

# 土壌の物理性

第83号

2000年3月

---

巻頭言	軽部重太郎	1
論文		
Crack Pattern Analysis for Moisture Prediction in Drying Dredged Material	P.O. BODUN・澁澤 栄・笹尾 彰・酒井 憲司	3
タイ南部ソククラ湖流域における土地利用の変化と土壌侵食の関係	駒村 正治・K. PHOUANGPHET, C. TANAVUD・C. YONGCHALERMCHAI	17
長期間にわたる有機物施用およびロータリー耕耘の有無が作土の理化学性並びに作物収量に及ぼす影響	加藤 哲郎・長谷川 功・米田 和夫	29
黒ボク土畑の圃場容水量の実態	長谷川周一	41
総説		
土壌動物の生態と土壌物理	中村 好男	47
研究紹介		
軟X線による非破壊土壌中の排水機構の解明	森 也寸志	59
第41回シンポジウムおよびポスターセッション報告	鈴木 創三	67
書評		
「世界の水田 日本の水田」	河野 英	69
会務報告		71
編集後記		75

---

土 壌 物 理 学 会

## 土壌物理学会会則

- 第1条 本学会は土壌物理学会 (Japanese Society of Soil Physics) と称する。
- 第2条 本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り、農業技術及び環境科学の発展に貢献することを目的とする。
- 第3条 本学会はその目的を達成するために次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
  - (2) 学会誌「土壌の物理性 (Journal of the Japanese Society of Soil Physics)」並びにその他の印刷物の発行
  - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
  - (4) その他、本学会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本学会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。会員となるには、評議員会の承認を受けなければならない。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- |      |    |        |
|------|----|--------|
| 正会員  | 年額 | 5,500円 |
| 学生会員 | 年額 | 3,000円 |
- (大学院生を含む)
- |      |        |         |
|------|--------|---------|
| 賛助会員 | 一口年額   | 22,500円 |
| 購読会員 | 会誌年額   | 7,000円  |
| 広告料  | 賛助会員   | 15,000円 |
|      | 賛助会員以外 | 22,500円 |
- 第6条 本学会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長1名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (2) 評議員  
イ 15名 正会員の中から互選する。  
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
- (3) 会計監査 2名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
- (4) 幹事 若干名  
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱する。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
  - (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員を選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
  - (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。
- 第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。
- 第9条 本学会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会  
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
  - (2) 編集委員会  
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。
- 第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてる。本学会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。
- 附則 (1) 本学会の連絡先は、これを当分の間次に置く。  
〒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科学科内
- (2) 本会則は、1999年4月1日より施行する。  
(1999. 8. 5改正)

## 「土壌の物理性」投稿規定

1. 著者のうち少なくとも1人は本学会会員でなければならない。ただし編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
2. 原稿の採否は編集委員会が決定する。編集委員会には、「論文」および「研究ノート」については2名、その他は1名の閲読者を選んで閲読を依頼する。
3. 投稿原稿の区分は下記による。
  - (1) 「論文」(Original papers): 独創性があり、土壌の物理性に関する研究および技術の進歩に寄与すると見なされるもの。一編ごとに論文としての構成を整えていて、他誌に未発表のものに限る。和文原稿には250 words以内の英文 Abstract を、英文原稿には500字以内の和文要旨をつけること。
  - (2) 「研究ノート」(Notes): 土壌の物理性に関する新しい事実や研究方法の改良などの短い報告で、独創性があり他誌に未発表のもの。和文原稿には125 words以内の英文 Abstract を、英文原稿には250字以内の和文要旨をつける。
  - (3) 「総説」(Reviews): 土壌の物理性に関する主題について、それまでの研究を総括し、今後の発展方向を展望するもの。
  - (4) 「解説」(Lectures): 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。
  - (5) 「研究紹介」(My research): 現在行っている研究、他の学会誌等に掲載された論文、研究上の工夫などについての平易な紹介。
  - (6) 「資料」(Miscellaneous): 広く会員の参考となる報告や情報。
  - (7) 「土粒子」(Readers' column): 「土壌の物理性」周辺のことについての随想や意見など。
  - (8) 「書評」(Book reviews)
4. 投稿原稿は刷り上がり6ページ以内とし、それを越える場合には1ページあたり9,000円を著者負担とする。また、カラー印刷の場合は実費を著者負担とする。

5. 依頼原稿として「巻頭言」(Foreword), 「講座」(Lecture series)をおく。「講座」は「解説」と本質的な違いはないが、特に編集委員会が企画して複数回にわたって行うものを指す。
6. 投稿する場合は、正原稿1部、コピー2部の計3部に原稿送り状(別紙書式)をつけて編集委員会事務局(編集幹事)宛に提出する。
7. 編集委員会は、投稿原稿を受け取ったら速やかに受付番号と受付日付を明示した電子メールまたは書状を投稿者に送る。また、掲載が決定し最終原稿を受け取ったら、受理日付を明示した書状を著者に送付する。
8. 著者に対して修正を求めた原稿が、特別な事情なく6ヶ月以内に再提出されないときは取り下げと見なす。
9. 著者校正は初校のみとする。また、特に申し出がない限り印刷ずみの原稿は返さない。
10. 別刷りは30部を著者に贈呈する。それ以上を希望する場合は実費を申し受ける。
11. 本誌に掲載された論文等の著作権は土壤物理学会に帰属する。

(1999. 11. 20 改正)

#### 「土壌の物理性」原稿執筆要領

1. 日本語の原稿の場合、A4判、25字、23行とし、上下左右に30mm以上の余白をとる。(4枚で1ページになる)。
2. 日本語の原稿は、はじめに表題、著者名を書き、そのあとに英語で、表題、著者名(フルネーム)、所属機関と所在地を書いてから本文を書き始める。また、第1ページの脚注に、日本語の所属機関と所在地、5個以内のキーワードを書く。
3. 論文および研究ノートには、英文Abstractの下に5個以内の英語のKey wordsをつける。
4. 英語の原稿は、A4判、ダブルスペースで作成する(約600 wordsで1ページになる)。
5. 英語の論文および研究ノートは、Manuscript title, Full names of authors, Address of institutions of authors, 250 words 以内の英文Abstract, および5個以内のKey wordsを書いてから本文を書き始める。
6. 英語原稿には日本語要旨と5個以内の日本語キーワードをつける。
7. 英語の適正化はすべて著者の責任において行うこと。自然科学論文を書いたり校正したりしたことのある英語のネイティブスピーカーによってチェックされている事が望ましい。
8. 閲読終了後に最終原稿を提出するときには、ワープロソフト名を明示したファイルまたはテキストファイルの入ったフロッピーディスクを添付する。
9. 本文は、章の見出しを、1., 2., 3., 節の見出しを、1.1, 1.2, 1.3, 項の見出しを1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, のようにする。
10. ゴシック、イタリック等の字体や、上付き、下付き文字など、まぎらわしい文字は、誤植防止のため鉛筆で指定する。
11. 略語、略号を使うときには、はじめにそれが出たときに正式名称とともに示す(例:陽イオン交換容量(CEC))。
12. 単位の使い方は国際単位系(SI)による。

13. 図、表、写真の番号は、図1、表2、写真3のように書く。英語を並記する場合は、Fig. 1, Table 2, Photo. 3とする。英語の原稿では、写真はFig.として扱う。
14. 図、表、写真は必要最小限度とし、同一事項を表と図に重複して表示する事は避ける。
15. 図、表、写真は1枚毎にA4判で作成するか、またはA4判の紙に貼り付ける。余白に著者名と図表等の番号を鉛筆で記す。
16. 図と写真はそのまま製版されるので、鮮明なものを提出する。
17. 図は1/2倍などおおよその縮小率を指定し、2倍くらいに大きく書く。図の線の太さや文字の大きさは、刷り上がりの大きさを考慮して決める。
18. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ、縮尺や倍率はつけない。
19. 日本語の論文、研究ノートの場合、図、表、写真の題名には英語を併記する。
20. 図、表、写真の番号と題名は、別紙にまとめて一覧表とする。
21. 本文中で文献を引用する場合は、著者名(西暦)、または(著者名, 西暦)とする(例: Tanaka (1994), (Nakamura and Suzuki, 1981)). 著者が3名以上の場合は第1著者名のあとに——ら、またはet al.をつける(例: 山田ら(1978), (Tayler et al., 1945)).
22. 引用文献は、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。
23. 引用文献の書き方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.  
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.  
(雑誌のページにはp.やpp.をつけない. 本の単数ページを示す場合にはp., 複数ページを示す場合にはpp.をつける)

#### 「土壌物理分野のSI使用例」

国際単位系(SI)については多くの出版物で解説されているので、ここでは、土壌物理に特に関連の深い単位の使用例を示す。

	推奨される単位	認められる単位
含水比	kg kg <sup>-1</sup>	*
体積含水率	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
体積	m <sup>3</sup>	L, cm <sup>3</sup> , mL
密度	kg m <sup>-3</sup> , Mg m <sup>-3</sup>	
濃度	kg m <sup>-3</sup> , Mg m <sup>-3</sup>	g L <sup>-1</sup> , mg L <sup>-1</sup>
モル濃度	mol m <sup>-3</sup>	mol L <sup>-1</sup>
力	N	
水分ポテンシャル	J kg <sup>-1</sup>	kPa, m, cm, **
透水係数	m s <sup>-1</sup>	cm s <sup>-1</sup>
イオン交換容量	mol. kg <sup>-1</sup> , cmol. kg <sup>-1</sup>	
回転数	s <sup>-1</sup>	min <sup>-1</sup>
収量	kg m <sup>-2</sup>	kg ha <sup>-1</sup> , Mg ha <sup>-1</sup> , t ha <sup>-1</sup>

\*%表示は、原則として分母と分子の内容が同じものの場合にだけ用いる。

\*\* cm H<sub>2</sub>O は使わない。  
その他、疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する。

(2000. 3. 10 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	論文, 研究ノート, 総説, 解説, 研究紹介, 資料, 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:		
原 稿 枚 数	本文: 枚		
表: 枚	図: 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

## 土壌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 : 土壌物理学会事務局/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



## 「土壤の物理性」への投稿のお誘い—投稿規定が改定されました—

軽部 重太郎\*

編集委員長を引き受けてからもうすぐ1年になります。この間、昨年(1999年)4月に研究会が学会に名称変更したこともあって、編集委員会では投稿規定、原稿執筆要領などを改定してきました。ここでは、そのことを振り返り、「土壤の物理性」の役割を考えながら、会員の皆様に本誌への投稿のお誘いをしたいと思います。

「土壤の物理性」の第一の役割は、オリジナルな研究論文の発表の場を提供することです。そのための投稿区分として「論文」と、短い報告としての「研究ノート」の2つがあります。最近、論文の投稿が増加して、編集委員会はうれしい悲鳴を上げています。この調子で行けば順調に会誌を発行できそうです。投稿が増えたことで、この第一の役割の重みが増しています。

投稿された論文は極力掲載する方向で、できるだけ急いで閲読するように適任者に閲読を依頼しています。そこで投稿者にもお願いがあります。それは、閲読者が多忙の中で時間を割く事をよく理解して、最大限に努力して完成した原稿を投稿していただきたいということです。結局はその方が閲読が早く済むことになります。

第二の役割は、会員相互の研究交流や技術普及などを促進することです。土壤物理学会は多様な専門分野の会員からなるという特徴もっているため、「土壤の物理性」ではこの役割が当初から重視されてきました。そのための投稿区分として「総説」、「解説」、「研究紹介」、「資料」、「土粒子」、「書評」などがあります。論文や研究ノートと比べると、こちらの投稿が最近少ないような気がします。

「総説」は、学会誌にとって重要なものです。よい総説は論文以上の価値をもつことがあります。それに見合った評価がされているかどうかという問題も残りますが、評価というものは本来読んだ人がするものはずです。今度新たに設けられた投稿区分に「研究紹介」があります。これは、国際誌などに掲載された論文の内容を易しく紹介してもらおうというものです。当面は依頼して出来るだけ毎号続けていきたいと思いますが、こちらにも是非自主投稿をお願いします。

さて、学会誌ではSI単位を使うのが当たり前になってきました。それに関して、原稿執筆要領を改定するとき気づいたことを書いてみます。含水比は従来%表示が普通でしたが、 $\text{kg kg}^{-1}$ での表示が推奨されています。混合物に含まれる異なった成分の比率を表す場合には、それぞれに単位を付けて示すことが推奨されているためです。英語の water content は、水分含量または含水量というような意味なので、質量比と体積割合の区別を明示するために  $\text{kg kg}^{-1}$  または  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  などの単位をつけるのが合理的です。しかし日本語では、含水比のように後に付く「比」(“specific”ではなく“ratio”)には本来単位がつかないので、用語と単位との間に若干違和感があります。その場合には、単位を含めて比を取り、分母と分子の中身が異なるので互いに消去しないと考えればよいようです。このように迷うこともありますが、本誌もSI単位を使うのが原則です。SI単位の基本は「国際単位系(SI)」(日本規格協会)などに解説されています。もっと詳しくは「国際単位系(SI)の手引き」(日本規格協会)や「SI単位と物理・化学量」(化学同人)が参考になりますが、残念ながら今はこれらは絶版です。

現在、学会事務局(編集幹事)と編集委員長、各編集委員が互いに離れているため、メーリングリストを使って連絡を取り合っています。メーリングリストを使うと、編集委員会が常時開催中ということになり、非常に便利です。受稿した原稿は早ければ1週間で閲読者に送れるようになりました。そうすると、編集委員会は顔を合わせて開かなくてもよいように思われますが、今までは投稿規定や原稿執筆要領の改定作業もあったので、1号編集する度に1回は顔を合わせて討論しました。主要な議題については前もってメーリングリストで討論してから集まるので、会議が効率的になりました。また、評議員のメーリングリストもあり、投稿規定の改定などに際しては事前に意見を聞く事が出来て、当初の案よりずっといいものにまとめることが出来ました。これからも多くの会員の協力を得て、「土壤の物理性」の存在感をますます高めていきたいと思っています。





## Crack Pattern Analysis For Moisture Prediction In Drying Dredged Material

P. O. BODUN<sup>1</sup>, S. SHIBUSAWA<sup>1</sup>, A. SASAO<sup>2</sup> and K. SAKAI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering,

Tokyo University of Agriculture and Technology

<sup>2</sup> Agricultural and Environmental Systems Engineering,

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture  
and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183, Japan

### Abstract

During the drying process, dredged sludge undergoes the process of shrinkage that typically begins at the surface, followed by the formation of three dimensional networks of planar cracks that break the sludge into fragments (clods) of various sizes. This paper presents the description of the crack networks by the processes of image analysis for describing the sludge response to change in moisture content with the morphological features of the cracks and clods during the drying process. From analysis, all crack features increased with a decrease in sludge moisture content; the clod features, except the number of clods, decreased with a decrease in sludge moisture; while the crack elongation remain fairly constant with a decreasing sludge moisture content. At 8% d. b, the equilibrium moisture content, the crack area was 0.96 times as large as the clod area; and the crack-clod ratio had a good logarithmic relationship with the sludge moisture content. The crack pattern was found to depend on the sludge drying rate and the moisture level within the sludge body.

**Key words** : sludge drying, image processing, crack-clod morphological features, and moisture content

### 1. Introduction

Water quality improvement and pollution control have been the subject of consideration in lake Kasumigaura (Japan) in the recent years, and dredging the lake bottom sludge has been implemented as an important option in the rapid improvement of the lake water quality. For environmental protection, the dredged sludge from the lake bottom is placed in a confined disposal yard of about 270 ha on paddy fields borrowed from farmers. The sludge retains high moisture for a very long time, presents problems in mobility on the ground surface, and makes quick reclamation difficult, which eventually lengthen the drying time, and increase the cost of managing the

borrowed fields.

In order to accelerate the sludge drying speed, mixing and pulverization of the dredged sludge in situ was considered, which required mechanical handling. To overcome the mobility and workability problems during these operations, an integrated sludge handling system (Shibusawa *et al.*, 1996), which consists of three main stages were planned. The stages are : (i) surface information sensing for sludge moisture prediction, (ii) trafficability and workability studies on the soft sludge surface, and (iii) the handling stage, which involves measures to be taken in accelerating the sludge drying speed. In this paper, attention is focused on the possibility of using the surface information developed during the drying process to predict

the sludge moisture condition in correspondence with the relationship between the sludge cone index and moisture content developed by Nonaka (1997).

Two significant features are developed during the sludge drying process: textural variation accompanied with color changes; and the development of three-dimensional crack networks on the sludge surface. Textural variation has been analyzed for sludge moisture prediction, (Bodun, *et al.*, 1999), but the prediction model could only be applied at high moisture content (above 150% d. b). Therefore, means of predicting the sludge condition to a much lower moisture content resulted in the analysis of the three-dimensional crack networks. In sludge drying, crack is considered an important sludge surface information, because the volume and its configuration controls the acceptance, transmission and storage of moisture, and the movement of gases within the sludge body, thus playing an important role in the rapid evaporation of moisture from the sludge body.

When sludge materials is allowed to dry through natural evaporation, in due time, an irregularly spaced cracks tends to appear on the surface. As evaporation continues, these cracks gradually expand and deepen such that regions of sludge between the cracks temporally vary from separate, free standing, irregular structures of roughly similar size and shape. This process of crack formation is self-generating, in the sense that once it begins, drying and shrinkage can cause it to extend from one side to another and some may extend indefinitely. Scott *et al.*, (1986) have described soil crack networks in terms of its density and orientation, and found that the distribution of inter-crack distances appeared to be exponential. O'Callaghan *et al.*, (1973) have developed a quantitative means of measuring properties of soil cracking patterns. Horgan (1998), has used mathematical morphology to analyze soil structure from soil images, including soil

cracking pattern, with suggestion that this method could be used in comparing cracking pattern in different soil types. Waller & Wallender (1993) have made qualitative and quantitative observations of soil cracking behavior, they found that crack area follows a change in the soil bulk density, but they did not correlate the cracking and the ped size with the soil moisture content. Preston *et al.* (1997) have also used fractal dimensions to quantify the complex geometry of soil cracking pattern, and they found that a significant relationship exists between the soil clay content and the fractal dimensions of the cracks. Ringrose-Voase & Bullock (1984) have developed an automatic recognition technique based on shape factors for discriminating and measuring the properties of pore classes. Ringrose-Voase (1987, 1990), Ringrose-Voase & Nys (1990) have all used image analysis technique to make qualitative description of pores in the soil horizon. The work of Murphy *et al.* (1977) and Moran *et al.* (1989) have also involved the application of image analysis technique for rapid analysis of soil pore structures. Several other research work reported in Bronswijk (1991) have been on the measurement of crack volume with different methods, while Bronswijk himself has investigated the relationship between vertical soil movements, cracking and water loss in the fields. He found that the ratio of water loss to three-dimensional volume shrinkage was as high as 0.80, without actually measuring the crack features, only the volume of shrinkage in the cracking soil.

Based on the morphological properties of the crack networks, and the series of past work, centered mainly on measuring the crack pattern complexity in terms of its fractal dimensions and shrinkage measurements in cracking soil, without taking the crack and clod morphological features into consideration. This research work therefore focus on the measurements and the use of the crack and clod morphological features to describe and

compare the crack pattern variation on different sludge image with changes in the sludge moisture content. The objectives of this research work are therefore :

- (i) Analyze the crack formation pattern, to extract the crack and clod morphological features with changes in the sludge moisture content.
- (ii) With the extracted morphological features, to develop a regression model for the sludge moisture prediction.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Experiments

Using the dredged sludge from Lake Kasumigaura, two experiments were conducted in a vinyl pipe house. The first experiment (A) was conducted from the 7<sup>th</sup> of May 1996 to 29<sup>th</sup> of May 1996. During this period, the vinyl pipe house average daily dry temperature was 25°C, and the average relative humidity was 79%. At the commencement of the experiment, the initial sludge moisture content was 458% (d. b), and when there was no further drying (only re-absorption of moisture), at sludge moisture content of 8% (d. b), the experiment was terminated. The second experiment (B) was conducted from 12<sup>th</sup> of November 1997 to 16<sup>th</sup> of January, 1998, in the vinyl pipe house, with the initial sludge moisture content of 398% (d. b), daily average dry temperature of 13°C, and the average relative humidity of 60.58%. At the 2<sup>nd</sup> week of the experiment, electric heater was used in the vinyl pipe house when it was discovered that the sludge surface became iced. When the sludge clods crumbling begins at moisture content of 67% d. b, the experiment was terminated. Experiments A and B differs in the sludge batch used, and the environmental condition in which they were conducted. In each experiment, dredged sludge was dried in an acrylic plastic box of dimensions 0.5×0.5×0.15 m at an initial depth of 0.1 m. The depth 0.1-m was chosen partly due to the box size, and the zone that is the most active region where the surface information, crack pattern, varies rapidly with mois-

ture content. At each time of the experiment, the drying box was heat insulated, water sealed on the sides. This was done to make the temperature distribution uniform, and to make the condition a little similar to the natural condition in the disposal yard, where sites have sealed ridges and no sub-soil drainage could take place, except allowing for moisture dissipation at the top surface. At the deposition of wet sludge into the acrylic box, the sludge initial moisture content (dry basis), dry mass, and the initial wet mass were determined. Daily surface images of the drying sludge were captured with digital camera (Fujix DS 200), in an illuminated chamber. Image capturing conditions such as height of capturing (0.5 m), position, lens aperture and lightning were kept constant during the experiments. Concurrently daily weights of the acrylic plastic box and its content were measured with electrical balance (EP 20 KA). Experiment A was dried to its equilibrium moisture content, and no crumbling of cracks was observed throughout, while experiment B was terminated when the crumbling of the surface cracks began, it did not gets to its equilibrium moisture content. From the daily weights, dry mass, and the initial moisture content data of the sludge body, the sludge daily moisture contents were calculated. Fig. 1 presents the original image of one of the sludge surface (from experiment B) showing the sludge tex-

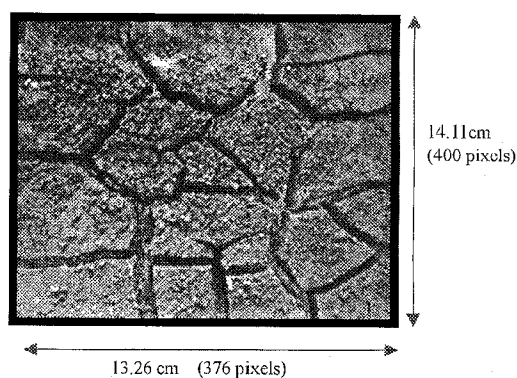


Fig. 1 Original image of the sludge surface at moisture content of 161% d.b.

ture and the crack pattern at moisture content of 161% (d. b).

## 2.2 Image Processing

The resulting digital images from the two experiments were of a high resolution ( $512 \times 512$  pixels), with each pixel equivalent to 0.35 mm. The images, which were in color, were first converted to their gray level. On the images, certain pictorial features makes recovering of the cracks very difficult, light enters wide cracks, and sludge crumbling (especially in experiment B) disrupts their continuity. To make the processing feasible, each of the images from the two experiments was duplicated, with one kept as the original copy and the other one as duplicate copy. The duplicate copy of each image was placed side by side with its original copy, and was edited manually with Adobe Photoshop™ software to remove extraneous materials along the crack paths. During the editing of the duplicate copy, constant reference was made to the original copy to minimize error in the segmentation process. To save computer running time and avoid memory problems, each of the edited images were then reduced into a rectangular areas of  $106 \times 100$  pixels ( $37.5 \text{ mm} \times 35.3 \text{ mm}$ ), and were digitized, valued in the range 0-255 gray levels in a program coded in C++ for further analysis.

### 2.2.1 Image Binarization

An approach that was felt to be more intuitive for extracting the crack and clod morphological features was to consider the regions enclosed by cracks (clods) as ground, and the cracks as the object. A threshold value was set for each image by using the gray level histogram of each image matrix. Pixel values less than the threshold value was set to 1 (clod) and level at or above the threshold was set to 0 (crack). Fig. 2 shows the cracking pattern of the sludge image at moisture content of 161% (d. b). In order to recognize the various morphological features of each binary image, which could be used for describing the crack pattern, the use of pattern recognition tech-

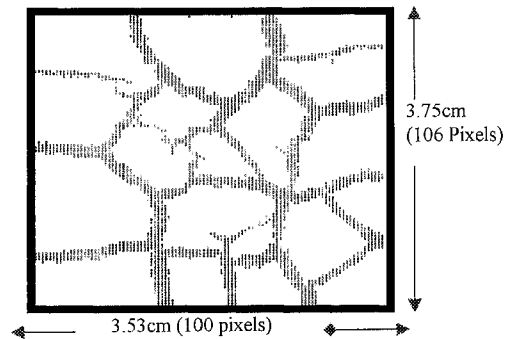


Fig. 2 The cracking pattern of the sludge surface at moisture content of 161% d. b.

nique was adopted. This involved the recognition of the morphological features of each of the image that continuously varying as the drying progresses. The morphological properties chosen were those that are independent of the image size and orientation (Ringrosevoase and Bullock, 1984). Cracks area and perimeter alone are not suitable individually for the measurement of the crack shape, because they are size dependent, hence they were combined to calculate the size independent shape characteristic called compactness. Calculating the crack elongation, which is also size independent and the angle of orientation, which depends on the image shape, carried out further crack description. From each of the sludge binary images, crack area,  $A$ , was estimated by counting the number of pixels within the crack regions, and crack perimeter,  $T$ , was estimated as a by-product of the crack length along the crack boundaries (Ioannis, 1995) by the relationship:

$$T = \sum_i \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad (1)$$

Where:

$X_i$  and  $Y_i$  are the coordinates of the crack boundaries pixels

The crack compactness,  $\gamma$ , angle of orientation,  $\theta$ , and elongation,  $E$ , were estimated by the relationships stated by Ioannis (1995) as follows:

$$\gamma = T^2 / 4\pi A \quad (2)$$

Compactness measures the complexity of the crack shape, it increase with complicated

shapes, and as the shape deviate from a circle. For a disc, the value is 1. The crack angle of orientation,  $\theta$ , is the angle between the crack major axis and the X axis. It measures the angle of crack displacement along the major axis in radian as follows :

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right) \quad (3)$$

While the crack elongation,  $E$ , is the square root of the second moments along the major and minor axes of the crack. It is estimated by the relationship :

$$E = \sqrt{\frac{\mu_{20} \cos^2 \theta + \mu_{20} \sin^2 \theta - \mu_{11} \sin 2\theta}{\mu_{02} \sin^2 \theta + \mu_{02} \cos^2 \theta - \mu_{11} \cos 2\theta}} \quad (4)$$

Where :

$\mu_{02}$  is the crack variance at X axis.

$\mu_{20}$  is the crack variance at Y axis.

$\mu_{11}$  is the crack covariance at X and Y axes

Spherical and rectangular objects have an elongation of 1.

