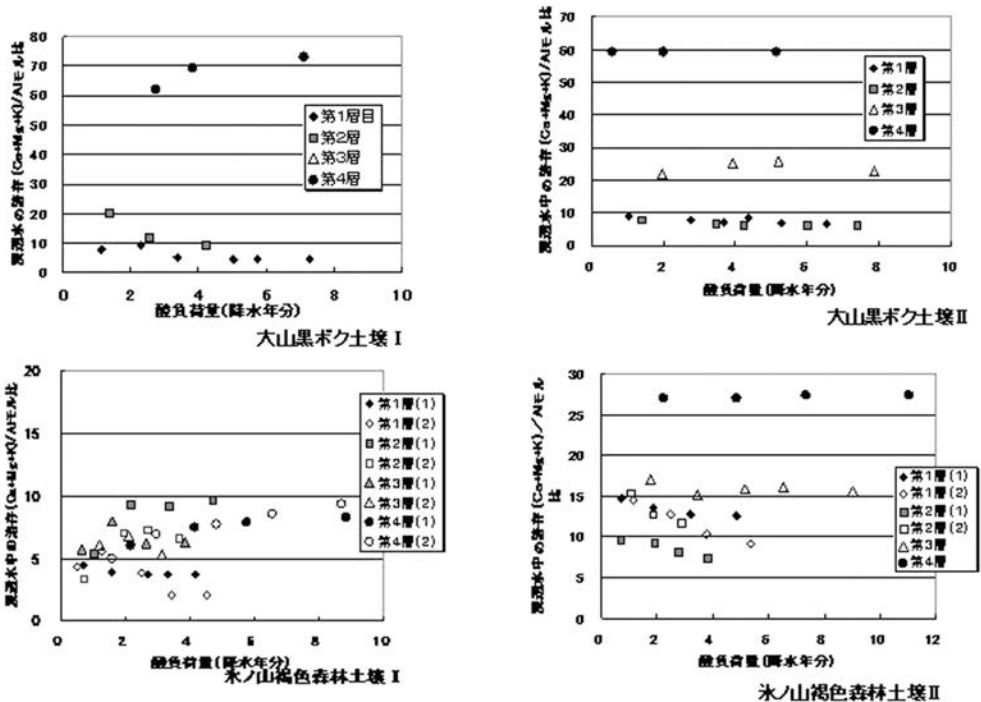


図 3.12 人工酸性雨 (pH 3.0) による酸負荷に伴う浸透水中の溶存 (Ca+Mg+K)/Al モル比の推移

4.2 溶存 Al について

- ①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。
- ②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 I 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。

4.3 塩基類(Ca, Mg, K), および栄養状態について

- ①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。
- ②Al 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開始するとされる値(< 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。

4.4 実験データ利用に向けての留意点

- ①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, さらに先の状態について, 知見を得る必要がある。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。
- ②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・評価に利用する。

— 参考文献 —

- 1) 一國雅己, 岡崎正規編: 土の化学—季刊化学概説 No. 4. 学会出版センター, p96~109, 1989
- 2) 飯村康二, 本名俊正他: 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, 1994
- 3) 佐竹研一編: 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, 2000
- 4) 佐竹研一編: 酸性環境の生態学—酸汚染と自然生態系を科学する—. p135~154, 愛智出版, 1999
- 5) 環境庁地球環境部監修: 地球環境の行方—酸性雨, p89~125, 中央法規, 1997