

## 人工酸性雨の土壌物理性への影響

田熊勝利\*, 安田 裕\*, 吉田和司\*\*

平成9年6月27日受付

\*鳥取大学農学部生存環境科学, \*\*サンスイコンサルタント株式会社

### The Influence of Artificial Acid Rain on Physical Properties of Soil

Katsutoshi Takuma\*, Hiroshi Yasuda\* and Kazushi Yoshida\*\*

\*Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680, Japan

\*\*Sansui Consultants Co. Ltd, Kyoto Prefecture

Acid rain has been taken up in various fields as an important environmental problem. It is feared that soil strength with soil acidification decreases in soil engineering field. We took up the problem about the influence of acid rain from the standpoint of soil engineering, and carried out experiments to find out the properties of soil changes, especially the changes in soil strength, soil acidification and soil buffer action, and studied these results. The addition of acid rain brought about the changes in soil fineness number and soil strength. With the increase in concentration of sulfuric acid and nitric acid solution, the decrease in soil buffer action and the acidification of soil progressed, but there was scarcely any change in soil fineness number and soil strength. It was found that the addition of acid rain exerted a different influence on soil fineness number, soil strength, soil acidification and soil buffer action, depending upon the kinds of acidity.

(Received 27 June 1997)

*Key words: physical properties of soil, acid rain, soil strength, soil buffer action, fineness number*

#### 緒 言

従来欧米各国において、酸性雨による環境への影響(湖沼・河川の酸性化、森林の立ち枯れ等)は、深刻な問題として捉えられている。日本においては欧米各国に比べて降雨量が多いことからあまり問題とされていなかった。しかし、最近全国各地より、pH5.6以下の降雨、いわゆる酸性雨が報告されている[2]。酸性雨・雪は、自動車の排気ガスや工場から排出された硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)や窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)に基づく、SO<sub>2</sub>やNO<sub>2</sub>が可溶性物質の硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)や硝酸(HNO<sub>3</sub>)に転換し、雨、雪および霧といった形で地上に降下したものである。

酸性雨は重要な環境問題として各分野で取り上げられており、土木学分野においてもコンクリートの劣化というところで問題となっている。このことは、コンクリートだけではなく、土質学分野における土の酸性化に伴う土の強度の低下も懸念されることである。酸性雨の影響について土質学的立場からの研究には、古河ら[1]が締固め特性およびCBR特性に関して、また山口ら[3,4]が湧水の分析、土の緩衝能力、物理化学的性質などの研究があり、徐々に解明されつつあるようである。

本研究では酸性雨を土質学的な立場から取り上げ、人工酸性雨によって土の性質がどのように変化するかを、特に土の強度変化、土の酸性化および土壌の緩衝作

用について実験を行い、検討を加えた。今回の実験では極端にpH値の低い実験も行ったが、これは、積雪状態においては、低いpH値を示すとの報告 [1] から取り上げた。

## 実験内容

試料土としては、岡山県勝田郡奈義町の高原地域（日本原）から採取した黒ぼく土、並びに鳥取市湖山町の鳥取大学農学部附属農場から採取した水田土壌を用いた（以下前者を日本原土、後者を湖山土と称する）。試料土の実験前の処理としては、土を室内にて空気乾燥し、0.42mmふるい通過土を用いた。この時の試料土を供試土Aとする。土の物理的性質等について第1表に示す。実験は土の物理試験の他、透水試験、強熱減量試験、CEC試験並びに溶脱試験とフォールコーン試験を行った。

第1表 試料土の物理性など

試料名	日本原土	湖山土
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.542	2.642
液性限界 (%)	71.9	86.2
塑性限界 (%)	65.0	38.8
透水係数 (cm/s)	$1.90 \times 10^{-4}$	$4.15 \times 10^{-5}$
pH(H <sub>2</sub> O)	5.05	4.43
強熱減量 (%)	12.1	31.3
CEC (meq/100g)	66.3	31.8
粗砂 (%)	17.3	1.3
細砂 (%)	34.7	3.5
シルト (%)	29.3	32.0
粘土 (%)	18.7	63.2

### (1) 溶脱試験

土には酸性雨に対する緩衝能力がある。この緩衝能力は交換性陽イオンの量に依存し、土性によってかなり異なると言われている。そこで今回の実験では、自然の雨水を使用するのではなく、蒸留水および規定度0.1～0.002Nの9段階に濃度調整された硫酸と硝酸溶液を用いて行った。供試体は供試土Aをアクリル製のカラム（内径5cm、長さ15cm）に充填し、自然の降雨状態に近い形の土壌を想定し作成した。この供試体に人工酸性雨を透過させることによって、土壌の緩衝作用を流出溶液のpH変化から検討を加えた。

