

酸性溶液が土壤の透水性と塩類溶脱に及ぼす影響

松川 進・富田平四郎・鈴木 敬

Effects of Acid Solution on Soil Permeability and Salts Leaching

Susumu MATSUKAWA, Heishirou TOMITA, and Takashi SUZUKI

Faculty of Agriculture, Utsunomiya University

1. はじめに

環境庁を中心に第1次(1983)、第2次(1988)酸性雨対策調査が実施され、日本の土壤の酸性雨に対する耐性分類や植生への影響が検討されている。従来、酸性雨の土壤への影響は、酸中和能の評価を中心とした化学的側面からの研究が主流で、土壤の透水性変化などの物理性や力学性への影響についての研究例は少ない。

特に、変異荷電を主要な粘土鉱物として構成されている土壤はpH変化により荷電量が変化し、土壤粒子の分散凝集現象を伴う。土壤粒子の分散凝集は土壤間隙構造を変え、透水性の変化をもたらす。また、土粒子の分散は土粒子と土壤溶液が直接接触する面積を増加させ、イオン交換を促進すると考えられる。

一方、土壤有機物は多量の塩基類を吸着し酸中和に寄与すること、土壤団粒の結合材の一つとして機能することなど、透水性低下や塩類溶脱を軽減することが予想される。また、酸性側で陽荷電が発現する土壤では陰イオンを吸着し酸吸着による中和能が生じるが、陰イオンの選択特性により中和能に相違が生じる。すなわち、酸性雨の陰イオン主成分である硫酸、硝酸、塩酸の構成比率により酸中和やそれに伴う透水性などへの影響が異なる。そこで、これらの影響要因を念頭に、酸性溶液を土壤カラムに浸透させ、酸性溶液や粘土鉱物の種類、および、有機物含量の相違が、土壤の透水性や塩類溶脱に及ぼす影響を室内実験により検討した。

2. 試料と実験方法

1) 試料

土壤試料は次の基準で選定した。①畑地土壤として広く分布していること。②主要粘土鉱物が異なること。③酸中和能が異なること。④有機物含量が異なること。以上の基準により、関東ローム表土(黒ボク土)、心土、及

び、黄色土を選定した。黒ボク土は日本の畑地の約50%、赤黄色土は約7%を占めている。また、環境庁(1990)による酸性雨の土壤への影響予察図によれば、黒ボク土は土壤酸性化耐性が強く、黄色土は弱い土壤に分類される。また、関東ロームの主要粘土鉱物はアロフェン、黄色土はカオリン鉱物を主体としている。そして、有機物含量の相違は関東ローム表土と心土を用い比較することとした。

関東ロームは宇都宮大学付属農場の飼料畑より、表土は深さ10~30cm、心土は40~60cmから、黄色土は浜松市大久保町の普通畑の深さ40~60cmからそれぞれ採取した。

採取した試料の生土2mm篩通過分をよく混合し密閉容器に入れ、室温20℃で保存した。

2) 土壤の物理・化学性

主な項目は以下の方法により測定した。①土壤溶液のpHはガラス電極法により、生土10gに蒸留水あるいは1mol/l-KClを25ml加えて測定した。②土壤有機物は高感度CNアナライザー(住友化学分析センター製)により炭素、窒素量を測定し、炭素量に1.724を乗じて算出した。③有機物の分解量は50ml三角フラスコ中の風乾土壤10gに、pHを調整した硫酸、硝酸、塩酸、および水酸化ナトリウム溶液30mlを加え、1時間振とうの後、24時間静置後濾過し、濾液中の有機物量を過マンガン酸カリウム酸性法により求め、単位土壤重当たりの分解量で表した。④陽イオン交換容量(CEC)はSchollenberger法により測定した。⑤試料の結晶性粘土鉱物の同定は0.002mm以下の粘土画分を沈降法により採取し、脱鉄処理後X線回析を行った。

