

兎島湖底堆積土の酸性化過程における 温度・水分条件の影響

上野 薫*・足立忠司**・成岡 市**

Influence of Temperature/Water Condition on the Acidification Process of Sediment in Lake Kojima

Kaoru UENO*, Tadashi ADACHI** and Hajime NARIOKA**

* The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

** Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

Abstract

In acid sulfate soils, the material which causes heavy acidity is sulfate ; mainly pyrite (FeS_2), produced from the sediments in the sea that contain a lot of organic matter and sulphuric acid and subjected to heavy reductive conditions. In the process of sulphuric acid production, particularly in the primary acidity stage, chemical acidity and bacterial acidity act together. These bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans*) contribute a major role as catalysts. The purpose of this study is to investigate the relationship between the acidification process and the temperature and water content conditions through an incubation experimentation. Results are listed as follows :

(i) In 10-50°C temperature conditions, the soil was acidified more strongly at high temperature by chemical oxidation accompanied by high evaporation rate. The acidification was stopped when the quantity of evaporation became lower than the level of soil moisture.

(ii) When keeping the water condition with almost no evaporation, the speed of acidification is slow but continuous. At 30°C and at around -31.0 kPa, the acidity is extremely strong.

The above results show that the speed of evaporation influences the acidification process and microstructure of the soil matrix. Drying is also an important factor that influences acidity due to bacterial activity.

Key words : acid sulfate soils, temperature, water content, acidity, microorganisms

1. はじめに

酸性硫酸塩土壌は主に熱帯の低湿地に広く分布する問題土壌で、古くからその酸性化機構や改良方法に関する研究がなされてきた (Dent and Pons, 1995)。酸性硫酸塩土壌が強酸性化する原因物質は主としてパイライト (Pyrite ; FeS_2) である。沿岸浅海域等の堆積物中に存在

する多量の有機物が海水中の硫酸イオンと反応することで生成した硫黄化合物の主成分であるパイライトが酸化され硫酸が生成する過程 (とくに初期的酸化過程) では、化学的酸化と微生物的酸化 (微生物の働きによるパイライト等の酸化) が共に関与し、微生物 (鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌) の働きが触媒として極めて大きな役割を果たしているといわれている (Darrell *et. al*, 1982 ; 高井

* 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 津島中 3-1-1

** 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 津島中 3-1-1

キーワード : 酸性硫酸塩土壌, 温度, 水分条件, 酸性化, 微生物

ら, 1989)。しかし, 土壌中の細菌の挙動についてはまだ不明な点が多く残されている。

本論は, 酸性硫酸塩土壌の生成過程において, パイライト等の土壌酸性化要因物質の酸化に関与する微生物の働き(微生物的酸化)と化学的酸化との関係について, これらの過程における可変要因である「土壌温度および水分条件」に着目し, これを室内実験によって検討したものである。

2. 材料および方法

2.1 供試土およびその理化学性の測定

供試土は, 岡山県児島湖の湖底堆積土(1998年採取。生土。乾燥経歴なし。湖のほぼ中央部において水面より採泥器を投下して採取。二重にした厚手のビニール袋に密閉。室内冷暗所に保存)とした。

この供試土の理化学性は, 土粒子密度, 土壌水分特性(加圧板法), 液性限界 ω_L , 塑性限界 ω_P , 収縮限界 ω_S , 初期含水比 ω , 粒径組成(国際土壌学会法), pH(H_2O , 1:5), pH(H_2O_2), EC(1:5)などを地盤工学会の定法に準拠して測定し, パイライト含有量は酸可溶性硫黄の半定量法(村上, 1961)により測定した。なお, pH(H_2O)は, 土壌に蒸留水を加え, 土塊をガラス棒で崩した後に90分間静置し, 測定直前に攪拌したものを3回測定し, その平均で示した。

2.2 実験方法

2.2.1 乾燥条件下の温度と酸性化の測定

連続的な乾燥条件下における温度による土壌酸性化の影響を追跡するために, ステンレス・バットに供試土(生土)2kgを入れ, 設定温度を10, 20, 30, 35, 40, 50°Cの6段階にした恒温器内で各土壌を連続的に乾燥させた。温度条件は, 一般に微生物的酸化に働く硫黄酸化細菌や鉄酸化細菌が28~30°Cで液体培養される(田野ら, 1993)こと, および土壌培養の予備実験で酸性化が45°C>30°C>15°Cであったことから, 30~40°Cの中間温度にも着目し, 上記のように設定した。30°C以下を低温区, 35°C以上を高温区として便宜上区別した。土壌の乾燥過程では, バット内土壌の水分分布が均一となるように4時間毎に手動攪拌し, 供試土が土塊を形成してから(塑性限界以降)は, サンプリング時の不均一性を避けるために上記攪拌のたびに土塊を手により崩し, 土塊径の均一化を図った。pH(H_2O , 1:5), 含水比 ω (kg/kg)の測定日は, 10~30°C区は実験開始から0, 1, 2, 4, 8, 16, 21日目に, 35~50°C区は蒸発速度を考慮して0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16日目とした。