### 2.2.2 Clods Labeling

After the calculation of the crack shape characteristics on each of the binary images, clod labeling was performed to estimate the number of clod, and the area of each clod. Each of the sludge binary image matrix was scanned from left to right and from top to bottom by examining the neighboring pixels immediately to the left,  $t$ , above,  $r$ , top left diagonal,  $s$ , and top right diagonal,  $q$ , to the current pixel,  $p$ , to check their connectivity. The existence of an adjacent pair of pixels :

$(p, t)$  where  $p=0$  and  $t=1$  indicates the boundary of a clod. A new clod is detected by the pair of adjacent pixels :

$(t, p)$  where  $t=0$  and  $p=1$

And starting from these pairs, each of the image matrixes was traced in a clockwise direction. If  $p$  is 0, the next position is scanned, if  $p$  is 1, and all the other four neighbors listed above are zeros, then a new label is assigned to  $p$ . If only one of  $p$  neighbors is 1, its label is assigned to  $p$ , and if two or more neighbors of  $p$  are 1, one of their label is assigned to  $p$ , and a note of an equivalence is made. Following this process, the equivalent label pairs were sorted into their equivalence classes (Gonzalez and Woods, 1993), and a unique label is assigned to each class. Fig. 3 shows a sample of a labeled local area of the sludge surface image with its clods and crack features shown in Table 1.

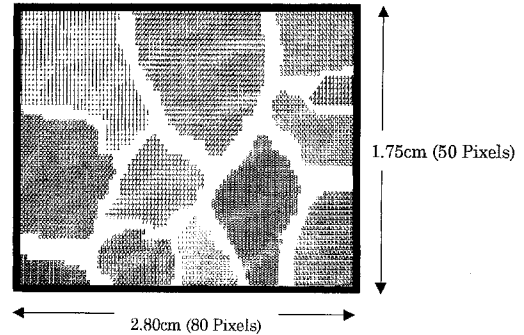


Fig. 3 A labeled local area of the sludge image at moisture content of 161% d.b.

Table 1 Statistics of the labeled sludge image in Fig. 3

	Clod 1	Clod 2	Clod 3	Clod 4	Clod 5	Clod 6	Clod 7	Clod 8	Clod a	Clod c	Clod d	Clod g
Area												
(Pixel)	644	772	247	61	218	529	290	430	252	137	185	85
(cm <sup>2</sup> )	0.80	0.96	0.31	0.08	0.27	0.66	0.36	0.54	0.31	0.17	0.23	0.11
Perimeter												
(Pixel)	910.68	1,091.69	349.28	86.26	308.27	748.06	410.09	608.06	356.35	193.73	261.61	120.20
(cm)	32.15	38.54	12.33	3.05	10.88	26.41	14.48	21.46	12.58	6.84	9.23	4.24
Compactness												
	102.48	122.85	39.30	9.71	34.70	84.18	46.15	68.42	40.10	21.80	29.44	13.53
Crack-cold ratio=0.29 Average clod area=0.39cm <sup>2</sup> Total clod area=4.78cm <sup>2</sup> Crack area=1.38cm <sup>2</sup>												

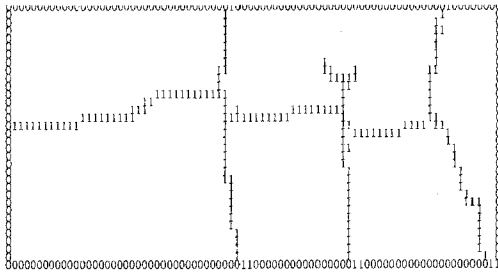


Fig. 4 Thinned structures of a local area of the sludge image at moisture content of 230% d.b.

From the labeled images, area of each clod, number of clods, clods perimeter, compactness, total clods area and the average clod area were estimated. From the results obtained, the crack-clod ratios were estimated for each of the image, as the ratio of the total crack area to the total clod area.

### 2.2.3 Cracks Thinning

Further processing of the sludge binary images were carried out to recover a thin line representation of the cracks in each image, from which values for crack widths and total crack lengths were obtained. An approach for representing the structural pattern of the cracks was accomplished by obtaining the medial axis of the cracks. In carrying out this operation, crack regions were reassigned the value 1, while the clod regions were reassigned value 0. Following which successive passes of the two basic steps thinning algorithm (Gonzalez and Wood, 1993) were applied to the crack points for peeling off the border pixels. Fig. 4 is a thinned structure of a local area in an image bordered by zeros.

Total crack lengths for each image was obtained by counting the number of pixels along the thinned crack lines. The crack width was obtained by updating the number of passes of the algorithm steps involved in reducing the largest crack width to a thin structure of a single pixel width. All the above processes were applied on all the images collected during the two experiments to extract the total crack

lengths and widths.

## 3. Results and Discussion

In the two experiments, at the initial stage of drying, and before the formation of surface cracks, there was the initial phase of moisture extraction from the sludge pores, thus resulting in the sludge consolidation and reduction in the sludge volume. The pores which later serves as source of weakness for crack formation. From the results obtained in the two experiments, experiment A, took 22 days to dry from its initial moisture content of 458% d. b to the equilibrium moisture content of 8% d. b, corresponding to an average of 524.48 g of moisture lost per day. The first crack appeared on the sludge surface 5 days after the commencement of the experiment. Experiment B took 64 days to bring the sludge moisture content from its initial value of 398% d. b to 67.24% d. b, despite its initial lower moisture content and the use of electric heater in the vinyl pipe house when the sludge surface became solidified, leading to an average loss of 152.29 g of moisture content per day, with the first crack appearing 27 days at the moisture content of 271% d. b after the commencement of the experiment. In experiment A, high drying rate, caused by the relatively high temperature and humidity resulted in the earlier formation, and increase in crack properties, at high moisture content of 351% (d. b), consequently affecting the mean change in its compactness, 46.36 per day, and the average of total crack compactness, of 371.29. Experiment B has a mean change of 20.40 in its compactness per day, and average of total crack compactness of 272.76. On the other hand, the difference in the batch of sludge used for the experiments, and the effect of environmental conditions may have resulted in the earlier crumbling of the sludge clods in experiment B.

Qualitative view of the sludge surface image shows that the crack pattern differs at different moisture level in the two experiments. The number of crack appearing per unit area,

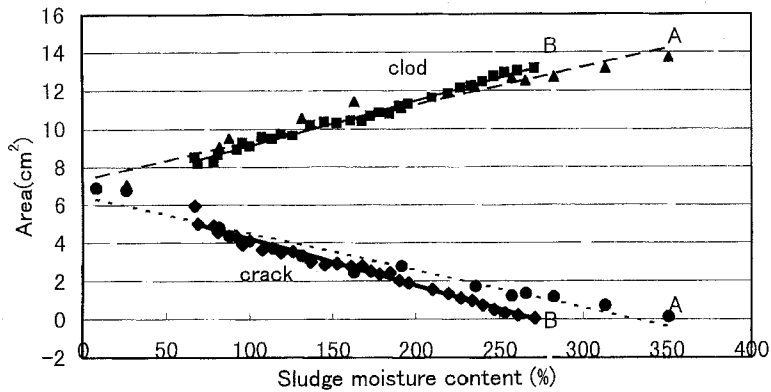


Fig. 5 The graph of crack and clod areas against the sludge moisture content.

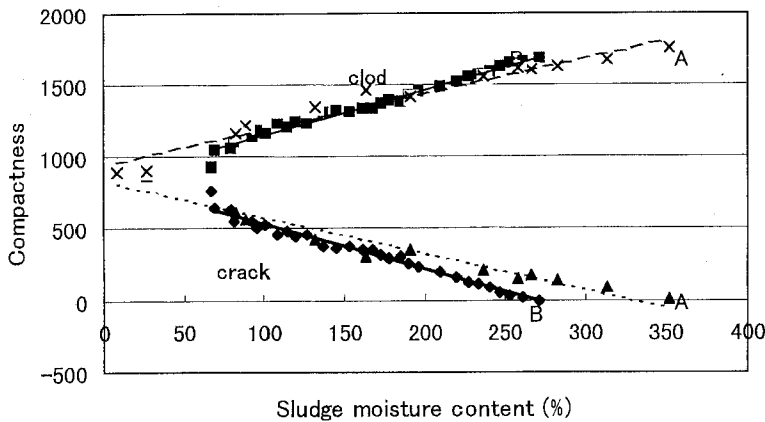


Fig. 6 The graph of crack and clod compactness against the sludge moisture content.

which is the crack density increased with a decrease in the sludge moisture content, which consequently affects the values of the crack and clod morphological features at different moisture content.

The pattern of cracks at the surface of a uniformly drying sludge appears as shown in Fig. 1. A set of polygons of roughly similar size and shape are formed as a result of clod displacement and further separation by the shrinkage process. Qualitative observations of the sludge surface shows that there were two distinct types of crack, the deep, straight, wide, and coarse cracks, extending from the sludge surface to the bottom of the drying box, and encompassing the sludge clods ; and the

thinning, shallow cracks on the clods surface called micro cracks. The coarse cracks begins as a small fracture or micro cracks with shallow depths on the sludge clods, and gradually expands and increase in length and depth with a decrease in the sludge moisture content. The crack pattern, especially the clods size and shapes are determined by the amount of clay (Preston *et al.*, 1997), the sludge moisture content, and the sludge drying rate.

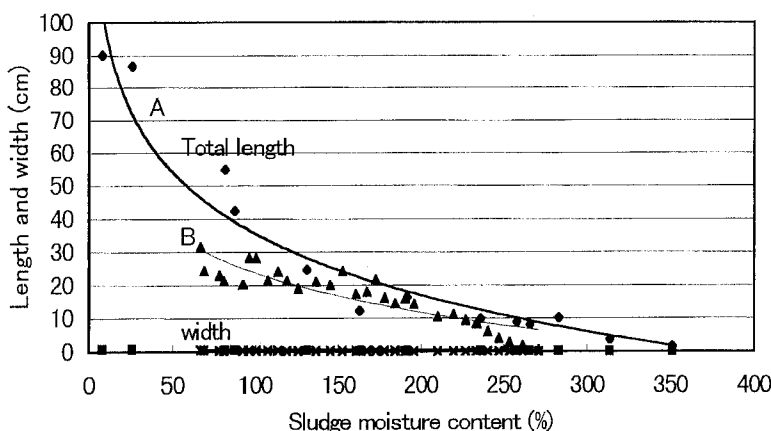
Results of the analysis of all the images collected in the experiments are as shown in Fig. 5 for the cracks and clods area, and in Fig. 6 for the clods and cracks compactness. Cracks area increased with a decrease in the sludge

**Table 2** Equations and the coefficient of determination of the crack area, compactness, length ; and clod area, and compactness against the sludge moisture content for experiment A and B

	Experiment A		Experiment B	
	Crack	Clod	Crack	Clod
Area	$Y = -0.020X + 6.50$ $R^2 = 0.953$	$Y = 0.020X + 7.37$ $R^2 = 0.953$	$Y = -0.024X + 6.67$ $R^2 = 0.976$	$Y = 0.023X + 6.73$ $R^2 = 0.988$
Compactness	$Y = -2.496X + 830.29$ $R^2 = 0.953$	$Y = 2.497X + 940.74$ $R^2 = 0.953$	$Y = -3.133X + 848.59$ $R^2 = 0.974$	$Y = 3.158X + 833$ $R^2 = 0.976$
Length	$Y = -26.907 \ln(X) + 159.53 \dots R^2 = 0.934$		$Y = -17.365 \ln(X) + 103.81 \dots R^2 = 0.781$	

X is the sludge moisture content (%) in the respective equations.

Y is the value of area, compactness, and length of cracks and clods in the respective equation.



**Fig. 7** The graph of crack length and width against the sludge moisture content.

moisture content, while the clods area decreased with a decrease in the sludge moisture content, at very low moisture contents, they both converge towards each other. In Fig. 6, the crack compactness increased with a decrease in the sludge moisture content, while the clod compactness decreased with a decrease in the sludge moisture content. During sludge drying, shrinkage, which is caused by the constant extraction of moisture from the sludge body, caused the formation of new cracks. Gradual, and horizontal displacement of the sludge clods resulted in the deepening and enlargement of the existing cracks, hence increasing the cracks area, their perimeters, and compactness, while causing a reduction in

the clods area, perimeter, as well as their compactness value because of the consolidation process. Table 2 shows the equations and the coefficient of determination of the crack area, compactness, length, and clod area, and compactness against the sludge moisture content for experiment A and B.

Figure 7 and Fig. 8 shows the graphs of the crack length and width, and the plot of number of clods against the sludge moisture content respectively. The cracks length and width increased with a decrease in the sludge moisture content, but the increase in the crack width was negligible compared to the total crack lengths. Cracks length become unstable at low moisture contents because (i) during the



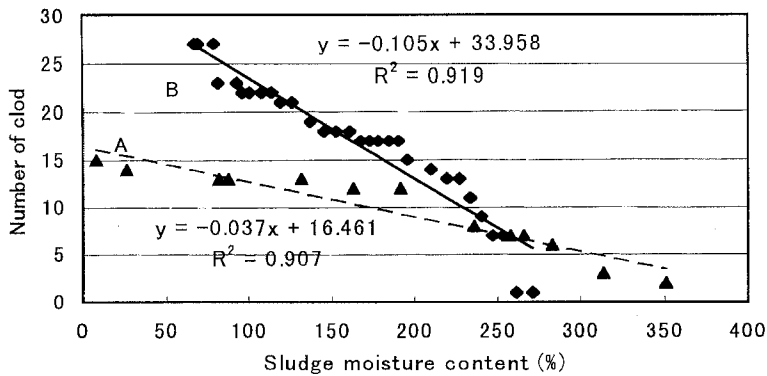


Fig. 8 The graph of number of clods against the sludge moisture content.

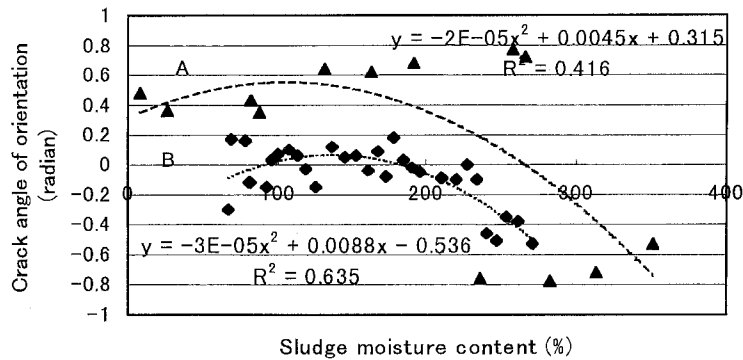


Fig. 9 The graph of crack angle of orientation against the sludge moisture content.

digitization process, micro cracks are sometimes disconnected. (ii) large difference in crack widths, especially between the coarse and the micro cracks, and the difference in crack widths at the crack junctions caused disconnection and sometimes deletion of the micro cracks after successive passes of the thinning algorithm. (iii) at low moisture contents, there is the difficulty in the separation of cracks from clods due to light that enters the wide cracks, crumbling of clod particles, and the development of micro cracks. In Fig. 8, constant degradation of the sludge structure as a result of moisture extraction led to the increase in the number of clods with a decrease in the sludge moisture content. Although experiment A and B were conducted using the same box size, there were fewer number of clods in experi-

ment A compared to those in experiment B. On the clod geometry, individual clod vary in sizes, and they all show polygonal shapes with their edges rough or jagged.

Figure 9 and Fig. 10 are the graphs of the crack angle of orientation and elongation respectively. The relationship between the crack angle of orientation and the sludge moisture content exhibits a parabolic shape, and at a single value of the angle of orientation, there were two values of the sludge moisture content at moisture content below 200% d. b, and the  $R^2$  are generally low in the two experiments. The angle of orientation increased from a negative value to a maximum positive value, remain constant for a short range of moisture contents, before gradually reducing to a lower values at low moisture contents. Crack elon-

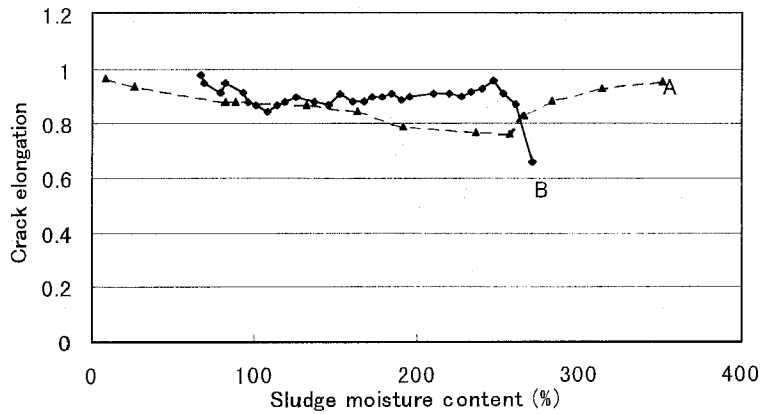


Fig. 10 The graph of crack elongation against the sludge moisture content.

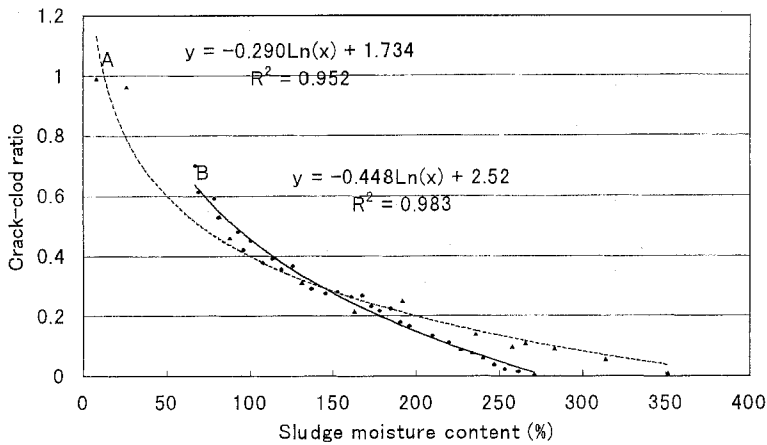


Fig. 11 The graph of crack-clod ratio against the sludge moisture content.

gation was virtually constant throughout the sludge drying period, except at the initial stage of the crack formation where little variation occurs. This result shows that the increase in the cracks length and width were gradual, with newly formed cracks following a repetitive pattern of the existing cracks.

The crack-clod ratio shown in Fig. 11 defines the changing rate of the total cracks area to the total clods area, and it increased with a decreasing sludge moisture content. It measures the degree of shrinkage in the sludge clods to the cracks. At the equilibrium moisture content of 8% dry basis, the total crack area was about 0.96 times the total clod area, which showed that the crack area was almost equal to

the clods area when fully dried to its equilibrium moisture content. The crack-clod ratio had a good logarithmic correlation with the sludge moisture content, and high coefficient of determination.

Sludge drying rate encouraged earlier formation of cracks on the sludge surface, and rapid increase in the crack morphological features such as the total crack length, width, crack compactness, and decreased the sludge clod features except the number of clods. All the crack and clod morphological features, except the crack elongation exhibited a significant change in value with changes in the sludge moisture content.

One of the main goal of this research work is

to investigate the relationship between the crack pattern morphological features and the sludge moisture content, and the possibility of using these features for the sludge moisture prediction. To achieve this, the sludge surface crack were analyzed quantitatively and qualitatively. The morphological features extracted from the images were used in formulating several sludge moisture prediction regression models, from which the most appropriate model was selected after validation. The dependent variable was the sludge moisture content, and the independent variables were the crack and clod morphological features with high  $R^2$ , that is, crack compactness, crack-clod ratio, clod compactness and number of clods. Stepwise regression selection of the statistical package, Minitab, was then applied to select the best features for the sludge moisture prediction.

The basic problem encountered in regression model selection is to find the model which has a good fit. In this way, model with high  $R^2$  is desired, because it gives the amount of variability in the model. To achieve narrow confidence intervals, and accurate estimates of prediction-moisture content, the mean squared error (MSE) should be small (Dale, *et al.*, 1991). Based on the above criteria, the model developed from experiment B data set (equation 7) was selected for the sludge moisture prediction. With any statistical model, there is usually error involved. In validating its accuracy, validation data was obtained from experiment A data set and cross validation method was applied, by comparing the mean squared error (MSE) obtained from the developed regression model with the mean squared prediction error (MSPR) estimated from the validation data set. From the work of Dale, *et al.* (1991), MSPR was estimated by the relationship :

$$MSPR = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{P_i})^2}{n} \quad (5)$$

Where  $Y_i$ =the value of the response variable

in the  $i^{th}$  case of the validation data set.

$Y_{P_i}$ =the prediction value for the  $i^{th}$  case, based on the substitution of the validation data set in the developed model.

$n$ =the number of data points in the validation data set.

While the MSE value was obtained directly from the regression model fitting by the relationship :

$$MSE = \frac{(Y_i - Y_{P_i})^2}{n - k - 1} \quad (6)$$

$Y_i$ ,  $Y_{P_i}$ , and  $n$  are as stated above, and  $K$  is the number of independent variables in the model. If the MSPR of the validation data is fairly closed to the MSE obtained from the regression fitting, then the MSE for the selected model is not seriously biased, and gives an appropriate indication of the predictive ability of the model (Dale *et al.*, 1991). The selected regression model is thus :

$$Y = -116 - 4 \times 10^{-4} X_1^2 + 306 X_2^2 + 0.226 X_3 \dots \dots \dots R^2 = 0.993 \quad (7)$$

Where :

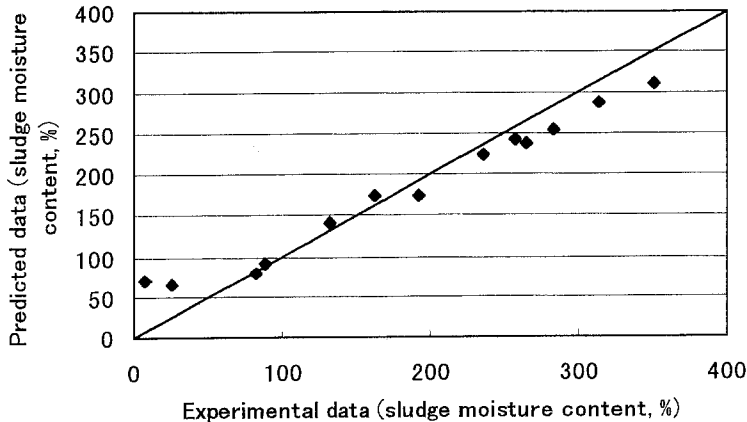
- $Y$ =Sludge moisture content (% d. b)
- $X_1$ =Crack compactness
- $X_2$ =Crack-clod ratio
- $X_3$ =Clod compactness

The selected model has MSE value of 34.15, with  $R^2=0.993$ , while from the validation, MSPR was 37.06, for the range of 80-250% moisture content. Table 3 shows the MSE,  $R^2$ , and MSPR, estimated for each of the regression model. The large variation between the MSE and the MSPR of the selected model is due to the significant difference in the residuals at different moisture content ranges, especially at very high or very low moisture contents. Fewer cracks developed at extreme high moisture contents, and there was the difficulty in segmentation of cracks from the clods at very low moisture contents ; where crack patterns were very complex and with large number of micro-cracks. Fig. 12. shows the comparison between the predicted and experimental moisture contents.

The agreement between the predicted and

**Table 3** The MSE,  $R^2$ , MSPR, estimated for each of the regression models

Data for mode formulation	Formulated model	MSE	MSPR	$R^2$	n
Exp. B data	$Y = -116 - 4 \times 10^{-4} X_1^2 + 306 X_2^2 + 0.226 X_3$	34.15	—	0.993	30
Validation with date of exp. A		—	42.16	—	13
Validation with data of exp. A (80-250%)		—	37.06	—	7
Exp. A data	$Y = -886 - 4 \times 10^{-4} X_1^2 - 58 X_2^2 + 0.708 X_3$	190.12	—	0.988	13
Validation with date of exp. B		—	246.52	—	30
Validation with data of exp. B (80-250%)		—	256.86	—	26
Exp. B (80-250%) data	$Y = -147 - 3 \times 10^{-4} X_1^2 + 201 X_2^2 + 0.245 X_3$	46.88	—	0.986	26
Validation with date of exp. A (80-250%)		—	266.15	—	7
Validation with whole of Experiment A Data		—	233.66	—	13
Exp. A (80-250%) data	$Y = -300 - 6 \times 10^{-4} X_1^2 + 721 X_2^2 + 0.351 X_3$	400.90	—	0.958	7
Validation with date of exp. B (80-250%)		—	211.24	—	26
Validation by using the whole data of Exp. B		—	230.08	—	30

**Fig. 12** Comparison between the predicted and experimental moisture contents.

the experimental data using this model appears very good for evaluating the sludge moisture content within the range of 80% to 250% (d. b) moisture contents, as can be seen in Fig. 12. This range, is very important for sludge strengths and traction parameters studies on the sludge surface. From the current studies, at moisture content of 250%, the moisture suction, PF, at 10 cm depth of the sludge surface is 1.30, the average cone resistance, and the average dry bulk density of the depth 0 to 40 cm are 84.71 kPa and 369.28 kg/m<sup>3</sup> respectively. At moisture content of 150%, the PF value is 2.77, average cone resistance,

and average dry bulk density of the depth 0 to 40 cm are 843.40 kPa and 486.08 kg/m<sup>3</sup> respectively.

With the developed regression model, the sludge moisture contents can be predicted to a good accuracy within the stated range, but field validation of the model is required for its efficient use in the sludge integrated handling system.

#### 4. Conclusion

The sludge surface crack pattern was analyzed by the technique of image processing at varying sludge moisture content, to extract

the crack and clod morphological features. The features, which were later used in developing a regression model for evaluating the sludge moisture content. From the results of the experiments and the model validation, it shows that the crack and the clod morphological properties can be used to predict the sludge moisture content to a good accuracy within the range of 250% (d. b) to 80% (d. b) moisture content, using the features crack compactness, crack-clod ratio and the clod compactness. The crack features increased with a decrease in the sludge moisture content ; and the clod features, except for the number of clods, decreased with a decrease in sludge moisture content. The crack-clod ratio which measures the degree of shrinkage in the drying sludge increased with a decrease in the sludge moisture content, and as the drying progresses to a lower moisture content, the cracks area was almost equal to the clods area. Crack elongation remains fairly constant with decreasing sludge moisture content, while the crack angle of orientation exhibited a parabolic shape. The crack pattern on the sludge surface was found to depend on the sludge drying rate and moisture content, and the developed regression model performed moderately well under laboratory test, but field validation of the model is required for its efficient use in the sludge integrated handling system.

