

大阪大学 藤田正憲、古川憲治
○岩堀恵祐、池 道彦
㈱清水建設 渡辺泰一郎

1. はじめに

酸性降下物は、大気中に放出された酸性物質が化学変化を受け、輸送・拡散されて湿性あるいは乾性の形態で地表面に降下する。この酸性降下物を含んだ雨水（酸性雨）が土壌に浸透すると、土壌酸性化を引き起こすが、土壌には緩衝能が備わっているため、その能力の大きな土壌は容易に酸性化され難いといわれている。この土壌緩衝能は酸中和能と酸消去能の総和であり、前者は粘土鉱物などによる物理化学的作用、後者は土壌微生物や植物などによる生物学的作用と捉えることができる。特に、日本のような温暖で湿度の高い条件では、窒素や硫黄などに関連した生物学的サイクルが土壌環境の形成に大きくかかわっており、土壌中に棲息する微生物の働きを無視することはできない。これまでは、酸性降下物に対する酸中和能が着目されてきたが、本研究では、土壌微生物による酸消去能を生物学的緩衝能と考え、カラム、回転振盪並びにマイクロコズム系による実験から、酸性降下物に対する土壌の生物学的緩衝能を検討した。

2. 実験材料並びに方法

2.1 実験材料

大阪大学吹田キャンパス内の竹藪で採取した土壌（褐色森林土）から団粒構造を崩さないようにして大きな礫や植物根などを除去した生土、この生土を粗砕・混合を繰り返しながら、直射日光を避けて風乾し、2mmの篩を通した風乾細土とこれを100℃で2時間高圧蒸気滅菌した風乾滅菌土をそれぞれ実験に供した。

カラム実験では SO_4^{2-} が0.5meq/l (24.0mg/l)、 NO_3^- が0.2meq/l (12.4mg/l)、 Cl^- が0.3meq/l (10.6mg/l)の人工酸性雨（pH:3.0）、回転振盪実験ではこれをイオン交換水で10倍希釈したものの（pH:4.0）、またマイクロコズム系の実験では NO_3^- を0.02meq/l (1.24mg/l)に変えた人工酸性雨（pH:3.09）をそれぞれ供試した。

2.2 実験方法

(1) カラム実験

内径48mm、高さ150mmの亚克力製円筒カラムの底部に工業用パッド（スコッチブライト type A, very fine: 住友リ-ム製）を装着し、土壌を均一に充填してから濾紙（5A）で覆い、人工酸性雨を上部より供給した。なお、カラムを実際の土壌環境に近づけるため、周囲を黒い紙で覆うとともに、乾燥土壌重量/供給量が約4.6g・hr/mlになるように各土壌（100~134g乾重）を充填した。

(2) 回転振盪実験

300ml容の三角フラスコに、風乾細土あるいは風乾滅菌土を1g投入し、人工酸性雨を100ml添加した。両土壌とも三角フラスコを9個用意し、120rpm、28℃で回転振盪した。所定時間ごとに1本の三角フラスコの生菌数を測定し、懸濁ろ液（0.45μm）を分析に供した。なお、本実験の酸添加量は1.0meq/100g乾土に相当する。

(3) マイクロコズム系の実験

コンテナ（53cm×38cm、深さ29cm）の底部（底から1cm）に、5cm間隔に直径1cmの穴をあけた亚克力板を敷き、洗浄した6号碎石を一様に敷き詰めた後、生土40kg湿重（乾重30.6kg）を充填した。土壌表面からの水分の蒸発を防ぐため、コンテナ上部をフィルムで覆い、またコンテナ全体をわずかに傾けて土壌を通過した水を採取できるようにした。人工酸性雨は約20ℓ/日で4地点から土壌表面に均等滴下した。

2.3 分析項目

各実験とも、pH、電気伝導度（EC）、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、T-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TOC、一般細菌数（平板培養法あるいは混釈平板法）、脱窒菌数・硝酸還元菌数・硫酸還元菌数（MPN法）、CEC（Schollenberger法）などを適宜測定した。

3. 実験結果並びに考察

風乾細土の交換性塩基量は5.69meq/100g乾土 (Ca^{2+} が約74%、 Mg^{2+} が約19%に相当)であり、CECが17.36meq/100g乾土、塩基飽和度が32.7%であった。これより、本実験で供試した土壌は酸性雨に対する耐性が高く、負電荷の約7割には交換性 Al^{3+} や交換性 H^+ が吸着していると判断される。

