

土壌の物理性

第 82 号

1999年7月

巻頭言	河野 英一	1
シンポジウム「根と土壌」		
総説		
土壌環境と根の発達	小柳 敦史	3
論説		
根系構造のとらえ方：フラクタル次元、空隙性およびマルチフラクタル	巽 二郎	11
根の電気生理研究法—ラボラトリーからフィールドへ—	岡本 尚・正木 伸之	21
報文		
中性子線による根—土壌系の水のCTイメージング	中西 友子・古川 純・松林 政仁	29
資料		
茶園の窒素吸収効率改善	鳥山 光昭	35
総合討論		41
報文		
火山灰質粘性土のアロフェン含有量がその物理的性質に及ぼす影響	宋 永焜	43
テラローシャ土壌における不耕起栽培が作物の根系分布と土壌の理化学性に及ぼす変化	島田 輝男・Artemio ROMERO・早坂 猛・Catalicio PAREDES	55
書評		
「豊かな上づくりを目指して」—環境土壌学—	坂西 研二	67
会務報告		69
編集後記		70

「土壌の物理性」投稿規定

1. 投稿要領

- 1) 投稿は本学会会員に限る。ただし共著者の場合または編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
- 2) 投稿原稿の採否は、編集委員会において別途定める閲読基準により決定する。なお、「報文」は2名、その他は1名の閲読者を編集委員会において決定し、閲読を依頼する。
- 3) 投稿は以下に示す種別にしたがい、その内容は土壌の物理性に主体をおくものとする。
「報文」一編ごとに報文としての体裁を整え、独創性があり、土壌の物理性に関する研究及び技術に寄与するとみなされるもの。他誌に未発表のものに限る。
「ノート」新しい事実や、研究方法の改良などを含む短い報告。
「論説・総説」土壌の物理性に主眼をおき、広い視野に立って記述したもの。
「資料」既に発表した報文または発表予定の内容を各分野の参考資料となるよう書き改めたもの。
「解説」土壌の物理性に関する諸事項の理解を計るための平易な解説ならびに研究技術の普及交換を進めるための紹介など。
「その他」土粒子、書評など。
- 4) 投稿には別紙形式の送り状を付け、正原稿1部、コピー2部の計3部を送付する。初校のみ著者校正とし、印刷済みの原稿は返さない。別刷は30部を著者に贈呈する。それ以上希望する場合は実費を申し受ける。
- 5) 本誌に記載された論文の著作権は、土壌物理学学会に帰属する。

2. 原稿執筆要領

原稿様式・枚数

- 1) 原稿の執筆は、日本語原稿の場合、400字詰横書き原稿用紙を用いる。ワードプロセッサを使用する場合は、A4判で横25字、縦23行とし、上左右30mm、下端に50mmの余白をとる。英語原稿の場合は、A4判ダブルスペースで作成する。なお、最終原稿の本文をテキストファイルで提出する。
- 2) 原稿枚数は、図表を含めて刷り上がり6ページ以内とする（日本語原稿では、刷り上がり1ページは、2300字で、ワードプロセッサ使用の場合は4枚が1ページに相当する。英語原稿では、刷り上がり1ページは、600語）。上記の印刷ページを越えるときには、1ページあたり9,000円を著者負担とする。ただし、編集委員長が依頼した論文・記事についてはこの限りではない。なお、カラー印刷の場合はいかなる場合でも実費を全額著者負担とする。

表題・著者名・キーワード

- 3) 表題は内容を簡潔に表すものとする。
- 4) 日本語で原稿を作成する場合には、表題、著者名の順に記す。次に英語で表題、著者名（フルネーム）、所属機関（住所）を記す。原稿1ページ目の脚注に、日本語で所属機関（住所）を記入し、ついで5個以内のキーワードを記す。
- 5) 英語で原稿を作成する場合には、表題、著者名、所属機関の順に記す。ついで300語程度のABSTRACTを記し、その下に5個以内のキーワードを記す。

本文

- 6) 本文は、1. はじめに、2. 実験方法、3. 結果、4. 考察のように章に別けて見出しをつけ、必要に応じて、1), 2), 3) …と節に分け小見出しをつける。章・節の番号はアラビア数字を用いる。
- 7) 文体はひらがな漢字混じりの横書き口語体とし、できるだけわかりやすい表現にする。
- 8) 術語以外は常用漢字を用い、かなは現代かなづかいとする。
- 9) 句読点・括弧・ハイフンは普通1画を与える。数字・小数点・ローマ字は1画に2字をあてる。
- 10) 数字はアラビア数字を用い、漢数字は普通の字句にのみ用いる。
- 11) 外国人名は欧字とし、最初の文字のみ大文字とする。ただし中国人名などは漢字でよい。術語になっている外国人名は、カタカナ書きとする（例：ダルシー則、ストークスの法則）。
- 12) 外国地名はカタカナを原則とするが、必要に応じて欧字を用いる。中国等の地名は漢字でもよい。日本語の地名も周知されていないものは、ひらがなを併記する。
- 13) ゴシック、イタリック、ボールドの字体は鉛筆で指定する。ギリシャ文字、上付き、下付き文字、あるいはI（エル）と1（イチ）のようにまぎらわしい文字が混在するときにも、誤植防止のため鉛筆で指定する。
- 14) 術語は原則として文部省編学術用語集による。普通に用いられる外国語の術語、物質名などはカタカナで書く。
- 15) 略語、略号を使うときは、はじめにそれが出る箇所、正式名称とともに記す（例：液性限界(LL)）。
- 16) 動植物の名称はカタカナ書きにし、必要に応じてラテン語学名をイタリックでつける。
- 17) 数量の単位は原則としてSIを用いる。
- 18) 文献の引用は著者名、年号をつける。著者が2名

の場合は、両者の名字と年号を記す。3名以上の場合は、以下の例に従う (Tanaka *et al.* (1994) は・・・; 竹中ら (1960) は・・・;・・・(Tayler *et al.*, 1945).)。

- 19) 図・表・写真番号は図-1, 表-1, 写真-1のように書く。図表・写真は本文中欄外に挿入位置を指定する。ただし、指定の位置に入らないことがある。
- 20) 謝辞は本文末尾につける。
- 21) 英文原稿も上記に準じる。ただし英文の適正化は、著者の責任において行うこと。また、著者からの希望があれば、英文の適正化を行う専門家にに関する情報を提供することができる。

要 約

- 22) 日本語報文には 300 語以内の英文要約をつける。英文要約の英文適正化も英文原稿の取り扱いに準じる。
- 23) 英文要約の下に、5 個以内のキーワードを記す。

図・表・写真

- 24) 図, 表, 写真は必要最少限度とし、同一事項を表と図に重複させることはできるだけ避ける。
- 25) 図, 表, 写真 1 つごとに、A4 判で作成する。事故を避けるために、余白に著者名を鉛筆で記す。図, 写真にはその番号も鉛筆で記す。
- 26) 図はそのまま印刷するので、白紙に黒インクできれいに書く。これと同程度の鮮明さを持つ、プロッタ、プリンタによる図は受け付ける。製版に適さない図は書き直しを要求することがある。
- 27) 図は刷り上がりの大きさを指定し、2 倍くらいに

大きく書く。図中の線の太さ、文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。なお図および写真中の文字は希望があれば写植する。その場合には、図中の文字は鉛筆で薄く記入する。

- 28) 地図には定尺をつけ、何万分の 1 などの縮尺を指定しない。顕微鏡写真などには定尺をつけ、何倍などの拡大率を指定しない。
- 29) 日本語報文原稿の図・表・写真の表題には日本語と英語を併記する。
- 30) 図, 写真の表題は別紙にまとめて記す。

引用文献

- 31) 文献は本文のあとに、著者名の ABC 順に書く。未発表・私信は引用文献として記載しない。
- 32) 書き方の様式は以下のようにする。
Bouma, J. and Dekker, L. W. (1978) : A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations, *Geoderma*, **20** : 27~40.
Cambell, G.S. (1974) : A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, **117** : 311~314.
FAO (1988) : Revised legend of the FAO-UNESCO Soil Map of the World. p. 119, FAO, Roma.
岩田進午 (1970) : 土壌物理とペドロロジー, ペドロジスト **14** : 28~33.
山崎不二夫監修 (1969) : 土壌物理, p 55, 養賢堂, 東京.
竹中 肇 (1965) : 収縮挙動よりみた土の工学的性質, *農土論集*, **14** : 32~35.

(1999. 7. 1 改正)

土壌物理学会原稿送り状

受付番号（本学会で記入）：

発送年月日	年 月 日	受付年月日(本学会で記入)	年 月 日
種 別	報文, ノート, 論説・総説, 資料, 解説, その他 ()		
表題(和文)			
表題(英文)			
キーワード <small>(日本語: 5ヶ以内)</small>			
キーワード <small>(英語: 5ヶ以内)</small>			
著者名 1 ローマ字		所属	本学会 会員・非会員
著者名 2 ローマ字		所属	本学会 会員・非会員
著者名 3 ローマ字		所属	本学会 会員・非会員
連絡先氏名			
住 所 電話・FAX 番号 e-mail	〒 TEL: FAX: e-mail:		
	A4:(枚) ・ 400字詰原稿用紙(枚)		
表 枚	函 枚	写 真 枚	
別 刷 り	30部・50部・100部・150部・200部・300部		

付記：投稿は土壌物理学会事務局または編集幹事宛のこと

土壤物理学会入会申し込み用紙

必要事項を記入し、このまま FAX または郵便で下記までお送り下さい。

会 員 種 別	正 ・ 学 生 ・ 購 読 ・ 賛 助
申 込 年 月 日	年 月 日
氏 名	
同上ローマ字読み	
性 別	男 ・ 女
生 年 月	年 月
勤 務 先	
同上所在地	〒
同上電話・FAX 番号・ e-mail	〒
自 宅 住 所	
同上電話・FAX 番号・ e-mail	
会 誌 の 送 付 先	勤務先 ・ 自宅
本学会以外の主な 所属学会	

本学会記入 受付年月日：

承認年月日：

宛先・問い合わせ

石川 重雄 (ISHIKAWA Shigeo : 土壤物理学会事務局/庶務幹事)

〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866 日本大学生物資源科学部生物環境工学科内

Fax. : 0466-80-1102

Tel. : 0466-84-3693, e-mail : sishika@brs.nihon-u.ac.jp



土壤物理学会のスタートにあたり

河野 英 一

「土壤物理学会」が、旧来の「土壤物理研究会」の名称を変更して、本年の4月1日よりスタートしました。したがって、この学会誌第82号は土壤物理学会の記念すべき学会誌第1号ということになりました。

今より41年前の昭和33年(1958年)春の土壤肥料学会大会開催時に「土壤物理研究会」が発会され、翌年の昭和34年(1959年)3月16日、丁度40年前に「土壤の物理性 (Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan)」第1号が全54ページで、東京都北区西ヶ原農業技術研究所化学部内土壤第1科土壤物理研究室に事務所を置いて発刊されました。また、昭和34年4月9日に第1回の総会が会員約60名の参集の下に開かれ、世話人よりの経過報告および会計報告があり、それらの承認が得られたのち、正会員200円および賛助会員1口2,000円の年額会費を定めたもの等を含む第1条～第9条の規約が決定され、次いで10名の評議員が選出されました。これに引き続いて、第1回の研究討論会が「土壤物理性の測定法」をテーマとして開かれ、この会の内容は学会誌第2号(昭和35年3月発行)に掲載されました。また、会誌第1号は巻頭言、論説、資料および随想から構成されたものであり、オリジナル論文である報文の掲載は学会誌第2号における下村和子氏、美園繁氏共著の「圃場における土壤物理性の測定値の偏差について」と題する1編のものがその始まりでした。

土壤物理研究会設立の主な目的は、初代会長の山中金次郎氏(農技研)が第1号の巻頭言「第1号発刊に際して」と題する中で述べているように、「私達は土壤を一つのテスト用のMaterialとして取り扱う基礎的なものと、現地のActiveな状態とを生産性に関連させて研究する事を使命とすべきであり、またそれは新しく発足したこの研究会の発展のための使命でもあると考える」、すなわち生物生産を巡って実験室レベルの研究と現場レベルの研究とを密接に関連づけていくことを追究するためでありました。この目的は土壤物理学会となっても堅く引き継がれていくものと考えます。

さて、今日人類の未来永劫の生存において、人類が他生物と共生しつつ、地球とその環境を保全していかなければならないことから、生物資源を含めた既利用・未利用の諸資源を少資源・少エネルギー使用を踏まえた消費資源として如何に有効利用していくか、またこの諸資源を適正な環境からなる生産・生活の場の形成における環境資源として如何に安定確保していくかが人類の緊急な課題となっています。土壤はとくに環境資源として大切なものです。地球の最表層にある土壤が他の自然物と異なるのは、粘土と難分解性の有機物である腐植とを含むからです。粘土は、地下自然物の中には存在せず、地表に露出した地下自然物が諸元素に風化分解され、それらが再結合して生成されます。腐植も地表にのみ存在する生物の腐朽分解により生成されます。これらの物質はとくに多量のマイナスの荷電を持っています。植物養分イオンの多くはプラスの荷電であり、マイナスの荷電の粘土と腐植との表面にそれらが吸着されて植物根に容易に吸収され、植物生育とその生態系が保持されます。また、粘土と腐植が中心となって形成される団粒等の土壤構造は土壤を巡る物理的、化学的および生物的变化、すなわち土壤環境の変化に対して強い緩衝能を有しています。今後、地球とその環境の保全にとっては、土壤が有する生態系保持、緩衝能等の環境保全機能を追究し、その健全・安定化を図ることがますます要請されるようになると思います。したがって、土壤物理学会では、生物生産の面からに加えて、今後環境科学的な面からの研究の分野も主要なものにしていかなければならないといえます。



土 壌 環 境 と 根 の 発 達

小 柳 敦 史*

Soil Conditions and Root Development

Atsushi OYANAGI*

* National Agriculture Research Center

Abstract

Effects of soil conditions on root system were reviewed. Soil type, fertilization, tillage and soil water condition affect total root length, root depth and specific root length of winter wheat. Significant difference in the root system was also found for some arable crops and genotypes. Ideal type of crop root system was discussed in relation to grain yield, grain quality and sustainable agriculture.

Key words : genotype, root depth index, root system, soil conditions, wheat

1. はじめに

Weir *et al.* (1984) は、英国国土の約 600 地点におけるコムギの多収データを解析した結果、収量の変動の 18~19% が土壌の種類で説明できたと報告している。同じ調査で、品種の効果が 12% 以下、播種期や降水量の効果が 4% 以下であったことと考え合わせると、作物の生育と収量における土壌条件の重要性が理解できる。

土壌は主として根系を通して植物に影響を与えるが、圃場に生育している作物の根系の研究には困難が多いため (ラッセル, 1956), 土壌環境と作物収量の間には、常に根系というブラックボックスが介在して両者の関係の解析的なアプローチを阻んでいる。

土壌環境が作物の根系に及ぼす影響を明らかにするためには、さまざまな条件で作物を栽培し、それぞれについて根系を調査することが必要である。これは労の多い作業ではあるが、両者の関係を解きほぐすことにより、土壌管理の立場からは耕起や施肥などを通じて土壌環境を適切に制御することができるようになり、作物育種の立場からは多様な土壌環境に合った根系を持つ品種を開発することができるようになる。その結果として、収量だけでなく、品質の向上、環境保全型農業の確立など、現在、私たちが直面している多くの問題の解決へのアプローチが可能となる。

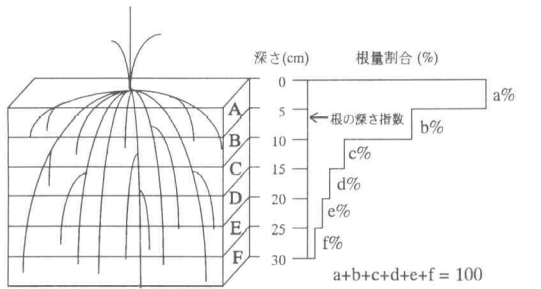
ここではまず、根系に対する土壌環境の影響を調べる

際的前提となる根系の遺伝的変異について整理し、次に根量や根系の形態に与える土壌の種類、施肥、耕起及び土壌水分の影響について、これまでの知見をまとめるとともに、冬作コムギを用いた著者らの試験結果を紹介する。なお、本稿では根系の特徴を表す主な指標として、圃場面積当たりの総根長、根系の深さ、および根の直径の指標となる根長/根重比 (総根長を根乾物重で除した値) を取り上げて、根系に及ぼす土壌環境の影響を整理する。

2. 根系の遺伝的変異

1) 作物間差異

作物の根系には 2 つのタイプがあり、コムギやイネなどの単子葉植物は細い多くの不定根から成る「ひげ根型根系」を形成し、ダイズなどの双子葉植物は種子から生ずる 1 本の太い主根から側根が出て「主根型根系」を形成する (中元, 1998)。根量については Yamaguchi and Tanaka (1990) がいくつかの作物を栽培して比較した結果、根量はコムギ (86 km²/m²) および水稻 (78 km²/m²) で多く、トウモロコシがそれに次ぎ (50 km²/m²)、ダイズは少なく (39 km²/m²)、バレイショはさらに少ない (21 km²/m²) ことを明らかにしている。また、深さ別に根量を調査したデータ (Hasegawa *et al.*, 1979) を用いて、図-1 のようにして根系の平均的な深さを示す「根の深さ指数」 (小柳, 1998) を計算したところ、トウモロ



$$\text{根の深さ指数 (cm)} = \frac{2.5a + 7.5b + 12.5c + 17.5d + 22.5e + 27.5f}{100}$$

図-1 根の深さ指数の求め方

注：深さ 30 cm までの根を深さ 5 cm ごとの層に分けて根量を測定した場合の計算例。層の深さの中央値 (cm) に各層に含まれる根の割合 (%) をかけて 100 で割る。根の深さ指数の単位は cm。(小柳, 1998 より)

コシ、ダイズおよびコムギでは、根の深さ指数が 19~24 cm で根系は深い、イネは同じ畑条件で栽培しても根の深さ指数が 10 cm 程度で、根系の深さは他の作物の半分程度になることが分かっている。さらに、根の直径の指標となる根長/根重比は、ひげ根型根系を作る作物で大きく (根が細く)、主根型根系を作る作物では小さい (根が太い)。このように、根量や根系の形態は作物の間で遺伝的に大きな差異が認められる (岩間, 1998)。

2) 品種間差異

根量や根系の形態は作物間だけでなく品種間でも異なり、O'Toole and Bland (1987) がそれらをまとめている。著者らも、乾燥した地域の多いオーストラリアのコムギ品種と湿潤な日本のコムギ品種を同じ圃場で栽培し、生育後期に根系を調査した結果、オーストラリアの品種は日本の品種に比べて根量が少なく、根系が深く、根が太い (根長/根重比が小さい) ことを明らかにした。興味深いのは、オーストラリアの品種は日本の品種に比べて根量が少ないにも関わらず、出液速度からみた根系全体の能動的吸水量 (平沢, 1998) が多かったことである。このことは、土壌の深い層の根が水分の吸収に大きな役割を果たしている可能性があることを示している。また、同じ条件で栽培しても、北日本で栽培されるコムギ品種は深い根系を形成し、関東以西の品種は浅い根系を形成する傾向にあることが古くから指摘されている。これは、北日本では厳しい寒さに対して根系の深い品種が有利であるのに対し、水田裏作の多い関東以西では土壌の過湿に対して根系の浅い品種が有利なため、品種育成の過程で両地域において根の重力屈性の異なる品種が

選抜されてきたことによるのではないかと推測されている (Oyanagi, 1994)。

このように、根には大きな遺伝的変異がみられるため、根系に及ぼす土壌環境の影響を調べる際には、供試作物や供試品種の根の遺伝的特性を十分に考慮する必要がある。

3. 土壌の種類の影響

北海道大学の波多野・高橋 (1992) が、土壌の種類別にコムギの根系を調べた例によると、地上部乾物重は栽培された土壌の種類でほとんど差異がなかったにもかかわらず、単位圃場面積あたりの総根長は、疑似グライ土で 25 km/m²、火山性土で 110 km/m²、砂丘未熟土で 50~100 km/m²、低地土で 80~100 km/m²、泥炭質グライ土で 180 km/m² と著しく異なることを報告している。また、他にも土壌の種類別に根系の比較を行った例があるが、互いに離れた地点での比較では気象条件の影響も表れてしまうのが問題である。そこで、著者らは農業研究センター土壌肥料部畑土壌肥料研究室が造成した大規模な土壌圃場 (写真-1) でコムギを栽培して根系調査を行った (小柳ら, 1988)。この圃場は、縦横 20 m × 25 m の無底のコンクリート製の枠 4 つから成り、それぞれに種類の違う土壌が深さ 80 cm まで充填されている。充填された土壌は、茨城県内の淡色黒ボク土、厚層多腐植黒ボク土および灰色低地土と愛知県内の赤色土である。赤色土は固相率が高く可給態窒素が少ないのが特徴で、コムギを栽培すると窒素不足のため葉色が淡くなり、収量は少ない。また、黒ボク土は可給態リン酸が少ないの



写真-1 4種類の土壌が充填された圃場

注：農業研究センター土壌肥料部畑土壌肥料研究室により造成された圃場で、手前が灰色低地土 (茨城県)、左が赤色土 (愛知県)、奥が厚層多腐植黒ボク土 (茨城県)、右が淡色黒ボク土 (茨城県)。

が特徴で、コムギは初期生育が貧弱で分けつが少なく、収量が少ない。これに対して、灰色低地土は肥沃でコムギの収量性は高い（佐藤ら，1988）。

1987年10月、著者らはこの圃場に共通の施肥条件とした区画と各土壌に合わせて施肥改善を行った区画を設け、コムギ農林61号を播種した。生育初期の分けつ期にあたる2月から、生育後期の登熟期にあたる5月にかけて根系の調査を行った。根の採取は改良モノリス法で行い、播種条の方向に5cm、播種条と垂直な方向に40cmの部分の深さ25cmまでの土壌を採取した。採取した土壌を深さ12.5cmの線の上層と下層に二等分して根を洗い出し、それぞれについてルートスキャナー（Comair社製 Root Length Scanner）で根長を測定し、乾燥して秤量した。これらの値から、総根長、根の深さ指数および根長/根重比を算出した。

写真-2に淡色黒ボク土および赤色土で栽培したコムギの農林61号の根系の例（Sato *et al.*, 1990）を示した。淡色黒ボク土では根系が浅く、根は細い。一方、赤色土では深い層にも多くの根が見られ、根は太い。表-1に各土壌の同一施肥区の2～5月の根系の調査結果を示した。根量は、生育初期には淡色黒ボク土で少なく、生育後期には赤色土の根量が他の土壌に比べて少なかった。このように、土壌によって根量増加のパターンは大きく異

なっていたが、これは土壌由来の養分の可給態化が、冬季から春季にかけて、温度の影響を受けて大きく変化するためではないかと考えられた。また、赤色土では根系が深く根が太い（根長/根重比が小さい）傾向にあり、黒ボク土では根系が浅く根が細いことが数字で示された。そして、これらの土壌ごとの根系の特徴は、調査時期にかかわらずほぼ一定していた。

一方、施肥改善区では、全ての土壌に堆肥を投入したのに加え、赤色土では窒素施用量を増し、両黒ボク土ではリン酸施用量を増した。表-1ではデータは省略したが、施肥改善の結果、淡色黒ボク土では初期の根量が約2倍に増加し、赤色土では生育期間全体で根量が2割程度増加した。しかし、根系の深さや根の太さについては、各土壌とも施肥の影響はほとんどみられなかった。

仮に、収量性の高い灰色低地土の根系を理想型と考えると、他の土壌でも根系の形態をそれに近づけることが多収への道となる。しかし、赤色土や淡色黒ボク土で土壌の特性に合わせた施肥改善を行い、高い収量を得た場合でも、根系の深さや根の太さなど根系の形態的な変化は少なく、根系はあいかかわらず土壌特有の形態を示していた。このことは、多収を実現するための理想的な根系形態はひとつの形に決めることができず、土壌の種類や作物の栽培条件に応じた理想型を考える必要があること

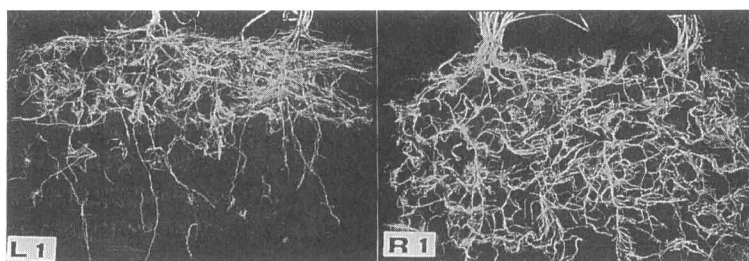


写真-2 土壌の違いによる根系の差異

注：左は淡色黒ボク土，右は赤色土における生育中期のコムギの根系。
写真-1の枠圃場における深さ30cmまでの根系。（Sato *et al.*, 1990より）

表-1 土壌の種類がコムギの根長、根の深さ指数および根長/根重比に及ぼす影響

土壌の種類/ 調査時期	根 長				深さ指数 5 月	根長/根重比 5 月
	2 月	3 月	4 月	5 月		
	(km/m ²)				(cm)	(m/g)
淡色黒ボク土	1.47	3.66	6.76	9.47	6.50	176
厚層多腐植黒ボク土	2.62	3.59	6.15	7.43	6.85	118
赤 色 土	2.97	3.58	4.33	4.14	8.93	62
灰色低地土	2.80	5.22	7.50	6.35	6.74	95

注：写真-1の枠圃場で同一な施肥条件とした試験区における調査結果。（小柳ら，1988より）

を示している。

4. 窒素施肥の影響

窒素施肥は作物の生育や収量に大きな影響を及ぼすが、根系に与える影響を調査した例は少なく、結果も一定していない (トラウトン, 1987)。この原因のひとつは、根系に及ぼす窒素施肥の影響が、供試された圃場の窒素肥沃度によって異なるためではないかと考えられた。そこで、著者らは窒素肥沃度が異なる隣接する 2 枚の水田圃場で窒素施用量を変えてコムギを栽培し、根系の調査を行った (小柳ら, 1989)。一方はダイズ跡の転換畑作、他方は水稲跡の水田裏作で、ダイズ跡の圃場の作土は水稲跡に比べて 2 倍程度の可給態窒素量で、各試験区の地上部の生育量からみて、両圃場の土壌窒素含量の差は施肥窒素量として 4~6 kg/10 a 程度に相当すると考えられた。

1988 年 11 月、両圃場に窒素無施用区、窒素 10 kg/10 a 区 (基肥 4 kg/10 a + 追肥 6 kg/10 a) および窒素 14 kg/10 a 区 (基肥 8 kg/10 a + 追肥 6 kg/10 a) を作り、コムギ農林 61 号を栽培した。土壌窒素肥沃度の低い水稲跡の圃場において、2 月~5 月に改良モノリス法により根を調査した結果を表-2 に示した。窒素無施用区では、生育初期には根長の値は比較的大きかったにもかかわらず、その後減少して登熟期の根量はむしろ少なくなった。このことは、土壌の窒素肥沃度が低い圃場では、コムギは生育の初期において地上部よりも根系を優先的に発達させたことを示している。一方、窒素施用区では根量が増え、根系全体は浅くなり、根は細くなっていた。

表-2 ではデータを省略したが、土壌の窒素肥沃度が高いダイズ跡圃場では、窒素施用により地上部の乾物重や窒素含量は増加したものの、根系への影響は少なかった。すなわち、窒素施用の有無にかかわらず、ダイズ跡圃場では根量は多く (5 月の調査で各区とも 11.7~12.2 km/m²)、根系は浅く (同じく根の深さ指数 7.9~8.8 cm)、根は細かった (根長/根重比 163~177 m/g)。

窒素無施用区の子実収量は水稲跡圃場で 215 kg/10 a、

ダイズ跡圃場で 498 kg/10 a であったが、窒素施用により両圃場とも最高で 600 kg/10 a 程度の収量となった。また、収穫期にコムギの地上部の最終的な窒素含量を調べたところ、両圃場とも窒素施用量の増加に伴って圃場面積当たりの地上部窒素含量は増えていた。水稲跡の圃場とダイズ跡の圃場では窒素肥沃度だけでなく、土壌の物理的性質なども異なる可能性があるため断定的なことはいえないが、窒素肥沃度の低い圃場では、窒素施用は根量と窒素吸収量の両方を増加させ、窒素肥沃度の高い圃場では窒素施用は根量を増加させず、窒素吸収量のみを増加させるものと考えられた (小柳ら, 1989)。

5. 耕起の影響

現在のコムギ栽培においては、プラウやロータリを用いて耕起した後に播種するのが一般的である。これに対して、不耕起栽培は土壌の流亡の防止や作物生産の省力化が可能となるため、近年、南米のコムギやダイズの栽培などで、大きな広がりを見せている。

辻 (1998) は、これまでに報告された不耕起栽培における根系調査の結果をレビューし、以下のような結論を示している。① 不耕起栽培では土壌表層の根量が増加し、全体として浅い根系が形成される。② 不耕起栽培による浅根化はひげ根型根系を作るイネ科の作物に比べて主根型根系を作るマメ科の作物で起こりやすい。③ その原因は、マメ科作物では一次側根や不定根がより水平に近い角度で伸びるためである。

著者らが茨城県内の水田転換畑で試験したところ、主根型根系を作るダイズだけでなく、ひげ根型根系を作る水稲でも不耕起栽培による浅根化が認められた。しかし、コムギでは浅根化は認められなかった (小柳ら, 1998)。これは、試験を行った関東地方では冬季の降水量が極めて少ないため、冬作でコムギの不耕起栽培を行っても土壌表層が乾燥ぎみに推移し、浅い層の根が多くなるためではないかと考えられた。また、不耕起栽培を行うと、全体の根量が少なくなり、根域が狭くなるとともに根長/根重比は小さく、根が太くなる傾向が認め

表-2 窒素施肥がコムギの根長、根の深さ指数および根長/根重比に及ぼす影響

試験区/ 調査時期	根 長				深さ指数 (cm)	根長/根重比 (m/g)
	2 月	3 月	4 月	5 月		
	(km/m ²)					
窒素無施用区	4.17	3.38	3.89	2.79	10.31	75
窒素 10 kg/10 a 区	2.18	3.79	3.27	4.67	9.80	88
窒素 14 kg/10 a 区	2.40	3.48	5.00	7.06	9.54	105

注：土壌の窒素肥沃度が低い水稲跡の水田裏作での調査結果。(小柳ら, 1989 より)

られた(表-3)。このような根系をもつ作物は環境ストレスに弱い可能性があるため、試みに条間の中央部に緩効性窒素肥料を施用したところ、窒素施用を行った位置の根量が多くなり、不耕起栽培でも比較的広い根系を形成させることができた(小柳ら, 1997)。このように、根系の広がり方は、施肥の位置を変えることにより、不耕起栽培においてもある程度制御できる。

6. 土壌水分の影響

作物は、湿潤な土壌では浅い根系を作り、乾燥した土壌では深い根系を作る。また、土壌の深層まで水分が浸透するような多量の灌水を低い頻度で行うと根系は深くなり、土壌の浅い層のみが湿るような少量の灌水を繰り返すような場合には根系は浅くなるといわれている(ラッセル, 1956)。

このように、土壌の水分条件によって根系の深さが変化するのは、土壌が乾燥している部分での根の生長抑制の補償作用として、土壌水分の好適な層の根がよく伸長し、分枝するためであると説明されている(ラッセル, 1981)。実際、土壌水分はコムギの根の分枝の発達に大きな影響を与える(森田・奥田, 1994)。ところが最近、それだけではなく、根が周囲の土壌水分を感知してその伸長方向を変化させる現象が明らかになってきた。

Nakamoto (1993) は圃場にトウモロコシを栽培し、土壌水分処理を行って節根の伸長方向の調査を行った。その結果、トウモロコシの根系の骨格を構成する節根は、生じた節位によって決まった角度で斜め下方向に伸びていくが、土壌を乾燥条件にすると、根がより下向きに伸びるようになることを報告している。著者らも、コムギの種子根の伸長する角度が土壌の水分条件によって変化することを確認し、これがアブジシン酸による重力屈性の変化によって起こるのではないかと推測した

表-3 耕起がコムギの根長、根の深さ指数および根長/根重比に及ぼす影響

年次	試験区	根長 (km/m ²)	深さ指数 (cm)	根長/ 根重比 (m/g)
1995年	耕起	14.25	8.39	169
	不耕起	6.10	8.86	122
1996年	耕起	14.47	11.02	171
	不耕起	8.91	11.02	122
1997年	耕起	8.33	9.79	102
	不耕起	6.49	10.04	80

注：水田圃場における調査結果。収量は全て 600 kg/10 a 程度。(小柳ら, 1997, 1998 より)

(Oyanagi *et al.*, 1993)。おそらく、これは土壌の表面が乾燥しても深い層には水が豊富な場合が多いことと関係して、植物が自然に獲得してきた性質ではないかと考えられる。一方、高橋(1992)は、これとは別に、根の周囲に水ポテンシャルの勾配があると根がより水分の多い方に向かって屈曲生長する現象(水分屈性)を明らかにし、その屈曲の大きさは品種間でも異なることが分かっている(Oyanagi *et al.*, 1995)。

陸稲は、降雨が比較的多い日本の条件でも早魃の影響で大きく減収する年がある。茨城生工研の平山ら(1997)は、根系の深い品種の方が早魃に強いという理論的な根拠(長谷川, 1981)に基づいて、実際に根系の深い品種を育成し、耐乾性が高いことを証明した。また、果樹では根域を制限して土壌水分を制御し、品質の良い果実を生産する技術が確立されている(高木, 1998)。さらに、水稻では中干しや間断灌漑、深水管理などの土壌水分の制御により、根系を適切に管理できる可能性が示唆されている(Abe and Morita, 1994)。一方、コムギでは平沢ら(1997)が出穂期の前の1ヶ月間、雨よけ栽培し、土壌を乾燥気味に推移させることにより、根系を深くさせ、根系の活性を生育後期まで維持させることで収量を増加させるという試みを行っている。このように、土壌の水分条件に合わせて遺伝的あるいは栽培的に根系を適切に制御し、作物の収量増加や品質の向上を図る試みが

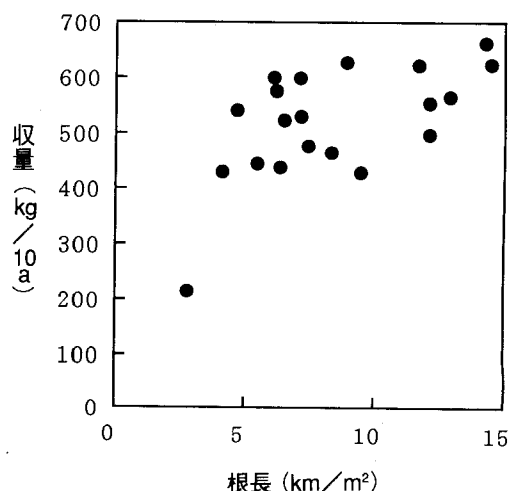


図-2 コムギの根長と収量の関係

注：表-1～3で紹介した試験の全データから作図。調査時期は出穂期以降で、試験を行った場所は茨城県内。根量と収量の関係は、 $r = 0.60$, 1%水準で有意。(小柳ら, 1988, 1989, 1997, 1998より作図)

行われている。

7. おわりに

表-1~3に示した著者らの栽培試験の結果を用いて、コムギの根量と収量の関係を調べてみると、図-2のように、全体的には川田ら(1978)が水稲で示しているデータやBarraclough and Leigh(1984)がコムギで示しているデータと同じように、根量が多いほど収量が多くなる傾向がみられ、両者は1%水準で有意な正の相関関係にあった($r=0.60$)。この関係には、生育の良い条件では根量も収量も多くなるという当然の結果を示しているに過ぎないという見方もあるが、通常の栽培条件下では、少なくとも根量が著しく少ない場合には多収は望めない。一方、根の深さ指数や根長/根重比は、収量と弱い正の相関関係にあるに過ぎなかった。このことは、陸稲(平山ら, 1997)や水稲(森田, 1994)とは異なり、関東地方の冬作コムギの栽培環境では、根系の深さや根の太さは、今のところ多収を目指す際の直接的な改善目標になり得ないことを示している。

野菜や果樹などで根系や根圏の環境を適切に管理することにより、品質の向上が図られているのと同じように、他の多くの作物においても根系の形態や機能を制御することにより、収穫物の品質向上が可能となるのではないかと期待される。例えば、コムギの品質は子実のタンパク質含量との関係が深く、作土の窒素肥沃度の高い圃場ではタンパク質含量が高くなりすぎて問題になることがある。もし、深い根系を持つ品種を育成し、土壌からの窒素吸収量の変動を抑制することができれば、圃場の違いによる子実のタンパク質含量のばらつきを少なくし、各地域で生産されるコムギの品質の斉一化が実現できるかもしれない(小柳・乙部(桐淵), 1998)。

一方、施肥窒素の地下水への流出などを少なくする環境保全型農業を確立するため、深山ら(1997)は、肥沃な表層に根が多く、根系の浅い水稲品種を作出することで土壌由来の窒素を有効に利用させ、減農薬栽培を実現できるのではないかと考えている。このように、根系の制御を行うことは、単に作物の生産性だけでなく、品質、環境問題の解決にも寄与できる可能性をもっている。

本稿では、土壌環境と根の発達の間を断片的に示すにとどまったが、本号の次頁以降には、根に関するいくつかの新しい研究手法が紹介されており、これらの手法を用いて、作物の根系に対する理解が急速に進んできた。そのような中であって、昨年には根に関する最近の研究結果が、長年にわたる研究の結果とともに体系的にまとめられた(根の事典編集委員会, 1998)。河野・山内(1996)が述べているように、「農耕地の土壌空間の生産

力の向上とその永続性をも視野にいれた理想的な作物根系を作っていく時期が、いよいよやってきた。」といえるのかもしれない。

引用文献

- Abe, J. and Morita, S. (1994): Growth direction of nodal roots in rice: its variation and contribution to root system formation, *Plant and Soil*, **165**: 333~337.
- Barraclough, P.B. and Leigh, R.A. (1984): The growth activity of winter wheat roots in the field: the effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crops, *J. agric. Sci.*, **103**: 59~74.
- Hasegawa, S., Parao, F.T. and Yoshida, S. (1979): Root development and water uptake under field condition, *IRRI Saturday Seminar*, 24 February 1979.
- 長谷川周一(1981): 陸稲の土壌水分吸収モデル, *土壌の物理性*, **44**: 14~22.
- 波多野隆介・高橋千穂(1992): 各種土壌における秋播小麦の根の分布, 第2回根研究会講演要旨, 7.
- 平沢 正・中村恵美子・大川泰一郎・石原邦(1997): 出穂前約1ヶ月間の土壌水分条件がコムギの乾物生産と生理生態的性質に及ぼす影響, *日作紀*, **66**(別2): 167~168.
- 平沢 正(1998): 出液と根圧の測定. 根の事典編集委員会編, *根の事典*, 朝倉, 東京, 409~410.
- 平山正賢・根本 博・岡本和之・宮本 勝・須賀立夫(1997): 陸稲の耐干性と根の分布との関係, *日作紀*, **66**(別1): 222~223.
- 岩間和人(1998): 根の遺伝的変異. 根の事典編集委員会編, *根の事典*, 朝倉, 東京, 152~227.
- 川田信一郎・副島増夫・山崎耕宇(1978): 水稲における“うわね”の形成量と玄米収量との関係, *日作紀*, **47**: 629~636.
- 河野恭廣・山内 章(1996): 理想的根系と土壌. 山内章編, *植物根系の理想型*, 博友社, 東京, 149~172.
- 深山政治・斎藤幸一・在原克之(1997): 水稲の減化学肥料栽培と根系分布, *根の研究*, **6**: 108~111.
- 森田茂紀・奥田浩之(1994): 土壌水分条件がコムギ幼植物の根の生育, とくに種子根の分枝に及ぼす影響, *日作紀*, **63**: 418~422.
- 森田茂紀(1994): 植物の根に関する諸問題 [13], 水稲の根系形成を考える場合の視点 (1), *農及園*, **69**: 933~938.
- Nakamoto, T. (1993): Effect of soil water content on

- the gravitropic behavior of nodal roots in maize, *Plant and Soil*, **152**: 261~267.
- 中元朋実 (1998) : 根系の形成. 根の事典編集委員会編, 根の事典, 朝倉, 東京. 76~107.
- 根の事典編集委員会 (1998) : 根の事典, p. 438, 朝倉, 東京.
- O'Toole, J.C. and Bland, W.L. (1987) : Genotypic variation in crop plant root systems, *Adv. Agron.*, **41**: 91~145.
- 小柳敦史・佐藤暁子・江口久夫 (1988) : 異なる土壌におけるコムギの根量及び出液速度と収量, *日作紀*, **57** (別2) : 41~42.
- 小柳敦史・渡辺輝夫・和田道宏 (1989) : 水稲跡圃場とダイズ跡圃場におけるコムギ根系の比較, *日作関東支報*, **4**: 109~110.
- Oyanagi, A., Nakamoto, T. and Morita, S. (1993) : The gravitropic response of roots and the shaping of the root system in cereal plants, *Environ. Exp. Bot.*, **33**: 141~158.
- Oyanagi, A. (1994) : Gravitropic response, growth angle and vertical distribution of roots of wheat (*Triticum aestivum* L.), *Plant and Soil*, **165**: 323~326.
- Oyanagi, A., Takahashi, H. and Suge, H. (1995) : Interactions between hydrotropism and gravitropism in the primary seminal roots of *Triticum aestivum* L., *Ann. Bot.*, **75**: 229~235.
- 小柳敦史・土田志朗・長野間宏 (1997) 緩効性肥料を用いて耕起・不耕起栽培したコムギの生育と根系, *日作関東支報*, **12**: 58~59.
- 小柳敦史 (1998) : 深さの定量化による作物根系の新しいとらえかた, *日作紀*, **67**: 3~10.
- 小柳敦史・南石晃明・土田志朗・長野間宏 (1998) : 汎用水田において耕起および不耕起栽培したコムギ, *ダイズおよび水稲の根の垂直分布の解析*, *日作紀*, **67**: 49~55.
- 小柳敦史・乙部 (桐渕) 千雅子 (1998) : コムギの品質向上を目指した根系の遺伝的制御, *根の研究*, **7**: 117~119.
- ラッセル, E.J. (1956) : 植物生育と土壌, 藤原彰夫他訳, p. 767, 朝倉, 東京.
- ラッセル, R.S. (1981) : 作物の根系と土壌, 田中典幸訳, p. 390, 農文協, 東京.
- 佐藤暁子・末永一博・高田寛之・川口数美 (1988) : 異なる土壌におけるコムギの生育と収量, 第1報 同一施肥水準におけるコムギの生育・収量とその品種間差異, *日作紀*, **57**: 97~104.
- Sato, A., Suenaga, K., Takada, H. and Kawaguchi, K. (1990) : Effect of soil types on the growth of shoots and roots and the grain yields of wheat varieties. *JARQ*, **24**: 83~90.
- 高木敏彦 (1998) : 果樹の根域制限, 根の事典編集委員会編, 根の事典, 朝倉, 東京. 276~278.
- 高橋秀幸 (1992) : 植物の水分屈性, *化学と生物*, **30**: 510~513.
- 辻 博之 (1998) : 不耕起畑における作物の根系, 植物の根に関する諸問題 (61), *農及園*, **73**: 919~923.
- トラウトン, A. (1987) : 作物の根, その生活史を探る, 広田秀憲訳, p. 146, 学会出版センター, 東京.
- Weir, A.H., Rayner, J.H., Catt, J.A., Shipley, D.J. and Hollies, J.D. (1984) : Soil factors affecting the yield of winter wheat : analysis of results from I. C.I. surveys 1979~80. *J. agric. Sci.*, **103**: 639~649.
- Yamaguchi, J. and Tanaka, A. (1990) : Quantitative observation on the root system of various crop growing in the field, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **36**: 483~493.