また、⑥粒度分析はピペット法を用い、分散剤に関東ロームは1mol/l-HCl、黄色土は0.4mol/lヘキサメタリン酸ナトリウムを使用した。⑦pHの変化による土粒子の分散の程度を知る指標として、団粒の崩落率を小川

(1981)の方法に準じて測定した。すなわち、内径5 cm、高さ5 cmの亚克力管に網目間隔1 mmの金網を接着した容器を使用し、pHを調整した硫酸、硝酸、塩酸、および、水酸化ナトリウム溶液300 ml中に1 mm以上2 mm未満の団粒2 gを金網に乗せ、24時間静置後容器を静かに取り出す。そして、全土壌重に対する金網を通過し落下した土壌重の割合を団粒崩落率とした。⑧酸性雨の主成分である硫酸、硝酸、塩酸の相違による土壌の緩衝能を簡便的に知るため、開畑地の土壌改良に用いられる炭酸カルシウム散布量を求める方法に準じて緩衝能曲線を求めた。50 ml三角フラスコ中の土壌10 gに、pH1の硫酸、硝酸、塩酸溶液を0, 1, 4, 8, 16 ml加え、溶液量が25 mlになるよう蒸留水を加えた。1時間振とうの後、24時間静置後のpHを測定した。⑨硫酸イオン吸着量は、50 ml三角フラスコ中の風乾土壌10 gに、pH1~5の硫酸を30 ml加え1時間振とう24時間静置後濾過し、濾液と添加液の硫酸イオン濃度をイオンクロマトグラフィで測定し、両者の差から硫酸イオン吸着量を推定し、単位土壌重当たりの吸着量で表した。

3) 土壌の透水性変化

図-1に示したような内径2.9 cm、長さ14 cmの亚克力管に、1~2 cm間隔にテンシオメータ（ビニール管の先端に脱脂綿を充填）を挿入し、試料を10 cm所定の密度に灌水充填する。蒸留水のマリオットから酸性溶液のマリオットに切り替えた時刻からの排水量の時間変化、水圧ポテンシャルを測定し、土層全体と深さごとの透水性変化などを算出した。

4) 塩類濃度とpH分布

図-1と同様な装置を用いた。ただし、テンシオメータは取り付けず、内径4.9 cm、試料長さ14 cmの亚克力管を土壌カラムとして使用した。蒸留水から酸性溶液に切り替え所定の浸透量を与えた後、湛水が消滅してからカラム中の土壌を2 cmずつ押し出し遠心分離し、分離液のpHとCa, Mg濃度をそれぞれガラス電極法、原子吸光法で測定した。カラムは4本用意し、1本は酸性溶液に切り替える前のpH, Ca, Mgを2 cm間隔に7点測定し、この平均値を初期pH, 初期Ca, Mg濃度とした。他の3本は所定の酸性溶液量が浸透した後、試料を押し出し、Ca, Mg濃度、及び、pHを測定した。そして、酸性溶液浸透後のCaとMgの濃度を初期濃度で除して、