2.2.2 一定水分条件下の温度と土壌の酸性化の測定
土壌の水分変化がほとんどない条件下において, 温度

表-1 供試土の基本的理化学性

Table 1 Fundamental physical and chemical properties of sample soils

| 土性 ¹⁾ | SiCL (粘土割合 10%) |
|--|-----------------|
| 土粒子密度 (Mg/m ³) ²⁾ | 2.68 |
| 液性限界 LL (kg/kg) | 1.20 |
| 塑性限界 PL (kg/kg) | 0.48 |
| 収縮限界 SL (kg/kg) | 0.33 |
| 塑性指数 Ip | 0.72 |
| 粘土活性度 A ³⁾ | 7.21 |
| pH (H_2O) | 7.36 |
| pH (H_2O_2) | 2.45 |
| EC (mS/cm) | 10.32 |
| パイライト含有量 (wt.%) ⁴⁾ | 1.20 |

¹⁾ ハイドロメーター法 (国際土壌学会)

²⁾ ピクノメーター法

³⁾ $A = I_p / 2\mu m$ 以下粘土含有率 (%)

⁴⁾ 酸可溶性イオウの半定量法

条件と水分条件が土壌の酸性化および微生物に影響を与える程度を知るため, 以下の実験を行った。

温度条件は, 上記実験2.2.1により得られた結果(酸性化が速い50°C)と, 酸性硫酸塩土壌の酸性化に関与する鉄酸化細菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)や硫黄酸化細菌(*Thiobacillus thiooxidans*) (Wakao *et. al.*, 1982; 加村, 1986; 高井ら, 1989)の鉄酸化活性における最適温度付近の30°C(伊藤, 1968; 寺井ら, 1971)の2段階に設定した。

水分条件は, 土壌の力学的変移点とされる液性限界 ω_L (供試土の測定の結果; 1.20 kg/kg), 塑性限界 ω_P (同; 0.50 kg/kg), および収縮限界 ω_S より乾燥側(同; 0.15 kg/kg)とした。微生物の有無の条件設定は, 生土のオートクレーブ滅菌処理(120°C, 1時間, 1.2 kgf/cm²)の有無によって行った。なお, この滅菌処理により土壌中の鉄酸化細菌および硫黄酸化細菌数はゼロとなっていた。以後, オートクレーブ滅菌処理区を無菌区, 無処理区を有菌区と称する。この処理後, 各土壌を30°C恒温器内で乾燥し, 水分条件を設定した。水分設定終了後の土壌は, バイアル瓶に密閉し30°Cおよび50°Cに設定した恒温器内で保存した。

以上の12区の供試土について, pH(H_2O , 1:5), EC(1:5)を2週間毎に測定した。測定用のサンプルは, 供試土の中心部より採取した。なお, 好気条件を維持する目的で, 1日1回の頻度でバイアル瓶の蓋を開けて換気した。

3. 結果

3.1 供試土の理化学性

供試土の基本的理化学性を表-1 に示した。供試土は、粘土活性の高い SiCL であった。実験初期の pH は 7.36、パイライトを 1.2 wt.% 含んでおり、潜在的な酸性硫酸塩土壌の特徴をよく示していた。供試土の採取（分布）域からも酸性硫酸塩土壌の研究材料として適していると判断した。

3.2 乾燥条件下の温度と土壌酸性化の関係

pH の経時変化を図-1 に示した。pH は、全ての温度区において、実験開始から 2 日目までの間に、初期値から若干（0.4 程度）上昇した後、急激な低下傾向に入った。

35℃ から 50℃ の高温区（図中の破線）では、最低の pH となった後に、漸増傾向を示した。上に凸のピークをとった後から 4 日目までの pH の低下は、高温条件ほど速い傾向にあったが、35℃ 区では 40℃ 区よりも若干速かった。また、4 日目以降は、50℃ 区で pH の低下に停滞傾向が見られ、8 日目頃より漸増傾向に移った。40℃ 区、35℃ 区も同様の傾向が見られた。

10℃ から 30℃ の低温区（図中の実線）では、低温条件ほど pH の低下傾向が長く続いた。最低の pH 値は、30, 20, 35, 40, 10, 50℃ 区の順に低く、pH と温度の関係は直線性を示さなかった。

次に上述の現象を定量的に比較するために、次式で表した「土壌酸性化度」（Degree of acidity, 以降 Da と称する）を求め、図-2 に示した。 Da 値が高いほど短時間で多くの酸が生成されたことを表す。

$$Da = (pH_{max} - pH_{min}) / d \quad (1)$$

ここで、 Da ; 土壌酸性化度、 pH_{max} ; 恒温培養期間中に測定された最大 pH 値、 pH_{min} ; 恒温培養期間中に測定された pH の低下傾向が漸減し始めた時の pH 値、 d ; pH の低下傾向が漸減し始めるまでの日数である。この指標は、後述の実験 2.2.2 にも用いたが、ここでは土壌 pH の低下幅が小さく、 d の値に Da が大きく左右されたことから、pH については前回測定値との差が 0.1 以内であれば前回の測定値を pH_{min} とし、前回までの日数を d として算出した。

Da 値は、10℃ 区で最も低く、高温区ほど高い傾向にあった。この中で、35℃ 区は値がとくに高く、微生物的酸化が活発であったことを示唆していた。

pH と含水比 ω の関係は図-3 に示すようであった。初期の $\omega = 3.00$ kg/kg から 1.80 kg/kg の範囲における乾燥過程では、全ての温度区において pH が上昇し、上に凸のピーク（pH 8.12~8.33）をとり低下傾向に移った。

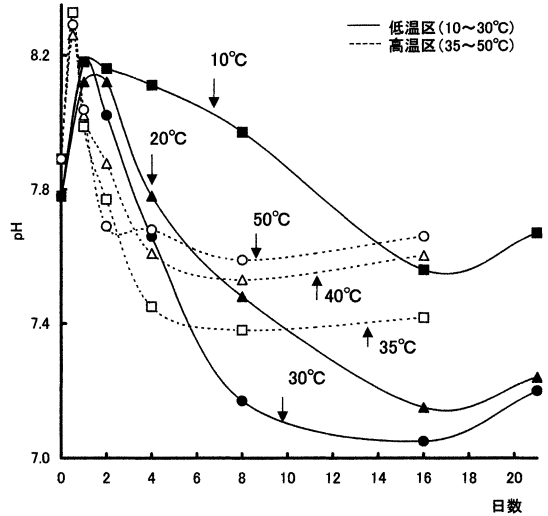


図-1 乾燥条件下における pH の経時変化

Fig. 1 Changes in pH under different temperature in drying condition.