受稿年月日: 1999年1月4日
受理年月日: 1999年3月30日



根系構造のとらえ方：フラクタル次元，空隙性 およびマルチフラクタル

巽 二郎

Fractal Methods in Root System Architecture : Fractal Dimension, Lacunarity and Multifractals

Jiro TATSUMI

Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University

Abstract

Methods for analyzing root system architecture and root distribution in soil are reviewed in relation to fractal geometry. Fractal dimension (D) is an useful index for describing root system morphology, as well as for quantification of topological architecture of the system. Fractal lacunarity and multifractal measure are applicable to root system analysis and they may offer alternative information on root system architecture.

Key words : fractal dimension, lacunarity, multifractal, root system architecture, topology

1. はじめに

根は土壤中に発達して「根系」と呼ばれる構造体を構築する。根系の構造や分布はその機能としての養水分の吸収や植物体の支持，土壤微生物との相互作用などと密接に関わっている。最近生物学の多くの分野において，フラクタルに関する研究が活発となってきた。フラクタル幾何学は複雑な形態をもつ根系の記述に適している。この論文ではフラクタルを応用した根系構造に関する研究の中で特に測定法との関わりを中心に検討し，根系の構築構造を探る上でのフラクタルの有効性や可能性について考察する。

2. フラクタルの考え方

フラクタル幾何学 (fractal geometry) はマンデルブロによって提唱された理論で，従来のユークリッド幾何学では取り扱うことのできなかつた形を記述することができる点に特徴がある (Mandelbrot, 1982)。自然界に存在する山の稜線や，地図上の海岸線などの輪郭を調べると，いたるところで微分不可能な曲線となっている。これらの形はフラクタルと呼ばれる性質をもつ。図-1にはコンピュータで描かれたフラクタル図形が示してある

が，フラクタルな図形の重要な性質の一つが，自己相似性 (self-similarity) である。つまり図形の一部を拡大すると全体と同じような形になっている。拡大するにつれて図形の細部が際限なく見えてくる。そのためにたとえば図-1の左端のコッホ曲線では図形としての大きさは有限であるが，その長さは無限大になっている。このような図形の性質を示す方法として，拡大にともなう図形の細部の出現程度を計測することによりフラクタル次元 (D) を求めることができる。したがってフラクタル次元は図形の複雑さの程度を表す指標といえる。通常の次元とは異なり，フラクタル次元は非整数値を持つという特徴がある。図-1のコッホ曲線の D は $\log 4 / \log 3 = 1.2618\cdots$ ，シェルピンスキーのガスケットでは $D = \log 3 / \log 2 = 1.5849\cdots$ ，となっている。フラクタルが存在するユークリッド次元を d とすると，通常のフラクタル図形において決定される D は d よりも小さい。平面上に分布する点の集合や点の直線的な並びなどでは D が 0 から 1 の値をとる。不規則な曲線や輪郭では $1 < D < 2$ となる。平面を覆う特殊なベアノ曲線では $D = 2$ ，起伏のある表面では $2 < D < 3$ となる。

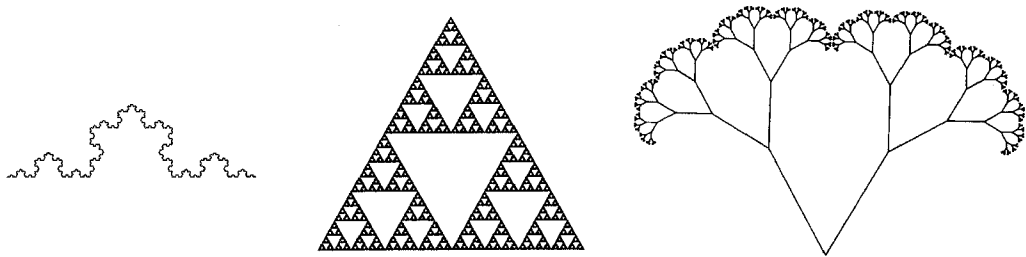


図-1 コッホ曲線 (左), シェルピンスキーのガスケット (中) およびフラクタル樹形 (右)

3. フラクタル次元の求め方

2次元平面上の図形の輪郭のフラクタル次元を測定するために用いられる方法として、コンパス法 (折れ線法), ボックスカウンティング法 (グリッド法), ダイレーション法 (膨張法), 質量法 (砂箱法) などがある (Landini, 1996)。

ボックスカウンティング法 (Box counting method): まず図形を一边 r の正方形の網目で覆う (図-2)。図形の一部が少しでも含まれる網目の数の総数 N を数える。 r の値を様々に変えてその時の $N(r)$ を求める。フラクタル図形では N と r のそれぞれの対数値を縦軸と横軸にプロットすると右下がりの回帰直線, つまりべき乗の関係が得られる。この傾きの絶対値が D となる (図-3)。つまり

$$N(r) = k \cdot r^{-D} \quad (1)$$

ここで k は定数。式(1)から決定される D をボックスカウント次元 (box counting dimension) または単にボックス次元 (box dimension) と呼ばれている (Feder, 1988)。

ダイレーション法 (Dilation method): 図形の境界を一定の長さだけ外側に膨張させる。膨張操作によって, もとの図形の細かい部分が消失して, 滑らかになってくる。ダイレーションの単位長さ (エレメント) n と, ダイレーション後に変換された図形の面積 $S(n)$ との関係から次式によりフラクタル次元が求まる。

$$\frac{S(n)}{n} = k \cdot n^{1-D} \quad (2)$$

ここで k は比例定数, D はフラクタル次元である。

この方法は Flook (1978) によって開発された。菅田ら (1992) はエレメントとして長さではなく面積を用いることにより, 測定上の誤差を少なくする方法を提案している。ダイレーション法はプログラムが少し複雑になるが, ボックスカウンティング法と比べて図形の配置や画素化にあたっての誤差が少ないことが報告されている (Smith *et al.*, 1996)。

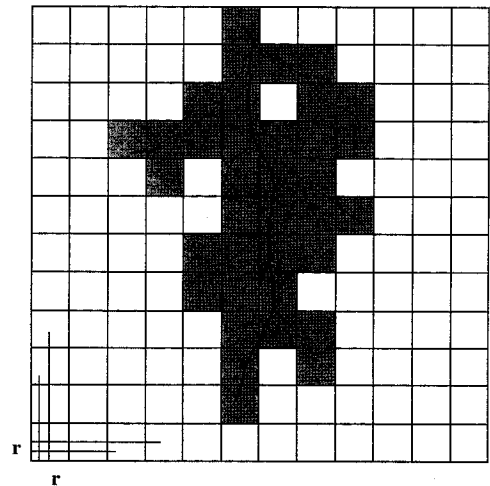


図-2 ボックスカウンティング法によるフラクタル次元の測定法

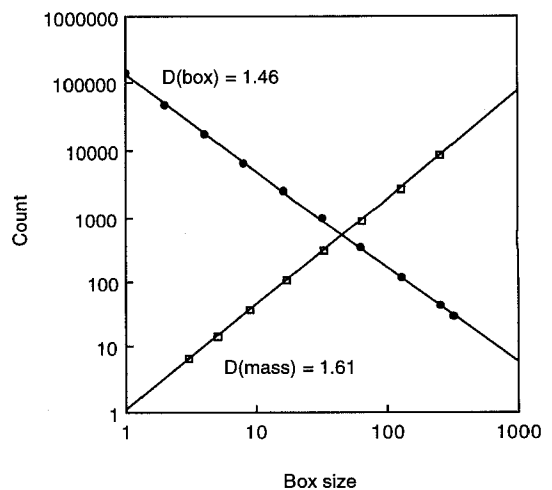


図-3 ボックスカウンティング法と質量法で測定したボックスサイズとボックス数またはボックス内の画素数との関係 (ササゲ根系)

質量法 (Mass-radius method) : 図形上の任意の点を中心にサイズの異なる円 (直径, r) もしくは正方形 (一辺, r) を置き, それらの中に含まれる画素数 (M) を数える。 r を変えて $M(r)$ を計測する。図形がフラクタルの場合, 対数グラフに r と M の計測値をプロットすると正の傾きをもった回帰直線が得られる。この傾きが求める D である (図-3)。

$$M(r) = F \cdot r^D \quad (3)$$

ここで F は係数であり, 回帰直線の y 軸切片に相当する。

この測定法はボックスカウンティング法とよく似ているが, ボックスに含まれる画素の情報を加味している点に違いがある。ボックスカウンティング法では, 測定するボックス内にたとえ海岸線が 1 回横切っていても複数回横切っていても全て 1 としかカウントしない。いっぽう質量法では計測円もしくは正方形の中に含まれる画素の数が測定対象量として扱われている。コッホ曲線 (図-1) のような再帰的方法に従って描き出される決定論的なフラクタル (Vicsek, 1989) では, ボックスカウンティング法で得られる D (ボックス次元) と質量法で得られる D (質量次元) の両者の値は一致する。しかし, 根系などの自然界のフラクタルでは両者の D が一致しない場合が多い (表-1)。通常, 質量次元の方が大きくなる。このくい違いは, ボックスカウンティング法と質量法とは同じ図形の性質を異なる側面から評価しているために生じる。

4. 根系における D

平面上に展開した根系についてボックスカウンティング法を適用すると, 通常 2 オーダー以上の範囲でボックスの 1 辺の長さ r と $N(r)$ のそれぞれの対数値の間に直

表-1 異なる方法で求めたフラクタル次元の比較¹⁾

	ボックス法	質量法	膨張法
ガスカート ²⁾	1.552	1.594	1.441
根系 ³⁾			
ササゲ 1	1.451	1.518	1.447
ササゲ 2	1.464	1.518	1.459
キマメ 1	1.417	1.512	1.440
キマメ 2	1.364	1.462	1.379

¹⁾ ボックス法では 320 倍, 質量法では 257 倍のボックス倍率まで, 膨張法では 64 回のダイレーションを行い測定した。

²⁾ シェルピンスキーのガスカート (理論値は 1.5849 ...)

³⁾ 播種後 2 週間の根箱栽培した根系

線的な関係が認められる (図-3)。このことは 2 次元に展開した根系の形がフラクタルであることを示している (Tatsumi *et al.*, 1989)。イネ科やマメ科植物において, 根箱-ピンボード法で 2 次元展開して調べられた多くの根系で同様な関係が認められ, 得られた D は 1 から 2 の間に分布する (Eghball *et al.*, 1993; Fitter and Stickland, 1992 a; 巽, 1995; Tatsumi, 1996)。また, グロースポーチで生育した根系 (Akasaka *et al.*, 1998), 圃場から採取された土壌コア中から取出した根系の一部 (巽・鳥居, 1996), 根端培養した根 (Izumi *et al.*, 1995) などを平面展開して得られた根系像もベキ乗のスケールリング特性を持つことが報告されている。

ここで注意しなければならない点は, 根系をはじめとする自然界のフラクタルでは, 式(1)で示されるような r と $N(r)$ の直線関係が成り立つスケール範囲が限定されることである。決定論的なフラクタル図形は無限に拡大しても r と $N(r)$ の直線関係が保たれるが, 自然界のフラクタルでは一定限度以上の拡大や縮小を行うと構造が単純となり自己相似的な性質が失われ, r と $N(r)$ とのベキ乗の関係が成立しなくなる。つまり r の上限域と下限域が存在する。根系の場合, 通常 0.2 mm 程度から数 10 mm 程度にわたって良好な直線関係が確認される (Tatsumi *et al.*, 1989)。0.2 mm よりも小さなスケール域での性質は明らかにされていないが, イネの根では側根 (分枝根) の直径が 0.08 mm ~ 0.16 mm, 根毛の直径が 0.01 mm 程度である (森田, 1998) ことから考えて, r の下限域は 0.2 mm より小さいと想像される。このスケールを越えて拡大を続けると根系としての構造が消失することになる。いっぽうボックスの 1 辺の長さ r が数十 mm を越えてさらに増加するとボックスのサイズが根系の広がりより大きくなり, N のカウントがついには 1 となる。それ以上 r が増加しても N は減少しない。このように r の上限域は, 根系の広がりによって規定される。

根系について求めた D は数学的に厳密な D ではなく, 経験的 (empirical) な D ということができる。コッホ曲線などのフラクタルにおいては, 厳密な自己相似性が成り立つ。しかし根系では, 拡大/縮小した形がもとの形に「似ている」だけである。つまり自己相似といっても統計的な意味でのことである。このような不規則なフラクタルを記述するには, 自己相似性よりもスケール不変性 (scale-invariance) という用語を用いた方がより妥当である (Vicsek, 1989)。

根系の D をボックスカウンティング法で求める際に, 上・下の限界域より外側のデータを除いて $r \sim N(r)$ のプロットを回帰直線で近似するが, その際 1 本よりも 2

本の直線で近似した方がより高いフィットに見える場合がしばしばある。図-4 はダイズの根系について測定した例を示す (Tatsumi, 1996)。11 mm 付近を境にして2本の回帰直線で近似すると、それより高倍率 (r が小) での傾きは 1.55、それより低倍率 (r が大) での傾きは 1.83 と計算される。この根系では 11 mm 付近を境界にしてそれより小さな構造に関して $D=1.55$ のフラクタル次元を有し、それより大きな構造については $D=1.83$ の次元を有すると解釈できる。このような例は、ボックスカウンティング法で測定されたつる性の植物の地上部 (Morse *et al.*, 1985) や血管 (松尾, 1992) においても指摘されている。根系において見いだされる2つの D は、生長の経過とともに相互に密接な関係を保って変化すると予想される。しかし、高倍率で求めた D は根系の生長とともに非常に緩やかに低下し、一方低倍率での D は急速に増加することが示されている (巽ら, 1995)。また根系の生長速度が変化した場合、低倍率での D は高倍率の D よりも敏感に変化する。傾きの異なる回帰直線がオーバーラップするスケール域は構造的に異なる性質が相接する特異常とも位置づけられ (Sugihara and May, 1990)、根系形態がスケール的な性質の異なる複数の構築ルールによって形成されていると仮定すれば以上の結果がよく理解できる。しかしこの点に関する研究は少なく、今後さらに検討されねばならない。

5. 根系の D とトポロジー

D で示される根系の複雑さの程度は、根系の分布特性を強く反映するものであるが、根系構造を直接記述するものではない。しかし、根系の構造はその分布特性を媒介として D と間接的に関連しているであろう。根系にお

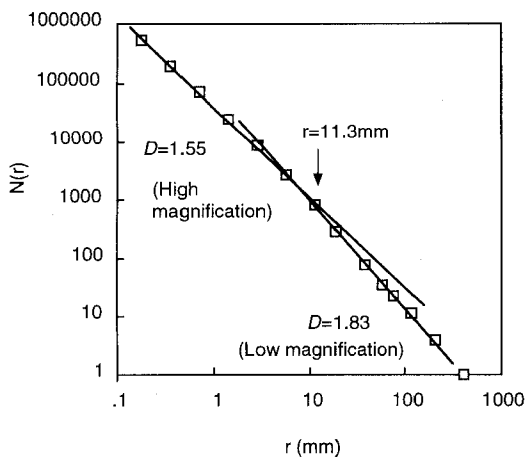


図-4 2本の回帰直線を用いた近似 (ダイズ根系)

ける D の構築構造的な意味を明らかにすることは根のフラクタル解析を進展させる上で必須である。根系の構造 (構築構造) を定量的に評価する方法の一つとしてトポロジーを利用したアプローチがある (Fitter and Stickland, 1991)。簡単に述べると次のようである。

分枝した根をリンク (link) の集合体と考える (図-5)。1本のリンクは隣り合った分枝点どうしを結ぶ根軸、または根端と分枝点を結ぶ根軸に相当する部分である。リンクには根端を有する外部リンク (exterior link あるいは external link) と根端を持たない内部リンク (interior link あるいは internal link) とが区別できる。根系の基部から順にリンクを経由して、ある1つの根端までたどった場合、最大のリンクを必要とする経路のリンク数を Altitude (a) とする。根系基部から各根端のリンクにいたるのに必要な経路リンク数の合計を Total exterior pathlength (Pe) とする。いま図-5のような、システムサイズすなわち根端数 (μ) が同じであるが分枝状態が両極端に異なる根系として魚骨型 (左) と二分枝型 (右) を考える。計算で求められる a と Pe はそれぞれ 4 と 13 および 3 と 12 となる。このように a と Pe を指標として、同じ根端数を有していても分枝状態が異なる根系を定量的に区別することが可能になる。これらのパラメータはシステムサイズに従属しているので、根端数の異なる根系を相互に比較するためにはシステムサイズの影響を消去する必要がある。そのためにランダム分枝モデルを導入する。ランダム分枝における a と Pe の期待値 $E(a)$ と $E(Pe)$ を各 μ について求めることができる。根端数 (μ) をもつ根系で得られた a と Pe をそれ

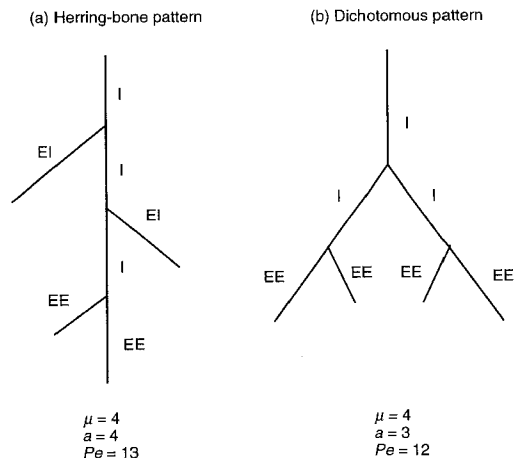


図-5 魚骨型 (a) と二分枝型 (b) 根系におけるトポロジー
I は内部リンクを、EI と EE は外部リンクを示す。

ぞれ同じ μ での $E(a)$ と $E(Pe)$ を基準とした指標で示せばシステムサイズの違いを消去できる。このようにしてトポロジー指数 $a/E(a)$ および $Pe/E(Pe)$ が得られる。 $a/E(a)$ および $Pe/E(Pe)$ はそれぞれ魚骨型で最大となり、二叉分枝型で最小値となる。通常の根系はこの両者の間の値をとることになり、トポロジー指数の大きさを比較することによって根系の分枝状態を定量化することができる。

トポロジー指数と D との関係解析した研究はまだ少ない。マメ科作物の根系では、 D と根端数、根長との間に高い正の相関が存在するが(巽, 1995)、いっぽう D とトポロジー指数との間には高い負の相関が認められる(Tatsumi, 1996)。後者の相関は、生長速度の低下した根系では消失することなどから、構築構造の変化が根の分布パターンを媒介として D に反映されることが示された(Tatsumi and Takagai, 1997)。Fitter and Stickland (1992 a) は牧草類の根系を調べ、発育時期によって根系の D とトポロジーとの関係が変化すると指摘している。根の分枝習性は植物種によって様々である。根系のトポロジーと D の関係について、さらに多くのデータの集積が必要である。

6. その他のフラクタル測度

1) **Lacunarity (L)**: Mandelbrot (1982) がすでに指摘しているように、 D の値のみで図形の形態のすべての情報を代表させるには十分でない。 D は単に形の複雑さの程度を示すだけで、どのような形かという情報は与えてくれない。 D が同じか極めて近い値を示す場合であっても、その形が大きく異なる場合が知られている(Smith *et al.*, 1996)。図-6 はケツルアズキ (blackgram) とササゲの根系である。両者のボックス次元を測定すると、それぞれ 1.44 という同じ値が得られる。しかし、直感的に根の分布がかなり異なっているのがわかる。 D で記述されないフラクタル的な性質を示すために Mandelbrot (1982) は lacunarity (空隙性) という概念を提出している (lacunarity の訳語については、広中ら (1985) にしたがった)。Lacuna はラテン語で隙間や空隙を意味する。空隙性は図形に含まれるギャップにもとづく影響を記述した測度であり、フラクタルにおけるテクスチャーに関係する性質である。

空隙性を計算するためのいくつかの方法が提案されているが、それぞれに長所と短所が存在する (Allain and Cloitre, 1991)。Landini ら (1995) は次のようにして網膜の血管分布の空隙性を求めた。

質量法において D を求めるために用いた式 (3) の右辺の係数 F は、両対数グラフの回帰直線の y 軸切片に相

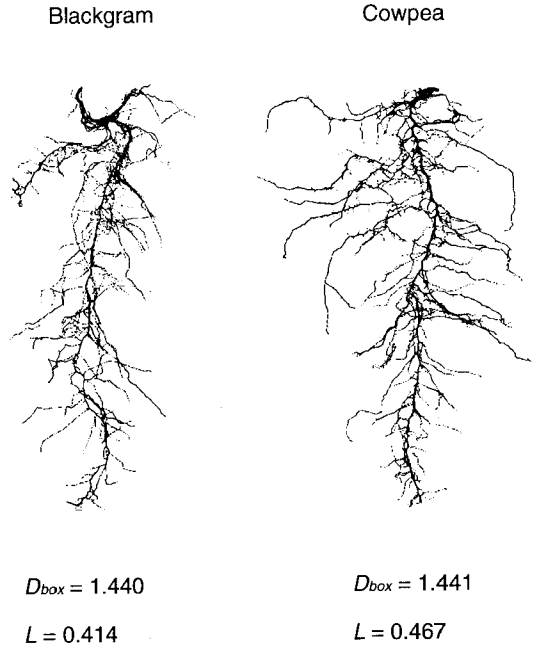


図-6 播種後2週間目のケツルアズキ (左) とササゲ (右) の根系
 図中の D はボックス法で求めたフラクタル次元、 L は質量の変動係数との関連で求めた空隙性を示す。

当する。いま測定しようとする図形上の様々な場所を中心に質量法で $r-M(r)$ 関係を測定すると、回帰直線から得られる F が場所によって変動するだろう。この変動は観測する範囲に存在するギャップの大きさや数の分布と関係している。質量の係数に関連する空隙性 Λ として Mandelbrot (1982) が与えた式に F を当てはめて次のような空隙性の計算式が得られる。

$$\Lambda = \left\langle \left(\frac{F}{\langle F \rangle} - 1 \right)^2 \right\rangle \quad (4)$$

ここで $\langle \rangle$ は期待値を示す記号。

この2次式は観測される質量と期待される質量との違いを示している。空隙性が高い場合は $F < \langle F \rangle$ との差が大きくなり Λ が大きくなる。いっぽう空隙性が低い場合は $F > \langle F \rangle$ との差が小さくなり、両者の比が1に近づく。したがって Λ が0に近づく。たとえば図形が直線や円などの場合、その上のどの場所を中心に測定しても F は変動せず、したがって期待値の F と測定値の F とは一致する。よって $F/\langle F \rangle$ の比は1となり、空隙性 Λ はゼロと計算される。

いっぽう Smith ら (1996) は次のようにして神経細胞の形態の空隙性を求めた。図形上の任意の点を中心とし

であるサイズのボックス (円または正方形) を置き、その中に含まれる質量としての画素数を数える。計測される画素数はボックスの中心の位置する場所によって変動するだろう。図形上のある点 p を中心とした 1 辺 r の正方形のボックス内に観測される画素数は、 p の位置が隙間の多い領域に近づくほど小さくなり、逆に p の位置が図形が密に分布する領域に近づくほど大きくなる。図形上のたくさんの場所において、一定サイズのボックスを用いて測定をくり返し、画素数 M の変動係数 (CV, coefficient of variation) を求める。式(3)より M は r の関数であり、ボックスの大きさ r に依存して変化する。ボックスサイズを広い範囲で変化させて、それぞれのサイズにおける測定値 M の CV を求める。求める空隙性 L はこれらの各スケールにおいて得られた CV の平均値で表される。これは、質量の変動係数との関連で定義される空隙性である。

図-7 中の数字には、このようにして求めた直線、シェルピンスキーのガスケット、フラクタル樹形、および播種後 2 週間目のササゲ根系における CV の平均値から求められる空隙性 L を示してある。直線では L が 0.04 と理論値の 0 に近いが完全に 0 とはならない。図-1 に示したシェルピンスキーのガスケットでは 0.14、フラクタル樹形では 0.31、ササゲ根系では 0.47 という値が得られる。シェルピンスキーのガスケットとササゲ根系について求められた D はそれぞれ 1.59 と 1.57 で非常に接近しているが、 L を指標に見ると大きな差が認められ

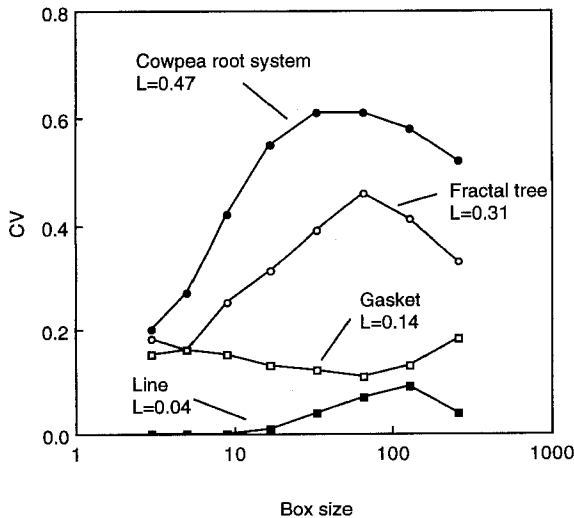


図-7 各ボックスサイズにおける画素数の変動係数 (CV) およびその平均値から求めた空隙性 (L)
100 反復測定による。

る。

完全な自己相似図形ではボックスサイズ r が変化しても CV は一定のはずである。シェルピンスキーのガスケットでは予想されるように測定した r の全範囲で CV はほぼ一定である (図-7)。直線図形ではボックスサイズが 9 ピクセルまでは CV が 0 であるが、それ以降は増加の傾向を示す。これは測定に供した直線に両終端が存在するために生じた測定誤差である (Obert, 1993)。したがって理論値の 0 よりわずかに大きい値が得られている。いっぽうフラクタル樹形やササゲ根系の CV は r に依存して大幅に変動している。これは測定上の誤差のためだけではない。この変動の主な理由は、これらの図形が一樣でないフラクタル (nonuniform fractal) のために生じたと考えられる (Mandelbrot, 1982)。たとえば、フラクタル樹形の場合、幹に相当する部分では直線が主体で単純な形であるが、樹冠部では複雑な形をしている。当然測定値が場所によって大きく変動するであろう。Keller と Chen (1989) は樹皮やウールなどの、 D だけでは明瞭に区別し難いがテクスチャーが明らかに異なる画像について、確率分布による空隙性を検討した。その結果ボックスサイズの関数として示される空隙性の変化のパターンが、テクスチャーの違いを示すことを明らかにしている。

エイジや発育程度の異なるインゲン根系について、 L と D の関係を調べると、全体として両者に負の相関 ($r = -0.72$) が認められる (図-8)。いっぽう神経細胞においても比較的高い負の相関が報告されている (Smith *et al.*, 1996)。全体として L と D の両者は相互に深く関連していると考えられる。しかし、図-5 で見たように、同じ D を示す 2 つの根系形態の違いを区別するための指標として空隙性が有力な候補の一つとなるであろう。

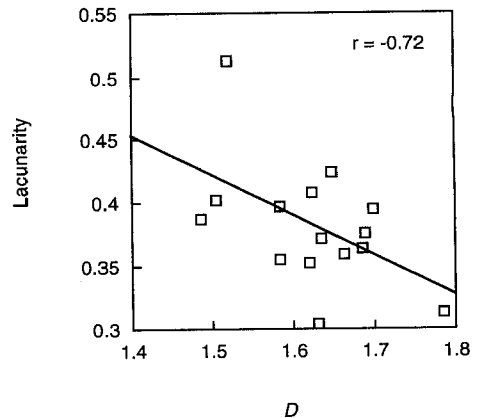


図-8 質量次元と空隙性との関係 (インゲン根系)

2) マルチフラクタル (Multifractal) : 質量法によって図形のさまざまな部位における比較的狭い範囲 (ここでは 65×65 画素の範囲) を測定して得られる局所的なフラクタル次元 (D_{local}) を図-1のコッホ曲線とフラクタル樹形について求め、その分布を示したものが図-9である。コッホ曲線では比較的狭い範囲内に D が分布しているが、樹形では D が幅広く分布している。理論的にはコッホ曲線の D 分布は1点に収束するはずであるが、この測定では、印刷した図形をスキャナで取り込んで計測したので測定上の誤差からデータにばらつきが出ている。測定値を平均して求めた D は1.28であり、コッホ曲線の理論的な D である1.2618と比較して1.6%ほどの差がある。

図-1の図形を見てすぐ判ることだが、コッホ曲線では両端付近以外の図形上のどの位置に測定中心をもってきても、測定エリア内には同じ形が出現する。しかし樹形の場合には測定するエリアを幹の根元に持ってくると単純な形となり、当然低い D を示すことになる。逆に良く繁った樹冠の部分では高い D が期待される。一様でないフラクタルでは局所的なフラクタル次元が測定場所に依存して変動することが知られている。このように一つの D の代わりに局所次元のスペクトルによって図形の性質を示すことができる。これはマルチフラクタル的なアプローチである (Landini, 1996)。

図-10はダイズ根系について D_{local} を質量法で測定してランク分けし、出現頻度の分布パターン、すなわちマ

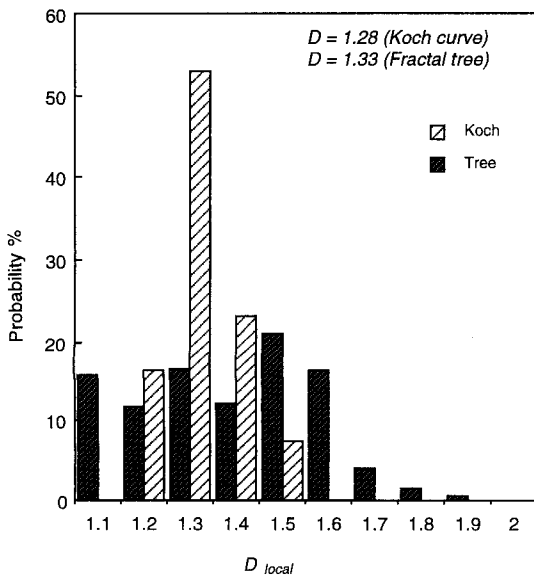


図-9 フラクタル図形における局所次元のスペクトル

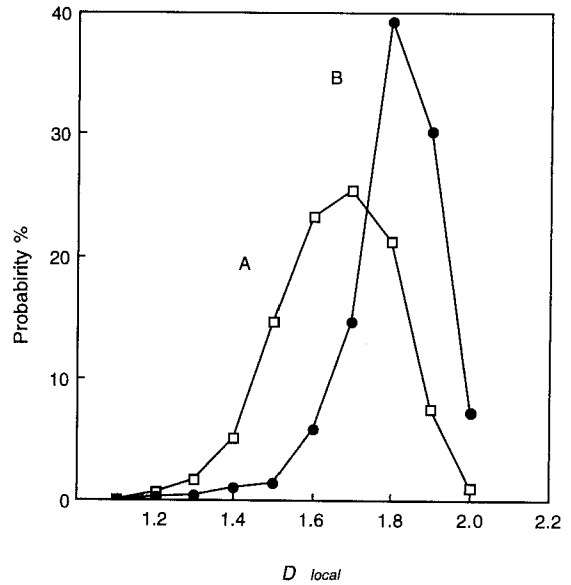


図-10 2つのダイズ根系 (A, B) における局所次元のスペクトルの違い

ルチフラクタルスペクトルを示したものである。Aの根系では D_{local} が幅広く分布しているのに対して、Bの根系では分布が集中してピークが高い。このような分布特性の差異を調べることによって、大域的 (global) な D で示し得ない根系のフラクタル的な特徴の違いを示すことができる。すなわち D_{local} の分布の広い根系ではマルチフラクタル的な性質が強いということである。根箱に生育したダイズについて調べた結果によると、全体的に一樣に良く発達した根系では D_{local} の分布は集中的でモード値の頻度が高く、モード値をはさんで左右に比較対称的に分布するが、未発達な部分を多く有する根系では、モード値そのものと頻度が低下し、分布が幅広い傾向を示す (巽, 未発表)。 D_{local} を平均して得られる質量次元は根系全体の大域的なフラクタル次元にほぼ相当する。

空隙性やマルチフラクタルを取り入れた解析法は、根系の構築構造をより詳細に把握する上で有効だと考えられる。トポロジーとの関係を含めてさらに検討される価値があろう。

7. 3次元における根系のフラクタル

以上触れてきた主題は根系を平面上に展開して得られる投影像に関してであった。これ以外に、根系のフラクタルをめぐってさまざまな課題が存在している。根系の一部と全体との関わりの問題、3次元における根系のフラクタル、フラクタルモデルを利用したシミュレーション

ンなどである。

このなかで特に今後検討されなければならない問題が、根系の3次元的な取扱いである。土壌断面に出現する根系をトレースする方法は、実際の根の土壌中での配置を良く保存している点において、根箱-ピンボード法で採取した根系像よりも優れている。しかし逆に根箱-ピンボード法では根系全体を把握できる点で有利である。Berntson (1994) は根箱栽培した根系の平面投影像から求めた D は、根系像の過度の単純化のために根の生長の違いを十分表現できない場合があると指摘している。田中ら (1990) は立方体の根箱に栽培したサイズの根系を調べ、その3次元的な分布がフラクタルであることを明らかにした。中道ら (1998) はダットンソバの根系を立体的に解析し、根系の水平断面と垂直断面のフラクタル次元の間に高い相関が得られたと報告している。Eshel (1998) は矮性トマトの根をゼラチンに埋包し、3 mm 毎にスライスして断面に現れる根系のフラクタル次元を調べた。Nielsen ら (1997) はモデル化したトマト根系を用いて、1次元、2次元および3次元における根系のフラクタル次元の相互関係を調べ、根系の2次元断面から3次元におけるフラクタル次元を正確に推定可能であると指摘している。

8. おわりに

根系研究の大きな目的の一つに圃場土壌中における根の分布の正確な把握がある。この目的のために、圃場にライゾトロンを設置したり、深い塹壕を掘ったりする。しかし、多大な資金と労力を払って調べられた根の分布に関する貴重なデータが、土壌中の3次元根系の特性を定量的に把握するために十分有効に利用されてきたとは言いがたい (Fitter and Stickland, 1992)。フラクタルによる解析はこの問題を乗り越えるための有力なプローブの一つである。根系構造とフラクタル測度との関係を解きほぐす努力を通じて、土壌中の根系構造の体系的な理解が一層進展するであろう。

引用文献

- Akasaka, Y., M. Mii and H. Daimon (1998): Morphological alterations and root nodule formation in *Agrobacterium rhizogenes*-mediated transgenic hairy roots of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Ann. Bot.* **81**: 355-362.
- Allain, C. and M. Cloitre (1991): Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physic. Rev. A* **344**: 3552-3558.
- Berntson, G.M. (1994): Root system and fractals: How reliable are calculations of fractal dimensions?. *Ann. Bot.* **73**: 281-284.
- Eghball, B., J.R. Settini, J.W. Maranville and A.M. Parkhurst (1993): Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. *Agron. J.* **85**: 287-289.
- Eshel, A. (1998): On the fractal dimension of a root system. *Plant Cell Environ.* **21**: 247-251.
- Feder, J. (1988): *Fractals*. Plenum Publishing, New York (フラクタル, 松下貢・早川美徳・佐藤信一訳, 啓学出版, 1991).
- Fitter, F.A. and T.R. Stickland, (1991): Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. *New Phytol.* **118**: 383-389.
- Fitter, F.A. and T.R. Stickland, (1992 a): Fractal characterization of root system architecture. *Funct. Ecol.* **6**: 632-635.
- Fitter, F.A. and T.R. Stickland, (1992 b): Architectural analysis of plant root systems III. Studies on plants under field conditions. *New Phytol.* **121**: 243-248.
- Flook, A.G. (1978) The use of dilation logic on the quantimet to achieve fractal dimension characterization of textured and structured profiles. *Powder Tech.* **21**: 295-298.
- 菅田栄一・土門正治・佐々木武仁 (1992): 血管の分布とフラクタル, 医学・生物学におけるフラクタル (松下貢編著), 朝倉書店, 東京. 21-33.
- Izumi, Y., Y. Kono, A. Yamauchi and M. Iijima (1995): Analysis of timecourse changes in root system morphology of rice in excised root culture. *Jpn. J. Crop Sci.* **64**: 626-643.
- Keller, J.M. and S. Chen (1989): Texture description and segmentation through fractal geometry. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **45**: 150-166.
- Landini, G., P.I. Murry and G.P. Misson (1995): Local connected fractal dimensions and lacunarity analyses of 60° fluorescein angiograms. *Invest. Ophthalmology Visual Sci.* **36**: 2749-2755.
- Landini, G. (1996): Applications of fractal geometry in pathology. In *fractal geometry in biological systems, an analytical approach*. (P. M. Iannaccone and M.K. Khokha, eds.), CRC Press, Boca Raton. 203-246.