3.1 カラム実験

流入 H^+ 量に対するpHの変化を図1に示した。このpH値やEC、各種陽イオンの変化を比較すると、0~4meq/100g乾土では、風乾細土のpHが最も高く、カラム内でイオン交換による中和が十分に行われていることがわかる。これに対して生土では、pHの低下は速いが、交換性塩基の溶出量は低かった。また、流入 H^+ 量が6~8meq/100g乾土では、風乾細土の流出陽イオンは H^+ と Al^{3+} が主体であるが、生土の場合には、その他の陽イオン（特に Ca^{2+} ）が含まれていた。これは、団粒構造を持つ生土内部で土壌溶液中への拡散が遅かったり、一部水みちが生じたことにより、見かけ上、酸性化が進行したような挙動を示したものと考えられる。また、風乾滅菌土の場合、高圧蒸気滅菌により酸性物質や H^+ が溶出したため、実験終了時にはほとんどの交換性塩基が溶脱された。

次に、実験開始時と終了時における生土と風乾細土の各種生菌数を表1に示した。これより、流出水のpHが3.5程度に低下しているにもかかわらず、各細菌の生菌数が増加していることがわかる。そこで、差分法により、各細菌の比増殖速度を算出したところ、生土の一般細菌と硫酸還元菌、風乾細土の硫酸還元菌で高い値（いずれも0.13 (1/日)）を示した。この結果は、生土の場合、団粒内部に多くの細菌が捕捉され、しかも酸性化を受けにくく、高いpHが保持されていたことに起因し、風乾細土では、水分含量の増加によるものと推定される。

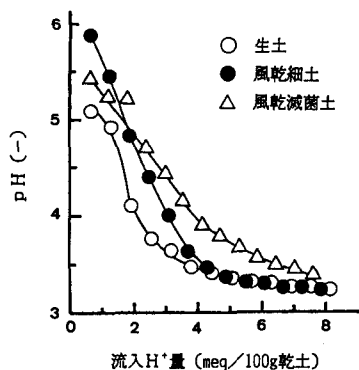


図1 流出水pHの変化

表1 実験開始時と終了時における各種生菌数の変化

細菌	項目	生菌数 (/g乾土)	
		実験開始時	実験終了時
一般細菌	生土	1.03×10^7	1.11×10^9
	風乾細土	3.50×10^6	1.51×10^7
脱窒菌	生土	1.67×10^5	7.24×10^5
	風乾細土	1.30×10^3	7.39×10^3
硫酸還元菌	生土	1.01×10^3	3.25×10^4
	風乾細土	4.90×10^2	1.39×10^5

3.2 回転振盪実験

約40日の振盪期間で、風乾細土のpHは初発状態（6.0）とはほぼ同じ値を示したが、風乾滅菌土では5.4から6.2まで徐々に増加した。また、ECは風乾細土で5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ から40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ まで増加したが、風乾滅菌土では初発状態とはほぼ同じ値が得られた（35~40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）。各種イオンの経日変化を比べた場合、風乾細土の NO_3^- が初発濃度の約5倍まで増加した（図2）。風乾滅菌土のそれに変化がなかったことから、風乾土壌中の窒素成分が可溶化して蓄積したものと推定される。また、土壌からの溶出と微生物による硫酸酸化により、風乾細土の SO_4^{2-} は徐々に増加した。次に、風乾細土における各種生菌数の経日変化を図3に示した。これより、硫酸還元菌の生菌数は僅かに増加しているが、その他の菌では、実験初期に増加し、その後減少傾向にあることがわかる。この傾向は、実験に供した土壌が1gであったため、可給態の有機物量が不足したことによるものと推察される。従って、酸性化した土壌中でも微生物は増殖できるが、実際の土壌では、酸性化による二次的な影響（例えば、可給態有機物の溶脱など）も微生物の生育に大きくかかわっていると考えられる。

3.3 マイクロゾム系の実験

実験開始10日目までは、流出水のpHは6.0前後ではほぼ一定であったが、その後徐々に低下し、20日目以降3.5~4.0の値となった。また、24日間の実験期間で、交換性塩基量とCECはそれぞれ、7.3meq/100

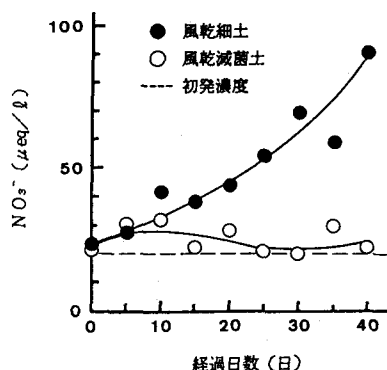


図2 NO_3^- 濃度の経日変化

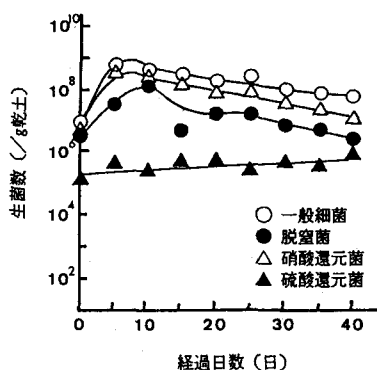


図3 風乾細土における各種生菌数の経日変化

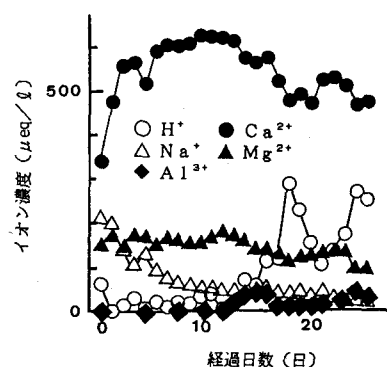


図4 流出水の陽イオンの経日変化

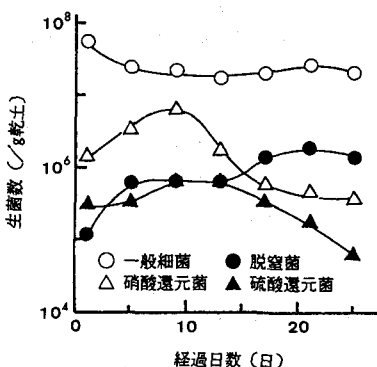


図5 各種生菌数の経日変化

g乾土から4.7meq/100g乾土、12.9meq/100g乾土から10.4meq/100g乾土に減少した。供試土壌の酸中和能は612meq/30.6kg乾土に相当し、約3割の酸中和能がまだ存在するはずであるが、実際にはpHの減少とECの増加が認められた。しかし、 Ca^{2+} は実験開始直後に上昇して、15日目以降徐々に減少し、 Na^+ は実験開始から徐々に減少したが、 Al^{3+} は15日前後と実験終了時に僅かに溶出した(図4)。これは、団粒構造を持つ生土と人工酸性雨が均等に接触しなかったことにより、一部の土壌が酸性化したものと推察される。従って、実際の土壌環境ではpHの低下と酸性化の指標である Al^{3+} の溶出が必ずしも一致しないと考えられる。次に、各種生菌数の経日変化を図5に示した。これより、一般細菌は実験開始後僅かに減少したが、ほぼ一定の値を示し、また脱窒菌、硝酸還元菌さらに硫酸還元菌は実験開始約10日目までは増加したが、pHの低下とともに前二者は減少し、硫酸還元菌は逆に増加していることがわかる。しかし、 NO_3^- は実験開始5日目までに20 $\mu\text{eq/l}$ から7 $\mu\text{eq/l}$ まで減少し、その後はほぼ一定の値を示したので、硝酸還元菌の増殖は流入濃度が律速因子となっている可能性が高い。以上のことから、生土を用いたマイクロコズム系の実験では、酸性化によって流出水のpHは低下するが、必ずしも土壌が酸性化したとは判断できず、実際には、酸性に強い微生物が何らかの酸消去能を働かせているものと推定できる。

4. まとめ

生土及びその風乾細土、風乾滅菌土を用いたカラム、回転振盪並びにマイクロコズム系による実験から、酸性降下物に対する土壌の生物学的緩衝能を検討したところ、次の知見が得られた。

カラム実験では、風乾細土が生土とは異なる様相を呈し、一般細菌や脱窒菌も2オーダー低い値を示した。これは、生土の団粒構造が深く関与し、その内部で酸性化の進行が遅れることを示唆している。また、回転振盪実験では、一般細菌や脱窒菌が10日目までは増加したが、それ以降は可給態有機物が可溶化したことにより、徐々に減少した。マイクロコズム系の実験では、硝酸還元による NO_3^- -Nの減少が確認され、実際の土壌環境ではpHの低下と Al^{3+} の溶出が一致しないことが予想された。