### References

- Alan H. Kvanli. (1988) : Statistics, a computer-integrated approach, 8<sup>th</sup> edition. West Publishing Company ; 50, W. Kellogg Boulevard, Minnesota, USA.
- Bodun, P.O., Shibusawa, S., Sasao, A., Sakai, K., Nonaka, H., (2000) : Dredged sludge moisture prediction by textural analysis of the surface image. *Journal of terramechanics*. Vol. **37**, pp. 3-20.
- Bronswijk, J.J.B. (1991) : Relation between vertical soil movements and water content changes in cracking clays. *Soil Sc. Soc. Am. Journal*, Volume **55**, pp. 1220-1226.
- Dale, W.A., Bo S.P., James D.Mc., Yanbo H., (1991) : Ultrasonic signal classification for beef quality grading through neural networks. Automated agriculture for the 21<sup>st</sup> century, Proceedings of ASAE, pp. 116-125.
- Gonzalez R.C. and Woods R.E., (1993) : Digital image processing. Addison-Wesley publishing company, Tokyo.
- Horgan, G.W., (1998) : Mathematical morphology for analyzing soil structures from images. *European Journal of Soil Sc.*, Vol. **49**, pp. 161-173.
- Ioannis Pitas. (1995) : Digital Image Processing Algorithms. Prentice Hall International Series in Acoustics, Speech and Signal Processing. Prentice hall Europe.
- Moran C.J., McBratney A.B. and Koppi A.J., (1989) : A rapid method for analysis of soil macropore structure. I. Specimen preparation and digital binary image production. *Soil Sc. Soc. Am. Journal*. Vol. **53**, pp. 921-928.
- Murphy C.P., Bullock P. and Biswell K.J., (1977) : The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part II. Applications. *Journal of Soil Science*, Vol. **28**, pp. 509-518.
- Nonaka, H. (1997) : Dredged sludge handling for purification in lake Kasumigaura. Masters thesis. Graduate School of Bio-applications and Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu Shi, Japan.
- O'Callaghan J.F. and Loveday, J., (1973) : Qualitative measurement of soil cracking patterns. *Pattern recognition*, Vol. **5**, pp. 83-98.
- Preston S., Griffiths B.S. and Young I.M. (1997) : An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry. *European Journal of Soil Sc.* Vol. **48**, pp. 31-37.
- Ringrose-Voase A.J. and Bullock P., (1984) : The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*. Vol. **35**, pp. 673-684.
- Ringrose-Voase A. J. (1987) : A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. *Journal of Soil Science*. Vol. **38**, pp. 343-356.
- Ringrose-Voase A.J. (1990) : One dimensional image analysis of soil structure. I. Principles. *Journal of Soil Science*. Vol. **41**, pp. 499-512.
- Ringrose-Voase A.J. and Nys C. (1990) : One dimensional image analysis of soil structure. II. Interpretation of parameters with respect to four-forest soil profiles. *Journal of Soil Science*. Vol. **41**, pp. 513-527.
- Scott, G.J.T., Webster, R., Nortcliff, S. (1986) : An

- analysis of crack pattern in clay soil : its density and orientation. *Journal of Soil Science*, Vol. 37, pp. 653-668.
- Shibusawa, S. *et al.* (1996) : Sludge handling vehicle for purification in lake Kasumigaura. *Proc. of the 12th Inter. Conf. ISTVS/Beijing*. pp. 394-401.
- Waller P.M and Wallender W.W. (1993) : Changes in cracking, water content, and bulk density of salinized swelling clay field soils. *Soil science*. Vol. 156, No. 6, pp. 415-423.

## 浚渫底泥乾燥における水分予測のための亀裂パターン解析

ボードン パトリック\*・澁澤 栄\*・笹尾 彰\*\*・酒井憲司\*\*

\* 東京農工大学大学院生物システム応用科学研究所

\*\* 東京農工大学農学部

### 要 旨

霞ヶ浦から浚渫される大量の底泥が、水田利用の大区画処理ヤードで天日乾燥固化処理されている。乾燥促進のための機械処理が求められており、底泥乾燥状態と地盤支持力を遠隔予測する必要がある。本研究は、表面情報により底泥乾燥状態を予測することを目的に実施した。

浚渫底泥の乾燥過程においては、乾燥の進行とともに土壌の凝縮が地表面からはじまり、更に3次元的な亀裂網の発生・発達及び大小さまざまな土塊が形成される。本報では、土壌水分変化に対する底泥亀裂と土塊の形態変化の関係を記述するため、亀裂網の幾何学的解析を行った。解析結果より、亀裂の形態特性値は水分減少とともに増大したが、土塊の形態特性値は土塊の数を除いて減少した。8% d.b.の平衡含水比で亀裂の地表断面積が土塊の地表断面積の0.96倍になり、また亀裂/土塊の面積比と含水比との間には相関の高い指数関係が認められた。また底泥の亀裂パターンは乾燥速度と水分状態に依存することを認めた。

受稿年月日: 1998年8月5日

受理年月日: 1999年10月15日

## タイ南部ソングラ湖流域における土地利用の 変化と土壌侵食の関係

駒村正治\*・ケットケオ プアンベット\*\*・チャンチャイ タナブド\*\*\*  
 チャオ ヨンチャラチャイ\*\*\*

Land Use Change followed by Soil Erosion in Songkhla Lake Basin

Masaharu KOMAMURA\*·Ketkeo PHOUANGPHET\*\*·Charlchai TANAVUD\*\*\*  
 and Chao YONGCHALERMCHAI\*\*\*

\* Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

\*\* Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture

\*\*\* Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Thailand

### Abstract

We were defined a major change in land use and assessed consequent environmental impact in Songkhla lake basin, southern part of Thailand using remote sensing techniques for geographic information system applications. 35 percent of forest area in the basin was disappeared during 1982 to 1996, contributing to 22 and 76 percent increases in rubber and aquaculture areas respectively.

Consequently, the basin was deteriorated by soil erosion. It was estimated that the average rate of soil loss increased from  $4.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  in 1982 to  $7.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  in 1996. The rate of soil loss was found higher in greater slope or rubber area.

The destruction of forest cover disturbed hydrological function in the basin, caused soil erosion and increased sediment in Songkhla lake system.

### 1. はじめに

タイ南部のソングラ湖流域は、近年急速に発展しているハジャイとソングラの2つの市を含んでおり、都市の拡大、経済の発展にともない、無計画な土地利用や流域内の天然資源の過剰開発が生じている。その結果、流域の調和ある自然生態系のバランスが乱れはじめ、人間の生産・生活活動の継続に対して問題となってきた。

とくに熱帯アジアにおける畑地からの土壌侵食については、熱帯土壌が有機物の乏しさによる構造の不安定さが受食性を高めている場合が多いとされ、さし迫った課題となっている(久馬一剛, 1999)。

そこで、我々はソングラ湖流域において以下の項目を中心に調査を実施した。

#### ① 土地利用の変化による土壌侵食

② 土壌堆積がソングラ湖における環境と生態系に与える影響

③ 流域における資源利用および生態系を持続的にするための土地利用計画

本報告はソングラ湖流域の農業的土地利用の変化と土壌侵食の関係およびその対策についてまとめたものである。

### 2. 調査項目と方法

調査対象地域であるソングラ湖流域は、図-1に示すようであり、北緯 $6^{\circ}27'$ から $8^{\circ}12'$ 、東経 $99^{\circ}44'$ から $100^{\circ}41'$ に位置している。ソングラ湖流域の面積は、陸地の $7,450 \text{ km}^2$ と湖の $1,050 \text{ km}^2$ を合わせた $8,500 \text{ km}^2$ であり、行政区としてはソングラ県とパタルーン県にまたがっている(NESDB and NEB, 1985)。

\*東京農業大学・地域環境科学部, \*\*東京農業大学・大学院農学研究科, \*\*\*プリンス・オブ・ソングラ大学・天然資源学部  
 キーワード: タイ国, 土地利用, ゴム園, 土壌侵食, 農地保全

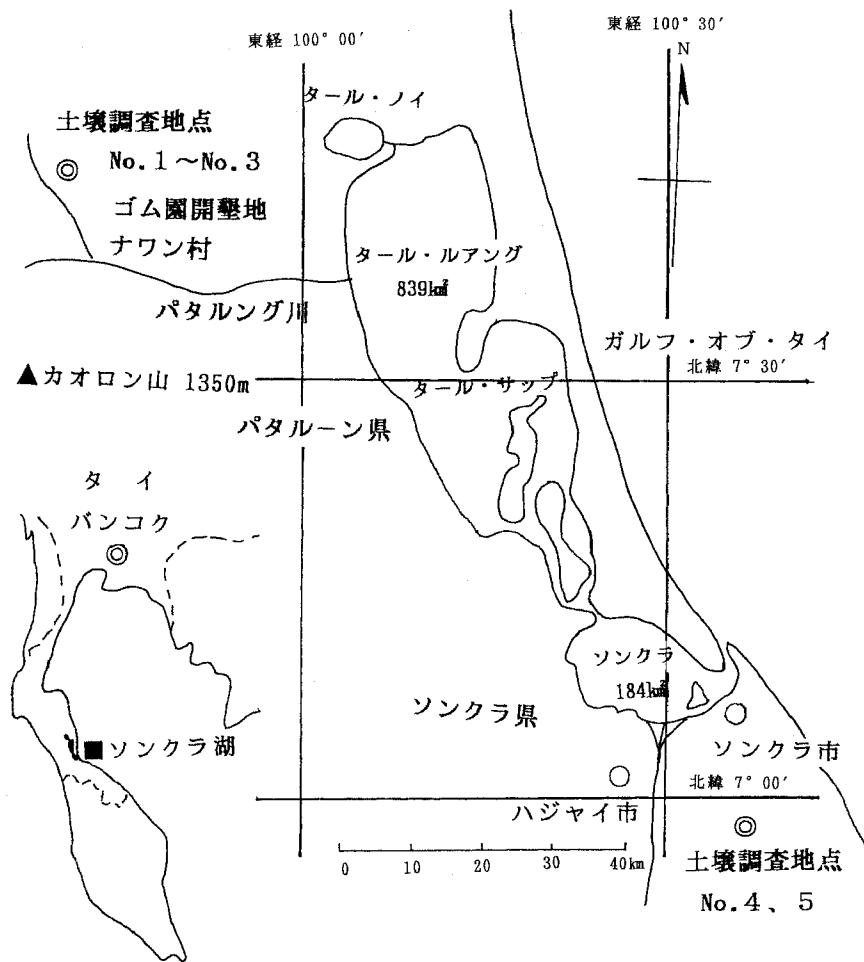


図-1 調査対象地

Fig. 1 Location of survey site.

本研究は、ソンクラ湖流域において以下の項目を主要な調査および方法とした。

- ① 自然環境および土地利用からみた地域の特徴については、既存の気象資料、土地利用図および農業統計資料によった。
- ② 土壌特性、とくに土壌の受食性については、現地での土壌調査と土壌の物理性や受食性の実験によった。
- ③ 土壌侵食量の予測については、汎用土壌侵食予測式 (USLE 式) によった。
- ④ 流域における土地利用の変化と土壌侵食量の関係である。

主に利用しない参考とした資料は、① 1/50,000 の地形図 (The Royal Thai Survey Department, 1990 年)、② 1/50,000 のソンクラ湖流域の土地利用図 (Land Development Department, 1982 年)、③ 1/50,000 のランド

サットイメージ図 (The National Research Council of Thailand, 1996 年)、などである。

### 3. 調査地域の自然環境

#### 1) ソンクラ湖

ソンクラ湖は、図-1 に示したようにタイ・ガルフ湾に面している潟湖で、湖水面積 1,050 km<sup>2</sup> を有しタイでは最も大きな湖であり、わが国の琵琶湖の面積の約 1.6 倍である。

この湖は 3 つの湖、4 つの部分に分けられる。北部のタール・ノイが最上流部、南端のソンクラ湖が最下流部にあたり、南端で外洋につながっている。そのため乾季における塩分濃度は、上流の淡水から徐々に濃度を上げながら淡水域から汽水域を経て、南部のソンクラ湖で海水濃度に漸近している。



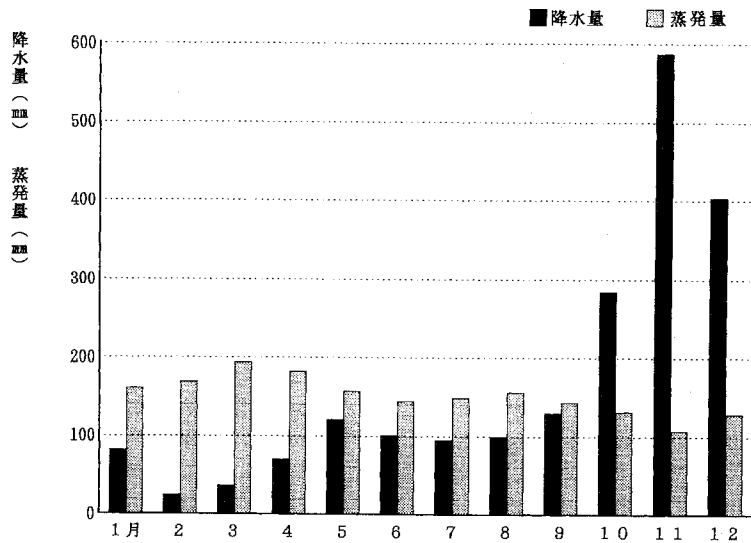


図-2 ソククラ市の気候（降水量と蒸発量）（1961～1990年の平均）

Fig. 2 Climate of Songkhla City.

資料：Climatology division Meteorological Department, 1991.

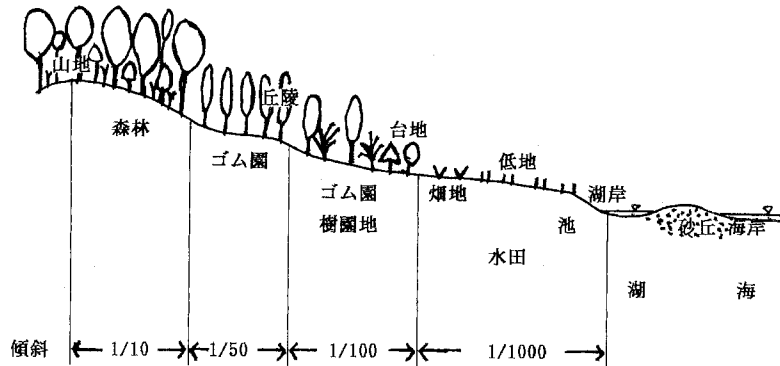


図-3 対象地中央部における東西方向の横断図

Fig. 3 Crossing geography figure in the central area of Songkhla Lake basin.

湖の水深について中央部のタール・ルアングは、平均水深が1.5～2.0mと浅い部分が多く、南部のソククラ湖は、最大水深9mで汽水ないし海水で満たされている。

水質は、水産加工場などの立地している南部のソククラ湖の地先水域やハジャイ市の汚水を含む流入域などを除けばおおむね良好である。また、塩分濃度の季節変化は、雨季と乾季における周辺河川や上流湖からの流入量変化や外洋からの潮汐の影響を受けて複雑に変化している。

2) 気象

ソククラ市の気象は図-2に示すとおり熱帯モンスー

ン気候であり、年平均降水量は2,035mmと多く、年平均気温28℃、平均湿度77%であり、年間をとおして高温、多湿である。しかし、雨季と乾季に分かれており、降水量の変動が大きく、10月から12月の雨季と1月から9月の乾季に分かれている。

計器蒸発量は、月間110～190mmの範囲で、乾季に多く、雨季に少なく、とくに2～4月にかけて蒸発量が降水量をかなり上回り、農作物の干魃の発生がうかがわれる。一方、雨季においては、朝、晩にスコール性の強い雨が発生し、24時間最大降雨量が390mmにも達した記録がある。

表-1 ソンクラ湖流域の傾斜区分および地形別面積割合

Table 1 Classification of slope steepness and landform

傾斜区分	面積 (km <sup>2</sup> )	比率 (%)	地形分類	面積 (km <sup>2</sup> )	比率 (%)
0~ 3%	5,863	79.0	海岸・湖岸	1,192	16.1
3~ 8%	439	5.9	平地	1,235	16.7
8~16%	214	2.9	丘陵地	2,305	31.2
16~35%	448	6.1	山地	2,074	28.0
35%以上	455	6.1	水域	588	8.0
合計	7,419	100.0	合計	7,394	100.0

注: 合計面積は、異なった資料によるため同一でない

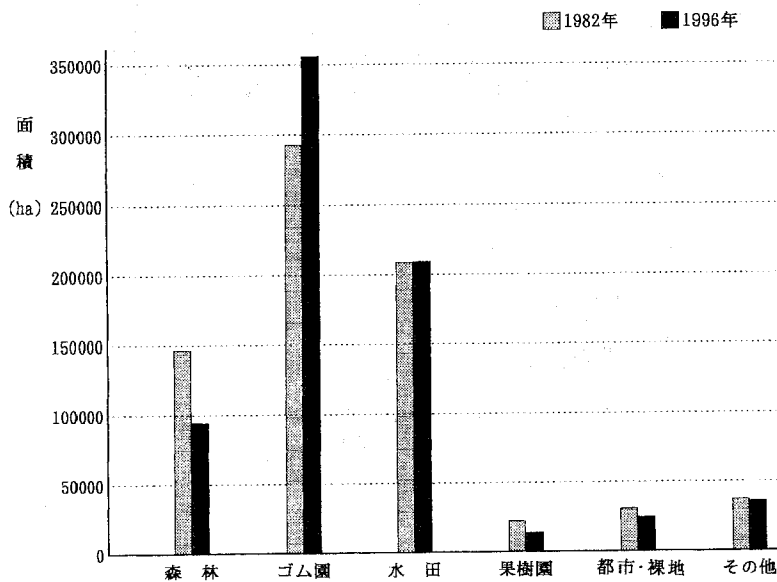


図-4 土地利用別の面積 (1982年, 1996年)

Fig. 4 Land use changes from 1982 to 1996.

### 3) 地形および土地利用

本地域は、図-3の東西方向の横断図に示すように、西に最高標高 1,350 m のカオロン山など高く急勾配な山が標高 800~1,000 m で南北につらなり、中間部に山麓、丘陵部が続き、その東部に平坦地が拡がり、さらにソンクラ湖を経て砂丘列のある海岸低地からタイ・ガルフ湾となる。

流域の傾斜区分および地形別面積割合は表-1のとおりであり、傾斜 0~3% の平坦地形の面積は 79% とその割合が高く、山地を除けば概して緩やかである。

傾斜区分からみて、山地と丘陵が約 60% を占め、緩やかな山地や丘陵地が多い。

河川は山間上流部が急流で、一部に滝もみられる。水

源流域の森林は、その保水性により地下水、湧水が豊富で乾季でも枯れない滝があることから水源涵養機能が高いといえる。

しかし、上流地域の森林が農地とくにゴム園へ急速に転換が進み、生態系の変化が発生している (Royal Forest Department, 1998)。一方、下流部は緩く蛇行し、流速は非常に遅く、侵食・運搬された土壌で懸濁した水が流下している。とくに、雨季における河川の濁りが激しく、そのままソンクラ湖の濁りにつながっている。

## 4. 農業における土地利用

### 1) 土地利用および農業の概要

地形と土地利用の関係は、山地は森林、中間部の山麓、

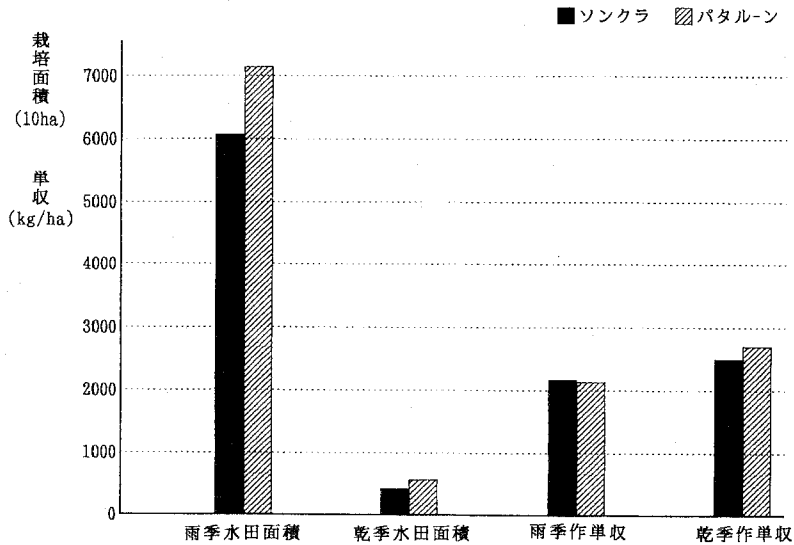


図-5 栽培別稲作の面積と単収

Fig. 5 Harvested areas of paddy field and rice yield.

資料：Agricultural Statistics of Thailand Crop Year 1994/95, 1995.

丘陵および一部の低地はゴム園および果樹園、平地は主に水田に利用され、微高地は道路、住宅および果樹園として利用されている。東部の海岸低地は、水田、樹園地園およびエビの養殖池として利用されている。

1982年と1996年における土地利用別の面積を図-4に示す。

1996年における土地利用は、ゴム園の面積が増加し、流域の48%を占め、非常に多い。続いて水田が28%、森林が13%である。森林面積は82年の20%からさらに減少し、この14年間に森林面積の95%が減少したことになり、同じ期間のタイ国全体の森林減少率の16%を上回っている(Charupatt, T. 1996)。面積は少ないが、エビの養殖池の増加率が76%と顕著である。

本地域の農業は、生産量からみてゴム生産がタイの17%と主要な農産物であり、地域を支えている産業であるが、米の比重はそれほど大きくない。その他の作物として、ヤシ、バナナなどの果樹が多く、野菜や普通作物の生産が少ない(Center for Agricultural Statistics Office, 1995)。

なお、水産物の割合が高く、ソクラ湖および周辺地域ならびに養殖池における漁獲量が多く、本地域ではゴムの生産とならぶ重要な産業である。

## 2) 水田

ソクラ県とパタルーン県の稲作は、図-5に示すように、雨季のみ水稲を作付する一期作水田がほとんどであ

る。灌漑施設を持った水田や乾季でも稲作可能な二期作水田はわずか7%程度である。このように多くの水田は、乾季に河川水が少ないため灌漑には利用することができず、雨季作のみである。

雨季作は、雨季に入る直前の9、10月に田植えを行い、翌年の1、2月に収穫する。雨季作の平均収量は、図-5に示したように、およそ220 kg/10 aと低い。乾季作収量は270 kg/10 aと雨季作に比べて若干多いが、近年収量が低下している傾向である。

水田の特徴は、雨水を貯留するため畦畔が大きく、排水路は幹線水路のみで、田越し灌漑の水田が多い。一部の水田を除いて水路および道路が不備で、区画も不整形であり、その面積も10 a程度と小さい。

## 3) ゴム園

ゴム園は、本地域の山麓傾斜地や丘陵地に多く分布しているが、低地でも高畝方式で排水対策を講じながら栽培している園も多い。

ゴム園の傾斜は1/100程度、高地でも1/50程度でそれほど大きくない。一般に排水の促進のためゴム園の植栽列の中央部がやや低くなっている。なお、近年では丘陵地での開墾が進み、傾斜が大きい園も造成され、土壌侵食からみて問題となっている。ゴムの樹は寿命が30~50年程度で、5年目から生産可能であり、生産前の生育初期の間ではインタークロップなどで生計をたてる。ゴム園のインタークロップは、バナナ、パイナップル、

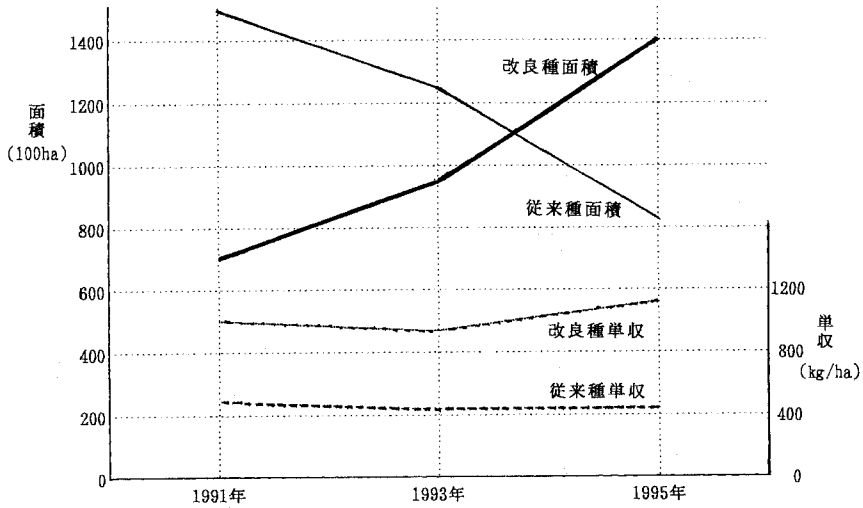


図-6 ゴム園の面積変化と単収

Fig. 6 Changes of rubber areas and rubber yield.

資料: Agricultural Statistics of Thailand Crop Year 1994/95, 1995.

ラッカセイおよび大豆などである。

ゴムの植栽間隔は、通常  $7 \times 3 \text{ m}$  ( $20 \text{ m}^2/\text{本}$ ) であり、10 a で約 50 本となる。下草、雑草はゴムが生長すると日射量が減るため自然に少なくなるが、土壌侵食対策には必要である。しかし、雑草が多いと収穫作業がしにくく、また蛇の危険性が高まるため多くの農家では下草刈りを行っている。

ソククラ県におけるゴム園の面積について、従来の品種と改良品種の面積および単収を図-6 に示す。従来品種の面積は、年々減少し、改良品種が増加している。これは改良品種の単収が従来品種の 2.5 倍と高く、また政策として改良品種への更新を奨めている結果でもある。

#### 4) 果樹園

果樹園での主要な果樹は、バナナ、ドリアン、パパイヤ、パイナップル、マンゴなどであり、ヤシ（ココナツ、オイル、シュガー）類も多い。

果樹園は丘陵地に多いが、一部低平地の水田地帯内にも分布する。水田地帯内の果樹園は、島畑方式による造成である。すなわち農地の周辺を掘削して、盛土部分を樹園地とし、掘削部分に雨水を貯留し、果樹の灌漑用水として利用する方法である。果樹は農家にとって重要な換金作物となっている。

#### 5) 土地利用の変化

森林の減少面積は、この 14 年間で 51,881 ha であり、35% が減少した。主な転換先はゴム園が 51,722 ha、水田が 5,157 ha、裸地が 2,870 ha である (図-7)。一方、ゴム

園は、63,704 ha (22%) 増加しており、主に森林から 51,722 ha、水田から 29,304 ha、果樹園などから 11,472 ha が転換されている。

このようにゴム園への転換面積が多いのは、ゴムの収益が稲作と比べて魅力があるためとゴム更新援助基金があるためである。丘陵でも頂上付近までゴム園を造成している。このような土地利用の変化が土壌侵食へ悪影響につながることになる。

一方、エビの養殖池が主に水田からの転換で、3,491 ha から 6,148 ha と 2,657 ha (76%) も増加している。養殖池はソククラ湖岸に多く存在し、養殖池の用水はソククラ湖からポンプで取水しパイプラインで送水される。しかし、排水路の設備が無いため、塩分濃度が高く、富栄養化した排水が周辺の農地の排水路に排除され、水質の汚染問題が顕在化しつつある。

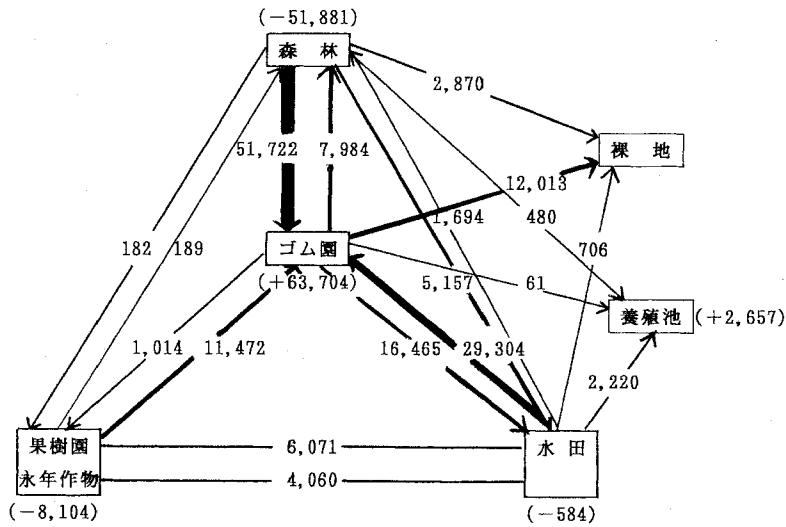
## 5. 土壌特性および予測侵食量

### 1) 土壌特性

土壌調査地点は表-2 のようにナワン村のゴム園の更新地とソククラ大学の土壌侵食試験圃場の 2 か所 5 地点である (図-1 参照)。

ナワン村のゴム園の更新地は、50 年前までは森林であり、その後ゴム園に開墾した。40~50 年ほど経過しゴムの生産が低下したため、政府が推奨している新しい改良品種の苗を改植している。

土壌断面について、代表的な No. 1 と No. 4 地点を図



数値が合わないのは、その他の土地利用面積を含むため

図-7 ソングクラ流域における1982年から1996年の土地利用面積の相互変化(単位: ha)

Fig. 7 Changes in land use from 1982 to 1996 in Songkhla Lake Basin.