- Mandelbrot, B.B. (1982): The fractal geometry of nature. W.H. Freeman & Company, New York (広中平祐監訳, フラクタル幾何学, 日経サイエンス, 1985).
- 松尾 崇 (1992): 血管の分布とフラクタル, 医学・生物学におけるフラクタル (松下貢編著), 朝倉書店, 東京, 51-65.
- Morse, D.R., J.H. Lawton, M.M. Dodson and M.H. Williamson (1985): Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. *Nature* **314**: 731-733.
- 森田茂紀 (1998): 根毛, 根の事典 (根の事典編集委員会編), 朝倉書店, 東京, 7-8.
- 中道英人・井上直人・侯野敏子 (1998): ダットンソバ根系の立体配置の解析手法. 北陸作物学会報 **33**: 121-125.
- Nielsen, K.L., J.P. Lynch and H.N. Weiss (1997): Fractal geometry of bean root systems: Correlations between spatial and fractal dimension. *Amer. J. Bot.* **84**: 26-33.
- Obert, M. (1993): Numerical estimates of the fractal dimension D and the lacunarity L by the mass radius relation. *Fractals* **1**: 711-721.
- Smith, T.G. Jr., G.D. Lang and W.B. Marks (1996): Fractal methods and results in cellular morphology - dimensions, lacunarity and multifractals. *J. Neuro. Method* **69**: 123-136.
- Sugihara, G. and R.M. May (1990): Applications of fractals in ecology. *Tree* **5**: 79-86.
- 田中典幸・有馬 進・原田二郎・三原 実 (1990): ダイズの根系構造に関する研究-パイプモデルと相似性について. 日作紀 **59** (別1): 252-253.
- Tatsumi, J., A. Yamauchi and Y. Kono (1989): Fractal analysis of plant root systems. *Ann. Bot.* **64**: 499-503.
- 巽 二郎 (1995): フラクタル解析による根系分布パターンの定量的評価. 日作紀 **64**: 50-57.
- 巽 二郎・高貝公一郎・弘 央子 (1995): インゲンマメ根系のフラクタル構造: 異なるスケール範囲における次元の挙動. 日作紀 **64** (別1): 90-91.
- Tatsumi, J. (1996): Fractal analysis of root distribution. In *Dynamics of Roots and Nitrogen in Cropping Systems of the Semi-Arid Tropics* (O. Ito *et al.* eds.), JIRCAS, Tsukuba. 547-557.
- 巽 二郎・鳥居美香 (1996): 作物の根の分布のダイナミクスに関する研究 1. 土壌コアに含まれる水稻根形態のフラクタル特性. 日作紀 **65** (別2): 291-292.
- Tatsumi, J. and K. Takagai (1997): Fractal characterization of root system architecture in legume seedlings. *Fractal Frontiers* (M.M. Novak and T. G. Dewey, eds), World Scientific, Singapore. 359-365.
- Vicsek, T. (1989): Fractal growth phenomena. World Scientific, Singapore (フラクタル成長現象, 宮島佐介訳, 朝倉書店, 1990).

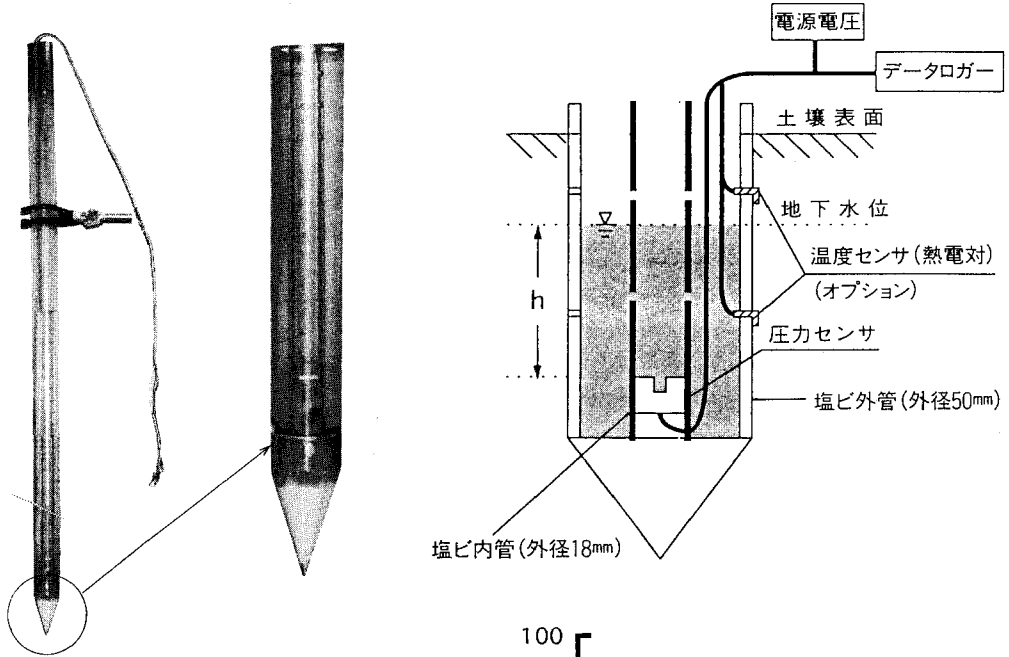
受稿年月日: 1999年1月25日

受理年月日: 1999年3月19日

地下水の動きを迅速かつ容易に見る

圧力センサ式地下水位メータ (EN-GW-501)

1. 構成



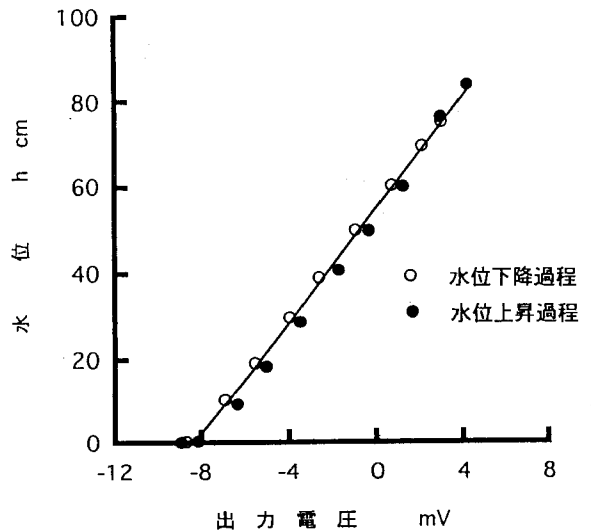
2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

1)仕様

定格圧力	0~ 9.81×10^{-2} MPa (0~1000cmH ₂ O)
最大圧力	0.196MPa
動作精度	±0.3% FS (0~50℃)
ヒステリシス	定格圧力の1%以下
アナログ出力	
オフセット電圧	±5 mV (0MPa)
スパン電圧	100 mV ±50mV
駆動電流	1.5 [mA]

2)特性

圧力センサの出力電圧の初期値(水位0cm)によらず水位と出力電圧は直線関係を保ち、ヒステリシスは非常に小さい(直線性/ヒステリシス=±0.3%FS)



3. 地下水位メータ仕様

1)標準仕様	外管・内管 1 m 延長ケーブル 5 m
2)オプション	外管・内管 1 m以上 電源装置 埋設用オーガー

エンドウ理化

〒001 札幌市北区新琴似10条7丁目3-16

☎ (011) 763-1088

FAX (011) 763-1667

根の電気生理研究法

—ラボラトリーからフィールドへ—

岡本 尚・正木伸之

Electro-physiological Study of Tree Root System —From Laboratory into the Field—

Hisashi OKAMOTO* and Nobuyuki MASAKI**

* Mori Laboratory of Plant Physiology, 443-5 Enden,
 Mori-machi, Shizuoka, 437-0221 Japan

** Masaki Laboratory of Arboriculture, 729-2 Higashihara,
 Toyoda-cho, Shizuoka, 438-0802 Japan

Abstract

Theoretical back-ground and principle of electro-physiological method for the study of root physiology were reviewed. The applicability of a model of electro-physiological structure to the root system in the field was experimentally examined and discussed. A convenient system via a perfect liquid junction was developed for long term measurement of trans-root electric potential (TRP) in field trees. The electro-radicogram of a *kaki* tree (*Diospyros kaki*) showed a regular diurnal changes. The seasonal change in the potential level and in the amplitude of oscillation was observed, and discussed in relation to the root activity and the environment.

Key words : Electro-physiology of root system, Trans-root electric potential of a *kaki* tree, Electro-radicogram

序 論

筆者 (H.O.) は永年研究室内で主として高等植物の胚軸を材料にして、伸長成長機構の解明の手段として電気生理学的方法を開発し、常用してきた。根の硝酸吸収機構の解析を行った事もあるが、経験は少ない。定年になる数年前から両筆者の共同研究によって、野外の木本植物の樹勢診断の一つの手段として根の生理活性を非破壊的に計測する方法の開発を志してきた。

様々な制約から実験室内で開発された方法がそのままの形で野外で使えるとは限らない。例えば細胞膜電位そのものを直接計測するには、根の研究したい部位を切り出して適当な実験液中に置き、しっかりした力学的基礎のうゑに固定された精密なマイクロマニピュレータを用いて、先端径が1 μ m程度の細胞内微小電極を細胞内に刺

入しなくてはならない。根の一部を切り出す事自体、すでに非破壊的計測ではなくなっている。しかしそのような精密且つ徹底した方法によって得られた理論的帰結、本文で紹介する電気生理学的構造の理論は、細胞内微小電極法の直接には使えない野外の樹木の問題を考える場合の仮説として、実験的研究を進めるための指針とすることはできる。この小論では実験室内での研究の概略とそこから得られた経験と理論に基づいて、電気生理学的実験にとっては制約の多い野外での非破壊計測法を開発してきたプロセスを紹介する。

1. 室内での研究

室内実験の有利な点は細胞内微小電極法が適用出来ることである。但し強固な細胞壁に囲まれた微小な植物細胞に電極を入れるには、動物細胞によく用いられる手動

* 森植物生理研究室 〒437-0221 静岡県森町円田 443-5

** 正木樹芸研究所 〒438-0802 静岡県豊田町東原 729-2

キーワード: 根系の電気生理, カキの木導管電位, 根電図

式のマクロマニピュレータを安易に用いることは避けたほうが良い。我々は空気中で垂直に置かれた胚軸の導管灌流法 (Okamoto *et al.* 1984) による研究には、上下動のために顕微鏡のメカニカルフレームを土台とし、その上に在来型のマニピュレータの前後左右動ユニットを取り付け、細胞内に電極を刺す最終段は水圧駆動ユニット (一次元) を用いた。根に刺し入れるには材料を水平に置き、顕微鏡の微粗動ユニットのみを用いた。この様な工夫によって長時間、安定した測定結果が得られる。

これらの研究によると植物軸性器官の電気生理学的構造の基本は図-1 に示される。その特徴は

- (1) 柔組織細胞は導管を取り巻くディスク状のシンプラスト構造を形成している (Katou 1978)。
- (2) シンプラスト間には絶縁構造 (根の場合はカスパーリ線) があり、直接の外部環境であるアポプラストを導管側と器官表面側とに分ける。したがってそれぞれの側の膜電位は値が通常異なる (Okamoto *et al.* 1978, 79)。
- (3) それぞれの側のシンプラスト膜には呼吸依存性の外向き起電性プロトンポンプが存在し、膜電位の約半分はこの活動によって保たれている (Okamoto *et al.* 1978, 79, Mizuno *et al.* 1985, Katou and Okamoto 1992)。

図-2 にこのような系の anoxia (材料を閉じこめた空間に、99.998% の N_2 を流して一気に呼吸を止めること) に対する反応を示す。伸長帯では V_{px} の起電性成分の大きさが V_{ps} のそれと同程度あり、しかも両者の反応に時間差があるために、 $V_s = V_{px} - V_{ps}$ の反応に著しい二相性が生じる。

このような構造はオオバコ (*Plantago sp.*) の根系にも存在することがオランダの研究グループによって後に確認された。細胞内微小電極を用いない彼らの実験系では説明のつかなかった Trans-root potential (図-4 の V_x) の anoxia に対する二相性反応 (図 2-B の V_s の反応に相当する) が我々のモデルで完全に説明できることに気づいたからである (De Boer *et al.* 1983, De Boer and Prins 1985)。

この機構モデルが野外の樹木の根系にも適用出来るか否かを見極める前段階として、われわれはマツ苗の水耕系でモデル実験を行い、あわせてマツノサイセンチュウの感染の TRP に対する影響を研究した (Okamoto *et al.* 1994, 図-3, 4)。

2. 野外における実験

野外の樹木の根を対象とした非破壊的計測には今のところ細胞内微小電極法の応用は困難である (水耕栽培系

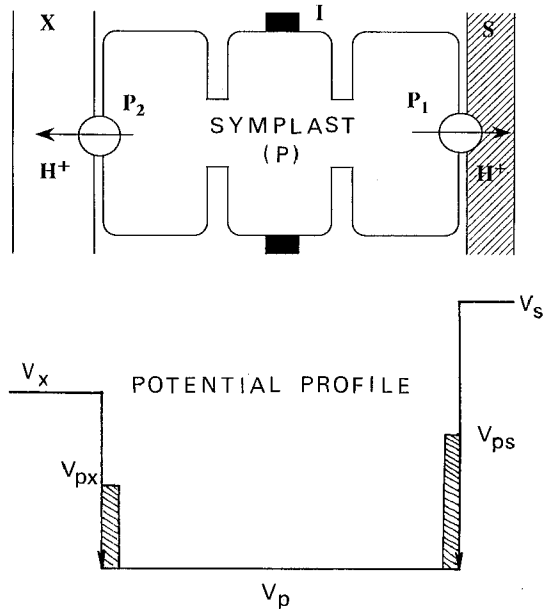


図-1 植物軸性器官の電気生理学的構造モデル: P, 原形質連絡でつながって形成されたシンプラスト; S, 器官表面側細胞壁; X, 導管; I, イオンと水に対する絶縁構造 (根の場合はカスパーリ線); P₁, 器官表面側プロトンポンプ; P₂, 導管側プロトンポンプ; V_x, 導管の電位; V_p, シンプラスト内の電位; V_s, 表面側細胞壁の電位; V_{px}, 導管側膜電位差 (斜線部分はプロトンポンプ活性で維持される起電性成分, anoxia で消滅する); V_{ps}, 器官表面側膜電位差 (斜線部分は同上)

Fig. 1 Electro-physiological model of plant axial organs: P, symplast; S, cell wall phase of organ surface; X, xylem vessel; I, insulating structure against movement of ions and water (e.g. Casparian strip in root); P₁, proton pump in the cell membrane of the organ surface; P₂, proton pump in the cell membrane of the xylem/symplast interface; V_x, electric potential of the xylem; V_p, electric potential in the symplast; V_s, that of the cell wall on the organ surface; V_{px}, membrane potential across xylem/symplast interface; V_{ps}, membrane potential across organ surface. Shadow parts mean the electrogenic activity which is reversibly extinguished by anoxia.

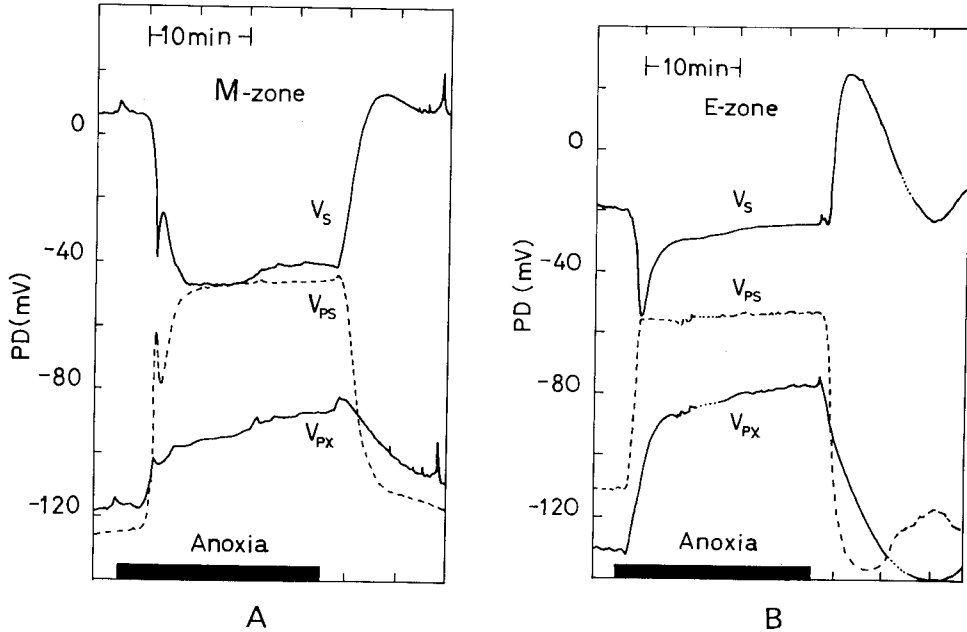


図-2 電位プロファイルを形成する3成分の anoxia に対する反応：A (M-zone), 既伸長帯；B (E-zone), 伸長帯 (Okamoto *et al.* 1978 より改変)。電位測定は $V_x (=0)$ を基準にしている。

Fig. 2 Anoxia reaction of the three components of the potential profile. A, mature zone; B, elongation zone of the *Vigna* hypocotyl in which bi-phasic reaction of V_s is observed because the V_{px} value is comparable with that of V_{ps} , but reacts slower than the latter.

から一本の根をマイクロコンピュータ下に出して測ることは可能かも知れない)。ここでは樹木根系の生理活性を地上から非破壊的に探る一つの試みとして導管電位 (Trans-root electric potential, TRP) を野外で長期連続測定できる実験系を開発した結果を報告する (図-5)。野外の現場での使用を考え、可能な限り簡単化した、正確な測定のために次の要件は守られている。

1. 植物体と計測器との接続は、分極による非生物学的な電位差の発生を避けるために、完全な液絡系 (10 m mol/l KCl 液を満たしたチューブに注射針をつなぐ) と非分極性電極を介して行わねばならない。もちろんアース側も溶液アースとする (図-5 参照。素焼円筒の壁の微小孔を通して、10 mmol/l KCl 液が絶えず地中に浸出している。円筒内に入れた非分極性電極はインピーダンス変換器の電源の 0 電位点に接続されている)。
2. 測定対象の抵抗は時として数 MΩ に達することがあるので、インピーダンス変換器として入力抵抗が 10^{12} Ω 程度あるオペアンプ、例えば AD 515 (Analog Devices 社) を間に入れる (増幅率は 1 に定め、増幅は記録計に任せればよい)。エレクトロニクスを用いる計測の基本的常識であるが、測定器の

入力側から見た内部抵抗が、測定対象の抵抗より充分高くないと直流電圧誤差を生じる。100 倍で誤差約 1%、1,000 倍で誤差約 0.1% になる。

記録には横河電機製 $\mu R 1000$ 打点式 6 チャンネル記録計を主に用いた (記録紙送り速度 1 mm/h が可能)。またノイズ計測等、より速い連続的計測の必要な場合には同じく 2 チャンネル・ペンレコーダ (横河電機 3057 型) を用いた。野外移動用には Data Logger が適当である。例えば Datamark LS 2000 (白山工業) で野外記録を取り、コントロールソフト SR 2000 でコンピューターに入力、プリントアウトさせる。

導管電位の誘導には、図-1, 4 の「電気生理学的構造モデル」(岡本 1991, Katou and Okamoto 1992) が樹木に適用できることを前提にすると、マイクロな針を直接導管そのものに刺し入れる必要は無い。この前提はマツ苗を材料とした室内実験その他で次第に確かめられて来ている。マクロな注射針を絶縁構造を通過して木部に刺し入れ、生きた細胞があるとすればその何個かを破壊して、導管部アポプラストと液絡を取る事ができる。この方法の妥当性を示す実験結果を図-6 に示した。

10 mmol/l KCl 溶液を満たした注射針を導管部に刺すと必ず瞬間的に -140 mV を超える大きな負の電位が

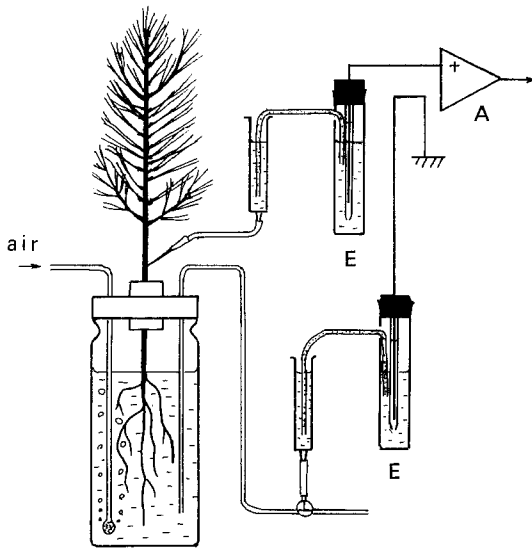


図-3 マツ苗の導管電位 (V_x , Trans-root potential) を計測する完全液絡系: E, 非分極性電極と, それを容れた容器

Fig. 3 An indoor system for the measurement of trans-root electric potential (TRP) of young pine plants with unpolarizable electrodes (E) and perfect liquid junctions.

観測されるが, この大きな TRP は最初急速に, ついでゆっくりと小さくなり, 何時間後にはほぼ一定のレベルに落ち着く。刺入の深さが深いほど時間がかかるが, 最終的に落ち着くレベルはほぼ同じである (図-6)。この現象は図-4 に示した電気生理学的構造モデルから容易に説明される。即ち刺入の刺激によって, 導管/シンプラスト界面の膜電位差が瞬間的に脱分極し, ついで次第に回復して行くと考えると合理的に理解出来る。この解釈が正しければ, 我々はこの現象を通じて本来は細胞内微小電極を用いなくとも直接測ることの出来ない二つの膜電位差について, その最小値をかきまみることが出来るのである (V_{px} が脱分極して一瞬 0 になれば, TRP は一時的にであるが V_{ps} に等しくなる)。

図-5 の方法による TRP の測定 の安定度と, 外部環境の擾乱がどの程度のノイズを与えるかを図-7 に示す (豪雨の影響は恐らく根の周囲のイオン濃度の低下によるものであろう。強風は測定系, 材料双方に加わる機械的振動に起因すると想像する)。

また応用例として, 幹直径が 28 cm, 樹齢約 50 年の次郎柿の木 (写真) を対象とした, 2 年間の連続計測結果を下に示した。

1. TRP は四季をつうじて規則正しい日周期的振動

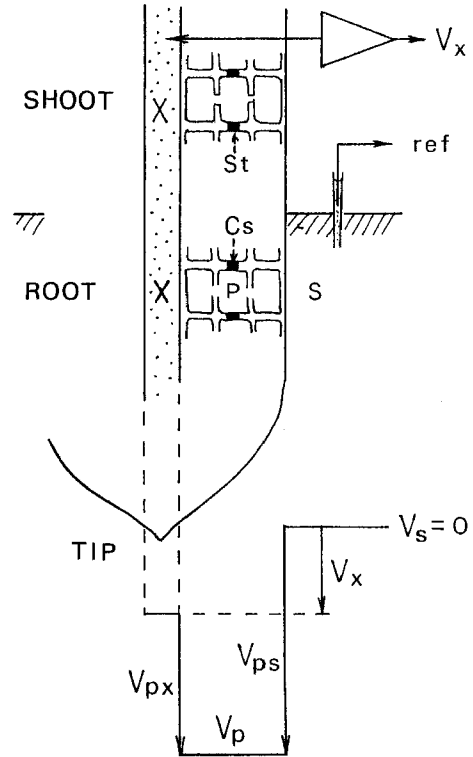


図-4 根の電気生理学的構造と導管電位 (TRP) の測定系 (模式図, Okamoto *et al.* 1994) 電位測定 の基準は図-2 の場合とちがって $V_s (=0)$ におかれている。

Fig. 4 A scheme of the measuring system for the trans-root potential: P, symplast; Cs, Casparian strip; St, starch sheath; S, bulk water phase surrounding the root; ref., reference electrode (liquid earth in Fig. 5); V_x , electric potential in xylem apoplast with respect to S, = TRP; The other notations are identical with those in Fig. 1.

を示す (図-8)。このような図を根電図 (electro-radiogram または ERG) と呼ぶ。

2. その平均のレベルは, 根の成長が最少になる真冬と真夏に -70 mV の極小値を, 成長が最大になる春と秋に -30 mV の極大値を示す (図-9)。

3. ERG の振幅は, 今までカキでは 3 月頃とされてきた根の活動開始時期 (福井 1997) より早い節分の頃から大きくなる。早春, 開葉直前に最大 70 mV となり, 葉が完全に展開し, 蒸散の盛んな真夏から初秋にかけて最小 10 mV となる (図-10)。(95-96 年度の結果を 96-97 年度のそれと比較したとき, 落葉期の傾向はよく一致す

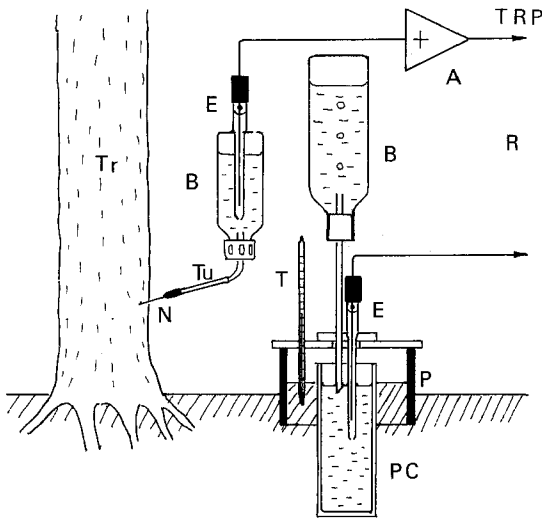


図-5 野外の樹木根系の導管電位 (TRP) の測定系: Tr, 幹; N, 注射針; Tu, フレキシブルな管; B, プラスチック容器; E, 非分極性電極 (pH メータ用比較電極, 2470-A10T 堀場-日立, 京都); T, 温度計; PC, 素焼円筒 (厚さ 5mm, 小平市津田, 岡本窯製); P, 硬質ビニール製円筒; A, インピーダンス変換器 (増幅率×1, 入力抵抗 $10^{12} \Omega$, オペアンプ AD-515 JH 使用); R, レコーダの入力端へ (Okamoto *et al.* JPR 1999 より)

Fig. 5 A measuring system for the TRP in a field tree; N, injection needle (0.6 mm); Tu, flexible tube; B, plastic bottle; E, unipolarizable electrode; PC, unglazed ceramic porous cylinder; A, impedance convertor

るが開葉期のそれにはかなりの差が認められる。これは 96-97 年度の春から夏にかけて著しく降雨が多かった為に、両年度の月平均振幅の差と月間降雨量の差との間には高い相関がある。図-11 参照)。

この方法の限界は言うまでもなく細胞内微小電極法と違って膜電位そのものではなく、特別な瞬間を除いて二つの膜電位の差しか測れない事である。しかし様々な考察から、これらの TRP の変化は起電性プロトンポンプの活動と水の能動的向頂輸送との関係を示唆するものと考えられる。

電気生理学的構造の項で述べた内外二つのプロトンポンプのうち、導管側プロトンポンプの役割は導管柔組織細胞から導管側アポプラストへのプロトンの放出と、それによって発生する膜電位差、もしくはプロトン駆動力を原動力とする溶質の取り込みであると考えられ、ササ

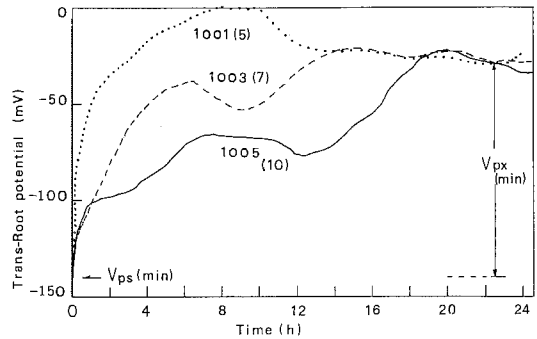


図-6 注射針刺入直後の TRP の変化とその後の経過: 95 年 10 月 1, 3, 5 日, () 内は刺入の深さ (mm), その他は本文参照。 (Okamoto *et al.* JPR 1999 より)

Fig. 6 Transient change in the TRP after sticking the needle: (), depth of the tip in mm

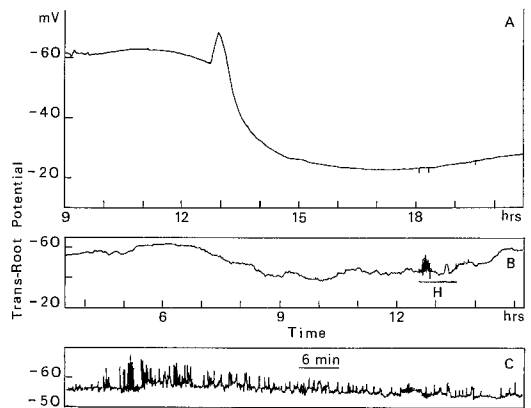


図-7 計測と記録の安定性: A, 静穏な日の ERG (97 年 2 月 23 日); B, 豪雨 (H, 97 年 8 月 8 日) に伴うノイズ; C, 強風によるノイズ (20 m/秒, 95 年 12 月 30 日)。Okamoto *et al.* JPR 1999 より)

Fig. 7 Stability of the measurement and the noise from the environment: A, ERG in a calm day; B, an example of noise with a heavy rain; C, an example of noise with a strong wind (20 m/sec)

ゲ胚軸の場合このような機構でのカリウムの取り込みが導管灌流法 (Okamoto *et al.* 1984) によって実証されている (De Boer *et al.* 1985)。空気中で成長する胚軸とは異なり、根の表面側プロトンポンプにも当然溶質吸収の駆動力を発生する役割がある。加藤らはこれらの一次的、二次的溶質能動輸送系に縁どられたアポプラスト・



写真 野外実験に用いられたカキの木：地上15cmにおける幹直径約28cm，樹齢約50年。樹下のテント内に測定系が格納されている。

Photo. Persimmon tree used in the experiment (*Diospyros kaki* cultivar. *jiro*). 28 cm in the trunk diameter, age: ca. 50 years.

カナルが、三次的には水の能動的輸送を可能にする共役の場になり得ることに着目して建設したカナル・モデル (Katou and Furumoto 1986a, b) を根にも適用し、計算機実験によって根による水の能動的向上輸送における起電性プロトンポンプの役割を提示した (Katou *et al.* 1989, Taura *et al.* 1988)。

これらの知見をバックグラウンドとして野外のカキの木で得られたERGの年変化の意味を考察して見る。

1. 広葉樹では根の発達の最大は春と秋に、最少は夏と冬に来ると言われる (秦野, 佐々木 1991)。これに対してTRPの最も浅くなる (絶対値が最小になる) のは春と秋、最も深くなる (絶対値が最大になる) のは夏と冬である (図-9)。TRPが最も浅くなると言うことは、導管側の膜電位、したがって導管側プロトンポンプの活性が表面側のそれと比較して相対的に最大であることを意味する (図-4 参照)。

2. 戦前東大小石川植物園で長期にわたって行われた

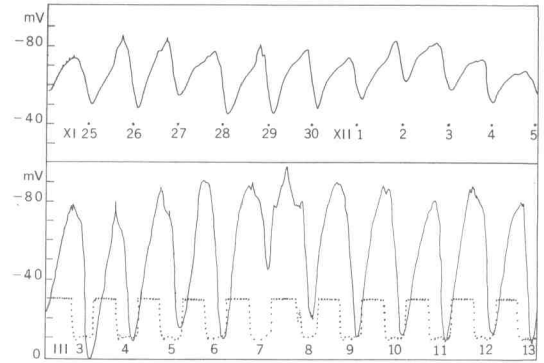


図-8A 落葉相におけるERG

上, 1995年11月25日-12月5日

落葉直後；点は正午を示す。

下, 1996年3月3日-3月13日

開葉の3週間前；点線は照度，下ほど高い。

Fig. 8A An example of ERG in defoliate phase: upper, just after defoliation, each dot means noon; lower, 3 weeks before leaf sprouting. Dotted line means the relative light intensity (the lower the stronger).

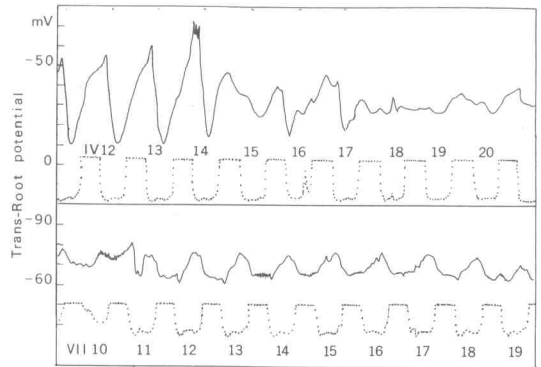


図-8B 開葉相におけるERG

上, 1996年4月12日-4月20日

開葉直後；途中から蒸散の盛んな相への移行が見られる。

下, 1996年7月10日-7月19日

葉が完全に展開した時期のERG (Okamoto *et al.* JPR 1999より)

Fig. 8B An example of ERG in foliate phase: upper, just after foliation; lower, ERG after complete development of the leaves.