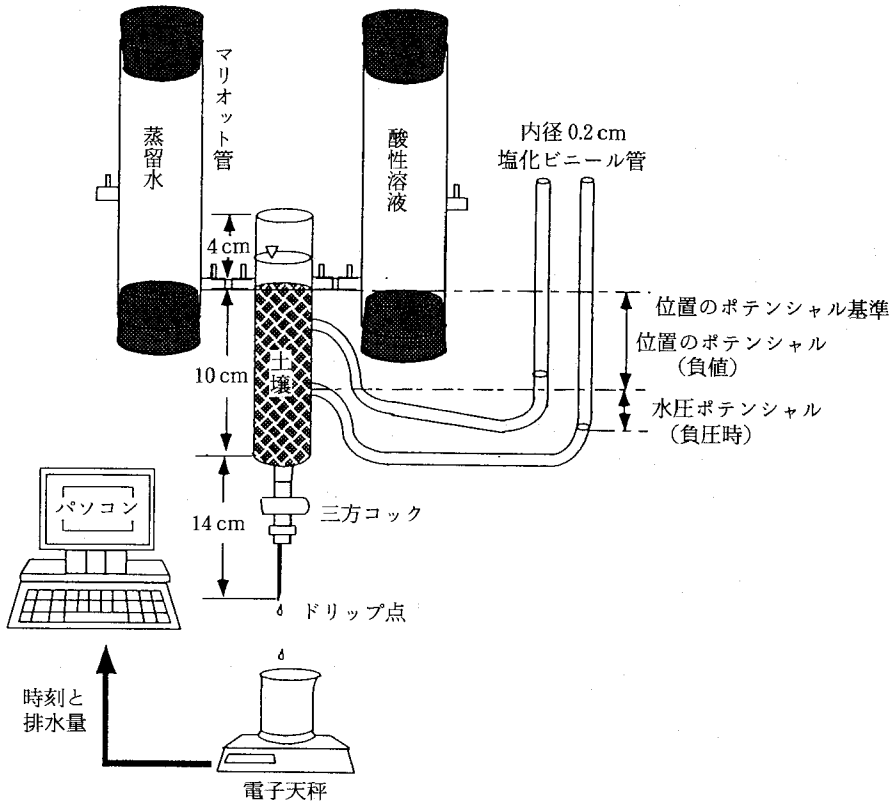


図-1 透水性と水圧ポテンシャル測定装置

濃度比として表した。

3. 実験結果

1) 土壌の物理・化学性

主な物理・化学性の測定結果を表-1に示した。主要粘土鉱物は関東ロームがアロフェンをはじめとする非晶質成分、黄色土はカオリン鉱物が主体であった。土壌溶液のpHは関東ロームより黄色土が低く、黄色土は酸性度の強い土壌であることがわかる。また、黄色土は関東ロームに比較し、有機物含有率が0.5%と低い。関東ロームのCECは表土で約40 cmol(+)/kgと黄色土に比較し大きく、アロフェンが主要粘土鉱物であることと有機物含量が大きいことによる。また、関東ローム心土の塩基飽和度は6.3%で、交換性陽イオン含量は著しく低い。

2) 有機物の分解量

図-2は添加溶液のpHと、単位土壌重当たりの有機物分解量(mg/g soil)の関係を、有機物含量が大きい関東ローム表土について示した。pH1では分解量がやや増加するが、pH2~5の範囲では中性付近の分解量との差は少ない。pH2~5では硝酸、塩酸、硫酸の順に分解量が大きい傾向を示した。しかし、pH13に比較し分解量

は非常に少なく、3 mg/g soil以下であり、酸性側での分解量は無視できると言える。

3) 緩衝能曲線と硫酸イオン吸着量

図-3に関東ローム表土と心土について、酸性溶液の添加量と平衡溶液のpHとの関係(緩衝能曲線)を示した。硫酸を加えた場合pH低下が最も少なく、硝酸と塩酸の場合は表土の方が心土に比較しpHの低下が少ない傾向を示した。また、添加した硫酸溶液のpHと硫酸イオンの吸着量(mg/g soil)との関係を、関東ローム表土、心