実験方法はアクリル製カラムの切り口にろ紙をあて、厚さ2cmのアクリル製カラムでろ紙を挟んで底にし、土層厚が10cmとなるように供試土Aを充填した。実験中は土層上に3cmの冠水部分を作り、定水位の状態に硫酸と

硝酸溶液を透過させた。冠水の定水位水頭を保つために医療用点滴を用いて溶液を滴下させて水頭を一定にした。次に下部からの流出溶液を100mlごとに採取し、温度補償用ガラス電極型pHメータを用いてpHを測定した。総流出量が1,000mlになった時点で、実験をやめ、冠水部分の溶液を直ちに捨てて、カラム内の土を取り出し、風乾させた。この時の試料土を供試土Bとする。

### (2) 土のフォールコーン試験

フォールコーン試験よりF値（ファイネスナンバー）を求めた。また、土の強度（剪断強さ）はフォールコーン試験結果よりハンスポアの式を用いて推定した。この試験は供試土Bの剪断強さが供試土Aに比べ、どのように変化したかを調べるために行った。

### (3) 土のpH試験

土壌の緩衝作用により、その土に流入してくる酸は中和される。ここでは酸性雨が降った後の土自体がどのくらい酸性化しているのかについて調べる。実験方法は溶脱試験によって得られたカラム内の供試土Bを30g取り出し、そこに蒸留水60mlを加えて1分間攪拌して懸濁液の状態にした後、40分間静置する。その後上澄み液をpH計で計測し、土のpHとする。

## 結果と考察

### (1) 土壌の緩衝能力について

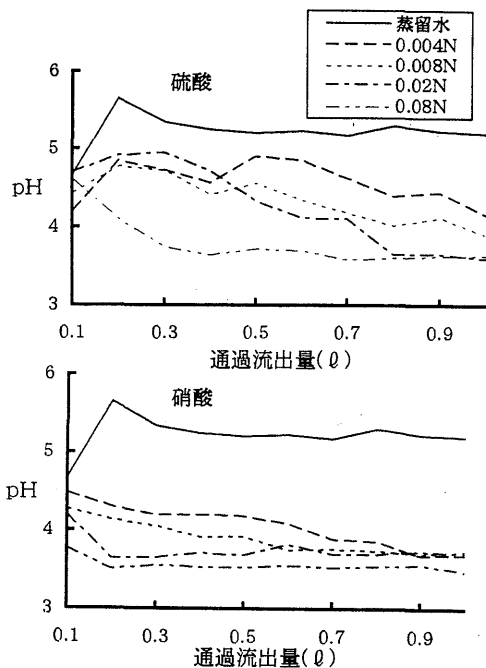
湖山土と日本原土にそれぞれ濃度調整された硫酸・硝酸溶液を透過させ、溶脱試験を行った。透過させる硫酸・硝酸溶液の通過流出量とpHとの関係の代表例を第1,2図に示す。

#### a. 日本原土

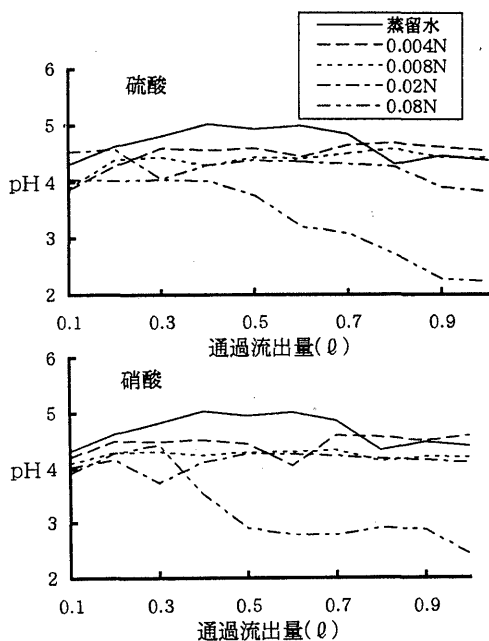
硫酸：全体的にグラフ形状は上に凸の放物線を描き、溶液が低濃度から高濃度になるに従い、凸部の頂点は左方に移動した。この頂点を境にして流量が増えるにつれて、流出水のpHは急激に低くなっていった。これは土壌の緩衝作用が働き、pHの低下を緩和していたが、日本原土の緩衝能力の限界を超えたためと考えられる。高濃度になるに従い、グラフは水平の状態になり、pH3.6付近で収束する形となった。

硝酸：グラフは硫酸透過時とは逆に下に凸な形を取り、0.1ℓ通過時から1ℓ通過時までには勾配が小さく、顕著なpH変動の見られない緩やかなpHの低下を見せた。そして低濃度から高濃度になるに従い、0.1ℓ通過時から1ℓ通過時までのpHの変化が少なくなり、ほとんど水平のグラフとなり、高濃度になるにつれてpH3.5付近に収束する形となった。