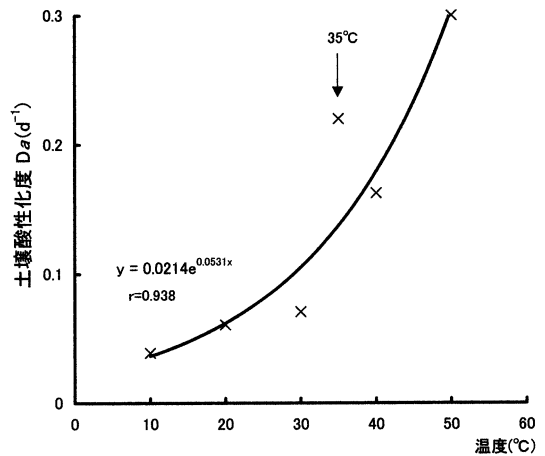


図-2 乾燥条件下における土壌酸性化度 Da

Fig. 2 Changes of soil acidity (Da) in drying condition.

各区での含水比の低下は、温度の高い順に速く、蒸発が急激に遅くなったときの含水比は、温度の高い順に、0.033, 0.022, 0.051, 0.049, 0.063, 0.161 kg/kg であった。いずれの温度区でもこの含水比の時に、pH の低下は緩慢になり、値は漸減あるいは漸増していた。この含水比は 0.20 kg/kg よりも乾燥側であり、供試土（生土）の水分特性曲線（図-4）では -981.0 kPa（pF 4.0）以上に相当していた。

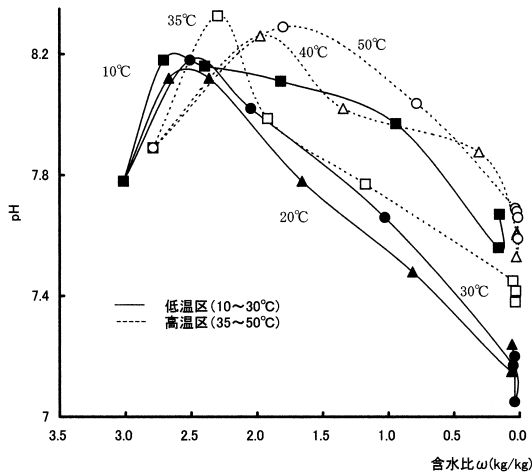


図-3 乾燥条件下における pH と含水比 ω の関係

Fig. 3 Relation between pH and water content in drying condition.

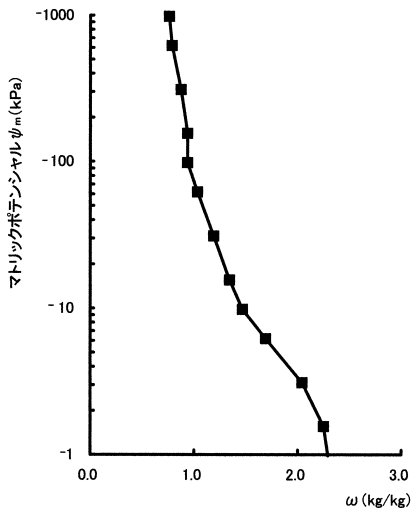


図-4 供試土の水分特性曲線

Fig. 4 soil moisture curve of sample soils.

なお、生土の水分特性曲線 (図-4) が示す含水比 0.20 kg/kg 相当のマトリックポテンシャルと、実際に乾燥した土壌のマトリックポテンシャルは厳密には一致しない (足立ら, 1992) が、 -98.1 kPa (pF 3.0) 以上の低含水比領域では水分差は過少であるので、生土の水分特性曲線と近似させることとした。

3.3 一定水分条件下における温度と土壌酸性化の関係

pH の経時変化を図-5 に示した。高温 50°C 区の有菌区 (図-5 (a), 黒塗り) では、水分条件の差異に関わらず同様の pH の低下傾向を示した。これは、30°C・0.50 kg/kg・有菌区 (図-5 (b), 実線, ▲) に近い低下傾向であり、pH が 5 以上の範囲で変化していた。一方、無菌区 (図-5 (a), 破線, 白抜き) では、pH の変化は水分条件によって一定ではなく、1.20 kg/kg 区の pH の低下程度は小さく、他の水分条件では 50°C 有菌区と同程度の pH 低下傾向を示していた。

常温の 30°C 区 (図-5 (b)) の有菌区 (同図, 黒塗り) では、pH の低下速度は、速い順に 1.20, 0.50, 0.15 kg/kg となっており、その低下傾向には大きな差が生じ、最低を示す pH も同じ順に低い値を示した。無菌区 (図-5 (b), 破線, 白抜き) では、水分条件に影響されず、上述の高温区と同様に pH 低下程度は小さく、高温区よりも遅かった。このように、30°C では有菌区と無菌区の結果に大きな差異が生じ、とくに有菌区では高い水分条件における pH の低下が激しかった。