表-2 調査地点

Table 2 Features of soil survey points

地点No.	場所およびその特徴	傾斜	標高
No. 1	ナワン村のゴム園の更新地の斜面下部	6度	60m
No. 2	ナワン村のゴム園の更新地の斜面上部	6度	65m
No. 3	ナワン村のゴム園の更新地隣接ゴム園(4年生)	6度	65m
No. 4	ソングクラ湖南部丘陵地道路沿いのゴム園	5度	30m
No. 5	ソングクラ湖南部丘陵地の土壌侵食試験ゴム園圃場	6~7度	65m

-8に示す。No. 1は黄褐色を基調とし、砂質壤土であり土壌構造がやや発達している。No. 4は砂質土で、単粒構造である。また2か所とも根群が発達している有機物の蓄積がみられず、熱帯土壌の特徴を呈している。

土壌の基本的物理性は表-3に示すように、乾燥密度は1.3~1.5程度で下層になるにしたがって大きな値となる。自然含水比は14~20%の範囲でやや少ない傾向である。透水係数は、 $10^{-2}$ ~ $10^{-5}$  (cm/s) のオーダーと範囲が広く、地点や深さによるバラツキがみられた。

土壌の三相割合は、固相が比較的多く、液相が少なく、気相がやや大きいことから、砂質土でやや密に詰まっている状態を反映しているといえる。

土壌の受食性について、今回採取した表層土の土壌の耐食性の評価として、過酸化水素水とヘキサメタリン酸ソーダによって完全分散試料と水のみ分散試料で行っ

た。粒度試験および土壌水分などから土壌の分散率および侵食率(土壌物理性測定法委員会編, 1972)を求めて、その結果を図-9にまとめた。この図には、ソングクラ湖岸付近の水田土壌や湖底に堆積した土壌も採取し、比較のため加えた。

図からみてゴム園の土壌は分散率や侵食率が高く侵食を受けやすい土壌と判断される。ゴム園では強い降雨強度と土地利用形態からみて土壌侵食が激しいものと予想される。一方、湖岸から採取した土壌のほとんどが耐食性の土壌である。これは河川の下流部での堆積土であり、粘質土のため分散しにくく、耐食性を呈したものである。

2) USLE式による土壌侵食量の予測

土壌侵食予測式として、現在世界の各地でUSLE式(Universal Soil Loss Equation)が用いられている。平

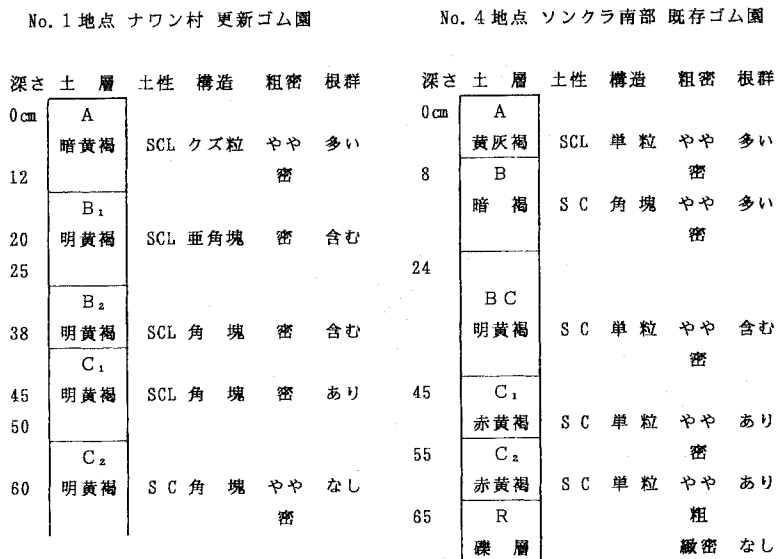


図-8 土壌断面 (No. 1, No. 4)  
Fig. 8 Soil profile.

表-3 土壌の基本的物理性

Table 3 Physical properties of soils

試料土層	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	自然含水比 (%)	間隙率 (%)	透水係数 (cm/s)	粗間隙率 (pF 0~1.8) (%)	三相割合 (%)		
						固相	液相	気相
No. 1 A	1.34	14.0	50.4	1.8×10 <sup>-2</sup>	15.4	49.6	18.7	31.7
B <sub>1</sub>	1.42	18.1	47.4	7.2×10 <sup>-3</sup>	11.8	52.6	25.7	21.7
B <sub>2</sub>	1.41	19.4	47.8	1.4×10 <sup>-2</sup>	11.8	52.2	27.4	20.4
C <sub>1</sub>	1.37	20.0	49.3	4.3×10 <sup>-3</sup>	11.6	50.7	27.3	22.0
C <sub>2</sub>	1.50	20.8	44.4	5.7×10 <sup>-5</sup>	10.1	55.6	31.0	13.4
No. 4 A	1.48	14.0	45.2	1.4×10 <sup>-3</sup>	11.3	54.8	20.7	24.5
B	1.33	17.3	50.7	2.3×10 <sup>-3</sup>	14.9	49.3	22.9	27.8
BC	1.45	16.1	46.3	6.9×10 <sup>-4</sup>	13.4	53.7	23.3	23.0
C <sub>1</sub>	1.54	15.0	43.0	5.0×10 <sup>-4</sup>	11.7	57.0	22.9	20.1
C <sub>2</sub>	1.50	14.1	44.4	1.1×10 <sup>-3</sup>	12.9	55.6	21.2	23.2

均年土壌侵食量は、次式により求められる (Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1978)。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

ここで、A: 平均年土壌侵食量, R: 降雨因子, K: 土壌因子, L: 斜面長因子, S: 傾斜因子, C: 作物管理因子, P: 保全因子である。

各因子について、降雨因子はソンクラ流域の各地点での気象観測所のデータによる年間平均雨量、土壌因子は、27種類の土壌から土性、有機物量、浸水性、構造などを考慮して求めた値とし、斜面長と傾斜因子は、地形

図と等高線間隔を用いた。作物管理因子 (C) は土地利用別に表-4 に示す数値とし、各因子を図面上にオーバーレイさせて求めた。

各因子から求めた 1982 年と 1996 年の予測侵食量を表-5 に示す。

予測侵食量は 1982 年の 4.9 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> から 1996 年の 7.2 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> と 1.5 倍程度増加している。これは土地利用の変化に伴う作物管理因子の差異が影響しているためである。

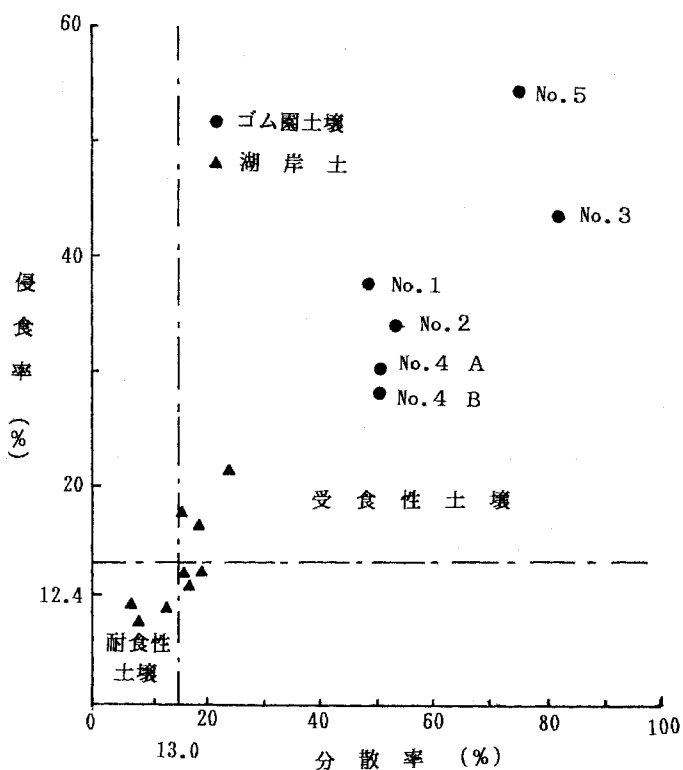


図-9 土壤の耐食性・受食性の判別

Fig. 9 Soil discrimination between non-erosive and erosive.

表-4 土地利用別のC値

Table 4 Crop factors for different land covers

土地利用	C値	土地利用	C値
森林	0.001	ゴム園	0.150
水田	0.028	果樹園	0.150
多年作物	0.200	その他	0.225
都市	0.450	裸地	0.800

## 6. 土地利用の変化と土壤侵食

### 1) 土地利用による土壤侵食の程度

土地利用と土壤侵食の関係について、近隣流域で過去に調査した結果を表-6に示す。土壤侵食程度は、山麓、丘陵に分布するゴム園に激しいようである。特に3~8年生のゴム園で侵食が大きいといえる。これは3~8年生のゴム園では、ゴムの採取が開始されつつあるが、インタークロップである果樹や畑作物および草生がなく、かつゴム樹の枝葉による被覆が少なく、雨滴が地表に直接当たり、土壤侵食が発生しやすいためである。

図-10によると、森林、果樹園などの農林地における土壤侵食段階は、「低い」ことが明らかであり、ゴム園、永年畑作物および裸地での侵食段階が「高い」傾向である。とくに、裸地における侵食段階が「高い」割合が大きい。

さらに丘陵部でのゴム園の造成地や錫鉱山の露天掘り帯では、土壤侵食が非常に激しいことがわかる。

一方、都市域においても激しい土壤侵食の状況を確認した。この原因は道路工事、宅地造成によるものであった。

### 2) 傾斜と土壤侵食

図-11によれば、傾斜が急になるに従って、土壤侵食段階が高くなる傾向が認められる。「中位」の侵食段階は、傾斜が8%を超えるとその割合が高まり、傾斜35%以上の土地では、「高い」侵食段階を示す面積割合が11%となり、急傾斜地で土壤侵食が激しいことを反映している。その一方、傾斜35%以上の土地でも「低い」侵食段階が65%も存在することが注目される。

急傾斜地でも侵食段階が低い土地が存在することは、森林などの地表被覆程度の高い場合での状況が推定され

表-5 予測された土壌侵食量

Table 5 Estimated soil erosion for 1982 and 1996

項目 侵食段階*	予測侵食量: 1982年				予測侵食量: 1996年			
	低い	中位	高い	計	低い	中位	高い	計
侵食土量 (1,000t)	995	1,866	775	3,636	1,100	2,586	1,654	5,340
面積 (1,000ha)	707.7	29.9	4.3	742.0	693.8	39.7	8.5	741.7
面積割合 (%)	95.4	4.0	0.6	100.0	93.5	5.3	1.2	100.0
平均値 ( $\text{t ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	1.4	62.4	180.4	4.9	1.6	65.2	194.0	7.2

\*: 侵食段階 ( $\text{t ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ ) は, 低い: 30 以下, 中位: 30~125, 高い: 125 以上である

表-6 土地利用と土壌侵食の関係

Table 6 Relationship between land use and soil erosion

土壌侵食程度	年間土壌侵食量	面積割合	土地利用区分
非常に低い	1~6 $\text{t ha}^{-1}$	47 %	森林, 水田
低い	6~31 $\text{t ha}^{-1}$	16 %	水田, 果樹園, R1, R3
中位	31~125 $\text{t ha}^{-1}$	26 %	R1, R3/R2
やや高い	125~625 $\text{t ha}^{-1}$	4.4%	R2
非常に高い	625 $\text{t ha}^{-1}$ 以上	2.7%	裸地, 錫鉱山

注) R1: ゴム園 1~3年, R2: ゴム園 3~8年, R3: ゴム園 8年以上

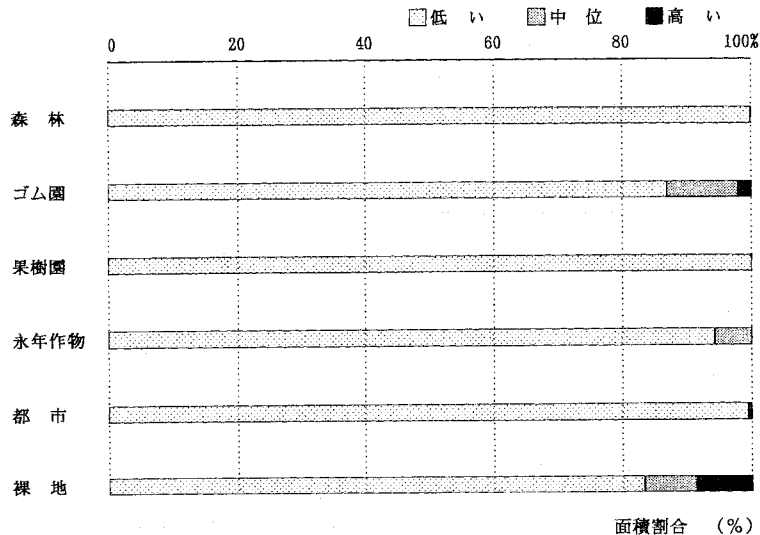


図-10 予測された土壌侵食量と土地利用の関係 (面積割合): 1996年

Fig. 10 Relationship between land use and estimated soil erosion for 1996.

る。その反面, 8~16%の緩傾斜地で, 「低い」侵食段階の割合が42%と各傾斜区分中で最も低い。これは, ゴム園や裸地ならびに都市的な開発によるためと推察される。

### 3) 土地利用からみた土壌侵食対策

ゴム園は現在でも傾斜地の森林に向かって拡大している。ゴム園への開墾や更新によって, 地表とくに裸地状態, すなわち被覆度が減少すると土壌侵食の危険性が高



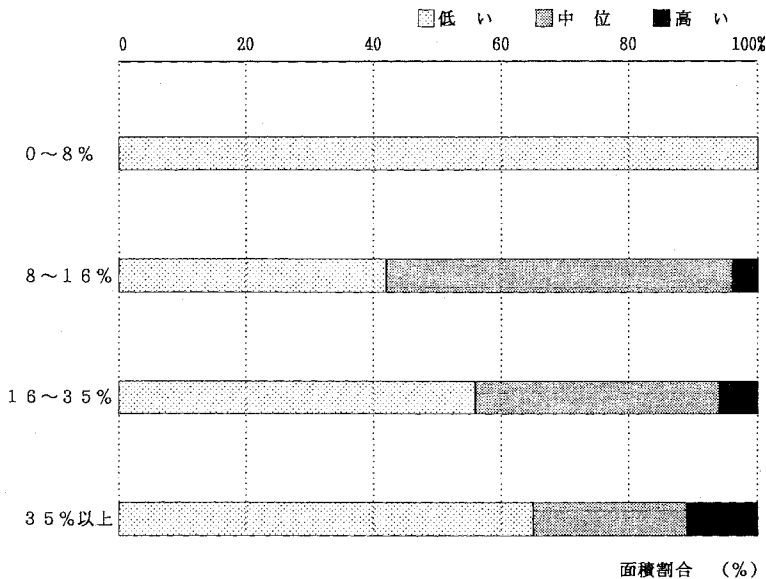


図-11 予測された土壤侵食量と傾斜の関係 (1996年)

Fig. 11 Relationship between slope steepness and estimated soil erosion.

まる。

前述したようにゴム園において10年生以上のゴムの木が多い場合には、枝葉による被覆度が増加し、農地保全からみて安定しているが、ゴム園の更新時に土壤侵食が問題となりやすい。

森林は土壤侵食からみて比較的安定している土地利用である。しかし、山麓・丘陵地域ではゴム園の開発および更新による土壤侵食程度がその土壌の受食性と合わせて激しいことが実態である。これらの流域からの流亡土壌は、懸濁状態で河川を流下し、最下流のソククラ湖に流入して沈殿する。

土壤侵食を防ぐためには、ゴム園に対して、牧草、落花生など被覆性の高い作物を間作栽培する必要がある。すなわち、インタークロップ、アグロフォレストリー的な土地利用による裸地期間の減少を採用すべきである(安富六郎, 1995)。

また、ゴム園の畝方向が等高線に直角方向すなわち傾斜方向に配置されていることについて、畝間が排水路としての機能を果たしているものと思われるが、土壤侵食対応からみて畝方向が横と縦でどちらが適切であるかについての検討が必要である。

### 7. ま と め

調査対象地であるタイ南部のソククラ湖流域は、近年ゴム園の造成が森林を中心に急速に進み、流域の土壤侵食が調和ある自然生態系のバランスから問題となりつつ

ある。そのため、土壤侵食の予測を推定したところ以下のような結果が得られた。

- (1) ソククラ湖流域の予測侵食量は1982年の $4.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ から1996年の $7.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と1.5倍程度増加している。これは土地利用の変化に伴う作物管理因子が影響しているためである。
- (2) 土地利用と土壤侵食程度はゴム園および裸地で激しく、永年作物畑でも一部多い傾向である。近年ゴム園の拡大、森林の減少が顕著であり、土壤侵食の増加につながっている。
- (3) 土地の傾斜が急なほど土壤侵食が増すが、急傾斜地でも土壤侵食程度の低い場合がある。これは地表の被覆程度と関係があり、保全的管理により侵食を防げるものと思われる。
- (4) ゴム園の成園時における下草の適度な管理方法の確立が必要である。下草が少なくと土壤侵食となり、多すぎるとゴム園の収穫などの管理作業上の問題がある。
- (5) ゴム園において10年生以上のゴムの木が多い場合には、農地保全からみて安定しているが、ゴム園の更新時における土壤侵食が問題となりやすい。その対策としてのインタークロップ、アグロフォレストリー的な土地利用による裸地期間の減少を採用すべきである。
- (6) 都市地域での道路・河川工事や土地造成および露天堀の錫鉱山では激しい土壤侵食が生じている。このような工事中の土壤侵食防止対策として沈砂池の機能を有する施設の設置および排水対策が必要である。

本調査研究は、日本学術振興会による拠点大学方式による農学分野でのタイ国との共同研究の成果の一部である。本誌を借りて日本学術振興会にはお礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- Center for Agricultural Statistics Office (1995) : Agricultural Statistics of Thailand Crop Year 1994/95, Agricultural Economics Ministry of Agriculture & Co-operatives.
- Charupatt, T. (1996) : Application of Remote Sensing in Monitoring of Tropical Forest. Tropical Forestry in the 21 Century. Vol. 9. FORTROP'96 International Conference.
- 土壌物理性測定法委員会編 (1972) : 第9章土壌保全, 土壌物理性測定法, 養賢堂 : 426~429.
- 久馬一剛 (1999) : アジアの畑作と土壌物理研究, 土壌の物理性, 81 : 3~4.
- NESDB and NEB (1985) : Songkla Lake Basin Planning Study. Final Report. Vol. 2. Main Report. John Taylor and Sons : 349.
- Royal Forest Department (1998) : Forestry Statics. Data Center, Information Office.
- 安富六郎 (1995) : 第8章サステナブルな土地利用計画, 環境土地利用論, 農文協 : 200~224.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) : Predicting rainfall erosion losses : A Guide to Conservation Planning. USDA Agricultural Handbook No. 537 : 57.

受稿年月日 : 1999年7月13日  
受理年月日 : 1999年12月15日

## 長期間にわたる有機物施用およびロータリー耕耘の有無が 作土の理化学性ならびに作物収量に及ぼす影響

加藤哲郎\*・長谷川 功\*\*・米田和夫\*\*

Effects of Long-Term Application of Organic Matter and Rotary Tilling on  
Physico-Chemical Properties of Surface Soil and Crops Yields

Tetsuo KATO<sup>1</sup>·Isao HASEGAWA<sup>2</sup> and Kazuo YONEDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Metropolitan Tokyo Agricultural Experiment Station, Tachikawa, Tokyo

<sup>2</sup> College of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa

### Summary

In the field of *Kuroboku* soil with humus top layer (Komekamito) at the Metropolitan Tokyo Agricultural Experiment Station (Tachikawa City) we investigated, in connection with the continuous application of organic matter, the effects of rotary tilling over a period of 20 years on the physico-chemical properties of surface soil and on crop yields. The results showed that the total carbon and total nitrogen contents of soil increased with the application of organic matter, but the rate of increase was smaller in tilling plot. In the plot where chemical fertilizers were continuously used, we found no effect of tilling on T-C and T-N. Available soil moisture content tended to decrease gradually over 20 years especially, the gaseous phase ratio at pF 1.5 tended to increase gradually, however, we observed a trend, as the years passed, that there were decreasing differences among the plots. Mineral nutrient content of the soil hardly differed between tilled and untilled soil, but it increased greatly in the plots where organic matter has been used repeatedly. Similarly to T-N of soil, available P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> increased with the continuous use of organic matter, but the rate of increase was lower in the tilled than in the untilled plot.

Rotary tilling had little effect on the yields of cabbage and radish, though they were slightly higher with the continuous use of organic matter and the practice of rotary tilling. Even when chemical fertilizer alone was used, yields were higher when tilling was employed. Rotary tilling did not decrease crop yields.

However, we noticed the formation of furrow pan due to rotary tilling, a tendency that was especially strong when only chemical fertilizers were used. Therefore 20 years of crop cultivation had no impact on the yields of cabbage and radish, but soil management that does not allow the formation of furrow pan is necessary, and for that reason the application of organic matter is important.

**Key words** : crop yields, *Kuroboku* soil, long-term application of organic matter, physico-chemical properties of soil, rotary tilling

## 1. はじめに

わが国の農業に大型農業機械が一般的に使われるようになって久しい。特に、耕耘は多くの時間を要する作業の一つであり、畜力による耕耘から小型ティラーによる機械力に、さらにはその主力がトラクター型ロータリー耕へと変遷してきた。

ロータリー耕は攪拌であり、土塊は細粉碎され、耕起層内は膨軟で比較的均一に整地される。しかし土層が反転・混入し、耕深の深いブラウ耕と比べると、耕深が浅く、トラクター車輪の走行による踏圧層の形成などの問題が指摘され、時々ブラウ耕を導入することが指導されている（農水省農産課，1996；土壌保全全国協議会，1991；東京都農試，1978）。

しかしながら、農耕地の区画面積が比較的小さいわが国では、大型機械のブラウ耕よりは、小型で回転半径が小さく、しかも廉価なロータリー耕がまだまだ主力となっているのが現状である。

作付け回数が多い露地野菜畑では、年間に平均3~4回以上のロータリー耕が行われており、過度のロータリー耕による土壌の緻密化や強固な耕盤の形成が指摘されるようになってきた。ロータリー耕による土壌の変化やそれによる耕作体系の中で作物生産に及ぼす影響について長期的な科学的なデータを得、それをもとに判断すべきであると考えられる。

一方、土壌への有機物の施用、特に連用は土壌の腐植分を増加させ土壌の団粒化や膨軟化を進めたり、保水力を高めるなど、土壌物理性を向上させること、および陽イオン交換容量や三要素、微量元素を増加させ、土壌の化学性をも向上させることが多くの研究によって報告されている（農水省農産課，1996；農水省農産課・土肥学会，1991；東京都農試，1978）ことから、ロータリー耕耘の欠点を補うために有機物の連用を図ることが重要であると考えられる。

特に、耕地の区画面積が小さい東京都の野菜畑では、ロータリー耕耘が主力である。本研究は、今後の土壌管理や土壌物理性への対策の基礎的知見を得て、良好な農作物生産を行うことを目的として、長期間にわたるロータリー耕耘が黒ボク土の作土の理化学性と作物収量に及ぼす影響について、有機物の連用との関係から検討したものである。

## 2. 試験方法

東京都農業試験場（立川市）内の表層腐植質黒ボク土（米神統）の圃場に化学肥料・ロータリー耕耘区（以下、（化+耕）区と略記）、化学肥料・ロータリー不耕耘区

（（化+不耕）区）、有機物施用・ロータリー耕耘区（（有+耕）区）および有機物施用・ロータリー不耕耘区（（有+不耕）区）の4試験区を設けた。ロータリー耕耘は年間3回実施した。時期は春作直前と春作と秋作の間と秋作の後とした。またロータリー不耕耘は施肥時に浅く（10~15 cm）鋤起こしを行う以外、ロータリーによる耕耘は行わずに栽培した。一方、施肥は化学肥料施用区では、窒素（N）、リン酸（ $P_2O_5$ ）、加里（ $K_2O$ ）として、1 ha 当たり各区 240, 170, 170 kg を用いた。具体的な化学肥料は、硫安、過石、硫加を施用した。有機物施用区は、バーク堆肥を用い、その堆肥の分析を行い、不足分を追加して1 ha 当たり成分で N 240 kg,  $P_2O_5$  170 kg とした。 $P_2O_5$  として化学肥料と同量（170 kg）となるようにバーク堆肥を施し、不足する N は硫安を用いて補足した。 $K_2O$  については、堆肥中の  $P_2O_5$  より  $K_2O$  がわずかに多い（表-1）ため、化学肥料施用区と同量に合わせることができにくいので調整は行わなかった。なお、堆肥の分析データがない年は、保存してあった前年または前々年の堆肥を使用しており、施肥設計もそのときのデータに基づいて行った。また、石灰資材としては、苦土入り炭酸カルシウム（苦土石灰）を年度により、0~2,000 kg/ha の間で各区同量ずつ施用した。施用は年1回春作植え付けの耕耘前に全面に行った。

作物の栽培は、春作として5月上・中旬定植、6月下旬~7月上旬に収穫のキャベツ（品種：YR 錦秋 152）を、秋作としては9月上旬播種、12月上~中旬収穫のダイコン（品種：都大根）を東京都における慣行法で栽培し、その生育と収量の変化を調査した。