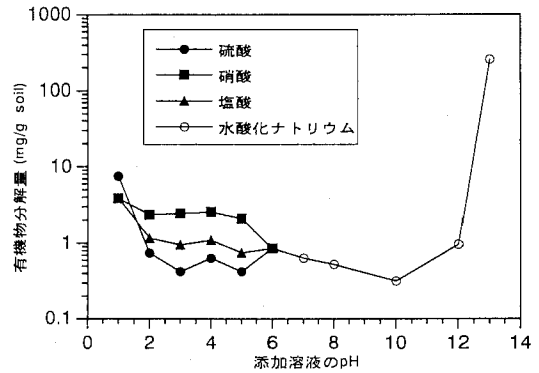


図-2 添加溶液のpHと有機物分解量

表-1 土壌の物理・化学性

測定項目	関東ローム表土	関東ローム心土	黄色土	測定数	
pH(KCl)	4.94	5.37	3.76	3	
pH(H ₂ O)	5.36	4.93	4.59	3	
有機物含有率(%)	9.76	2.08	0.50	3	
CEC(cmol(+)/kg)	39.21	22.36	10.18	2	
交換性塩基	Ca(cmol+)/kg)	15.47	0.88	2.67	2
	Mg "	2.68	0.43	0.85	2
	K "	0.94	0.04	0.54	2
	Na "	0.02	0.08	0.02	2
塩基飽和度(%)	48.71	6.37	40.17	2	
主要粘土鉱物	アロフェン	アロフェン	カオリン	2	
カラム充填密度(g/cm ³)	0.61~0.67	0.53~0.58	0.84~0.91		
真比重	2.25	2.72	2.59	5	
粗砂(2-0.2 mm) %	16.6	4.4	11.8	3	
細砂(0.2-0.02 mm) %	15.8	16.6	24.4	3	
微砂(0.02-0.002 mm) %	32.2	36.1	19.3	3	
粘土(0.002 mm以下) %	35.4	38.9	44.5	3	

備考：測定数に示した数の平均値を示した。(X線回析, カラム充填密度を除く)

土について図-4に示した。pH3付近から硫酸イオンの正味の吸着が生じ、pHの低下とともに直線的に吸着量が増加した。従って、関東ロームでは硫酸イオンの吸着がpH低下を抑制していると言える。なお、この機構は吉田ら(1988)の緩衝機能分類によれば、第Ⅲ段階に相当する。

4) 土壌団粒の崩落率

硝酸と水酸化ナトリウムを用い、関東ローム表土、心土、黄色土について平衡溶液のpHと団粒崩落率の関係を図-5に示した。硝酸の場合pH4以下で関東ローム心

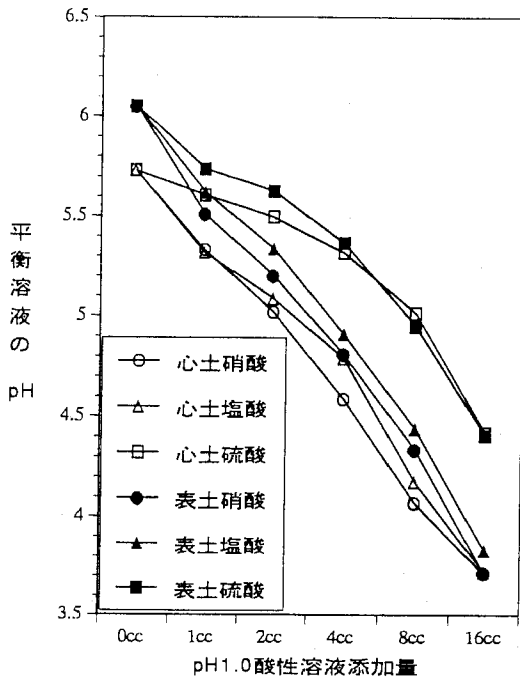


図-3 関東ローム表土、心土の緩衝能曲線

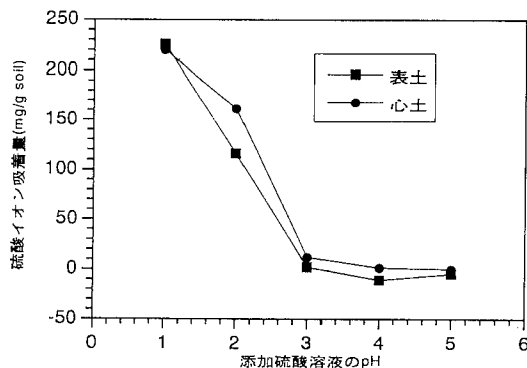


図-4 添加硫酸溶液のpHと硫酸イオン吸着量(関東ローム)

土の崩落率が急増し、表土の増加は少ない。また、黄色土は酸性側では崩落率は極めて少なく、アルカリ側で著しく大きい。ここで、有機物含量が大きい関東ローム表土と少ない心土を比較すると、平衡溶液のpH2~3.5の範囲で、崩落率には15%程度の差異が生じている。硝酸溶液を用いた場合の崩落率の相違は、有機物の分解量が酸性側で少ないため、団粒を結合する機能が表土で維持されていることの効果によると思われる。