上述の現象を定量的に比較するため、温度別の土壌酸性化度 Da を図-6 に示した。

有菌区では、 $\omega = 1.20$ kg/kg において $Da_{30^\circ\text{C}} > Da_{50^\circ\text{C}}$ となり、温度により 2.0 倍の差があった。これに対して $\omega = 0.50$ kg/kg および 0.15 kg/kg においては $Da_{30^\circ\text{C}} < Da_{50^\circ\text{C}}$ となり、1.6~1.9 倍の差となった。

無菌区では、 $\omega = 1.20$ kg/kg において $Da_{30^\circ\text{C}} \approx Da_{50^\circ\text{C}}$ (1.1 倍の差) であり、 $\omega = 0.50$ kg/kg と 0.15 kg/kg においては $Da_{30^\circ\text{C}} < Da_{50^\circ\text{C}}$ となり 1.8~2.4 倍の差となった。

また、図-7 に、 Da の 30°C に対する 50°C の比を示すと、最高値 (無菌・0.50 kg/kg 区) と最低値 (有菌・1.20 kg/kg 区) の差は 5 倍にも達し、土壌の酸性化において温度条件の微生物に対する影響力が大きいことを示していた。

これらの含水比に相当する水分状態を、前出の図-4 の水分特性曲線から推定すると、土壌の酸性化が最も強く生じた水分条件 ($\omega = 1.20$ kg/kg) は、 -31.0 kPa 付近であった。

4. 考 察

4.1 乾燥条件下における温度と土壌の酸性化について

初期の pH 上昇 (図-1) は、温度・水分環境の急激な変化に伴う微生物の一時的な生育停滞により酸の生成が低下することを示していた。さらに系外への溶脱のない実験条件であることから、土壌中のアルカリ金属やアルカリ土類金属を含むケイ酸塩鉱物が炭酸により溶解した結果、弱アルカリ性を示す (和田ら, 1998) と考えられた。また、高温区の後期における pH の漸増は、長期間

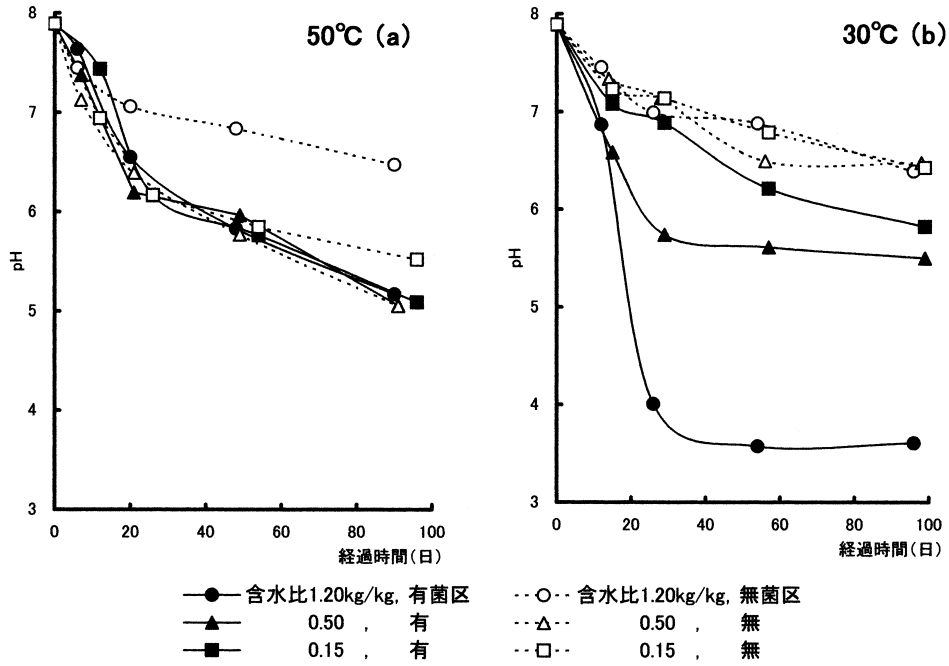


図-5 一定水分条件下における pH の経時変化

Fig. 5 Changes in pH on three levels of water content.

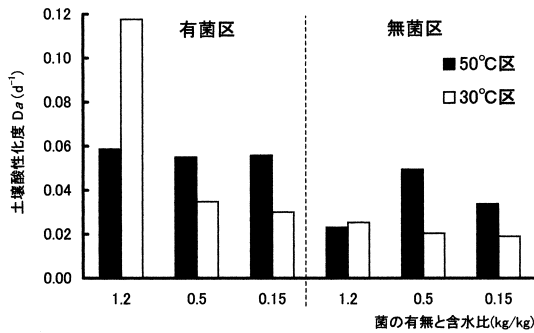


図-6 一定水分条件下における土壤酸性化度 D_a

Fig. 6 Differences of soil acidity (D_a) on three levels of water content.