また、土壌の化学性の測定には、毎年キャベツおよびダイコンの収穫直後に各区から作土に相当する0~20 cm の間から土壌を採取し、土壌養分の分析用とした。圃場から採取した生土は、常温の日陰で約1ヶ月以上風乾後、粗大有機物や礫、ビニール片などのゴミを取り除いたあと、乳鉢で粉碎後2 mm の篩を通したものを供試した。CN 分析およびリン酸については、さらに微粉碎して分析に供した。土壌の分析は、すべて2連で行い平均化した。両者に5%以上の差が生じた場合は、再度2連で分析を行った。土壌の全炭素（T-C）および全窒素（T-N）はC/N コーダー（柳本製、ヤナコ MT-500）（土壌養分測定法委員会，1970 d）によって測定した。pH は定法（土壌養分測定法委員会，1970 a）により、1時間振とう後、pH メーター（DKK 製）で、電気伝導度（EC）は土壌：水=1：5 で1時間振とう後、EC メーター（DKK 製）で測定した（土壌養分測定法委員会，1970 c）。陽イオン交換容量（CEC）はセミクロ・ショーレンベルガー法（pH 7, 1 N 酢酸アンモニウム液抽出；pH 7,

表 1 供試した堆肥中の養分分析

Table 1 Chemical analyses of elements value in applied composts

Year	N ( $10^{-2}$ kg/kg)	P ( $10^{-2}$ kg/kg)	K ( $10^{-2}$ kg/kg)	Ca ( $10^{-2}$ kg/kg)	Mg ( $10^{-2}$ kg/kg)
1976	2.14	1.29	2.08	3.02	1.06
1977	— <sup>a)</sup>	—	—	—	—
1978	—	—	—	—	—
1979	2.73	1.93	2.20	2.72	0.78
1980	2.67	1.70	1.09	2.67	1.08
1981	2.60	1.66	1.49	3.02	0.77
1982	—	—	—	—	—
1983	3.27	1.60	1.20	3.50	0.82
1984	2.62	1.05	2.90	2.05	1.03
1985	3.04	1.32	1.79	3.45	0.86
1986	2.86	1.23	1.55	3.51	1.01
1987	2.90	1.42	2.21	3.31	1.17
1988	3.19	1.38	1.87	3.14	0.83
1989	2.71	1.15	2.00	1.89	1.11
1990	2.43	1.37	1.26	2.47	0.96
1991	3.12	1.25	1.94	3.01	1.04
1992	3.05	2.69	2.19	4.97	0.94
1993	—	—	—	—	—
1994	2.64	1.72	2.33	2.82	0.64
1995	—	—	—	—	—
1996	2.91	2.09	1.37	3.52	0.72

<sup>a)</sup>: 保存してあった前年または前々年の堆肥を使用した。

80% エタノール洗浄、1N 塩化ナトリウム液抽出) およびホルモル法 (0.1N 水酸化ナトリウム液滴定) で行った (土壤養分測定法委員会, 1970 b)。交換性陽イオン (CaO, MgO, K<sub>2</sub>O) はセミマイクロ・ショーレンベルガー法による抽出液を原子吸光法 (日立製, Z-4000) によって分析した (土壤養分測定法委員会, 1970 b, f, g)。可給態 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> はトルオーグリーン酸抽出液を比色法 (島津製, UV-1100 分光光度計) によって測定した (土壤養分測定法委員会, 1970 e)。

堆肥の成分測定には、試料採取後常温の日陰で約 1 ヶ月以上風乾後、粗大有機物や礫、ビニール片などのゴミを取り除いたあと、粉碎機で微粉碎して分析に供試した。供試した堆肥の分析はすべて 2 連で行い平均化した。両者に 5% 以上の差が生じた場合は、再度 2 連で分析を行った。堆肥の T-C および T-N は C/N コーダーによって測定した。陽イオン (T-Ca, T-Mg, T-K) および全リン (T-P) は硝酸・過塩素酸分解した液を用いた。その後、陽イオンは分解液の一部を原子吸光法によって分析した。T-P は同じく分解液の一部を比色法によって測定した。

一方、土壌の物理性の測定は以下の通りである。三相

分布は圃場の表層部 (5~10 cm) から採土管を用いて 3 連で試料を採取し、実験室内で実容積測定法によって測定した (土壤物理性測定法委員会, 1972 a)。有効水分含量は三相分布を測定した同じ試料を採土管のまま用いて土柱法と加圧板法を組み合わせた方法で、さらに圃場における pF 1.5 の気相率は土柱法と実容積測定法を組み合わせた方法で測定した。pF 4.2 の体積含水率は遠心法 (土壤物理性測定法委員会, 1972 b) によった。また、最終年には土壤硬度を貫入式硬度計 (大起製) によって連続測定した。

なお、本実験は 1976 年 (昭和 51 年) から 1996 年 (平成 8 年) までの 21 年間にわたって実施したものである。1976 年 (昭和 51 年) は予備年とし、データは翌年からのものを使用して、20 年間分をとりまとめた。

### 3. 結果および考察

図-1 と図-2 に、20 年間の間における土壌中の T-C および T-N 含量の推移を示した。図に示されるように、化学肥料のみを施用した区の T-C 含量はロータリー耕耘の有無にかかわらずほとんど変化しない、もしくは微減する傾向がみられた。一方有機物施用区では顕著に増

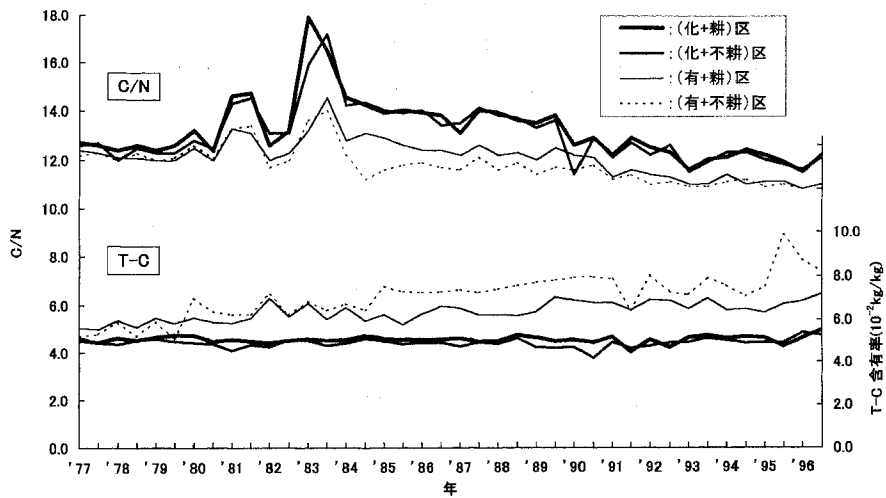


図-1 土壌の全炭素含量および C/N 比の経時変化

Fig. 1 Change in total carbon content and C/N ratio of soil.

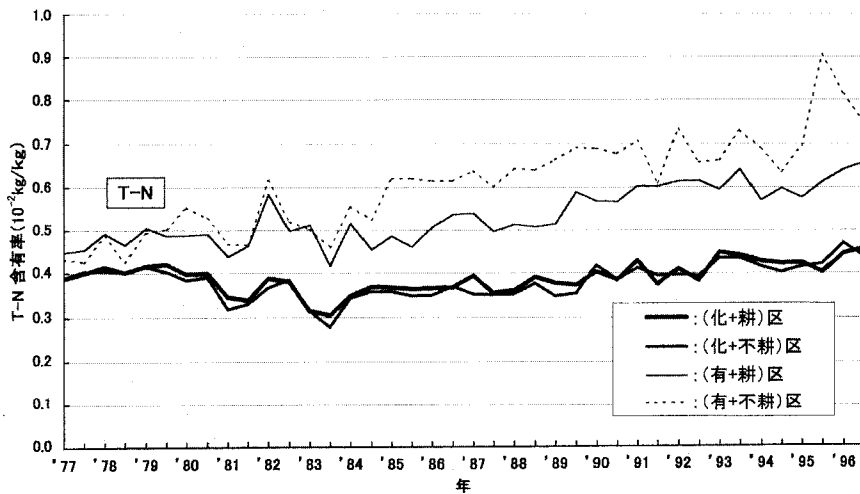


図-2 土壌の全窒素含量の変化

Fig. 2 Change in total nitrogen content of soil.

加し、その T-C 含量が開始時  $5 \times 10^{-2}$  kg/kg 程度であったのが、20 年間の間に約  $7 \times 10^{-2}$  kg/kg となった。ロータリー耕耘の有無による差異は、試験開始した 1977 年から 2 年間ほどは、ほとんど差がみられなかったが、それ以降になるとロータリー耕耘の有無によって差異がみられ、不耕耘区の方が高い含量となった。これは耕耘によって、土壌が好氣的条件となり、土壌微生物によって有機物の分解が大きくなったものと考えられる。土壌中の T-N 含量についても、ほぼ同様の傾向がみられ、化学肥料施用区ではほとんど一定であったが、有機物を

連用すると、土壌中の T-N 含量が次第に増加し、中でもロータリー耕耘区よりも不耕耘区の方が若干高い傾向が示された。不耕耘区より耕耘した方が T-N 含量は低いことは、T-C 含量と同様に有機態 N の無機化が耕起による好気条件下で促進され、さらに硝化の進行によって溶脱が多くなったことに関連するものと推測した。

こうした土壌有機物含量の推移ともなって、土壌の理化学的性質の変化がどのように推移するかを検討した。図-3 は pF 0, pF 1.5, pF 2.7, pF 4.2 の体積含水率を示したものである。測定を開始した 1979 年から 10 年ほ

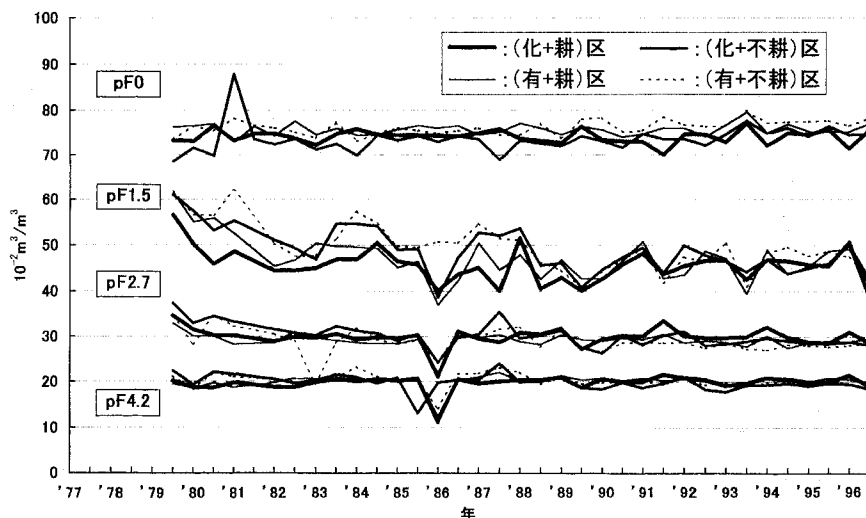


図-3 pF ごとの水分含量の変化

Fig. 3 Change in moisture content by various pF.

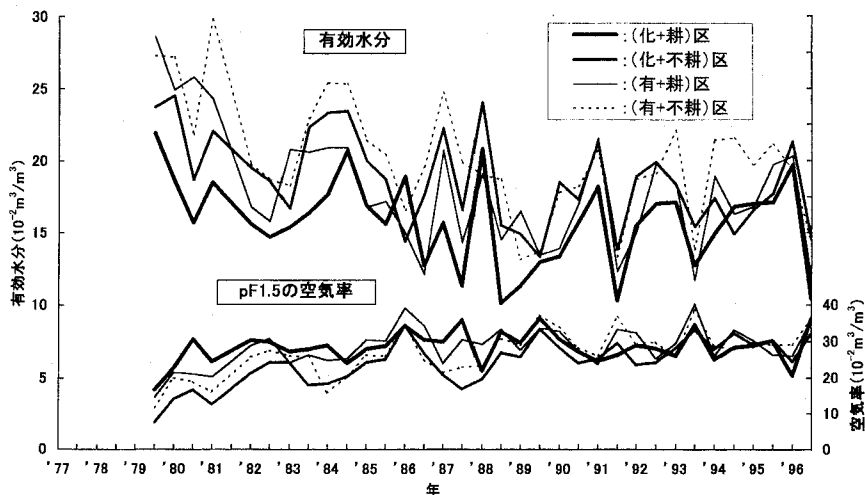


図-4 土壌の有効水分と空気率の変化

Fig. 4 Change in available moisture content and gaseous phase of soil.

どはばらつきが大きかったが、12~13年経過後からは比較的安定してきた。pF 4.2の値は各区でほとんど差がみられなくなり、pF 0やpF 1.5では有機物を施用した区で体積含水率が高くなる傾向であった。このことはpF 1.5とpF 2.7の差で示される有効水分にも関係していたものと考えられた。図-4は土壌の有効水分含量の変化を示したものであるが、(化+耕)区が最も低く推移し、(化+不耕)区と(有+耕)区ではほとんど大差がなく、(有+不耕)区は若干高く推移した。一方逆にpF 1.5における気相率(図-4)は、試験開始時から数年の間は不

耕耘区が低くロータリー耕耘区が大きい傾向で推移したが、測定開始後約10年を経た1989年頃からは全区間の間で差が著しく小さくなった。そして開始時に比べ、全区とも20年間で土壌の有効水分含量は次第に少なくなり、逆にpF 1.5の気相率は次第に高まる傾向がみられた。この有効水分の減少と気相率の増加は、三相分布の推移とも比較的良く対応しており(図-5)、気相が漸次増加し、液相は若干減少していた。化学肥料を連用し、ロータリー耕耘を続けると、保水性が小さくなることを意味するものと考えられる。

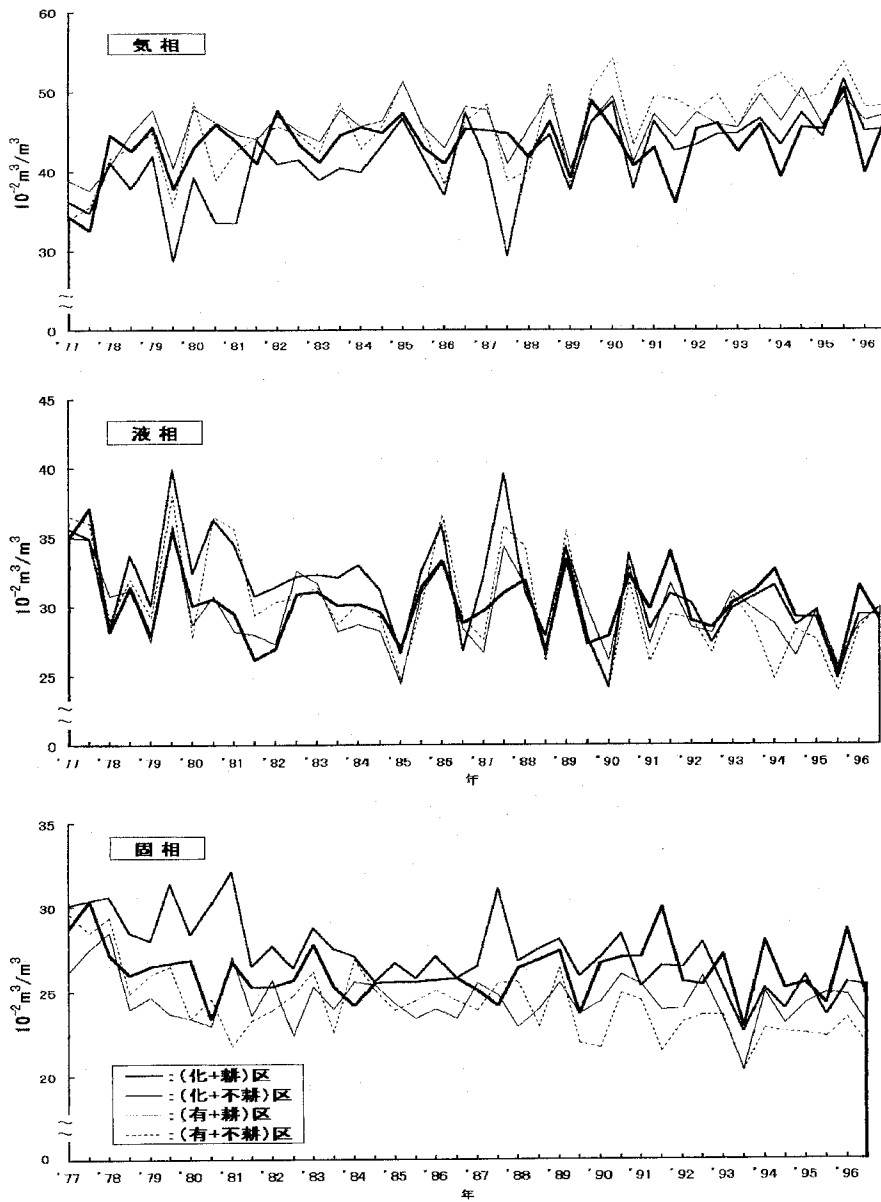


図-5 土壌の三相分布の変化

Fig. 5 Change in three-phase distribution of soil.

土壌有機物の増加にともなう CEC の変化をみると、明らかに有機物施用の有無によって異なり、有機物の連用によって CEC が次第に増加することが示された。しかもロータリー耕耘の有無で比較すると、耕耘区がやや低い傾向が示された。このことは土壌の T-C 含量の推移とよく一致しており、CEC の増大はこの増加が一因していることが示唆される。また塩基飽和度は CEC と同じような動きをしており、有機物を施用した CEC の

高い区で高くなっていた (図-6)。有機物からの塩基類供給と保肥力が大きいことから溶脱を抑えたことが要因と考えられた。なお、耕耘による影響は小さかった。

図-7~図-9 に、交換性 CaO, MgO および  $\text{K}_2\text{O}$  含量の推移を示した。CaO, MgO を含む苦土石灰は年度によって施用量が異なることもあり、交換性塩基類のうち、特に CaO, MgO は測定年次による変動がかなり大きい。有機物の連用区では明らかに塩基含量が高く推移してお



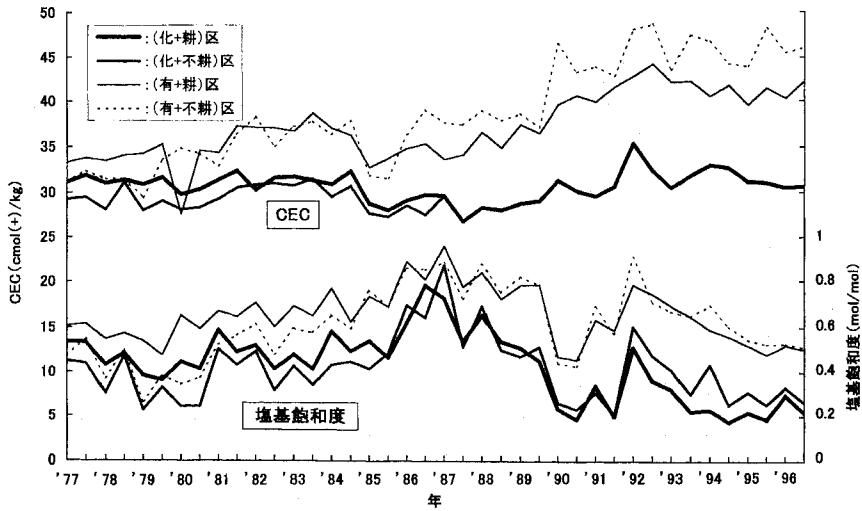


図-6 土壌の陽イオン交換量 (CEC) と塩基飽和度の変化

Fig. 6 Change in the cation exchange capacity (CEC) and case saturation of soil.

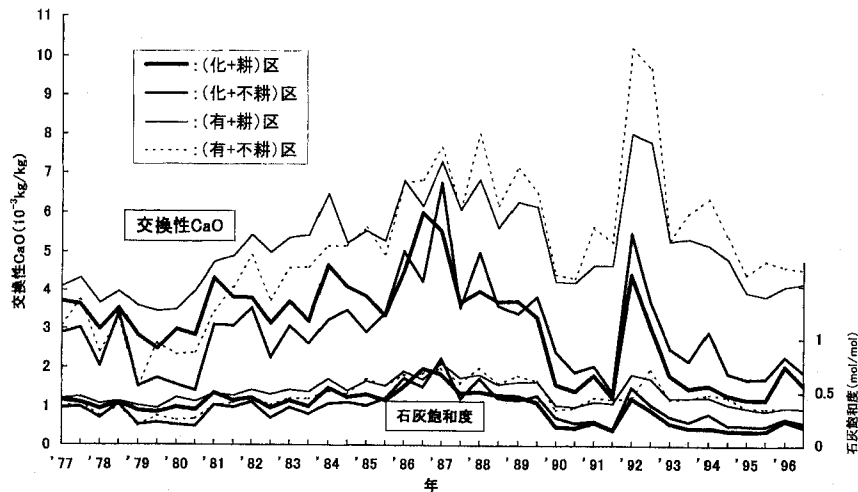


図-7 土壌の交換性 CaO と石灰飽和度の変化

Fig. 7 Change in exchangeable CaO content and lime saturation of soil.

り、最も MgO で、次いで CaO でその差が顕著であった。しかしロータリー耕耘の有無による交換性塩基含量の差異はほとんど認められなかった。石灰飽和度も塩基飽和度と似た傾向にあり、CEC や交換性 CaO の高い有機物施用の区で高くなっていた (図-7)。一方、土壌 pH は、化学肥料施用区がやや低く推移し、しかも開始時から比べると次第に低下する傾向にあった (図-10)。このことは化学肥料区の T-N 含量が低いことなどを考慮すると、塩基の溶脱が起こっていることを示唆するものと

考える。それに対し有機物連用区は比較的高く推移し、しかも開始時とほとんど同じレベルが維持されていた。ロータリー耕耘の有無が pH の推移に及ぼす影響はほとんどみられなかった。毎年、作物収穫直後に採取した土壌の EC (図-10) の値は、化学肥料施用区で若干大きく、有機物連用区は低い傾向がみられたが、それほど大きな差異は各区間ではみられなかった。

土壌中の可給態  $P_2O_5$  含量の推移をみれば、(有+不耕)区は顕著に可給態  $P_2O_5$  含量が増加し、次いで(有+

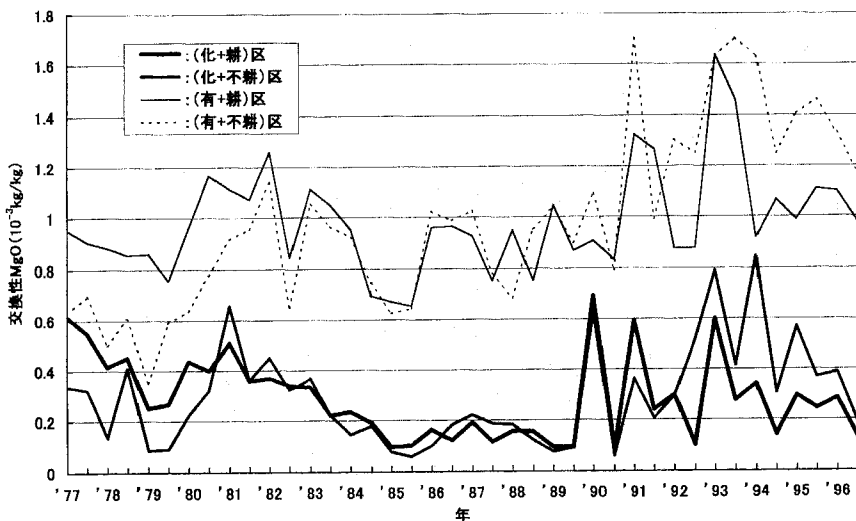


図-8 土壌の交換性 MgO の変化

Fig. 8 Change in exchangeable MgO content of soil.

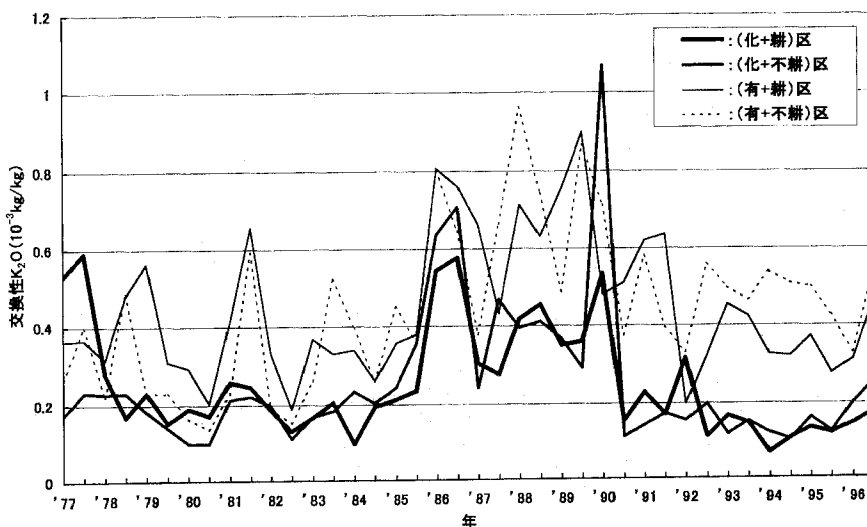


図-9 土壌の交換性 K<sub>2</sub>O の変化

Fig. 9 Change in exchangeable K<sub>2</sub>O content of soil.

耕) 区も次第に増加したが、不耕耘区より少なかった(図-11)。(化+耕)区は試験開始時から数年間は増加したが、その後はほとんど変化なく推移した。(化+不耕)区はそれよりも若干高いものはほぼ同じレベルで推移した。また(有+不耕)区に比べ、(有+耕)区で可給態 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> が少なかったのは、耕耘による好気的な条件の付加によって、有機物の分解が促進され、有機物中の P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> が可溶化し、吸収されたり、土壌に固定されることに起因

するものと考えられる。

20 年間にわたる有機物施用およびロータリー耕耘の有無が土壌の理化学性におよぼす影響を検討した結果、有機物の連用は土壌の理化学的な性質に大きく影響し、その肥沃度に関連する要因を大きく増大させた。

最終年に層位別の土壌硬度を測定したが(図-12)、(化+耕)区は深さ 20 cm 位に 12~15 cm の硬い耕盤層ができており、(化+不耕)区は深さ 12 cm 位に 5 cm 程度の

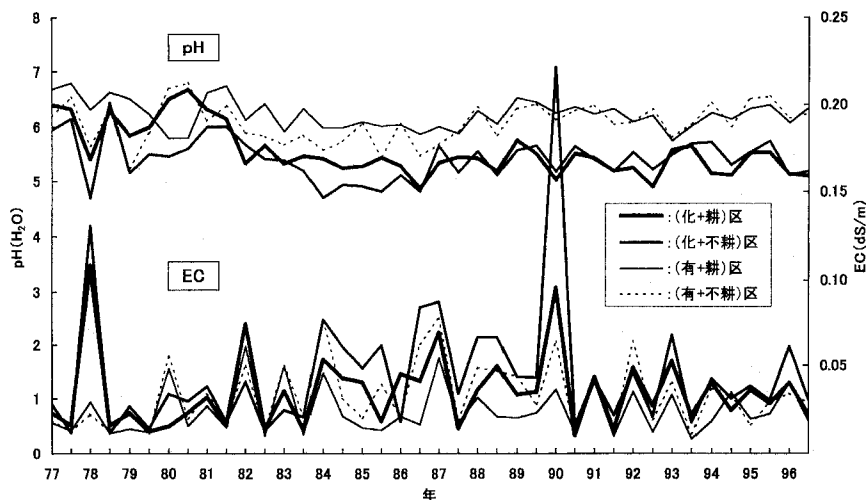


図-10 土壌の pH と EC の変化

Fig. 10 Change in pH and electric conductivity (EC) of soil.