#### b. 湖山土



第1図 溶脱試験における流出水のpH (日本原土)



第2図 溶脱試験における流出水のpH(湖山土)

硫酸：0.008N以下の濃度を透過させた場合、ほとんどpH4~4.5の値で一定しており、グラフは水平状態であるが、0.02Nの濃度以上の酸を透過させると、グラフも右

下がりになり、0.1Nを透過させたときはpH4から2に低下した。しかし、上に凸な放物線を描いており、緩衝作用が働いているのではないかと考える。

硝酸：硫酸を透過させた時と同じく蒸留水から0.008Nまでのグラフは右上がりまたは水平になっており、通過流出量が増加してもほぼpH4~4.5の値をとり、pHの低下がほとんど見られなかった。しかし、0.02Nのグラフから次第に右上がりの傾向が現れ、硫酸を透過したグラフよりも緩衝能力の限界をはっきりと分かる。0.04N以上の濃度の透過で急激なpHの低下がみられた。

以上のことより、日本原土はCEC(陽イオン交換容量)やグラフの形状をみる限り、高い緩衝能力を保持していると考えられる。しかし、硫酸に比べて硝酸に対する緩衝能力が低いと考えられる。一方、湖山土が日本原土と異なる点は湖山土の緩衝能力は高いと考えられるが、緩衝能力の限界が急激におとずれる。

## (2) 土のファイネスナンバーと強度の変化

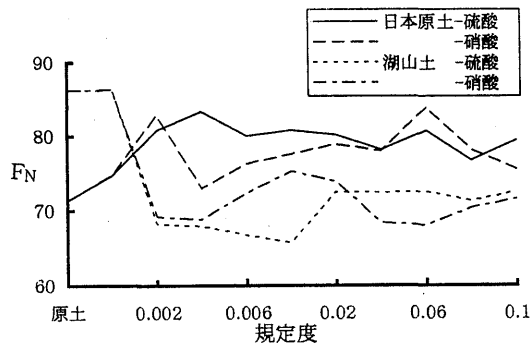
試料土のフォールコーン試験から求められたF値を第3図に示す。フォールコーン試験から求められたF値はJIS1205A による液性限界に近似するとされている。今、酸によるF値への影響を求めてみる。酸を透過したことによって、日本原土では原土および蒸留水透過の供試土に比べるとF値は酸透過により大きい値をとっている。つまり酸の透過によって日本原土のF値は上昇したということであり、親水性になってきている。一方湖山土は日本原土とは全く逆の結果を示している。すなわち、疎水性の傾向を示している。このことは両土が酸の取り込みの形態が第1図と第2図との比較より異なることが推測される。

供試土AのF値を $F_0$ とし、供試土BのF値を $F_N$ とおいたとき、土の強度に関して次のことが言える。

$$F_0 > F_N \quad \text{土の強度は低下した}$$

$$F_0 < F_N \quad \text{土の強度は増加した}$$

上記より



第3図 土のファイネスナンバーの変化

日本原土：溶脱試験を行った（供試土Bの時の）日本原土のF<sub>N</sub>値は、カラム試験をしなかった（供試土Aの時の）日本原土のF<sub>0</sub>値をすべて上回った。よって日本原土の強度は人工酸性雨によって増加したことが考えられる。硫酸と硝酸のF値を比べたとき、日本原土の硫酸を透過したF値は硝酸を透過したF値より高い値をとる結果となった。硫酸は硝酸に比べて日本原土の強度をより高める働きを持つ傾向にあると考える。

湖山土：供試土B時の湖山土のF値は供試土A時のF<sub>0</sub>値をすべて下回った。よって湖山土の強度は人工酸性雨によって低下したと考える。

次に、フォールコーン試験結果より、土の剪断強さをハンスポーの式を用いて求めてみる。

$$C_u = K \cdot Q \cdot h^{-2}$$

ここに、C<sub>u</sub>：非排水剪断強度 (kPa)

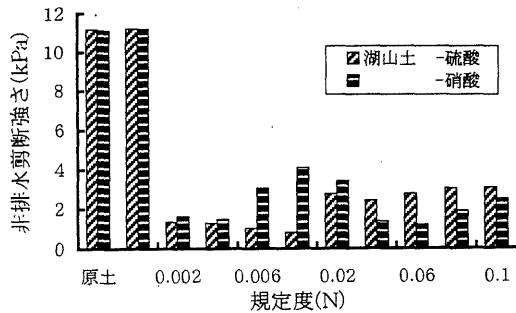
K：定数 = 2.13 / (π · N<sub>c</sub> · tan<sup>2</sup>α) ≒ 0.3