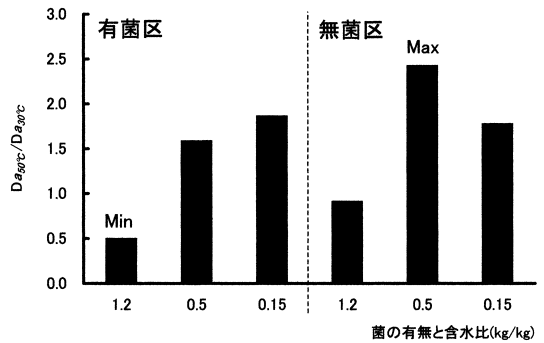


図-7 一定水分条件下における土壤酸性化度 D_a の温度比

Fig. 7 Ratio of $D_{50^\circ C}/D_{30^\circ C}$ on three levels of water content.

の乾燥の結果、土壤環境が細菌の生育にとって劣化し、初期における pH 上昇と同様の現象が生じたと考えられた。

土壤酸性化度 D_a は温度上昇と指数的関係にあった (図-2) が、これは化学的酸化と微生物的酸化の総合的な結果である。ここで、35°C で D_a がとくに高かったことに着目する。化学的酸化の反応速度が $40^\circ C < 35^\circ C$ であ

ることは、熱理学的にも実験 2.2.2 の結果 (図-6) から説明しにくい。この現象の説明として、微生物の増殖最適温度を考えた。微生物は、増殖最適温度を超えるとタンパク質が変性し急激に増殖率が低下する (スタニエラ, 1997)。供試土の酸性化 (硫黄化合物の酸化) に直接関わる鉄酸化細菌や硫黄酸化細菌の生育温度は $10 \sim 37^\circ C$ であり、増殖最適温度は鉄酸化細菌の多くは $30 \sim$

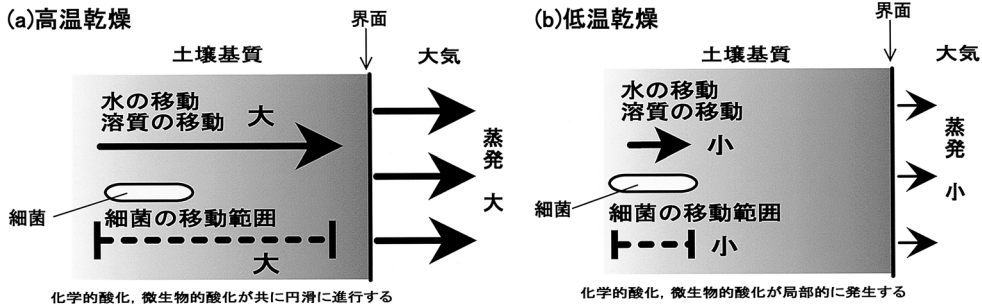


図-8 温度の差と土壌酸性化 (模式図)

Fig. 8 Types of soil acidification in different temperature.

35℃, 硫酸酸化細菌は30℃付近である(いずれも液体培養, 千田ら, 1996)。これらの細菌が混在する液体培養下での鉄酸化率は35℃付近をピークに急激に低下すると報告もある(伊藤, 1968)。本実験において35℃で Da が急激に高まり40℃で低下したのは, 35℃でこれらの細菌の増殖および鉄酸化活性がピークを迎えたためと考えられる。このように考えると, $Da_{30^\circ\text{C}} < Da_{40^\circ\text{C}} < Da_{50^\circ\text{C}}$ の結果は, 化学的酸化が温度上昇にともなって促進した影響と説明できる。

以上のような温度による土壌酸性化の違いを土壌水分との関係で理解するために, 以上の結果を土壌水分の動きの観点から整理し, 図-8に示した。この図では, 土壌基質内の土壌水の形態が液状であることが前提である。土壌中における細菌の増殖と土壌水分との関係を考察する場合, 細菌の生育可能な最低水分量と細菌の棲息場所が問題となる。乾燥により土壌の構造が大きく変化する供試土の場合にはとくに後者が重要である。固体-液体界面が存在する環境では, 細菌は固体表面に吸着され表面上で最大密度まで増加し, それを超えると娘細胞は液中に放出される(森崎ら, 1998)。土壌中の細菌も, 土壌粒子に吸着し増殖するとすれば, 土粒子あるいは土塊や団粒の表面が最大増殖密度を超えると, 増殖した若い娘細胞は液相へと放出される。浮遊細菌は土壌水の移動とともに容易に土壌基質内を移動し, 吸着できる固体表面があればそこで棲息し増殖する。浮遊する細菌が土壌基質内をどれだけ自由に移動できるかが土壌全体における細菌の増殖および土壌の酸性化に大きく影響を与える。細菌の移動性は主に移動水の流れに依存することから, 土壌中の液状水の量が重要となる。

温度が高くなるにつれ, 土壌水の蒸発速度は高まり, これにともなって土壌水の移動性は高まる。土壌水の移動にともない溶質も移動し(溝口ら, 1988; 粕淵ら, 1989), 上述したように, 土壌に吸着されていない細菌は

土壌水中に浮遊していると考えられるため, 土壌水の移動性ととも細菌の移動性も高まり, 土壌基質全体で効率よく細菌が栄養源を利用できる。これに引き続き様々な化学反応が速く進行する。これが(a)の状態である。少なくとも50℃や40℃の乾燥初期がこの状態に該当する。しかし, 土壌水分量が細菌生育の必要水分量以下に達するのにも速く, この状態では微生物的酸化が十分に発揮されず, pHの低下が中性付近で終了したと考えられた。一方, 温度が低いと蒸発速度は遅く, 土壌水の移動性は低下し, 溶質や細菌の移動性は低くなる。この状態が(b)であり, 少なくとも10℃や20℃はこの状態に該当する。30℃や35℃は, (a)と(b)の中間にあたり, 蒸発速度は土壌が乾燥しすぎるほど速くもなく, 土壌水の移動が小さすぎるほど遅くもない。このため, 30~35℃では細菌による微生物的酸化が促進した。

実験では, どの温度もやがて毛管連絡水が切れ, 最終的には各温度における相対水蒸気圧と平行に達する水分状態になり, 蒸発は停止した。蒸発が停止した状態では土壌pHの低下も漸減し始めていた。土壌水の移動が停止した状態では, 微生物的酸化および化学的酸化の活性はほぼ消失し, 多少の酸性化反応が生じたとしても土壌中の多様な鉱物により中和されると考えた。

4.2 一定水分条件における温度と土壌の酸性化について

高温の50℃区は, 微生物の動きが非活発であり, 微生物の有無に影響されることなく土壌の酸性化が進行した(図-5)と考えられた。これらの酸性化の程度は30℃・有菌・0.50 kg/kg区に相当するほど高かった。これより, 温度が50℃であれば化学的酸化だけでもかなりの土壌の酸性化が進行することが推定される。

一方, 常温の30℃区では, 水分条件により微生物の活動に差が生じ, 有菌区では土壌の酸性化の程度にばらつきが生じたと考えられる。無菌区では, 化学的酸化のみ

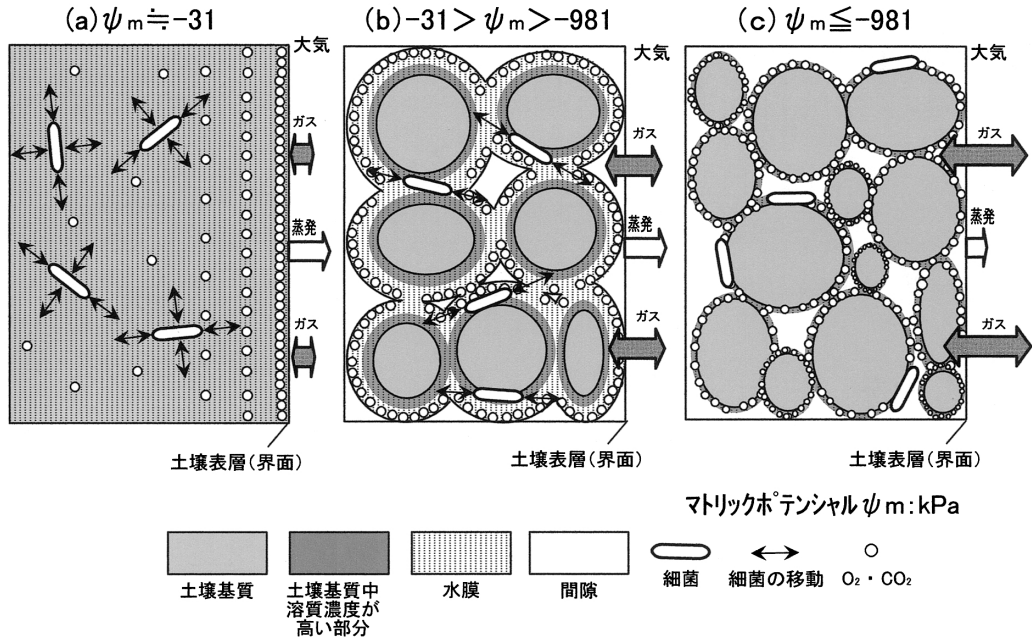


図-9 土壌水分状態と細菌の生息環境（模式図）

Fig. 9 Types of habitat of bacteria in different water content.

が進行し、化学反応も 50℃ に比べて遅く、pH の低下が遅くなったと推定される。

また、30℃・有菌・0.15 kg/kg 区は、30℃ における 1.20 kg/kg や 0.50 kg/kg に比べると pH の低下傾向が直線的であり、微生物的酸化よりも化学的酸化が主として働いていたと考えられる。ω=0.15 kg/kg は細菌の活動に抑制的な条件として働いた可能性が高い。

温度ごとの Da をみると、有菌・1.20 kg/kg 区において $Da_{30℃} > Da_{50℃}$ の関係があったほかは、全ての区で $Da_{30℃} \leq Da_{50℃}$ の関係であった（図-6）。これは、温度条件と水分条件の両方が揃うことで微生物が急激に活発になり、pH の低下を激しく促進させることを示している。この微生物の急激な活発化について、村上（1968）は、「酸性硫酸塩土壌の微生物的酸化は、適当な水分・温度・空気の条件下であれば著しく速い」と述べており、本研究は、水分・温度に関してこれを支持する結果となった。土壌の酸性化メカニズムにおける水分条件 ω=1.20 kg/kg (-31.0 kPa) は、微生物に対して重要な意味を持っているといえる。

4.3 乾燥過程における土壌水分変化が細菌に与える影響

本論では、微生物の働きが水分条件に大きく影響を受けることが確認された。足立ら（1992）は、酸性硫酸塩土壌の乾燥過程において、少なくとも pF 3.0 (-98.1

表-2 毛管間隙径と細菌径

Table 2 Size of micropore and bacteria

| 等価間隙径 (μm) | 等価 pF | 等価 φm (kPa) | 細菌径 |
|------------|-------|-------------|-----|
| 0.03 | 5.0 | -9,810.0 | |
| 0.09 | 4.5 | -3,102.2 | |
| 0.30 | 4.0 | -981.0 | |
| 0.50 | | | 短径 |
| 0.95 | 3.5 | -310.2 | |
| 1.00 | | | 長径 |
| 1.19 | 3.4 | | |
| 1.50 | 3.3 | | |
| 1.80 | 3.2 | -155.5 | |
| 2.38 | 3.1 | | |
| 3.00 | 3.0 | -98.1 | |
| 9.49 | 2.5 | -31.0 | |