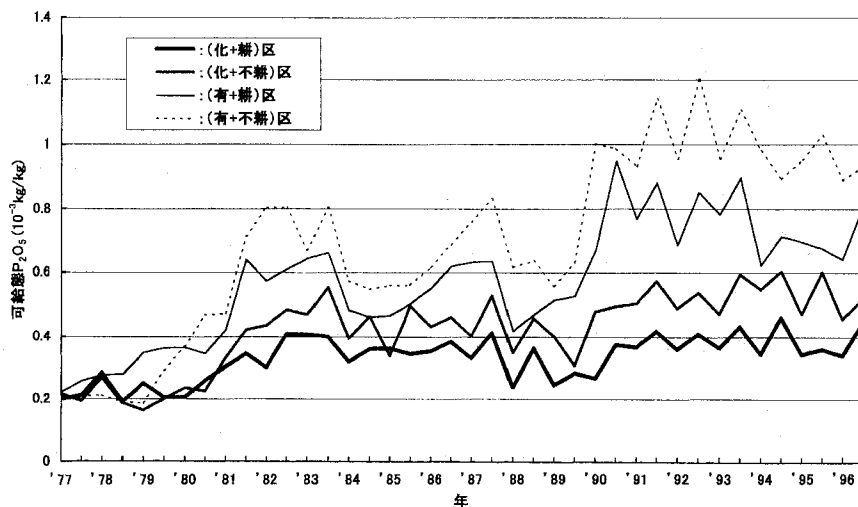


図-11 土壌の可給態 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量の変化

Fig. 11 Change in available P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content of soil.

薄くて弱い耕盤が、(有+耕)区には深さ 20 cm 位に 10 cm 程度の弱い耕盤の形成がみられた。(有+不耕)区には、このような耕盤はみられなかった。本研究を実施した表層腐植質黒ボク土での 20 年間では、不透水層となるほどの硬度ではなく、さほどの問題とはいえないが、今後これがさらに継続されることによって、水分の移動や根の伸長などの問題が生じる可能性は十分考えられるが、有機物の施用によって、土壌の膨軟性が増したものと推察される。

本研究では、ロータリー耕耘および不耕耘との組合

せで検討した結果、ロータリー耕耘は、土壌の理化学的な性状に対しては土壌有機物の分解を促し、その含量を低くすることで、T-N や P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量が低下することを誘因していることが示された。それはあくまでも不耕耘と比較しての場合であり、必ずしも地力低下要因をもたらしているとはいえなかった。

図-13 に、試験期間中におけるキャベツ結球重と横周囲の推移を示した。キャベツ結球重は、年度によって変動は大きかったが、全体的に年を経るごとに収量は上昇傾向にあった。キャベツ結球重の収量は 1977 年の試験

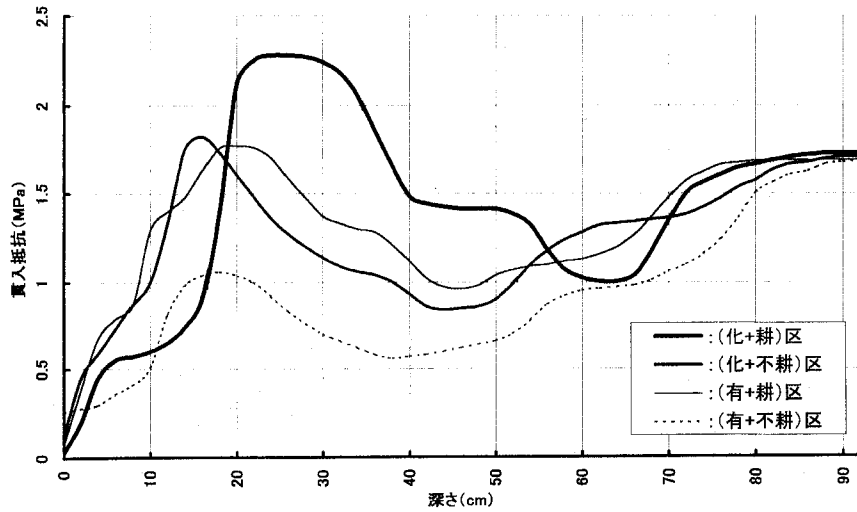


図-12 深さごとの土壌硬度（貫入抵抗）

Fig. 12 Soil hardness (resistance to penetration) at various depths.

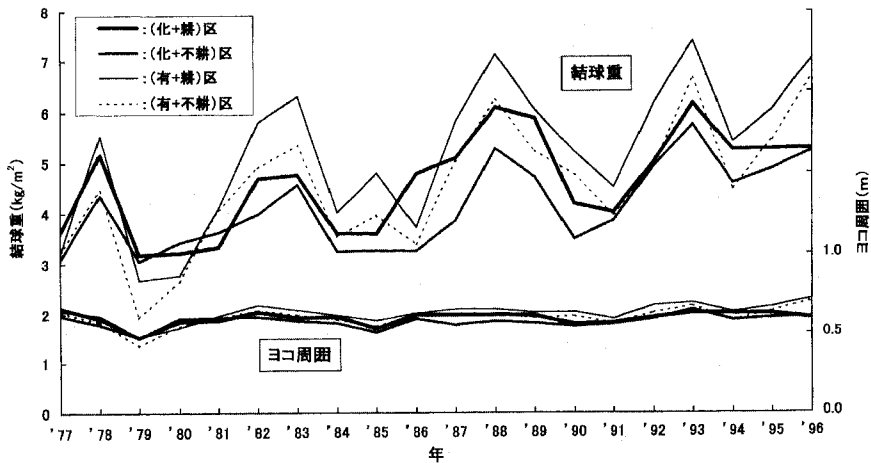


図-13 キャベツ結球部重と周囲長の変化

Fig. 13 Change in cabbage head weight and girth.

開始直後では、処理区間に大きな差はみられなかったが、1981年頃からは、その差が大きくなった。(化+不耕)区は各区の中で最も低く推移し、(化+耕)区はそれよりも高く推移していた。化学肥料単用においては、耕耘を行った方が20年の間では、収量は高く、ロータリー耕耘が収量だけに限れば、大きなマイナス要因とはなっていない。 (有+耕)区は試験開始から4年ほど経った1981年頃から最も高い収量を維持し続けた。(有+不耕)区は(有+耕)区よりは、収量は少なかったが、化学肥料だけの区よりはやや高い傾向がみられた。有機物

を施用した場合でも、ロータリー耕耘を行った方が、収量は高く、ロータリー耕耘による弊害はみられなかった。また、有機物を施用すれば、ロータリー耕耘を行わなくても十分な収量が得られることが認められた。キャベツの横周囲については、年度間および処理区間で、大きな差はなく、ほぼ一定していることが認められた。収量の増減があった場合でも、横周囲の変化は、キャベツ結球重の差ほどではなく、わずかであった。

図-14に、試験期間中におけるダイコン根重、葉重と根長の推移を示した。ダイコン根重はキャベツと同様、

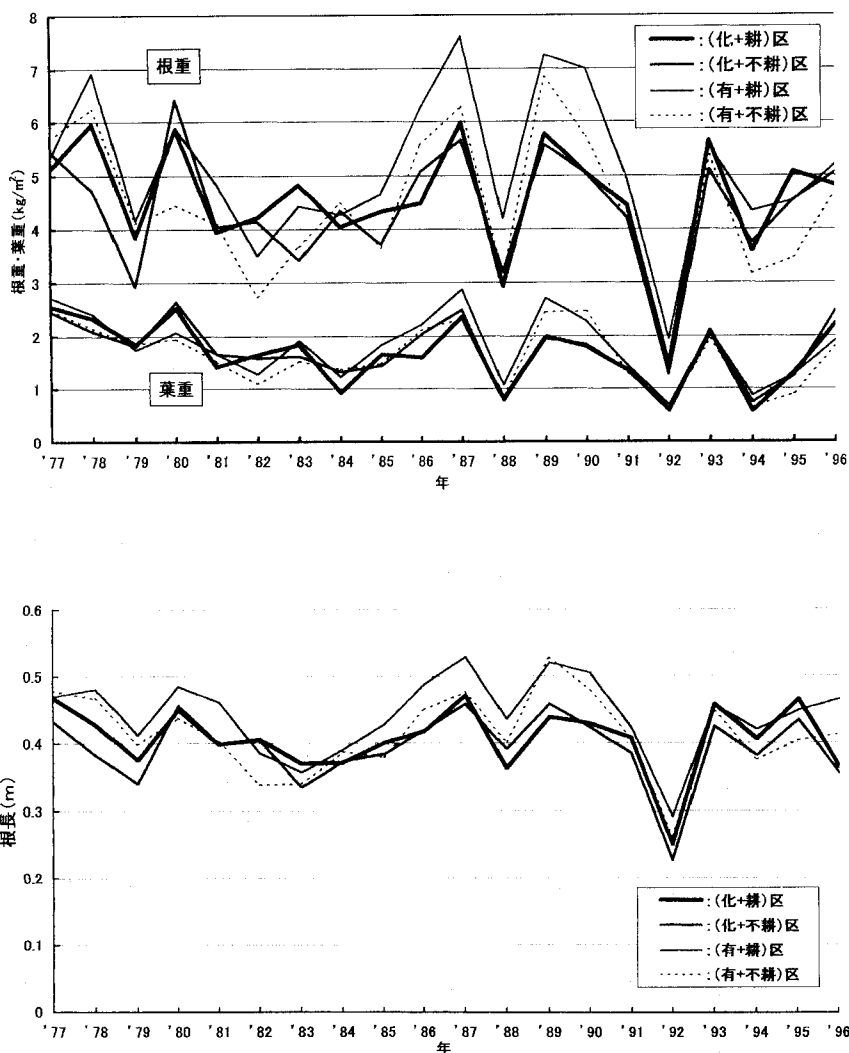


図-14 ダイコンの根重，葉重，根長の変化

Fig. 14 Change in radish root weight, leaf weight, and root length.

年度によって変動がみられたが、(有+耕)区が比較的高い傾向を示していた。特に、生育の良好な年度において、増収の差が大きかった。(化+不耕)区と(化+耕)区は、収量の低い年度が多かった。1987年や1992年は異常気象と病虫害の発生の多い年であったが、このような年では、処理区間の差は小さくなっていった。化学肥料施用では、ロータリー耕耘の有無は、収量には大きな影響を与えず、また有機物施用では明らかにロータリー耕耘を行った区で、収量が高いことからロータリー耕耘は腐植質の黒ボク土においては、土壌生産力を低下させているとはいえない結果であった。これらの傾向は、葉重や根長でもみられた。

#### 4. まとめ

東京都農業試験場内(立川市)の表層腐植質黒ボク土(米神統)の圃場で、20年間にわたるロータリー耕耘が作士の理化学性と作物収量に及ぼす影響について有機物の連用との関係で検討した。この結果、土壌中のT-C・T-N含量は有機物の施用で増加するが、耕耘の方がその増加量は小さかった。化学肥料の連用区では、耕耘の有無による差は認められなかった。土壌の有効水分含量は20年間の間に全区とも漸減する方向にあり、特に化学肥料だけで耕耘した場合もその傾向が強かった。またpF 1.5の気相率は全区とも漸増する傾向がみられた。し

かし、有機物の連用や耕耘の有無による区間差異は年数の経過とともに、小さくなる傾向がみられた。土壌の無機養分含量は、耕耘による差異がほとんどなく、有機物連用した区で顕著に増大した。T-Nと同様に可給態 $P_2O_5$ は有機物の連用で増大するが、不耕耘と比べ、耕耘区はそれよりも低く推移した。

キャベツとダイコンの収量の推移には、ロータリー耕耘の影響は少なく、有機物を連用し、ロータリー耕耘を行った方が20年間のうち、17回も最も高い収量を示した。また、化学肥料だけでもロータリー耕耘をした方の収量は高かった。収量だけから見れば、ロータリー耕耘によって生産力が低下したとはいえなかった。

しかし、ロータリー耕耘によって、耕盤の形成がみられており、特に化学肥料だけでその傾向が強かった。したがって、20年間の人為的な営農インパクトでは、キャベツやダイコンの収量に影響はなかったが、耕盤が形成されないような土壌管理が望ましく、それには有機物の施用は重要であると指摘できる。

### 引用文献

- 土壌物理性測定法委員会編 (1972 a) : 土壌物理性測定法, 土壌3相, 養賢堂, 東京, p. 1~52.
- 土壌物理性測定法委員会編 (1972 b) : 土壌物理性測定法, 土壌水分, 養賢堂, 東京, p. 134~159.
- 土壌保全調査事業全国協議会編 (1991 a) : 日本の耕地土壌の実態と対策, 博友社, 東京, p. 36~55.
- 土壌保全調査事業全国協議会編 (1991 b) : 日本の耕地土壌の実態と対策, 博友社, 東京, p. 75~96.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 a) : 土壌養分分析法, 酸度, 養賢堂, 東京, p. 29~32.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 b) : 土壌養分分析法, 塩基置換容量・全置換性塩基・塩基飽和度, 養賢堂, 東京, p. 33~44.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 c) : 土壌養分分析法, 塩類濃度, 養賢堂, 東京, p. 45~52.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 d) : 土壌養分分析法, 炭素, 養賢堂, 東京, p. 139~147.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 e) : 土壌養分分析法, りん酸, 養賢堂, 東京, p. 225~245.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 f) : 土壌養分分析法, カリウム, 養賢堂, 東京, p. 258~264.
- 土壌養分測定法委員会編 (1970 g) : 土壌養分分析法, カルシウム・マグネシウム, 養賢堂, 東京, p. 281~296.
- 農林水産省農産園芸局農産課監修 (1996 a) : 土壌改良と資材, 土壌保全調査事業全国協議会, 東京, p. 1~25.
- 農林水産省農産園芸局農産課監修 (1996 b) : 土壌改良と資材, 土壌保全調査事業全国協議会, 東京, p. 26~51.
- 東京都農業試験場 (1978 a) : 東京都農耕地土壌の基本的性格と生産力特性, 地力保全基本調査総合成績書, 東京, p. 1~32.
- 東京都農業試験場 (1978 b) : 東京都農耕地土壌の基本的性格と生産力特性, 地力保全基本調査総合成績書, 東京, p. 215~310.

受稿年月日: 1999年9月6日  
受理年月日: 2000年2月8日

## 黒ボク土畑の圃場容水量の実態

長谷川 周一\*

Field Capacity of a Volcanic Ash Soil—the real conditions

Shuichi HASEGAWA\*

National Institute of Agro-Environmental Sciences

### Abstract

Field capacity is a widely used concept for irrigation management, but its definition is still controversial. Field capacity has been recognized by soil physicists a process of free drainage and it can not be defined as an intrinsic properties of the soil. To investigate further the meaning of field capacity, soil water content to a depth of 1 m and matrix flow by Darcy's law at 1-m depth were measured and calculated every 30 minute for 1997 and 1998 at a maize-Chinese cabbage cropping field. Matric potential profiles with depth of a soybean field were also measured at a heavy rain event in 1991. The field soil is a well-drained volcanic ash soil. As the matrix flow is influenced by soil water content profiles during rain event and rainfall distribution pattern, the rain events whose amounts at the final day of consecutive rainy days were more than 10 mm/d, and brought the maximum values of matrix flow exceeding 5 mm/d at 1-m depth on the day following the rainfall were applied for discussing field capacity. When soil water conditions on the second day after the rainfall were applied as a field capacity, the matrix flow was 4 mm/d, and the hydraulic conductivity and the hydraulic gradient at 1-m depth were approximately  $1 \times 10^{-5}$  cm/s and 0.5, respectively. The amount of water stored to a depth of 1 m was 620 mm and the matric potential in the subsoil ranged between -50 to -100 cm. The matrix flow of 4 mm/d was very small compared to 620 mm water stored to a depth of 1 m. Although free drainage was still lasting on the second day after heavy rain events, the day can be applied as the field capacity for well-drained volcanic ash soils.

**Key words** : Field capacity, volcanic ash soil, free drainage, matrix flow, TDR

### 1. はじめに

圃場容水量は良く使われ、教科書にも必ずと言って良いほど出てくる用語であるが、畑で土壌水分量を実測して考察した例は多くない。その理由は、畑土層の土壌水分量を連続的に測定する良い方法が発達していなかったからである。TDR (Time Domain Reflectometry) は、従来の点の測定ではなく、2点を結ぶ線の平均水分を測定出来るという利点を持っている。そこで、本研究では、排水性の良い黒ボク土普通畑を対象に、主としてTDRを利用して、多量の降雨時の深さ1 mまでの土層水分量を連続測定するとともに、テンシオメータを併用して深

さ1 mの浸透流を連続的に推定することにより圃場容水量を考察した。

### 2. 圃場容水量についてのレビュー

圃場容水量 (field capacity) は1927年の第1回国際土壌学会 (現在の世界土壌科学会議) において、Veihmeyer & Hendricksonにより発表された。それは、"The amount of water held in the soil after the excess gravitational water has drained away and after the rate of downward movement of water has materially decreased, which usually takes place within 2 or 3 days (after a rain or an irrigation) in

pervious soils of uniform structure and texture.”というものであった (Veihmeyer & Hendrickson, 1931)。カッコ内は、同論文中に出てくる別の表現を挿入した。岩田 (1963) はこれを「排水が良好な均一な構造をもった土壌で、多量の降雨があった2~3日後、水の下降運動の割合が、非常に小さくなったときの土壌水分量」と訳している。Veihmeyer & Hendrickson は、2~3日後も排水は続くがその量は、彼らの実験結果によれば、植物の吸水量よりも小さかったと述べている。我が国では、岩田 (1963) により圃場容水量が排水過程の水移動という視点から考察された。岩田は、排水性の良い土壌に対して、「裸地状態であつ土面蒸発が抑制されている条件のもとで、植物の根が分布する深さに対応する土層から排水される水の量が、その時期の植物の蒸発散量以下になるときの水分状態」と定義した。論文の中では、蒸発散の値としては、 $7\text{ mm d}^{-1}$  と比較的大きな値を与えている。また、水移動の視点から、圃場容水量に対応する水分状態での動水勾配は  $1.0\sim 0.1$  の範囲内で、不飽和透水係数は  $10^{-6}\text{ cm s}^{-1}$  のオーダーであると指摘している。岩田とはほぼ同時期に圃場容水量を考察した竹中 (1969) は、現実の畑地では作物が栽培されており、蒸発散が進行しつつ重力による排水も進むと考え、圃場容水量を「根群域に対して下層から水分移行が開始されたときの水分状態」と定義した。しかし、砂丘地土壌では、この定義によると植物が水不足となるため、保水力の乏しい土壌では水の下方損失を含んだ段階で有効水分の上限界を考えざるを得ないと述べている。一方、椎名 (1963) は、圃場容水量を「実際の構造を持った土壌において、大量のかん水または降雨後、ほぼ平衡状態に達した水分を意味する」と規定した。また、均一層であれば大量のかん水または降雨後、24~72時間程度で表層から1m位までの土層から排除された後の水分状態であつて、マトリックポテンシャルは $-100\text{ cm}$  ( $\text{pF } 2.0$ ) 付近とした。土壌物理用語事典 (1974) では、圃場容水量を「多量の降雨もしくはかん水した1~2日後、水の下降移動量が非常に小さくなったときの水分量」と定義しており、Veihmeyer & Hendrickson と類似している。しかし、降雨後、水の下方浸透が非常に小さくなるのが、アメリカと日本では1日差が見られる。土壌物理用語事典ではまた、圃場容水量に対するマトリックポテンシャルは、土壌の種類によって多少異なるが、我が国の場合、大体 $-30\sim -100\text{ cm}$  ( $\text{pF } 1.5\sim 2.0$ ) の範囲にあると説明している。マトリックポテンシャルとの関連づけでは、 $-30\text{ cm}$  ( $\text{pF } 1.5$ ) や $-60\text{ cm}$  ( $\text{pF } 1.8$ ) を与えている例が多い (農林水産技術会議事務局, 1972)。

アメリカ農学会の用語集 (Glossary of Soil Science

Terms, 1996) では、圃場容水量を“The content of water, on a mass or volume basis, remaining in a soil 2 or 3 days after having been wetted with water and after free drainage is negligible.”と解説しており、Veihmeyer & Hendrickson の考えを踏襲している。しかし、Hillel (1980) は圃場容水量とは水の再配分過程であり、Veihmeyer & Hendrickson の定義する圃場容水量は存在せず、圃場容水量をマトリックポテンシャルで測定できないことを指摘している。また、Jury *et al.* (1991) はアメリカ農学会の定義は、粗粒土では実用上適用可能であるが、その他の土では、排水が長期にわたって続くため、圃場容水量の水分を与えることが出来ないと指摘している。また、マトリックポテンシャルで表すという考え方には、土層の水分保持が透水性と動水勾配によって変化するということを無視していると批判している。

圃場容水量は、土層から排水が生じている過程であつて、運動学的に定義しようとする、排水速度を規定しなければならず、排水速度が測定できなければ、圃場容水量を考察することは出来ない。さらに、多量の降雨後という場合、降雨パターンと降雨強度が降雨後の排水過程の水移動に影響を与えるが、この点は竹中により指摘されているが、余り議論されてこなかった。また、植物の根が分布する深さ (根群域) も概念的なものであり、議論はほとんどなされてこなかったようである。圃場容水量の実測は1960年代にテンシオメータを用いて行われたが、いくつかの測定データの積み上げ後は、不攪乱試料のマトリックポテンシャルで圃場容水量を決定し、代替するという考え方になってしまっている。結局、圃場容水量は排水が平衡化していく過程での水の動きであるという視点からの新たな知見は、この40年近く見られないようである。

### 3. 圃場容水量の対象とする土層深と今回の実験

対象とする土層の深さが浅いほど、降雨後の排水は早期に終了するため、深さは圃場容水量を考へるときに重要な要因となってくる。しかし、岩田 (1963) や竹中 (1969) が根群域を採用している他は、深さについてははっきりしていない。一般に、作物根長は土層の深さとともに急激に減少し、深い部位の根の蒸散に対する寄与は小さくなる。土層に十分水がある場合には、植物は浅い部位から優先的に吸水し、深部の根の寄与は少ない傾向にあり、根の吸水率は輪によっても異なる。したがって、根群域という概念はあつても、それを数値化することは難しい。そこで、今回は後述する試験畑において以下のことを考慮し、深さ1mを対象として圃場容水量を



考えることにした。

- ① 地下水位が1mより浅くなることは数年に1回しかないこと
- ② 土壌水分の変動領域が不飽和透水係数の測定しやすい湿潤状態にあること
- ③ ダイズの根は深さ80cmにおいても認められたこと
- ④ 掘削や測定センサー埋設等の作業のしやすい深さであること

ここで、①は降雨により、対象とする深さより地下水面が上部にくると、排水性の良い土壌という条件が満たされないためであり、②は浸透流の推定が可能という前提条件による。

#### 4. 実験方法

土壌水分およびマトリックポテンシャルの測定は、TDR ケーブルテスタ (テクトロニクス社 1502B)、圧力変換器とデータロガーを用い、30分間毎に行った。圃場は農環研構内の淡色黒ボク土普通畑で1997～1998年の栽培履歴は次のようである。1997年5月23日にトウモロコシを播種し8月19日に収穫、10月2日にハクサイを定植し12月6日収穫、1998年4月21日にトウモロコシを播種し、7月30日に収穫、9月9日にハクサイを定植し、11月16日に収穫した。非栽培期間は除草を行って裸地状態とした。土層水分測定用のTDRプローブは長さ1mあり、0～1m土層の平均体積含水率、つまり、保水量を直接測定する。測定はそれぞれ1m離れた3点で行った。深さ1mにおける浸透流は、90cmと110cmに埋設したテンシオメータのマトリックポテンシャル値から動水勾配を求め、深さ1mの透水係数を乗じて求めた。透水係数はTDRで測定した深さ1mの体積含水率から推定した。このため、前もって、Richards法により不攪乱試料のマトリックポテンシャルと不飽和透水係数の関係性を求め、同一試料の水分特性曲線を用いて、透水係数を体積含水率の関数に変換しておいた。また、透水係数と体積含水率との間にはヒステリシスがないことを確認した。テンシオメータ、透水係数用試料(直径10cm、高さ4cm)の反復数は3である。深さ1mの体積含水率測定は2m離れた2点で行った。それぞれ、深さ1mに、長さ30cmのTDRプローブを水平方向に挿入した。TDRによる水分測定法の詳細はHasegawa(1997)を参照されたい。

深さ別マトリックポテンシャルの測定は、1991年8月下旬の多量の降雨後、ダイズ畑において行った。ポーラスカップ(長さ60mm)の中心を地表から6, 22, 32, 41, 55, 67, 83, 104cmに埋設し、マトリックポテンシ

アルを1時間毎に自動計測した。測定深の反復はない。測定の詳細はHasegawa *et al.* (1994)を参照されたい。

#### 5. 結果と考察

##### 1) 降雨条件について

自然状態の畑では、ライシメータ試験とは異なり、一定時間に一定強度の雨が降るということはない。2年間の降雨と浸透量を整理していく中で、降雨条件として、次のような降雨を対象とすることにした。それは、「降雨終了日の雨量が10mm以上であって、浸透流の最大値が降雨翌日に生じ、その流量が5mm以上となる雨」である。この規定は多分に任意的であるが、総降雨量が多量としても日雨量が数mmの程度の雨を入れると降雨終了の決定が難しくなること、また、最大値が降雨終了の翌日になる雨を対象としたのは、浸透流が最大値を示した後の雨の取り扱いが難しいことによる。なお、最大値が降雨終了の翌々日になる雨はなかった。また、時間の尺度は、午前0時で区切り日単位で考えることにした。

##### 2) 降雨後の浸透量と圃場容水量

図-1は、1997年4月～6月の梅雨を含む3ヶ月間の降雨量、地表から1mまでの土層に蓄えられる保水量、および地下1mの浸透流を日単位で示している。降雨が午前0時以前に止むか以降に止むかで、時間軸は約1日間の違いを持っている。降雨後の保水量の変化は、浸透流と蒸発散量の和に等しいが、1mのTDRプローブ精度はほぼ0.5% (水量換算で5mm)であるため、保水量の変化と浸透流の値から蒸発散量を求めることはできない。日浸透流の最大値が5mmを超えたのは3回と少ない。このうち、4月8日、6月21日の最大値は、降雨翌日に生じており、今回考察の対象とした雨である。一方、5月25日の最大値は19.2mm d<sup>-1</sup>に達しているが、その翌日には13.9mmの降雨があり、降雨中に浸透流の最大値が生じている例であり、考察対象外の雨である。

1997年と1998年において浸透流の最大値が5mmを超えた降雨は18あり、そのうち5降雨では、降雨中に最大値が発生しており、今回規定した条件を満たす降雨は13であった。表-1にこれら13降雨とその後の排水の特徴を示した。降雨翌日に生じた浸透流の平均値は約7mm d<sup>-1</sup>であり、降雨後2日の浸透流の平均値は約4mm d<sup>-1</sup>になっている。また、降雨中に浸透流の最大値が生じた図-1の5月の雨においても、降雨後2日目の浸透流は4.2mm d<sup>-1</sup>であった。

降雨後の浸透流の経時変化は、気温や日射の影響も当然受けるが、図-1の4月の雨では約2週間排水が継続し、その後水移動は上向きに転じている。岩田(1963)

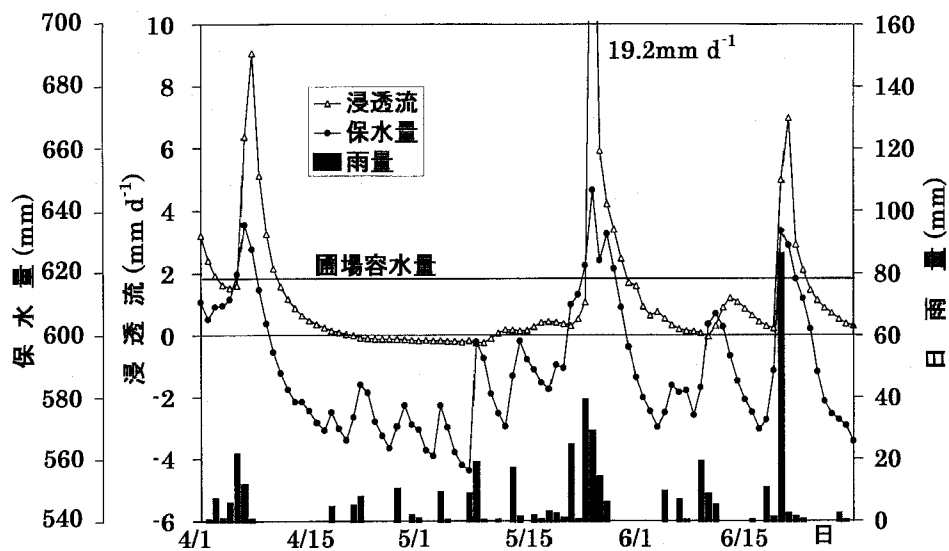


図-1 深さ 1 m の浸透流 (下向きが正) と保水量の経時変化 (1997 年)

Fig. 1 Rainfall, stored water to a depth of 1 m and matrix flow at 1 m (downward positive) from April to June, 1997.