N<sub>c</sub>：コーンの支持力係数

Q：おもりの自重 (N)

h：貫入量

ただし、この式は内部摩擦角φ=0という仮定にて求められるものであり、つまり粘土にしか適用できない。それ故に、湖山土についてのみ非排水剪断強さ(C<sub>u</sub>)を求めることができる。湖山土に含水比70%の水分量を与えたときのC<sub>u</sub>を求め、それを第4図に示す。原土と蒸留水透



第4図 規定度と土の剪断強さの関係(含水比:70%)

過供試土はほぼ同じ11.2kpaの値をとっている。硫酸・硝酸を透過した供試土の非排水剪断強さは、原土の非排水剪断強さに比べ大きく低減し、硫酸の透過により原土の0.07~0.28を、また硝酸の透過により0.11~0.37の割合となっている。一番剪断強さが低下するのは、硫酸が0.008NでpH4.11、硝酸が0.06NでpH2.40となっている。そして、土の酸中和によってイオン交換といった溶脱が行われた結果、イオンの種類または規定度の違いによって非排水剪断強さにある一定の規則性がみられるの

ではないかと思われたが、今回の実験では判別や断言することはできなかった。強いて挙げるとすれば、硫酸透過においては低濃度でも大きな剪断強さの低下があること、硝酸透過では硫酸とは逆の傾向がみられる。ところで、今回のカラム実験においては本当に強度の変化が人工酸性雨による影響なのかを検討する。

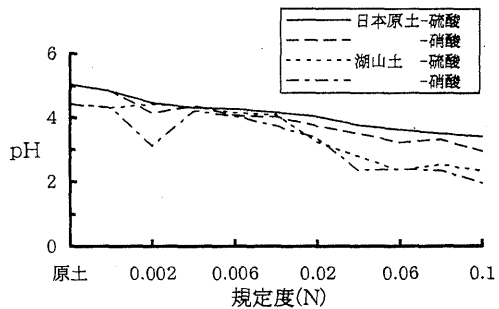
今回の場合、土の強度に与える要因としては、

- ①人工酸性雨による影響、
- ②土の練り直しによる影響、
- ③リーチングによる影響、
- ④シキソトロピー が考えられる。

③に関しては、原土と蒸留水透過の供試土のフォールコーンの値に違いが見られなかったので、影響はなかったと考える。②と④に関しては、これらの試験時に起こりうる問題であるが、一定の条件下で行ったので影響はほぼなかったと考える。これらのことより、①のことが最も土の強度変化に貢献したものと考える。

### (3) 土のpHの変化

カラム実験後の土のpH試験の結果を第5図に示す。日本原土、湖山土ともに透過した酸の濃度が高くなるに従って、酸の種類に関わらず、pH値は徐々に低下した。また硝酸を透過した供試土の方が硫酸を透過した供試土より若干低いpH値になった。



第5図 規定度の違いにおける土のpH

## 総 括

酸性雨は重要な環境問題として各分野で取り上げられている。土質工学分野においても、土の酸性化に伴う土の強度の低下が懸念される場所である。人工酸性雨の影響について土質工学的立場から取り上げ、人工酸性雨によって土の性質がどのように変化するかを、特に土の強度変化、土の酸性化および土壌の緩衝作用について実験を行い、検討を加えた。

酸性雨の透過により土のファイネスナンバーおよび強度に変化がもたらされた。特に湖山土の強度低下は大き

く、硫酸透過で原土の0.07~0.28, 硝酸透過で原土の0.11~0.37の強度しか発現しなかった。硫酸・硝酸溶液の濃度が高くなるにつれて、土壌の緩衝能力の低下、土の酸性化は進むが、土のファイネスナンバーおよび強度はほとんど変化がなかった。酸の種類によって土のファイネスナンバー、土の強度、土の酸性化および土壌の緩衝作用に異なった影響を与えることがあった。

#### 引用文献

- 1) 古河幸雄, 藤田龍之, 平山和雄: 安定処理したまさ土へ及ぼす酸性雨の影響, 土質工学会論文報告集, 34(3): 123-135(1994)
- 2) 飯田俊彰, 上木勝司: 日本海沿岸地域における酸性雨・雪の特徴, 農土誌 60(12): 5-8 (1992)
- 3) 山口晴幸, 福田 誠, 鶴居正行, 黒島一郎: 酸性雨と土質, 土と基礎, 40(12): 35-40(1992)
- 4) 山口晴幸, 福田 誠, 鶴居正行, 黒島一郎: 酸性雨をかんがみた土の物理化学的性質に関する考察, 土と基礎, 41(6): 47-52(1993)