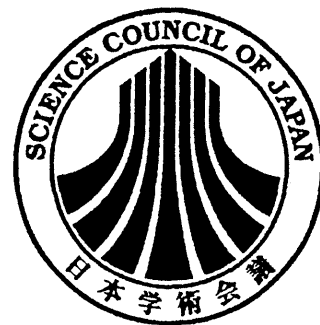


日本学術会議公開シンポジウム 土壌資源の秘めたる可能性と未来 —土壌科学からのアプローチ—



国際土壌科学連合



日本学術会議

主催：土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会

共催：(社)日本土壌肥料学会、日本ペドロジー学会
日本土壌微生物学会、日本土壌動物学会
農業土木学会、土壌物理学会

後援：(独)農業技術研究機構、(独)農業環境技術研究所
(財)日本土壌協会、全国農業協同組合連合会

日時：
平成16年11月27日(土)
10:00~17:00

会場：
東京大学農学部1号館8番教室
(東京都文京区弥生1-1-1)



プログラム

司会 山本洋子 (岡山大学生物科学研究所)

(10:00~10:10)

開会の辞: 三枝正彦(土壌・肥料・植物栄養研連委員長、東北大学大学院農学研究科教授)

講演:

(10:10~10:40)

1. 土壌科学連合(IUSS)の活動と世界的研究動向

犬伏和之(土壌・肥料・植物栄養研連・土壌科学小委員会委員長、千葉大学園芸学部教授)

(10:40~11:10)

2. 「ペドロジスト」誌に見るわが国のペドロロジー研究の軌跡と将来展望

東 照雄(土壌・肥料・植物栄養研連委員、筑波大学大学院生命環境科学研究科教授)

(11:10~11:40)

3. 先端的土壌化学とフィールド研究

米林甲陽・山田秀和(京都府立大学大学院農学研究科教授・同助教授)

(11:40~12:10)

4. 土壌物理学が拓く未来の物質循環

宮崎 毅(東京大学大学院農学生命科学研究科教授)

昼休み(12:10~13:30)

(13:30~14:00)

5. 土壌微生物群集の生態系機能—持続型社会構築へ微生物の働きを活かす—

豊田剛己(東京農工大学大学院生物システム応用科学研究科助教授)

(14:00~14:30)

6. 落ち葉の手紙へ返信—陸上生態系の機能と土壌動物の多様性

金子信博(横浜国立大学大学院環境情報研究院教授)

(14:30~15:00)

7. 持続的農業生産を支える地域資源循環

藤原俊六郎(神奈川県農業総合研究所・企画調整部長)

休憩(15:00~15:20)

(15:20~15:50)

8. 土壌生態系からの温室効果ガス放出

八木一行((独)農業環境技術研究所・温室効果ガスチーム長)

総合討論: (15:50~16:50)

(司会)長谷川 功(土壌・肥料・植物栄養研連委員、日本大学生物資源科学部教授)

(16:50~17:00)

閉会の辞: 木村真人(日本土壌肥料学会会長、名古屋大学大学院生命農学研究科教授)

目 次

開会の辞：	1
三枝正彦(土壌・肥料・植物栄養研連委員長、東北大学大学院農学研究科教授)	
講演：	
1. 土壌科学連合(IUSS)の活動と世界的研究動向	3
犬伏和之(土壌・肥料・植物栄養研連・土壌科学小委員会委員長、千葉大学園芸学部教授)	
2. 「ペドロジスト」誌に見るわが国のペドロロジー研究の軌跡と将来展望	11
東 照雄(土壌・肥料・植物栄養研連委員、筑波大学大学院生命環境科学研究科教授)	
3. 先端的土壌化学とフィールド研究	15
米林甲陽・山田秀和(京都府立大学大学院農学研究科教授・同助教授)	
4. 土壌物理学が拓く未来の物質循環	21
宮崎 毅(東京大学大学院農学生命科学研究科教授)	
5. 土壌微生物群集の生態系機能—持続型社会構築へ微生物の働きを活かす— ...	25
豊田剛己(東京農工大学大学院生物システム応用科学研究科助教授)	
6. 落ち葉の手紙へ返信—陸上生態系の機能と土壌動物の多様性	31
金子信博(横浜国立大学大学院環境情報研究院教授)	
7. 持続的農業生産を支える地域資源循環	35
藤原俊六郎(神奈川県農業総合研究所・企画調整部長)	
8. 土壌生態系からの温室効果ガス放出	41
八木一行((独)農業環境技術研究所・温室効果ガスチーム長)	
閉会の辞：	45
木村真人(日本土壌肥料学会会長、名古屋大学大学院生命農学研究科教授)	

開会の挨拶

第 19 期日本学術会議、土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会委員長
東北大学大学院附属複合生態フィールド教育研究センター：三枝正彦

わが国では十月第一土曜日を「土の日」とし、また地域によっては文字どおり十一月を「土」の月間として、全国各地でその年の収穫に感謝し、また次年度の豊作を祈願して「土づくり運動」が展開されている。すなわち、土は単なる植物を支える無機物の支持体ではなく、植物が成長するための食物の宝庫でもあり、さらに共生する多様な微小生物の棲家でもある。また外界の変化に緩衝力を行使し、安定な状態を維持すると共に、成長に必要な水と空気を程よく貯蔵し、供給する。そこには目には見えないが、まさに様々な生物が生息する複雑で、居心地の良い生態系が造られており、「土は生きている」といわれる。それゆえ、専門家の間では単なる材料を「土」と言い、上記の土の生態系を意味するものは「土壌」という用語を用いて区別している。この土壌の「壤」は「壤」、「醸」とも共通する旁を持ち、長い期間をかけて、慈しみ、丁寧につくりあげたものを意味する。それゆえ H.Jenny の指摘するように、土壌はその生成要因である気候(c)、人間を含む生物(o)、母材(p)、地形(r)、時間(t)の総合 $[S=f(c,o,p,r,t)]$ として生成される。それゆえ、土壌はかけがえのないものであり、地球環境としての土壌の重要性は世界的にも認められている。そして国際土壌科学連合では、第 17 回世界土壌科学会議（タイ国バンコク、2002）において、世界「土の日」を、開催地タイ国の女王で農業振興に深い理解を示す Maha Chakri Sirindhorn の誕生日である 12 月 5 日と決めている。今回の土壌科学セミナーを日本「土の日」と世界「土の日」の間の 11 月の 27 日に開催することは極めて意義深い。

一方、2004 年は我が国を代表として日本学術会議が世界土壌科学連合に加盟した年でもある。日本側の窓口としては、第 18 期日本学術会議、土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会の下に、土壌科学小委員会を設置し対応してきた。この土壌科学小委員会は土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会を構成する日本土壌肥料学会、日本ペドロジー学会、日本土壌動物学会、日本土壌微生物学会のほかに、農業土木学会、日本地理学会、土壌物理学会、日本環境学会、日本林学会、日本第四紀学会、日本粘土学会、森林立地学会が参加し、第 19 期も継続している。

現在、日本学術会議は第 20 期に向けて大きな改革が行われている。その中で最も大きな改革の 1 つは、現在の 7 部制が 3 部制となり、第 6 部農学は第 4 部理学の一部である生物系および第 7 部医学と一緒に、第 2 部生命科学系となることである。またこれまでの各学協会の代表からなる研究連絡委員会を廃止し、課題別専門委員会を中心として活動が行われることである。このような状況の中で、現在の土壌科学小委員会は今後、世界土壌科学連合に対する日本側窓口として、また第 20 期日本学術会議における第 2 部生命科学系の中で農学を代表する課題別専門委員会の 1 つとして発展するための重要な委員会となる。その意味でも土壌科学の現状と将来展望を明らかにすることは極めて重要である。

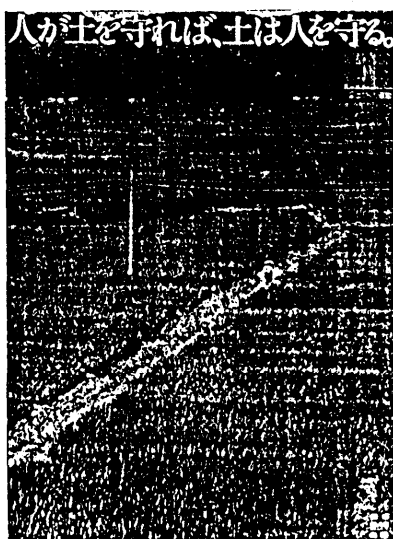
ところで第 18 期日本学術会議の土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会では、今後活躍す

る若手研究者を対象に、21世紀における植物栄養学のあり方を討議する「21世紀の食糧・農業問題へ植物栄養学研究に何ができるか」（東京大学弥生講堂 2002年11月2日）を開催し、多くの研究者の高い関心と評価を得た。そこで第19会では、この若手研究者向けセミナーのシリーズとして、また今年度の日本学術会議の世界土壌科学連合加盟を記念して、若手土壌研究者に土壌科学の魅力、重要性、将来性を理解していただくための一助として、「土壌資源の秘めたる可能性と未来—土壌科学からのアプローチ」を開催することとした。この土壌科学セミナーを通じて、若手研究者が今後の土壌科学に対して大きな夢と希望を抱き、またその重要性に鑑み、継承とさらなる発展を志して下さることを期待する。

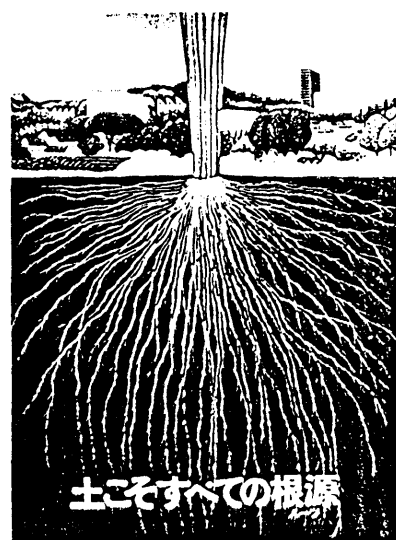
「土づくりポスター」



昭和45年



昭和50年



昭和54

第7回 ESAFS 国際会議のご案内

上記国際会議が、2005年6月1日～4日フィリピン、マニラ近郊ケソン市で開催されます。ESAFS (East and Southeast Asia federation of Soil Science Societies : 東・東南アジア土壌連合) は、第14回国際土壌会議 (京都1990年) の際に設立された会議で、第1回を京都、その後、中国、マレーシア、韓国、タイ、そして2003年台湾とほぼ隔年ごとに、「コメ、稲作、水田」にかかわる課題をとりあげ開催されてきました。前回は、9カ国187名 (外国人82名) の参加があり、今回は更に多くの参加が見込まれています。

第7回会議では、「Food Security, Multi-functionality of Paddy Farming, Soil and Water Environment, Food Safety」の4つを主要なトピックとし、会議後2日間のルソン島中部平原穀倉地帯の見学会も企画されています。皆様方の振るってのご参加をお願いいたします。(詳細は土肥学会ホームページのSecond Announcementをご覧ください。)

国際土壌科学連合 (IUSS) の活動と世界的研究動向

犬伏和之(千葉大学)

要約：国際土壌科学連合(IUSS)の組織と役割、世界土壌科学会議(WCSS)のテーマ動向について述べる。

国際土壌科学連合 IUSS とは

国際土壌科学連合 IUSS International Union of Soil Sciences とは 2002 年に新しく改革され誕生した土壌科学を担う国際学術組織である。これまで個人会員参加形式の International Society of Soil Sciences (ISSS) が母体となって開催してきた世界土壌科学会議 World Congress of Soil Science (WCSS)を、今後は国ごとに土壌科学研究者が唯一の代表団体を組織して参加する形式の国際土壌科学連合 IUSS となって開催運営する体制となる。

IUSS の組織の概要は以下のとおりである。

部門 Divisions

- D1. 時空における土壌
- D2. 土壌の特性とプロセス
- D3 土壌の利用と管理
- D4 社会と環境の維持における土壌の役割

部会 Commissions

- D1. 時空における土壌
 - C1.1 土壌形態学と微細形態学
 - C1.2 土壌地理学
 - C1.3 土壌生成
 - C1.4 土壌分類
 - C1.5 ペドメトリックス (計量土壌学)
 - C1.6 古土壌学
- D2. 土壌の特性とプロセス
 - C2.1 土壌物理学
 - C2.2 土壌化学
 - C2.3 土壌生物学
 - C2.4 土壌鉱物学
 - C2.5 土壌界面反応学

D3. 土壌の利用と管理

C3.1 土壌評価と土地利用計画

C3.2 土壌および水の保全

C3.3 土壌肥沃度と植物栄養

C3.4 土壌工学と土壌テクノロジー

C3.5 土壌の劣化防止・修復・再生

D4. 社会と環境の維持における土壌の役割

C4.1 土壌と環境

C4.2 土壌, 食料安全保障, 人間の保健衛生

C4.3 土壌と土地利用変化

C4.4 土壌教育と一般市民の意識

C4.5 土壌科学の歴史・哲学・社会学

この他、ワーキンググループや各種委員会が設置されている。

第 17 回国際土壌科学会議 (バンコック大会) の概要

第 17 回国際土壌科学会議は 2002 年 8 月 14~21 日バンコックで開催された。アジアでは第 14 回 (1990 年) の京都での開催に次いで熱帯農業国タイで、21 世紀最初の会議となった。100 カ国以上から約 2250 名、日本から 120 名が参加した。本会議のテーマは **Soil Science : Confronting New Realities in the 21st Century** であった。これまでの土壌学研究が国ごとの農業生産に寄与する研究、例えば国ごとの土壌肥沃度調査と土壌分類、土壌肥沃度の要因としての土壌微生物活性と養分動態、肥料の利用法などが、重要課題とされてきた。これに対し今後は人類が生存する地球のコンポーネントの大気と水に加えて土壌のグローバルな役割と世界 (特にアジア、アフリカの熱帯域) での食糧の持続的生産のための土壌科学、そして土壌そのものについての基礎科学を目指すとされた。

この新しい動向は、シンポジウムの課題として、土壌中物質、特に汚染化合物の特異な移動、地形と土壌、土壌構造からみた土壌の理化学性判定法、熱帯土壌の有機物と炭素シケストレーション、グローバルな気候変動と土壌反応、土壌汚染化合物の同定や土壌修復確認のための新しい分析法、土壌肥沃度の生態学的・持続的概念、半乾燥土壌の研究強化、などにもみられた。

土壌のグローバルな役割、例えば炭素のシケストレーションや物質 (汚染質を含む) の循環などについての情報を土壌学者が積極的に社会に提供する、土壌学がこれまでに集積したデータと知見を総合して政策決定者に重要な提案をする、初等教育から土壌を重要な対象に位置付けることなど、土壌学の社会的、政策的寄与について活動が始まった印象を受けた。また土壌学は 20 世紀の緑の

革命に寄与したが、これまでの土壌学は温帯先進国のものであり、今後アジア、アフリカの食糧生産を増すためには、熱帯土壌、特に有機物管理の研究を進めることの重要性が強調されていた。

本会議では、6会場で65のシンポジウムが、またその間にポスター発表が行われた。シンポジウムやポスター発表で、日本の若い研究者が、日本国内のテーマよりも、アジア、アフリカの農業や環境保全に関する土壌研究について発表しているのが印象的であった。確かに本会議は国際会議であり、開催地がタイであることもあるが、日本の研究者による土壌研究も、若い研究者が率先してグローバルな土壌、環境、農学への視点と研究の場を移しつつあることを強く感じた。

国際土壌科学連合中間会議

本年4月25～29日にWCSSの中間会議が開催予定地のフィラデルフィア国際会議場に隣接したマリオットホテルで行われた。フィラデルフィアはニューヨークとワシントンDCの間に位置する全米第5位の大都市であるが、何より合衆国独立宣言が採択されたアメリカ生誕の地として有名であり、歴史的建物も会場から徒歩で行ける範囲に多く存在する。独立宣言の折、高らかに鳴り響いた「自由の鐘」も歴史記念公園に象徴として保存展示されている。

この中間会議では、まず Council Meeting で前回のバンコック大会で選出された Sparks 会長と Nortcliff 事務局長の進行でバンコックでの同会議議事録の承認、ロンドン理事会報告（会計・部門名変更など）、ISSS（国際土壌学会）から IUSS（国際土壌科学連合）への変更完了報告と続いて、IUGS（国際地理学連合）との連携強化、大会運営資金などに関する規約改正、名誉会員の選出方法の審議、学会賞の選出方法、ワーキンググループの昇格と休眠グループへの対応、第19回オーストラリア大会（2010年）へ向けて次期会長副会長候補者の批准と大会準備報告、第20回2014年大会への立候補国（韓国）の提案などが審議された。今回は韓国以外から提案はなかったものの正式決定は2年後なのでその半年前までに招致候補国は事務局へ提案書を出すことが確認された。

日本からの推薦者はなかったが9名の名誉会員が選出された。規約改正に伴って名誉会員の総数が増加したことから、3年後の推薦に向けて早めに準備すべきであると感じた。同様に各部会長部門長などの選出についても対応策を早急に練るべきことと思われた。バンコック大会で新設された IUSS Awards (Dokuchaev Award と Liebig Award) については受賞候補者の推薦書を各国代表

機関から1年以内に選考委員長 Blum 氏宛に送る選考規定と内規が承認された。また若手対象の賞も今後検討されることになった。

その後 Council Meeting では部門部会の変更が討議され、副部門 B の「微細形態学」が第1部門第1部会の「形態学」に統合され、ワーキンググループの「ペドメトリックス」と「古土壌学」がそれぞれ第1部門の新部会に、またワーキンググループの「無機有機界面相互作用」が第2部門の新部会にそれぞれ昇格することが承認された。一方、休眠状態のワーキンググループには2年後までに活動報告を出すことが求められている。

Council Meeting と平行して開かれた Division Meeting では次期大会プログラムが審議され、昨年末までに出された90近くのシンポジウム提案課題を会期・会場の関係で60以下に絞る必要があり、相当数が整理された。その中で土壌肥沃度と植物栄養に関する部会でのシンポジウム案（問題土壌における植物のイオンストレス応答と耐性作物の開発、岡山大学松本教授提案）についてはポスターシンポジウムに採択された。植物病理についてのシンポジウム提案は犬伏が co-convener となり、また根圏のシンポジウムや土壌微生物生態への分子生物学的アプローチについても開催されることとなった。さらに放射性元素の土壌中での挙動、温室効果ガス放出と土壌物理性との関係、なども採択された。またポスター賞も継続される。採択シンポジウムの概要は以下のとおりであり、正式テーマ名は近日中に下記大会ホームページにも掲載される予定である。

次回、第18回国際土壌科学会議フィラデルフィア大会の概要

2006年7月9～15日にアメリカ合衆国フィラデルフィアで開かれるが、そのファーストアナウンスがすでにウェブ上で公開されている。

<http://www.colostate.edu/programs/IUSS/18wcss/index.html>

それによればアブストラクトの締め切りは2005年8月1日（会議の約1年前）となっている。全体テーマは「土壌科学のフロンティア：技術と情報の時代」に決まった。会期が前回より1日短くなったため全体講演（招待講演者のみ）とシンポジウム（口頭およびポスター）が部門および部会ごとに以下のように（ワーキンググループからも5）計画されている。

シンポジウムテーマ案（2004年9月10日現在）記号Pは Poster Symposia を示す。

Division 1 Soils in Space and Time

- 1.0A New Frontiers in Soil Resource Assessment
- 1.0B Soil Change in Anthropocene

- 1.0W Soil Geochemical Patterns at Regional, National, and International Scales
- 1.0PA Multiscale Mapping of Soil Properties for Environmental Studies, Agriculture, and Decision-Making
- 1.0PW Synthesis, Modeling, and Applications of Disciplinary Soil Science Knowledge for Soil-Water-Plant-Environment Systems

Commission 1.1 Soil Morphology

- 1.1A Hydropedology: Fundamental Issues and Practical Applications
- 1.1B Site Disturbance: The Role of Soil Morphology in its Assessment
- 1.1C Soil Micromorphology, Archaeometry, and Archaeology
- 1.1P Soil Geomorphology: Concept Theory and Practices

Commission 1.2 Soil Geography

- 1.2A Spatial, Societal and Environmental Aspects of Pedodiversity
- 1.2B Soil System Behavior in Time
- 1.2P Interdependency of Soils and Soil Scapes

Commission 1.3 Soil Genesis

- 1.3A New Frontiers in Soil Genesis
- 1.3B Essence Diagnostic and Time-Scales of Natural and Human-Induced Pedogenic Processes
- 1.3PA Andosols and Related Soils
- 1.3PB Arid Soils: Genesis, Geomorphology, and Geoarchaeology
- 1.3PC Pedogenesis and Weathering in Humid Tropics
- 1.3PD Soils on Limestones: Their Properties, Genesis, and Role in Human Societies

Commission 1.4 Soil Classification

- 1.4A Impact of National Soil Classification on Soil Science and Society
- 1.4B Indigenous Soil Classification Systems

Commission 1.5 Pedometrics

- 1.5A Diffuse Reflectance Spectroscopy, Soil Sensing, Remote Sensing and Image Analysis
- 1.5B Soil Sampling in Space and Time

Commission 1.6 Paleopedology

- 1.6A Imprint of Environmental Change on Paleosols
- 1.6B Amazonian Dark Earth Soils (Terra Preta and Terra Preta Nova): A Tribute to Wim Sombroek

Working Group AS

- AS Acid Sulfate Soils: Technological Advances Enabling Better Management

Working Group CR

- CR Soils of Northern, Southern Polar Region and Soils of High Elevations and Their Relationship to Global

Climate Change

Working Group RB

- RB Developments in the World Reference Base (WRB), Soil Taxonomy (ST) and Other National Soil Classification Systems for Soil Resources

Division 2 Soil Properties and Processes

- 2.0A Synchrotron Spectromicroscopy of Particulate Matter Affecting Air, Water & Soil Quality
2.0B Innovative Technologies in Rhizosphere Research
2.0W Emerging Methods to Examine Metal Speciation and Bioavailability in Soils
2.0P Measurement, Occurrence, and Transport of Radionuclides in Soils and Sediments, and their Transfer

Commission 2.1 Soil Physics

- 2.1A Soil Structuring as a Dynamic Process and Particles Transfer
2.1B Soil Hydrology, Structure, and Micromorphic Properties (Soil Porous System)

Commission 2.2 Soil Chemistry

- 2.2A Soil Organic Matter: Stabilization and Carbon Sequestration
2.2B Adsorption Processes in Soils - Basis for Ecological Soil Functions

Commission 2.3 Soil Biology

- 2.3A Microbial Habitat: Evolution, Structure and Distribution in Soils
2.3B Molecular Approaches to Microbial Ecology in Soils
2.3P New Strategies for Management of Plant Pathogenic Soil Microorganisms - Natural Soil Suppression or Genetically Modified Plants

Commission 2.4 Soil Mineralogy

- 2.4A Poorly Ordered Nanoparticulate materials (PONM) in Soils
2.4B Soil Mineralogy and Geophysics: Environmental and Soils Management and Mineral Exploration

Commission 2.5 Soil Interfacial Reactions

- 2.5A Soil Physicochemical-Biological Interfacial Interactions: Impacts on Transformations and Bioavailability of Metals and Metalloids
2.5B Interactions between Clays and Organic Matter and Their Impact on Sorption and Availability of Organic Compounds in Soil Environments.

Division 3 Soil Use and Management

- 3.0A Long-term Agronomic Experiments: Their Importance for Science and Society
3.0B Wetlands: Science and Management
3.0W Sustainable Soils and Life on Land

Commission 3.1 Soil Evaluation and Land Use Planning

- 3.1A Land Use Planning: Environmental, Economic and Social Trade-offs
- 3.1B Translating Soil Science into Agricultural & Environmental Policy

Commission 3.2 Soil and Water Conservation

- 3.2A Environmental Impacts of Soil Erosion - Measuring and Modelling On- and Off-Site Damages of Soil
- 3.2B Dryland Conservation Technologies: Innovations for Enhancing Productivity and Sustainability
- 3.2C Irrigation and Water Use Challenges for the Future

Commission 3.3 Soil Fertility and Plant Nutrition

- 3.3A Future Challenges in P Fertilization and the Environment
- 3.3B Nutrient Use Efficiency and Global Agriculture
- 3.3C Improved Management of Alkaline Soils for Dryland Agriculture
- 3.3P Plant Responses and Adaptation of Ionic Stresses

Commission 3.4 Soil Engineering and Technology

- 3.4A Combating Global Soil & Land Degradation I. Industrial & Urban Site Remediation, Planning &
- 3.4B Combating Global Soil & Land Degradation II. Agroecosystems: Processes & Assessment
- 3.4P Evaluation of Anthropogenic Sealing Systems Impact on the Environment

Commission 3.5 Soil Degradation Control, Remediation, and Reclamation

- 3.5C Combating Global Soil & Land Degradation III. Agroecosystems: Reclamation Strategies
- 3.5D Combating Global Soil & Land Degradation IV. Forest, Grassland, Wetlands & Native Ecosystems
- 3.5P New Methods for Large-Area Assessment of Soil Degradation

Working Group SCE

- SCE Evaluating Management Impacts on Forest Soils

Working Group SU

- SU Soils in Urban Ecosystems: Characteristics and Functioning

Division 4 The Role of Soils in Sustaining Society and the Environment

- 4.0A Bridging Soil Science and Environmental Policy Targeting Science While Better Communicating Scientific Findings
- 4.0B Soil Related Discords and Conflicts
- 4.0W Soils and Human Health

Commission 4.1 Soils and the Environment

- 4.1A Organic Farming – Advantages and Disadvantages for Soils, Water Quality and Sustainability
- 4.1B Role of Organic Matter for Soil Properties and Consequences for Environmental Functions

- 4.1PA Soils and Natural Hazards (Knowledge, Assessment and Mitigation)
- 4.1PB Soil, Wine and Other Quality Crops

Commission 4.2 Soils, Food Security and Human Health

- 4.2A Soil Care and Quality Soil Management
- 4.2B Biologically Intensive Agriculture: an Approach to Combating Hunger for the Poor
- 4.2C Soil Quality as it Affects Nutrients in Food Crops and Human Health

Commission 4.3 Soils and Land Use Change

- 4.3A Land Use Modeling as a Tool to Combat Soil Degradation
- 4.3B The Amazon: Land Use Changes and the Environment
- 4.3P Intensification of Agricultural Production Systems and the Environment

Commission 4.4 Soil Education and Public Awareness

- 4.4A Case Histories of the Relationships Among Soils and Societies
- 4.4P Soil Science and International Organizations

Commission 4.5 History, Philosophy, and Sociology of Soil Science

- 4.5A History of Soil Science in Developing Countries
- 4.5P The History of Soil Sciences: Past Accomplishments to Future Perspectives

今後の展望

WCSS は4年に1度、開催され、次回の第19回(2006年)は上述のようにアメリカ合衆国(フィラデルフィア)で、さらに第20回(2010年)はオーストラリア(ブリスベン)で開催されることが既に決まっている。

組織改革が進み、これまでの4年に1度だけの会議開催から脱却し、2年ごとの中間シンポジウムや関連学会との共同シンポジウムなども多く企画され有機的に機能しはじめている。また、1998年時点でのIUSSを構成する国別個人会員数では、日本はアメリカ合衆国、スペイン、ドイツに次ぎ第4位で、以下、イギリス、オーストラリア、カナダと続く。日本人のさらなる活躍が期待されている。アジアやアフリカの会員数はまだ世界全体のそれぞれ13%、6%に過ぎないが、第21回の誘致ではすでに中国、韓国、アフリカ土壌連合などが名乗りを挙げており、以前から誘致しながら実現していないブラジルなどを含めて今後の動向が注目される。

参考文献

- 学術の動向、2003.7、87-89 (2003)
- 土肥誌、74、105-106 (2003) ; 75、533-534 (2003)

「ペドロジスト」誌に見るわが国のペドロロジー研究の軌跡と将来展望

東 照雄 (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

1. はじめに

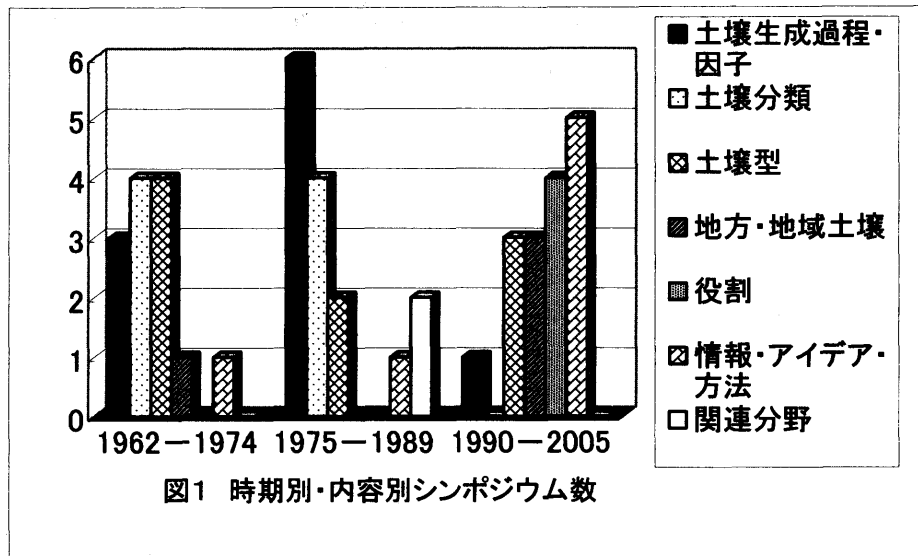
ペドロロジー (基礎土壌学) の本来的な中核部分は、『何故そこに、そんな土壌があるのか?』という根源的な問いに対して、時代を超えて科学的に答えることであり、土壌の存在そのものを研究対象とすることであると私は常日頃考えている。しかしながら、例えば研究分析機器の発達に象徴されるような便利な世の中になっても、この基礎的で基本的な問いに対して答えるのは、そう簡単ではない。また、一方で、土壌資源に関わる応用的で実際的な諸問題に対して、どんな土壌試料を用いて研究を行っているのか、どんな土壌を対象にして解決しようとしているのかを知らないことには、土壌資源の秘めたる可能性も引き出せない。ましてや、土壌の存在無しには日常生活が全く成立しなくなるのが自明の理であるのに、「もうペドロロジーは必要なし」とか「もうペドロロジーには興味なし」などと言う声が聞こえる時、何とも悲しくなるのは私だけだろうか?

土壌は、壮大な地球史の一部を成す過去の履歴を内包した地球表層の自然体であり、持続的な循環型社会構築の基盤であり、地球だけに存在する多様な物質循環の要であり、そして、その意味でもっと盛んに研究されるべき対象である。地球環境の危機に直面している今日であるからこそ、土壌の存在を重視しなければならない。ペドロロジーは、「生産と環境との調和」や「循環型社会の構築」などの現代社会における焦眉の諸課題に対して大きく貢献する学問であり、それを確実に社会に根付かせてはじめて、より活力と安定感のある社会が見えてくるはずである。ここでは、わが国のペドロジスト達が育んできた日本ペドロロジー学会の学会誌「ペドロジスト」に見るわが国のペドロロジー研究の軌跡と将来展望について述べる。

2. わが国におけるペドロロジー研究の軌跡

日本ペドロロジー学会 (1995 年、ペドロジスト懇談会から発展的に設立された) の学会誌「ペドロジスト」に掲載された 265 編の論文 (1957 年から 2004 年 10 月まで) ならびに年 1 回開催されてきた 43 回に及ぶシンポジウムを対象に、時期別の内容解析を試みた。なお、日本ペドロロジー学会の会員数は約 600 名で、「ペドロジスト」誌は年 2 回発行され、土壌そのものを扱うわが国で唯一の学術雑誌である。

まず、シンポジウムのテーマと内容を振り返る。図 1 に示したように、設立以来約 50 年に及ぶ歴史をほぼ 15 年間隔の 3 期に分けて見ると、シンポジウムのテーマと内容が大きく変化してきたことが一目瞭然である。つまり、ペドロロジーが、その時期の学問的・社会的なニーズを把握し、その時期に横たわる諸問題に対して貢献しようとしてきた姿勢が理解される。つまり、1962 年に、「日本の土壌生成因子 (環境) について」と題して第 1 回シンポジウムが開催され、その後も、ペドロロジーの中核的なテーマと内容 (例えば、土壌生成過程・生成因子・分類・調査など) が様々な視点から取り上げられた。しかし、1990 年頃を境に、そのようなテーマと内容は次第に少なくなり、最近の 15 年間では、土壌資源の地域性・情報・インベントリー、多面的な役割や将来展望などに関するテーマが多くなっている。ごく最近では、「わが国の失われつつある土壌の保全を目指し



て「レッドデータ土壌の保全」や「土：生きている地球遺産—次世代への継承を教育現場から考える—」といったシンポジウムも開催されるなど、その内容は誠に多様である。最近のこの傾向は、ペドロロジーの社会貢献・役割に関する具体的内容・側面について、学会員のみならず市民に対して、より目に見える形で公開していく最近の日本ペドロロジー学会の姿勢を示すものである。

次に、投稿論文のタイトル・内容を時期別に振り返る。なお、論文内容の類別は、学会40周年記念特集で用いられたカテゴリー（加藤および三土、ペドロジスト40(2)：123-144(1996)）にほぼ従った。この特集は、わが国におけるペドロロジー研究の歴史を振り返る上で貴重なものであり、ここでは、それと内容重複を避けるため、上記カテゴリー別に、2004年までのペドロロジー研究の軌跡を追うこととした。区分した次期は、図1と同様で、創設(1957)–1974年、1975–1989年、1990–2004年までのほぼ15年間隔の3つの時期である。日本経済の動向から見れば、回復期—高度成長期—低成長期に符合するのかもしれない。表1に示したように、それぞれの時期において総論文数に多少の変動があるが、以下のような研究の軌跡が指摘できる。①どの時期においても、土壤生成過程・因子、分類、土壤地理（地域の特徴ある土壤研究を含む）、土壤調査・土壤図に関する論文が高い割合を占め、土壤型別でも黒ボク土、森林植生下のポドゾル性土・（黄）褐色森林土に関する研究が多い。②水田土壌に関する研究が時期の経過とともに少なくなっている。③逆に、時期の経過と共に、外国の土壌に関する論文数が明らかに増加しており、とくに、その生成・諸性質に係る粘土鉱物などの無機成分を取り扱った研究が多い（有機成分については比較的少ない）。④わが国のペドロロジー研究における一つの特徴であると考えられるが、古環境の復元・過去の土壤生成にとって重要な植生情報の一つである植物珪酸体に関する論文も多い。⑤ペドロロジーに基づいたエダフォロジー（応用土壌学）的観点からの現場に対応した研究や土壌資源の評価などに関する研究は、創設以来今日まで増加傾向にある。ここで、上記①から⑤の時期別傾向に関して、多少コメントを述べることにする。

①について：ペドロロジーの中核的研究であり、これ無しにはペドロロジーの存在基盤が無いと考えられ、論文数の全体に占める割合には、極端な減少あるいは増加傾向は無い。

項目	1957-1974	1975-1989	1990-2004	合計
土壌生成過程・因子	16	15	25	56
土壌分類	13	11	11	35
土壌(地方別特色)	11	4	7	22
土壌調査・土壌図	10	6	9	25
黒ボク土	12	14	25	51
赤黄色土・暗赤色土	7	9	11	27
ポドゾル・褐色森林土	13	8	5	26
低地・水田土	7	9	9	26
未熟土	5	1	4	10
外国土壌	11	14	16	41
有機成分	11	13	15	39
無機成分	17	12	28	57
植物珪酸体	1	6	7	14
エダフォロジー	4	10	17	31
合計	138	132	189	459
論文数	81	76	108	265

最近では、ともすれば、研究資金をより獲得し易い応用的・実際的研究にシフトしがちであるが、研究課題の中に基礎的・基本的な内容を包含させることが肝要であると考えられる。例えば、土壌生態系への温暖化影響などは、応用研究のように受け取れる場合もあるが、土壌生成過程の基本的側面に関する深い理解無しには意味のある研究成果は得られない。②について：行政・消費者行動に大きく左右されてきた日本における米作・米の歴史を考えると、このような傾向が出るのは当然かもしれない。しかし、わが国の水田土壌研究は、世界をリードして来たとし、今後もそうでなくてはならない。水田土壌・低地土壌のペドロロジー研究の多くの成果が、戦後から今日まで、日本のみならず世界の稲作技術に貢献してきた例は数多く知られている。③について：先進国としては既に研究されつくした感のある研究が、土壌生成環境あるいは社会経済状況をかえる時、息を吹き返し、ペドロロジーの重要性が再認識されることにも繋がるわけで、とくに、発展途上国への技術協力・移転において、ペドロロジーの功績は甚大なものがあり、今後ともその意義は変化しない。④について：地球環境問題を考える上で、古環境の把握は現実の対応にとって意義深く、今後とも様々な環境下での研究促進が期待される。⑤について：ペドロロジーのみでは社会貢献する場面が限られてくる場合が多い。しかし、従来から指摘されているように、ペドロロジーは、エダフォロジーと両輪を組むことによって、現場の土壌資源管理や将来を見越した適切な生産体系（環境保全型・循環社会型）の構築に向けて、今後益々その大きな役割を果たさなければならない。

3. わが国のペドロロジー研究の現状と将来展望

既に述べたように、わが国には世界をリードする先進的・特徴的な研究が数多くあった。例えば、黒ボク土や水田土壌の研究は、そのよい例である。この機会に、わが国のペドロロジーの現状に照らして、より一層それを発展させるために必要とされるペドロロジー研究について私見を述べてみたい。

①土壌の時空間的不均一性に関する研究。従来から指摘されてきように、多くの土壌調査・研究では、時空間スケールにより異なるが、研究対象の土壌・土壌試料がその目的にとって代表性を持つことを前提としてきた。しかし、むしろ今後は、その土壌の時空間的不均一をもっと明らかにすべきであろう。最近のペドメトリックス的なアプローチなどは圃場レベルでの研究に有効であろうし（例えば、矢内ら、1997）、土壌個体・粒子レベルの空間的不均一性に関しては、その研究方法の開発が（わが国で研究例が少ない微細形態学なども含めて）とくに重要であろう。その際、ペドロロジー研究に深く関連する基礎化学・物理学・生物学・情報科学などの最新の諸成果を、それらの有効性と限界性を認識しながら、意識的に取り込むことが有効となろう。とくに、粒子レベルの多面的研究は、土壌生成分類や土壌管理に関する新局面を展開する可能性があると考えている。②人間活動の土壌資源に対する影響評価は今後とも非常に重要である。その際、土壌（資源）の全ての属性が、全体として変化していることを考えなければならない。例えば、ごく短期間の森林衰退によって、土壌は全体として劣化する方向へ大きく変化したことが明らかにされ（東・大瀬ら、Soil Sci. Plant Nutr., 49, 161-184, 2003）、火山灰土壌と非火山灰土壌の間では、硫酸塩イオンの蓄積量・土壌荷電特性が大きくことなることをが示されたが（谷川ら、土肥誌, 74, 149-155, 2003）、今後、土壌のみならず森林生態系全体に影響を及ぼす可能性が高い。これらの研究例が示すように、潜在的・不可逆的？に進行する様々な土壌資源の環境変化応答に関する研究は焦眉の課題であり、そのために、フィールド研究と他分野との共同研究が再認識される必要がある。また、わが国では研究例が少ない都市（近郊）土壌・人工土壌について、市民にも大きな関心があり、その汚染問題などの現状把握と適切な管理対策に関する研究が急務である。③過去に蓄積された土壌資源に関するデータの編集と解析は（例えば、小原・中井、土肥誌, 75, 59-67, 2004; Morisada et al., Geoderma, 119, 21-32, 2004）、わが国の土壌資源の過去と現状把握・将来予測にとって基盤的研究であり、わが国に限らず、世界各地の土壌資源の将来に渡る持続的管理の基礎として重要である。④地球環境問題との関連を強く意識したペドロロジー研究を、世界的研究者ネットワークの活性化などを通して、さらに展開させるべきである。とくに、土壌有機物動態や土壌中の無機物・有機物・微生物の間の相互作用など、生態学的視点からはあまり扱われないペドロロジー研究が不可欠である。

最後に、生命の維持に深く関係するペドロロジーは、その研究成果や社会的役割などに関して、日常的な広報活動を今後さらに強化する必要があると思われる。また、何よりも、多くの若い方々が、このペドロロジーの分野に興味をもって頂き、未解明の課題と正面から取り組み、世界に向けて意義深い情報発信をして頂くことが重要であろう。

注) 引用論文については、研究例を本文中に示しました。

先端的土壌化学とフィールド研究

米林甲陽・山田秀和（京都府立大学大学院農学研究科）

要 約

核磁気共鳴(NMR)、質量分析計、ICP など先端分析機器を用いた非破壊、超微量分析が土壌化学に適用され、多くの新知見が得られた。 ^{29}Si -NMR、 ^{27}Al -NMR 分析により、黒ぼく土のアロフェンおよび層状ケイ酸塩粘土の生成過程、交換性アルミニウムの形態が明らかになり、炭素安定同位体比分析により黒ぼく土の腐植物質の給源がススキ(C4 植物)に限らないことが見いだされた。腐植酸を構造タイプの異なる 2 成分に分画し ^{13}C -NMR 分析をもとに腐植酸の平均化学構造モデルが提案された。微量元素のセレンおよびヨウ素について蛍光検出 HPLC による微量分析法が開発され、土壌中の元素の形態と挙動が明らかにされた。熱帯泥炭土壌の下層土に海水の浸入した痕跡としてナトリウム、マグネシウム、ホウ素の集積が見いだされ、下層の塩濃度が高く持続的な農業が困難なことが認められた。

1. ^{29}Si -NMR、 ^{27}Al -NMR 分析、炭素安定同位体比分析による黒ぼく土のアロフェン、交換性 Al の形態、腐植の給源に関する研究

近年、核磁気共鳴(NMR)を用いて土壌を非破壊で分析する手法が積極的に試みられている。ケイ素を対象元素として NMR 分析を行うと、新しく堆積した火山灰土壌に豊富に含まれる粘土鉱物アロフェン・イモゴライトは、1 万年以前に堆積した火山灰土壌に多く含まれる粘土鉱物パーミキュライトなどとは NMR シグナルの位置が全く異なることから、アロフェン質黒ぼく土と非アロフェン質黒ぼく土を見分ける上で有効であることが分かってきた。

アロフェンやイモゴライトは火山灰や軽石の風化過程で生成するが、その過程で鉱物中のアルミニウムが 4 配位から 6 配位に形態変化することが、 ^{27}Al -NMR 分析で明らかになった。さらに、 ^{29}Si -NMR 分析によって火山灰や軽石(-110ppm)→アロフェン・イモゴライト(-78ppm)→層状ケイ酸塩粘土鉱物(-92ppm)の変化をとらえることも可能であり、火山灰土壌の風化・粘土生成過程を ^{27}Al -と ^{29}Si -NMR 分析によって追跡することができるようになった。

アロフェン質黒ぼく土に比べ非アロフェン質黒ぼく土は交換性 Al 濃度が非常に高く、植物生育を阻害する Al 過剰障害が起こることが知られていたが、Al の形態については、モノマー Al イオンとする説と 13 量体 Al とする説などがあった。 ^{27}Al -NMR 分析の結果、13 量体 Al(63ppm)とモノマー Al イオン(ca.0ppm)は明瞭に区別できることから、多くの土壌で交換性 Al の主成分はモノマー Al イオンであることが明らかになった。土壌中ではケイ酸、硫酸イオン、リン酸イオンや、根から分泌された有機酸や腐植分子などが 13 量体 Al の生成を阻害していることが明らかになった。

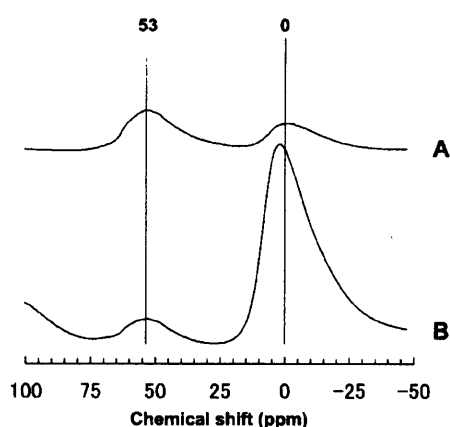


図1 ^{27}Al -固体 MAS NMR スペクトル
 A: 非アロフェン質黒ぼく土 A 層
 B: アロフェン質黒ぼく土 B 層
 (S. Hiradate: 2004)

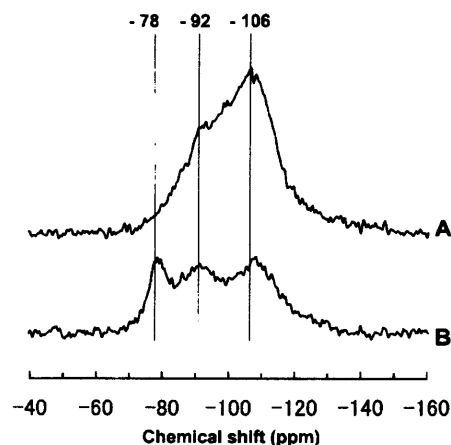


図2 ^{29}Si -固体 MAS NMR スペクトル
 A: 非アロフェン質黒ぼく土 A 層
 B: アロフェン質黒ぼく土 B 層
 (S. Hiradate: 2004)

黒ぼく土は、世界的に見て異常なほど多量の炭素を腐植物質として蓄積した土壌である。黒ぼく土の腐植物質は芳香環とカルボキシル基を多量に含んでいることが特徴で、カルボキシル基は Al によって架橋されて安定化していると考えられている。従来、黒ぼく土の腐植物質の給源としてススキ(C4 植物)とする説が有力であったが、質量分析計によって炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)を測定して、C3 植物と C4 植物の寄与率を調べた結果、黒ぼく土では C4 植物の寄与率は 20~50%にすぎないことが報告された。必ずしもススキに限らず植生が多様に遷移する中で、火山灰や軽石の風化にともなって多量に放出される Al が腐植物質の安定化に寄与していると考えられた。

2. ^{13}C -NMR スペクトルから求めた腐植酸の平均化学構造モデル

土壌中の腐植物質は、難分解性の天然高分子化合物の混合物であり、材料となる植物遺体の供給量と、生成する場すなわち土壌の違いによって全く異なる物性を示す。極めて多様な混合物で構成される腐植物質の構造を推定するため、平均的な構造を把握する方法として、石炭化学で開発された統計的構造解析法が適用されていた。元素分析値と官能基分析値、 ^1H -NMR スペクトルを基にしているが、官能基は全て芳香環に結合するとし、脂肪族鎖は直鎖だけと仮定することによって構造パラメータが求められていた。しかし、解析の精度は高くなく、細部にわたる推定は困難であった。

近年、 ^{13}C -NMR 分析で DEPT 法と QUAT 法を適用すると、1~4 級炭素のサブスペクトルを得ることが可能になったため、 CH_3 、 CH_2 、 CH 、 C_t サブスペクトルそれぞれについて各種形態炭素の存在割合が計算できる。元素分析、官能基分析、 ^1H -NMR 分析の結果と併せて、全てのデータを満足する化学構造単位が構築され、図 4 に示す「平均構造モデル」が提案された。このモデルは、混合物としての腐植酸を、疎水性樹脂を用いて化学的

性質の類似した構造タイプのごとの成分に分離し、腐植酸をカルボキシル基と芳香環の多い成分と、長い脂肪族鎖を持つ成分に分離したものについて得られた結果である。

カルボキシル基と芳香環の多い成分は、分岐が少ない構造で、多量のカルボキシル基の大部分は芳香環の表面上に位置している。長い脂肪族鎖を持つ成分は、芳香環が少なく分岐の多い構造で、少量のカルボキシル基が疎水的な領域から離れて存在している。

全ての土壌中の腐植酸は、ここで示す2つの構造モデルで表した成分の、成分比が違うものとして存在していることが明らかになった。

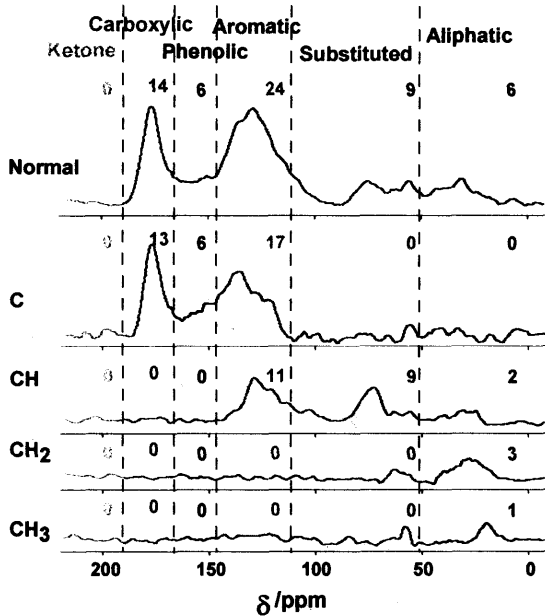
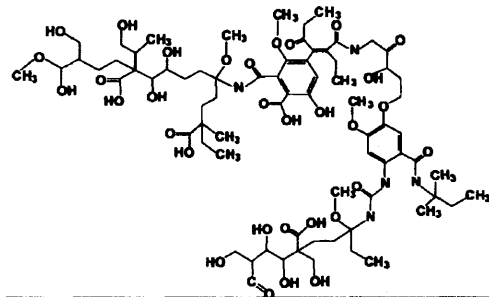
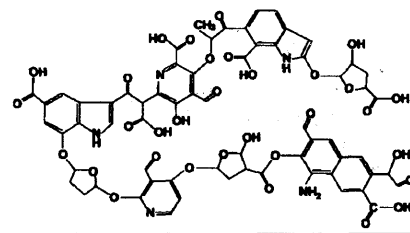


図3 灰色低地土腐植酸カルボキシル性成分の¹³C-NMRスペクトルとDEPT, QUATサブスペクトル



長い脂肪族鎖を持つ成分



カルボキシル基、芳香環の多い成分

図4 腐植酸の平均化学構造モデル

3. 微量元素の高感度分析法の開発と、環境中の微量元素の化学形態と挙動

土壌中の微量元素は、植物の生育だけでなく作物を介して人や家畜の健康に影響する。たとえば、土壌に多量のセレンが含まれ飼料作物に集積すると動物にセレン過剰症が、土壌セレンが少ないと人や家畜にセレン欠乏症が現れる。

蛍光検出—高速液体クロマトグラフィーによりセレンの高感度分析法が開発され、日本の土壌中には概ね0.1から2 mg/kgのセレンが含まれること、また土壌セレンの分別定量法が開発され、土壌セレンは亜セレン酸 (SeO_3^{2-}) 態やセレン酸 (SeO_4^{2-}) 態のほか土壌腐植物質のフルボ酸や腐植酸に結合して有機態で存在することが明らかにされた。土壌セレンの動態について、土壌が還元化すると有機態セレンは比較的安定であるが亜セレン酸態の一部が元素状に変化すること、しかし生成した元素状セレンは不安定で土壌セレンの安定形態ではないことが見いだされた。また、有機態セレンの一形態であるトリメチルセレンニウム ($[(\text{CH}_3)_3\text{Se}]^+$) は、土壌中で短時間に微生物分解されジメチルセレン ($(\text{CH}_3)_2\text{Se}$)

等のガス状セレン化合物に変化することが明らかにされた。これらの結果は、環境汚染物質としてのセレンの挙動を考察する場合に有用な知見を提供する。

ヨウ素は、甲状腺ホルモンに含まれる動物の必須元素であるが、植物には毒性を示す。ヨウ素は、土壤中に概ね 1~50 mg/kg 含まれ、土壤が還元化するとその一部が可溶化する。そのため、ヨウ素濃度の高い土壤を水田化すると可溶化したヨウ素によってイネが生育障害（赤枯れ病）を受ける。蛍光検出—高速液体クロマトグラフィーや ICP-MS によるヨウ素の高感度定量法が開発され、土壤ヨウ素はヨウ化物 (I⁻) 態やヨウ素酸 (IO₃⁻) 態のほか土壤腐植のフルボ酸や腐植酸に結合した有機態で存在することが明らかにされた。また、土壤の可溶性ヨウ素濃度が 6 mg/kg を超えるとイネに赤枯れ病の症状が顕著に現れることから土壤分析による赤枯れ病発生予測の可能性が指摘された。更に、ヨウ素毒性に対するイネの抵抗性には品種間差がみられるが、この抵抗性の違いはイネ根部の酸化力の差異に対応することが見出された。

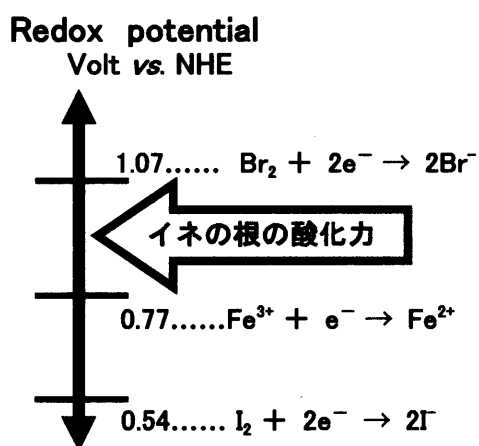


図5 標準酸化還元電位と根の酸化力

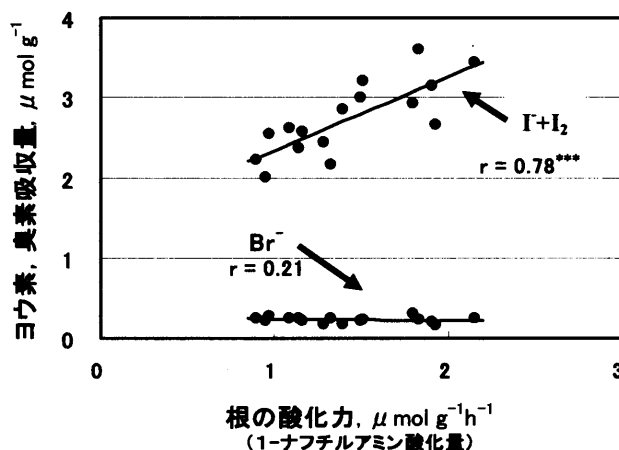


図6 根の酸化力と根のヨウ素・臭素吸収量

4. 熱帯泥炭土壌の化学的特徴

熱帯泥炭地を保全し、適切に利用するには、植物の養分欠乏や過剰毒性などの問題を解決しなければならない。熱帯泥炭は低 pH で、鉄、マンガン、銅、亜鉛、ホウ素の含有量が少なく、特に銅と鉄の大部分は腐植物質と錯体を形成して、不可給態化していることが明らかにされている。ホウ素について、全量とマンニット可溶性ホウ素を ICP で分析した結果、微量しか存在しないホウ素の大部分は非解離状態で泥炭表面に吸着しているとされた。内陸性泥炭の 40cm 以下の下層にだけ非常に多量のホウ素が存在する場合があります、その層でナトリウムとマグネシウム濃度も高いことから、海水中に多いホウ素が泥炭下層への海水の浸入にともなって固定されたものと考えられた。このように海水の浸入した痕跡が認められた泥炭地は、開墾後に作物の耕作が持続できず現在荒地地となっている。

5. 今後の展望

従来、土壌を化学試薬で処理した成分を分離・分析したり、化学試薬との反応性から物性を推定したりすることによって広く土壌の化学性が研究されていたが、化学試薬との反応が想定外の反応性によって誤った値をもたらす危険性が常に内在していた。固体 NMR 分析によって非破壊分析が可能になったため、この恐れが著しく低くなり、多くの新知見が明らかになってきている。今後も多くの場面で固体 NMR は適用されて成果が上げられると期待される。しかし、分析コストが高く、専門的知識が必要で、元素によっては感度や分解能に制限があるなどの問題点もあることから、十分な対応が必要となろう。

土壌腐植酸については、その化学構造モデルの推定が可能になったことで、腐植酸と重金属との錯形成のしやすさや、農薬や多環芳香環を持つ有害有機物などの腐植酸に対する疎水吸着のしやすさなどが、土壌腐植酸の違いと関連して解析することができる。このことは、土壌生態系だけではなく、水環境においても腐植物質を有害有機物や重金属元素の移動担体とし、その機能性を評価するときに重要な情報を与えるものである。また、腐植物質の植物生育を促進する機能について、効果の発現機構を解析する試みが今後行われると期待される。

土壌の微量元素に関しては、例えば、ホウ素の供給力の診断には、土壌の熱水可溶性濃度が使用され、この分析診断には先端機器の使用や、操作の簡便化が試みられてはいるが、計測されるホウ素の土壌中での化学形態の詳細が不明のため、結果を効果的に活用できていないように思われる。これからの土壌化学は、土壌成分の定量的把握だけではなく、作物栽培を念頭に置きつつ、成分の存在形態と挙動の化学的詳細をより深く考察すべきであろう。

謝 辞

本稿の取りまとめに当たり、独立行政法人 農業環境技術研究所 平舘俊太郎氏のご協力をいただいた。深謝申し上げます。

引用文献

- Hiradate, S., Taniguchi, S., and Sakurai, K. (1998): Aluminum speciation in aluminum-silica solutions and potassium chloride extracts of acidic soils. *Soil Science Society of America Journal*, **62**, 630-636.
- Hiradate, S. and Yamaguchi, N.-U. (2003): Chemical species of Al reacting with soil humic acids. *Journal of Inorganic Biochemistry*, **97**, 26-31.
- Hiradate, S., Nakadai, T., Shindo, H., and Yoneyama, T. (2004): Carbon source of humic substances in some Japanese volcanic ash soils determined by carbon stable isotopic ratio, $\delta^{13}\text{C}$. *Geoderma*, **119**, 133-141.

- Hiradate, S. (2004): Speciation of aluminum in soil environments; application of NMR technique. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50, 303-314.
- Kodama H. and Yonebayashi K.(2000): Structural model proposed for humic acid components fractionated with adsorption chromatography using DAX-8 resin. Pages 125-127 in Symposium on Refractory Organic Substances in the Environment – ROSE II. Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- Yamada H., Miyamura T., Yasuda A., Hattori T., and Yonebayashi K. (1994): Determination of trimethylselenonium ion and its behavior in soil. *Soil Science and Plant Nutrition* 40:49-56.
- Yamada H., Kiriya T., and Yonebayashi K.(1996): Determination of total iodine in soils by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Soil Science and Plant Nutrition* 42:859-866.
- Yamada H., Kase Y., Usuki M., Kajiyama S., and Yonebayashi K. (1999): Selective determination and formation of elemental selenium in soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 45:403-408.
- Yamada H., Hisamori I., and Yonebayashi K.(2002): Identification of organically bound iodine in soil humic substances by size exclusion chromatography /inductively coupled plasma mass spectrometry (SEC/ICP-MS), *Soil Science and Plant Nutrition*, 48, 379-385
- Yonebayashi K., Yamada H., Suzuki A., Ebato M., and Anwar S. (2004): Evidence of sea water boron in the lower layers of tropical woody peat. *TROPICS*, 14 (in press).

土壌物理学が拓く未来の物質循環

宮崎 毅

東京大学大学院農学生命科学研究科

要約

安全な食料を求める声がこれまでになく強い昨今、食糧生産を基礎から支える土壌の安全性についても関心が高まっている。土壌汚染がもたらす健康被害は、野菜や穀物の汚染によるものだけでなく、生物生態系の食物連鎖を通じて人間に及ぶものもあるし、土壌から発生するガス状物質であれば、呼吸を通して直接体内に入り込む危険もある。有害な物質を含む土壌水が地下水に達すれば、地下水汚染を生じる。これら全ての問題は、土壌における物質循環と深く関わっている。ところが、土壌の健全性の実態や、土壌における物質循環の実態などについて、総合的に解明されたとは言いがたい。そこで、地球の土壌がどれほど病んでいるか、また、どうすれば健康な土が取り戻せるのか、物質循環を物理学的に扱う専門分野である土壌物理学から、事例を挙げつつこれらの問題を考え、未来へ向けた研究課題を考えてみた。

1. 地球の土壌診断

地球の表面積はおよそ 500 億 ha で、陸地 149 億 ha、森林 33 億 ha、砂漠 36 億 ha、農耕地 15 億 ha などと見積もられている。そして、陸地土壌の厚さは平均 18cm である。岩石の風化から測定すると、1cm 厚さの土壌を作るにはおよそ 300 年かかるという。土壌の全体像は以上のとおりであるが、最近 20 年間に、人間の行為によって約 20 億 ha の土壌が劣化したというショッキングな報告 (UNEP 代表 ISRIC の調査報告) が出され、騒然となった。土壌劣化の内容は、土壌侵食 (風食や水食)、土壌の酸性化、土壌の塩類化、土壌汚染、土壌からの溶脱や有機物損失、土壌圧縮、土壌の目詰まり、などであり、その全てが人間の行為によるとされた。NHK スペシャルで 1999 年に放映された「世紀を越えて一大地はどこまで人を養えるか」では、映像を駆使してこのことを茶の間にまで届け、数回の再放送を行ったが、必ずしも多くの人びとの理解には至っていない。なお、これらの報告の中では、日本の土壌劣化については特別な問題は指摘されず、当時、我々に深刻な危機感は起きなかった。

2. 日本の土壌診断

日本は降水量が適度で、気候も温暖なため、多少の人為的な影響を受けつつも、土壌劣化は報告されていない。しかし、農地を対象としたフィールド調査を行うと、「最近、土壌が硬くなった」「何となく土が悪くなっているような気がする」「表土がどんどん薄くなっている」「昔は似たような土だったのに、最近、排水の不良な圃場が出てきた」などという“現場の声”があり、また、休耕田の土壌亀裂や土壌劣化を心配する声も聞く。日本の土壌は本当に持続性を維持し、良好で健全なのか、土壌診断の必要性はますます高くなっている。

一方、特定の土地における土壤汚染については、いくつもの深刻な報告がある。工場跡地でのトリクロロエチレン、メッキ工場跡地での六価クロム、マンション建設用地の重金属および有機塩素化合物汚染、盛土中に検出された PCB、飲用井戸水のヒ素汚染（基準値の 450 倍）など、新聞報道された事項であるが、平成 15 年に土壤汚染対策法が施行されたことに伴い、今後ますます汚染の実態が表面化する可能性が高い。

3. 土壤物理学研究の現状

土壤物理学は、厳密な概念規定、精密な測定手法、土壤を巡るさまざまな物理現象の発見、最新のソフトウェアを適用したシミュレーション、不均一性とスケール依存性を考慮した移動現象解析、土壤諸科学・水文学・地質学・環境諸科学との接点開拓、などを今日的課題として発展してきている。特に、環境問題が大きく取り上げられる中にあるのは、物質循環問題に対する土壤物理学の貢献に対する期待が大きい。ところが、SSSAJ、JEQ、VZJ などの雑誌における最近 7 年間（1998～2004）の土壤物理部門論文発行数を見ると、土壤物理一般 144 件、測定法 137 件、土壤構造 100 件、流れ（Flow）44 件、透水係数 42 件、物質循環(Fate)21 件、熱関連 10 件、力学的挙動 9 件等となっている。つまり、物質循環に関わる研究実績は、世界的に見てもまだまだ萌芽的と言わざるを得ない。

土壤物理学において物質循環の研究があまり進展していない理由は、①物質の化学変化をモデルに組み込むことの困難性、②物質の吸着・離脱過程をモデルに組み込むことの困難性、③移流・分散現象の測定や解析の困難性、④植物が関与する移動現象の実験手法、解析手法の未確立、⑤微生物が関与する移動現象の実験手法、解析手法の未確立、⑥土壤ガス移動の基礎研究の遅れ、などが考えられる。そこで、以下に、最近着手された萌芽的研究の現状を述べる。

3-1 土壤圏における地球温暖化ガス CO₂ の動態

土壤中の CO₂ フラックス計測と解析に関するワークショップが、2003 年 10 月にコロラドで開催され、概略下記のような総括がなされた。すなわち、地球上のカーボンの 3 分の 2 以上は土壤中に存在すること、大気中の多量の CO₂ も土壤を通過すること、土壤中の呼吸は植物根の呼吸と微生物の呼吸からなること、したがって、土壤呼吸を明らかにすることは、炭素循環の要であること、以上である。土壤物理学では、土壤中の CO₂ ガス濃度分布の時間変化や季節変化と土壤微生物の活性との相関を、圃場調査と実験研究によって検討中である。理論的な面では、CO₂ 発生・貯留を含む拡散モデルを中心とした研究以外に、外気圧変化に応じて土壤中のガスが大気に噴出する、いわゆるポンピングといわれるマスフローの研究も近年開始された。

3-2 土壤圏における地球温暖化ガス CH₄ の動態

湛水条件下の土壤中では、長期的に還元状態に置かれるためメタンガスが発生し易い。特に、水田と並んで湿原の地下水面下でも多量の CH₄ が存在する。日本では水田面積が大きいので、水田からのメタンガス発生が注目されるが、世界的に見ると wet land(湿地)と

総称される自然環境における CH₄ の発生、貯留、拡散移動、移流移動、大気への放出などについて研究が集中している。最近、気泡が存在する条件下での水中ガス拡散移動の研究が注目されており、新しい測定や解析、モデリングが検討されている。

3-3 ファイトリメディエーションの研究

土壌の重金属汚染は、食生活に直接的な影響を与える。たとえば、日本のイネに含まれるカドミウムが比較的高く、国産米中に含まれるカドミウム量の平均値は、ブラジル産の 25 倍とも言われている。そこで、国際的な食品規格設定を司るコーデックス委員会では、コメ（精米）中のカドミウム国産基準を 0.2 ppm とする原案に対し、日本は 0.4 ppm 基準を主張しているほど、外交問題としての重要性も有する。この問題の根本的解決のためには、土壌中のカドミウムを減少させることが最も重要である。

そこで、重金属で汚染された土壌を植物によって浄化しようとする方法、ファイトリメディエーションが注目されている。ヨーロッパ各国では、ヒマワリやシダ類などの野生植物を利用した浄化に関心が高く、日本ではイネなどの栽培作物を利用する動きが強い。この研究の現状は、政策的には汚染土壌から Cd を良く吸収する植物を選定する研究が先行しているが、土壌物理的にはもう少し基礎的な面から研究を開始した。たとえば、Cd 汚染土壌では植物の生育障害が起こらないか？、土壌中の Cd はどの深さからより多く吸収されるか？、土壌中の Cd は水と一緒に根に吸収されるのか？、土壌中の Cd 濃度と根による Cd 吸収量との間に相関はあるだろうか？などの視点で進められている。

3-4 バイオベンティングの研究

汚染土壌に空気を送り込んで、自然に存在する微生物を活性化させ、接触する汚染物質を分解して浄化する技術をバイオベンティングという。この手法は現場技術として先行しており、基礎的研究の遅れがある。すなわち、空気が送り込まれたとき、微生物は増殖するのか、それとも活性度が高まるのか、という基本的な知見が確立しておらず、したがってモデリングも確定していない。この分野では、土壌中の好気性微生物に関する増殖モデルが発展しているが、微生物の活性化モデルは立ち遅れている。現在、実験的なデータの蓄積に努めている所である。

3-5 バイオクロッキングの研究

土壌中の微生物をコントロールして土壌の透水性を変化させることができれば、いろいろな応用分野に生かすことができるだろう。バイオクロッキングの研究は、土壌微生物に栄養を与えたり、逆に殺菌したり、あるいは特定の微生物を選択的に活性化させたり、といった様々な条件を与えて土壌の透水性に現れる変化を調べることが、現在行われている。例えば、土壌の透水係数の温度依存性を調べたところ、15℃にコントロールした場合は 10 日間経過後もほとんど変化しなかったのに、25℃では 7 日間で 1/100 にまで低下した。この原因を調べた所、糸状菌の増殖によるものであることを突き止めた。このように、土壌物理学と土壌微生物学は、分野とすれば最も遠い存在であるにもかかわらず、自然現象と

してはほとんど同時平行的に現れていることを考えると、専門分野の細分化が自然現象の解明を阻害しているように見えなくもない。この研究は、そのような壁を突き崩す契機ともなりうると期待されている。

3-6 廃棄物利用による土壌改良の研究

産業廃棄物や都市廃棄物、農業廃棄物などの資材は、その最終処分に至るまで十分な注意を払わねばならぬことは言うまでもない。これらの中で、安全性が確保されている資材については、別の目的に再利用できることが望ましい。最近、破壊された有色ビン類などから生ずるガラスカレットを土壌改良材に用いる研究が行われている。ガラスカレットを土壌に混入することで、十分な締固め強度、高い透水性、安全性、これらの機能の持続性が得られるとすれば、実用に耐える。さらに、集落排水汚泥の農地還元についても検討を依頼されている。多くのデータと議論が必要な分野であろう。

4. 今後の研究展望

以上のような研究の現状から、今後の研究を展望してみたい。まず、各専門分野の一層の深化が必要なことは言うまでもないが、それだけで問題が解決するとは思えない。そこで、今後の研究をいくつかの戦略によって拓くことを展望する。研究戦略としては、①個別研究課題の壁を乗り越える基礎研究、②分野間の壁を乗り越える交流戦略、③若手研究者の人材育成、④中堅やベテランの継続教育、などが重要と思われる。

基礎研究については、「重要な研究などというものはない。面白いと思った研究を徹底的に追求すること、そうするとその研究は重要になるのです（要旨）」（江上不二夫）に学ぶ以外にはないだろう。分野間の交流戦略については、本シンポジウムをはじめとして様々な企画が提案されているものの、まだ道は遠いように思われ、教育システムの見直しも含めて考えて行きたい。若手研究者の動向を見ると、研究動機を持って大学院に進入学する学生が増えたこと、特に環境問題に関与したり寄与したい学生が多いこと、バックグラウンド知識が多様化していること、研究に対し実際的な効果を求める学生が多いこと、古い理論を理解することより新しい現象を見出すことに魅力を感じているように見受けられること、などの印象がある。我々自身を含めた継続教育を考えると、中堅やベテラン研究者における IT 知識、新しい計測知識の充実、国際舞台での積極的な役割貢献、国際誌での読者や編集者との論争力強化、国際誌の閲読参画、日本語での論文重視、現場からの要請へのサービス対応、などを改善する必要がある。

おわりに

土壌物理学は、難しく狭い学問と思われているかもしれない。しかし、現在のように研究対象や研究手法の“越境”が当然視される時代においては、土壌物理学から“越境”したり、他分野から土壌物理学に“越境”することが、むしろ歓迎される。土壌物理学を“越境の科学”と呼ぶとき、この学の現状と未来がより明確に見えてくると思う。挑戦心にあふれた若手研究者を歓迎する理由もここにある。

豊田剛己（東京農工大学大学院共生科学技術研究科）

要約

土壤微生物は作物生産上重要な様々な機能を有している。これら生物機能を維持、向上させることが今後持続型作物生産システムを構築する上できわめて重要である。そこで、重要な生物機能として、①ホメオスタシス（各種ストレスに対するレジスタンス、ストレスからのレジリエンスの2点から土壤機能の持続性を評価）、②土壤病害抑制能（病原生物を抑制し、健全な作物生産を支える）、③窒素固定能を取り上げ、これらに関する基礎研究例を紹介する。また、持続的土壤利用には有機物施用は欠かせないため、有機性廃棄物の土壤への有効利用の面から上記3点を考える。

1. はじめに

土壤微生物は普遍的に存在する。温帯や熱帯の土壤のみならず、砂漠やツンドラ、南極の土にも微生物は生育している。これら微生物はさまざまな生態系機能(Ecosystem services)を担っているため、人類の生存に欠かせない生物である。微生物は生きていれば必ず何かを食べ、排出するが、これが分解者として知られる他の生物では代替されない最も重要な土壤機能である。また、主要な排出物である二酸化炭素は地球温暖化との関係でその排出量の増加が懸念されるが、土壤微生物による二酸化炭素発生がなければ温室効果が生まれず、温暖な地球は年中マイナス18度の氷の世界となってしまう。

微生物の体（バイオマスと呼ばれる。バイオ(bio:生物)とマス(mass:重さ)の複合語）は、炭素、水素、酸素をはじめ、窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウム、鉄、銅、亜鉛、ホウ素といった様々な生元素を有している。従って、バイオマスが土壤中で分解されると各種養分が放出され、それらが直接植物の栄養源となる。

土壤1gには数十億の微生物が存在し、それらは数万種類を超えるほど多様である。この微生物の多様性が、さまざまな有機物を分解できる土壤機能の源となっている。コナラやスギといった樹木の落葉落枝や動物遺体だけでなく、一部の化学物質で見られるような元々自然界に存在しなかった人工化学物質でさえ、土壤に入ると分解される。また、こうした多様性が、生態系の安定性を担うことがわかってきた。

その他、土壤微生物の有する生態系機能を上図に紹介したが、これらはあくまで一

土壤微生物の生態系機能

一般微生物

- ・存在 = 有機物分解能(物質代謝)
- ・バイオマス = 植物への養分供給源
- ・多様性 = 多様な土壤生物機能源
= ストレス耐性

特異微生物

- ・窒素循環: 窒素固定、アンモニア化成、硝酸化成、脱窒(亜酸化窒素生成)
- ・リン溶解(菌根菌)
- ・植物生育促進(ホルモン生成、拮抗菌)
- ・有害微生物(植物病原菌)

例であり、その他にも非常に多くの機能を土壤微生物は有している。本シンポジウムでは、これらの中から演者らの研究室で実際に行っている研究例について紹介する。

2. 各種ストレスに対する土壤機能のレジスタンスとレジリエンス

土壤は常時さまざまな環境ストレスを受けている。温度や水分の変動、農業に代表される各種化学物質が土壤微生物に対してさまざまな影響を及ぼす。こうしたストレスの影響が少なく（レジスタンスが高いと見なすことができる）、また、ストレスの影響を受けてもすばやく回復するようであれば（レジリエンスが高い）、その土壤はホメオスタシスを維持できることになり、持続的な土壤利用につながる。一方、レジスタンスが低い、あるいはレジリエンスが低いなどして、受けたストレスの影響が持続すると（つまりホメオスタシスを失う）、その土壤は本来の機能を損ない、やがては土壤の質が低下する可能性がある。持続的な作物生産には持続的土壤利用が不可欠であり、そのための評価法および実践法を確立していく必要がある。そこで、典型的な化学物質ストレスとして土壤燻蒸剤、および、風乾-湿潤や凍結-融解といった非人為ストレスを取り上げ、これら環境変化が土壤微生物に及ぼす影響について包括的に評価している。

モデル土壤として、名古屋大学農学部付属農場より採取した化学肥料のみを1988年より連用した土壤（化肥区）と化学肥料および厩肥(40t/ha/y)を連用した土壤（慣行区）の2土壤を用い比較した。風乾-湿潤を繰り返しても、慣行区ではバイオマスはほとんど減少しなかったのに対して、化肥区ではバイオマスが減少する傾向にあった。また、微生物群集の基質資化能をバイオログプレートを用いて評価したところ、両土壤とも風乾直後は基質資化能が顕著に低下し、化肥区では再湿潤後も低下したままであったが、慣行区では元のレベルに回復した。両土壤に対して凍結-融解処理を繰り返した場合にも、慣行区に比べ化肥区でよりバイオマスが減少した。また、キチン分解能は慣行区では凍結-融解の影響を受けなかったのに対し、化肥区では初期には減少し、中期以降増加した。つまり化肥区ではキチン分解能が変化した。以上の結果は、有機物を長期にわたって連用した土壤では乾燥-湿潤、凍結-融解のストレスに対するレジスタンスが高く、またレジリエンスも高くなる可能性を示唆している。

両土壤をクロルピクリン、キルパーで消毒し、微生物機能としてキチンやグルコースをモデル有機物とした分解能、またPCR-DGGE法を用いたそれらの分解に関与する微生物群集を評価した。キチン分解能は両土壤とも消毒により消失し、12週間の培養期間中には回復しなかった。一方、グルコース分解能は消毒2週間目までは抑制効果が見られたが、4週間以降回復した。これらの結果に化肥区、慣行区間で顕著な違いは見られなかった。ついで、消毒直後および8週間後の土壤からDNAを抽出し18S rDNAを標的にPCR-DGGEを行ったところ、消毒直後では、分解に関与すると思われる濃いバンドが消毒により著しく減少した。つまり、非消毒区では多くの微生物がグルコー

ス分解に関与しているが、消毒区では生き残ったわずかな微生物のみがその分解に関与することがわかった。したがって、消毒により死滅した微生物の機能の中に他の微生物で代替できないものがあれば、その機能はキチン分解能のように失われることになる。このとき、バンド数の減少は化肥区でより顕著であったため、消毒による多様性の減少は化肥区でより顕著であると推察された。グルコース分解能が見かけ上完全に回復した消毒 8 週間後でも、その傾向は同じで、消毒区ではバンド数が極端に少なかった。この結果は、グルコース分解能という機能は完全に回復していても、それに関与する微生物群集の中身が異なっていることを意味する。したがって、こうした微生物群集の変化が他の何らかの土壤機能の変化をもたらす可能性がある。

これらの結果は、化肥区、慣行区間で顕著な違いはないものの、有機物施用によりストレスに対する土壤の有するレジスタンス、レジリエンスが高まる可能性が示唆された。こうしたストレスに対する土壤のホメオスタシスは今後の持続的土壤利用の観点から重要である。

3. 有機性廃棄物を利用した土壤病害抑制

世界中でどれだけ被害があるのかを推定することはきわめて困難であるが、貴重な食糧の一部は土壤中に生育する植物病原菌によって引き起こされる土壤病害の被害を受けている。日本において、殺菌剤・燻蒸剤の売上金額は年間 1000 億円前後である。こうした薬剤施用では恐らく完全には防除できないと想定されることから、病害による作物被害は、防除効率が 99%として 10 億円、90%として 100 億円程度が想像される。また、1000 億円以上の被害が予想されなければ、1000 億円もの農薬を使わないであろうから、潜在的な被害金額は 1000 億円をはるかに超える。したがって、(土壤)病害の防除は食糧生産に確実に寄与する。一方、有機性(生物系)廃棄物処理も重要な課題である。農業、食品産業、一般家庭などから年間約 2 億 8 千万トンもの生物系廃棄物が排出され、これらの有効な循環利用法の確立が望まれている。有機物施用は土壤の団粒化を促進し土壤の物理性を、各種養分の供給源となることから化学性を、微生物の活性を高め・多様性を豊かにすることで生物性を改善するなど、持続的な農業生産には欠くことの出来ないものと一般的に考えられている。したがって、土壤病害を有効に軽減できる有機物施用法が見つかれば、土壤への有機物還元の際しての大きなインセンティブとなる。そこで、モデル病害として、*Ralstonia solanacearum* によるトマト青枯病、*Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* によるトマト根腐萎凋病などを取り上げ、それら病害の出にくい土壤について研究を行っている。

名古屋大学農学部付属農場厩肥(400t/ha/y)連用土壤(厩肥区)は、トマト青枯病に対する発病抑止土壤である。青枯病菌は厩肥区において速やかに死滅することから、厩肥区は病原菌に対して抑止的で、その結果発病も抑制されると考えられる。有機物含量が少なく、酸性の強い黄色土に厩肥を多量に長期にわたって施用すると、土壤 pH が

中性に矯正され、保水性が高まる。これらの性質は青枯病菌の生存を高め、発病を助長する方向に働くが、実際はきわめて病害が出にくい土壌となった。つまり、病原菌の生育を良好にするこうした土壌環境へのマイナス要因以上に、土壌中に生育する微生物の働きを高めたと言える。現在、既肥区土壌で栽培したトマト根から各種の微生物を分離し、青枯病抑制効果を担う菌株のスクリーニングを行っている。

既肥区はトマト青枯病が軽減される点では望ましいが、年間 400 トンが施用されるため、硝酸溶脱、亜酸化窒素発生といった環境負荷の問題が生じる。そこで、連用ではなく 1 回の施用で、しかもできる限り少量で青枯病抑制効果を有するという観点から有機物のスクリーニングを行っている。各種堆肥、炭化物、有機性廃棄物をスクリーニングしたところ、多くの有機物では青枯病促進効果はないが、発病抑制効果も認められなかった。その中で、ある種の牛糞堆肥と鶏糞堆肥、生ゴミ炭化物には繰り返しのポット試験、および、圃場試験において発病抑制効果が認められた。また、メタン発酵残液、廃糖蜜、コーヒー粕炭化物にもポットレベルではあるが青枯病抑制効果が認められた。これらの有機物の発病抑制メカニズムは、いずれも研究途中にあり核心まで辿り着いていないが、化学性が関与する場合（殺菌土壌でも効果がある）と、生物性で説明できる（殺菌土壌で効果がなくなる）場合とがあり、生物性が主要な要因のケースが多い。また、生物性と言っても、一般微生物相の活性化が関与していたり、特定の微生物(群)であったりするなど、抑制資材それぞれに固有のメカニズムがあるようである。これまでの所、物理性の評価は行っていないが、病原菌の生残性や一般微生物の活性に影響を及ぼすという点で、物理性の影響も十分に考えられる。有機物施用は、土壌の物理・化学・生物性いずれにも影響を及ぼすことから、これらを総合的に評価する必要がある。

名古屋大学農学部付属農場内コーヒー粕堆肥連用土壌はトマト根腐萎凋病およびトマト萎凋病に対して抑制的である。これには、コーヒー粕堆肥の連用によって微生物が活性化され、土壌静菌作用が強くなったことが関与する。この高まった静菌作用には、特定の糸状菌が関与していることがわかってきたが、詳細は現在研究中である。

有機性廃棄物ではないが、未利用資源である火山灰を固結した軽石にも大きな可能性がある。養液栽培では土壌病害の被害が懸念されるため、水耕液を掛け流しにする、あるいは、水耕液をさまざまな方法で殺菌するなどして防除している。軽石を培地に養液栽培した場合にも、確かに未使用の軽石ではトマト青枯病菌を接種すると高い発病率を示したが、6年以上連作した軽石培地では顕著に発病が抑制されることがわかった。また、この連作軽石は青枯病だけでなく、トマト萎凋病や *Pythium* による苗立枯病に対しても抑制的であった。つまり、きわめてバイオマスが小さい未使用軽石を繰り返し栽培することでバイオマスが蓄積し、微生物活性が高くなる。そうなると、各種の土壌病害に対して抑止的となることが示唆された。また、青枯病に助長的な未使用軽石でも、連作軽石から分離した拮抗菌を接種する、あるいは、Ca 資材を添加するこ

とで発病抑止的になることが室内レベルではあるが明らかになった。従って、軽石培地を用いることで土壤病害に強い養液栽培システムが確立できる可能性がある。

以上の例から、有機性廃棄物の中には土壤病害を抑制する資材があることを示した。土壤病害抑制能以外にも、有機物は各種の植物養分供給源であり、また、団粒形成促進など物理性の改善効果も期待できる。一方、通常の窒素肥料に加えて施用する場合には、硝酸溶脱や亜酸化窒素発生など環境負荷の側面も併せ持つ。さらに、有機性廃棄物はその排出源から施用する圃場までの輸送コストも大きな課題となる。今後、総合的な評価がますます重要となる。

4. 有機性廃棄物施用の水田土壤における窒素固定能に及ぼす影響

窒素は最も重要な化学肥料である。しかし、地球規模では全化学肥料使用量以上に生物的に窒素が固定されていることからわかるように、窒素供給の点で土壤微生物の働きは大きい。特に、水田では1ha当たり数10kg~100kgの窒素が生物的に固定されている。こうした微生物の窒素固定能を高めることは、窒素肥料の削減という意味で、また、有機性廃棄物を利用することができれば、廃棄物利用という二重の点でメリットがある。そこで、モデル水田を作成し、各種有機物を添加し、アセチレン還元法により経時的に窒素固定能を測定した。これまで言われているように稲ワラの添加が最も窒素固定能を促進した。一方、生ゴミ堆肥や生ゴミ炭化物、牛糞堆肥の施用は、稲ワラほど窒素固定能を促進せず、無添加の場合と同程度あるいはやや低くなった。化学肥料はその添加量とともに窒素固定能を抑制し、60kg以上の施用ではほとんど窒素固定能は見られなくなった。生ゴミ堆肥は無機態窒素として60kgを含むにもかかわらず、窒素固定能が認められたことは興味深い、この原因として施用直後はいずれも無機態窒素含量が高いため、窒素固定能を抑制するが、生ゴミ堆肥の場合には、その有機物成分の分解とともに窒素が微生物バイオマスへと取り込まれ、水田における無機態窒素量が見かけ上減少し、窒素固定能が発現されるようになったと想像される。

いずれの有機物も窒素を含むため、これらがやがて無機化され窒素源となるばかりでなく、微生物バイオマスを増加させることで潜在的な養分供給能を向上させる。化学肥料は植物の栄養源としかならないが、有機物は窒素固定能を促進し窒素供給能を高めるだけでなく、バイオマスの増加、土壤構造の改善など多様な機能を有する。

現在、水田土壤において除草剤施用は必要不可欠である。室内実験で、除草剤の窒素固定能に及ぼす影響を検討した。供試した水田では、窒素固定は主にラン藻によるが、ベンスルフロンメチルおよび2,4-Dの施用により藻類の生育が顕著に抑制され、その結果、窒素固定能も大きく抑制された。すなわち、除草剤を施用することで、水田では数10kgのレベルで期待される窒素固定が減少する可能性がある。室内実験のため、田面水の流亡がない、稲体がないなど、施用された除草剤の影響が長期にわたって現れると推察される。従って、実際の水田圃場でどの程度こうした除草剤施用による窒

素固定能の低下が見られるかは、今後の課題である。

5. 今後の展望

持続型社会の構築が望まれるが、それには持続的な作物生産、土壌利用が必要不可欠である。また、同時に有機性廃棄物の有効利用、環境負荷の軽減も必須である。上記事例は、有機物を上手に利用することで、ホメオスタシス、病害抑制能、窒素固定能の向上が期待できる可能性を示した。室内レベルでは確実に効果があったが、実際に圃場レベルでこうした現象が再現されるかどうかは現時点では不明である。また、これらの潜在的な実践法を実際に現場に普及させることができるかどうかには、今後の総合的な評価が必要である。特に、経済性の面からの評価が必要不可欠であるが、現実には上述の土壌機能を経済性から評価した報告例はない。持続的な循環型農業を確立する上で、土壌微生物の有するさまざまな生態系機能を正當に評価し、実際の現場に役立てていくことが重要である。

6. 引用文献

- 豊田剛己：有機性廃棄物を利用した土壌病害防除。再生と利用、106、(2004) (印刷中)
- Yanai, Y., Toyota, K. and Okazaki, M.: Effect of a successive soil freeze-thaw treatment on soil microbial biomass and organic matter decomposition potential of soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, (in press)
- 根路銘美穂・豊田剛己・Tajul MD Islam・西島孝紀・松岡智生・佐藤一郎・山口安幸：生ゴミ炭化物の土壌施用によるトマト青枯病抑制。土と微生物、59(1)、(2005) (印刷中)
- 松岡智生・豊田剛己・佐藤一郎・増田和成・黒田哲生：連作軽石のトマト青枯病抑制に關与する微生物の特定。土と微生物、59(1)、(2005) (印刷中)
- Wada, S. and Toyota, K.: Effect of organic amendment on the resistance and resilience of fumigated soils. Eurosoil2004, Freiburg, Germany (2004)
- Islam, MD T. and Toyota, K.: Susceptibility of soils with or without repeated application of farmyard manure to bacterial wilt of tomato caused by *Ralstonia solanacearum*. 土と微生物、58, 33-42 (2004)
- Islam, MD T. and Toyota, K.: Suppression of bacterial wilt of tomato by *Ralstonia solanacearum* by incorporation of composts in soil and possible mechanisms. *Microbes and Environments*, 19(1), 53-60 (2004)
- 松岡智生・豊田剛己・増田和成・黒田哲生：連作軽石のトマト青枯病抑制培地としての抑止力とその抑制メカニズム。土と微生物、58, 25-32 (2004)
- 浜中康弘・豊田剛己・池田恭子：コーヒー粕堆肥連用土壌のトマト根腐萎ちよう抑制機構に關与する微生物群集の推定。2003 年度日本土壌微生物学会講演要旨 (2003)
- 佐伯政男・豊田剛己：除草剤ベンスルフロンメチルのモデル水田土壌における窒素固定能に及ぼす影響。日本土壌肥料学雑誌、74(6)、(2003)

落ち葉の手紙へ返信
陸上生態系の機能と土壤動物の多様性

金子信博

横浜国立大学大学院環境情報研究院
土壤生態学研究室

要約： 土壤動物は一般に落ち葉を食べる分解者とみなされてきた。実際には落ち葉食の土壤動物は少なく、微生物を何らかの形で利用している場合が多い。有機物を分解するのは微生物であるが、土壤動物は微生物を直接摂食したり、微生物の餌資源の量や生息環境を間接的に変えたりすることで、微生物の活動を大きく左右している。これらはそれぞれ、微生物食者、落葉変換者、そして生態系改変者という生態機能群にまとめることができる。土壤動物は微生物のバイオマスの10分の1程度しかないが、動物を操作することで植物の生長が数倍よくなることが実験的に明らかとなっている。機能群が多様であることは、植物の一次生産を増加させ、乾燥などの攪乱に対して強い系を作り出している。土壤生態系の理解には多様性情報（分類、生活史）の整理が欠かせない。

はじめに

生物多様性の減少は、生態系にどのような影響を与えるのだろうか？このような問いに答えるために、世界中で実験室や野外操作実験、野外における多様性の傾度の観察などの多くの研究が行われてきた。

陸上生態系での研究でわかってきたことは、植物の種多様性を増すと、自然群落の一次生産量が増加するということであつた。多様性を増すことは、さまざまな種が異なる光や養分、水分の利用特性を持つことによって資源の利用効率が増す（相補説）ことや、環境条件の変化に対応して適した種が異なることで長期にわたって安定した生産が可能となる（保険仮説）と考えられている。

土壤動物の種多様性は陸上生態系の中でどのような意味を持つのだろうか？森林ではさまざまな落ち葉が地面に落ち、やがて分解されていく。落ち葉の種の違いや種類の多さは、土壤動物にとってどんな意味があるのだろうか？本講演では森林での多様性－機能研究を例に、植物と土壤動物の種多様性の関係を説明する。

土壤における土壤動物の多様性

自然群落では施肥や耕起が行われないので、植物は土壤の持つ肥沃度や物理構造によってその成長が制限されている。植物に必要な無機塩類の多くは有機

物の分解によって利用可能となり、植物と土壌との間を循環している。有機物の分解は微生物のはたらきによるが、土壌には微生物とほぼ同じサイズの原生動物から、小型の節足動物、人の目にも見えるミミズやアリなどの無脊椎動物、そしてモグラなどの脊椎動物が生息している。また、ミミズやモグラは鳥や獣の餌となり、植物を介した経路とは別に、食物連鎖によって土壌から地上へ大きな物質の流れが存在している。これらの動物は同じ面積の地上部の動物に匹敵する種多様性と、およそ10倍のバイオマスを達成している。

有機物の分解に重点を置いて土壌動物の機能を分けると図1のようになる。従来、土壌動物は落葉を食べるものと言われてきたが、むしろ微生物を餌とするものの方が多い。微生物だけを食べる動物は原生動物や線虫、一部のトビムシ・ダニなどの節足動物である。シロアリやヤスデのような節足動物とミミズには落葉を直接食べるものが多いが、消化効率はまだよくなく、排泄された糞では有機物が粉碎されたり、水分条件などが変化するので微生物による分解が促進されたりする。一部のミミズやヤスデは土壌を直接食べる。シロアリやアリの巣やミミズの坑道、糞塊などは土壌構造を大きく改変し、その影響は長く残る。このような機能群を生態系改変者と呼んでいる(金子, 2004)。

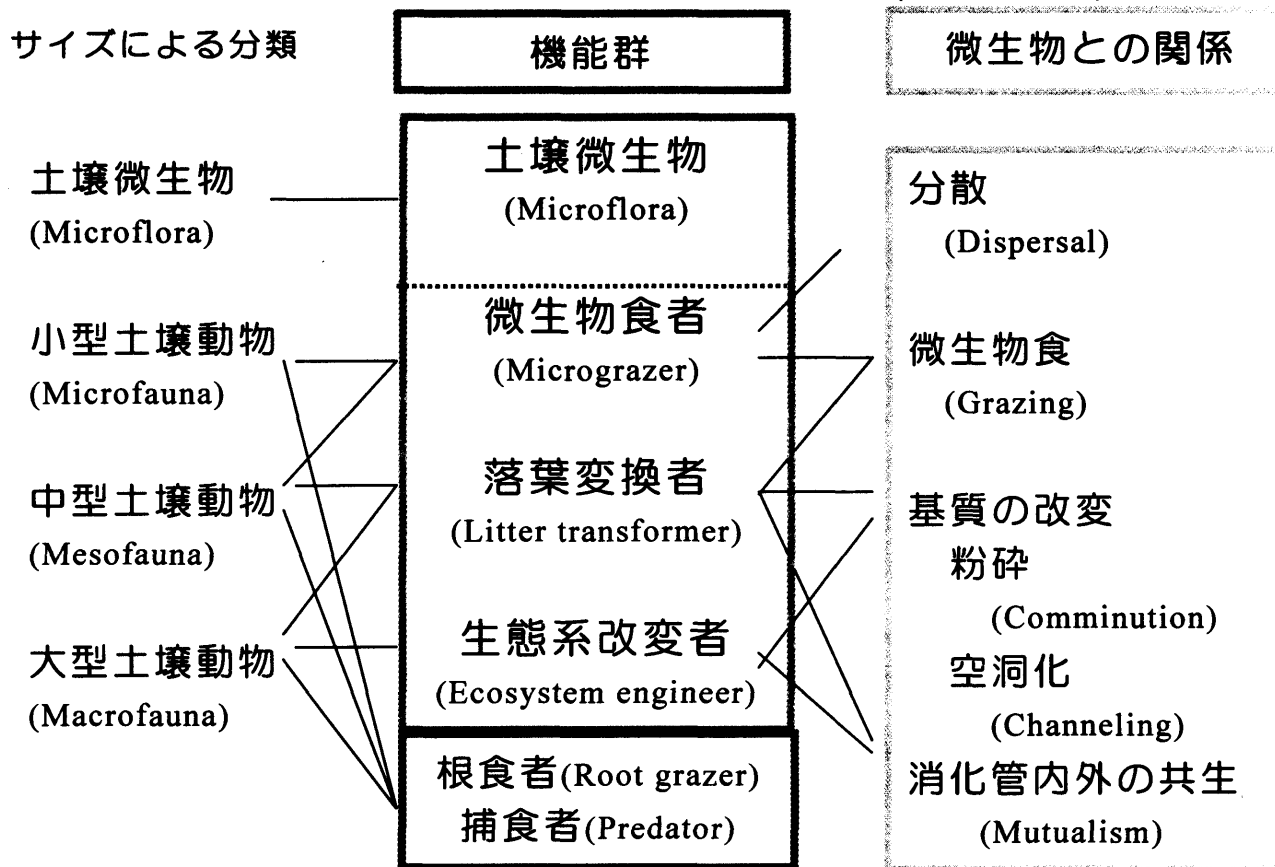


図1 土壌動物のサイズ、機能による分類と微生物との関係(金子・伊藤, 2004)

土壌動物は土壌を移動することにより微生物の分散を助けている。また動物の消化管はシロアリの消化管でよく知られているルーメンを構成したり、分解や窒素固定などが行われたりして、土壌とは異なった特異の環境となっている。さらに、一度糞として排泄された有機物は微生物による分解が進み、ふたたび動物によって食べられる場合もある。このように、土壌では土壌動物が微生物活性を変化させることで、分解が進行していて、動物と微生物に緩やかな共生系を形成している。

多様性と機能

土壌の生態系機能として分解速度や窒素などの無機化速度を考えると、土壌動物は微生物による生態系機能を大きく増進している。一般に動物による窒素循環の寄与率は3割程度と言われているが、フィンランド・ユバスキュラ大学の研究グループは土壌動物群集の多様性を操作する実験により、バイオマスで微生物の10分の1にすぎない土壌動物（線虫、小型節足動物）が、カンバの成長を数倍高めることを明らかにした(Setälä ら 1998)。さらに種の多様性よりも機能群の多様性が重要であり、機能群中の多様性は動物、腐生菌ともに重要でなかった。

落葉の多様性を増すと、分解速度が増す例が知られている。落葉広葉樹林でコナラ、アカマツ、チュウゴクザサを混合して分解させると、単独での分解よりも土壌節足動物の個体数が増え、分解速度が相乗的に速くなった(Kaneko & Salamanca, 1999)。落葉の多様性と分解系の応答は現在、盛んに研究されており、植物の多様性が分解系の反応を通して正のフィードバックをもたらす可能性が論議されている（長谷川 2004）。

日本の大型ミミズはヨーロッパで優占的なツリミミズ科ではなく、フトミミズ科が優占しているが、ヨーロッパとよく似た生活型（表層性、地中性、表層採食地中性）で群集を捉えることができた(Uchida ら 2004)。ミミズの活動は土壌構造を変え、mull土壌の形成に大きく寄与している(Ponge, 2003)。

研究の現状

日本の土壌動物分類学は世界的にみてもかなり進んでいるが、依然として研究者がほとんどいない分類群もある。とくに生態学的に重要なミミズ類は通常眼にする大型ミミズ類も、成虫で数mmのヒメミミズ類も大幅に研究が遅れている。また、分類学的、生物地理的情報の整理、利用方法の改善がなされておらず、インターネット上で利用できるデータベースの整備が必要である。現在はアリ類についてはすぐれたデータベースが利用できる。ササラダニについては公開予定である（一澤ら, 2003）。

一方、土壌動物の生活史に関する研究はトビムシやササラダニを除くと極めて少ない。また、土壌の機能研究では微生物、動物を無視したり、ブラックボックスとしたりする場合が多いが、ヤスデやミミズの窒素の無機化への寄与率が野外で測定されている。土壌動物を土壌汚染や環境変動の生物指標とする試みが多くなされているが、日本では指標する対象が十分に測定されていない。

今後の展望

環境変動に対する土壌系の応答をとらえるためには微生物だけでなく、土壌動物の生物地理学的、群集生態学的、生態系生態学的研究が必要である。さらに植物の動態と同時に土壌系の変化を考えていかななくてはならない。土壌中の生物間相互作用は個々の生物の単なる反応の総和では理解できない。土壌に生息する生物すべてを扱うことは事実上不可能であるが、キープロセスに関与する生物を正しく同定して相互作用を解析することはできるだろう。

豊かな分類学と生活史の知識を基盤として操作実験を行うことにより、落ち葉の手紙に書かれたメッセージを読み解くことができる。

引用文献

- 長谷川元洋 (2004) 植物の多様性が分解者およびその機能に与える影響. 日本生態学会誌 54 (印刷中)
- 一澤圭・伊藤雅道・金子信博・島野智之・青木淳一 (2003) 日本産ササラダニ類データベース(ORIDAS)の構築. *Edaphologia* 73: 45-57.
- 金子信博・伊藤雅道 (2004) 土壌動物の生物多様性と生態系機能. 日本生態学会誌 54 (印刷中)
- Kaneko, N. Salamanca, E F. (1999) Mixed leaf litter effects on decomposition rates and soil microarthropod communities in an oak-pine stand in Japan. *Ecological Research* 14: 131-138.
- 日本産アリ類画像データベース <http://ant.edb.miyakyo-u.ac.jp/J/index.html>
- Ponge, J -F. (2003) Humus forms in terrestrial ecosystems: a framework to biodiversity. *Soil Biol. Biochem.* 35: 935-945.
- Setälä, H. Laakso, J. Mikola, J. Huhta, V. (1998) Functional diversity of decomposer organisms in relation to primary production. *Applied Soil Ecology* 9: 25-31.
- Uchida, T. Kaneko, N. Ito, M T. Futagami, K. Sasaki, K. Sugimoto, A. (2004) Analysis of the feeding ecology of earthworms (Megascolecidae) in Japanese forests using gut content fractionation and $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ stable isotope natural abundances. *Applied Soil Ecology* 2:153-163.

持続的農業生産を支える地域資源循環

藤原俊六郎（神奈川県農業総合研究所）

要 約

現在の農耕地には養分の蓄積傾向がみられるが、この要因に有機物の施用がある。有機物施用は、地力維持に不可欠であるが、多量施用によりリン酸やカリ栽培の蓄積を招いている。他方、有機性廃棄物の中には、成分に特徴を持ったものがある。有機性廃棄物を組み合わせて作物や土壌養分の特性に適した成分組成をもった有機物を作り上げ、施用にともなう養分蓄積を防止することが大切である。そのためには地域循環の発想による、身近な有機性廃棄物の堆肥化・肥料化利用の促進が必要である。

はじめに

今、農業には、「食の安全安心」、「地産地消」、「環境保全型農業」の推進が強く期待されている。これらの中で土壌肥料分野に期待される側面として、「有機物の活用技術」、「循環機能を活用した技術」が求められており、有機資源を有効活用する資源循環による持続的農業生産技術の確立が重要になっている。

農業生産における有機物の活用に関する研究には、古くから多くの事例がある。しかし、「堆肥ならなんでも役に立つ」、「堆肥は入れるほど土が良くなる」などの誤った考えがあり、農耕地の悪化要因になっている現状もある。また、身近に発生する成分的に優れた未利用有機物が「廃棄物」として処分されている現実もある。

ここでは、農業生産の基盤である農耕地土壌の現状を考察したうえで、持続的農業生産を営むための地域資源循環のあり方を考えてみたい。

1. 今、農耕地土壌の実態は

(1) 養分欠乏の時代から過剰の時代へ

作物生産安定のための土壌診断が、全国の農業試験場や農協、民間の機関で行われている。土壌診断に基づく施肥改良は、かつては不足する成分をどう補うかが基本であったが、現在では交換性塩基類のバランスが重視された診断が行われている。

現在、全国的に養分の過剰状態とアンバランスが指摘されている。神奈川県における土壌養分の変化を表1に示したが、年々、リン酸、カリの蓄積傾向が認められる。土壌養分の蓄積は、多肥、連作、作物残渣のすき込みなどがあるが、土づくりのために用いられる、堆肥の連用もこの一因になっている。

表1 神奈川県内の土壌養分の年度推移

(神奈川県JA土壌診断センター結果まとめ、2001、藤原)

地目 (作目)	調査 年度	pH	EC mS	NO ₃ -N mg	Truog P ₂ O ₅	交換性塩基(mg)			CEC meq	飽和度 %
						CaO	MgO	K ₂ O		
水田 (水稲)	86	6.3	0.14		8.6	527	130	22	31	82.0
	90	5.9	0.12		11.2	429	90	25	30	67.8
	95	6.1	0.17		10.3	467	114	32	30	75.7
	00	6.2	0.10		13.6	538	126	35	32	81.5
露地畑 (野菜)	86	5.8	0.15	2.2	32.6	310	45	62	22	63.2
	90	5.7	0.19	3.1	37.1	430	62	72	29	66.0
	95	5.7	0.22	4.3	40.9	394	61	84	28	64.9
	00	6.0	0.20	3.0	60.7	424	70	96	28	73.6
施設畑 (野菜)	86	5.8	0.92	16.7	92.6	555	118	149	35	82.8
	90	6.0	0.84	21.3	93.4	629	134	140	36	87.3
	95	6.1	0.74	35.3	86.8	596	133	129	35	85.8
	00	6.2	0.70	35.6	129.2	627	145	105	36	89.2

(2) 有機物連用による養分の蓄積効果

有機物の施用により土壌環境が改善されることはよく知られている。各県の有機物連用圃場試験を農林水産省がとめた結果においても、有機物の連用により、土壌孔隙が増え土が軟らかくなるとともに、すべての可給態養分が増加するとしている。

一般に、畑土壌では堆肥の施用量は20t/haが適切な基準量である(家壽多, 2001)が、現実には30t以上施用されていることが多い。有機物は緩効的な肥料効果を示すため、急激な作物障害はでにくい、土壌中には養分蓄積が徐々に進行する。その事例を表2に示した。

表2 堆肥施用量の異なるハウスねぎ圃場の土壌診断結果

(成分は乾土100gあたりのmg, S県I普及C, 2003年)

堆肥の量	調査数	pH	EC	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
普通施用	30件	6.7	0.56	213mg	64mg	372mg	53mg
多量施用	5件	5.9	1.12	331	123	529	84
診断基準		6-6.5	0.2-0.5	10-100	10-30	100-300	15-40

(3) 有機物の過剰施用による障害

有機物施用は地力増進には不可欠であるが、過剰施用は、地下水の水質汚染の原因にもなるだけでなく、土壌養分のアンバランスを招き作物収量は不安定になる。過剰施用による土壌環境の悪化については、次のことが考えられる。

① 養分集積による障害

土壌養分が集積して起こるのは、ECの上昇による障害である。堆肥や肥料に含まれ

るアニオンやカチオンの集積がECを高め、根の伸長を阻害する。また、イチゴの育苗時に用いる堆肥からの塩素の害もあるとされている。さらに、土壤に蓄積されない過剰な養分は、徐々に溶脱し、地下水を汚染する。

②交換性塩基のバランスによる障害

家畜ふんには、リン酸やカリが多く含まれているため、連年施用によりこれらの成分が蓄積し、塩基バランスを乱す。カリ過剰による苦土欠乏症の発生はよく知られているが、リン酸過剰によるねこぶ病の助長(後藤, 2003)などの報告もある。

③微量元素の欠乏

有機物からの微量元素供給は作物生育に有益に働くことが多いが、有機物の多量施用により、微生物によるマンガンの不溶化がおこり、作物がマンガン欠乏を生じる事例(渡辺, 2003)もある。

④乾燥害

物理性の良い土壤に粗大有機物を過剰施用することにより、土壤の孔隙が大きくなることにより土壤の毛管が切断され、干ばつ被害を受けやすくなる。

2. 持続的農業生産のための土壤管理技術

(1) 有機物の成分を考慮した施肥

有機物施用による土壤養分の過剰蓄積を防ぐためには、農耕地の土壤の状態を把握したうえで、有機物の種類や量を考慮することが必要である。地力窒素は、現在のところ容易に測定することはできないが、地力窒素の予測をしながら施肥を考えることが、持続的農業生産のためには必要である。

一般的な牛ふん堆肥(含水率50%)の現物成分を窒素1.1%、リン酸1.4%、カリ1.5%、肥効率を窒素20%、リン酸60%、カリ90%とすると、堆肥1t中の有効成分量は窒素2.2kg、リン酸8.4kg、カリ13.5kgにも及ぶ。従来は、この堆肥の肥料成分は計算せず、肥料の成分のみを施肥設計で考慮されていたが、堆肥からの肥料成分の持ち込み量は大きな値となる。これからは、基肥の施肥設計に、堆肥の成分量を含める必要がある。

(2) 多様な有機物の混合による養分調整堆肥生産

有機物は同じ種類のものを何年にもわたって連用することが多いので、単一資材の連用により土壤中の化学成分だけでなく微生物相も固定化する可能性が考えられる。その改善のためにも、多種類の資材の混合や、作物によって異なる資材を施用することも必要である。

作物は、種類により養分吸収特性が異なる。それは、肥料成分の必要量だけではなく、イモ類のように生育初期に養分を必要とする作物や、根菜類のように生育後期に

養分を必要とする作物などの違いもある。

生物系廃棄物は種類により成分特性が異なる(表3)。性格の異なる資材の特徴を考慮すれば、堆肥化が容易に行われる条件や、作物の養分吸収特性に適合した成分となる組み合わせが可能になる。たとえば、メロン用に緩効的な牛ふんと速効的な油粕を組み合わせる(郡司掛, 1996)など、異なる資材を組み合わせることによって、肥料効果の発現性や養分バランスに優れた堆肥(有機肥料)を製造することも可能になる。

表3 各種有機質資材の特性分類(藤原)

資材名	水分	窒素	リン酸	カリ	C/N比	備考
豚ふん	多	多	多	中	小	多水分・多養分資材
鶏ふん	多	多	多	中	小	
おから	多	多	少	少	小	
生ごみ	多	中	少	少	小	多水分・中養分資材
牛ふん	多	中	中	中	中	
野菜屑	多	中	少	多	中	
剪定屑	中	中	少	中	中	低水分・低養分資材
茶粕	中	中	少	少	中	
コーヒー粕	中	少	少	少	中	
稲わら	少	少	少	多	中	水分調節用資材
モミガラ	少	少	少	少	大	
木屑	少	少	少	少	大	
バーク	少	少	少	少	大	

(3) 地域有機物の使用による地域循環の促進

我が国に輸入される食料や飼料は莫大な量であり、家畜ふん尿や食品廃棄物のすべてを農地還元することはできない。しかし、地域から排出される有機物から地域農産物に適したを選択して使用することは持続的農業生産の基礎であるといえる。そのためには、次の対応が必要である。

①資源情報の提供： 農業者は近くにどのような資源があるか知らず、堆肥生産者は利用者がどこにいるか知らないことが多い。これら需給関係の組織だった情報システム構築が必要である。

②資材の組み合わせ技術開発： 家畜ふんは畜種により成分が異なり、食品系廃棄物は肥料成分に富むが、成分的にばらつきが大きい欠点もある。各種の資材を混合し、品質的に優れた資材に変えることが必要である。

③作物に適した有機物を製造する二次発酵施設： 廃棄物の発生源で一次処理して広域流通が可能な資材に変え、農業者の身近においてそれらを用途に応じて混合し、二次発酵することにより農業生産に適した資材に変える施設が必要である。

3. 地域循環の研究事例

持続的農業生産活動を守るための地域循環システムの作成について中央農業総合研究センターが中核機関となり、神奈川県農業総合研究所、三重県科学技術振興センター、静岡大学工学部、ヤンマー株式会社、株式会社デジアイズを共同機関として、農林水産省のプロジェクト研究である「先端技術を活用した農林水産高度化事業」を利用して取り組んでいる共同研究「生ごみ処理物を利用した高品質融合コンポスト製造システムの開発」の内容と成果の一部を紹介する。

(1) 地域の有機性資源をどう利用するか

横須賀市・逗子市・三浦市・葉山町を併せた三浦地域4市町における生ごみ等有機性廃棄物を地域の家畜ふんや剪定屑などと組合せて熟成する方法を検討している。三浦地域では、生ごみ処理物と地域で排出される有機性廃棄物を利用した高品質融合堆肥の農地利用を新たなシナリオとして想定することにより、地域内の各種有機性廃棄物の循環利用になるとともに、地域の作物に適した堆肥製造の可能性を期待している。

(2) 生ごみ処理物を利用した融合堆肥製造技術の開発

生ごみ処理物は、脂質などの易分解性有機物の含量が多く、容水量が少ないため、堆肥化時にpHが低下し易く粗脂肪分の分解率が低いが、アンモニアガス通気によりpHを制御すると、粗脂肪分の分解が促進される。さらに、混合する資材に家畜ふん処理物やおから、米ぬか等を添加することで、肥料成分バランスの改善が可能であった。

(3) 生ごみ処理物を利用した融合堆肥の品質評価法の開発

堆肥製造過程の有機物分解を直接担っている微生物は、原料資材の特性や分解過程の段階によって異なる微生物(群)が作用している。それをPCR-RFLP法を利用して解析し、それを指標とする手法の開発にも取り組んでいる。

その結果、堆肥化開始直後にRFLPパターンが大きく変化し、その後再び僅かにパターンが変化した後ほぼ一定となった。また、堆肥中の有機物の分解経過は粗タンパク、粗脂肪、粗繊維、糖質の間で異なり、その経過をRFLPパターンの変化によって把握できる可能性が示された。

(4) 堆肥製造装置の開発

この共同研究では、生ごみ処理物と地域で発生する多様な有機性資源を組合せた融合堆肥の製造プラントを開発・試作した。

堆肥製造装置としては、カセット方式の熟成槽において 通気性・攪拌性・蓄熱性・保湿性を考慮して熟成貯留時は縦置き、攪拌時には横置きキルン方式の併用が可能な基本構造とし、2重壁・4分割構造を有する発酵槽への給気・排気方向切り替え配管を持つ構造をベースにした。また、pHの制御法として、熟成槽からの排気に含まれ

るアンモニアをフィードバックする手法を開発した。

(5) LCAによるシステム評価

該当地域において有機性資源の新たな農業利用シナリオを導入することによって、却って環境に負荷がかかることがあってはならない。そこで、三浦地域をモデルとした有機性資源の処理・活用サブシステムを想定し、LCAを用いた評価によって、対象地域により適したシステムの構築を目指している。

具体的には、各種のサブシステムを想定し、サブシステムの各段階におけるエネルギー、原料・素材などのインプットと主製品、副製品、中間製品、廃棄物、環境負荷物質（大気：CO₂、CH₄、N₂O、SO_x、水質：全リン、全窒素）などのアウトプットに関するインベントリデータを収集して、現状と生ごみの堆肥利用を導入した場合について比較している。

4. 今後の展望

持続的生産活動のためには有機物の施用は欠かせない。持続的農業生産のためには、栽培作物や土壌養分の実態に適した成分組成をもった有機物を作り上げ、有機物施用にともなう養分蓄積を防止することが大切である。しかし、実施の栽培に当たっては、有機物のもつ肥料効果の評価や土壌中での蓄積効果など解決すべき課題は多い。他方、家畜ふんを含む有機性廃棄物の有効活用も強く求められており、それら素材を組み合わせることで作物特性に合わせたものに加工する技術開発も欠かせない。

食料や飼料の大部分を海外に依存している我が国の状況を考えれば、完全なる循環社会の確立は望めないが、環境負荷を軽減しながら持続的農業生産を行うためには、可能な限りの地域循環の発想は欠かせない。有機性廃棄物の利用については、堆肥化以外に、良質肥料を作る（後藤, 2004）試みなど多様なシナリオが考えられるが、いかなるシナリオの導入にあたって、環境負荷を増大させるものであってはならない。環境への影響は堆肥原料となる有機性廃棄物の収集、堆肥製造と農地への輸送・施用の各段階において生じ、しかも多方面にわたるため、それらを総合的にLCA等で評価し、環境面を考慮した有機物活用システムを確立する必要がある。

5. 文 献

- (1) 渡辺和彦：季刊肥料, 96, p15～29 (2003)
- (2) 郡司掛則昭：熊本農研センター研究報告, No. 5, p46～55 (1996)
- (3) 家壽多正樹ら：千葉県農氏試研報, 42, p43 (2001)
- (4) 後藤逸男：農家のための土壌学 [四訂版], p131 (2003)

土壌生態系からの温室効果ガス放出

農業環境技術研究所

八木一行

要約

土壌生態系での物質循環により、農耕地は全体として、温室効果ガスである二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の放出源となり、地球温暖化に影響を及ぼしていると考えられる。特に、水田からのメタン発生と施肥土壌からの亜酸化窒素発生は、それぞれの温室効果ガスの主要な発生源である。この問題に対し、これらのガスの発生・吸収のメカニズムを解明し、発生量をより正確に評価し、さらに地球温暖化を抑制するための発生抑制技術を開発する努力が進められている。これまでの研究の蓄積から、詳細な発生・吸収のメカニズムが明らかにされ、発生抑制技術としてメタンに対しては水管理や有機物管理が、亜酸化窒素に対しては施肥管理が有効であることが示されている。今後、広域での発生量評価の精緻化と普及可能な発生抑制技術の検討が必要である。

はじめに

急激な人間活動の拡大は、地球規模での物質循環に影響を与え、大気組成を変化させている。炭素については、化石燃料の燃焼と森林伐採など土地利用の変化により、毎年、約 70 億トン (7 Gt C) を二酸化炭素として大気に放出している。窒素については、農業生産のための大気中窒素の化学的固定とマメ科植物の利用等、人為的な大気窒素の固定量が毎年約 1.2 億トン (120 Mt N) に達し、自然界での窒素固定量を上回りつつある。このことがさまざまな窒素化合物の大気中濃度を増加させている。これらの結果、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O : 一酸化二窒素) などの大気中温室効果ガス濃度は、人類のこれまで経験したことのない急激な割合で増加し、地球温暖化を進行させつつある。

この問題に対し、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) により、世界の科学者の知識をまとめ上げた環境評価報告書が定期的に発表されている (IPCC, 2001)。これらの評価報告を元に、1992 年の国連環境開発会議 (地球サミット) において「気候変動枠組み条約」が、1997 年には、地球温暖化防止計画の第一歩を策定する「京都議定書」が採択されるなど、温室効果ガス排出削減目標の達成に向けた各国の取り組みが進められつつある。「京都議定書」では、わが国を含む先進諸国での目標 (1990 年を基準年とした 2008~2012 年の第 1 期約束期間における温室効果ガス排出削減目標。わが国の場合、二酸化炭素換算で 6%削減する。) が定められており、その達

成に向けた諸制度の整備・構築が進められている。現時点では、わが国において農業セクターにおける温室効果ガス放出に対する削減目標が定められるかどうかは不明である。しかし、農業活動は、メタンと亜酸化窒素の重要な放出源であることから、将来に向けて、その着実な発生削減を求められることは避けられないものと思われる。

農業活動からの温室効果ガス発生

農耕地と農業活動は、場合によっては、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素を吸収するが、全体としてはこれらの温室効果ガスの発生源となっている。

二酸化炭素については、作物の光合成による大気中二酸化炭素の吸収と、作物の呼吸および土壌有機物や作物残渣の分解による放出のバランスから、吸収源となるか発生源となるか決定される。加えて、農業機械等からの排出も考慮する必要がある。

メタンと亜酸化窒素に関して、農耕地と農業活動は重要な発生源となっている。メタンについては、水田、反すう動物の消化活動、畜産廃棄物、焼き畑や作物残渣などのバイオマス燃焼が農業に関係する発生源であり、全体の約 40%を占めている。亜酸化窒素についても、農耕地土壌、バイオマス燃焼、畜産で全体の約 40%となっている。近年の世界的な農業活動の発展と土地利用の変化は、このような農業が関与する発生源からのメタンと亜酸化窒素の発生量を増加させ、地球温暖化に寄与してきたことが明らかである。

水田からのメタン放出

水田土壌では、湛水後、土壌中の酸化物質が徐々に還元され、酸化還元電位(Eh)が-200mV 近くに低下した後、メタン生成菌と呼ばれる一群の絶対嫌気性古細菌の活動によりメタンが生成される。土壌中で生成されたメタンは、気泡として、田面水中を拡散して、または水稻を通過して、のいずれかの経路で大気へと放出される。このうち、量的にもっとも重要なのは、水稻の通気組織を通過して放出される経路である。一方、水田土壌中にはメタンを酸化分解する別の一群の細菌(メタン酸化菌)が存在し、一部のメタンはこれにより消費される。

水田からのメタン発生にはいくつかの特徴的な変動パターンがみられる。一日のうちでは、発生量は午後から夕方に高く、早朝に低いといった日変動が観察される。水稻栽培期間では、一般的には土壌を湛水し水稻を移植後、多少の変動はあるものの時間の経過とともに発生量は少しずつ増加する。そして、中干し等の間断灌漑水管理により発生は低下し、収穫前の落水により終了する。

このような発生量の変動にはいくつかの要因が関わっているが、主なものは、地温、新鮮有機物の分解量、土壌の Eh の変動である。栽培初期にメタンが多く発生するのは、刈り株や雑草、有機質肥料が急激に分解するためである。また、水田の湛水にとまなう土壌 Eh の低下は、メタン生成菌の活動を左右する。栽培中期および後期に見られるメタン放出量のピークは、土壌 Eh が低下し温度が上昇した結果であるこ

とが多い。さらに、中干しなどの水管理により、発生量が急激に減少する。そのほか、水稻植物体量の増大も発生量の増加と相関を示すことから、有機物の供給や大気への輸送に関する植物生長の役割が示唆されている。

わが国の水田における調査の結果をまとめると、水稻一作あたりのメタン発生量の平均値は、稲わらを秋に土壌還元した処理区で $19.0 \pm 12.5 \text{ g m}^{-2}$ である。これらのデータについて土壌タイプと有機物管理実態を考慮すると、わが国の水田からの年間メタン発生量は 33 万トンと推定される。

農耕地土壌からの亜酸化窒素発生

亜酸化窒素は土壌中での硝化および脱窒の両方の過程で副生成物として生成される。畑地や草地などの農耕地土壌では、窒素施肥にともなった特徴的な亜酸化窒素発生パターンを示す。施肥の直後に亜酸化窒素発生ピークの見られることが多いが、これは土壌中での活発な硝化過程による亜酸化窒素の生成と発生が考えられる。しかし、施肥の直後でも降雨がほとんどなく土壌がきわめて乾燥した状態であれば亜酸化窒素発生は抑制される。一方、降雨や雪解けにより土壌水分含量が高まると亜酸化窒素発生ピークが現れることも多く、この場合は脱窒の関与が示唆される。このように、土壌からの亜酸化窒素発生には施肥や有機物の施用など窒素投入にともなう土壌中の無機態窒素濃度の増加とそれらの変換速度が決定的な制御要因となっている。これに加えて、土壌の水分や温度による反応の制御もきわめて重要である。

農耕地からの亜酸化窒素発生の見積もりには、施用窒素量あたりの発生係数として、1.25%が用いられている。しかし、わが国のデータは、多くの場合、発生係数はこの値より低い、茶園土壌等の一部の例ではきわめて高い発生が見られることを示し、窒素換算で年間 4,420 トンの発生量が見積もられている。

水田における湛水期間中の亜酸化窒素発生は無視できる場合が多いが、収穫前の落水処理後とその後の非湛水期間にはある程度の亜酸化窒素発生が見られる。また、亜酸化窒素発生プロセスとして、農耕地土壌から直接大気へ放出される以外に、施肥窒素が農業地帯の地下水や河川水に流出した後に、脱ガスで亜酸化窒素が放出される、間接発生が指摘されている。

発生抑制の方策

水田からのメタン発生抑制方策として、中干しや間断灌漑による水管理、稲わらの堆肥化や非湛水期間での分解を促進する有機物管理、肥料または資材の使用、土壌改良など、候補となる技術が数多く提案され、その多くは効果が実証されている。今後、これらの有望と考えられる発生抑制技術に関し、圃場試験による抑制効果の実証データを蓄積することと、現場で適用可能な実用的技術の選択が求められている。同時に、モデルの適用など、効果の定量的評価を行うための手法開発が必要である。

農耕地土壌から発生する亜酸化窒素の抑制技術については、地下水への硝酸性窒

素溶脱の問題と共通する点が多く、作物による窒素利用効率の向上や硝化・脱窒の抑制等にポイントを置いた技術の開発が有効であろう。そのための技術としては、①作物生産と環境負荷のバランスを考慮した最適な窒素施肥量設計、②より頻繁な分施など窒素肥料の施用時期の改善、③局所施肥など作物にとってより効率的な位置への窒素肥料の施用、④緩効性肥料や硝化抑制剤・ウレアーゼ阻害剤など新しいタイプの肥料の使用、⑤適切な有機物施用設計などが考えられる。これらの技術を用いて、土壌の環境容量を超えずに高い収量を維持するための窒素施肥体系を地域ごとに示し、広く普及させる努力が、食糧生産と環境保全の調和のために必要であろう。

今後の課題

水田からのメタン発生と施肥土壌からの亜酸化窒素発生に関して、これまでの研究の蓄積から、その制御要因や発生量の変動に関する多くの知見が集積されてきた。しかし、地球規模での発生量には、未だ大きな誤差が含まれており、地球規模や各地域における発生量に対するより精度の高い推定が必要である。そのためには、温室効果ガス発生の物理・化学・生物過程に対するより定量的な取り扱いが不可欠であり、それに基づくモデルの利用等による観測データのスケールアップが重要な課題となろう。また、広域評価を可能とするための各種データベースの構築も重要である。

また、発生抑制については、数多くの効果的な技術が提案され、その効果が実証されている。しかし、これらの技術について、気候や土壌など農業生態系の多様性のため、それぞれの技術について十分な定量的評価が得られていないことから、各地での試験データの蓄積が必要とされる。また、これまでに提案されている抑制技術の多くは温室効果ガス発生抑制効果だけに着目したものが多く、今後、経済性や生産効率など普及の可能性に対する検討を加えることが必要である。

参考文献

IPCC (気候変動に関する政府間パネル)『第3次評価報告書 (Climate Change 2001)』

<http://www.ipcc.ch/>, <http://www.gispri.or.jp/kankyo/ipcc/ipccreport.html> にて英文版または日本語仮訳版をダウンロード可

陽捷行編著『土壌圏と大気圏』朝倉書店、1994

農業環境技術研究所編『農業生態系における炭素と窒素の循環』農業環境研究叢書第15号、2004

袴田共之・波多野隆介・木村真人・高橋正道・坂本一憲『地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり、1. 二酸化炭素と陸域生態系』*土肥誌*、71, 263-274, 2000.

犬伏和之『地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり、2. メタンと土壌生態系』*土肥誌*、71, 400-409, 2000.

鶴田治雄『地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり、3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生』*土肥誌*、71, 554-564, 2000.

「土壌科学の未来—土壌資源へのアプローチ—」

木村 真人（名古屋大学大学院生命農学研究科）

今、土壌科学が面白い。

わが国の土壌学は食糧生産のための科学としてスタートし、その主な研究対象は、低位生産地（黒ボク土、酸性土壌）の土壌改良、水田土壌における土壌改良・肥沃度の維持・増進であった。現在、これら研究に加えて、わが国における「安全・安心」な食糧生産、環境保全のための土壌科学が求められている。一方、1965年に米の自給率が100%に達した後、関連科学の進歩に伴って、より広く自由な視野から、多面的に、土壌を科学するようになった。

土壌は、地球が40数億年をかけて作り上げた貴重な「資源」であり、その利活用の世界は計り知れない。土壌を「資源」と理解するとき、資源探索、埋蔵量推定に始まり、生成機構の解明、機能解明、機能開発、資源保全、が求められる。その中心を担っているのが土壌科学である。土壌は、自然が作り上げた極めて複雑な生成物であり、その生成と機能の解明のために、物理、化学、生物学を基礎とする新たな土壌科学の確立が求められている。

土壌科学は、関連科学の進歩に触発されて進歩してきた。近年、リモートセンシング技術、各種分析・計測機器の普及、分子生物学、遺伝子工学等の進歩、に伴って、土壌を科学する手段、土壌を有効活用するための技術開発、さらには新たな土壌機能や遺伝子源の発見の可能性が飛躍的に広がった。

「土壌資源」はその機能を通して、資源としての価値を発揮する。「土壌機能」は、活性と容量に区分される。また、土壌機能は、物理的、化学的、生物学的プロセスを通して発揮される。地球環境問題の多くは、土壌に関わる問題である。主要な温室効果ガスであるCO₂、CH₄、N₂Oの多くは土壌中で生成し地球の温暖化を引き起こす。地球温暖化の防止のためには、土壌機能の発現機構を解明し、その機能を制御するための技術開発が求められる。酸性雨問題の顕在化は、土壌の持つ緩衝力（中和容量）の多少によって大きく左右され、わが国においては西欧諸国においてほど大問題とならないのは、わが国の土壌が若く、緩衝能力に優れているためである。土壌科学は、地球温暖化を防止するための科学であり、酸性雨問題の顕在化を予測する学である。

20世紀が人類発展の世紀と捉えるならば、今世紀の前半は90億近くの人類が地球上で安定して豊かに生活するための方策を模索する時代と言えるであろう。化石燃料、水資源、土壌資源を酷使することなく膨大な食糧を持続的に生産する、「生産」と「地球環境」を調

和させた持続的で循環型の社会システムを模索する時代である。その中で、土壌（土壌資源）は中心に位置する。自然環境に恵まれた日本に生活する我々には想像し難いほど、世界の土壌科学、土壌科学者への期待はきわめて大きい。わが国の農業もまた「安全・安心」で環境にやさしい食糧生産を目指す一方、緊急に解決すべき多くの土壌に関わる課題に直面している。土壌病害はその一例である。わが国の農業においては、なお、直面する諸問題に対し化石エネルギーの力を借りて、高踏的に解決しようとする感が否めなく、土壌資源の劣化も懸念される。より、土壌の科学的理解に立脚した作物生産、土壌管理が求められている。

今、土壌科学が面白い。

土壤資源の秘めたる可能性と未来—土壤科学からのアプローチ—

平成 16 年 11 月 27 日

第 19 期日本学術会議第 6 部 土壤・肥料・植物栄養学研究連絡委員会

委員長：三枝正彦（東北大学大学院農学研究科）

幹事：山本洋子（岡山大学生物資源科学研究所）

同：東 照雄（筑波大学応用生物化学系）

委員：安西徹郎（千葉県農業総合研究センター）

同：犬伏和之（千葉大学園芸学部）

同：武田博清（京都大学大学院農学研究科）

同：中西友子（東京大学大学院農学生命科学研究科）

同：長谷川功（日本大学生物資源科学部）

同：百町満朗（岐阜大学農学部）