表-1 降雨後の土層水分状態

Table 1 Soil water conditions after the rainfall

降雨終了	連続雨量 (mm)	降雨翌日		降雨後 2 日					
		保水量 (mm)	浸透流 (mm/d)	保水量 (mm)	浸透流 (mm/d)	透水係数 (cm/s)	動水 勾配	90 cm ポテン シャル (-cm)	110 cm ポテン シャル (-cm)
1997 年									
4 月 7 日	38.5	628	9.1	615	5.1	8.5E-06	0.7	52	46
6 月 20 日	97.4	629	7.0	618	2.9	1.1E-05	0.3	50	36
11 月 29 日	30.7	634	6.2	632	4.7	5.1E-06	1.1	52	54
1998 年									
1 月 18 日	14.0	644	8.9	633	5.2	1.1E-05	0.5	46	37
2 月 21 日	40.2	626	7.9	618	4.4	7.0E-06	0.8	57	53
3 月 1 日	32.0	630	8.9	621	5.3	8.7E-06	0.7	52	46
4 月 9 日	20.0	630	8.6	616	5.4	9.8E-06	0.6	50	42
4 月 17 日	17.1	631	6.2	618	3.8	1.2E-05	0.4	51	38
5 月 19 日	49.5	613	6.1	598	3.1	6.7E-06	0.6	55	47
6 月 14 日	33.5	623	7.7	610	4.5	8.2E-06	0.6	51	44
6 月 22 日	47.5	622	6.6	610	3.5	7.7E-06	0.5	53	44
9 月 27 日	44.5	633	5.5	625	2.7	8.7E-06	0.4	47	35
10 月 1 日	37.3	631	5.6	619	2.5	9.7E-06	0.3	48	34
平均値		629	7.3	618	4.1	8.8E-06	0.6	51	43
標準偏差		7	1.3	9	1.1	2.0E-06	0.2	3	7

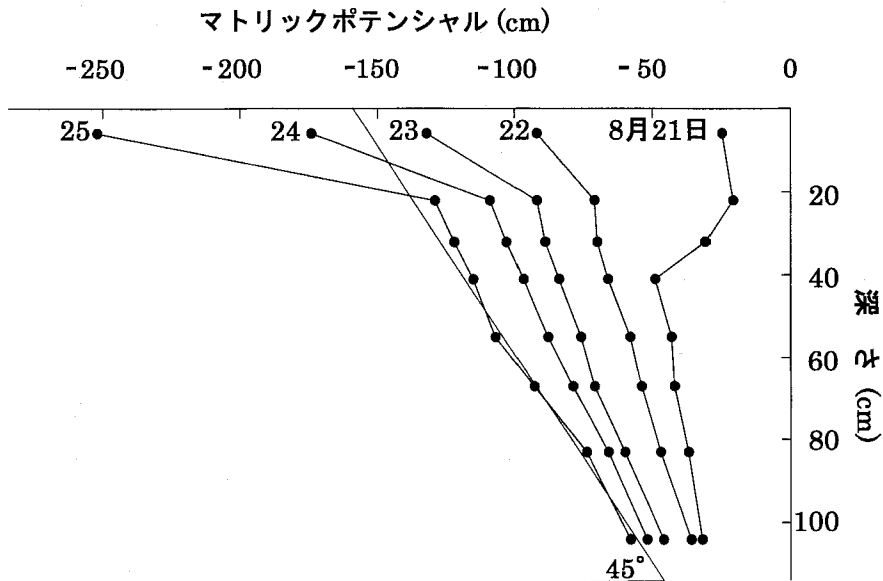


図-2 多量の降雨後の土壤中マトリックポテンシャル分布 (1991年)

Fig. 2 Matric potential profiles with depth after a heavy rain event (1991).

は黒ボク土 (赤ノッポ)、洪積土 (磐田ヶ原) 土壌を充填したライシメータ実験より、100~150 mm の灌水後に土壌面蒸発を抑制した場合、深さ 70 cm の 1 日当たり排水量は、灌水後 3~4 日間 7 mm を超えたと報告している。今回の実験では、土壌表面からの蒸発 (蒸発散) を抑制していないが、後述のように、降雨後数日間は蒸発散が地下 1 m の水移動に与える影響は小さいと考えられるため、岩田との違いは、充填土壌と自然の乱さない構造を持つ土壌の差等によると考えられる。

圃場容水量を排水過程のある水分状態と考え、浸透流の最大値が生じることの多い降雨翌日は適当ではない。一方、降雨 2 日後の浸透流量は今回の場合、約 4 mm d<sup>-1</sup> あり、無視できる量というほど小さくないが、実用上は、圃場容水量を降雨後 2 日とする定義で十分であろう。土壌物理用語事典では、降雨 1~2 日後を採用しているが、上記のことを考慮すると、降雨 1 日後は除外した方が適当である。

### 3) 降雨後 2 日の土壌水分量

圃場作土の乾燥密度は約 0.8 Mg m<sup>-3</sup>、心土の乾燥密度は 0.55 Mg m<sup>-3</sup> であり、間隙率が非常に大きいという特徴がある。0~1 m の平均間隙率は計算上約 77% となる。一方、表-1 から降雨翌日の 0~1 m の保水量は平均値 629 mm、標準偏差 7 mm である。降雨 2 日後の保水量の平均値、標準偏差はそれぞれ、618 mm、9 mm であり、体積含水率では 62% となる。図-1 にこの平均値

を圃場容水量として図示した。TDR はこのように、ある土層に含まれている土壌水分量を直接、精度良く測定できるという、今までの測定法にない特徴を持っている。黒ボク土の保水量の多さからみると、降雨後 2 日の浸透流量は、保水量の 1/100 以下で無視しうる量である。一方、気相率からみれば、圃場容水量時には 15% が確保されており、湿害による作物の生育障害は起こらないわけである。

### 4) 降雨後 2 日の透水係数

降雨後 2 日、浸透量の最大値が見られた翌日の透水係数は、表-1 にみるように、平均  $8.8 \times 10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$  と  $1 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$  に近い。圃場容水量は排水過程の途中の段階であり、動水勾配は 0 に向かって減少しており、降雨後 2 日の平均動水勾配は 0.6 となっている。なお、深さ 1 m の土の透水係数が  $1 \times 10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$  の時は、水の流れは下向きの時も、上向きの時のこともあり、その大きさは 1 日 1 mm 未満が多く、水移動がほとんどない状態である。したがって、大まかには圃場容水量の透水係数は  $1 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ 、動水勾配は 0.5 と考えて良いようである。

### 5) 降雨後 2 日のマトリックポテンシャル分布

1991 年 8 月 20 日に 79 mm、8 月 21 日に 25.5 mm の降雨があり、16 時に降雨が終了した。図-2 に、8 月 21 日から、各日 16 時の深さ別マトリックポテンシャル分布を示す。図示はしていないが、降雨による浸潤前線が深

さ104 cmに達したのは8月21日の0時から1時の間であった。マトリックポテンシャルと深さとの関係から、21日と22日の間において動水勾配がほぼ1の浸透流が起きていたことがわかる。ただし、ポテンシャル分布は降雨パターンの影響を受けるため、地表から深さ1 mまで全体にわたって動水勾配が1とはならない。その後、心土では排水に伴って、動水勾配が減少し静水圧分布に近づいていく。一方、最も浅い位置の作土では蒸発散に伴う上向きの水移動が22日には生じている。

降雨後2日の23日(ちょうど48時間後)のマトリックポテンシャルを見ると、深さ20~30 cmで約-100 cm、深さ104 cmで-52 cmとなっている。一方、表-1からは、降雨後2日の深さ90 cm、110 cmのマトリックポテンシャルはそれぞれ $-51 \pm 3$  cm、 $-43 \pm 7$  cmとなる。圃場容水量は排水過程の途中にあるため、マトリックポテンシャルは単一な値として決定できないことはもちろんであるが、 $-50 \sim -100$  cmということを経験の実験は示している。心土の毛管飽和からの脱水過程の水分特性曲線から、マトリックポテンシャルが-30、-50、-70、-100 cmにおける体積含水率は0.709、0.689、0.675、 $0.660 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ である。圃場容水量を-50 cmまたは-100 cmとして近似してもその差は $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ である。採土試料の体積含水率のバラツキを考えると、排水の良好な土壌の場合、圃場容水量の目安として多く使われている-60 cm (pF 1.8)は、実用上有効である。

## 6. おわりに

黒ボク土普通畑における深さ1 mまでの平均土壌水分量、深さ1 mの土壌水分量と動水勾配の連続測定データをもとに、圃場容水量を考察した。その結果、自然降雨条件下の畑において圃場容水量を厳密に定義しようとすると、水移動にとって有意な根群域をはっきりさせること、多量の降雨の意味を明確にすることが必要であった。そこで、対象土層を1 m、雨を「降雨終了日の雨量が10 mm以上であって、浸透流の最大値が降雨翌日に生じ、その流量が5 mm以上となる雨」と規定して圃場容水量を考察した。畑での2年間の実験データから考察されたことは、圃場容水量は排水過程の途中であるため、自然の降雨、土層および根系の異なる作物を対象とする場合、浸透速度で厳密に定義するのも実用的ではなく、排水の良い土壌では、降下浸透が小さくなったときの水分状態という定義で十分であった。今回の淡色黒ボク土の実測データからは、確実に排水過程に入っている降雨

後2日を圃場容水量とすることが適当であった。このときの深さ1 mの状態は浸透流が1日4 mm程度、透水係数がおおよそ $10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ で動水勾配が約0.5、マトリックポテンシャルは約-50 cmであった。また、0~1 m土層の保水量は約620 mmあり、TDRによって直接精度良く計測された。

## 謝 辞

畑での2年間にわたる測定補助および、多量のデータの吸い上げならびに作表、作図処理をしていただいた郷原弘美さんに感謝します。

## 引 用 文 献

- 土壌物理研究会編(1974): 土壌物理用語事典, p. 67, 養賢堂, 東京.
- Hasegawa, S., Osozawa, S. and Ueno, H. (1994): Measurement of soil water flux in andisols at a depth below a root zone of about 1 meter. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, **40**: 137-147.
- Hasegawa, S. (1997): Evaluation of rainfall infiltration characteristics in a volcanic ash soil by time domain reflectometry method. *Hydrology and Earth System Sciences*, **1**: 303-312.
- Hillel, D. (1980): *Applications of soil physics*. p 67-72, Academic Press, New York.
- 岩田進午(1963): 圃場容水量について, 農業土木研究 **30**: 385~394.
- Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner, W.H. (1991): *Soil physics*. p 150-151, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York.
- 農林省農林水産技術会議編(1972): 畑地かんがい, pp. 56~57, 農林省農林水産技術会議事務局, 東京.
- 椎名乾治(1963): 蒸発散による畑地水分の現象機構に関する研究, 農土試報 **1**: 83~156.
- Soil Science Society of America (1997): *Glossary of Soil Science Terms 1996*, p 40, Madison.
- 竹中肇(1969): 圃場容水量, 山崎不二夫監修土壌物理 pp. 293~297, 養賢堂, 東京.
- Veihmeyer, F.J. and Hendrickson, A.H. (1931): The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.* **32**: 181-193.

受稿年月日: 1999年12月10日

受理年月日: 2000年2月16日

# 土壌動物の生態と土壌物理

中村 好男\*

## Ecology of Soil Animals and Soil Physics

Yoshio NAKAMURA\*

Department of Upland Farming, Tohoku National Agricultural Experiment Station

### 1. はじめに

次の事象における土壌の物理性に、土壌動物の関与はどの程度なのか、が関心のあるところである。第一は、耕地での耕起の意義、また作物根の伸長と土壌の硬度と脆さや空隙への関与。たとえば、畑土壌の改善目標としての硬度は、山中式硬度計の値で22 mm以下とされる(鬼鞍 豊(編)(1985))。ところが現在試験している無耕起畑ではこの値近くを示すことがあるが、ダイズや麦は順調に育っているように見受けられる。第二は、土壌の物理学と動物学の知識が意識的に活用された汚水処理技術、新見式土壌浄化法における不飽和流動の成立条件への関与、である。

#### 1. 土壌動物は多種多様な動物の集合体～土壌物理性とは土壌環境形成動物群が関連

土壌中には多種多様な土壌動物と称される動物が生息し、土壌微生物とともに土壌圏(八幡, 1989)の土壌生物を構成する。多数の動物門からなる土壌動物は、食性、棲み場所あるいは大きさ等から分けられ扱われる(表-1)。

土壌動物の多くの群は種類相や、その生態がまだ未解明であり、機能の全容は明らかでない。これまでの知見に基づいて、筆者は現在のところ土壌の3性質への関わり度の強さから次の2群に分けている(中村, 1991):

- ┌ 主に土壌の物理・化学性に影響を与える群(土壌環境形成動物群)～例: ミミズ・シロアリ
- └ 主に土壌の生物性に影響を与える群(土壌生物調節動物群)～例: トビムシ・ヒメミミズ

ミミズ(小型類のヒメミミズを含める)は他の動物に比べ知見が集積し、土壌の3性質全てとの強い関わりが明らかにされつつある。すなわちミミズは土壌圏の担い

手(中村, 1998a; 海外ではEcosystem engineer: Jones *et al.*, 1994, Lavelle *et al.*, 1997)として、土壌の性質(物理・化学・生物的特質)を変化させ、資源の有効性を高めることを通じて、直接・間接的に土壌圏の3大機能、生産・分解・調整(自浄)に関与し(中村, 1998b), 生態系の物質循環に寄与すると考えられる。

#### 2. 土壌動物の存在(生息)可能な条件(土→動物)としての土壌物理性

土を棲み場とする動物(表-1)は、土中に空隙を作り、あるいは作られた空隙を生活空間とする。そのため土壌の物理的性質のうち、空隙を作る動物の生息に対しては、堅さや粒径組成の度合い、また形成された空隙を利用する動物の生息に対しては、生活空間としての空隙の大きさやその中の酸素濃度、および移動媒体と生命維持としての水の質と量などが、強い制限要素として働くことと推定される。また水分と温度条件の変動と幅も重要であろう。図-1に空隙の間隔( $\Phi$ ), 水分状態(pF, 相対湿度, 空隙内状態)および主要動物の推定される関連を示した。

pFを尺度とすると、土壌動物の多様性の高いところは、1.8(重力水)以下の不飽和条件の範囲と考えられる。すなわち土壌動物の棲み場として、空隙内に酸素とともに水が存在することでその水を利用する水性動物の生息を可能にし、また高い湿度が保たれることで湿性動物の生息を可能にする。

#### 3. ミミズ(土壌動物の代表として)の存在は土壌物理性に影響を及ぼすか

土壌動物の土壌の性質への影響は、野外での測定とともに、実験的に目的とする土壌動物を添加(人工移入)した人工生態系(マイクロコスモ)で解析される。筆者は<土+土壌微生物>, <土+土壌動物>, <土+土壌微生物+土壌動物>, それぞれの組み合わせは異なる循環

\* 農林水産省東北農業試験場 〒960-2156 福島県荒井字原宿南50  
 キーワード: 土壌動物, ミミズ, 土壌物理

表-1 多様な土壌動物の仕分け  
Table 1 Groups of soil animals

動物分類学	食性	棲み場所	体の大きさ	
原生動物門	節足動物門	落葉食 捕食	枯葉生息群	大型群
扁形	脊椎	材 糞	腐植	中型 (湿性)
袋形		根 寄生	土 (乾性)	中型 (乾性)
軟体		腐植	土 (湿性)	小型
環形		セン苔	土 (水性)	微小型
緩歩		菌	生物 (寄生)	

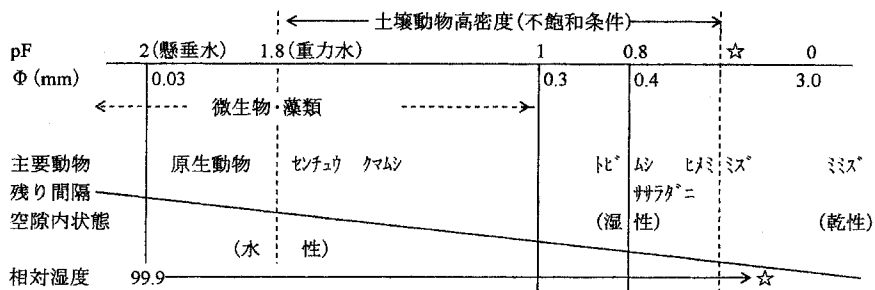


図-1 土壌動物の生息域と空隙および水分状態との関連推定図 (☆: 数値不明)

Fig. 1 Effects of the soil pores and water contents on soil animals.

表-2 大麦収穫後の土壌表面硬度 (板倉 1990 より抜粋改変)

Table 2 Soil hardness in soil surface after the harvest of barley

処理条件	化成肥料のみ	無肥料	枯葉のみ	枯葉+ミミズ2	枯葉+ミミズ4	枯葉+ミミズ8
硬度計値	16.5	23.0	23.5	8.5	7.5	8.5

系が生じ、潜在能力や新能力があらわれる、と仮定している。ただしこれらの組み合わせのうち、土壌微生物を除去した<土+土壌動物>を、人工的に創出することは極めて難しく(土壌動物そのものの生存が微生物と密接に関連することもある)、土壌動物の影響は、ほかの2組の結果の差から解析されることが多い。また添加する土から、あらかじめ微生物や動物を取り除くのに、熱、乾燥あるいは薬品処理されるが、はたしてこうした処理を受けた土が、本来の土と同じなのか疑問が残るところである。以下に、これまでに筆者らの実験から得た物理性に関する結果の概要を示した。

3-1. 土壌圏活用型農法をミミズは支えるか

A: 風乾土(腐植質黒ボク土)を詰めたポット(1/2,000 a)に、ミミズ(ヒトツモンミミズ)を移入(2, 4あるいは8成熟個体)し、温室内にて大麦を栽培した。ミミズ

移入ポットの大麦収穫後の土壌表面や横断面には、ミミズの通過孔と思われる5ミリ程の孔が多数見られ、ミミズ無移入に比べ硬度が低下した(表-2)。

B: 野外枠(コンクリート枠、無底、3.3m×3.3m、腐植質黒ボク土及び淡色黒ボク土)にミミズ(ヒトツモンミミズ; 100成熟個体)を移入し、夏作にダイズ、冬作にオオムギを栽培した。移入4年後(ダイズ収穫後)の三相分布は、2土壌型ともミミズ移入枠で気相が多かった(表-3)。ミミズ移入枠の10年後の土壌表層には、多数のミミズ糞が見られた。11年後から上壤水を採取し、水量とその中の窒素量を計測している。ただしこの実験にはミミズ無移入の無耕起・被覆処理が含まれないので、数値がミミズ移入効果そのものを示していない。

C: ミミズを移入しない野外枠(コンクリート枠、無底、3.3m×3.3m、褐色森林上、灰色低地土及び腐植質黒ボク

表-3 ミミズ移入4年後のグイズ収穫跡土壌の三相分布 (中村・未発表)

Table 3 Soil air, liquid and solid contents after the introduction of earthworms, *Pheretima hilgendorfi*

処理条件	深さ (cm)	腐植質黒ボク土			淡色黒ボク土		
		固相 (%)	液相 (%)	気相 (%)	固相 (%)	液相 (%)	気相 (%)
ミミズ移入 (無耕起・被覆)	0-5	36.5	48.2	15.3	35.1	47.3	17.6
	5-10	36.1	47.1	16.8	33.1	52.7	14.2
	10-15	40.0	54.7	5.3	42.0	50.9	7.1
ミミズ無移入 (耕起・無被覆)	0-5	40.3	45.6	14.1	38.3	49.2	12.5
	5-10	39.7	50.4	9.9	38.2	51.1	10.7
	10-15	39.4	58.8	1.8	38.1	57.4	4.5

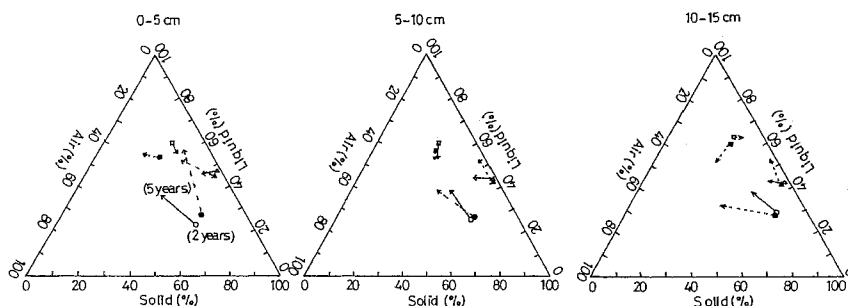


図-2 肥料形態と耕起有無が三相分布に与える効果 (板倉ら, 1994 の表 2 を図化) 棒試験; 初回調査処理2年目, 二回5年目  
化成肥料・耕起: ○褐色森林土, △灰色低地土, □火山灰土; 実線  
有機肥料・無耕起: ●褐色森林土, ▲灰色低地土, ■火山灰土; 点線

Fig. 2 Effects of fertilizers and tillage on soil air, liquid and solid contents

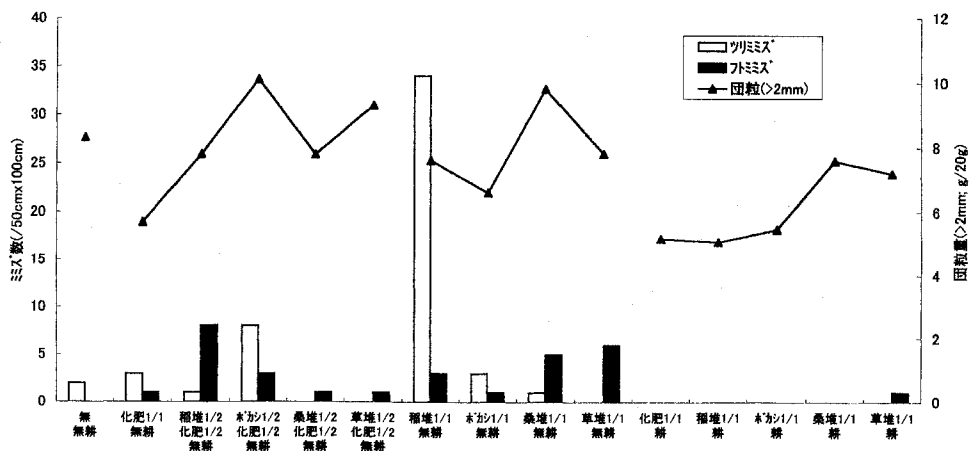


図-3 肥料形態と耕起有無がミミズ数と団粒量に与える効果 (黒ボク土; 処理7年目; 中村・未発表)

Fig. 3 Effects of fertilizers and tillage on earthworm numbers and soil aggregates.

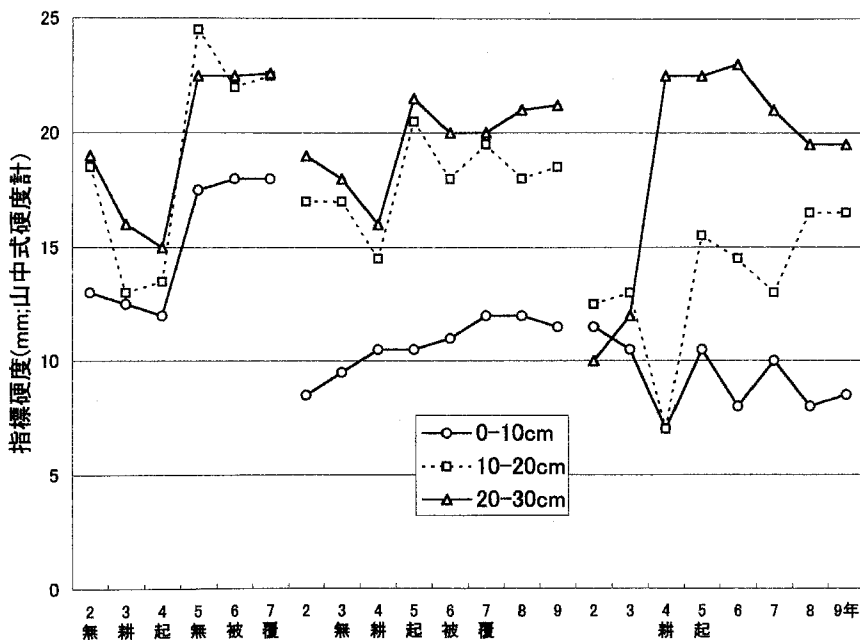


図-4 耕起，無耕起（無被覆）および無耕起（被覆）処理された畑土壌の硬度の推移（中村・未発表）

Fig. 4 Effects of tillage and mulch on soil hardness.