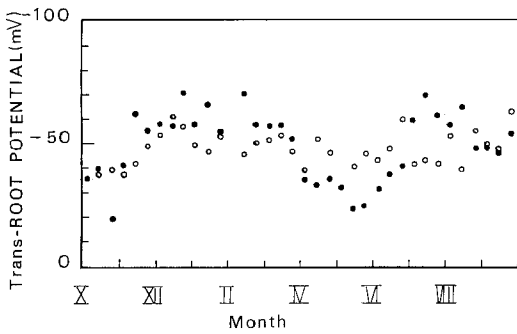


図-9 TRP の旬間平均水準の季節変化：
黒丸：1995年10月-1996年9月
白丸：1996年10月-1997年9月
(Okamoto *et al.* JPR 1999 より)

Fig. 9 Annual changes in the TRP on the average for each ten days: closed circle, 1995-1996; open circle, 1996-1997

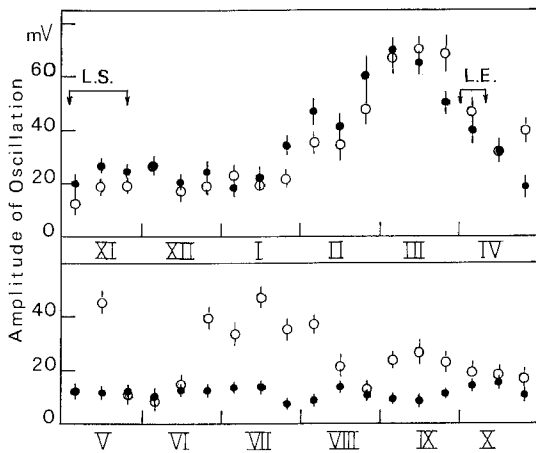


図-10 ERG 振幅旬間平均の季節変化：
黒丸：1995年11月-1996年10月
白丸：1996年11月-1997年10月
L.S., 落葉; L.E., 開葉
(Okamoto *et al.* JPR 1999 より)

Fig. 10 Annual changes in the amplitude of ERG on the average for each ten days: closed circle, 1995-1996; open circle, 1996-1997

ミズキの幹の導管液圧の自動計測によると、液圧は春先、葉の展開の始まる直前、または直後に最大となり、その後一過性の急落が起こってから徐々に減少して行くことが報告されている(中野1937)。このことはERG 振幅の最大が開葉直前に観測される事とよく対応してお

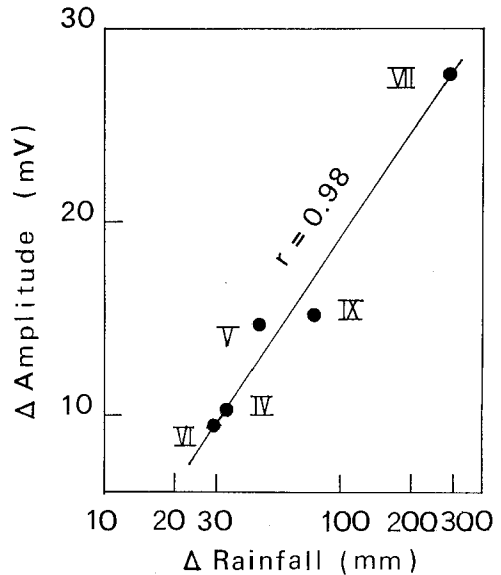


図-11 1996年と1997年の開葉期におけるERG 振幅の月間平均の差と月間平均降雨量の差との相関 (Okamoto *et al.* JPR 1999 より)

Fig. 11 The relationship of the difference between 1996 and 1997 in the total monthly precipitation with that in the amplitude of ERG on the average per each month in the foliate phase

り、起電性プロトンポンプの働きと水の能動的向上輸送との関連を示唆している。

この可能性をさらに探っていくために導管液の圧力を同時計測出来る装置を開発し、シンポジウムで報告したが、紙数の関係でこの紙上では割愛する。

引用文献

- De Boer, A.H., Katou, K., Mizuno, A., Kojima, H. and Okamoto, H. (1985): The role of electric xylem pumps in K^+ absorption from the xylem of *Vigna unguiculata*: the effect of auxin and fusicoccin. *Plant Cell Environ.*, 8: 579-586.
- De Boer, A.H. and Prins, H.B.A. (1985): Xylem perfusion of tap root segments of *Plantago maritima*: the physiological significance of electrogenic xylem pumps. *Plant Cell Environ.*, 8: 587-591.
- De Boer, A.H., Prins, H.B.A. and Zanstra, P.E. (1983): Bi-phasic composition of trans-root electric potential in roots of *Plantago* species: involvement of spatially separated electrogenic pumps.

- Planta, **157** : 259-266.
- 福井博一 (1997) : カキの根の生育と養分吸収. 現代農業, **76** (5) : 286-290.
- Hammel, H.T. (1968) : Measurement of turgor pressure and its gradient in the phloem of oak. Plant Physiol., **43** : 1042-1048.
- 畑野健一・佐々木恵彦 (1991) : 樹木の成長と環境, p. 179, 養賢堂, 東京.
- Katou, K. (1978) : Distribution of electric potential and ion transport in the hypocotyl of *Vigna sesquipedalis* V. Electrogenic activity of the parenchyma cells in hypocotyl segments. Plant Cell Physiol., **19** : 525-535.
- Katou, K. and Furumoto, M. (1986a) : A mechanism of respiration-dependent water uptake in higher plants. Protoplasma, **130** : 80-82.
- Katou, K. and Furumoto, M. (1986b) : A mechanism of respiration-dependent water uptake enhanced by auxin. Protoplasma, **133** : 174-185.
- Katou, K. and Okamoto, H. (1992) : Symplast as a functional unit in plant growth. Intern. Rev. Cytology, **142** : 263-304.
- Katou, K., Taura, T. and Furumoto, M. (1989) : A biophysical model for water movement in roots : Root exudation and root pressure. B.C. Loughman *et al.* (Eds.) Structural and Functional Aspects of Transport in Roots, p.147-150. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Mizuno, A., Kojima, H., Katou, K. and Okamoto, H. (1985) : The electrogenic proton pumping from parenchyma symplast into xylem —direct demonstration by xylem perfusion. Plant Cell Environ., **8** : 525-529.
- Nakano, H. (1937) : Über den wechsel des Blutungsdrucks von *Cornus contraversa* Hemsl. J. Fac. Sci., Imper, Univ. Tokyo, Sect. III Botany V., part II : 75-193.
- 岡本 尚 (1991) : 植物の知られざる生命力, 科学全書, 40 : p. 41-100. 大月書店, 東京.
- Okamoto, H., Hasuike, S., Masaki, N. and Shinobe, T. (1994) : Long term measurement of the xylem potential by unpolarizable electrodes via liquid junction. J. Plant Res., **107** : 177-180.
- Okamoto, H., Ichino, K. and Katou, K. (1978) : Radial electrogenic activity in the stem of *V. sesquipedalis* : involvement of spatially separate pumps. Plant Cell Environ., **1** : 279-284.
- Okamoto, H., Katou, K. and Ichino, K. (1979) : Distribution of electric potential and ion transport in the hypocotyl of *Vigna sesquipedalis* VI. The dual structure of radial electric activity. Plant Cell Physiol., **20** : 103-114.
- Okamoto, H. and Masaki, N. (1999) : Long term measurement of the trans-root electric potential in a persimmon tree in the field. J. Plant Res., **112** : 123-130.
- Okamoto, H., Mizuno, A., Katou, K., Ono, Y., Matsumura, Y. and Kojima, H. (1984) : A new method in growth-electrophysiology : Pressurized intraorgan perfusion. Plant, Cell Environ., **7** : 139-147.
- Taura, T., Iwaikawa, Y., Furumoto, M. and Katou, K. (1988) : A model for radial water transport across plant roots. Protoplasma, **144** : 170-179.

受稿年月日 : 1999年1月4日
 受理年月日 : 1999年5月10日

中性子線による根—土壌系の水の CT イメージング

中西友子*・古川 純*・松林政仁**

CT Imaging of Water in Root-Soil System by Neutron Beam

Tomoko M. NAKANISHI*, Jun FURUKAWA* and Masashi MATSUBAYASHI**

* Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

** Neutron Research Center, Tokai Establishment, Japan
 Atomic Energy Research Institute

Abstract

We present neutron imaging of water in root-soil system by an X-ray film method as well as CT method. In the case of an X-ray film method, a soybean seedling grown in a thin aluminum container was fixed on an aluminum cassette and was irradiated for 19 seconds by thermal neutrons from a research reactor, JRR-3M, installed at Japan Atomic Energy Research Institute. The neutron flux from the reactor was 1.5×10^8 n/cm²·s. A gadolinium n/γ converter, which thickness was 25 μm, and an X-ray film were sealed in vacuum in the cassette. To get a CT image, the soybean seedling grown in a cylindrical container was fixed on a rotating disk and was irradiated for 4 seconds per projection. The neutrons penetrating the sample was converted to photons by a fluorescence converter. The photon image was guided to a cooled CCD camera using two mirrors. The sample was rotated with an interval of 1 degree for 180 degree, i.e. 180 images were obtained for the CT construction. Neutron beams allowed to image not only a root imbedded in soil but also water movement in the vicinity of the root. The method is non-destructive, therefore, morphological development of the root but also water movement near the root was able to be visualized. Through piling up the CT images, which were successively taken every 50 μm, three dimensional water image of the root-soil system was constructed.

Key words : neutron beam, CT imaging, soybean, water image, root-soil system

1. はじめに

水は生体の基本物質であるにもかかわらずその動態はほとんど知られていない。その最大の理由のひとつに計測手法がまだ未発達な点が挙げられる。

根の水分吸収モデルは Gardner (1960) が提唱した考え方がその基本であり、根は一様なシリンダーとみなされてきた。つまり、根のモデル化においては一本の根の水分吸収能の多様性について考慮に入れられてきていない。それは、根の水分吸収動態を最も直接的に反映していると予想される、根から 1 mm 以内における土壌中の根近傍の水分動態について、実際の実験が困難なことか

らほとんど測定値が報告されてこなかったからである。

我々は水の構成元素である水素により特異的に吸収・散乱する中性子線を用い、生体物質とくに生きた植物試料を中心にその中に含まれる水の動態を非破壊状態で可視化させることを試みてきた (Nakanishi *et al.*, 1997, 1998)。本法を用いると根—土壌系において育成中の根の形態および根近傍の水分像を得ることができる (Furukawa *et al.*, 1999)。

非破壊計測手法として生体試料の可視化法に通常よく用いられる X 線は、原子番号の高い、いわゆる固いものの検出に役立ってきた。一方、中性子線は X 線とは逆に柔らかいもの、とくに水素、リチウム、ホウ素などを検

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

** 日本原子力研究所中性子科学研究センター中性子利用技術開発室 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根

キーワード: 中性子線, CT イメージング, サイズ, 水分像, 根—土壌系

出すことができる。電子と相互作用する X 線の場合には、一般に元素の外殻電子密度が高くなるに従い次第に通過する線量が減少するが、中性子線の場合には核反応であるため元素によって阻止される線量は X 線の 100 倍から 1,000 倍も異なる。特に水素の場合には重金属元素よりも約 1,000 倍吸収・散乱能があるため、生体に中性子線を照射すると水素に特異的な像を得ることができる。生きている細胞の約 8 割は水で構成されているため、水素の像とは水の像であり、つまり水により組織の形態が示されることになる。

水の計測には NMR 法も可能であるが、試料の大きさに限りがあること、また空間分解能は理論的に $10\mu\text{m}$ 以下にはならないことが証明されている (Callaghan, 1991)。そのため、非破壊状態で生体物質中の水の動態を高い分解能で調べるためには、中性子線の利用が最良な手法といえるだろう。

本研究では、我々が今まで行ってきた X 線フィルムを用いた中性子線による可視化手法をさらに発展させ、CCD カメラを用いた多角度における像から CT 像 (Computer Tomography, 断面像) を得ることを試みた。X 線フィルム法とは全く異なる可視化系を組み立てて得られた像をコンピュータで処理したところ、空間的な根-土壌系の水分像を得ることができたので報告する。

2. 実験方法

1) X 線フィルム法

実験は日本原子力研究所の研究炉 JRR-3M の路室内で行った。植物試料はダイズ (*Glycine Max. Merr. cv. Tsurunoko*) を用いた。播種後、根の長さが約 30 mm に育成した段階で水分を 18% 添加した豊浦標準砂を充填させたアルミニウム製の薄い容器 (70 mm × 160 mm × 3 mm, アルミニウム厚: 1 mm) に移し変え、原子炉内に

設置したファイトトロン中で育成させた。薄い容器は厚さが 3 mm となるよう、2 枚のアルミニウム板の間にスペーサーとなるアクリルの棒を挟んだ。また、アルミニウム板の内面にはテフロンシートを貼った。育成中、容器中の水分の蒸発を防ぐため、容器の周囲をアルミニウムテープで密閉した。植物試料は中性子線を照射する直前に育成器から取り出し、アルミニウム製カセット上に固定した。カセットには、試料を通り抜けた中性子線を放射線に変換するガドリニウムコンバータ (Gd を $25\mu\text{m}$ の厚さに塗布したもの) と X 線フィルム (Kodak, SR) を減圧封入させた。この試料を固定したカセットは鉛直に固定し、カセット面に垂直に中性子線の照射を 19 秒間行った (図 1 左)。原子炉からの熱中性子線束は、 $1.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ であった。

試料中の水分量を定量したり、異なる X 線フィルム像を比較したりするため、厚さが 1, 2, 3, 4 および 5 mm と階段状に異なるアルミニウム製の容器を作製し、この容器中に水を封入した標準試料用もカセットに固定して照射した。

照射後、カセットおよび植物育成容器などのアルミニウムから生成する ^{28}Al (半減期: 2.3 分) が減衰し、放出される γ 線強度が充分低くなるまで約 10 分間待った後、カセット内の X 線フィルムを取り出し現像した。使用したフィルムは乳剤が片面のみ塗布されたものであり、現像ムラが出やすいため、現像を行っている際にはフィルムを動かさないなど細心の注意が必要であった。X 線フィルム上の像は、スキャナー (Sharp 製, JX-32F6) でコンピュータに取り込み、標準試料像と比較することにより、黒化度が水分量を示すように画像を再構築した。

2) CT イメージング

播種後 5 日目のダイズ幼植物を 35 mm のアルミニウ

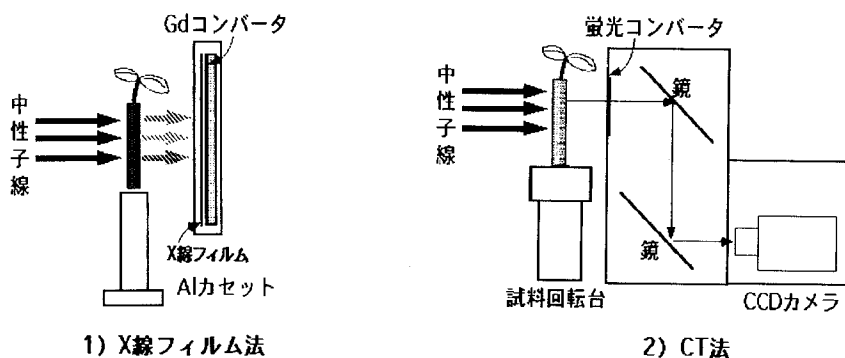


図-1 中性子線によるイメージング (X 線フィルム法および CT 法) の模式図

Fig. 1 Neutron imaging by 1) X-ray film method and 2) CT method

ム製の円筒容器（アルミニウム厚：1 mm）に移し変え、ファイトロンにて育成を行った。容器中には、水分 15% を含む、豊浦標準砂を充填し、よくシールした。植物試料はファイトロンで 3 日間生育させた後、JRR-3 M で熱中性子線を照射した。

CT 像を得るためには、何枚もの画像を処理する必要がある。しかし X 線フィルムで一枚毎の像を得ては毎回セットするフィルムの試料に対する位置が少しずつずれるため、各フィルムから取り出す像の正確な位置決めを行うことができない。そこで、X 線フィルムの代わりに分解能が高くノイズが低い冷却型 CCD カメラ（浜松ホトニクス製、C4880）を用いた。冷却型 CCD カメラを使用する場合には試料を通り抜けた中性子線を光に変換する必要がある。しかし、前述の X 線フィルム法で使用したガドリニウムコンバータでは中性子線は放射線のみに変換されるため CCD カメラでは像を得ることができない。そこで、中性子線を光に変換する蛍光コンバータの開発が必要であった。調製した蛍光コンバータ（NRC 95）は ${}^6\text{LiF}:\text{ZnS}(\text{Ag})=4:6$ となるように混合し硝酸セルロースでアルミニウム板に直接 1 mm の厚さでコーティングしたものである。また、中性子照射チェインバー内は中性子線により放射化された物質から γ 線などが発生していることから、放射線に非常に敏感なチップを内蔵した冷却型 CCD カメラはできる限りビームから遠い所で、かつ充分なしゃへい体内に設置させなくてはならない。そのため、コンバータからの光を暗箱中二つの鏡を用いて反射させ、中性子ビーム軸とは離れた位置に設置した CCD カメラへ導入した（光路：約 90 cm）。蛍光コンバータと CCD カメラの間の距離が短いほど CCD カメラで得られる像の 1 ピクセル上での画像面積の大きさが小さくなり、見かけ上での分解能は高くなる。しかし、散乱放射線による CCD カメラ内のチップの損傷をできる限り少なくするため、鏡を用いてしゃへい体内に CCD カメラを設置する必要がある。そのため蛍光コンバータからカメラまでの光路は約 90 cm となった。また試料を水平に精確に回転させる回転台も用意し、回転の制御ならびにカメラのシャッターはコンピュータにより制御できるようにした。CCD カメラにはニコン製 Micro Nikkor F=105 mm レンズを取り付けた。中性子照射チェインバー中の装置の模式図を図 1 右に示した。

植物試料は回転台に固定し中性子線のシャッターは全開とした。試料台は 1 度ずつ回転させながら各角度において 4 秒間シャッターを開き、冷却型 CCD カメラで撮像した。一つの試料で画像は 180 度まで、合計 180 枚の画像を CCD カメラで撮像しコンピュータ処理により

CT 像を構築した。取り込まれる各角度における像はリアルタイムでコンピュータによりモニターした。180 枚の画像を撮り終わるのに約 1 時間を要した。蛍光コンバータ（面積：50 mm×60 mm）の画像をコンピュータ上の 500×600 pixel の画像として取り込んだ。CT 画像を構築するためのアルゴリズムは Filtered Back Projection Method を用い、Shepp & Logan Filter を使用した。ソフトウェアは IP Lab Spectrum 3.1.1 C であった。

3. 実験結果と考察

1) X 線フィルム法

ダイズの発根し始めた根および周辺土壌中の水分像を図 2 に示す。アルミ薄箱中（厚さ 3 mm）に水分 18% を添加した豊浦標準砂中で 8 日（左図）および 15 日間（右図）育成させた場合の像である。試料中水分量が多い部分ほど通り抜けられる中性子数が減少するため、その箇

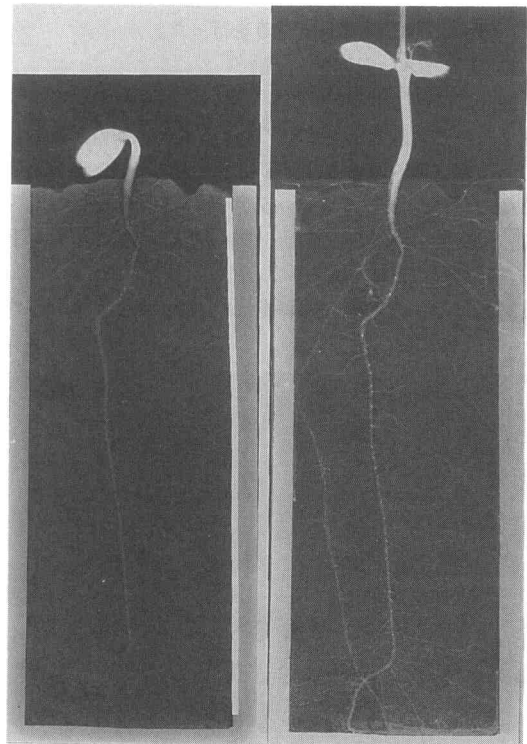


図-2 中性子線による生育過程におけるダイズの根および土壌中の水分像（左：8 日目，右：15 日目）

Fig. 2 Water imaging of soybean root imbedded in soil by neutron beam (left : 8 days, right : 15 days)

所の X 線フィルムの感光され方が少なくなり、現像後はより白い像となる。根周辺土壌中の水分量よりも根中の水分量の方が多いため、根の像が鮮明に写っている。図中、黒い箇所ほど水分が根に吸収され少なくなっていることを示している。8日目の像ではとくに主根の上部から水分が吸収されていることが根近傍の黒くなった像から判る。主根の所々白くなった点は、この箇所から側根が前方または後方に生育している所である。主根と側根が重なったため水分量が多くなりより白い像となった。

ダイズを育成させながら経時的に像を撮っていくと、根の形態変化ならびに根の長さを測定することができる。豊浦標準砂を用い、土壌水分量が15%の場合には、20 mm 厚のアルミニウム箱でもダイズの主根を像として得ることができた(データ省略)。

しかし、X 線フィルム法では試料中の全ての水分量が重なった像となるため、例えば、側根が主根の手前側から生育しているのか、または後ろ側からかというような空間的な位置関係を知ることはできない。そこで次に CT (断面) 像を構築する試みを行った。

2) CT イメージング

図3に冷却型 CCD カメラを用いて得られた、アルミニウムの円筒に育成させたダイズの根の上部の例を示した。X 線フィルム像とは異なり、蛍光コンバータを用いた像では黒いところほど水分が多い箇所を表わしている。左右の根が曲がっているのは、円筒の壁にあたり下向きとなったためである。

図3に示された像の分解能は約 $100\mu\text{m}$ と見積もられ

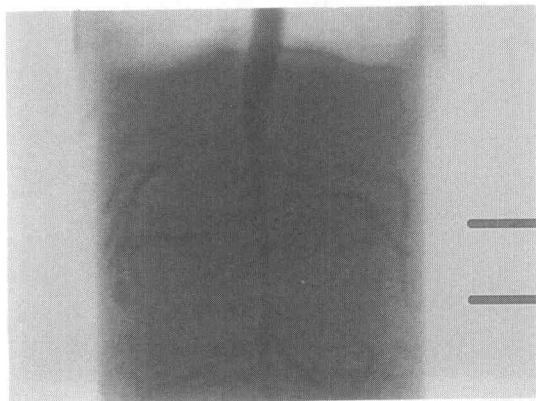


図-3 冷却型 CCD カメラで得られたダイズの根および土壌中の水分像

Fig. 3 A water image of soybean root imbedded in soil through cooled CCD camera

た。中性子線による水の可視化像の分解能は、現在のところ電子顕微鏡の場合の銅やニッケルで作製された標準物質により実際に像を作ることができないことから実験的に求めることはできない。そこで便宜的にコンピュータで取り込まれた画像上の1ピクセルの大きさで分解能を見積もっている。CT 像の場合には上述のようにカメラをコンバータに接した位置に設置できないことから X 線フィルムを用いる場合よりも分解能は低くなる。コンバータと試料間の距離が短いほど得られる像の分解能は高くなるからである。X 線フィルム法の場合にも同様に分解能は約 $16\mu\text{m}$ と見積もっている (Nakanishi et al., 1997)。

図3のような画像を各角度ごとに撮り、180枚、全ての画像から同じ高さにおける1ピクセルラインの画像を取り出して、コンピュータにより、任意の高さにおける CT 像を構築した。

図4は、図3に示した10mmの範囲の CT 像を、下部へ1mmづつ連続的に求めた CT 像である。番号が大きくなるほど試料の下部となる。これらの像の中心にある白い点は主根であり、その他の白い点は、各断面図上にある側根の像である。主根に接した黒い部分は根に吸収され土壌水分が減少したところである。これらの水平な CT スライス像は $50\mu\text{m}$ ごとに取得可能であったため、上部から下部まで全ての高さにおける CT 像を全て構築するとコンピュータ上では連続的な映像として見る事ができる(データ省略)。

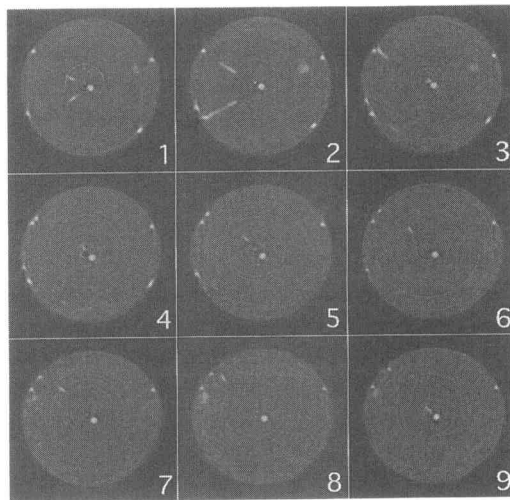


図-4 図3に示した箇所における CT 像 (上部から1mm おきに順に示した)

Fig. 4 Successive CT images, every 1 mm, at the part indicated in Fig. 4

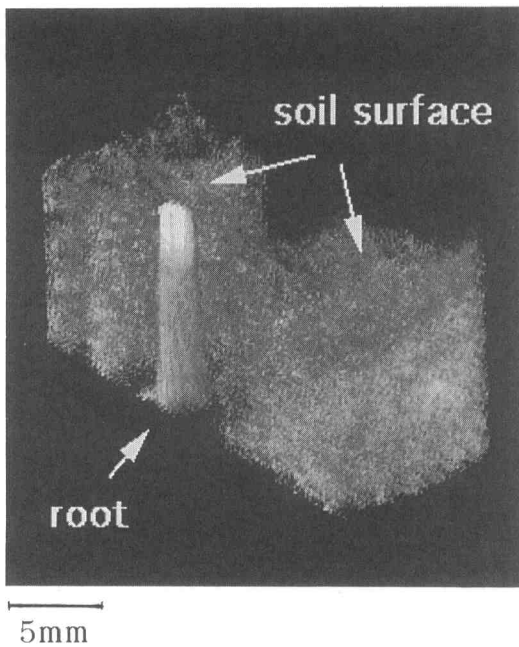


図-5 CT 像 400 枚を重ね合わせて得られた根上部の水の立体像

Fig. 5 Three dimensional water image of the upper root in soil, obtained by piling up the 400 CT images

根の上部の CT 像を 400 枚分重ね合せると高さ 2 cm の土壌中の根近傍の水分の立体像を得ることが可能であった (図 5)。この場合には、得られた CT 像を全て重ねると根が見えなくなるため、主根のところで元の画像を切り分け約半分の像を積み重ねた。中心には主根が示されており、土壌中の水分分布は根の近傍で減少していることが示された。

4. ま と め

根から 1 mm 以内の水分動態は根の活動を最も良く反映していると予想されているにも拘わらず、実際の実験が困難であることから殆ど報告されてこなかった。中性子線を用いると根および根近傍の水分分布を非破壊状態で可視化することができる。中性子線を用いた根-土壌系の空間的な水分分布像を得ることは初めての試みであ

る。装置上の問題から CCD カメラを用いた CT 画像の分解能はまだ X 線手法と比較して低いものの、全ての高さにおける水平 CT 像を用いると、任意の角度面における空間的な水の分布を可視化させることが可能である。本手法により土壌中の生きた根の活動がさらに解析されることを期待したい。

引 用 文 献

- Callaghan, P.T. (1991) : Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy. p. 203, Oxford Science, Oxford.
- Furukawa, J., Nakanishi, T.M. and Matsubayashi, M. (1999) : Neutron Radiography of a Root Growing in Soil with Vanadium. Nucl. Instrum. Meth. in Physics Research A, **424** : 116~121.
- Gardner, W.R. (1960) : Dynamics Aspects of Water Availability to Plant. Soil Sci., 89 (2), 63~73.
- Nakanishi, T.M., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M. (1997) : Water Movement in Plant. Fifth World Conference on Neutron Radiography. DGZfp (Deutsche Gesellschaft für Zertörungsfreie Prüfung E.V.) Publisher.
- Nakanishi, T.M. and Matsubayashi, M. (1997) : Nondestructive Water Imaging by Neutron Beam Analysis in Living Plants. J. Plant Phys., **151** : 442~445.
- Nakanishi, T.M. and Matsubayashi, M. (1997) : Water Imaging of Seeds by Neutron Beam. Bioimages, 5 (2) : 45~48.
- Nakanishi, T.M., Okano, T., Karakama, I., Ishihara, T. and Matsubayashi, M. (1998) : Three Dimensional Imaging of Moisture in Wood Disk by Neutron Beam During Drying Process. Holtzforschung., **52** : 673~676.
- Nakanishi, T.M., Karakama, I., Sakura, T. and Matsubayashi, M. (1998) : Moisture Imaging of a Camphor Tree by Neutron Beam. Radioisotopes, **47** : 387~491.

受稿年月日：1999年1月6日

受理年月日：1999年5月28日

土壤をそのまま測定!!

NO₃⁻ 土壤用硝酸イオンメーター

NOS-120



pH 土壤挿入式 pH 計

PHS-120



EC 土壤用 EC メーター

PK-33



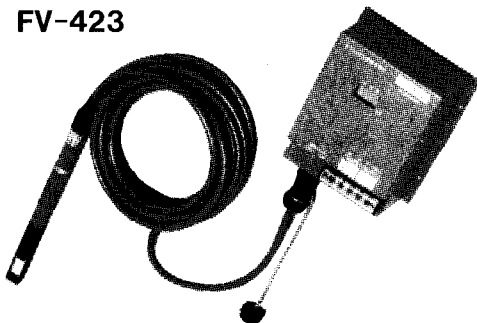
pF セラミックス土壤水分計

pF-33



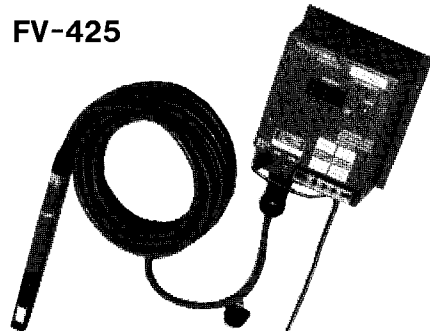
土壤 pF を連続測定及び自動灌水!!

FV-423



指示を見ながら出力(4~20mA)で
データとりも行える

FV-425



指示を見ながら設定 pF で灌水信号
を出せる(データ用に0~1V出力付)



株式
会社

藤原製作所

〒114 東京都北区西ヶ原1-46-16
TEL 03(3918)8111(代)
F X 03(3918)8119

茶園の窒素吸収効率改善

鳥山 光昭

Method of Effective Soil Control and Fertilizer Application in Tea Gardens to Increase the Recovery Rate of Nitrogen

Mitsuaki KARASUYAMA

Kagoshima Tea Experiment Station

Abstract

A large amount of nitrogen fertilizer has been applied in tea cultivation to produce the new shoots contained much amino acids. However the recovery rates of nitrogen by tea plants are comparatively low, and excessive application of nitrogen bring on the increase in nitrate concentration of the groundwater.

It could be essential for the distributed region of root system magnification in tea plants by the soil improvement before planting in tea gardens to increase the recovery rates of applied nitrogen.

We estimated that the nitrate leaching rates from tea gardens was suppressed by the use of coated fertilizer and the application of fertilizer into surface soil by injection method.

Key words : Tea gardens, roots, nitrogen, recovery rate, nitrate leaching

1. はじめに

各県では、茶園の施肥基準は10a当たり窒素50~70kg, リン酸20~30kg, カリ20~40kgと定めている。しかし、緑茶は品質による価格差が大きいことから、生産者は市場価格の良好な高アミノ酸・アミド含量の緑茶生産を目指し、窒素を多施用している。アミノ酸・アミドの大部分を占めるテアニン、アルギニン、過剰に吸収された窒素の代謝産物として増加することから品質向上に有効な施肥量が明確でない。さらに、チャの根圏域は広く、窒素の過剰障害が現れにくいことも適正施肥の障害となっている。多肥茶園では多くの細根が腐敗し、肥料の吸収利用率は低いことから、さらに肥料を増やすという悪循環を繰り返している。

このような多肥栽培は生産費を増加させるだけでなく、茶園周辺水域における硝酸態窒素の増加や亜酸化窒素の発生など環境への負荷が懸念される。

2. 施肥技術の改善

1) 養分吸収特性に応じた施肥

チャは窒素、リン酸、加里をほぼ5:1:2の割合で吸収し、窒素は品質との関係も深いことから最も重要な要素である。

チャの窒素吸収量は、定植5年後までは樹体形成のため増加するが、樹齢が進むと個体間の競合等により枝、幹等の乾物生産量が低下するため吸収量は少なくなる(橋, 1996)。成木では、年間の窒素施肥量が54kg/10aの場合、肥料窒素を20kg程度吸収するが、これ以上施肥量を増やしても吸収量はわずかしかならず増加せず、溶脱量が急増する(小川, 1981)。さらに、肥料窒素の他、土壌由来の窒素や落葉、整せん枝で土壌に還元された有機物由来の窒素など10~15kg/10a吸収する(鳥山, 1990; 橋, 1996)。肥料窒素の吸収利用率を45%とすると、成木園における10a当たりの施肥量は50kgで十分であり、これ以上の施肥量の増加は吸収利用率の著しい低下につながる。時期別の窒素吸収特性も明らかにされており(岡野ら, 1997)、これらを参考に分施することで施肥

効率は高まる。

土壌診断に基づく施肥は養分の吸収効率がよく、生産性の維持・向上と環境保全を図るためには有効な方法である。そこで、うね間土壌中のアンモニア態窒素+硝酸態窒素の量と収量、品質との関係が深いことを利用した窒素診断に基づく施肥技術が開発され(烏山, 1989)、無機態窒素の簡易分析を図るため小型反射式光度計による測定法も確立された(内村ら, 1995)。さらに、土壌埋設型 EC センサーを用いて土壌中の無機態窒素をリアルタイムで測定し、施肥管理に利用する方法も開発されている(岩橋, 1997)。

2) 施肥効率の高い資材の利用

¹⁵N 被覆尿素 70 日タイプを 2, 9 月に施用し、翌年の 11 月まで吸収と溶脱をライシメータで調査した。チャ新芽、成葉、枝など樹体内への窒素の分配は硫安に比べて少なく、溶脱量は多かった(表-1)。畑地からの窒素溶脱抑制に被覆尿素は有効であるが(松丸, 1997)、茶園における抑制効果は低いことから、資材利用だけでなく、根群域の拡大や根の活力を高めて吸肥力を向上させるとともに施肥量を削減する必要がある。

表-1 被覆尿素由来の窒素の吸収と溶脱 (対施用 N%)

施用時期	供試肥料	樹体への分配				溶脱量
		新葉	成葉	枝	計	
'96年2月	被覆尿素	9.3*	4.9	1.3	15.5	41.0
"	硫安	16.6*	4.8	2.9	24.3	31.3
'96年9月	被覆尿素	7.6**	12.8	3.5	23.9	15.1
"	硫安	11.2**	13.6	4.3	29.1	5.2

注) *96年一、二, 刈番茶, 整枝葉, 97年一番茶, 整枝葉の計

**96年整枝葉, 97年一番茶, 整枝葉の計

茶園では有機質肥料を主体に年8回程度施肥している。魚粕、菜種油粕、化成肥料に被覆尿素 70 日タイプを窒素成分で 1/2 配合した肥料を春、夏、秋の年3回施用し、さらに春、化成肥料を1回施用する省力・低投入型施肥法について検討した。供試茶園は、これまで年間に窒素を 100 kg/10 a 程度施用しており、窒素を大幅に削減した場合、収量、品質への影響があるため、省力・低投入型施肥法では、これまでの施肥量に比べて初年度約 20%, 2 年目以降さらに約 20% 削減した。初年度は減収となったが、被覆尿素を利用し窒素施肥量を削減することで細根の活力が高まり、2~4 年の収量、品質は多量施肥とかわらず、茶園の深さ 60 cm から採取した暗きょ排水の硝酸態窒素濃度も低下した(図-1)。このように窒素多肥茶園では、被覆尿素と有機質肥料、化成肥料を組み合わせることで収量、品質を低下させることなく、窒素施肥量を削減できる。

茶園土壌の pH は低いが、施用した窒素は速やかに硝酸化成される。硝酸化成抑制剤の施用により、好アンモニア作物であるチャの吸収利用率は高まり、新芽のアミノ・アミド含有率は高まるとの報告もあり(渡部, 1993)、硝酸化成抑制剤入り肥料による溶脱軽減効果については検討中である。

3) 施肥位置の見直し

成木茶園では、施肥位置であるうね間は茶園面積の約 1/6 程度と狭い。細根の大部分は深さ 0~40 cm に分布し、表層に近いほど根の活力は高い。一方、樹冠下の株下は落葉が堆積し管理の影響を受けないことから、表層を中心に細根が多く分布し、うね間に比べて根の活力は高い。うね間の深さ 20 cm へ ¹⁵N 被覆尿素を施肥した場合、表層施肥に比べて吸収利用率は低かった(烏山, 1998)。一方、¹⁵N 被覆尿素、¹⁵N 硫安の株下施肥は従来うね間施肥に比べて新芽への窒素分配量は多く(図-2),

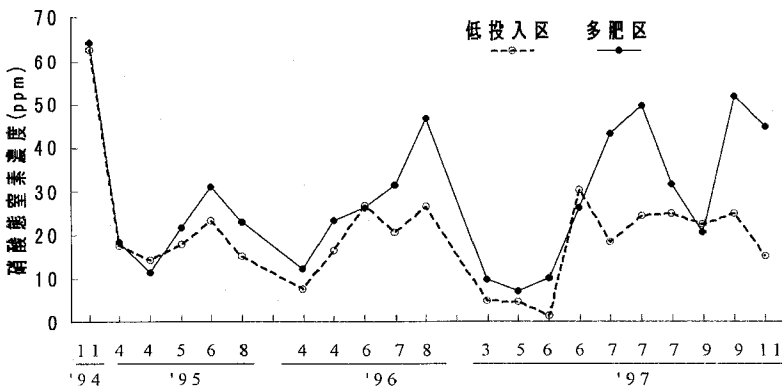


図-1 省力・低投入型施肥法と暗きょ排水中の硝酸態窒素

株下施用によって窒素の吸収利用率は高まると考えられる。

被覆尿素を主体とした窒素 50 kg/10 a をうね間に施用した省力・低投入型施肥法は、有機質肥料主体で分施肥回数も多い 80 kg/10 a に比べて年間収量は 7% 少なかったが、うね間に施用する窒素の 20% を株下に施用することで、多肥と同等の収量が得られた（寿江島ら，1998）。これまでのうね間への局所施肥から細根の活力の高い株下への施肥など、施肥位置を拡大することで吸収利用率は高まる。しかし、株下への恒常的な施肥は土壌の化学性、生物性への影響もあることから、当面はうね間への施肥の補完的なものとする。有効な資材の選定、施用法の確立などが今後の課題である。

うね間表層に施肥した窒素はすみやかに硝酸化成されるが、深層に施肥することで窒素の硝酸化成は抑制されることから、深根性で好アンモニア作物のチャでは吸収利用率の向上が期待できる。

多腐植質黒ボク土を充填したライシメータにおいて、年間を通して有機サスペンション肥料を深さ 25 cm にかん注施肥することで、表層施肥よりも窒素溶脱量は約 20% 減少した（表-2）。有機サスペンション肥料は液体、固体、両方の性状をもち、懸濁状で粘性が高く、有機物を含んだ肥料である。5年間かん注施肥した茶園にユウロピウムを施用し根の活力を調査した結果、深さ 0~40 cm の細根は増加し、ユウロピウムの吸収量も多く根の活力が向上した（内村ら，1998）。

赤黄色土においても、かん注施肥により窒素溶脱量は約 15% 減少しており（野中ら，1997）、溶脱軽減にかん注施肥は有効である。

かん注施肥の省力化を図るため、自走式（江上ら，1998）と乗用型のかん注施肥機（写真-1）が開発された。

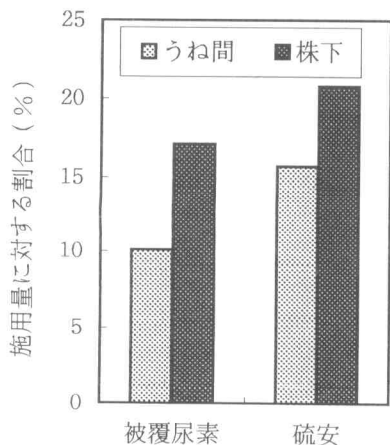


図-2 施肥位置と窒素の新芽への分配

表-2 かん注による深層施肥法と窒素溶脱

土壌 pH	施肥法	新芽への N 分配量 (g/m ²)	N 溶脱量 (g/m ²)
4	深層施肥	52.8	93.8
4	表層施肥	52.2	113.0
5	深層施肥	54.0	91.8
5	表層施肥	54.8	108.2

注) 4年間の N 投入量は 200 g/m²

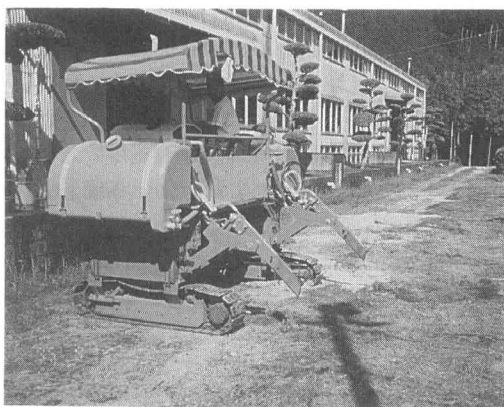


写真 1 乗用型のかん注施肥機

乗用型のかん注施肥機（以下、乗用型深層施肥機という）は、心土破碎機のようにり柱を振動させながら移動し、先端にある噴孔から有機サスペンション肥料を加圧、注入するもので深さ 30 cm までの深層施肥が可能である。本機は、有機サスペンション肥料の 2 倍希釈液 200 L (8 kg N) を 10 a 当たり 20 分足らずで施用できるなど施肥の大幅な省力化も図れる（内村ら，1996）。乗用型深層施肥機を利用した施肥法については、現地実証試験の段階である。

3. 根群域の拡大と活力の向上

1) 品種の選定

チャの根群分布には品種間差がある。樹姿の一つで上に伸びる性質の強い直立型の品種は、細根が深層まで分布し、横に広がりやすい生長特性の開帳型品種は、比較的浅層に分布することから、根群分布に配慮した施肥技術が必要である（下門・宮崎，1998）。しかし、全国で栽培されている品種では「やぶきた」の比率が 75% を占めることから、他の品種についても同様の肥培管理がなされている。今後、品種特性に応じた肥培管理とともに根の活力が高く、資材低投入型栽培に適應できる品種の選抜が期待される。

2) 土づくり, 根づくり

根群域の拡大, 活力を高めるためには土づくり, 特に定植前の土づくりが大切である。重機では場を1.5m程度天地返しし, 土壌の透水性, 通気性を良くし, 排水対策を講ずることで根群域の拡大が図れる。さらに, 成木茶園ではうね間が狭く, 土壌改良の効果も上がりにくいことから, うね間の広い幼木期に有機物などを十分施用し, 土づくりに努める。

本邦における茶園土壌の約50%を占める火山灰土壌では, 粘土鉱物の大部分がアロフェンで, 陰荷電はpHの影響を受ける。茶園では施肥量が多く, 土壌pHは低いことから, 保肥力はかなり小さい。苦土石灰を150kg/10a施用し, 土壌pHを4から5に高めて保肥力向上を図った結果, 窒素溶脱量は2~4%減少した(烏山, 1998)。陽イオン交換容量の大きい資材施用による溶脱軽減についても効果は明かでなかったが, 茶園土壌の保肥力向上は重要な課題である。

有機物は土づくりに有効な資材で, 茶園ではチガヤなどが敷草として施用されている。堆肥を施用している茶園も多いが, 窒素を多く含んだものが多く, 窒素の総投入量増加につながりやすい。そこで, 堆肥を施用する場合, 含まれる窒素量を肥料の施用量から差し引くなど肥料を含めた窒素総投入量を抑制する必要がある。

茶園のうね間は施肥位置と同時に管理作業の通路であることから, 土壌踏圧により細根の活力は低下し, 肥料の吸収利用率は低くなっている。特に大型管理機による機械化が図られている茶園においては土壌踏圧の影響が大きい。このような茶園では通気処理や深耕等で物理性を改良する必要があり, 特に赤黄色土など有効土層の浅い土壌で効果は高い。

一方, 火山灰土においても乗用型深耕機による深耕で細根の活力が向上し, 収量は増加する(中村, 1997)。深耕機は, 前述の乗用型深層施肥機のり柱先端に幅約15cmのウイングを装着し, 振動させながら土壌貫入し, 心土を破碎する。深耕の深さは35cm程度まで可能で, 振動による亀裂は45cmまで及ぶ。また, 断根が少なく, 作業時間は15分/10a程度で省力化が図れるのが特徴である。

3) 樹勢の維持・向上

根の活力を高めるためには, 土壌条件の改善とともに樹勢を向上させる必要がある。チャは年間を通じて着生している葉によって光合成を行い, 生産された炭水化物は各部位の生長に使われることから, 葉層の薄い茶園では根群の発達は不十分で肥料の吸収利用率は低い。葉層を構成する成葉は新芽へ転流する窒素の貯蔵器官としての働きも大きい。このようなことから茶園の葉層は8

cm以上確保することで樹勢の維持・向上が図られ, 根の活力向上につながる。

一方, 摘採, 整せん枝の回数が多く, 強度が高まると根群域拡大が抑制され, 白色根は減少する(図-3)。成木では, 夏期は摘採, 整枝など地上部の収奪を繰り返すことから根の活力が低下し, 吸収利用率が低下する(烏山, 1998)。このように根群域の拡大, 根の活力維持のためには, 過度な摘採, 整せん枝を避けるなど適切な地上部の管理が大切である。また, 中切り更新, 強せん枝など地上部に対するストレスが大きい場合には, 深耕など根に大きなストレスを与える管理は避け, 樹勢の回復に努める。

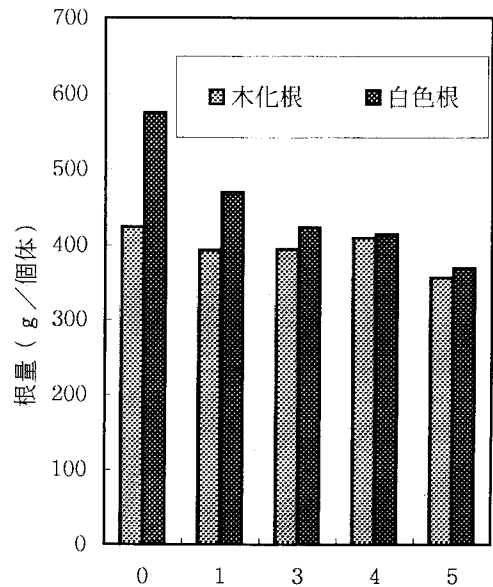


図-3 摘採, せん枝の回数と根量 (山下, 1989)

表-3 育苗法と定植後の生育
(黒木・間曾, 1995)

調査項目		4か月ポット苗	24か月標準苗
地上部	樹高 (cm)	18.6	32.7
	株張り (cm)	13.0	21.8
	幹径 (mm)	3.3	6.5
地下部	最長根長 (cm)	35.7	26.0
	最大根径 (mm)	2.4	2.6
	根重 (g)	11.6	5.5
	白根重 (g)	9.1	4.1
	木化根重 (g)	2.5	1.4

注) 4月定植, 9月調査

根群の発達、分布は育苗法、栽植方法、幼木期の管理などによって変わる。挿し木苗を本ばに移植する現在の方法では、定植時の植え傷みにより直根が伸びにくく、根群域は狭くなる。一方、ペーパーポット苗は植え傷みが少なく、地上部に比べて地下部の生育がすぐれる（表3）。現在の栽植方法は早期成園化、摘採面の早期拡大を重視した密植栽培の傾向にあるが、成園化後における地上部の競合が強く、樹勢の低下や根の生育が抑制されることから、今後は根群域の拡大に配慮した栽植法が必要である。また、幼木期における過大な窒素施肥は根の伸長を抑制する傾向にあり、施肥量を極力少なくすることで根群域は拡大する。

4. おわりに

チャの根の活力は樹齢の進行や新芽の収穫などで低下するにもかかわらず窒素多肥を続けた結果、地下水への窒素負荷などの問題が生じた。今後、肥培管理を低投入型に転換するためには養分の吸収効率の向上が欠かせない。そこで、根群域の拡大に最も有効な定植前の土壌改良を実施し、成木においては摘採、整せん枝、病害虫防除など地上部の適正な栽培管理により樹勢の維持・向上を図ることで根の活力を高める。さらに、施肥効率の高い施肥位置、養分吸収特性に応じた施肥を基本に被覆尿素などの有効な資材の活用を図ることが必要である。

引用文献

- 江上 修・久保田朗・中村晋一郎・森山弘信・清水信孝・別所 務（1998）：茶園用ペースト状肥料灌注施肥機の開発，茶研報，87（別冊），74～75。
- 岩橋光育（1997）：土壌埋設型センサーによる茶園の施肥管理技術，茶研報，84，49～58。
- 烏山光昭（1989）：黒ボク土茶園における窒素濃度診断技術，九州農業の新技術，1，112～117。
- 烏山光昭（1990）：茶樹における窒素の吸収・移行・代謝・利用に関する研究，鹿児島茶試研報，6，46～49。
- 烏山光昭（1998）：緑茶の品質向上と環境負荷低減のための肥培管理，九農研，60，24～29。
- 黒木高幸・間曾龍一（1995）：茶樹のペーパーポット挿し木苗利用による根群拡大法，九農研，57，36。
- 松丸恒夫（1997）：被覆肥料利用による畑地からの肥料窒素溶脱軽減，土肥誌，68巻，4，430～434。
- 中村憲知（1997）：乗用型茶園深耕機による茶園の畦間土層改良，九州農業の新技術，10，164～167。
- 野中一弥・東島敏彦・畑瀬房次・池田茂成（1997）：茶園での灌注施肥法の検討，九農研，59，54。
- 小川 茂（1981）：施肥窒素の収支について，茶研報（講要旨），53，101。
- 岡野邦夫・松浦啓晶・鹿島勝義・松尾喜義（1997）：幼茶樹の窒素吸収能力の季節変化，茶研報，85，1～8。
- 下門 久・宮崎久哉（1998）：茶樹の根群分布の品種間差異，九農研，60，22。
- 寿江島久美子・加治俊幸・内村浩二（1998）：茶樹における樹冠下への窒素施肥法と資材，茶研報，87（別冊），76～77。
- 橘 尚明（1996）：多肥栽培茶園における無機態窒素の動態ならびに根系分布と窒素吸収特性，三重農技センター特研報，4，11～17。
- 内村浩二・烏山光昭・今井明子（1995）：小型反射式光度計による黒ボク茶園土壌の無機態窒素簡易測定法，茶研報（別冊），82，132～133。
- 内村浩二・烏山光昭・岩倉 勉（1996）：乗用型茶園中切機に装着した深層施肥機の性能，茶研報（別冊），84，136～137。
- 内村浩二・加治俊幸・寿江島久美子（1998）：深層施肥，酸度矯正が茶樹根の分布，活性に及ぼす影響，茶研報（別冊），87，94～95。
- 渡部尚久（1993）：茶園土壌における窒素の動態と合理的な施肥管理に関する研究，神奈川農総研研報，135，151～156。
- 山下正隆：茶樹における根群の形成と断根後の再生に関する研究（1989），野菜試報，D2，46～58。

受稿年月日：1998年12月25日
受理年月日：1999年4月19日

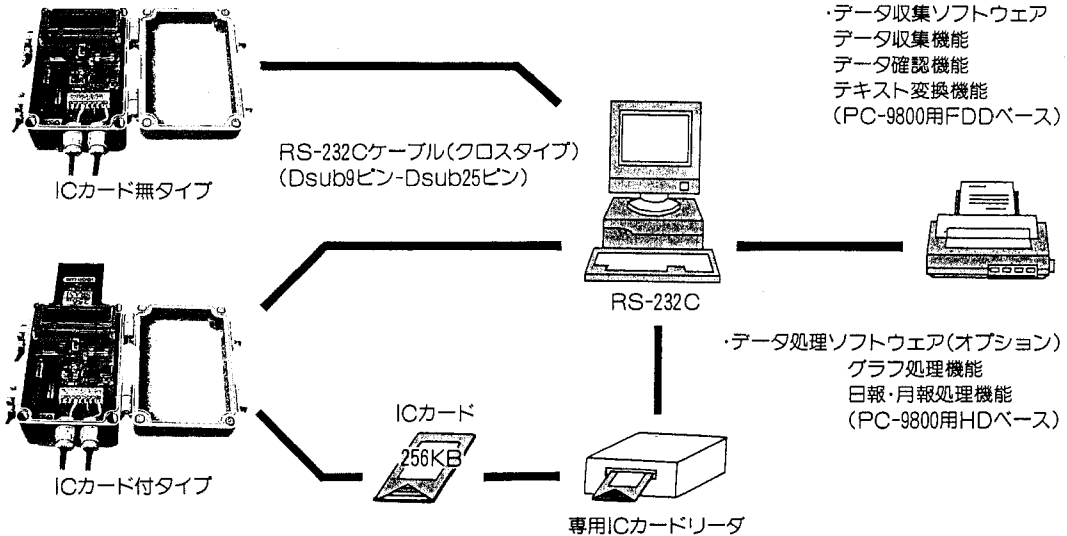
センサ入力固定型フィールドデータロガー

野原計蔵 F80シリーズ

<特徴>

1. 設置環境を選ばない
2. カンタン開閉
3. 長期間測定が可能
4. カンタン操作
5. 低価格を実現
6. 豊富な機種

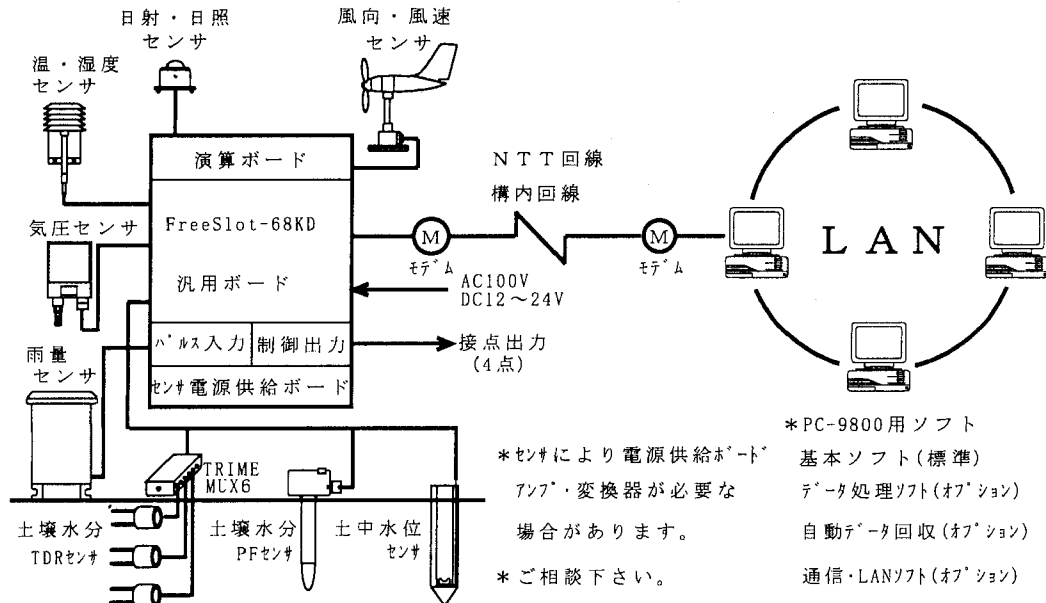
<データ収集とデータ処理方法>



多機能・多チャネル データロガー

FreeSlot-68KDシリーズ

<気象観測システム例>



※ F80・FreeSlot-68KD用Windows95対応ソフトウェア (オプション)

第40回土壌物理研究会シンポジウム

—根と土壌— 1998年10月2日(金)

座長 波多野隆介(北海道大学大学院農学研究科)

土壌環境と根の発達

小柳敦史(農業研究センター)

根系構造のとらえ方

巽 二郎(名古屋大学農学部)

座長 成岡 市(岡山大学環境理工学部)

中性子線による根-土壌系の水のイメージング

中西友子(東京大学大学院生命科学研究所)

座長 本間知夫(野菜・茶業試験場)

根の電気生理研究法—ラボラトリーからフィールドへ—

岡本 尚(森植物生理研究室)

茶の養分吸収効率改善

烏山光昭(鹿児島県茶業試験場)

総合討論

司会: 山内 章(名古屋大学農学部)

長谷川周一(農業環境技術研究所)

長谷川:

まず質問表から始める。

奥山(農工研):

測定システムのことで岡本氏に質問が2つある。1つは、自然界の中でのハイ・インピーダンスの測定ということで、非常にノイズを拾いやすいと考えられるが、測定システムの中でのノイズ対策について教えていただきたい。2つめは、図では、インピーダンス変換器のマイナス側をアースに落としているように書かれているが、そのポイントと木の根元で素焼円筒で計っている電位の関係はどうなるのか。

岡本:

1つめについては、電気鉄道が近くに無いせいかノイズがほとんど入らないので対策はしていない。2つめについては、実際のアース点は電源の0電位点で、液体アースに直接つながっている。フローティングの形で使っている。

長谷川:

岡本氏に2つの質問がある。1つめは、土壌水分が減少して根が水を吸いにくくなったときに導管電位は変化しているか、というもの。2つめは、土が固くなると根が土に入りにくくなるが、このように根の伸長が阻害されているとき、導管電位は変化するのか、というものである。

岡本:

2つめについては、そのような実験をしていないので何とも言えない。1番目については、柿園の下2~3mで地下水が流れているので今まで強く乾燥したことがほとんどない。乾燥よりもむしろ、豪雨の影響が大きい。

成岡:

中西氏に3つ質問がある。1つめは、キャリブレーションについて、土壌中の一次鉱物を完全に無視できるかどうか。2つめは、中性子線の分解能について。3つめは、軟X線と中性子線の違いについて。

中西:

3番目については、X線は固いもの、中性子線は希土類を除くと軟らかいものを通しやすい。また、元素間の違いは、X線はなだらかであるが、中性子線は元素ごとにオーダーが違うほど大きく違う。2番目の分解能については、中性子線はNMRのような限界はない。また、NMRよりも大きい試料を使えるのが中性子線の利点である。1番目の、土の中の粒子が映らないかどうか、については、非常に乾いた場合でも大丈夫ではないかと思われる。

長谷川:

烏山氏に、北海道立中央農試の竹内さんより質問がある。根の活力と根長、根量の関係は、単純な対応関係にあると考えてもよいのか?

烏山:

私のやっている範囲内では、根の活性の高いものは、根長も長く、太さも大きく、対応はあると思うが、他の作物、他の例ではそうでない場合もあると思う。

小柳:

活力という言葉には根量が含まれていると考える。活性だと、単位根量あたりの吸収量などということになると思うが。つまり、活力=活性×根量と考える。よって、活力と根の量には関係があると思う。質問は、活性と根量の関係ということだと思うが、それは一概には言えない。

竹内:

根群分布の話があったが、深く根が張っていて根群分布が深根性であると考え、上部と下部の活力を同じく考えてよいのか。

小柳:

活力という言葉は活性というように考えると、上の方

にあっても下の方にあっても活性の高い根も低い根もあるということになる。活力といった場合は、先ほど言ったように根の量の概念も含むし、また、例えば、そこに水があると肥料成分を吸収しやすいなど、おかれた場の状態にも影響される。その場合、浅い根と深い根とどちらがよいかというのは、条件によるということになる。例えば、乾いていて下の方にしか水がない場合には深い根が良いし、下の方が強還元になっているなど条件が悪い場合には浅い根が良い、ということになる。

竹内：

根の活力は相対的なものと理解して良いか？

小柳：

活力というのは、相対的で、環境の影響も受けるし、作物がどれだけ収量をあげられるかなど、利用する側の人間が考えて使うような内容を表す言葉であると思う。活性というのは植物学上の言葉であると思うが。

山内：

座長を交代する。

蝦名（青森りんご試）：

根は無限大に増えるものではなく、新しい根が出て機能の衰えたものはなくなっていくことの繰り返しで、そのため植物によって根の量はだいたい同じになっていると思う。植物種によって違うと思うが、どのくらいの根が増えてどのくらいの根がなくなっていくかなど、わかっていることがあれば教えていただきたい。

山内：

根の量の動態ということだと思うが、何か意見はないか。

中西：

これはひとつの例であるが、都会の街路樹などの人工土壌ではかなり薄い土に高木が育っているので、条件によって同じ植物種でも根量はかなり違うこともある。

山内：

作物では、死ぬ根はほとんど出てこない。

巽：

土は不均一な空間である。資源獲得のためにはどういう形が活力ある根系か、根の研究には難しい問題がある。

山内：

根の活性あるいは活力については、難しい問題がある。例えば、根が生きていることと働いていることは別であり、成長している根はむしろ養分を吸わないということもある。また、水は死んでも入ってくるし、むしろ

死なないと輸送能力はないなど。

根、土壌ともに不均一であることが根の研究手法についても難しくしている。それについて意見をお願いする。

波多野：

土壌は不均一な空間である。私は、不均一な空間を作り出している土壌構造に全てが支配されているという立場で考え、土壌の条件に他を適応させるという考え方をしていたが、他分野では植物に適応するように土を変えるという発想もあることに気づかされた。

岡本：

活性を測るときは、根の量などの Capacity factor を含まないように、Intensity factor を使うべきである。根の活性（健康状態）の測定に電気的な測定法が使えないか、という希望を持っている。

岩間：（農環研）

烏山氏に質問がある。茶の施肥効率は、秋や冬は高いが夏は低い。これはおそらく収穫による地上部へのインパクトと雨が多く過湿になることなどによると思われるが、これを克服しないと茶園の施肥量を減らすことは難しい。何か戦略があったら教えていただきたい。

烏山：

やはり地上部を切る回数が多いところでは、夏の養分吸収が少ないので、刈り取りの影響は大きいと考えられる。施肥量をどこまで減らせるか、ということについては、まずは県の施肥基準 50 kg を目標にしようと考えている。しかし、環境保全という考え方から言うと、それでは不十分なので、多少は生産性を落としても施肥量を減らす、ということまで考えて、最終的には 50 kg よりも低いレベルを目指そうと考えている。

波多野：

吸収量よりも多い施肥量を与える発想がわからない。土壌は開放系であるから、25 kg しか吸わないのに 50 kg やれば吸われない分は外へ出ることになる。

烏山：

利用率 100% にできれば良いのだろうが、それは現実には難しい。茶の場合は量は確かに多いので問題だが、利用率でみると窒素の場合 50% は他の作物と比べても普通である。

長谷川：

生産と環境は相反することもあるので難しい問題である。これで総合討論を終わる。

火山灰質粘性土のアロフェン含有量がその物理的性質 に及ぼす影響

宋 永 焜

Influence of Allophane Content on the Physical Properties for Volcanic Cohesive Soil

Ei-Kon So

Faculty of Engineering, Kanto-Gakuin University

Abstract

Relationship between allophane content and physical properties for volcanic cohesive soil was investigated. The main results are as follows

1. Allophane clay minerals are the main factor for forming ped structures.
2. Acid dispersion is more effective than alkali dispersion when the allophane content is above 50%.
3. Natural water content, liquid limit, non-free water content and natural void ratio increasing linearly with allophane content respectively.
4. Volcanic cohesive soil lies below A-line in plasticity chart and fall more far from the A-line with increasing allophane content. The soil has its characteristic linear line in the chart.
5. Compacted dry density decreases linearly with increasing allophane content.

Key words : Kanto loam, allophane content, ped structures, physical property, compaction curve

1. はじめに

火山灰質粘性土は本邦の首都圏に広く分布し、その代表的なものが関東ロームとして知られている。地質学的には地表面から地下に向かって立川ローム、武蔵野ローム、下末吉ローム、および多摩ロームの順に層序をもって堆積している。そのうちでも立川ロームが最も年代的に新しく、以下順に古くなる。これらの層には、おのおの違った不完全または完全結晶質である微細粘土鉱物を有している（関東ローム研究グループ、1965）。立川ロームはほぼ地表面下3m以上に堆積し、多量のアロフェン粘土鉱物のみを含有している。武蔵ローム層以下からは、順次アロフェン量が減少し、代わって球状または針状の加水ハロイサイトおよびハロイサイトなどの粘土鉱物が多くなる。このうち立川ロームと武蔵ロームは堆積年代が比較的新しく、かつアロフェン粘土鉱物を含んでいるので新期ロームまたはアロフェン質火山灰土とも呼

ばれる。これに対し下末吉ロームおよび多摩ロームは古期ロームと称している。アロフェン質火山灰土が団粒を形成して存在することは、古くから土壌学の分野で知られている。またこの団粒は階層を有して存在している。すなわち数百個のアロフェンの集合によって数百Åの一次団粒が形成され、それが更にマイクロメートル単位の二次団粒、ミリメートル単位の三次団粒へと逐次成長していくことである。団粒形成の原因はアロフェン内の粘質の和水アルミニウム、土中の酸化鉄、有機質、および植物の根の吸水による土の圧縮作用によって形成される（岩田、1989）。この団粒構造によって乱さないアロフェン質火山灰土は、沖積粘土に比べて比較的大きな間隙比と透水性を有している。

第二次大戦後からこのアロフェン粘土鉱物が関東ロームの高含水比および鋭敏性などにみられる地盤工学的特異挙動の原因であることが定性的に知られるようになってきた（高速道路調査会、1973）。著者はこの両者の定量

的關係について、いくつかの知見を発表してきた(宋, 1993, 1994)。これらの研究によって関東ロームの地盤工学的性質がアロフェン含有量によって著しく変化することが明らかになってきた。すなわち関東ロームのうちでもアロフェン質である新期ロームは火山灰の特異挙動を示すのに対し、非アロフェン質古期ロームは沖積粘土的挙動をとる違いを有することである(宋, 1998)。具体的に火山灰特異挙動について言えば、乱さないアロフェン質火山灰土が団粒構造の形成によってますます安定し、乱された地盤は逆に団粒構造の破壊と非自由水の自由水化によってトラフィカビリティー確保の困難な軟弱土と化することである。過去において関東ロームを主とする火山灰質粘性土に関する多数の研究が地質学的(関東ローム研究グループ, 1965)、土壌学的(前田ら, 1983)、および地盤工学的(地盤工学会, 1974)になされてきた。しかしアロフェン量との定量的な広範な工学的研究は、著者以外にはほとんどないのが現状である。特にアロフェン量と物理的性質の関係については、本邦内外を問わずごく限られたデータについての過渡的な研究しかない段階にある(Maeda *et al*, 1977, Warkentin *et al*, 1974, Wesley, 1973)。

本研究は著者が最近十数年にわたって採取した多くの試料についての試験結果である。すなわちアロフェン量と団粒構造およびその分散性、指数的性質、乱さない土の物理的性質と締め固め曲線の性質について、統計的分析を行った結果の報告である。

2. 実験試料と方法

1) 実験試料

実験試料は東京、神奈川県を中心として関東南部および西部一帯において採取した火山灰質粘性土(関東ローム)を用いた。採取現場は主として企業工事現場、東名高速改築沿線、および住宅都市整備公団の宅地造成地などである。乱さない試料は5cmφ×5.1cm(100cm³)の円筒を使用して、ブロックサンプリング法によって採取したものである。いろいろなアロフェン量を有する試料は、ランダムに採取した後、アロフェン定量試験によって選別した。多数の試料を詳細に明示するのは、紙数の制約上困難であるため、最近の代表的試料についてのみ、その物理的性質を表-1に示す。また本論文における大部分の図表そのものが試料の基礎的性質に関するものであるため、表-1の内容は最小限に止めている。なお長い研究期間において、実験設備の有無の差や採取年次の異なる試料を用いたため実験試料数に変動がある。

2) 実験方法

下記の特殊試験以外は、主として地盤工学会基準による(地盤工学会, 1991)。

(1) アロフェン定量試験

北川の8mol/l HCl-1/2mol/l NaOH交互溶解法によって行った(北川, 1977)。その原理は結晶質粘土鉱物に比べてアロフェンのような非晶質なものは、酸とアルカリの交互溶解によって迅速に減量されることによるものである。

表-1 代表的実験試料の物理的性質

Table 1 Typical index properties for volcanic cohesive soils

採取地	アロフェン含有量 A _p %	自然含水比 W _n %	密度 ρ _s g/cm ³	液性限界 W _L %	塑性限界 W _P %	塑性指数 I _p %	液性指数 I _L	強熱減量 L _{ig} %	pH
長津田(上)	66.0	125.8	2.841	169.6	113.0	56.6	0.23	17.4	6.13
長津田(下)	15.0	42.6	2.725	54.8	28.6	26.2	0.53	9.6	6.47
北公園	68.0	133.5	2.865	158.4	108.9	49.5	0.50	16.8	6.11
川上	22.0	89.0	2.818	117.4	70.3	47.1	0.40	13.3	5.90
温水	24.0	91.0	2.791	94.6	67.5	27.1	0.87	11.9	6.01
坪ノ内	31.0	90.2	2.828	121.2	80.9	40.3	-0.02	11.7	7.13
尾尻(上)	29.0	76.4	2.744	119.2	78.1	41.1	-0.26	11.0	6.42
尾尻(下)	25.0	42.5	2.751	90.4	66.4	24.0	-1.00	5.5	7.20
常泉寺	76.0	137.4	2.813	150.4	97.2	53.2	0.76	15.3	6.95
上九沢	82.0	131.0	2.763	181.4	99.3	82.1	0.37	16.6	6.83
相模ヶ丘	27.0	74.8	2.868	91.0	60.8	30.2	0.46	11.9	6.65
馬場	47.0	120.9	2.904	126.8	91.7	35.1	0.83	12.5	6.78

(2) X線回折試験

420 μm ふり通過試料を、メノウ鉢中で十分細かくなるまですったものを使用した。回折定数は $\lambda = 1.5418 \times 10^{-10} \text{m}$ 、対陰極 Cu K α である。

(3) 土の保水性試験

非自由水分は、水ポテンシャル 1,550 kPa (旧 pF = 4.2) に相当するものとし、圧力板法によって行った (竹中, 1963)。試験は 5 cm ϕ \times 2.5 cm (50 cm³) の円筒によって乱さない試料を採取して行った。

(4) 比表面積測定

測定は窒素吸着法、その計算は BET 法による (慶伊, 1990)。

(5) 細孔間隙分布測定

乱さない試料を水銀圧入ポロシメータによって測定した。試料は 8 mm 角に整形し、測定前に凍結乾燥処理を行った。凍結温度は -140°C、凍結時間は 8 時間以上である。測定定数は水銀接触角 147 度、水銀表面張力 $4.84 \times 10^{-1} \text{N/m}$ である。

3. 実験結果と考察

1) アロフェン含有量が物理化学的性質に及ぼす影響

(1) アロフェン量の変化に伴う粘土鉱物の変化

代表的な火山灰質粘性土である関東ロームは、その層序の変化とともに含有粘土鉱物の種類と量が変化することを前に述べてきた。一般に古期ロームはアロフェンを全く含まず、新期ロームの立川ロームはアロフェン量を 50% 以上含有し、武蔵野ロームは 40% 以下であることが知られている (宋, 1998)。またアロフェン量 (以下 A_p と表記する) 40~50% は両層の境界に存在するものと考えられている。図-1 は関東ロームの X 線回折図である。 A_p 量の変化に伴う粘土鉱物の変化を示している。

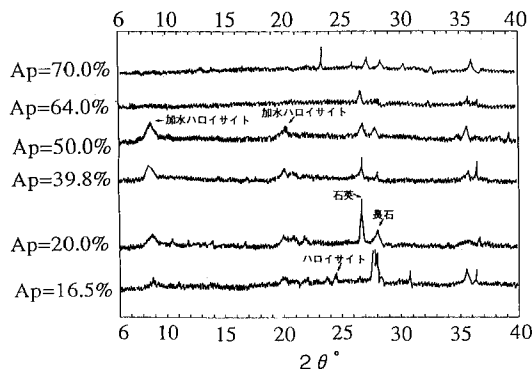


図-1 関東ロームの X 線回折図

Fig. 1 X-ray diffraction diagram of Kanto loam

この図から $A_p > 50\%$ 以上の立川ロームにはアロフェン粘土鉱物のみが含有されていることがわかる。ちなみにアロフェン粘土鉱物の非晶質を示す回折ピークは、30°~40°間の幅広い小ピークで表されると報告されているが (北川, 1977) 一般的にはピークのないのが特徴である。アロフェン量が減少し、 $A_p < 40\%$ の武蔵野層になると順に加米ハロイサイトおよびハロイサイトの出現が見られる。このように深さ方向にアロフェン量が減少し、それとともに加米ハロイサイトが指数曲線的に増加していくことが著者によって確かめられている (宋, 1995, 1998)。

(2) アロフェン量と団粒構造の関係

前に述べたようにアロフェン粘土鉱物は団粒構造形成の主要な原因の一つである。このことはアロフェン量の増加につれて、その表面積と細孔間隙量が増加することによって証明できる。なぜなら理想的な球状粒子において、密に詰まった一次団粒構造が二次構造に成長すれば、その間隙率は 20% 増加し、粗に詰めれば 25% も増加することから推察できるからである (川口ら, 1974; 岡島 1989)。また団粒構造間には粗間隙があり、その内部には微細間隙があるので間隙量の増加につれて、その表面積も増加することになる。以上の理論的推論を実験的に証明したのが図-2 と図-3 である。これらの図は、おの乱さない土のアロフェン量と比表面積および累積細孔間隙量の関係である。ここで累積細孔間隙量とは、水銀圧入ポロシメータで計測されたすべての径の間隙量の総計であり、普通土の乾燥単位質量の間隙体積 (cm³/g) として表示される。以後これを全間隙量と称することにする。これらの図からアロフェン量と比表面積およ

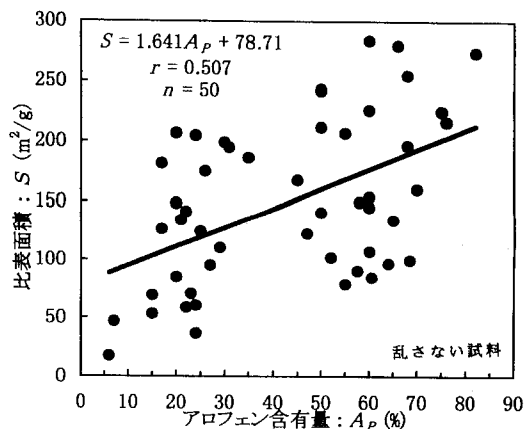


図-2 アロフェン含有量と比表面積の関係

Fig. 2 Relationship between allophane content and specific surface area

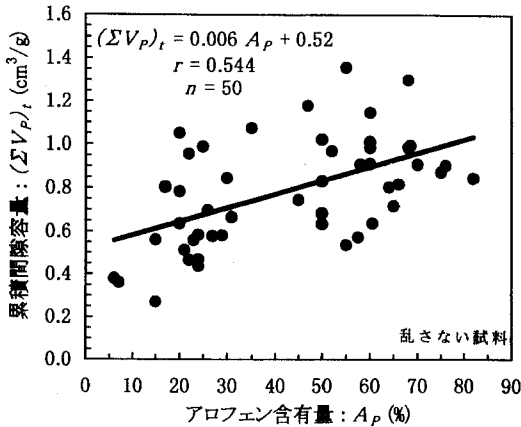


図-3 アロフェン含有量と累積細孔間隙容量の関係
Fig. 3 Relationship between allophane content and cumulative pore volume

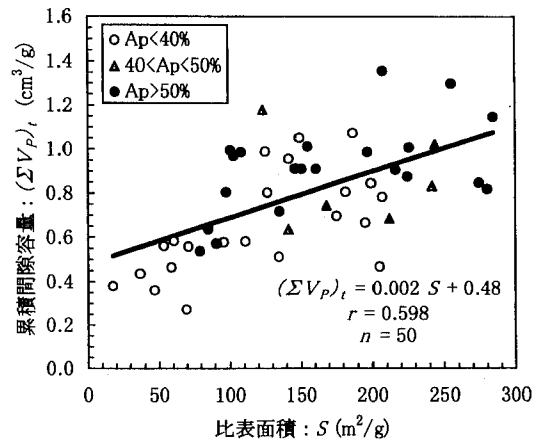


図-4 比表面積と累積細孔間隙容量の関係
Fig. 4 Relationship between specific surface area and cumulative pore volume

び全間隙量の間には、次のような直線的正の相関関係があることがわかる。

$$s = 1.641 A_p + 78.71 \quad (1)$$

$$r = 0.507 \quad n = 50$$

$$(\Sigma vp)_t = 0.006 A_p + 0.52 \quad (2)$$

$$r = 0.544 \quad n = 50$$

ここで A_p = アロフェン含有量 (%)

$$s = \text{比表面積 (m}^2/\text{g)}$$

$$(\Sigma Vp)_t = \text{全間隙量 (cm}^3/\text{g)}$$

$$r = \text{相関係数} \quad n = \text{試料数}$$

以上の関係からアロフェン粘土鉱物が団粒構造形成の主要な一要因であることがわかる。関東ロームの比表面積の値はアロフェン量によって 50~250 m²/g の間に分布している。この値は一般に報告されている値とほぼ一致する(高橋ら, 1985)。また全間隙量はほぼ 0.4~1.2 cm³/g の間にあり、締固めた関東ロームの 0.1~0.35 cm³/g に比べるとかなり大きい(山口ら, 1992)。締固めにより団粒構造が破壊されると、いかに大きく間隙が変化することがわかる。図-4 は比表面積の増加が間隙量の増加をもたらすことを示したものである。両者の間には次式のような直線的正の相関関係がある。

$$(\Sigma Vp)_t = 0.002 s + 0.48 \quad (3)$$

$$r = 0.598 \quad n = 50$$

ミクロ的に測定された全間隙量が妥当なものであるかは地盤工学的な量である間隙比と対比することによって知ることができる。図-5 はこのような関係を示したものであり、全間隙量と間隙比の間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$(\Sigma Vp)_t = 0.191 e_0 + 0.16 \quad (4)$$

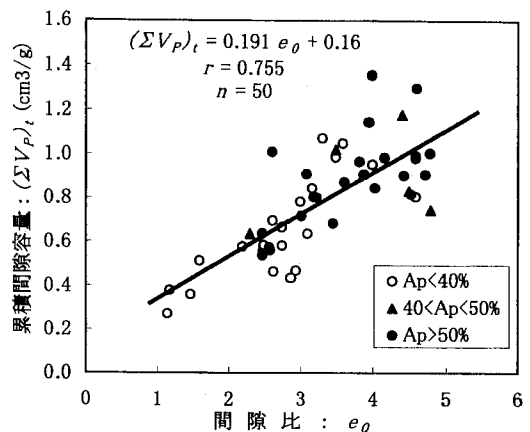


図-5 間隙比と累積細孔間隙容量の関係
Fig. 5 Relationship between void ratio and cumulative pore volume

$$r = 0.755 \quad n = 50$$

ここで e_0 = 間隙比

(3) アロフェン量と非自由水分量の関係

土中水はその重力によって運動する自由水に対し、アロフェン質土粒子に強く吸着されている多量の非自由水を有している。この非自由水はアロフェンの中空間隙の内部や団粒構造内部の微細間隙中に保持されている。その最小水分ポテンシャルは約 1,550 kPa (旧 pF=4.2) であることが知られている(竹中, 1963)。非自由水は乾燥によって減少し、また締固めなどの機械力によって自由水に変化するが、その水分特性曲線は脱水過程と吸水過程で異なる。図-6 はアロフェンが非自由水分を保持して

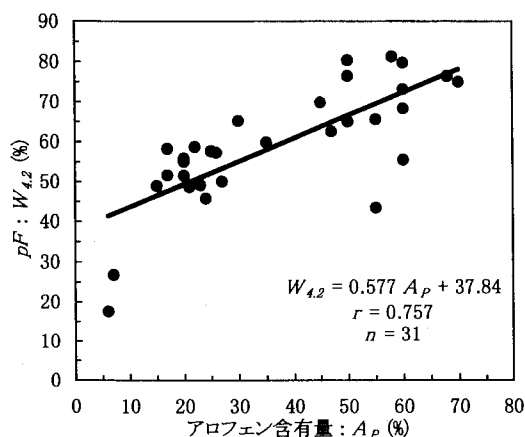


図-6 アロフェン含有量と非自由水の関係

Fig. 6 Relationship between allophane content and non-free water content

いることを示す図である。アロフェン量の増加とともに非自由水分量も直線比例的に増加していることがわかる。両者間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$w_{4.2} = 0.577 A_p + 37.84 \quad (5)$$

$$r = 0.757 \quad n = 31$$

ここで $w_{4.2}$ = 非自由水分量 (%)

この図から関東ロームの非自由水分は、ほぼ 40~80% の間に分布し、幾つかの報告とも一致していることがわかる (Maeda *et al.*, 1977; 竹中, 1963; Warkentin *et al.*, 1974)。

(4) アロフェン量と pH および分散との関係

一般に結晶性粘土が強酸性の性格であるのに対し火山灰土は弱酸性の性格を有している (川口, 1974; Warkentin *et al.*, 1974)。この弱酸性はアロフェンの有する多量の活性アルミニウムに起因しているので、図-7 に示すようなアロフェン量と pH の相関性が考えられる。アロフェン量が増えるにしたがって、その pH 値は直線的に減少している。またアロフェン量の高いところでは、その値はほぼ 5.5~7.5 の弱酸性の範囲内にあることがわかる。両者の関係は次式のように表される。

$$pH = -0.017 A_p + 7.42 \quad (6)$$

$$r = 0.518 \quad n = 58$$

アロフェン質火山灰土の pH が重要な理由は、そのイオン交換容量、アルミニウム溶出量や団粒構造の分散性が pH 値によって変化するからである (川口, 1974; 岡田, 1989; 多田ら, 1963)。すなわちそのイオン交換容量は pH 依存荷電 (変異荷電) であるのみならず、pH が強酸性に向かうにしたがって (pH=2~4) アルミニウムの溶出量が増加する。一方アロフェン質火山灰土の団粒構造

の分散には、塩酸などによる酸性分散が有効であることが早くから知られてきた (地盤工学会, 1990; 多田ら, 1963; 多田, 1965)。しかしこれらの研究では、その工学的意義および従来のアルカリ分散と酸性分散の限界が明らかでないのが欠点である。図-8 は、このような欠点を補うために行ったアロフェン量と均等係数の関係である。従来のヘキサメタリン酸ナトリウムによる分散と塩酸による分散効果は、工学的意義を有する均等係数の大小によって比較されている。この図からアロフェン量 50% 以上の土のみ塩酸による分散効果が大きく、それ以下では従来の分散法がなお有効であることがわかる。分散効果を粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分で表したのが図-9 であ

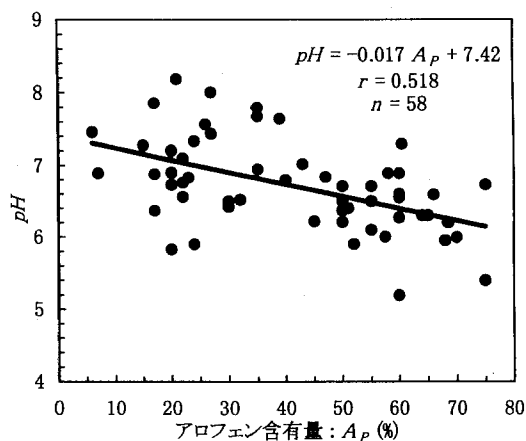


図-7 アロフェン含有量と pH の関係

Fig. 7 Relationship between allophane content and pH

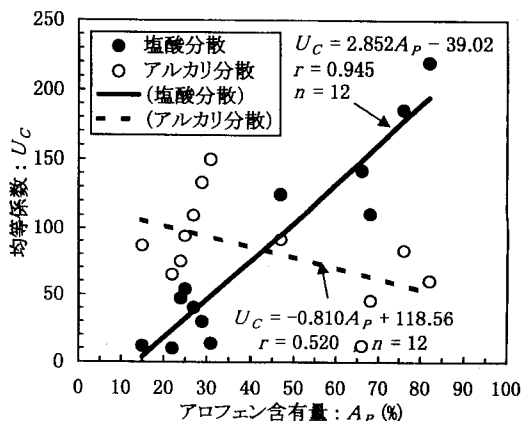


図-8 アロフェン含有量と均等係数の関係

Fig. 8 Relationship between allophane content and uniformity coefficient

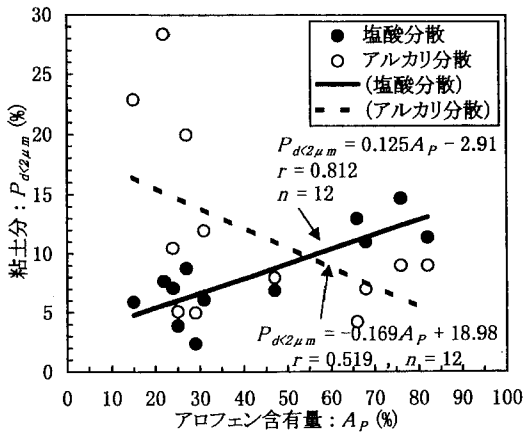


図-9 アロフェン含有量と粘土分の関係

Fig. 9 Relationship between allophane content and clay fraction

る。図-8と同様な結論が得られる。また図-8から酸性分散の場合、アロフェン量と均等係数の間には次のような直線的正の相関関係があることがわかる。

$$U_c = 2.852 A_p - 39.62 \quad (7)$$

$$r = 0.945 \quad n = 12$$

ここで U_c = 均等係数

図-10はアロフェン量の異なるいろいろな試料の懸濁液に1 mol/l HClを添加してpH値を変化させた場合の均等係数との関係を示したものである。これからアロフェン量のいかに係らず、均等係数が最大になる各懸濁液の最適pH値はおおよそ3~4の間にあることがわかる。均等係数が最大であることは、懸濁液の分散が最大に行われていることを示すものである。pH=3~4になる1 mol/l HClの添加量は、任意のアロフェン量に対して約20 cc前後であることが確かめられている(宋, 1993)。酸性分散がアロフェン質火山灰土に対して有効な理由は次のようである。アロフェンはpH依存荷電を有し、その等電点はpH=6付近である。ゆえに塩酸を添加して懸濁液が酸性になるとアロフェンの正荷電が増加する。よって土粒子相互の斥力が増大し分散される結果となる。また団粒の結合物質でもある活性アルミニウムや酸化鉄の等電点もpH=8付近であるため、酸性状態になると同様の理由で斥力が増え分散される(岩田, 1989; 岡島, 1989)。

2) アロフェン含有量と指示的性質の関係

一般に粘土の指示的性質の一つであるコンシステンシー限界などを支配する要因は、その比表面積であることが知られている(葛上ら, 1971; Muhanthan, 1971; 高橋ら, 1985)。図-2で示されるように、比表面積はアロ

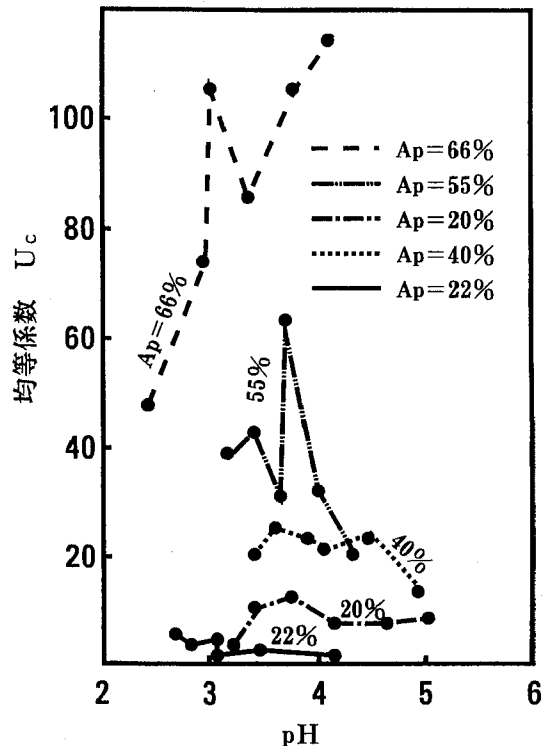


図-10 pHと均等係数の関係

Fig. 10 Relationship between pH and uniformity coefficient

フェン量の増加とともに増加する。表面積の増加は水分吸着の場の増加を意味する。ゆえにアロフェン量の増加とともに、そのコンシステンシー限界も増加することになる。アロフェン質粘土については、練返しによる非自由水の自由水化も大きく作用していることが考えられる。すなわちアロフェン量の増加につれて、その比表面積と自由水が増加することにより、そのコンシステンシー限界が増加することが結論づけられる。このような関係を示したのが図-11~図-13である。これらの図は、おのおのアロフェン量と自然含水比、液性限界および塑性限界の関係を示したものである。これらの両者間にはおのおの次のような直線的正の相関関係が存在する。

$$w_n = 0.923 A_p + 59.46 \quad (8)$$

$$r = 0.570 \quad n = 131$$

$$w_L = 1.037 A_p + 64.80 \quad (9)$$

$$r = 0.657 \quad n = 132$$

$$w_p = 0.755 A_p + 44.62 \quad (10)$$

$$r = 0.663 \quad n = 131$$

ここで w_n = 自然含水比 (%)

w_L = 液性限界 (%) w_p = 塑性限界 (%)

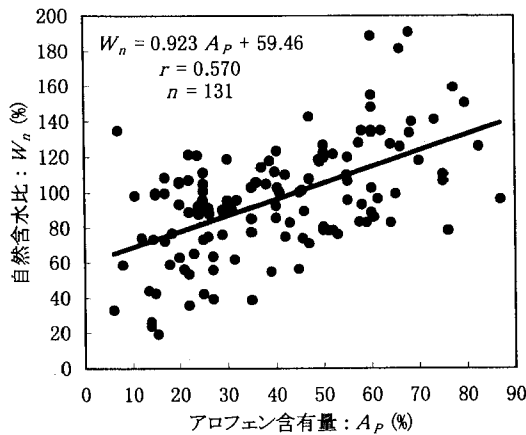


図-11 アロフェン含有量と自然含水比の関係

Fig. 11 Relationship between allophane content and natural water content

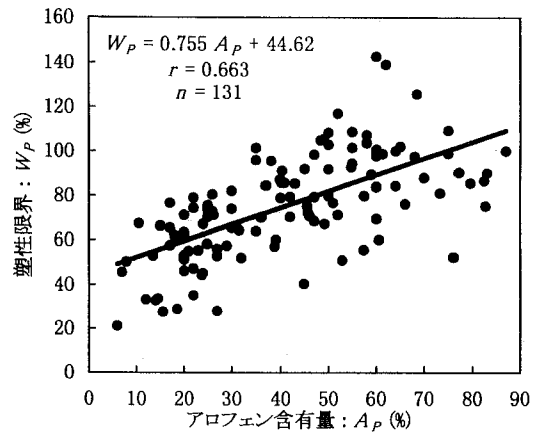


図-13 アロフェン含有量と塑性限界の関係

Fig. 13 Relationship between allophane content and plastic limit

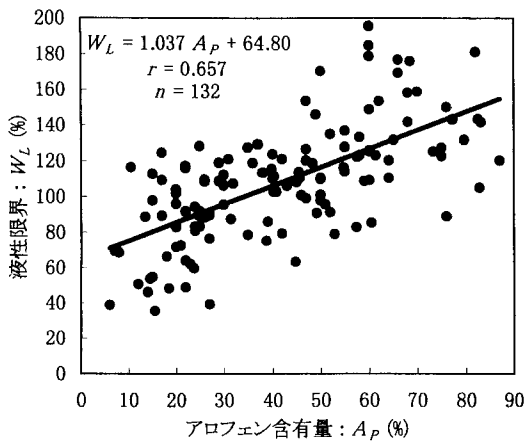


図-12 アロフェン含有量と液性限界の関係

Fig. 12 Relationship between allophane content and liquid limit

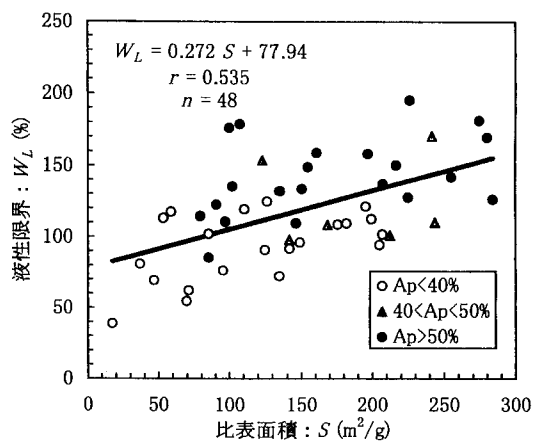


図-14 比表面積と液性限界の関係

Fig. 14 Relationship between specific surface area and liquid limit

アロフェン量の定量にはかなり煩雑なプロセスと莫大な時間を要する。そのためアロフェン量と液性限界の直線的比例関係を利用して、液性限界をアロフェン量の等価指数として利用できるメリットを有している。また表面積の増加が吸水の場の増加を示す一例として比表面積と液性限界の関係を示したのが図-14である。両者の間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$w_L = 0.272 S + 77.94 \quad (11)$$

$$r = 0.535 \quad n = 48$$

この他にも比表面積と自然含水比および塑性限界の間の直線的比例関係を報告した研究もある（今野，1993；高橋ら，1985）。図-15はアロフェン含有量と塑性指数の関

係である。両者の間には明瞭な関係が見られない。過去の研究においても、液性限界と塑性限界との関係について言及したものはあるが、塑性指数との関係について述べたものは皆無である（Warkentin *et al.*, 1974；Wesley, 1973）のは、このような明瞭な関係が存在しないことによるものと思われる。この図でアロフェン量が40～50%で塑性指数が最低になる特異点が見られる（宋，1994）。塑性指数はほぼ10～60%の間に分布している。一般に粘土の塑性指数は、その粘土鉱物の量に比例するのが普通であるが、関東ロームには、この関係が当てはまらない。この理由は、関東ロームの液性限界と塑性限界が試験開始時の含水比と練返し程度により変動す

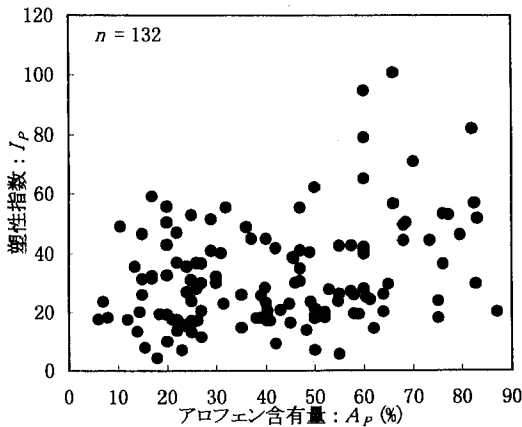


図-15 アロフェン含有量と塑性指数の関係

Fig. 15 Relationship between allophane content and plasticity index

ることによるものと思われる (地盤工学会, 1974)。図-16 は普通に塑性図と呼ばれる液性限界と塑性指数の関係である。一般に火山灰質粘性土は板状粘土の分布線を表す A 線の下部に分布することが知られている (前田ら, 1983; 高速道路調査会, 1973) が, 本研究においても同様な結果となっている。しかしこの図でもっと明らかなことは, アロフェン量が多いほど A 線から偏離し, かつすべての関東ロームが A 線の傾きより小さい次のような直線上に分布していることである。

$$I_p = 0.39 (w_L - 26) \quad (12)$$

$$r = 0.696 \quad n = 119$$

地盤工学会では, $w_L = 80\%$ を VH_1 と VH_2 の分類基準としている。この図から w_L が 80% 以下のものもかなりの数にのぼるが, そのほとんどがアロフェン量 40% 以下のものである。農業土壌の分野ではこの 80% を火山灰土の下限としているが, それはアロフェン量の大きい A, B 層のみを研究対象としている限り正しいものと思われる。この塑性図上におけるインドネシアの火山灰土の位置は本邦の更に下方にあるとの報告もあるが, その理由もこれと同様である (前田ら, 1983)。

図-17 はアロフェン量と強熱減量の関係である。両者間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$L_{ig} = 0.128 A_p + 8.12 \quad (13)$$

$$r = 0.626 \quad n = 99$$

ここで L_{ig} = 強熱減量 (%)

一般にアロフェン量は地表に近づくほど増加し, 有機物が多くなることが知られている。関東ロームの表層を占める黒ボク土がこのことを示している。ゆえに上式に示すような比例関係がある。強熱減量は約 20% 以内に

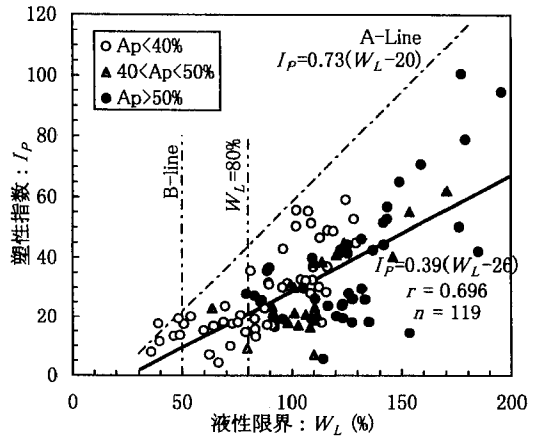


図-16 火山灰質粘性土の塑性図

Fig. 16 Plasticity chart of volcanic cohesive soil

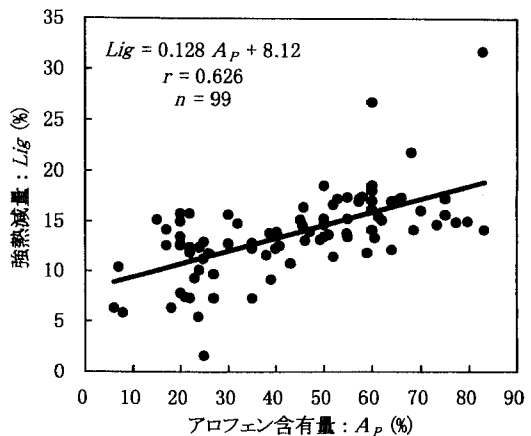


図-17 アロフェン含有量と強熱減量の関係

Fig. 17 Relationship between allophane content and ignition loss

るが, 従来から報告されている値と一致する (地盤工学会, 1991)。これらのデータから指示的性質相互の間にも密接な関係が存在することが知られている (So, 1998)。

3) 乱さない土のアロフェン含有量と物理的性質の関係

アロフェン粘土鉱物が団粒構造を形成し, かつアロフェン量が増えるにつれて総間隙量が増加することは図-3 で示した。ここで総間隙量の増加を地盤工学的な量からみると, それは間隙比の増加および乾燥密度の減少ということになる。ゆえにアロフェン量の増加につれて間隙比は増加し, 乾燥密度は減少する。図-18 と図-19 はこの関係を示したものである。おのおの次のような

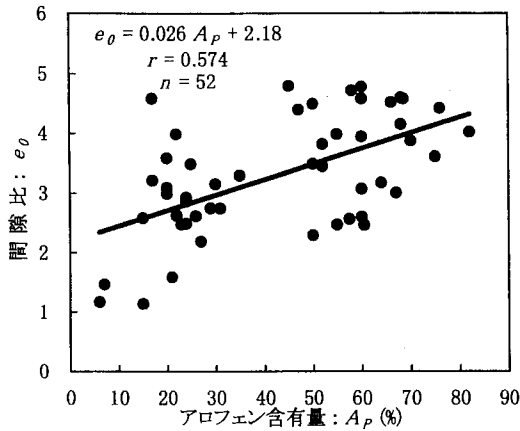


図-18 アロフェン含有量と間隙比の関係

Fig. 18 Relationship between allophane content and void ratio

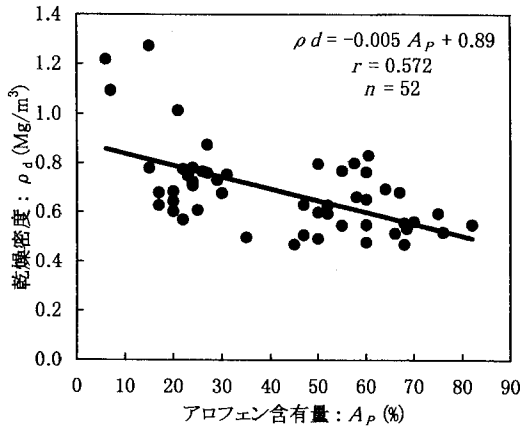


図-19 アロフェン含有量と乾燥密度の関係

Fig. 19 Relationship between allophane content and dry density

直線関係を有している。

$$e_0 = 0.026 A_p + 2.18 \quad (14)$$

$$r = 0.574 \quad n = 52$$

$$\rho_d = -0.005 A_p + 0.89 \quad (15)$$

$$r = 0.572 \quad n = 52$$

ここで e_0 = 間隙比 ρ_d = 乾燥密度 (Mg/m³)

また間隙比と乾燥密度の間には図-20 に示すような関係がある。すなわち間隙比が増えるとその乾燥密度は指数曲線的に減少していく。この関係は次のような式で表される。

$$e_0 = 11.087 e^{-1.8468 \rho_d} \quad (16)$$

図-20 は地盤工学的に常識的なものであるが、次のよう

な重要性を有している。すなわち関東ロームの乱さない試料は、クラックが多いため採取が困難で誤差が大きいものになりがちである。ゆえに図-20 は図-18 と 19 のデータの正しさを立証するためのものである。また関東ロームの間隙比と乾燥密度の関係を示すデータは同様の理由でほとんどない現状にある。

火山灰土は、一般に軽い土と言われている。アロフェン量が増えると、間隙比と有機質が増加するので単位体積重量は減少することが考えられる。ゆえに図-21 からアロフェン量が増えると単位体積重量が減少し、両者間には次のような直線的負の相関関係があることがわかる。

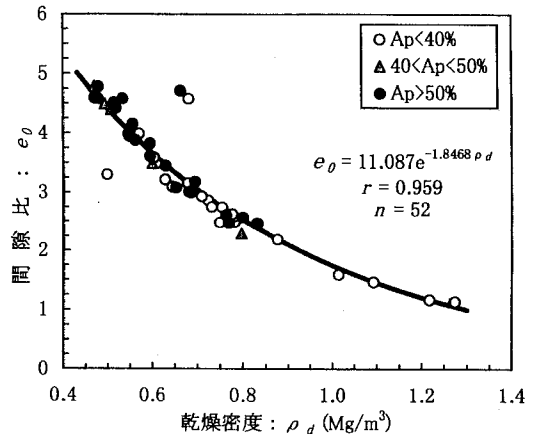


図-20 乾燥密度と間隙比の関係

Fig. 20 Relationship between dry density and void ratio

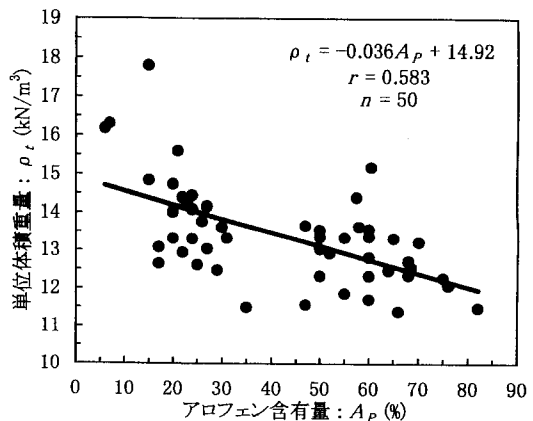


図-21 アロフェン含有量と単位体積重量の関係

Fig. 21 Relationship between allophane content and unit weight

$$\rho_t = -0.036 A_p + 14.92 \quad (17)$$

$$r = 0.583 \quad n = 50$$

ここで ρ_t = 単位体積重量 (kN/m^3)
 この図から火山灰質粘性土の単位体積重量は、ほぼ 16 kN/m^3 (1.6 tf/m^3) 以下であり、一般土の標準値である 16.5 kN/m^3 よりもずっと軽いことがわかる。

4) アロフェン含有量が締固め曲線に及ぼす影響

一般に火山灰質粘性土は、締固め曲線やその施工管理における特異性を有している (高速道路調査会, 1973)。すなわち試験開始時の含水比や締固め試料の処理方法の違いにより締固め曲線が変動する。また高含水比のため、最適含水比による締固めが困難であるので、飽和度や空気間隙率による施工管理法がとられている。締固め過ぎによる強度低下をもたらすオーバーコンパクション現象もよく知られている。アロフェン量とこれらの締固め挙動との定量的関係の一端は、著者によって報告されてきた (宋, 1993, 1994)。これらの研究において、特にアロフェン量と締固め曲線の変化および最大乾燥密度の関係を示したのが図-22 と図-23 である。図-22 の締固め曲線からアロフェン量が高いほど締固め曲線は平坦になり、最大乾燥密度も小さくなることがわかる。またこの図から図-23 に示すようなアロフェン量と最大乾燥密度の負の相関関係が得られる。この両者の間には次のような直線的負の相関関係がある。

$$\rho_{d_{max}} = -0.005 A_p + 0.97 \quad (18)$$

$$r = 0.715 \quad n = 43$$

ここで $\rho_{d_{max}}$ = 最大乾燥密度 (Mg/m^3)
 上式の実験では、軽石を含んだ試料があったので本解析から外した。ただし軽石は武蔵野ローム層下部、すなわ

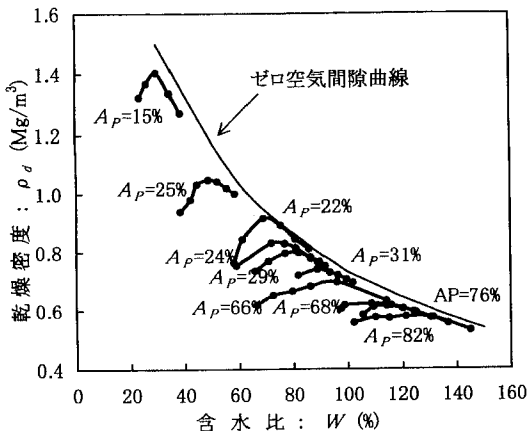


図-22 火山灰質粘性土の締固め曲線
 Fig. 22 Compaction curve of volcanic cohesive soil

ちアロフェン量約 30% 以下の場合にのみ存在する。過去の研究から、軽石を含むと乾燥密度、強度や透水性などが急に増加することがある (So *et al*, 1998) ためである。また図-22 の締固め曲線から、図-24 と図-25 の関係が得られる。図-24 はアロフェン量と最適含水比の関係、図-25 は最大乾燥密度と最適含水比の関係である。おのおの、次のような直線的正あるいは負の相関関係がある。

$$w_{opt} = 0.735 A_p + 57.64 \quad (19)$$

$$r = 0.707 \quad n = 43$$

$$\rho_{d_{max}} = -0.006 w_{opt} + 1.31 \quad (20)$$

$$r = 0.969 \quad n = 43$$

ここで w_{opt} = 最適含水比 (%)

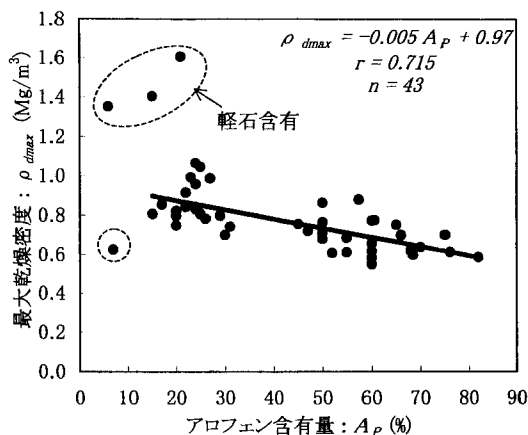


図-23 アロフェン含有量と最大乾燥密度の関係
 Fig. 23 Relationship between allophane content and maximum dry density

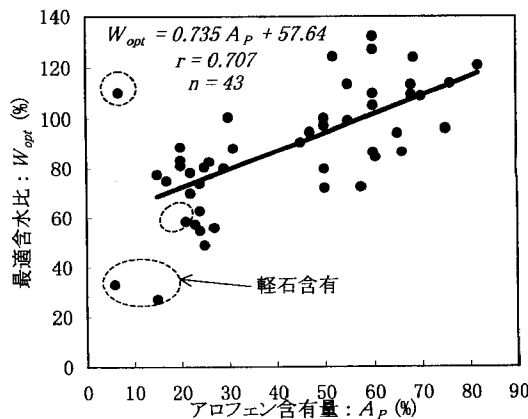


図-24 アロフェン含有量と最適含水比の関係
 Fig. 24 Relationship between allophane content and optimum water content

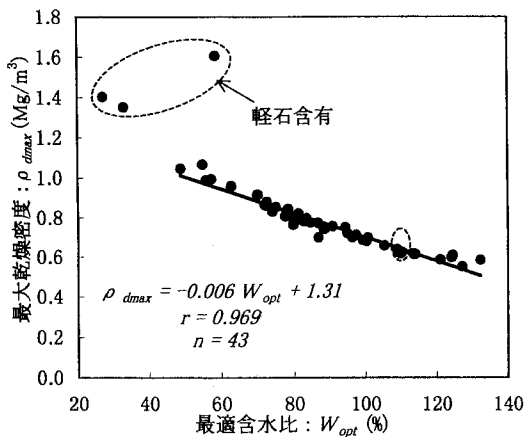


図-25 最適含水比と最大乾燥密度の関係

Fig. 25 Relationship between optimum water content and maximum dry density

4. 結 論

以上の研究結果から、次の結論を得る。

- (1) アロフェン量の増加につれて団粒構造の形成が促進されることは、その比表面積と全空隙量の増加によって証明できる。
- (2) アロフェン量と自然含水比、液性限界、塑性限界、非自由水分量および強熱減量の間には、おのおの直線的正の相関関係がある。
- (3) 火山灰粘性土の物理的指数のうちでも、最も安定した液性限界はアロフェン量との直線的関係を有しているので、この液性限界をアロフェン量の等価指数とすることができる。
- (4) アロフェン量 50% 以上の試料は塩酸による分散が有効である。
- (5) 塑性図上における火山灰質粘性土の位置は、A 線の傾きより小さい直線上に分布する。またアロフェン量が高いほど A 線から離れる傾向にある。
- (6) 乱さない土のアロフェン量と空隙比との間には直線的正の相関関係、また乾燥密度および単位体積重量との間には、おのおの直線的負の相関関係がある。
- (7) 締め固めた火山灰質粘性土のアロフェン量と最大乾燥密度との間には負の直線的相関関係がある。

参 考 文 献

1) 今野 誠 (1993) : 火山灰質粘性土の粘土化による塑性図上の位置について、土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 143-150.

2) 岩田進午 (1989) : 土を科学する, NHK 市民大学 pp 7-108.

3) 地盤工学会 (1974) : 日本の特殊土 (第 2 章火山灰質粘性土) pp 21-83.

4) 地盤工学会 (1991) : 土の試験実習書, pp 15, 102.

5) 川口桂三郎 (1974) : 土壌の物理性, 土壌学, 朝倉書店, pp 130-140.

6) 慶伊富長 (1990) : 吸着 (第 6 章 表面積と細孔分布), 共立出版, pp 95-131.

7) 北川靖夫 (1977) : 土壌中のアロフェンおよび非晶質無機成分の定量に関する研究, 農技研報告, 29, pp 1-48.

8) 葛上 久, 尾崎勲司, 中谷三男 (1971) : 比表面積と液性限界の関係, 農土論集, 37, pp 61-97.

9) Maeda, T, Takenaka, H and Warkentin, B.P. (1977) : Physical properties of allophane soils, Advance in Agronomy, Academic Press, Vol. 29, pp 229-260.

10) 前田 隆, 相馬剋之 (1983) : 火山灰土の物理性と工学的性, 火山灰土, 博友社, pp 99-139.

11) Muhanthan, B. (1971) : Liquid Limit and surface area of clays, Geotechnique, Vol. 41 No. 1, pp 135-138.

12) 岡島秀夫 (1989) : 土の構造と機能, 農文協, pp 35-82.

13) 関東ローム研究グループ (1965) : 関東ローム, 築地書館.

14) 高速道路調査会 (1973) : 関東ロームの土工, 共立出版.

15) 宋 永焜 (1993) : 関東ロームのアロフェン含有量とその工学的分類に及ぼす影響, 土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 151-158.

16) 宋 永焜, 応 長雲 (1994) : 関東ロームのアロフェン含有量が石灰-石膏安定処理土に及ぼす影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 34, No. 4, pp 97-107.

17) 宋 永焜 (1994) : 関東ロームのアロフェン含有量とその特異挙動に及ぼす影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 34, No. 2, pp 141-151.

18) 宋 永焜 (1995) : 関東ロームのアロフェン含有量が土質工学的性質に及ぼすミクロの影響, 火山灰質土の性質と設計施工に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 161-168.

19) 宋 永焜 (1998) : 関東ロームにおける地質学の地盤工学への応用, 土と基礎, Vol. 46, 2, pp 33-35.

20) So, E.K., Inoue, K. and Okada, F. (1998) Influence

- of allophane content on the mechanical properties of volcanic cohesive soils, Intern. Symp. on Problematic Soils, Sendai, Japan, Vol. 1 pp 131-135.
- 21) So, E.K. (1998): Statistical correlation between allophane content and index properties for volcanic cohesive soil, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 4, pp 85-93.
- 22) 高橋 悟, 白井清恒 (1985): 土壌の比表面積による水分特性曲線の推定について (第一報) - 腐植を含まない場合 - *農土論集*, 117, pp 25-33.
- 23) 竹中 肇 (1963): 関東ロームの非自由水分, *農土研別冊*, 7, pp 68-75.
- 24) 多田 敦, 山崎不二夫 (1963): 関東ロームの粒度分析, *農土研別冊*, 5, pp 17-23.
- 25) 多田 敦 (1965): 火山灰土の粒度分析の問題点, 第10回シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 23-26.
- 26) Warkentin, B.P. and Maeda, T. (1974): Physical properties of allophane soils from the West Indies and Japan, *Pro. Soil Sci. Soc. Amer.* Vol. 38, pp 372-377.
- 27) Wesley, L.D. (1973): Some basic engineering properties of halloysite and allophane clay in Java Indonesia, *Geotechnique*, Vol. 23, pp 471-494.
- 28) 山口晴幸, 池永 均 (1992): 締固め土の間隙構造, *土木学会論文集*, 448, 3-19, pp 35-44.

受稿年月日: 1998年 8月 27日

受理年月日: 1999年 4月 19日

テラローシャ土壤における不耕起栽培が作物の 根系分布と土壤の理化学性に及ぼす変化

島田輝男*・Artemio ROMERO**・早坂 猛***・Cantalicio PAREDES**

Effects of No-tillage Cultivation on Crop Root Distribution, Soil
 Physical and Chemical Properties in *Terra Roxa* Soil

Teruo SHIMADA*, Artemio ROMERO**, Takeshi HAYASAKA***, Cantalicio PAREDES**

* 2174 Hirai, Hinode-machi, Nishitama-gun, Tokyo-to 190-0182, Japan

** Centro Regional de Investigacion Agricola (CRIA) Capitan Miranda-Itapua, Paraguay

*** 573 Kusuno-machi, Kumamoto-shi, Kumamoto-ken 861-5511, Japan

Abstract

As *Terra Roxa* has a high clay content, and a lot of fissures occur in the surface soil under the no-tillage cropping in habitual drought terms, thus the root system of crops expands to the subsoil through the fissures. Under the tillage cropping, roots expand transversely among the granular structure of tilled soil layer. Roots can hardly penetrate through the underlying compact layer downward as there are only a few of finer fissures.

For the non-tilled surface soil, fissures occur in the parts where hardening has been developed. Since the broken structure is preserved, the state of surface soil gets closer to that of tilled one by the accumulation of the structure as time goes by.

An examination was conducted to make evident the process of nutrient supply to the subsoil which is brought about by falling of fertile surface soil into the fissures. Clods were collected from each soil horizon and fractionated samples were prepared; i.e. the main bodies of clods and fine soil particles which adhered to the surfaces of clods and these were lightly scraped off with a metal brush from the surfaces.

The contents of several nutrients were compared between the fine particle fraction and clod fraction at each horizon. Under the no-tillage cropping, generally, the nutrient content of fine particle fraction was higher than that of clod fraction, especially on K, Ca, and Mg. On the other hand, those differences were rather smaller under tillage cropping.

Thus, under no-tillage cropping, falling of fertile surface soil was presumed but nutrient supply attributable to root decay was also suggested, because the content difference was found in the subsoil as well where the fissures became less and finer.

Under the no-tillage cropping, improvements in the physical and chemical properties of subsoil are considered to be possible by such a mechanism mentioned above, with maintaining the surface soil in a fertile state.

Key word : No-tillage, Root system, Soil conservation, Sustainable cropping, *Terra roxa*

* 〒190-0182 東京都西多摩郡日の出町平井 2174

** パラグアイ地域農業研究センター (CRIA)

*** 〒861-5511 熊本県熊本市楠野町 573

キーワード : 不耕起, 根系, 土壤保全, 持続的農法, テラローシャ

1. はじめに

アメリカ合衆国で不耕起栽培法が提起された動機は、大規模なブラウ耕畑作がもたらす土壌侵食と、それに伴う地力低下の防止であったが、技術として確立されたのは、すぐれた除草剤が開発された今世紀中葉以降のことである (Sprague & Triplett, 1986, 金沢, 1995)。

1971年にはブラジルのパラナ州の農務省南部農業試験場 (当時) が、土壌侵食防止の目的でその導入試験を開始し、1980年には農家の間にもかなり普及した。この年に情報を入手した国際協力事業団パラグアイ農業総合試験場 (CETAPAR-JICA: パラグアイの日系人入植者のための営農指導機関) が、各種耕耘法の一つに不耕起栽培を組み込み、5年間の比較試験を開始した。その試験経過から土壌保全に最も有望と考えられた不耕起栽培法を、農家に普及する活動が1982年に起され、翌年にはそれを導入する農家が現れた。また1987年には導入農家による全パ日系不耕起栽培研究組織協議会が結成され、CETAPAR-JICAの後援のもとに、パラナ川沿いのアルトパラナ・イタプア両県の日系農家に、この栽培法が急速に普及した。その間にも農家自身による除草剤や薬剤の使用量の低減等の技術改良が進んだ。〔パラグアイにおける不耕起栽培〕編集・発行委員会, 1993, 茨木, 1997)。

不耕起栽培の導入はパラナ川沿いの畑作地帯の土壌侵食を軽減し、作物の収穫量も耕起栽培をしのぐ水準に安定させた。また土壌が耕起できない湿潤状態にあっても、不耕起のまま適期播種できる利益をもたらした。しかし、この栽培法が連作障害等を克服し、持続性のある農法として確立出来るか否かは未知であった。

その後、不耕起栽培の研究は国としても取り上げられた。すなわち国際協力事業団 (JICA) を通じて行なわれた、日本・パラグアイの国際協力事業「パラグアイ主要穀物生産強化計画」の主要課題の一つとして、不耕起栽培が取り上げられ、1991~1995年の期間、イタプア県のパラグアイ地域農業研究センター (CRIA) において、関連する問題点の研究が実施された。その研究課題の一つが「不耕起栽培が土壌の理化学性に及ぼす影響の解明」であり、栽培研究室と土壌肥料研究室の共同研究として、それぞれ作物根の分布特性、土壌断面の比較とその理化学的特性の解明を分担することとなった。最初に地域の主要土壌であるテラローシャに限定して調査研究を進め、以下に述べる結果を得た。

2. 実験方法

1) 調査対象圃場

図-1 にパラグアイ東部の調査対象地域の位置と、地質的背景を示した。東部の地質はパラグアイ川に並行するように古生代砂岩・中生代赤色砂岩・玄武岩と、東に向かって順次後代の地層が現われている。パラナ川沿いの玄武岩は大陸の分裂・移動の際に地殻が歪み、ブラジルから続く裂目からマグマが噴出し、赤色砂岩を覆う地層となった (小原, 1997 a)。これが風化を受けてテラローシャ (暗赤色土の意) 土壌が生成されたので、その分布域は図中の玄武岩の分布域に重なる。この土壌は粘土含量が60%以上と高く養分に富み (小川・堀田, 1991, 宮沢, 1997), 分布域はパラグアイにおける穀倉地帯となっている。

東部地域の気候分布は、等温線・等降雨量線ともパラナ川に並行しており、調査地域内では大差がなく (小原, 1997b), 図-2 に示す CRIA の年間降雨量約1,600 mm, 平均気温約21°C に代表される。降雨量の月別分布はほぼ100~160 mm の範囲にあり、冬季の雨がやや少ない。年ごとの気象要素の変動は大きいものの、基本的に降雨の偏りが少ないことが、周年不耕起栽培を成立させる要因と考えられる。また月平均気温は15~26°C の範囲にあり、冬といえるほど寒冷期が持続しないので、常習的な凍霜害による冬作物選択の制限は少ない。

このテラローシャ土壌地帯に限定し、不耕起栽培を始めてからの経過年数を追って調査対象圃場を選定した。それらの圃場条件は表-1 に示す通りで、アルトパラナ県のイグアス地区で1カ所、イタプア県のラパス地区で2カ所の農家圃場の他に、詳細な調査のための CRIA の試

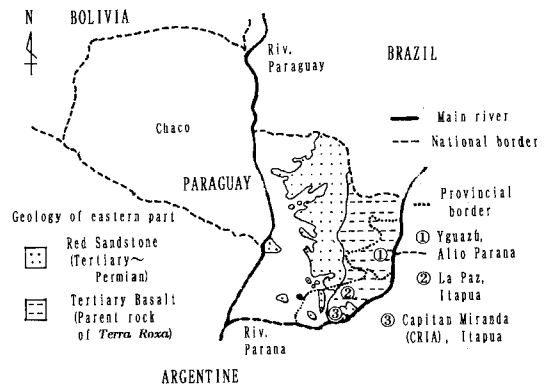


図-1 調査地域の所在とその地質的背景

Fig. 1 Locations of surveyed areas and the geological back ground

験圃場を加えた。さらに各地区それぞれ1カ所の耕起栽培の圃場を選んで対照とした。調査は土面に亀裂が多く発生する時期の夏作大豆を主とし、冬作小麦についてはCRIA 圃場の根系調査のみ行なった。

2) 調査分析項目

(1) 土壤断面調査

大豆が繁茂した開花期以後、根系の分布状態を広く見るために、複数の作条と直交する1m幅の調査断面を備えた深さ1mの試坑を掘り、常法による土壤断面調査を

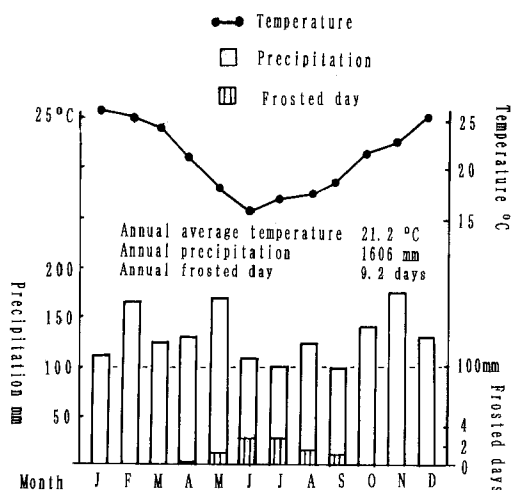


図-2 CRIAにおける気温・降水量・降霜日数の月別平均値

Fig. 2 Monthly average values of temperature, precipitation and number of frosted days at CRIA (1965~1994)

行なった。次いで区分した層位ごとに山中式硬度計による貫入抵抗値を測定したのち、物理性測定用の試料を3連制で容積100mlの金属製試料円筒に採取し、同時に化学分析用の試料も各層位から採取して、それぞれの分析に供した(土壤標準分析・測定法委員会, 1990)。

(2) 土壤の物理分析

試料円筒に採取した未攪乱土を1日飽水させ、砂柱法・加圧板法・遠心法とつないで、一定の土壤水分張力に対応する脱水量を秤量した。しおれ点まで測定したあと105°Cで乾燥して乾土重量を測定し、仮比重や各水分恒数を算出した。また、圃場容水量(pF1.75)における三相分布を実容積法で測定した。

(3) 土壤の化学分析

土壤の層位ごとの主な養分の分布状態を知るために、それぞれの風乾細土について、pH(H₂O)、チューリン法による有機物(OM)、ブレイII法による有効態リン酸(P)、ならびに1N酢酸アンモニウム溶液浸出のカリ(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)の原子吸光法による定量を行なった。

(4) 根系分布調査

夏作大豆の土壤断面調査を終えた後、大豆根の分布状況を観察記録し、代表的な複数株を掘り取った。根を切らない様に断面を掘り崩しながら、一株づつの根系を土を付けたまま採取し、慎重に洗って標本を作成した。しかし土壤の粘性性が強く、洗浄の際に細根が失われたので重量ではなく、写真による形態比較にとどめた。

冬作小麦については、部分的にはあるが、根量の比較を目的としてCRIA 圃場で根系調査を行なった。大豆と同様の試坑を掘り、まず表土の土層断面上に25cm平

表-1 調査圃場の概要

Table 1 Field conditions of surveyed farm

Location	Name of farm	Cultivation (History ¹⁾)	Crop	Season of survey
Alto Parana, Yguazu	Zanuzo	Plow tillage	Soybean	Summer, Feb. 1994
	Fukami	No-tillage (11)	Soybean	Summer, Feb. 1994
Itapua, La Paz	Sano	Plow tillage	Soybean	Summer, Mar. 1994
	Ito	No-tillage (8)	Soybean	Summer, Mar. 1994
	Tani	No-tillage (1)	Soybean	Summer, Mar. 1994
	Capitan Miranda	CRIA ²⁾	Soybean	Summer, Mar. 1994
Capitan Miranda	CRIA ²⁾	Plow tillage	Wheat	Winter, Oct. 1994
	CRIA ²⁾	No-tillage (3)	Soybean	Summer, Mar. 1994
		No-tillage (4)	Wheat	Winter, Oct. 1994

¹⁾ History : Continued years of no-tillage cropping

²⁾ CRIA : Centro Regional de Investigacion Agricola (in spanish)
 = Regional Investigation Center of agriculture

方の透明な OHP フィルムを置き、亀裂や根の分布域などの土壌構造を描き写した。次いで任意に選んだ小麦株直下の根の多い土層を深さ 10 cm 毎に 7 区分し、容積 100 ml の試料円筒を表面から挿入して、根を含む未攪乱土を 3 連制で採取した。表層土採取のあと順次土層を掘り崩して次層の表面を削り出して採取したので、各層とも上部約 5 cm についての調査である。円筒に含まれる小麦根を丁寧に洗いき取り、60°C で乾燥して秤量し、各層位毎の根の平均重量と分布割合を算定した。

(5) 亀裂を通路とする下層土への養分輸送の調査 夏作大豆の根系および土壌断面の調査後に、亀裂面を通路とする、表土から下層土への養分移動を検証する調査を行なった。土壌母材が共通な CRIA の試験圃場において、耕起・不耕起両区の各土壌断面から、層位別に 1 kg 程度の大きい土塊を取り、それぞれの試料毎に室内で乾燥を進めながら、両手で軽く力をかけて亀裂面を割り、可能な限りの小土塊に分割した。それらの表面の軟らかい部分をワイヤブラシで軽くこすり落とし、分割の際に砕け落ちた微小団粒や土粒子と併せて 1 mm の円孔篩を通し、細土だけを集めて土塊表面付着細土試料とした。また処理済みの 4 mm 以上の土塊を集めて砕き、1 mm の円孔篩を通した細土を土塊本体試料とした。各層位のこれら二つの画分の化学分析値を比較して、耕起・不耕起栽培の土壌養分移動におよぼす影響を考察した。

3. 結 果

1) 不耕起栽培下の土壌断面調査とその物理的特性

(1) 夏作大豆畑の土壌断面調査

不耕起栽培の代表例として、表土が最も硬化していた CRIA の試験圃場の土壌断面調査成績の概要を、対照の耕起栽培の成績とともに表-2 として示した。簡略に記載したので要点を補足する。

両者共通の特性として、玄武岩に由来する暗赤色の重粘な土壌であり、基本的に付着性が強い。また下層土 (Bt 層) は層界が判然とせず、小土塊の表面に光沢があってニトソルの特徴を示すほか、弱度の亜角塊状の構造が見られ、物理性は悪くないと考えられた。例えば地上にさらされた下層土の塊は、半月程の間に 5 mm 程度の亜角塊状に自壊した。しかし、湿った状態の下層土は容易に指頭で構造を壊すことができ、この際に強い付着性が現れた。これに対して有機物の多い表土では付着性が弱められ、安定した団粒構造が発達していた。

不耕起土層断面の特徴は、乾燥時の表土が著しく硬化することで、山中式硬度計で測定した絶対硬度は、耕起表土の 4 kg に対して約 10 倍の 38 kg/cm² であった。両区の表土下の Ap₂ と AB 層はともに 12 kg で差がなく、

さらに下の Bt₁ 層では 4 と 9 kg で、不耕起の方が硬化していた。この様に不耕起下では表土の硬化が下層に向けて深化しており、それに対応して下向きに走る多くの亀裂が発生し、下層土への根の通路となっていた。

(2) 大豆畑土壌の物理分析成績

土壌断面調査の際に、各層位から内容 100 ml の試料円筒に未攪乱土試料を採取し、pF 1.75~3.0 の領域の迅速有効水分、pF 3.0~4.2 の難利用水分などの物理分析を行なった。CRIA 試験圃場のそれらの成績を、仮比重とともに表-3 に示した。仮比重の数値から、耕起・不耕起の耕作法による圧密土層の位置の違いが知られる。不耕起表土の仮比重は 1.614 で、耕起土層の 1.462 に対して密な状態にあり、有効水分含量は 1.2% 減少している。

各層位の有効水分含量に土層の厚さを加算して得た、層位別有効水分保留量の深さ 1 m までの積算値は、耕起栽培に比べて不耕起栽培の方が多く、しかも迅速有効水分の割合が増している。しかし両区とも深さ 1 m の土層の有効水分保留量は 100 mm 以下であり、夏季の連続晴天下では水不足になり易いと考えられる。

不耕起栽培の継続に伴う土壌の三相分布の変遷を図-3 に示したが、各圃場ごとに層位の深さが異なるので、縦軸には深さを採用した。不耕起栽培への出発点にあたる上段の耕起栽培の 3 例の間では、土壌三相の分布形態は類似している。

下段には、左から不耕起栽培の経歴順に三相分布図を配列した。不耕起栽培 1 年目の三相分布は耕起栽培と似ているが、3 年目の例では元の耕起土層とその下の圧密層の、0~24 cm の層が一体化して固相率が高まり、ち密な状態になっている。しかし 8 年目には、ち密土層の上部に固相率の減少した薄い表土が再生しており、さらに 11 年目の例では表土が厚くなるだけでなく、ち密な次表層直下でも固相率が低下しており、耕起栽培の三相分布の形に近づく傾向が見られる。

不耕起栽培 11 年目の圃場の所有者である深見氏の証言によれば、「不耕起栽培に転換した圃場では、初期には表土の硬化が進み、乾燥時の亀裂の発生が著しかったが、5 年目位から畑面を踏む足裏の感触が軟らかくなり、亀裂の発生が減少した。」とのことである。

2) 不耕起栽培下の根系分布特性

(1) 夏作大豆の根系分布

耕起栽培下では表土が膨軟であり、その下の圧密層にかけて亀裂の発生が少なく、下層土には少数の細い根が散在するだけで、根系の主体は耕起層を横に拡がっていた。不耕起栽培下では、元の耕土層とその下の圧密層とが一体化して硬化し、乾燥収縮の進行により生じた多数の亀裂に沿って大豆の主根が下層土に達し、分岐して拡

表-2 耕起・不耕起栽培下の大豆畑土壌断面の特徴

Table 2 The characteristics of soil profile of soybean field under tillage and no-tillage croppings
Tillage at CRIA

Horizon	Depth cm	Color ¹⁾	Organic mater	Texture	Structure	Compactness ²⁾ kg/cm ²	Content of roots
Ap ₁	0~ 10	10 R 3/2.5 (DRB)	low	HC (Heavy Clay)	strong, medium granular (a few fissures)	3	common, very fine & fine roots
Ap ₂	~ 20	10 R 3/3 (DRB)	low	HC	strong, coarse subangular blocky (few fissures)	12	a few, very fine roots
Bt ₁	~ 35	10 R 3/4 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	4	few, very fine roots
Bt ₂	~ 70	2.5 YR 3/4 (DRB)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	5	few, very fine roots
Bt ₃	~100 ⁺	2.5 YR 3/5 (DRB)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	5	few, very fine roots

No-tillage of 3 years at CRIA

Horizon	Depth cm	Color ¹⁾	Organic mater	Texture	Structure	Compactness ²⁾ kg/cm ²	Content of roots
A ₁	0~ 10	2.5 YR 3/3 (DRB)	low	HC (Heavy Clay)	strong, coarse subangular blocky (many fissures)	38	common, very fine & fine roots
AB	~ 24	10 R 3/3 (DRB)	low	HC	strong, coarse subangular blocky (many fissures)	12	a few, very fine & fine roots
Bt ₁	~ 34	10 R 3/6 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (a few fissures)	9	a few, very fine & fine roots
Bt ₂	~ 61	10 R 3/6 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	3	a few, very fine roots
Bt ₃	~100 ⁺	10 R 3/6 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	3	a few, very fine roots

¹⁾ Color : Referred to the Munsell color notation system, (DRB ; Dark Reddish Brown, DR ; Dark Red).

²⁾ Compactness : Resistance values measured by Yamanaka's handy type cone-penetrometer.

がっていた。

これらの代表的な根の標本を、耕起栽培から不耕起栽培に転換した経歴順に、左から右へ並べて写真-1に示した。粘土質の付着土壌を洗い落す際に、耕起区では下層に伸びる少数の根も細いために失われた。一方、健全な主根が亀裂を通じて下層に伸びるといふ不耕起栽培の根の分布特性は、写真中央の1年目の例において、すでに認められた。

(2) 冬作小麦畑表土の構造性と根の分布形態

夏作大豆畑での根系分布の特性は、冬作小麦畑でも同

様に見られたので、耕起・不耕起両区の根量の比較を試みた。それに先立って CRIA 試験圃場の両区の表土の、深さ 25 cm までの土層における根の分布領域、土塊や亀裂などの土壌構造の図化を行なった。図-4 に両区の模式図を比較したが、表土の団粒構造の発達した根の分布領域を打点で示し、播種溝跡には横線を加え、散在する土塊は白抜きのまま残した。表土の下に接する圧密層は、表面を限る線の内側にハッチを書き加え、中を走る亀裂は形のまま黒く塗り潰した。

耕起栽培下では、浅い播種溝跡を上部に含む、約 20

表-3 耕起・不耕起栽培下の大豆畑土壌の仮比重と有効水分含量

Table 3 Bulk density and available moisture retention of soybean field soil under tillage and no-tillage croppings

Tillage at CRIA

Horizon	Depth cm	Bulk density	Available moisture %		Retention of available moisture ¹⁾ mm	
			Rapidly	Non-easily	Rapidly	Non-easily
Ap ₁	0~ 10	1.462	6.4	4.1	6.4	4.1
Ap ₂	~ 20	1.640	3.2	5.5	3.2	5.5
Bt ₁	~ 35	1.532	3.9	5.2	5.9	7.8
Bt ₂	~ 70	1.329	4.1	4.8	14.4	16.8
Bt ₃	~100 ⁺	1.337	4.0	5.3	12.0	15.9
Total					41.9	50.1

No-tillage of 3 years at CRIA

Horizon	Depth cm	Bulk density	Available moisture %		Retention of available moisture ¹⁾ mm	
			Rapidly	Non-easily	Rapidly	Non-easily
A ₁	0~ 10	1.614	5.9	3.4	5.9	3.4
AB	~ 24	1.618	4.5	3.8	6.3	5.3
Bt ₁	~ 48	1.399	5.0	4.5	5.0	4.5
Bt ₂	~ 71	1.302	5.1	4.6	13.8	12.4
Bt ₃	~100 ⁺	1.377	4.5	5.8	17.6	22.6
Total					48.6	48.2

¹⁾ Retention of available moisture mm = available moisture% × (thickness of horizon cm/10 cm)

cmの厚さの表土が団粒構造の発達した根の分布領域であり、その下に根に乏しい圧密土層が水平方向の層として重なっていた。

これに対して不耕起栽培下では、団粒構造の発達した表土は浅く、すぐに硬い土層に変るが、そこに下向きの亀裂が大略10cmの間隔で走り、それらを中心として元の圧密層下部から下に、団粒構造の発達した根の分布域が出来ており、垂直方向の構造が形成されていた。なお圧密層直下の団粒構造の発達も、その部位の固相率の低下に寄与するものと考えられる。

(3) 冬作小麦の根系の垂直分布

部分的試料採取ではあるが、両区の小麦畦直下の垂直方向の根の分布量を、層位ごとの3連平均値により表-4に示した。また、その全層位合計値に対する分布割合を並記したが、表土の20cmまでの分布割合は、耕起区の86%に対して不耕起区が72%と少ない。中間の20~50cmの層への分布割合には差が少なく、したがって50cm以下の下層土ではそれぞれ2%と14%と、不耕起区の分布割合が著しく高くなっている。深い土層に多くの根が分布することは耐旱性を増し、また枯死後に有機物や養分を多く残すと考えられる。

3) 亀裂と根による下層土への養分輸送の可能性

(1) 不耕起栽培下土層の養分分布

不耕起栽培が土壌養分の消長におよぼす影響を知るため、調査圃場のうち不耕起経歴が最も長いFukami農場と、それに近接した耕起栽培のZanuzo農場の土壌断面各層位の化学分析成績を表-5で比較した。両圃場の土壌断面には、前述の耕起・不耕起の根系分布の差が明らかに見られた。

耕起圃場のAp層のカルシウム含量は下のBt層より低い。逆にリン酸・カリ含量はBt層で急減しており、とくにリン酸は溶出できない程であった。これに対して不耕起の例では、マグネシウムを別として各養分含量が表土で高く、下層に向って漸減する傾向を示し、Bt層での有機物以外の養分含量が耕起の例に比べて高い。

不耕起栽培では収穫残渣で畑面を被覆(マルチ)して管理し、肥料も表面に散布して土層へは混和しないから、溶解度の低い有機物やリン酸は表面に集積するという(Sprague & Triplett, 1986, 金沢, 1995)。表-5の不耕起栽培でも、有機物・リン酸の表土への著しい集積が見られる。

有機物の場合、一部はフルボ酸等の水溶性物質とし

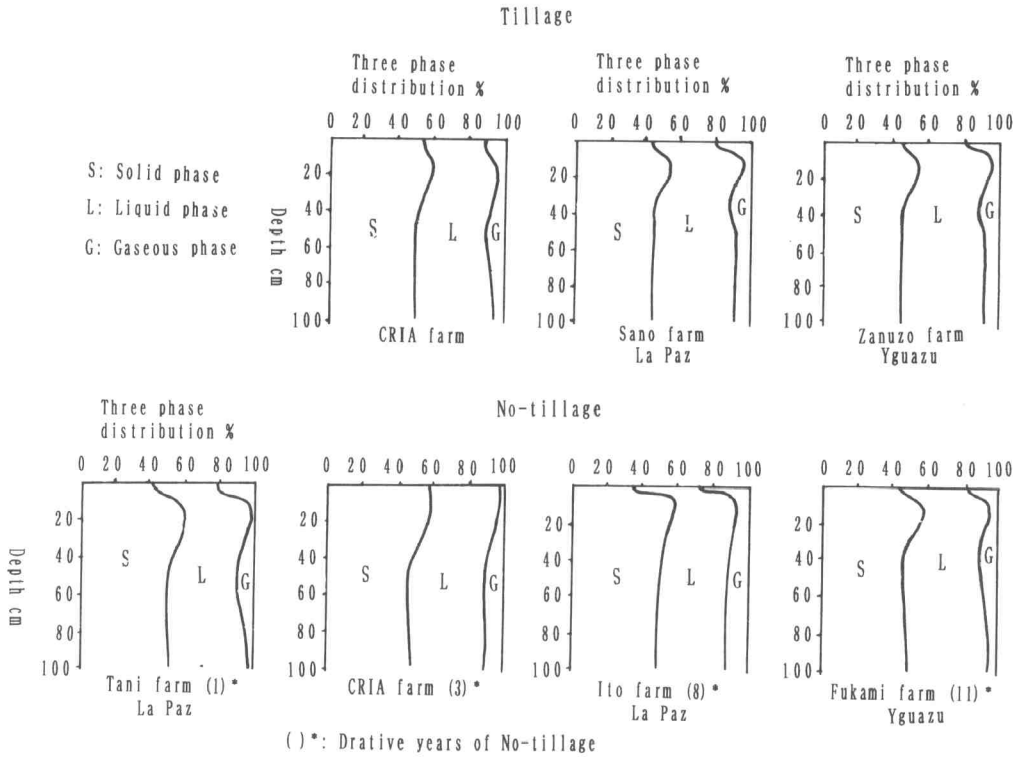


図-3 不耕起栽培下の土壤の三相分布の変遷

Fig. 3 Change of three phase distribution of the soil under non-tillage croppings

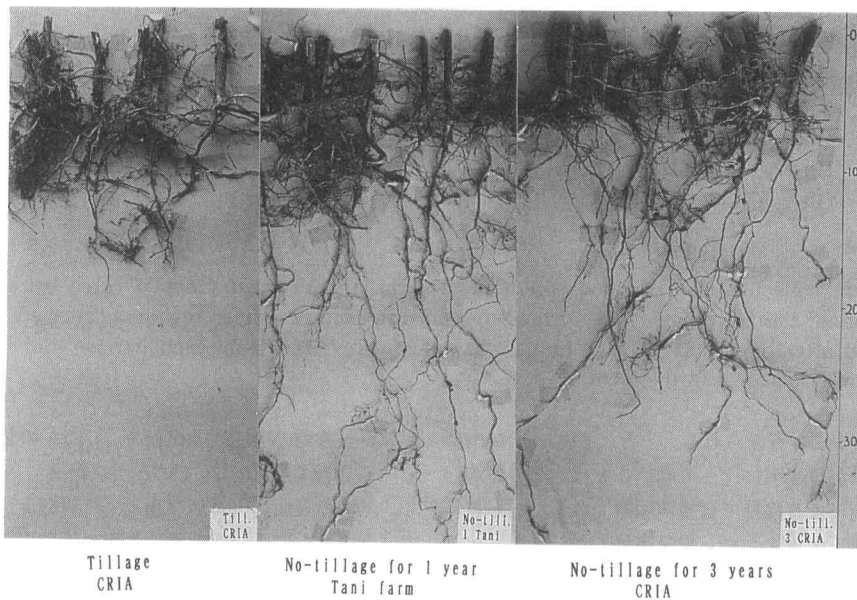


写真-1 耕起および不耕起栽培下での大豆根系分布

Photo. -1 Distribution of soybean root system under tillage and non-tillage croppings

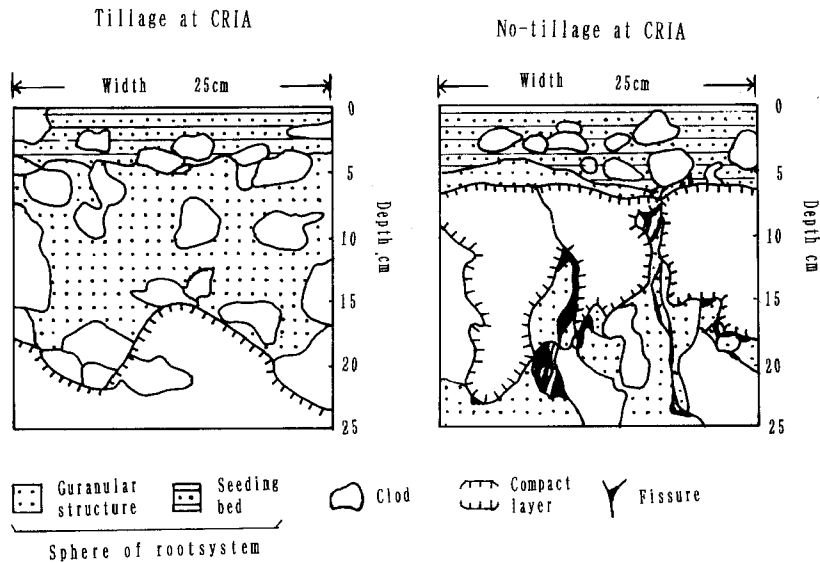


図-4 耕起栽培と不耕起栽培の小麦畑表土の構造性の模式図

Fig. 4 Schema of the surface soil structure in tillage and non-tillage wheat field

表-4 耕起および不耕起栽培下での小麦根系分布

Table 4 Distribution of wheat root systems under tillage and no-tillage croppings

Tillage at CRIA				No-tillage at CRIA			
Depth cm	(Horizon)	Distribution of root		Depth cm	(Horizon)	Distribution of root	
		weight mg	ratio %			weight mg	ratio %
0~5	(Ap ₁)	78.9	60.8	0~5	(A ₁)	128.2	56.3
10~15	(Ap ₂)	32.4	25.0	10~15	(AB)	35.9	15.7
20~25	(Bt ₁)	7.2	5.5	20~25	(AB)	9.5	4.2
30~35	(Bt ₁)	4.1	3.1	30~35	(Bt ₁)	10.9	4.8
40~45	(Bt ₂)	4.1	3.2	40~45	(Bt ₂)	10.9	4.8
50~55	(Bt ₂)	1.3	1.0	50~55	(Bt ₂)	13.6	6.0
60~65	(Bt ₂)	1.8	1.4	60~65	(Bt ₃)	18.8	8.2
Total		129.8	100.0	Total		227.8	100.0

Samples were collected from divided soil horizon right under wheat cropped ridge by using a soil sampling core of 100 ml volume. Wheat roots contained in each sampling core were collected by washing and weighed after drying at 60°C. 3 random samples were taken from each horizon and the average value of them was shown in the table.

て、下層へ浸透すると考えられる。一方、不耕起下のBt層のリン酸含量が耕起下に比べて高いことは、その難溶性からみて浸透による移動では説明困難である。むしろ亀裂に表土が落下・流入して、養分移動をもたらした可能性が高いと考えられたので、このことを検証するために次の実験を行なった。

(2) 亀裂と根による下層土への養分輸送の可能性
亀裂への表土の落ち込み、あるいは流下による下層土

への養分移動の可能性の検証を、CRIAの試験圃場の耕起・不耕起栽培の両区で試みた。両区の各層位について、土塊の表面に付着した細土(付着細土)と、土塊本体(土塊)との画分間の養分含量の比較を行なった結果を図-5に示した。なお、この方法では付着細土画分への土塊の一部の脱落混入は避けられない。

耕起区では、全層にわたり付着細土と土塊との養分含量の差は小さい。耕起が砕土と攪拌という均質化の作業

表-5 耕起・不耕起栽培下の大豆土壤断面の養分分布

Table 5 The nutrient distribution in the soil profile of soybean field under tillage and no-tillage croppings

Zanuzo farm : Tillage

Horizon	Depth cm	pH (H ₂ O)	O.M. ¹⁾ %	P ppm	K me	Ca me	Mg me
Ap ₁₁	0~ 2.5	5.8	2.6	5.6	0.5	3.9	0.6
Ap ₁₂	~ 7	5.7	2.7	6.0	0.3	4.0	1.1
Ap ₂	~ 19	5.5	2.2	0.7	0.1	3.7	0.9
Bt ₁	~ 43	5.5	1.7	0.0	0.1	5.2	0.8
Bt ₂	~ 60	5.9	1.5	0.0	0.4	6.0	0.8
Bt ₃	~100 ⁺	6.0	1.5	0.0	0.1	4.5	1.2

Fukami farm : No-tillage of 11 years

Horizon	Depth cm	pH (H ₂ O)	O.M. ¹⁾ %	P ppm	K me	Ca me	Mg me
A ₁₁	0~ 2.5	6.4	4.1	17.9	1.1	7.3	1.2
A ₁₂	~ 7	6.4	2.8	9.1	0.8	6.3	1.0
AB	~ 21	6.6	2.3	2.1	0.5	7.0	1.0
Bt ₁	~ 43	6.7	1.8	0.7	0.3	6.3	1.1
Bt ₂	~ 60	7.0	1.4	0.5	0.3	5.2	1.2
Bt ₃	~100 ⁺	6.9	1.0	0.5	0.5	4.6	1.5

¹⁾ O.M. : Organic Matter

にはかならず、また亀裂の発生と下層土への根の分布が少ないため、細土の落込みや根の腐朽による、表土から下層土への養分供給が期待できないことが理由として考えられる。なお例外的にマグネシウム含量が土塊の方で高くなっているが、理由は不明である。

不耕起区では、リン酸を別として全層にわたり付着細土の養分含量が土塊に比べて大きい。これは表土に多発する亀裂に、表面に集積する富栄養の土壤粒子が落ち込んだ結果と考えられる。また亀裂が減少する下層土では、耕起区に比べて根の分布量が多いため、その腐朽後に養分を多く残すと考えられる。

4. 考 察

1) 土層の亀裂の発生と根系分布の深化：

不耕起栽培は温暖地帯の粘土質土壤において、耕起栽培よりも増収するといわれるが、畑面からの無駄な水分蒸発が、収穫残渣マルチによって抑制されることが一つの要因であり、水分環境が良くなるために根系分布はむしろ浅くなると考えられている (Sprague & Triplett, 1986)。乾燥による土層の亀裂発生が作物の根の下層土への分布を助長することは、不耕起水稲作に関して報告されている (長野間ら, 1991) が、畑地での報告は見当

らなかつた。

図-2の CRIA の気象図に見るとおり、亜熱帯で乾季のないパラグアイ東部のテラローシャ土地帯であっても、蒸発量の多い夏季の晴天が10日以上も続けば、耕起栽培の土面にさえも乾燥による土層の亀裂の発生が見られる。表-2の CRIA 圃場の土壤断面の硬度や、図-3の三相分布の推移に見るとおり、不耕起栽培に転換した初期に表土が著しく硬化するが、亀裂の発生が盛んなのもこの時期で、その砕土作用の集積により表土が軟化するとともに、亀裂の発生も減少すると考えられる。一方、耕起土層の下の圧密層の硬度は、不耕起栽培下の次表層と同程度でありながら亀裂は少なかった。孔隙が多くて亀裂が起きにくい耕土層に保護されるためと考えられる。

テラローシャはオキシソルに近いまでに風化を受けているので、下層土にも亜角塊構造が弱度ながら発達している。しかも塩基類も高い水準で残されており、亀裂により圧密層が破られ、下層土への通気性が改良されれば、酸素を必要とする畑作物根域の下層土への拡大が可能となる。このことは写真-1の不耕起栽培1年目の例ですでに認められる。さらに不耕起栽培11年の FUKAMI 農場の土壤断面調査では、表層の粒状構造化が進んで

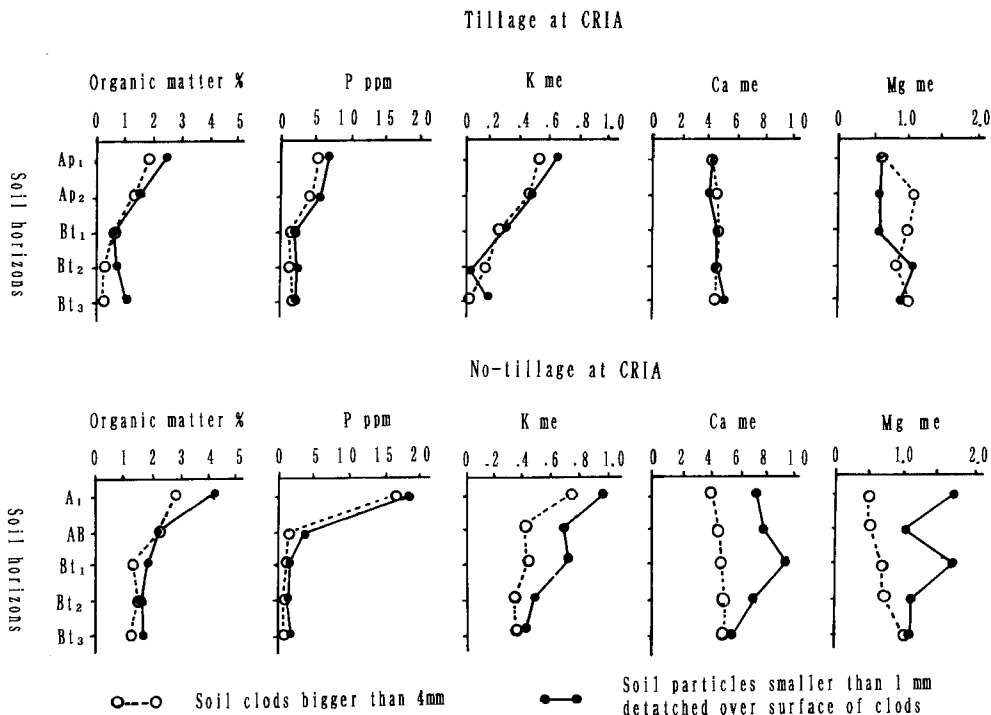


図-5 各土層から採取した土塊とその表面に付着した粒子との間の養分含量の比較

Fig. 5 A comparison of nutrient content between clods and soil particles adhering to the surface of the clods; the clods were collected from each soil horizon

も、硬化土層の亀裂を通じて大豆の根が広がる特性は、耕起という破砕作業がないために保持されており、60 cmの深さにも大きな根粒が、また1 mの深さにアリの巣が見られたことから、好気的環境は持続すると考えられた。

圧密土層をサブソイラーで破砕した畑の土壌断面においても、不耕起栽培下と同様に下層土への根域拡大が見られたので、不耕起栽培の導入が困難な場合は、圧密層の破砕耕がそれに代る手段と考えられる。

2) 下層土への養分の転送

テラローシャの粘土含量が高く、不耕起栽培下では特に乾燥・収縮による亀裂を起し易いので、ヴァーティソルと同様の、養分に富む表層土の亀裂への崩落や、懸濁水としての流入が起ると考えられるが、その可能性は図-5に関して説明した。しかし大きな亀裂は硬化土層に限られるので、表土の落ち込みによる下層土への養分供給は、硬化土層下面の境界付近から下へは急減すると考えられる。

一方、不耕起栽培下の下層土(Bt)では、亀裂を通路として分布する根系が、表-4の小麦作では全体の28%と耕起区の2倍に及んでいる。作目により変動するとし

ても、収穫後の残渣根の腐朽により下層土に供給される養分は不耕起区で大きいと考えられる。表土に施した養分を作物自身の働きで下層土に転送する可能性については、表-5のFUKAMI農場の下層土の養分の中で、浸透性の小さいリン酸含量がZanuzo農場に比べて明らかに高いことから推定される。

テラローシャは元来の肥沃度が高く、カリ肥料は施用しないのが農家の慣行となっている。しかし、Zanuzo農場の化学分析値に見られるように、カリ含量の低い例も散見されるので、将来の施肥上の問題点と考えられる。

3) 気象的条件

パラグアイの気候は南東部のパラナ川沿いの地帯で降水量1,600 mm、平均気温21°Cと恵まれた環境にあり、周年作物栽培を可能にしている。この南東部から北西部のチャコ地方に向かって高温・乾燥の度が強まる(小原, 1997 b)。

不耕起栽培では収穫残渣マルチによって、無駄な土面からの蒸発が抑制されるので、熱帯・亜熱帯の水分不足の起りやすい、雨の少ない地域での作物増収効果が大きい、砂質土壌ではその効果が見られないといわれる

(Sprague & Triplett, 1986)。この様に不耕起栽培はどこでも成功するとは限らない技術であり、その成否の原因についての土壤の理化学的解析がなければ、普遍的技術とはなり得ない。例えばパラグアイ東部の砂質土地帯では、不耕起栽培によりテラローシャ土地帯同様に増収したということである。これは通説に合わない結果であり、土壤環境の解析による相当の説明なしには、技術の適用条件を定めることができない。

また北西部チャコ地方の中央部では雨量が700mm程度であり、粘土質土壤の区域は塩害が起きるので被害の軽い草地として利用され、また塩害の軽い砂質土壤の区域には一般作物が栽培されるという。砂地は浸透性が良いので塩害が起きないという推論に立てば、粘土質土壤であっても、不耕起栽培により良好で均一な浸透性を付与できれば、雨季には一般作物の栽培が可能とも考えられる。この様に不耕起栽培の可能性に関して、パラグアイ国内に限っても興味ある問題が残されている。

5. 要 約

パラグアイ東部のテラローシャ土地帯に導入され、土壤侵食防止の成果をあげた不耕起栽培法について、その継続が土壤の理化学性に及ぼす影響を評価した。

テラローシャは粘土含量が高いので、不耕起栽培下の表土は乾燥時に著しく硬化・収縮して多くの亀裂を生じ、それを通じて作物の根系が下層土に拡がっていた。耕起栽培下では耕起土層の中を根が横に拡がっており、下の圧密層を破って下層土に拡がる根は僅かであった。不耕起下の亀裂によって破碎された構造は保存され、経過が進むにつれて表土は耕起された状態に近づくが、下層土での根の活動を可能にする好気的環境は維持される。

この亀裂に肥沃な表土が落下あるいは流下して下層土を肥沃化する可能性を検証するため、各層位毎に土塊本体とその表面付着土とを分画した試料をつくり、それぞれの養分含量を比較したが、不耕起下では画分間の差が大きく、養分の流下があると考えられた。不耕起栽培経歴が長い畑の、亀裂が微細になる下層土で、溶解度の低いリン酸の富化が見られるのは、分布域が深くなった根系の腐朽による養分転流が関与すると考えられる。この様にテラローシャ土地帯の不耕起栽培下では、表土の肥培管理を適切にすれば、自然の働きによる下層土の理化学性の持続的改良が可能と考えられる。

6. 謝 辞

本研究を実施するにあたり、イグアスおよびラパス農

業協同組合の指導部の方々から、不耕起栽培に関する情報を提供して頂いたが、とくに深見明伸氏からは表土の亀裂の発生の経過などの観察結果をご教示頂いた。また多くの農家の方々から調査圃場を提供して頂いた。

プロジェクトリーダーの岩田文男博士からは、研究推進上の多くのご援助を頂いた。

あわせて厚くお礼申し上げる。

引 用 文 献

- 土壤標準分析・測定法委員会 (1990) : 土壤標準分析・測定法, 博友社, 東京.
- 茨木和典 (1997) : 中南米の農地劣化地域における持続的作物生産技術 III. パラグアイの自然環境と持続的作物生産 [B] 持続的作物生産 2. 畑作物の生産 (栽培) 技術, 全国農業改良普及協会, 190~230.
- 金沢晋二郎 (1995) : 持続的・環境保全型農業としての不耕起栽培, 畑作物の収量と土壤の特性, 土壤肥料学雑誌 66 : 286~297.
- 宮沢数雄 (1997) : 中南米の農地劣化地域における持続的作物生産技術 II. ブラジル・セラードの自然環境と持続的作物生産 [A] 自然環境 4. セラードの土壤 6) 構造テラロッシュ, 全国農業改良普及協会, 63~64.
- 長野間宏・児玉 徹・金田吉弘・山谷正治 (1991) : 耕起方法が低湿重粘土汎用水田の土壤物理性に及ぼす影響, 土壤の物理性 62 : 43~52.
- 小川和夫・堀田利幸 (1991) : イグアス地域における畑土壤の理化学性 (肥沃度特性) と土壤管理法, パラグアイ農業総合試験場 (国際協力事業団), 3~55.
- 小原 洋 (1997a) : 中南米の農地劣化地域における持続的作物生産技術 III. パラグアイの自然環境と持続的作物生産 [A] 自然環境 1. 地形・地質, 157~159, 4. 土壤, 全国農業改良普及協会, 170~178.
- 小原 洋 (1997b) : 同上 [A] 自然環境 2. 気候 (気象・水文), 全国農業改良普及協会「パラグアイにおける不耕起栽培」編集・発行委員会 (1993) : パラグアイにおける不耕起栽培, 全パ日系不耕起栽培研究組織協議会, 160~162.
- Sprague, R.Q. and Triplett, G.B. (1986) : No-tillage and surface tillage agriculture The tillage revolution, John Wiley & sons, New York.

受稿年月日 : 1998年11月13日

受理年月日 : 1999年6月10日

各種センサ



D220

ターミナルボックス

- L810B/L840との接続用ターミナルボックス。
- 頻繁に配線が変わるアプリケーションに便利です。



D200A

熱電対アンプユニット

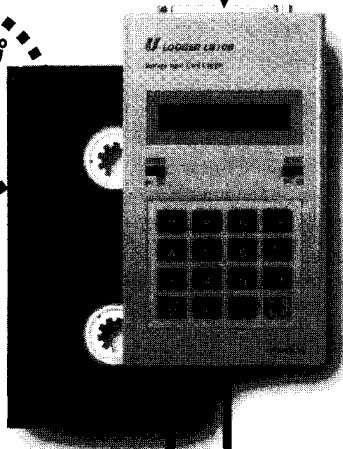
- 熱電対をL810BまたはL840に接続するためのアンプユニット。
- 熱電対7ch、デジタル4bit入力。
- KT 2タイプの温度が直読できます。

各社
シグナル
コンディショナ

ダイレクト接続



ビデオテープ
サイズが
うれしい!



さまざまな分野の現場計測に機動力を発揮。
データ収集の新しい流れが、ここにあります。

温度・湿度・水位・微小変位・衝撃など、現場での様々なデータ収集を手軽に行える携帯型データロガーです。小型ながら、豊富なロギングモード、省電力化設計、大容量メモリによる長期間データ収集など、フィールドでの応用範囲を広げる充実のスペックです。

DATA LOGGER

データロガーLシリーズ

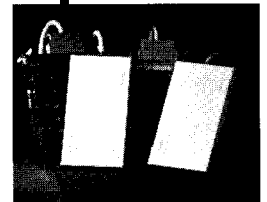
- L810B/電圧入力・長期間タイプ ●L840/電圧入力・超高速タイプ
- L822/熱電対入力・温度記録タイプ ●L830/測温抵抗体入力・温度記録タイプ ●L835/温湿度センサ入力・温湿度記録タイプ

RS-232C



メモ리카ード

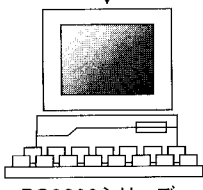
- L810B、L840で使用できます。
- JC128、JC256、JC512、JC1024、JC2048



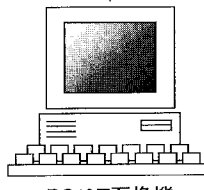
RW98A RWAT RW98AN

メモ리카ードドライバ

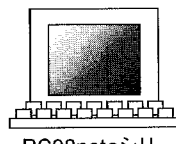
- PC9801シリーズ、PC/AT互換機、PC98noteシリーズ専用のメモ리카ードドライバです。
- メモ리카ードに記録したデータをパソコンに高速送信するのに最適です。



PC9800シリーズ



PC/AT互換機



PC98noteシリーズ

UNIPULSE

ユニパルス株式会社

※資料請求・お問い合わせは、本社宛お気軽にどうぞ

本社・工場 / 〒343 埼玉県越谷市千間台西2-7 TEL.0489-77-1235 FAX.0489-76-5200 営業所 / 東京・横浜・名古屋・大阪・広島・福岡

豊かな土づくりを目指して

—環境土壌学—

環境土壌学編集委員会編著

農業土木学会 1998年発行 A5版 186ページ 3,200円

子供の頃、たんぼで虫取りや魚取りで駆け回り、稲刈りが過ぎれば野球、たこ揚げ、模型飛行機を飛ばしたことは誰にもある懐かしい思い出であろう。それが畑や栗林でも同様に懐かしいものであろう。昔はたんぼや畑というものが身近にあった。人々の暮らしがたんぼや畑と共生していたように思う。しかし、農業の近代化に伴い、たんぼから子供たちの遊ぶ風景は消え、規則正しく区画され、用水パイプラインや排水路が完備されたものに変っていたのはいつの頃からだろう。

「豊かな土づくり……」という表題から、わらと牛馬の堆厩肥のような有機質肥料を用い、除草剤や農薬の使用を極力控え、素直に豊作を喜ぶ一昔前の情景を想像するのは評者だけだろうか。

本書は、農業土木学会による地域環境工学シリーズの5巻として出版された。本書の執筆は、岩田進午、赤江剛夫、粕淵辰昭、長谷川周一、宮崎毅の5氏である。いずれも本研究会を代表する執筆者であり、各氏の豊富な経験と多くの論文に基づく解説は、幅も広ければ内容も深く、多くの知識を得るには十分な量である。この著名な執筆者を各項目に配し、重複なく論を展開することは、かなり大変であったと想像がつく。以下に各章ごとのポイントを記す。

まえがきは、本書を発行した強い思い入れを感じる。化学肥料は速効性があり、収量を増やす。反面、化学肥料の多投は環境に負荷を与え、水はけ、水もち等の土壌の物理性を悪化させる。加えて、上中作物の養分のバランスがくずれ、作物が病弱になり、病虫害が増加する。農薬は病虫害防除や除草の労働力を減らし、収量の増大をもたらす。反面、土壌微生物や土中動物の種・数を減らし、上中の生物相を単純化させ、生態系を破壊している。生物多様性こそが生態系の保全の要であり、病虫害の多発を抑制し、土を肥沃にする機能を保障するという、世に警鐘を鳴らす姿勢に気概を感じる。

1章には食糧と土という基本命題を置き、穀物耕地面積が拡大から減少へ、穀物生産量の増加傾向にも伸びがとまり限界が見えてきたこと、主要国の中で食糧自給率が最も低い我が国の将来への懸念。地球の温暖化やオゾン層の破壊をもたらす二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素

の増加は、農業や土壌と密接に関係していることが述べられている。

2章には基礎学として体系だった解説であるが、各著者の得意となる分野だけに読んでいて分かり易い。土壌物理学、土壌学が中心であるが、土中空気、硝酸態窒素の移動、土中の微生物、土中の動物、土壌と植物の根の関係など、単に作物生産の場でなく生態系の中で土壌を見つめることが新しい。

3章は各論への展開であるが、土との関係でみた気候、植生、河川、火山、水田、畑、干拓地、乾燥地等々である。最近では干潟や湿地の保全の重要性が言われ、干拓工事が見られないが、食糧増産の早道として、かつて大規模事業で行った経験も財産である。国際的援助として我が国の農業技術も、乾燥地や砂漠等、極限的環境の中で計画実施されているのが昨今の状況である。蒸発散が降水量よりも大きい乾燥地で、かんがい水によって持ち込まれた塩分、あるいは地下水位の上昇による上中の塩分が地表に集積する。その除塩に関する方策も紹介されている。

4章は積極的土づくりや生育に好ましい農地や耕作法に対する方策が記述されている。栽培方法の進歩に伴い時々刻々変化する技術であるため、系統だった技術の発展や利用が考えられなければならない。土壌改良と土層改良、かんがいと排水、汎用農地の設計、不耕起栽培の長所と短所、労働生産性の向上ばかりでなく、土地生産性についても不耕起土の化学性や微生物相の変化についても言及している。

5章は、地球環境と土と題し、土壌の侵食、砂漠化、塩類化から、我が国食糧生産と窒素投入、さらには河川や湖沼の富栄養化等、多岐にわたり記述されている。中でも化学肥料、機械、農業へのエネルギー投入量が、主要国の中で群を抜いて大きいこと等、省資源に取り組む必要性が指摘されている。

6章は、持続可能な農業のための土について各論をまとめている。収量の安定と持続性、環境に負荷を与えない、美味で栄養価の高い作物の生産を目的とした土づくりをめざし、若い人々の参加こそが解決の糸口になることで結んでいる。

本書は、土壌に興味のある人、研究対象としてこれから取り組もうとする人、さらに深く研究しようとする人、いづれの人たちにも極めて参考になる内容を含んで

いる、是非一読をお薦めする。

坂西研二 (国際農林水産業研究センター沖縄支所)

I. 新旧事務局引継会

日 時：1999年4月17日(土) 14:00～
 会 場：日本大学生物資源科学部湘南校舎7号館2階
 地域保全工学研究室
 出 席：河野会長，石川・鈴木庶務幹事，重松会計幹事，青木編集幹事，成岡・中村・奥山旧幹事

引継内容：

- (1) 学術会議への登録，学協会著作権協議会への連絡，関連学協会への連絡，会則変更等の業務引継
- (2) 会計・会員管理等の業務引継
- (3) 会誌第81号の発刊経過および第82，83，84号の編集進捗状況の説明と編集業務引継

II. 1999年度第1回編集委員会

日 時：1999.6.11(金) 15:00-17:30
 場 所：日本大学生物資源学部東京校舎第3会議室
 出席者：河野英一(会長)，軽部重太郎(編集委員長)，加藤 誠，加藤英孝，原口暢朗，関勝寿，青木正雄(編集幹事)，奥山武彦(旧編集幹事)

1. 新会長のあいさつ
2. 編集委員会体制について
 - (1) 奥山氏(旧編集幹事)から1997-1998年度の編集経過と引き継ぎ事項について報告があった。
 - (2) 編集作業の流れについて
 編集作業の流れについて話し合った。
 - (3) 閲読体制について
 報文の閲読者二人のうち一人は編集委員に，他の一人は編集委員以外の人(ただし，原則として会員)に依頼するのが望ましい。ただし，閲読の適任者がいれば二人とも編集委員でもよいし，二人とも編集委員以外の会員でもよい。また，論説・総説などの閲読者一人のものについてはできるだけ編集委員が閲読する。

(4) 英文原稿のチェックについて

編集事務局は英文のチェックをしないので，閲読者には英文が適正であるかについてもチェックしてもらおう事になる(閲読報告の書式の中に，英文の校閲を別に必要とする旨の判定をチェックする欄をつくっておく)。問題がある英文の校閲は，著者の責任で依頼する。

3. 第82号の目次について
 編集幹事から報告があり，話し合った。
4. 会誌の英文名について
 前編集委員会の提案“Journal of Soil Physics”について意見を出し合った。基本的にはこれでよいが，どこで出している雑誌であるかが分からないという事があれば，日本の土壤物理学会の会誌である事を明確にするために，“Journal of (the) Japanese Society of Soil Physics”という表記もあるという意見が出た。
5. 会誌のA4判化について
 これも前編集委員会からの提案であるが，この委員会では以下のような意見があってA4判化に対して消極的な雰囲気になった。
 - ・A4判の雑誌は今ある書棚に入らないので置き場に困っている。
 - ・会誌編集上の必要性からA4判にするというのなら分かるが，みんながA4判になってきたからという理由では賛成できない。海外の雑誌を見てもいろいろな大きさのものがあリ，それぞれ個性を主張している。黄表紙・B5判を「土壌の物理性」の個性にしてはどうか。
 - ・コピーした資料はA4判に統一されていた方が整理しやすいが，冊子になっているものは大きさが同じでなくても問題ない。
6. 投稿規定について
 原稿種別(「報文」，「論説・総説」，「資料」，「その他」)の是非が検討課題となった。

III. 会員の動向

現会員数(1999.3.31現在)

	北海道	東北	関東	中部	近畿	中・四国	九州	国外	合計
正会員	75	42	190	41	37	66	52	5	508
学生会員	5	1	17	1	3	1	0	0	28
合計	80	43	207	42	40	67	52	5	536
購読会員	61								
賛助会員	12								

総会員数 609

—編集後記—

前号(第81号)までは研究会名の出版物であったが、今期は、前編集委員会に続いて、会誌の年3号化とともに、会則の一部未整備な所もあるが、学会名としての出版物である。4月に事務局が前東京農業大学から移動し、引き継いで間もない状態での編集業務のスタートとなった。したがって本原稿の大半は、前編集委員会扱いである。そんなさ中、今期、編集幹事を引き受けることになり、編集後記を書くことになった。

大きな歴史のある学会では、スタッフを抱えた固定事務局であり、編集業務の処理をしていただけるのでいろいろな面で有利で、事務的には原稿が円滑な流れになるが、反面歴史が浅かったり、会員数や財政的な面で制約を受ける場合には移動事務局となり、そこに〇〇幹事の役割があるのかな?と過渡的判断に駆られています。

さて本号は、シンポジウム特集「根と土壌」および一般報文の構成である。

根は植物体の生育状況、すなわち作物では、収量にも影響を及ぼす大切な部分である。一方樹木において、大

樹は根が四方八方に隅無くはびこり、地上部がうっそうとしている。反面、根の衰退は地上部の衰退にも係わりがあると考えられている。

また樹木に関連して、こんな事を考えたことがある。植物でなく人為的な建築構造物の場合である。これは地盤が悪いと構造物を直接支持できない。その場合、地盤を改良したり、杭基礎などの工法を採用して支持力を高めたりする。地盤改良にも工学的手法、化学的手法など色々あるが、構造物にとって地盤(土)は重要な役割を果たしている。植物を対象とする場合は、構造物と見ている対象が違うのは勿論であるが、大局的にはかなり類似した様相を呈している。したがって植物に目を転じると、土との接触部分であり、健全な土壌は健全な植物体を育むといっても過言ではない。特集では、植物体地下部の見えないブラックボックスを物理的、生理的および化学的アプローチによって科学的に究明し、報告している。

<編集幹事 青木正雄(日本大学)>

土壌物理学会

事務局構成	会 長	河野 英一 (日本大学生物資源科学部)
	副 会 長	渡辺 春朗 (千葉県農業化学検査所)
	庶務幹事	鈴木 創三 (東京農工大学農学部)
	“	石川 重雄 (日本大学生物資源科学部)
	会計幹事	重松 智範 (千葉県環境財団)
編集委員会	編集幹事	青木 正雄 (日本大学生物資源科学部)
	会計監査	松川 進 (宇都宮大学農学部)
	“	小川 吉雄 (茨城県農業総合センター)
	委 員 長	軽部重太郎 (茨城大学農学部)
	委 員	加藤 英孝 (農業環境技術研究所)
		加藤 誠 (東京農工大学農学部)
		駒村 正治 (東京農業大学地域環境科学部)
		島田 清 (岡山大学環境理工学部)
		関 勝寿 (東京大学大学院農学生命科学研究科)
		原口 暢朗 (農業工学研究所)
	平野 繁 (東京農業大学地域環境科学部)	

土壌の物理性 第82号(会員配布) 1999年7月24日発行

発行 土 壌 物 理 学 会

〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866

日本大学生物資源科学部 生物環境工学科内

電 話 0466-84-3696 FAX 0466-80-1103

E-mail : kohno@brs.nihon-u.ac.jp

振替口座 00150-2-17794

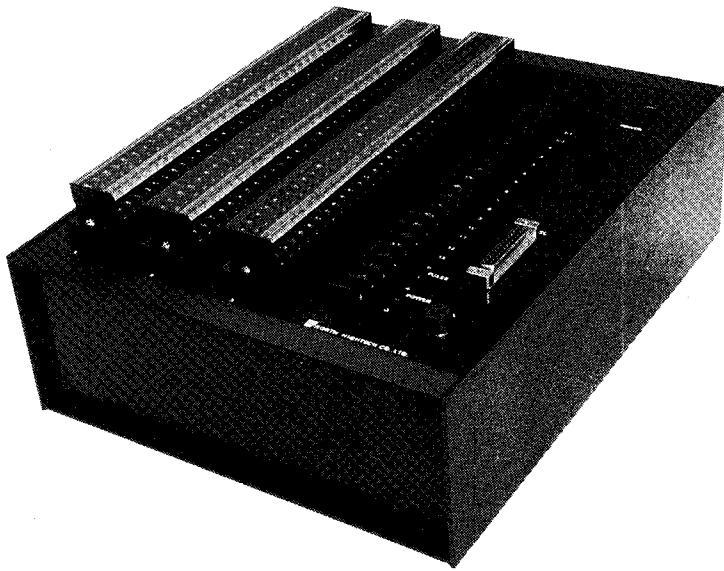
銀行口座 東京三菱銀行藤沢支店(店番 257)

普通 1495164「土壌物理学会」

印 刷 創文印刷工業株式会社

〒116-0011 東京都荒川区西尾久 7-12-16

最も進んでいるパソコン時代のロガー「IDL-3200」



センサ対応がマルチ

±5mV, ±50mV, ±500mV, ±1V, ±5V, Pt100, 熱電対, 歪みゲージのマルチシグナルコンディショナ内蔵。センサを個別に各点に指定, 混在できる。センサ変換器を必要としないから計測コストが抜群

センサ電源を供給

センサ電源を必要とするセンサにはサンプリング10秒前からDC12V 200mAが供給されます

多チャンネル

アナログセンサ入力は8チャンネル単位で最大256チャンネルまでのデータロガーを供給します。各機には転倒桁雨量パルス入力が1ヶ付いています

12Vバッテリー動作

経済的な12V バッテリー動作。8Vまで低下しても動作。-温度の低温時はリチウム電池を推奨。アルカリ電池単1(約8AH)は常温の環境に推奨

ネットワーク

回線にモデムで接続するとパソコンとのテレメータ。多数のRS-232C機器とフィールドのLAN構築及び構内LANイーサネットともネットワークを構築

マイナス温度に強いマシン

-25℃~45℃動作機器は標準 -40℃から動作機器も出荷します

ロガーの機能を高める演算機能

専用演算回路による平均 積算 ピーク 敷き値積算 コンパレータアナログ出力 パルスカウント



計測の未来をひらく

株式会社

ノース・ハイテック

〒062 札幌市豊平区美園1条8丁目1-28
TEL. 011-833-4386 FAX. 011-833-4387

画期的な TDR (Time Domain Reflectometry) の原理による革新的な水分計システム

ドイツゲッティンゲン大学との森林エコロジシステム、IFU との大気圏環境システム、カールスルーエ大学との TDR 技術開発など産学官共同研究により開発され、公的機関の実証を経て製品化されました。すでに欧州を中心に数百台の実績があります

〈操作は簡単かつメンテナンスフリーです〉



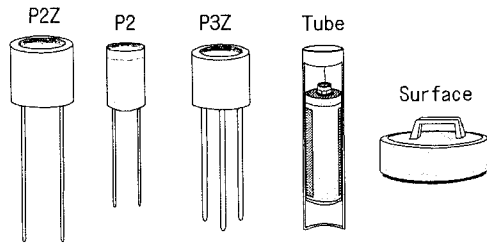
●特長

- 1) 迅速、非破壊の水分測定が可能で、サンプルを採取せずに連続測定が出来る。
- 2) 測定時間が約 12 秒と高速
- 3) これまでの方法では測定が困難なクリティカルな物質にも適用
- 4) 非測定物に影響を及ぼしたり破壊することがない。
- 5) 多様なプローブが用意されており各種物質に適用可能
- 6) 現場設置用システムのモジュールによる対応

●使用分野

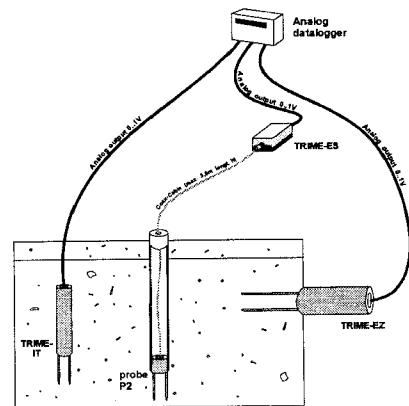
土壌、石材、穀物、また水による自然災害の常時モニタ、構造物や土壌の含水量モニターあるいは森林、水源地帯や農業計画の一環としての含水測定、モニターなど

【各種プローブ例】



☆当社主力製品“ケミルミネッセンスアナライザー”
(極微弱化学発光分析装置)は国内外で使用され、その
応用分野も広がっています。また、表面エネルギー測定
システムなどの製品も販売しております。

【現場設置用アナログシステム構築例】



東北電子産業株式会社

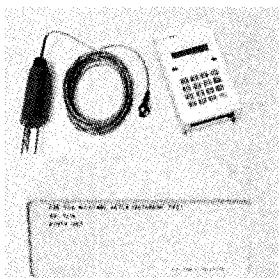
★東京支店 応用計測機器グループ

〒211-0004 川崎市中原区新丸子東 2-897 ラボ 新丸子 207
TEL:044-411-1263 FAX:044-411-1839

★利府事業所 営業部

〒981 宮城郡利府町しらかし台 6-6-6
TEL:022-356-6111 FAX:022-356-6120

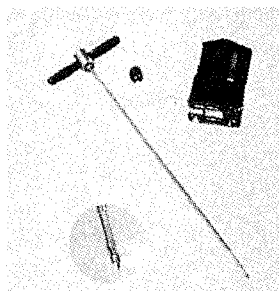
DIK-321A FDR水分計 自記タイプ



本機はプローブ（水分センサ）、パワーユニット、データロガーからの構成からなり、土壌の体積含水率を長期間連続してデータを記録することができます。また電源の無い場所でもバッテリーにより長期間無電源でご使用頂けます。

DIK-500A 土壌酸素計（携帯型）

土壌ガス調査用



深さ80cmまでの土壌中の酸素量を測定します。ガス採取管を測定する深さまで押し込み、その後少し引き上げ採取口を開きます。次に酸素測定器をガス採取管につなぎ付属のポンプを使って酸素を測定器に送り計測します。本器は土壌酸素の他、土壌中の汚染ガス調査にも最適です。

DIK-100A ハンドオーガー

土壌汚染調査用



土壌の特長（例：砂質・粘土質・硬質・軟質）に合わせた各種類の刃先を用意しています。調査場所に合わせたオーガを使用する事が出来るので、簡単にサンプリングやボーリングが行えます。継柄を使用することにより5m～8m程度までの調査も行えます。



ダイキ
大起理化工業株式会社

〒116-0011 東京都荒川区西尾久7-60-3 TEL. 03-3810-2181

SI 単位の使用例

(農業上木学会, 日本土壤肥料学会, American Society of Agricultural Engineers, Soil Science Society of America で使用が認められている単位)

使用が認められる接頭記号

10^{12} : T (テラ), 10^9 : G (ギガ), 10^6 : M (メガ), 10^3 : k (キロ), 10^2 : h (ヘクト), 10^1 : da (デカ)

10^{-1} : d (デシ), 10^{-2} : c (センチ), 10^{-3} : m (ミリ), 10^{-6} : μ (マイクロ), 10^{-9} : n (ナノ), 10^{-12} : p (ピコ)

使用が認められる表記法: m/s, $m \cdot s^{-1}$, ms^{-1} , Nm, $N \cdot m$ 認められない表記法: mN

分類	量	SI 単位または組立単位	併用してよい単位記号	使用が推奨されない単位
空間および時間	平面角	rad (ラジアン)	mrاد, ° (度), ' (分), " (秒)	Å cc
	立体角	sr (ステラジアン)		
	長さ	m (メートル)	km, cm, mm, μ m, nm	
	面積	m^2	km^2 , cm^2 , mm^2 , ha (ヘクタール), a (アール)	
	体積	m^3	cm^3 , mm^3 , L (リットル), mL	
	時間	s (秒)	ms, μ s, y (年), d (日), h (時), min (分)	
	速度, 速さ	m/s	m/h, m/min	
	角速度	rad/s		
	加速度	m/s^2	cm/s^2	
	角加速度	rad/s^2		
周期現象	周期	s	ms, μ s	
	波数	m^{-1}		
	波長	m	cm, mm	
	周波数, 振動数	Hz (ヘルツ)	MHz, kHz	
	回転速さ, 回転数	s^{-1}	min^{-1} , rpm, $r \cdot min^{-1}$	
力学	質量	kg (キログラム)	g, mg, μ g, t (トン)	dyn, kgf bar, atm erg
	密度	kg/m^3	g/cm^3 , t/m^3 , kg/L	
	比体積	m^3/kg		
	濃度	kg/m^3	g/cm^3 , mg/L, g/mL, ppm, ppb	
	運動量	$kg \cdot m/s$		
	力	N (ニュートン)	MN, kN, mN, μ N	
	力のモーメント	$N \cdot m$	$MN \cdot m$, $kN \cdot m$, $mN \cdot m$	
	圧力	Pa (パスカル)	MPa, kPa, hPa, mPa, μ Pa	
	応力, 弾性係数	N/m^2 , Pa	GN/m^2 , MN/m^2 , kN/m^2 , GPa, MPa, kPa	
	仕事, エネルギー	J (ジュール)	TJ, GJ, MJ, kJ, eV (電子ボルト)	
	仕事率	W (ワット)	kW, mW	
	流量	m^3/s	cm^3/s , m^3/min , m^3/h , L/s, L/min, L/h	
粘性係数	$Pa \cdot s$	$mPa \cdot s$		
熱	熱力学温度	K (ケルビン)		cal
	セルシウス温度	°C (セルシウス度)		
	温度差	K または °C		
	熱量	J	TJ, GJ, MJ, kJ, mJ	
	熱流	W	kW	
	熱伝導率	$W/(m \cdot K)$	$W/(m \cdot ^\circ C)$	
	比熱	$J/(kg \cdot K)$	$J/(kg \cdot ^\circ C)$	
	エントロピー	J/K	kJ/K	

分類	量	SI 単位または組立単位	併用してよい単位記号	使用が推奨されない単位	
電気および磁気	電流	A (アンペア)	kA, mA, μ A, nA	mmho/cm	
	電荷, 電気量	C (クーロン)	kC, mC, μ C		
	電位, 電位差, 電圧	V (ボルト)	MV, kV, mV, μ V		
	静電容量, キャパシタン	F (ファラッド)	MF, kF, mF, μ F		
	誘電率	F/m	μ F/m		
	磁束	Wb (ウェーバ)			
	インダクタンス	H (ヘンリー)			
	電気抵抗	Ω (オーム)	M Ω , $\mu\Omega$		
	コンダクタンス	S (ジーメンズ)	MS, kS, μ S		
	導電率, 電気伝導度	S/m	dS/m, mS/m		
	電力	W	TW, GW, MW, kW, mW, μ W, nW		
電力量	J	TJ, GJ, MJ, kJ, mJ			
物理化学	物質量	mol	kmol, mmol, μ mol	erg/kg	
	モル濃度	mol/m ³	mol/dm ³ , kmol/m ³ , mol/L		
	質量モル濃度	mol/kg	mol/g		
	拡散係数	m ² /s			
	化学ポテンシャル	J/kg	J/g		
土壌物理学分野	粒径	m	mm, cm, μ m	meq/100 g meq/100 g	
	透水係数	m/s	cm/s, m/min		
	土壌水分吸引圧	Pa	pF, cmH ₂ O		
	温度伝導度	m ² /s	cm ² /s		
	乾燥密度	kg/m ³	Mg/m ³ , t/m ³ , g/cm ³		
	比表面積	m ² /kg	m ² /g		
	水分ポテンシャル	J/kg	J/g		
	水分ポテンシャル	m	cm		
	吸着量	mol/kg	mmol/kg		
	陽イオン交換量	mol(+)/kg	cmol (+)/kg		
	陰イオン交換量	mol(-)/kg	cmol (-)/kg		
	酸化還元電位	V	mV		
	体積熱容量	J/(m ³ · K)			
	湿潤熱	J/kg			
	吸着熱	J/mol			
	含水比	kg/kg			%
	質量分率, 含水率	kg/kg			%
体積分率	m ³ /m ³		%		
質量濃度	kg/m ³	mg/m ³ , g/L, mg/L	%		
その他	放射能	Bq (ベクレル)	MBq, kBq, mBq, Ci (キュリー)	rad R kg/10 a kg/10 a, t/10 a	
	吸収線量	Gy (グレイ)	MGy, kGy, mGy		
	照射線量	C/kg	MC/kg, kC/kg, mC/kg		
	施肥量	kg/m ²	kg/ha		
	収量	kg/m ²	Mg/ha, t/ha, kg/ha		
	光度 照度	cd (カンデラ) lx (ルクス)			

その他については、「農業土木分野での SI 単位の使用一覧表 (案) (1995): 農土論集, 175, 付録および「日本土壤肥料学会発行の雑誌で使用が推奨される単位の例」: 土肥誌執筆規定付録を参照のこと。

「土壌の物理性」読読に関するお願い

本誌は土壌物理に関連する広い学問分野の研究者及び技術者が、各分野の情報を速やかに交換できることを目的に発行されている。委員会としては、投稿された原稿を極力掲載したいと考えている。このお願いは、編集作業を円滑に進めるために作成されたものである。

1. 読読者

(1) 読読者は、著者と意見が違っても、それを論文等の不採用の理由にしてはならない。新しい概念や提案された理論が、将来、間違いであることが証明される場合もあるが、現時点ではその適否の判断は難しい。完全な証明がないことを理由に論文を受理しないということは避けるべきである。

(2) 読読者は共著者ではなく添削者でもないので、原稿には必要以上の書き込みをせず、誤字、疑問点および意味不明・説明不足の箇所の指摘のみにとどめること。

(3) 著者の主張を尊重し、過度の修正を要求しないこと。著者と意見が異なる場合、読読者はその意見を「討論」「資料」等として投稿し、誌上で討論されたい。その「討論」等が他の読者に価値の高い情報を与えることがある。

(4) 読読期限を厳守し、論文等の公表を必要以上に遅らせないこと。急用等で依頼期限内に読読不可能な場合は、至急、原稿を編集委員会まで返却のこと。

(5) 論文等の印刷前に、無断で原稿のコピーを取ったり、結果の利用、引用等はないこと。

2. 報文について

(1) 読読者

読読は、原稿が本誌に掲載するに適しているかどうかを判断するとともに、原稿内に誤りがないか、読みやすいものであるかどうかを検討し、よりよい会誌を作るためのものである。報文の読読は、編集委員会が依頼した2人の読読者によって行われる。

(2) 読読後の取扱い

読読結果は次のように処理して、最終的に委員会で開催の可否を決定する。

1) 担当したすべての読読者の判定が判定 A「このまま掲載可」の場合は、特別の異議がなければそのまま受理する。

2) 判定 B「指摘の点が修正されれば掲載可」の場合は、読読者の意見を勧告し、委員会意見として著者に伝

達し、加筆、訂正を要求する。原稿修正の確認は、編集委員会で行い、適切な修正が確認された時点で原稿を受理する。

3) 判定 C「指摘の点が修正を要し、再読読の要あり」の場合は、読読者の意見を勧告し、委員会意見として著者に伝達し、加筆、訂正を要求し、修正後に再度読読を行う。

4) 2人の読読者の判定が D「掲載不可」の場合は、不可の理由を付して著者に返稿する。意見が分かれた場合は、他の読読者を依頼し、Dの場合には著者に返稿する。

5) 読読結果に対して著者から反論があれば、他の読読者に依頼することがある。読読者の意見が分かれた場合には、その対応を編集委員会判断する。

(3) 総合判定 D「掲載不可」のものの事由

以下のような事由に抵触するものは、読読の総合判定 Dにあたり、掲載不可の理由となる。

- ・内容が本誌より他の専門誌に適しているもの。
- ・原稿の根幹に重大な誤りがあるもの。
- ・理論的または実証的でない論文、あるいは事実に基づいた報告ではなく、単なる主観が述べられているに過ぎないもの。
- ・通説が述べられているだけで、新しい知見が全く無いもの。
- ・修正を要する根本的な指摘事項をあまりにも多く含んでいるもの。
- ・明らかに既発表とみなされるもの。
- ・研究等が論文報告とする段階まで進展していないことが明らかな場合。
- ・現象の解析にあたり、明らかに不相応な理論を当てはめて、論文が構成されているもの。
- ・他人の研究成果をあたかも本人の成果のごとく記述することで論文の基本が構成されているもの。

3. ノート、資料、論説・総説、解説、土粒子、書評などについて

ノート、資料、論説・総説、解説については、読読者1名とする。読読の基準や取扱いは、報文に準ずる。土粒子、書評、巻頭言、広告、会告などは、受理ならびに掲載を編集委員会において検討する。

(1997.10.30 改定)

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

TEL : 03-3475-5618 FAX : 03-3475-5619 E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

TEL : 81-3-3475-5618 FAX : 81-3-3475-5619 E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 82

July 1999

Contents

Forward	E. KOHNO	1
Symposium "Root-Soil System"		
Reviews		
Soil Conditions and Root Development.....	A. OYANAGI	3
Fractal Methods in Root System Architecture : Fractal Dimension, Lacunarity and Multifractals	J. TATSUMI	11
Electro-physiological Study of Tree Root System—From Laboratory into the Field—	H. OKAMOTO and N. MASAKI	21
Original		
CT Imaging of Water in Root-Soil System by Neutron Beam	T.M. NAKANISHI, J. FURUKAWA and M. MATSUBAYASHI	29
Miscellanea		
Method of Effective Soil Control and Fertilizer Application in Tea Gardens to Increase the Recovery Rate of Nitrogen	M. KARASUYAMA	35
Discussions in the Symposium		41
Originals		
Influence of Allophane Content on the Physical Properties for Volcanic Cohesive Soil	E. SO	43
Effects of No-tillage Cultivation on Crop Root Distribution, Soil Physical and Chem- ical Properties in <i>Terra Roxa</i> Soil	T. SHIMADA, A. ROMERO, T. HAYASAKA and C. PAREDES	55
Book Review	K. BANZAI	67
Announcements		69
Editor's Comment		70

Japanese Society of Soil Physics

Department of Bioenvironmental and Agricultural Engineering
College of Bioresource Sciences, Nihon University
1866 Kameino, Fujisawa-shi, Kanagawa 252-8510, Japan