また、図-6には関東ローム表土、心土に硫酸と水酸化ナトリウムを用いた場合の添加溶液のpHと団粒崩落率の関係を示した。酸性側の崩落率は2%以下で、硝酸の場合の5~20%に比較し少なく、アルカリ側のpH12で急増した。しかし、硝酸の場合のように酸性側で表土と心土に明確な崩落率の相違は認められなかった。

このように、粘土鉱物、有機物含量、酸性溶液の種類により土壌団粒の崩落や土粒子の分散が異なることが推定でき、これらの要因が土壌の透水性変化や塩類の溶脱に差異を生じることが考えられる。

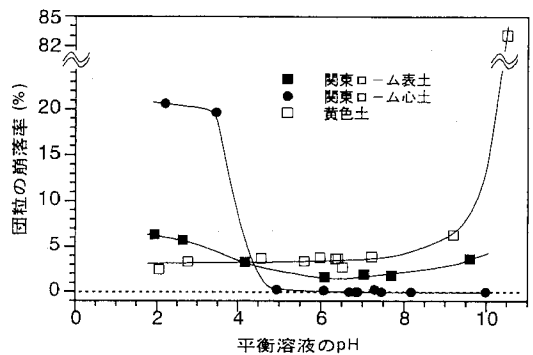


図-5 関東ローム表土、心土、黄色土の平衡溶液のpHと団粒崩落率(硝酸溶液)

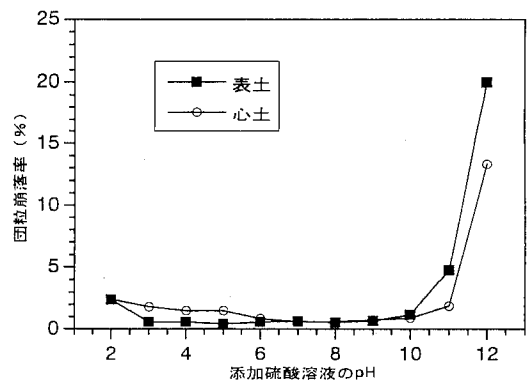


図-6 関東ローム表土、心土の添加硫酸溶液pHと崩落率

5) 透水性の変化

pH3の硝酸溶液を浸透させた場合の透水係数の変化を、硝酸溶液に切り替える前の透水係数 (k_0) に対する比 (無次元化透水係数 k/k_0) で図-7に示した。酸性側で団粒の崩落率が大きい関東ローム心土の透水性低下が最も大きく、約40時間で1/100に低下した。しかし、有機物含量の大きい関東ローム表土や、酸性側で団粒の崩落率の小さい黄色土の低下は緩慢であることがわかる。

また、pH2の硫酸、硝酸、塩酸を関東ローム心土に浸透させた場合の水圧ポテンシャル分布を図-8~図-10に示した。図-8の硝酸の場合、浸透開始後2時間頃から水圧ポテンシャルの低下が生じ、19.2時間後には深さ1cmで-1.8KPaまで低下した。この分布は、地下水水位が存在し、透水係数が表層で小さく、下層で大きい場合の成層浸透と同様な水圧ポテンシャル分布を示す。すなわち、表層での団粒の崩落、土粒子の分散により、表層の透水係数が低下したためと考えられる。

一方、pH2の硫酸の場合の水圧ポテンシャル分布を

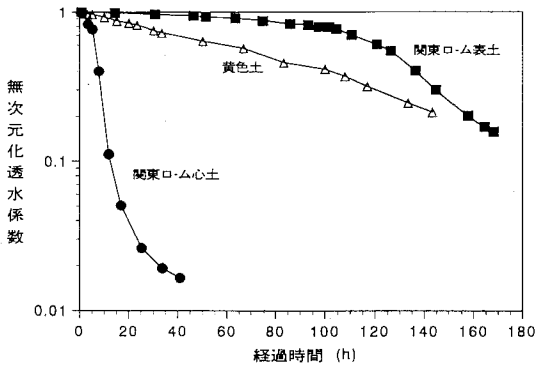


図-7 無次元化透水係数 (k/k_0) の時間変化 (硝酸 pH3)