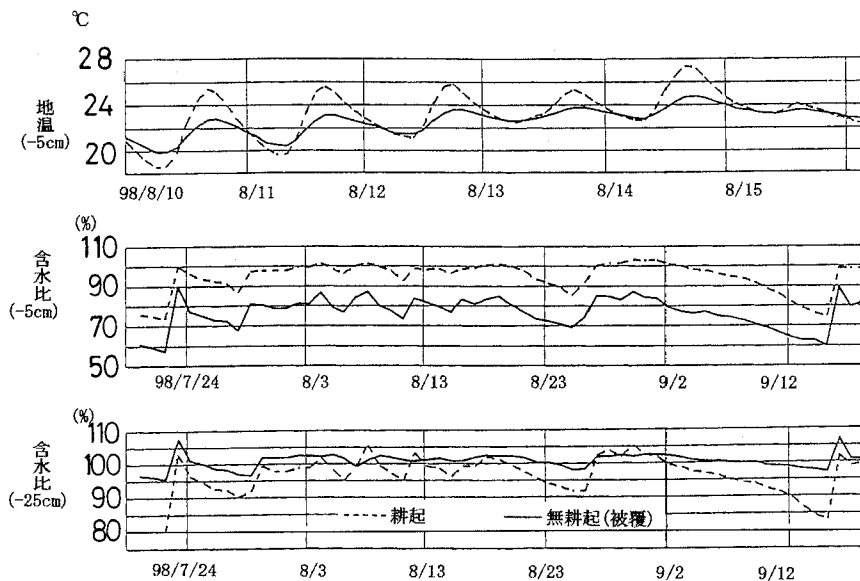


図-5 耕起の有無が土壌水分（含水比）と地温に与える効果（中井ら・未発表）

Fig. 5 Effect of tillage on soil water content and soil temperature.

土)に、肥料形態と耕起有無を組み合わせた処理区を設け、ミニトマト・ダイズなどを栽培した。5年目のミミズ数と団粒量 (>2mm) が正の相関 (r=0.85) を示し

(Enami *et al.*, 1999), 三相分布 (図-2) の液相率は褐色森林土でやや多く、気相率は灰色低地上で多かつた (板倉ら, 1994)。



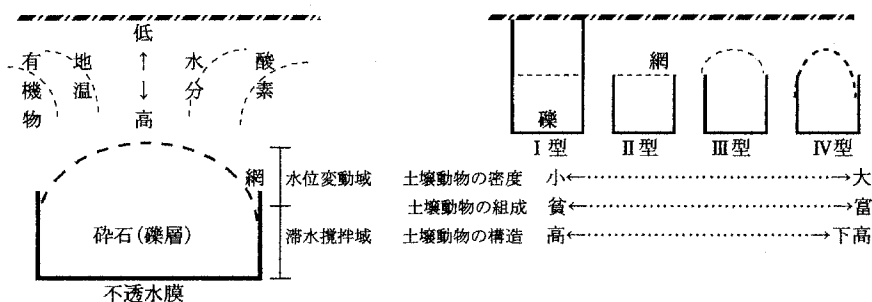


図-6 新見式汚水処理装置のトレンチとその付近の土壤条件 (左: 中村 1983 を一部変更) および側壁と網の位置と形状による類別と土壤動物の関連 (右: 中村 1996 を一部変更)

Fig. 6 Soil conditions in the Niimi trench (left) and the relationship between the trench type and soil animals (right).

D: ミミズを移入しない野外枠 (枠無し, 14.7 m<sup>2</sup>, 腐植質黒ボク土) に, 肥料形態と耕起の有無から 15 処理区を設け, インゲン・ミニトマトなど野菜を栽培した。図-3のごとく, 5 年目では枯草堆肥 (図-3 の枯堆) を除く, 化成肥料 (化肥), 稲藁堆肥 (稲堆), ポカシおよび桑条堆肥 (桑堆) のいずれも耕起条件でミミズは生息していなかった。ミミズ数と団粒量 (>2 mm) とは相関 (正) が低かった (r=0.4)。

E: 圃場 (淡色黒ボク土) に, 耕起 (春と秋の 2 回), 無耕起 (無被覆) および無耕起 (被覆) の 3 処理区を設けた。なお無耕起 (被覆) 区は, 土壤動物の多様性を高める方策として提案された二重被覆 (中村, 1999) が, 適宜刈り取った雑草と作物残さを材料として用いられた。処理開始 2 年後からの土壤硬度の推移 (図-4) によると, 0-5 cm 層は耕起区と無耕起 (被覆) 区の間には大きな差異が無く, 無耕起 (無被覆) 区が 5 年後から堅くなった。その下の 2 層は 3 処理区間に大きな差異があった。10 年後の無耕起 (被覆) 区の土壤断面は, 表層に腐植集積による黒色化が深さ約 4 cm まで進んでいた。夏季における表層 (深さ 5 cm) の土壤温度の日変動は, 無耕起 (被覆) 区で少なく, また降雨後の表層の土壤水分は, 無耕起 (被覆) 区が速やかに乾燥した。しかし下層 (深さ 25 cm) では, 無耕起 (被覆) 区の方が水分変動は少なく乾燥も遅かった (図-5)。

### 3-2. 新見式汚水処理装置のヒメミミズ数は不飽和流動と関連か

新見式汚水処理装置の構造はいたって簡易である (図-6 左)。汚水浄化の原理を, 古くから用いられてきた”地獄だめ”と称せられる縦穴浸透方式と比較すると, 次の 2 点の大きな差異がある (毛管浄化研究会, 1983)。第一に縦穴式では, 汚水の土壤への浸透が穴の底部付近から始まり, 垂直下方又は斜め下方に向かう。こ

れに対し, 新見式では汚水はいったん不透水膜内の礫層に集まり, その後土壤への浸透は土壤の比較的浅い位置から始まり, しかも流動の方向が上方に仕向けられ, 土粒子表面及び粒子間隙に生息する土壤生物 (小動物と微生物) の活動の盛んな表層部を通して流れるようにしてあること。第二に水の流動が縦穴式では飽和浸透であるのに対し, 新見式は不飽和流動で, ゆっくり水を移動させる。そのことにより不透水膜の内側 (トレンチ) やその上方は図-6 (左) のような条件が作られる。しかしながら, 各地に設置された装置は図-6 (右) のごとく側壁と網の位置と形状から 4 型に類別され, その土壤動物の密度, 組成および分布構造には一定の傾向が認められた。

新見式汚水処理装置の汚水浄化の高い効率が維持されるには, 毛管水流動が遅滞なく起こることであり, 土壤動物は毛管水流動の条件づくりに寄与すると推測されている (中村, 1996)。両者の関連を, 汚水流入開始から明らかにするために, 黒ボク土に処理装置を設置した。設置開始から 20 ケ月間の礫層内の水位変動 (図-6 の水位変動域) の記録によると, 16 ケ月から変動幅が小さくなり, 閉塞状況を示した。この閉塞が発生した頃から, ヒメミミズ数が減少し始めた (Nakamura, 1984)。しかしながらこの結果からは, 閉塞が先か, ミミズ減少が先か判断できなかった。

### 4. ミミズの存在と物理性をどう結びつけるか

上述の実験や多くの類似文献から, ミミズの存在する土壤は, 地温, 空気酸素拡散, あるいは水分・pF は上昇し, 硬度は低下する。この変化とミミズの存在はどのような関連があるのか? 比較的最近の生理・生態に関する文献 (例えば Pedobiologia, 43 (6), 1999 には第 6 回ミミズ生態学国際シンポジウムの多数の報告あり) をもとに関連を探ってみる。

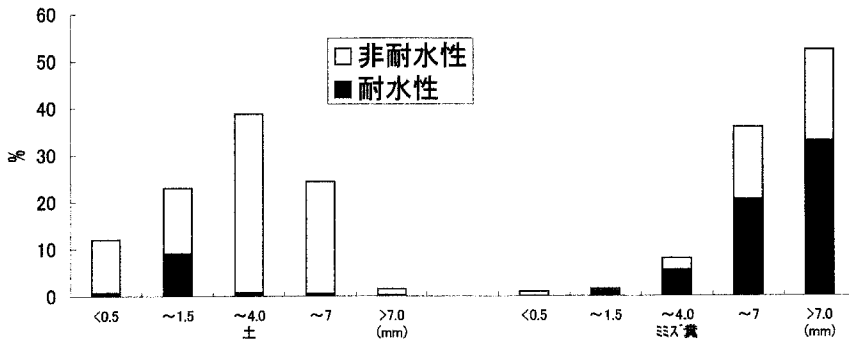


図-7 ヒトツモンミズ糞と周囲土の粒径割合および粒径別耐水性団粒割合 (中村・板倉・未発表)

Fig. 7 Soil particles and waterproof aggregates of wormcasts and soils (Right: cast of *Pheretima hilgendorfi*; black: waterproof aggregates).

ミズの体の仕組みには次の特徴が認められている；

強靱な筋肉

例：バライロツリミズは軸方向に平均 72.8 kPa (McKenzie & Dexter, 1988 a)；放射方向に 230 kPa (McKenzie & Dexter, 1988 b)

食欲な食性と強固な腸

例：排糞量は体重の 5 倍/日 (Lavelle, 1978)，砂糞と蠕動活動 (Laverack, 1963)

多様な腸内 (微) 生物

例：細菌，放線菌，糸状菌，原生動物，センチュウ (Satchell, 1967)

腸内の強力な活性物質

例：セルラーゼ，プロテアーゼ，キチナーゼなど多様 (Laverack, 1963, Merino-Trigo *et al.*, 1999)

こうした体の特徴をもつミズの行動は、<食べる・徘徊・排フン・分泌・死>の5つがあり、このうち土壌物理性とは、主に<食べる・徘徊・排フン>が関与すると推測される。

#### 4-2. 腐植形成と層位の乱れ (かきませ) と落葉層消失

ミズの間断ない食べる・徘徊の行動は、腐植を形成し、層位を乱れさせる。とくに森林で顕著にあらわれ、例えば、アメリカ・ミネソタ州の火山灰土壌からなるカバヤボラの広葉樹林では、林内に捨てられた釣り餌のミズが殖え、わずか 10 年ほどで腐植型がモダーからムルと変化した (Alban & Berry, 1994)。また草地では、ミズによる根群層の破壊が、物質循環に寄与し、草生産量を増加させる (Lee, 1985)。

#### 4-3. 孔道 (Burrow)

徘徊行動によって地中に孔道が形成される。孔道は、

住み家 (多くは地表面に開口) と移動探索の通路に使われる。孔道の作り方は 2 通りあり、第一は強靱な筋肉を用いて土壌を押し開いて作る、そのため孔道の周囲に亀裂がはいる。第二は口から液を出し、土を柔らかくし呑み込み通過させてつくる。

孔道の内壁は、3 層 (腐植層、石灰層、酸化鉄層) 構造を持つ (Jeanson, 1964)。厚さ 1-2 mm の内壁には粘液が付着し  $\text{NO}_3$  に富み、そのため細菌が繁殖し窒素の循環に寄与 (Parkin & Berry, 1999) したり、孔道は植物の根やトビムシも利用する。孔道の内径は 1-10 ミリ、ときには 30 ミリ (Lec & Foster, 1991)、深さは地下 80 cm (Lighthart & Peek, 1997) にもなる。孔の数はミズ密度に影響され、 $100-300/\text{m}^2$  の報告が多い。体積は 1.3-9 L および長さは  $142-888 \text{ m}/\text{m}^2$  に達する (Kretzschmer, 1978, 1982)。

野外の孔道の観察保存は、表面から少しずつはぎ取り作図したり (Lighthart *et al.*, 1993)、採土器具で試料を取り樹脂で固める (箱石・私信)。孔道の形成過程は、X 線 (Jégou *et al.*, 1998)、CT-スキャン (Joschko *et al.*, 1989)、二次元画像解析 (Kretzschmer & Aries, 1992)、軟 X 線 (Narioka & Nijima, 1995) などで行われる。このうち軟 X 線は観察対象のミズを殺傷しないこと、費用が廉価の利点がある。

孔道の解析は、ガス、水および溶質の移動通路としての機能から取り組まれ、すでに大気と土壌間の酸素拡散モデル (Rappoldt, 1993) が提案されている。この孔道は耕起によって簡単に壊れる。そのため孔道の機能の解析は、耕起されない草地や無耕起畑で行われることが多い。例えば草地ではミズが生息すると粗孔隙が 1.5-4 倍増加する (Tisdall, 1985)。無耕起畑では、雨の浸透量

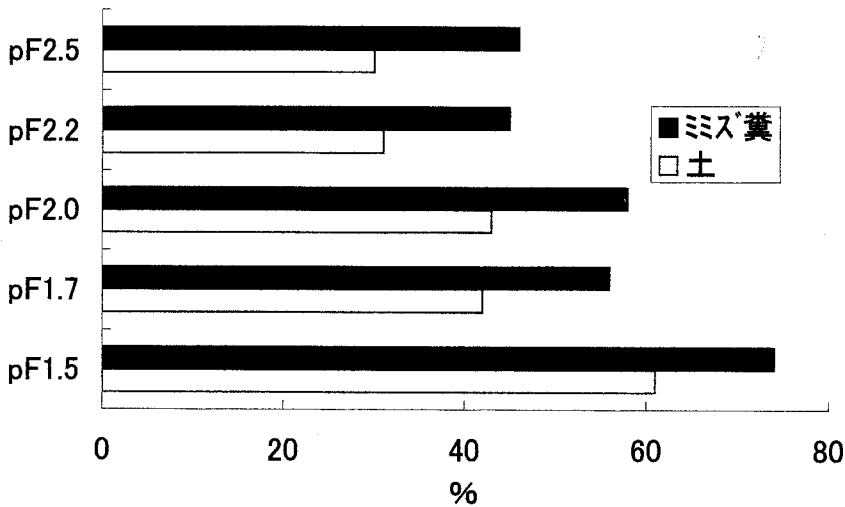


図-8 ヒトツモンミミズ糞と周囲土の pF 別の保水率 (含水比; 中村・板倉・未発表)

Fig. 8 Water contents at different pF values of wormcasts and soils (Black : cast of *Pheretima hilgendorfi*)

がミミズが生息しないと  $1.11 \text{ L/m}^2$  ( $0.02 \text{ mm/min}$ ) に対し、ミミズが生息すると  $6.5 \text{ L/m}^2$  ( $0.12 \text{ mm/min}$ ) に上昇する (Ehler, 1975)。無耕起のコーン畑の測定によると平均して降雨量の 3.9% がミミズ孔を通過し (Edwards *et al.*, 1990)、降雨実験では地表流去水が 2 時間に 60 mm の降雨では、孔道があると約半分に減少する (Roth & Joschko, 1991)。当然ながら、土壤流亡も減少する (Pitkänen & Nuutinen, 1998)。

#### 4-4. フン (Cast)

地表に排出されるミミズ糞は、重なって固まる事が多く、数センチの大きな塊にもなる。糞に対する関心は古くから高く、排出量の計測が世界各地でなされている。量はミミズ密度に影響され、2-250 t/ha/yr ほどである。南アフリカには、高さ 30 cm-1 m、径 1 m のドーナツ状にミミズ糞が排出される (Ljungstrom & Reinecke, 1969)。しかしながらミミズ糞の大半は地中に排出される。例えばサバンナでは地表の 2.5 t/ha/year に対し、地中に 1,200 t が排出される (Lavelle, 1978)。

芝地の表層から採取したフトミミズ糞は、粒径 7 mm 以上が 50% 以上、4 mm 以上では 80% 以上を占めていた (図-7)。糞は粘土、シルト、砂など一次粒子とともに、植物繊維の破片が含まれる (有村・岩下, 1987)。

ミミズ糞の物理性はエサの内容に大きく影響される (Flegel *et al.*, 1998)。一般的にミミズ糞の保水性は高く (図-8)、その断面には、多数の空隙が見られ、水中に浸

けると多数の泡が出てくる。空隙は大小さまざま、水中に浸けても不飽和状態が保持される。そのミミズ糞が地表とともに地下の孔道を埋め、雨水の浸透、土壌と大気とのガス交換などに寄与する (Blanchart *et al.*, 1993)。粗孔隙の 90% 以上が水没し、根の生長に悪条件となっても、ミミズ孔道は空気を含むことができる (Kretzschmar, 1978)。

排泄された直後の糞は、土壤団粒よりも安定性は低いが、乾燥とともにしだいに安定性が高まる。羊のひずめを仮定した 80 kPa で圧縮したところ、土壤団粒は 55% に圧縮されるが、ミミズ糞は 66% にとどまった (McKenzie & Dexter, 1987)。構造の安定性の増加は、腸通過中に添加された菌由来の物質 (?) が糊として作用し堅くなり、その糊の産生は細菌の繁殖し易い有機物の存在によって促進されると推測されている (Marinissen & Dexter, 1990; Marinissen *et al.*, 1996)。またミミズ体内の石灰腺から分泌される石灰と、呑み込まれた有機物とが結合した物質が安定性を高める (Swaby, 1950)。エサとしての土の有機炭素含量が高いと安定性が高く (Guggenberger *et al.*, 1996)、また粘土量 (測定範囲 15-55%) や  $\text{CaCO}_3$  量 (測定範囲 0.3-3.2%) が高くなるにつれて団粒量は減少するが、強度は増す (Schrader & Zhang, 1997)。Al, Fe, Ca, Mg (Gu & Doner, 1993) や溶解性の炭水化物も安定性の増加に寄与する (Hindell *et al.*, 1997)。

水中につるしたミミズ糞は 3 ヶ月経過しても崩れな

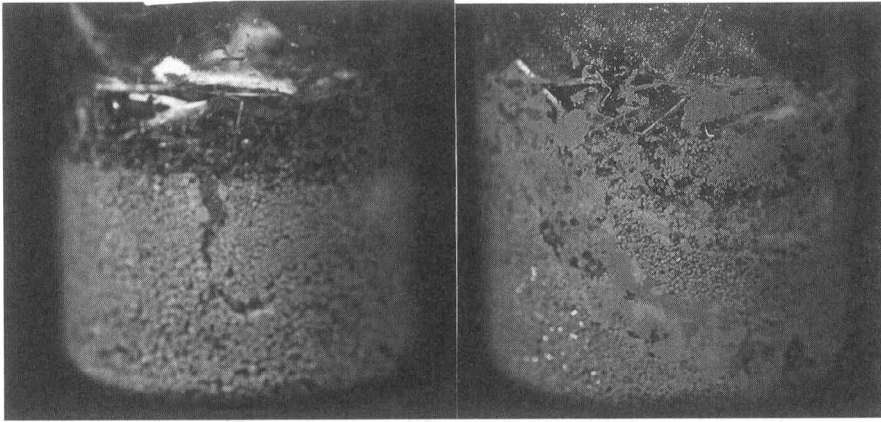


図-9 ミクロコスモ実験例 (左: シマミズ移入 100 日後, 右: ヒトツモンミズ移入 8 日後)

Fig. 9 Introduction of earthworms in microcosm (Left: *Eisenia fetida*, right: *Pheretima hilgendorfi*).

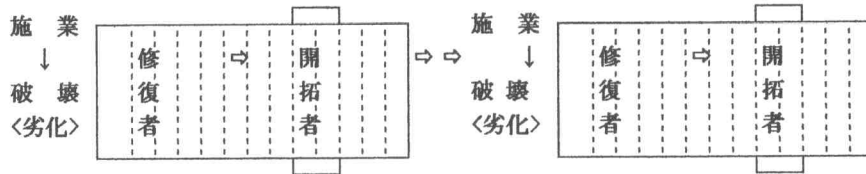


図-10 農作業による土壌物理性の破壊とミミズ活動による修復

Fig. 10 Destruction of soil physical properties by agricultural practices and restoration by earthworms.

かった。野外の温度や水分が変動し、植物根や多様な生物が存在する条件ではどのくらい保持されるのであろうか。サバンナでの測定では、 $>2\text{mm}$  の団粒が 2-5 cm 深さで約 65% を占め、ミミズを排除しても、その割合は 6 ヶ月間変化が無く、12 ヶ月後においても 50% であった (Blanchaet & Spain, 1989; Lee & Foster, 1991)。

耕地土壌には、土壌物理性の改良を目的に多様な資材が投入される。かつてミミズ糞は、1970-80 年のミミズ養殖ブーム時代に、土壌改良資材として販売されたが、安定性が持続しないなどの理由から、改良資材としての価値が疑問視された (伊達, 1979)。しかしミミズ糞の安定性が長期に維持され、またその安定性はミミズのエサの内容に影響されることが明らかにされつつある。ミミズの種類やエサの内容からの検討、さらに、堆肥の効用とされる土壌の団粒化促進効果が、ミミズ糞にも有るのかどうかの検討が待たれる。

なおミミズ糞とミミズコンポスト (vermicompost) は別物で、前者は地表に排出された糞を集めたもの、あるいはミミズを用いたミミズコンポストから糞を選別し

たものである (中村, 1999)。ミミズコンポストと微生物主体 (好氣的発酵) の堆肥との物理性の大きな差異は、前者の方が粒径が大きく多孔質構造が安定性であることである (Haimi & Huhta, 1987)。

##### 5. ミミズの生態型と実験目的に合う種類の選択

ミクロコスモ法にはミミズ、ヤスデ、トビムシなど多様な土壌動物が移入され、扱いが容易な種類もしだいに明らかになってきた。当然ながら移入する動物 (あるいは種類) は実験の目的から選択され、誤った選択はとんでもない結果を生じることもある。例えばミミズの地表有機物を地下 (土壌) へ移動する効果を実験するとする。図-9 (左) のごとくシマミズを移入すると、有機物の土壌への移動はほとんど無く、結論としてミミズの地表有機物の地下移動能力はほとんど無いとなる。ところが、図-9 (右) のごとくフトミズを移入すると、わずかな日数で地表有機物の大半が地下へ移動させられる。シマミズは堆肥生息型 (中村, 1999) で堆肥に多く見られ、入手あるいは飼育が容易であるためか、しばしば実験に用いられるが、土壌に生息することはまれであ

る。土壤との関連の実験には、土壤生息型の種類（例えばフトミミズ属ヒトツモンミミズ）が適当と考えられた。ミミズと土壤物理性に関連する報告が、多数発表される今日では、当然ながら用いたミミズの種類名は記載される。残念なことに我が国における、ミミズの土壤の性質に与える効果を実験した先駆的報告（小野寺・武田, 1935）には種名の記載が無い。まことに残念である。

## 6. おわりに

耕地土壤は多様な資材の投入、農作業あるいは作物生長などにより、恒常的に攪乱され、土壤物理性の諸性質の多くは破壊を免れない。一方、その土壤に生息するミミズの5大行動には、その破壊を修復する行動が含まれる（図-10）。今後、耕作による土壤物理性の劣化の定量と、ミミズの修復力の定量が、同じ場面で実験され論議されることを希望したい。

## 引用文献

- Alban, D.H. & Berry, E.C. (1994) : Effects of earthworm invasion on morphology, carbon and nitrogen of a forest soil. *Appl. Soil Ecol.*, **1** : 243~249.
- 有村玄洋・岩下 徹 (1987) : 稲わら分解におけるミミズ類の有無による土壤呼吸量および2, 3の化学性の差異. 宮崎総農試報. **21** : 37~48.
- Blanchart, E. & Spain, A.V. (1989) : Rôle des vers de terre dans l'élaboration et la conservation de la structure des sols de savane. In 'Processus Biologique et Fertilité de Sol dans les Savannes Humides de Côte d'Ivoire' (ed. O. Lavelle) pp. 26~41. (Ministere de l'Environnement SRETIE : Paris.) (Lee & Foster 1991 より)
- Blanchart, E., Bruard, A. & Lavelle, P. (1993) : The physical structure of casts of *Millsonia anomala* (Oligochaeta : Megascolecidae) in shrub savanna soils (Cote d'Ivoire). *Geoderma*, **56** : 119~132.
- 伊達 昇 (1979) : ミミズ糞肥料は本当に効くか—ミミズブームの副産物, 現代農業, 1979年10月号: 64~65.
- Dexter, A.R. (1978) : Tunneling in soil by earthworms. *Soil Biol. Biochem.* **10** : 447~449.
- Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. & Norton, L.D. (1990) : Effect of *Lumbricus terrestris* L. burrows on hydrology of continuous no-till cornfields. *Geoderma*, **46** : 73~84.
- Ehlers, W. (1975) : Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, **119** : 242~249.
- Enami, Y., Shiraishi, H. & Nakamura, Y. (1999) : Use of soil animals as bioindicators of various kinds of soil management in northern Japan. *JARQ*, **33** : 85~89.
- Flegel, M., Schrader, S. & Zhang, H. (1998) : Influence of food quality on the physical and chemical properties of detritivorous earthworm casts. *Appl. Soil Ecol.*, **9** : 263~269.
- Gu, B. & Doner, H.E. (1993) : Dispersion and aggregation of soils as influenced by organic and inorganic polymers. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **57** : 709~716.
- Guggenberger, G., Thomas, R.J. & Zech, W. (1996) : Soil organic matter within earthworm casts of an anecic- and endogenic tropical pasture community, Columbia. *Appl. Soil Ecol.*, **3** : 263~274.
- Haimi, J. & Huhta, V. (1987) : Comparison of composts produced from identical wastes by "vermistabilization" and conventional composting. *Pedobiologia*, **30** : 137~144.
- Hindell, R.P., McKenzie, B.M. & Tisdall, J.M. (1997) : Influence of drying and ageing on the stabilization of earthworm (*Lumbricidae*) casts. *Biol. Fertil. Soils*, **25** : 27~35.
- 板倉寿三郎 (1990) : フトミミズが大麥の生育と成分及び土壤条件に与える効果. 東北農業研究, **43** : 117~118.
- 板倉寿三郎・白石啓義・中村好男 (1994) : 無耕起被覆処理が畑土壤の理化学性並びに動物相に及ぼす影響. 東北農業研究, **47** : 169~170.
- Jeanson, C. (1964) : Micromorphologie et pédozoologie expérimentale, contribution à l'étude sur plaques minces de grandes dimensions d'un sol artificiel structure par les *Lumbricidae*, In 'Soil Micromorphology' (ed. Jongerius,) pp. 47~55. 2nd Int. Working Meeting Soil Micromorph., Arnhem.
- Jégou, D., Cluzeau, D., Wolf, H.J., Gandon, Y. & Trehen, P. (1998) : Assessment of the burrow system of *Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea giardi*, and *Aporrectodea caliginosa* using X-ray computed tomography. *Biol. Fertil. Soils*, **26** : 116~121.
- Jones, C.G., Lawton, J.H. & Schachak, M. (1994) : Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, **69** : 373

~386.

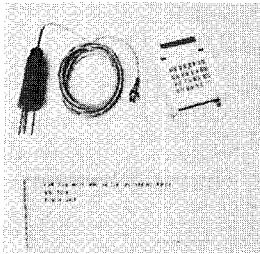
- Joschko, M., Diestel, H. & Larink, O. (1989) : Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. *Biol. Fertil. Soils*, **8** : 191~196.
- