

微生物的観点からみた酸性硫酸塩土壌の研究史

上野 薫*・足立忠司**・成岡 市**

Studies on Acid Sulfate Soils from a Biological Perspective

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

Acid sulfate soils are one of the problem soils worldwide, and are found mainly in the tropical mangrove forests and mangrove swamps of Southeast Asia and Africa. Together, these areas account for about 12 million hectares of acid sulfate soils. But there is a shortage of arable lands in these areas, hence, acid sulfate soils are studied for agricultural purposes. While many studies have already made clear the mechanism of soil acidification, it is still unclear how bacterial actions are influenced by soil physical conditions. Additionally, clarifying the mechanism of changes in iron formation, leading to the development of acid sulfate soils may contribute to the understanding of the phenomenon. Studies on changes in iron formation in paddy soils, for example, could become an interesting research area in soil physics. This research area requires interdisciplinary collaboration and has good possibilities of advancing. Likewise, other bacterial studies in croplands will greatly supplement studies in acid sulfate soils.

In this paper, a number of studies on acid sulfate soils conducted in Japan and other countries are introduced and possible research areas in the future are identified.

Key words : acid sulfate soils, acidity, bacteria, soil moisture, soil physics

1. はじめに

酸性硫酸塩土壌 (Acid Sulfate Soil ; ASS) は、東南アジアやアフリカの主に浅海沿岸域やクリーク地帯に分布し、その多くは現在あるいは過去におけるマングローブ植生帯である。本土壌の総面積は、1,200 万 ha にもなる世界的な問題土壌である。分布域は、農地として利用可能な土地が不足している地域であることが多いため、酸性硫酸塩土壌の研究は主に農地利用を目的として発展してきた。土壌分類上の基準は、Soil Taxonomy (USDA, 1975) や FAO/UNESCO の世界土壌図 (1971-1981) および WRB (FAO, 1998) などにより設けられている。酸の生成を支配する要素は、地形的要素、気象的要素、土

壤内環境的要素 (土壌構造、塩分濃度、水分状態、微生物状態、pH 等)、人的要素 (耕起、土質改良等)、など多様でかつ複雑に絡み合っている。そのため、酸生成機構に関する研究は鉱物学、地質学、農業工学、微生物工学、などの各分野内で発展し、現場で生じる現象の体系的な把握整理には至っていないように思われる。

低湿地の開発を目的とした排水、あるいは干拓地造成による浅海域の干陸化により生じた強酸性土壌を農地として利用するためには、作物の生育障害の原因や酸生成の機構の解明および、それに基づく土壌改良技術の確立がまず求められ、まもなく基本的な酸生成機構は解明され、土壌改良法および農地化の工法が確立した。酸管理の現行技術は、中和剤の大量投入や大量の水による酸の

* 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, 酸性化, 細菌, 土壌水分, 土壌物理

洗脱である。前者では中和剤投入のタイミングや量の管理が難しく、現場では過剰な投入が生じがちな上にコストが高い。後者は、大量の良質な水が必要であり、問題が深刻な地域では実用的・持続的な方法とは言えない。また、酸や塩類の系外への排出は、酸自体や重金属、過剰なアルミニウムや鉄イオンによる流域の汚染を引き起こし、湖沼等の水生生物に害を及ぼす場合もある。

現地（とくに熱帯域）における酸性硫酸塩土壌の管理では、広域にわたる潜在的酸性硫酸塩土壌の分布や土壌酸性度の把握方法の確立が求められる。現行法は、簡単な土壌培養試験や土壌 pH (H_2O_2) 試験であり調査点の土深が浅く狭い面積の調査であれば工数上の問題はない。しかし、調査が必要な現地のパイライト含有部位の土深は多様であり、50 cm～数 m であることが少なくない上に、深度数 cm の差でも大きく性質が異なる場合も多い。この場合には、現行法は大きな労力を伴うことになる。このため、現地での正確な潜在的酸性硫酸塩土壌の分布状況を把握できず、不適切な開発により土壌を強酸性化させてしまうことも少なくない。これを避けるため、指標植物を用いた土壌酸性度の判定も導入されつつあるが、土地利用状況の把握や土質等の多様さのために土壌酸性度の判定は容易ではない。また、低湿地の排水による二酸化炭素の大气中への大量放出が指摘されており (Hicks *et al.*, 2002)、低湿地の開発における微生物挙動が無視できないことを示唆している。

本論では、酸性硫酸塩土壌における既往の研究成果を海外と日本国内とに分けて整理し、土壌物理分野と土壌微生物分野とが関連する分野の位置付けを行い、その重要性および今後発展すべき方向の提示を試みた。

2. 酸性硫酸塩土壌研究の流れ

2.1 海外の研究

酸性硫酸塩土壌は 17 世紀以降、内陸干拓地における問題土壌として認識されるようになった。Linnaeus (1735) は、オランダの土壌区分を行い、酸性硫酸塩土壌を“argilla vitriacea”と称している (Dent and Pons, 1995)。Stumm and Morgan (1970) は、微生物の触媒としての働きを実験的に測定し、化学的な作用のみで進行する二価鉄の酸化は 1,000 日のオーダーで、微生物の介在する二価鉄の酸化は 20～1,000 分のオーダーで反応することを明らかにし、現地の物理・化学的な現象における微生物の役割の大きさを示した (久馬ら, 2001)。また、van Breemen and Wielemaker (1974) は、酸性硫酸塩土壌の酸化過程における鉱物の変化に関して、ジャロサイトを含む B 層は多様な鉱物相のために強力な緩衝能が働き、pH 3.6～3.8 の狭い範囲に土壌 pH が収束

することを示した。1986 年には酸性硫酸塩土壌の研究および開発のための現場での調査方法や室内での実験方法がまとめられた (Dent, 1986)。1990 年代にはさらにリーチング試験による金属移動の研究が進み、シミュレーション技術が向上した (Bronszijk and Groenenberg, 1993; van Wlik *et al.*, 1993)。また、Puhrg and Liew (1993) は、酸性硫酸塩土壌の微生物フロアを現地調査し、微生物相は貧弱であること、土壌改良後には、無色硫黄細菌の一種である *Thiobacillus* 属が存在しなくなる等の貴重な生物データを示した。海外での酸性硫酸塩土壌の研究については、Acid Sulfate Weathering (1982), Selected Papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils (1993) にまとめられている。Dent (1992) や Dent and Pons (1995) は、酸性硫酸塩土壌の総説を記し、van Mansvoort and Dent (1998) は、現地での酸性硫酸塩土壌の判別法や土壌培養法などを詳細に示している。また、Minerals in Soil Environment 2nd edition (1989) には、パイライトの酸化に関する鉱物学的な総説が示されている。

2.2 日本の研究

平地の少ない日本では、江戸時代より沿岸を干拓し水田として利用してきたが、近年、コメの消費が減り減反政策がとられるようになると干拓地は畑地としてその利用法を変えてきた。2000 年以降には、国営事業である島根県中海干拓地本庄工区の干陸化が中止され、有明諫早湾干拓地造成が一時中止されるなど、現在の国内における干拓地開発は打ち止め傾向にあり、むしろ自然再生の考え方から人工干潟の研究が進んでいる。近年では内陸地における大規模な土地開発が進み、地層深部の旧沖積層や火成性酸性硫酸塩土壌が好気条件に露出して酸が生成され、法面の崩落、農作物や植栽の酸性障害、ガスや水道管およびコンクリートの腐食等が発生し、国内での酸性硫酸塩土壌による主な問題となっている (林, 1994; 横浜, 2000; 前田・根岸, 1999 など)。

国内での酸性硫酸塩土壌は、このような土地利用の変遷に伴い、干拓地土壌、水田土壌、沿岸・湖底堆積土、浚渫土、内陸性酸性硫酸塩土壌などと名称を変えて多くの研究蓄積がなされてきた。1950 年代までの国内の干拓地土壌に関しては、米田 (1958 ab) に詳しい。これによると、1930 年代に湖沼干拓が霞ヶ浦で、干陸後の水稲への障害における原因等が研究され (小林, 1938, 1940, 1951)、1940 年代には有明・諫早湾の干拓地水田の熟化過程が、1950 年代には岡山県児島湾干拓地・笠岡干拓地、島根県中海干拓地において干拓後の水田生成過程や生産力の変移 (川口・松尾, 1956; 米田, 1956 abc; 米田・河内, 1956; 川口・喜田, 1957) および土壌中の鉱

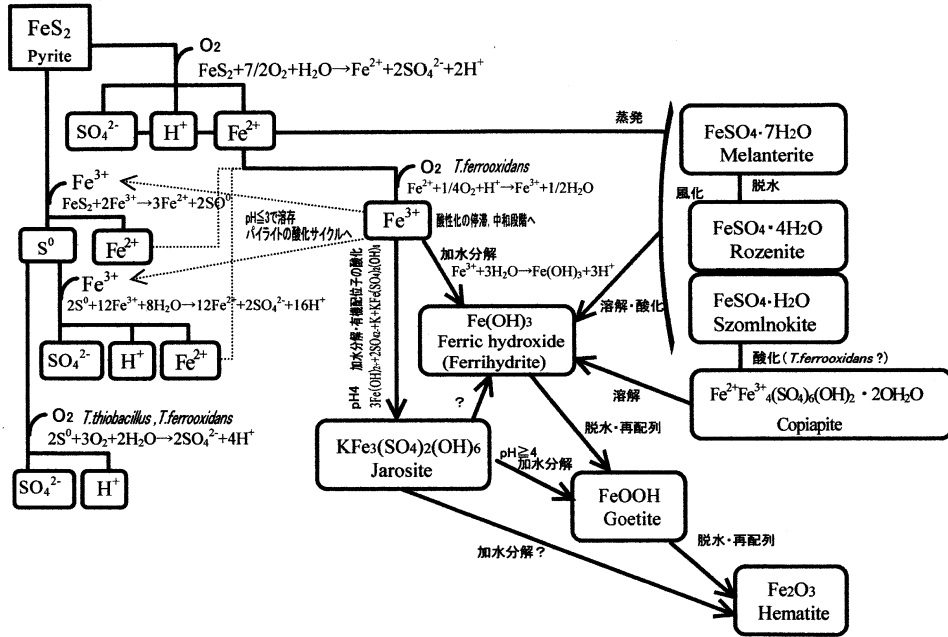


図-1 パイライトの酸化過程
Fig. 1 Process of pyrite oxidation.

※ Nordstrom (1982) および日本化学会編(1999)より作成

物が研究された (内田・鬼鞍, 1956)。土壌物理部門では、干陸に伴う土壌構造の発達や土壌酸性化の変遷が土層断面により把握され (川口・松尾, 1957), 化学的な土壌改良方法の基礎が出来上がるとともに物理工学的な改良方法の研究が発展した。1960年代にはパイライトの酸化に伴う土壌無機成分の変化が分析された (村上, 1961, 1965, 1967, 1968 ab)。

1960年代には、鉱山廃水の水質問題から微生物工学分野で硫酸化細菌の生化学的な研究が進められ、1970年代までには、鉄酸化細菌や硫酸化細菌の生理代謝がほぼ明らかになった (今井ら, 1964; 今井・奥積, 1965; 奥積・今井, 1965; 今井, 1968; 伊藤, 1968; 寺井・岩崎, 1971; 宇佐美・杉谷, 1971)。

1980年代になると、これまでの農地化過程の研究に室内実験や生物学的な観点が加わり、土壌の乾燥化に伴った塩類の移動や土壌物理性の変化、土壌酸性化の機構をより体系的に把握する試みがなされた (高井, 1980; 足立ら, 1988; 石川ら, 1989; 高井ら, 1989, 下川, 1986)。加村・大源 (1986) は、土壌における鉄酸化細菌の計数法を示した。加村 (1986) は、この頃に問題化していた内陸地の火成性酸性硫酸塩土壌の場合にも土壌酸性化には同様の細菌が大きく関与していることを示し、細菌数と二価鉄・三価鉄濃度の関係や pH との関係を実験

から明らかにした。小川ら (1990) は土壌における鉄酸化細菌および硫酸化細菌の増殖と pH との関係を実験により示した。土壌水分や塩濃度と土壌酸性化の関係は足立ら (1992) により示された。2000年以降は、法面被覆のためのフロンティア植物の選抜 (牧ら, 2001) や被覆工法 (横浜, 2000), 土壌の酸性化とコンシステンシーの関係 (金, 2001) 等が報告されている。

3. 土壌の酸性化過程

酸性硫酸塩土壌の酸性化反応に関しては、Nordstrom (1982), Dixon *et al.* (1989), 久馬ら (2001) に詳しい。これらを参考にその反応に鉱物の変化 (日本化学会編, 1999) を含め、図-1 に示した。潜在的酸性硫酸塩土壌に含有する大量のパイライト (FeS₂) は、還元条件から好氣的条件に置かれると、大気中の酸素による化学的な酸化が開始され、硫酸イオン、水素イオンおよび二価鉄イオンを生じる。この二価鉄イオンは鉄酸化細菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*, 後述) により三価鉄イオンに変化する。パイライト酸化の初期段階では三価鉄イオンは存在しにくい、このイオンは土壌中のパイライトや元素状硫黄を化学的に酸化させる酸化剤である。この酸化剤を生成する働きにより、鉄酸化細菌は土壌の初期的酸性化過程において重要な存在となる。鉄酸化細菌が

働き出すことで土壌中の化学的な酸化反応速度が高まり、パイライトから生じた元素状硫黄から、鉄酸化細菌や硫黄酸化細菌 (*Thiobacillus thiooxidans*, 後述) の関与する微生物的酸化および純化学的な酸化により酸性物質が増加し、土壌は急激に酸性化する。パイライトの酸化が終了し、土壌の酸性化が停滞して中和反応が強まると土壌中の三価鉄イオンは加水分解や脱水、風化や溶解を繰り返して、ジャロサイトやゲータイトのような顕在的酸性硫酸塩土壌に特有な鉱物を生成するようになる。

4. 粘土鉱物

米田 (1958 b) は日本の干拓地土壌の主な粘土鉱物を以下のようにまとめている。児島湾干拓地土壌や有明海沖積水田土壌、八代湾内、八郎潟の干拓地土壌の主要な粘土鉱物は illite-montmorillonoid 系であり、kaoline 系粘土鉱物や halloysite 等を少量含んでいる。海外では、バンコクの酸性硫酸塩土壌の多くは、シルト以下の土壌の 50% 強が 1:1 型鉱物であり、次いで 2:1 型鉱物が多く、雲母型鉱物は少ない (Attanandana *et al.*, 1981)。テキサスの鉱物掘削地のパイライト含有土壌では、シルト以下の土壌でスメクタイトが 50% 強、カオリナイトは 10% 以下、雲母型鉱物が 25% 以下であり、土層のごく表面ではスメクタイトが減少し、カオリナイトが増加していた (Dixon *et al.*, 1982)。このように、酸性硫酸塩土壌は、その多くが膨潤性、イオン交換性、吸着性の高い 2:1 型粘土鉱物を多く含んでおり、乾燥に伴う物理化学性の大きな変化が容易におこりうる特徴を有している。微小な細菌の棲息環境としては、これらの特徴が大きく影響を与えていることが予測される。

5. 土壌の酸性化と微生物

5.1 基本的な生理生態

酸性硫酸塩土壌の酸性化に関わる微生物は主に鉄酸化細菌; *Thiobacillus ferrooxidans* (以降, *T. f*) と硫黄酸化細菌; *Thiobacillus thiooxidans* (以降, *T. t*) である (Stum and Morgan, 1970)。これらはバクテリア・リーチングやバイオセンサーの分野 (例えば, Giaveno and Donati, 2001; Cerruti *et al.*, 1998; Sasaki *et al.*, 1997) で有用な種である一方、コンクリートや鉄配管の腐食 (野中ら, 1994) や鉱山の酸性排水の原因菌でもある。また、近年、鉱山からのヒ素流出を収着により抑える働きのある鉄酸化水酸化硫酸塩鉱物 (schwertmannite) の生成に、鉄酸化細菌が関与しているとも考えられている (中村・赤井, 1999; 小竹ら, 2002)。このように鉄酸化細菌や硫黄酸化細菌は研究需要が高く、微生物工学分野では多くの蓄積がある。以下に、液体培養下におけるこ

れらの細菌の基本的な生理生態を示した。

5.1.1 鉄酸化細菌

鉄酸化細菌という呼称は、鉄を酸化する際に得られるエネルギーを細胞の生育エネルギーとして利用する細菌群の総称である。鉄酸化細菌は酸性・非糸状細菌、中性・糸状細菌に大別できる (小島ら編, 1996, 高橋ら訳, 1997)。酸性硫酸塩土壌の酸性化において対象となる *T. f* は酸性・非糸状の鉄酸化細菌であり、化学合成独立栄養細菌である。鉄酸化細菌については田野・杉尾 (1993) および千田 (1996) に詳しい。*T. f* はグラム陰性の桿菌 ($0.5 \times 1.0 \mu\text{m}$) で、1本の鞭毛を有し運動性がある。酸性条件下 (pH 1.4~5.8) で二価鉄あるいは還元型の無機硫黄化合物を酸化する際に生じるエネルギーを増殖あるいは生命維持のためのエネルギーとして利用する。絶対好気性菌で発酵、脱窒での増殖はできない。生育最適温度は 15~25°C の中温菌である。細胞構成炭素の殆どをベンソン・カルビンサイクルによって空気中の炭酸ガスから合成する絶対独立栄養細菌である。

T. f は単独培養よりも *T. t* 等の硫黄酸化細菌との共存培養で鉄酸化能力が高まることが知られている (伊藤, 1968)。バクテリア・リーチングの分野では、*T. f* のパイライト酸化および鉄の溶出との関係では、菌がパイライトに直接付着してこれを酸化する貢献度が高いと考えられていたが、Wakao *et al.* (1984) は、*T. f* のパイライト付着により基質の鉄酸化活性が低下し、遊離状態で鉄酸化活性が回復することから、パイライト酸化および鉄溶出の促進には、菌のパイライトへの付着は必要なく、菌が環境中に溶存する Fe^{2+} を利用して Fe^{3+} を生成し、この Fe^{3+} が化学的なパイライト酸化を促進させるような、菌の触媒的な働きこそが重要であると説明した。

5.1.2 硫黄酸化細菌

硫黄酸化細菌の基礎的な生理生態は、今井ら (1964)、今井・奥積 (1965)、奥積・今井 (1965)、高橋ら訳 (1997)、今井 (1968) に詳しい。これらをまとめて以下に示す。硫黄酸化細菌は硫黄化合物を細菌の増殖、生命維持のためのエネルギー源とする細菌群である。この細菌群には化学独立栄養細菌の無色桿菌 (主に湿潤土壌や水に棲息)、化学合成無色の糸状菌 (主に水生)、光合成を行う緑色細菌や紅色細菌などの偏性嫌気性細菌の 3 つに大別される。土壌から分離される硫黄酸化細菌の多くは化学独立栄養の無色桿状硫黄酸化細菌とされており、そのほとんどが絶対好気性である。生育最適 pH は中性と酸性に、栄養的には絶対独立栄養性と通性独立栄養性とに分類できる。鉄酸化細菌の一部はエネルギー源として鉄化合物以外に硫黄化合物も利用できることから、硫

黄酸化細菌に分類されることもある。*T. t*は好気性・好酸性絶対化学合成独立細菌である。生育最適温度は*T. f*同様15~25°Cの中温性細菌であり、生育pHは*T. f*に比べ、やや中性側のpH4以降の酸性条件であるとされている。エネルギー源には硫黄化合物や元素状硫黄を利用する。なお、Bergey's Manual of Systematic Bacteriology 第2版(2001)では分類体系が大幅に変更され、*T. f*および*T. t*は、*Acidithiobacillus ferrooxidans*および*Acidithiobacillus thiooxidans*と改名され新属に移行しているが、本報では、現在一般的に知られている旧名称を用いた。

5.1.3 生育阻害物質

これらの細菌の生育に関して、高濃度の硝酸イオンや塩化物イオンは鉄酸化細菌の生育阻害物質であり(Touvien and Kelly, 1972)、*T. f*や*T. t*が自ら排出するピルビン酸やオキサロ酢酸、およびタンニン酸や木酢液などの天然有機酸もこれらの菌の生育を阻害することが知られている(広吉ら, 1992; Sasaki *et al.*, 1999)。

5.2 土壌での細菌の生態

近年、土壌微生物の生態の解明は新しい研究手法の導入により飛躍的に進展した。水田土壌では、湛水による微生物の生態変化が把握され(近藤ら, 1982ab)、物質循環における微生物機能が整理されている(木村ら, 1995)。しかし、酸性硫酸塩土壌の酸性化過程では、変化する土壌環境要素が多く微生物代謝等の測定が困難であるために未解明な部分が多い。

高井ら(1989)は、干拓地において鉄酸化細菌の棲息部位よりも深い層で硫黄酸化細菌が棲息していたことから、土壌酸性化の初期には硫黄酸化細菌が主に増殖し、土壌pHが低下した後に鉄酸化細菌の増殖が活性化すると考えた。小川ら(1990)は、このような遷移が室内実験でも生じることを確認すると同時に、次の結果も示している。無菌土壌に鉄酸化細菌のみを接種したところ、pHは低下したが細菌は増加せずに衰退した。しかし、鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌を共存させたところpHは低下し両細菌の増加もみられた。この結果は、鉄酸化細菌の増殖により増加した生育阻害物質の菌への影響を硫黄酸化細菌が緩和することを示唆していると考えられる。液体培養では、*T. t*由来の有機物が*T. f*のパイライト酸化を促進しているとの報告もある(Wakao *et al.*, 1982, 1983)。筆者らの室内実験では、鉄酸化細菌は土壌pH6の環境下で十分に増殖し、その結果土壌pHが急激に低下した。また、細菌の増殖は土壌pHではなく土壌水分条件に大きく影響を受けていた(上野ら, 2002a)。これらの事象から、現地土壌における細菌の増殖や遷移の過程は、土壌pHだけでなく土壌構造の差異や水の移動、

他の細菌との競合関係を含めて検討されるべきであろう。

一般に、土壌微生物活性に直接影響を与える環境要素は、土壌水分、栄養源、温度、土壌pHであるが、酸性硫酸塩土壌の酸性化過程に関わる細菌に最も影響を与える要素は、土壌水分である。酸性硫酸塩土壌の乾燥過程における土壌水分状態と微生物生態に関して、足立ら(1992)は、pF 3.0付近で土壌酸性化が促進されることを示し、上野ら(2002ab)は鉄酸化細菌の増殖活性化がこの原因であることを示した。栄養源に関しては、EC 9.8~1.3 mS/cmの範囲では低ECほど土壌の酸性化が激しい事実が報告されている(足立ら, 同上)。これは、浸透圧の問題であるとともに、先に示した関連細菌の生育阻害物質が影響していると考えられる。

温度条件に関して、筆者らの実験では10°Cで微生物的酸化も化学的酸化も緩慢であり、30°C~35°Cで微生物的酸化が活性化し、50°Cでは主に化学的酸化が働いていた。また、土壌酸性化は温度と水分の両条件が微生物に適した条件になると急激に高まり、化学的酸化は水分条件ではなく温度条件に影響を受けた(上野ら, 2002a)。村上(1965)は、酸性硫酸塩土壌の微生物的酸化は、水分、温度、空気が適当であれば著しく速いことを示しており、上記結果を支持している。いずれの結果も土壌水分条件が土壌の酸性化における微生物の活性を大きく左右する重大な要素であることを示唆している。土壌水分の蒸発は土壌中の物質移動の駆動力であるが、蒸発速度は細菌の生育にも影響を与えており、急激かつ連続した蒸発は鉄酸化細菌の増殖を阻害するとの報告もある(上野ら, 同上)。

酸化還元電位(Eh)は土壌微生物や鉄の挙動と密接な関係にあると考えられている(高井, 1958; 長谷部・飯村, 1982; 木村ら, 1984ab)が、酸性硫酸塩土壌の分野では微生物挙動とEhの関係を示した知見はない。これは土壌の乾燥過程におけるEh測定可能領域に制限があるためと考えられる。また、パイライトの粒径に関して加村(1986)は、粒径が小さいほど鉄酸化細菌数が多く存在すると報告している。

以上のように、酸性硫酸塩土壌中の微生物挙動は、温度、pH、EC、土壌水分との関係で研究蓄積があり、土壌水分条件が最も微生物挙動に大きく影響を与える要素であることが判っている。微生物の諸活性と土壌水分の変化から生じる土壌基質の変化(例えば間隙の質や量、粘土粒子表面の構造等の変化)との関係を解明する作業は、今後に残された課題である。これらの把握には、これまで以上に分析するサンプルサイズの選択が重要となるだろう。

5.3 土壌細菌の微視的分布の意味

酸性硫酸塩土壌では、鉄酸化細菌等の土壌基質中の棲息部位は把握されていない。しかし、畑土壌では細菌群の増殖と土壌団粒構造および、土壌水分の関係において様々な検討が行われ、団粒単位での細菌の微視的分布も明らかにされている。田中ら (1969) は、土壌細菌の生態と土壌の物理的環境要因との関係を調べる中で、細菌数と水分要因の関係は、土壌構造-土壌水分-細菌数の系、ひいては水分ポテンシャルとの関係で把握することにより合理的な因果関係を導き出せると述べ、さらに、壤質砂土を用いた実験で、pF 2.5 もしくは 2.7 を超えた範囲で細菌数 (全菌数およびグラム陰性細菌) と土壌水分ポテンシャルに相関が認められなくなることを示した。

石沢ら (1958) は、微生物フロアの水分要因の影響は重力水の存在する条件下では細菌が、毛管水しか存在しない水分条件では、かび、放線菌が優性となることを示した。田中ら (1970) は、グラム陰性細菌は、水分要因とともに、粒径サイズにも大きく影響を受け、径が小さいほど菌数が多くなることを示した。坂本 (1995) は、土壌中の微生物バイオマス量と呼吸活性に関する研究の中で、大部分の細菌が土壌粒子に吸着して存在し、土壌中のバイオマスは土壌粒子表面における細菌の増殖により決定されると述べている。山口ら (1995) は、黒ぼく土を供試した洗浄音波法により団粒の外部と内部におけるバイオマスの動態を調べ、土壌全体のバイオマスが急激に減少しない原因は、団粒内部のバイオマスが急増後もすぐには減少しない点にあると説明した。

これらの事実は、細菌が土壌の微小な構造変化により住み分けを行っており、土壌水分状態や好気条件等の通気性に関わる要素が菌の挙動と密接に関係していることを示している。このような視点は酸性硫酸塩土壌における酸生成と関与する細菌の挙動との関係を知るために重要と思われる。

6. おわりに

酸性硫酸塩土壌の研究は、干陸化に伴う土壌化学成分の収支に関わる理化学的分野と土地改良に関わる工学的な分野が主流であった。持続的・永続的な土地利用のためには、環境負荷の実態を把握し負荷量を減じる姿勢が必要であり、今日では自然条件下における現象把握の重要性が一層高まっている。これは、酸性硫酸塩土壌においても同様であり、土壌の乾燥化により大きく変化する「土壌の物理性」と、土壌水分に大きく影響を受ける「土壌の微生物性」の関連を把握することは、微生物学と土壌物理の両分野にまたがる学際的、かつ発展余地のある

課題である。また、土壌の酸性化過程で大きく形態が変化する鉄は、鉄酸化細菌においては最も要求性の高い栄養素であり、作物栄養学的には、酸性土壌では鉄の溶解度が高まり作物の過剰障害が問題となる物質である。土壌物理分野では、鉄の形態変化がコンシステンシー限界や間隙の質に大きく関与していることが判っており、このような粘土表面の微細構造に関する現象は、土壌中の細菌の増殖や生育に大きく影響する要素であり、とくに脱水による粘土の微細構造変化の解明により明らかになる部分が多いと思われる。このように、酸性硫酸塩土壌の生成過程における鉄の形態変化やこれに関わる細菌群の微視的挙動の解明は、これまで土壌物理分野で認識されていた現象のより深い理解や新たな解釈をもたらす可能性を含んでおり、今後の発展が期待される。

引用文献

- Attanandana, T., Vacharotayan, S. and Kyuma, K. (1981): Chemical Characteristics and Fertility Status of Acid Sulfate Soils of Thailand. pp. 137-156, Proc. of the Bangkok Symp. on Acid Sulfate Soils.
- 足立忠司・石川重雄・江崎 要・天谷孝夫・堤 聰 (1988): 干拓地土層の農地化過程. 農土誌, **56** (12): 45-51.
- 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.
- Bronswijk, J.J.B. and Groenenberg, J.E. (1993): A simulation model for acid sulphate soils I: basic principles. pp. 341-355, In Selected Papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils, ILRI Publ. No. 53, ILRI, Wageningen.
- Cerruti, C., Curutchet, G. and Donati, E. (1998): Bio-dissolution of spent nickel-cadmium batteries using *Thiobacillus ferrooxidans*. Journal of Biotechnology, **62**: 209-219.
- 千田 侑 編 (1996): 微生物資源工学. コロナ社, 東京.
- 金 原台・矢橋晨吾 (2001): 浚渫土の基本的理化学性と乾土効果. 土壌の物理性, **86**: 19-24.
- Dent, D. (1992): Reclamation of Acid Sulphate Soils. Advances in Soil Science, **17**: 79-121.
- Dent, D.L. (1986): Acid Sulphate Soils, a Baseline for Research and Development. ILRI Publ. No 39, ILRI, Wageningen.
- Dent, D.L. and Pons, L.J. (1995): A world perspective

- on acid sulphate soils. *Geoderma*, **67** : 263-276.
- Dixon, J.B., Hossner, L.R., Senkayi, A.L. and Egashira, K. (1982): Mineralogical Properties of Lignite Overburden as they Relate to Mine Spoil Reclamation. pp. 169-191, *Acid Sulfate Weathering*, SSSA Special Publ. No. 10, Soil Science Society of America, Wisconsin.
- Dixon, J.B. *et al.* edit (1989): Minerals in Soil Environment 2nd edition, Carbonate, Halide, Sulfate and Sulfide minerals, pp. 303-309, Soil Science Society of America, Wisconsin.
- FAO (1988): FAO/UNESCO Soil Map of the World, Revised Legend, World Soil Resources Report 60. FAO, Rome.
- FAO (1998): World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Report 84. FAO, Rome.
- Garrity, M.G. Editor-in-Chief (2001): *Bergey's Manual of Bacteriology Vol. 1* 2nd edition. Springer-verlag, New York.
- Giaveno, A. and Donati, E. (2001): Bioleaching of heazewoodite by *Thiobacillus* spp, *Process Biochemistry*, **36** : 955-962.
- 長谷部亮・飯村康二 (1982): 水分含量の異なる土壌を湛水した場合の酸化層・還元層の分化発達過程. *土肥誌*, **53** (6) : 497-502.
- 林 久人 (1994): ジャロサイトの鉱物科学と酸性硫酸塩土壌. *粘土科学*, **34** (3) : 118-124.
- Hicks, W., Bowman, G. and Fitzpatrick, R. (2002): The geochemistry of Australian tropical acid sulfate soils and their environmental hazard. 17th. WCSS, World Congress of Soil Science 2002 Paper No. 238.
- 広吉直樹・恒川昌美・平島 剛・高森隆勝 (1992): *Thiobacillus ferrooxidans* による黄銅鉱精鉱の微生物学的浸出に及ぼすりん脂質の影響. *資源と素材*, **108** (2) : 129-133.
- 今井和民 (1968): イオウ細菌の生理と応用. *醸酵工学*, **46** (4) : 317-324.
- 今井和民・奥積昌世・片桐英郎 (1964): 硫黄細菌の生化学的研究 (第1報) 硫酸酸化細菌の分離・同定. *醸酵工学*, **42** (12) : 755-761.
- 今井和民・奥積昌世 (1965): 硫黄細菌の生化学的研究 (第4報) 菌の生育とエネルギー効率 (その2). *醸酵工学*, **43** (1) : 1-9.
- 石川重雄・足立忠司・松本 聰・天谷孝夫・長堀金造 (1989): 中海干拓地・安来地区における植生分布と土壌の化学性. *農土誌*, **52** (12) : 5-14.
- 石沢修一・鈴木達彦・甲田知則・佐藤 修 (1958): 土壌の微生物とその作用に関する研究. *農技研報告*, **8** : 1-212.
- 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.
- 加村崇雄・大源正明 (1986): 希釈頻度法による鉄細菌の計数. *土肥誌*, **57** (3) : 248-251.
- 川口桂三郎・喜田大三 (1957): 児島湾干拓地水田における耐水性団粒団の発達課程. *土肥誌*, **28** (4) : 29-32.
- 川口桂三郎・松尾嘉郎 (1956): 水田土壌の生成学的研究 (第5報). *土肥誌*, **26** (12) : 5-8.
- 川口桂三郎・松尾嘉郎 (1957): 干拓後の経過年数を異にする児島湾干拓地水田土壌断面中の活性及び不活性酸化物の分布についての再検討水田土壌の生成学的研究 (第7報). *土肥誌*, **28** (5) : 27-32.
- 木村真人・和田秀徳・高井康夫 (1984): 水稲根圏における代謝活性. *土肥誌*, **55** (4) : 338-343.
- 木村真人・和田秀徳・高井康夫 (1984): 水稲根周辺における水酸化鉄, 二酸化マンガン, 硫化鉄沈殿の生成. *土肥誌*, **55** (4) : 332-337.
- 木村真人 (1995): 微生物の生態 20. p. 57, 学会出版センター, 東京.
- 久馬一剛 編 (2001): 熱帯土壌学. p. 206, 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 小林 崇 (1938): 茨城県における湖沼の干拓地不良土並にその改良について (第1報). *土肥誌*, **12** : 308-311.
- 小林 崇 (1940): 湖沼の干拓地不良土壌の改良. 茨城農試臨時報告 : 3.
- 小林 崇 (1951): 湖沼の干拓地不良土壌の改良に関する研究. 農林省農地局計画部資源課資料 : 1-59.
- 小島貞男・須藤隆一・千原光雄 編 (1996): 環境微生物図鑑. pp. 1-7, 講談社サイエンティフク, 東京.
- 小竹由紀・福士圭介・佐藤 努・柳瀬信之 (2002): 大分県木浦鉱山廃石場から漏洩するヒ素の挙動. 地球惑星科学関連学会合同大会.
- 近藤 熙・藤沢吉和・高井康雄 (1982a): 水田土壌の作土が心土の微生物層に及ぼす影響. *土肥誌*, **53** (5) : 415-419.
- 近藤 熙・藤沢吉和・高井康雄 (1982b): 水田土壌作土

- 浸透水の心土微生物抑制効果について. 土肥誌, **53** (5) : 420-424.
- Linnaeus, C. (1735) : *Systema natural* 12.vol.111, Gen, 52(5) : 11.
- 前田照信・根岸敦規 (1999) : 下水道施設のコクリートの初期腐食に関する硫黄酸化細菌に対する防菌剤の効果. ハザマ研究年報 : 37-43.
- 牧 孝憲・朝倉嘉子・江澤辰広・和田富吉・吉田重方 (2001) : 酸性硫酸塩土壌におけるバイオニア植物および共生微生物の探索と利用. 土肥学会講演要旨集 第47集 : 194.
- 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 (1965) : 酸性硫酸塩土壌の特性と改良法に関する研究. 京都大学学位論文.
- 村上英行 (1967) : 可酸化性イオウの形態. 土肥誌, **38** (4) : 117-120.
- 村上英行 (1968 a) : 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.
- 村上英行 (1968 b) : 可酸化性イオウの酸化に伴う土壌無機成分の変化. 土肥誌, **39** (4) : 194-198.
- 日本化学会編 (1999) : 土の化学. p. 70, 学会出版センター, 東京.
- Nordstrom, D.K. (1982) : Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals. pp. 37-56, Acid Sulfate Weathering, SSSA Special Publ. No. 10, Soil Science Society of America, Wisconsin.
- 中村岳夫・赤井純治 (1999) : 微生物の活動下で生成した薄膜状 schwertmannite 及び類似鉱物 : 北海道錦沼及び群馬鉄山産試料について. 地球惑星科学関連学会合同大会論文.
- 野中資博・杉田秀雄・但田廣次・森 忠洋 (1994b) : 汚水処理施設におけるコンクリート微生物腐食対策に関する考察. 農業土木学会論文集, **174** : 23-31.
- 小川直人・犬伏和之・松本 聡・和田秀徳・高井康雄 (1990) : 干拓地土壌の酸性化とそれに関する鉄・イオウ酸化細菌の動態. 土肥誌, **61** (1) : 42-47.
- 奥積昌世・今井和民 (1965) : 硫黄細菌の生化学的研究 (第5報) T. thiooxidans の生理学的検討. 醸酵工学, **43** (1) : 10-17.
- Phung, N.T. and Lieu, P. (1993) : Microbiological characteristics of acid sulphate soils : A case study in Ho Chi Minh City environs. pp. 237-240, In Selected Papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils, ILRI Publ. No. 53, ILRI, Wageningen.
- 坂本一憲 (1995) : 土壌中の微生物バイオマス量およびその呼吸活性に影響する諸因子の解析. 土肥誌, **66** (3) : 213-214.
- Sasaki, K., Tsunekawa, M., Tanaka, S., Fukushima, M. and Kanno, H. (1999) : Inhibiting Effect of Natural Organic Acids on Microbially Mediated Dissolution of Pyrite in Acidic Environments. Shigen-to-Sozai, **115** (4) : 233-239.
- Sasaki, S., Yokohama, K., Tamiya, E. Karube, J., Hayashi, T., Arikawa, Y. and Numata, M. (1997) : Sulfate sensor using Thiobacillus ferrooxidans. Anal. Chim. Acta., **347** : 275-280.
- 下川博通 (1986) : 筑後川下流域クリーク地帯における水田の圃場整備と酸性硫酸塩土壌. 土肥誌, **57** (2) : 188-190.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1970) : *Aquatic Chemistry*. N. Y., John Wiley.
- 高橋 甫・斎藤日向・手塚泰彦・水島昭二・山口英世 共訳 (1997) : 微生物学 (下). pp. 67-74., 培風館, 東京.
- 高井康雄 (1958) : 水田土壌における鉄化合物の行動について (第2報). 土肥誌, **29** (5) : 30-34.
- 高井康雄 (1980) : 水田土壌の動態に関する微生物学的研究 I. 肥料科学, **3** : 17-55.
- 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・硫黄酸化細菌数の経年変化. 土肥誌, **60** (2) : 151-156.
- 田中 博・坂本正幸 (1969) : 土壌細菌の生態と土壌の物理的環境要因. 東北大農研報, **20** : 277-292.
- 田中 博・坂本正幸 (1970) : 土壌伝染性細菌の生態と土壌の物理的環境要因 (2). 東北大農研報, **21** : 177-186.
- 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.
- 寺井悌三・岩崎達也 (1971) : 鉄酸化細菌による鉱山排水処理に関する研究. 醸工, **49** (1) : 53-60.
- Touvinen, O.H. and Kelly, D.P. (1972) : Zeitschrift für Allg. Mikrobiologie, **12** : 311-346.
- 上野 薫・足立忠司・成岡 市 (2002 a) : 児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. 土壌の物理性, **91** : 15-23.
- 上野 薫・足立忠司・成岡 市 (2002 b) : 酸性硫酸塩土壌の乾燥過程が微生物活性および鉄の形態に与える

- 影響. 土壌の物理性, **91** : 49-57.
- 宇佐美昭次・杉谷 透 (1971) : 鉄酸化細菌の生育, 鉄酸化能などに及ぼす有機源の影響. 醸酵工学, **49** (7) : 587-591.
- 内田修男・鬼鞍 豊 (1956) : 水田土壌に於ける粘土の生成に関する研究 (第3報). 酸性水田土壌の粘土鉱物に就いて. 土肥誌, **26** (11) : 37-42.
- USDA, Soil Conservation Service, Soil Survey Staff (1975) : Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, Agric Handb. 436, Washington, D.C.
- van Breemen, N. and Wielemaker, W.G. (1974) : Buffer Intensities and Equilibrium pH of Minerals and Soils II. Theoretical and Actual pH of Minerals and Soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **38** : 61-66.
- van Mansvoort, M.E.F. and Dent, D.L (1998) : Methods of Soil Degradation. pp. 301-335, Advances in Soil Science, CRC Press, LLC.
- van Wijk, A.L.M., Widjaja-Adhi, I Putu Gedjer, Ritsema, C.J. and Konsten, C.J.M. (1993) : A simulation model for acid sulphate soils II : validation and application. pp. 357-368, In Selected Papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils, ILRI Publ. No. 53, ILRI, Wageningen.
- Wakao, N., Mishina M., Sakurai, Y. and Shiota, H. (1982) : Bacterial Pyrite Oxidation I. J. Gen. Appl. Microbiol., **28** : 331-343.
- Wakao, N., Mishina M., Sakurai, Y. and Shiota, H. (1983) : Bacterial Pyrite Oxidation II. J. Gen. Appl. Microbiol., **29** : 177-185.
- Wakao, N., Mishina, M., Sakurai, Y. and Shiota, H. (1984) : Bacterial Pyrite Oxidation III. J. Gen. Appl. Microbiol., **30** : 63-77.
- 山口知幸・浜田龍之介・坂上寛一・田中治夫 (1995) : 団粒外部および内部における基質添加後の土壌微生物バイオマスの動態. 土肥誌, **66** (2) : 140-145.
- 横浜充宏 (2000) : 酸性硫酸塩土壌の露出した切土法面の緑化工法. 圃場と土壌, **32** : 17-23.
- 米田茂男 (1956 a) : 干拓地土壌に関する研究 (第11報). 土肥誌, **27** (10) : 15-18
- 米田茂男 (1956 b) : 干拓地土壌の物理的性質とその改良法に関する研究 (第3報). 土肥誌, **26** (12) : 1-4.
- 米田茂男 (1956 c) : 干拓地土壌の物理的性質とその改良法に関する研究 (第4報). 土肥誌, **27** (3) : 29-33.
- 米田茂男・河内知道 (1956) : 干拓地土壌の物理的性質とその改良法に関する研究 (第5報). 土肥誌, **27** (9) : 11-14.
- 米田茂男 (1958 a) : 干拓地土壌, 肥料に関する総説 (I). 土肥誌, **28** (10) : 34-38.
- 米田茂男 (1958 b) : 干拓地土壌, 肥料に関する総説 (II). 土肥誌, **28** (11) : 27-31.

受稿年月日 : 2002年11月13日
 受理年月日 : 2003年1月20日