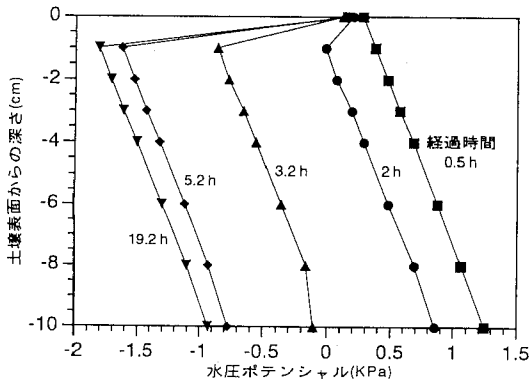


図-8 関東ローム心土の水圧ポテンシャル分布 (硝酸 pH2)

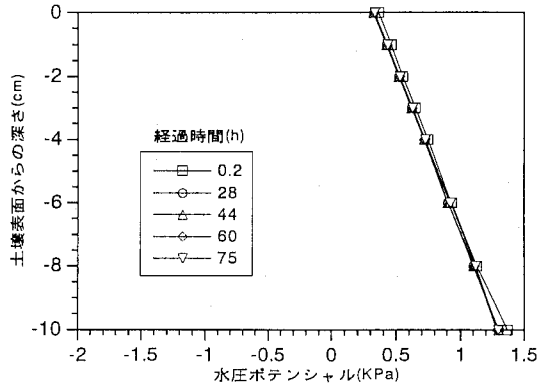


図-9 関東ローム心土の水圧ポテンシャル分布 (硫酸 pH2)

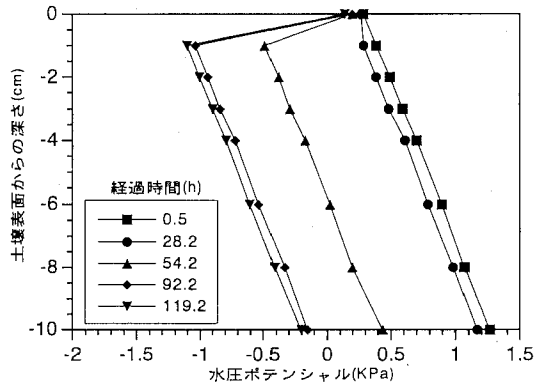


図-10 関東ローム心土の水圧ポテンシャル分布 (塩酸 pH2)

図-9に示した。水圧ポテンシャルは75時間の範囲ではほとんど変化せず、ほぼ直線分布であることから硫酸の場合、透水性の低下は硝酸に比較し非常に小さいことがわかる。この原因の1つに、硫酸イオンの吸着による酸中和能が関与していることが推定される。

図-10は塩酸の場合を同様に示したもので、54.2時間後には明らかに負の水圧ポテンシャルを示した。経過時間119.2時間でも最大負圧は-1.2KPaで、図-8の硝酸の場合より低下が小さく、硝酸と硫酸の中間の分布を示した。

これらのことから、硝酸や塩酸の場合、表層1cmまでの土壌団粒が分散し、間隙径が小さくなり透水性が低下し、土壌カラム全体の透水性低下の原因となっていることが理解できる。一方、硫酸の場合にはほぼ初期状態の直線分布を示し、表層での土粒子分散が少なく、透水係数の低下が極めて少ないと言える。

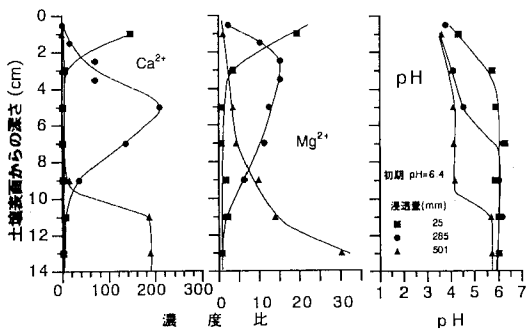


図-11 関東ローム心土の Ca, Mg 濃度比と pH 分布 (硝酸 pH2)