注) 細菌；鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*)
 硫黄酸化細菌 (*Thiobacillus thiooxidans*)

kPa) の土壌水分域（高含水比領域）で微生物的酸化が卓越しそれ以上の低含水比領域では化学的酸化が主体でそれのみでもかなり酸化が進行すると示した。本研究では微生物的酸化が卓越する現象はやや高い含水比領域（-31.0 kPa）で認められた。この土壌水分状態の差は、

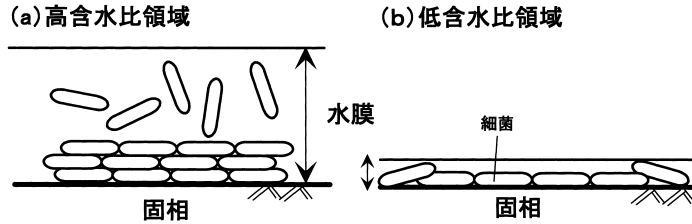


図-10 水膜の厚さと細菌の移動性 (模式図)

Fig. 10 Water thickness and bacterial motility.

供試土や実験過程の差による土壌微細構造の違いに起因すると考えられた。

対象菌のような微小な好気性細菌は、「大団粒の表面や大団粒を構成する小団粒の表面、および内部の空間、間隙のような部位に生息している」と考えられており(和田ら, 1981), サイズが小さいほど比表面積が大きく, 土壌表面の状態, 間隙の質や量などの土壌の微細構造に大きく影響を受ける。また, 一般的に, これらの好気性独立栄養細菌(田野ら, 1993)の成長や増殖に影響する要素は, ①栄養基質の量, ②酸素, 二酸化炭素の量, ③培養温度であるが, 土壌中では ④細胞の移動範囲も重要であると考えられ, これらは土壌の微細構造と深く関係している可能性がある。供試土は乾燥にともない酸化鉄が増加する性質から, 乾燥により土壌の微細構造が変化していることは十分に考えられる(Takahashi and Toriyama, 1998)。また, 供試土は膨潤性の活性粘土であり, 交換性イオンや水分に対する物理的変化が大きく, 水分条件の差が細菌の棲息場所としての土壌微細構造に大きな影響を与えた可能性は高い。

これまでの議論から, 土壌水分状態の変化における土壌微細構造と細菌の関係を, 図-9 にまとめて示した。

(a) は, 微生物的酸化が促進された -31.0 kPa 付近の状態では, 前出実験 2.2.1 における蒸発が盛んに生じている段階や, 前出実験 2.2.2 の 1.20 kg/kg 区 (-31.0 kPa) に相当している。 -31.0 kPa は, 毛管連絡切断含水量のやや湿潤側にあり, 土壌水分が液状でよく移動する状態にある。この状態は, それよりも高い含水比領域と比べると, 増殖し浮遊した細菌が粘土粒子の表面に定着しやすく, しかも酸素や二酸化炭素の供給もある。このような条件は, 上記細菌の成長や増殖に適した環境と考えられる。

(b) は, (a) と (c) の中間の状態である。(c) は, 乾燥が進み土壌構造がより発達した状態である。多くの間隙の存在により, 酸素や二酸化炭素の供給は行われるが, 水分の移動性が低下し, 細菌の移動範囲が狭くなり,

土壌基質中に溶存する栄養分が少なくなるか, あるいは細菌の密度が低い部分では, 栄養分が局部的に高濃度となることが推測できる。この状態は, 前出実験 2.2.1 で蒸発と酸の生成が停止した $\omega=0.20$ kg/kg 以下の条件や, 前出実験 2.2.2 における微生物的酸化が抑制された 0.15 kg/kg 区に相当する。このときのマトリックポテンシャルは -981.0 kPa 以上(図-4)である。

ジュレンの式によりマトリックポテンシャルに対する等価間隙径を示すと, 各土壌水分状態における主要な間隙径が推定できる。この間隙径と細菌の大きさを比較したのが表-2 である。土壌中の主な間隙径が細菌の大きさ以下である土壌水分状態は -310.2 kPa 付近 ($d=1.00\sim 0.50\mu\text{m}$) から乾燥側である。 -981.0 kPa 付近では, 乾燥収縮のために間隙径が小さく, 細菌の移動が困難であると考えられる。また, 乾燥につれて, 土壌粒子表面の水膜の厚さは減少し, 間隙水圧も増大する(図-10)ことを考慮すると, -981.0 kPa 付近における細菌の移動性の低下は容易に推測できる。

このように, -981.0 kPa 以上の乾燥状態(図-9, (c))では, 細菌の成長・増殖が大きく抑制される。化学的酸化も溶媒となっている水の量や移動性の極端な低下により強く抑制され, 土壌の酸性化は極めて非常に進行しにくい状態となっている。

5. おわりに

本論では, 酸性硫酸塩土壌の酸性化過程と温度・水分条件との関係を明らかにするため, 潜在的酸性硫酸塩土壌である岡山県児島湖の湖底堆積土における次の二つの土壌酸性化過程を室内実験により追跡した。

1) 乾燥条件 ($10\sim 50^\circ\text{C}$ の 6 温度による乾燥) における土壌の酸性化過程。

2) 一定水分条件として, $\omega=1.20, 0.50, 0.15$ kg/kg の 3 段階水分条件を設定し, 30°C および 50°C の 2 温度条件で保存した場合の土壌の酸性化過程。

その結果, 以下の事実が明らかとなった。

(1) 乾燥条件における温度と土壌の酸性化の関係について、土壌の酸性化に関わる微生物の働きは35°Cでとくに活発であり、酸性化を促進させた。蒸発が停止する $\omega=0.20$ kg/kg (-981.0 kPa 付近) 以下の低水分条件でpHの低下は停止した。

(2) 一定水分条件における温度と土壌の酸性化について、50°C区では、土壌の酸性化に関わる微生物の働きは非活発で、水分条件による酸性化の程度差は小さかった。30°C区では、化学的酸化のみでは土壌の酸性化は緩慢だった。微生物的酸化が生じる場合は、 $\omega=1.20$ kg/kg (-31.0 kPa 付近) の水分条件で微生物の活性が高まり、土壌の酸性化が速かった。微生物の存在する土壌では、水分条件がpHの低下に大きく影響した。

以上のことから、酸性硫酸塩土壌の酸性化過程において、10~50°Cまでの温度条件で、水分の蒸発量が多い場合は、温度が高いほど化学的酸化により酸の生成は進行するが、乾燥が進み蒸発量がある量以下になると酸の生成は停止する。ある水分状態が保持される場合には、酸の生成は蒸発量が多い場合(乾燥条件)よりも遅いが、持続して生成される。温度条件と水分条件の両方が鉄酸化細菌等の微生物に適した条件(30°C, -31.0 kPa 付近)では、酸の生成が急激に高まることが分かった。

以上の事実は同様の分布域や性質を持つ酸性硫酸塩土壌の酸性化過程の特性を示す測定事例として位置付けることができる。細菌の活性が水分量に大きく影響を受けた理由は、土壌水分状態の変化に伴って土壌微細構造が変化したためと考えられたが、今後のさらなる研究が必要である。

謝 辞

本論をまとめるにあたり、実験協力を頂いた岡山大学環境理工学部土壌圏管理学専攻学生の皆様、試料採取にあたりお世話になりました皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

足立忠司・松本康夫・原 徹夫 (1992) : 土壌水分から見た干拓地土壌の酸性硫酸塩土壌化過程, 農土論集, 162 : 89-96.
 千田 侑・広吉直樹ら (1996) : 微生物資源工学, pp. 57-60, コロナ社, 東京.
 Darrell Kirk Nordstrom *et. al.* (1982) : Acid Sulfate Weathering SSSA Special Publication Number

10, pp. 37-56, SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, Madison.
 Dent, D.L. and Pons, L.J. (1995) : A World perspective on acid sulphate soils, *Geoderma*, **67**, 263-276.
 伊藤一郎 (1968) : バクテリア・リーチングの研究の現状, 醸工, **46** (4) : 325-335.
 加村崇雄 (1986) : 火成性パイライト酸化による酸性硫酸塩土壌の生成と鉄・イオウ細菌, 土肥誌, **57** (3) : 252-256.
 柏淵辰昭・中野政詩 (1989) : 水の中の物質移動 (その9) 農土誌, **57** (3) : 237-241.
 溝口 勝・藤井克巳・宮崎 毅・中野政詩 (1988) : 水の中の物質移動 (その3), 農土誌, **56** (9) : 903-909.
 森崎久雄・服部黎子 (1998) : 界面と微生物. pp. 68-78, 学会出版センター, 東京.
 村上英行 (1961) : 過酸化水素による干拓地土壌中の可酸化性イオウの半定量法, 土肥誌, **32** (6) : 276-279.
 村上英行 (1968) : 可酸化性イオウの酸化についての二三の問題, 土肥誌, **39** (2) : 116-120.
 Nario W., Masatoshi M., Yonekichi S. and Hideo S. (1982) : BACTERIAL PYRITE OXIDATION I, *J. Gen. Appl. Microbiol.*, **28** : 331-343.
 R.Y. スタニエ, E.A. エーデルバークら原著 (1997) : 微生物学入門, pp. 110-111, 培風館, 東京.
 高井康雄・小川直人・竹内えりか・犬伏和之・加藤茂・松本 聡・和田秀徳 (1989) : 中海干拓地での溶脱・酸化過程と鉄・硫酸酸化細菌数の経年変化, 土肥誌, **60** (2) : 151-156.
 寺井悌三・岩崎達也 (1971) : 鉄酸化細菌による鉱山廃水処理に関する研究, 醸工, **49** : 53-60.
 田野達男・杉尾 剛 (1993) : *Thiobacillus ferrooxidans* と *T. thiooxidans* の分離, 培養および同定, 資源と素材, **109** : 553-557.
 Takahashi, T. and Toriyama, K. (1998) : Role of Iron Oxides in Changes in Soil Microstructure with Drying and Redacting Treatments, *Soil Phys. Plant Growth, Jpn.*, **78** : 35-43.
 和田信一郎ら (1998) : 久馬一剛編 最新土壌学, pp. 91-92, 朝倉書店, 東京.
 和田秀徳・蘭 道生ら (1981) : 土壌微生物研究会編 土の微生物, pp. 154-155, 博友社, 東京.

受稿年月日 : 2002年1月4日

受理年月日 : 2002年5月1日