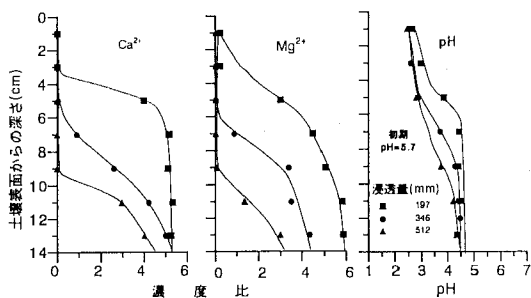


図-12 黄色土の Ca, Mg 濃度比と pH 分布 (硝酸 pH2)

6) pH と塩類濃度分布

土壌団粒の崩落率が高い pH 2 の硝酸溶液を用いた場合の土壌カラム中の pH 分布と Ca, Mg の濃度比分布を、関東ローム心土と黄色土について図-11, 図-12 に示した。図中には初期土壌溶液の pH, 浸透量をカラム断面積で除し雨量 (mm) に換算した値を示した。また、関東ローム心土の初期 Ca, Mg 濃度はそれぞれ 5×10^{-6} , 1.5×10^{-5} mol/l, 黄色土は 5.5×10^{-4} , 2.9×10^{-4} mol/l であった。

関東ローム心土 (図-11) の場合、濃度比ピークが明瞭であり、浸透量の増加に従って次第にピークが下方に移動している。また、濃度比ピークの値も Ca で約 200 倍, Mg が約 20~30 倍を示した。また、濃度比ピークを示す位置の pH は 4 のオーダを示している。これを図-5 に示

した団粒の崩落率と比較すると、pH 4 付近から崩落率が増加する傾向と対応し、濃度比ピーク付近で団粒の崩落、分散が生じ、水素イオンとのイオン交換が活発化していると考えられる。そして、ピークより上層では pH 5 を示していることから、佐藤ら (1990) によれば塩類による酸中和機能は消失していると判断される。

一方、黄色土 (図-12) の場合には濃度比ピークの形成が無く、濃度比の値も 3~6 倍で、関東ローム心土と比較し小さい。すなわち、ピークが存在しないのは、団粒の崩落・分散によりイオン交換が盛んに行われる部位が少ないためと考えられる。

しかし、pH の初期値が 5.7 であることを考え合わせると、少量の硝酸溶液の浸透で急激に pH が低下したこととなり、酸中和能が低い土壤に該当する。

4. おわりに

酸性溶液を用いて、団粒の崩落率や透水性の変化、pH や塩類の濃度比分布を測定した。その結果、土壌粒子の分散現象が透水性変化や塩類の溶脱に影響を及ぼすことを示した。また、酸性雨の陰イオン主成分の相違によっても影響に差異が生じることが判明した。そして、自動車の増加にともない、窒素酸化物の放出の減少が将来とも期待できないことから、硝酸を中心とした陰イオンの相違による影響把握も重要となる。

室内実験による僅かな測定結果であるが、酸性雨の土壤への影響を推定する場合、土壤の分散・凝集現象などの土壤の物理性に着目した研究が重要であると言える。

引用文献

環境庁水質保全局土壌農薬課監修 (1990): 酸性雨 土壌・植生への影響, p.154, 公害研究対策センター。
 小川和夫 (1981): 土壌団粒の安定性 (崩落率, 分散率) の測定法, 土壌の物理性, 43: 14~20。
 佐藤一男ら (1990): 酸性降下物に対する土壌中和能の簡易測定法, 環境科学会誌, 3 (1): 37~48。
 吉田 稔ら (1988): 酸性雨の土壤による中和機能, 日土肥誌, 59 (4): 413~415。

(受稿年月日 1995 年 5 月 30 日)
 (受理年月日 1995 年 7 月 13 日)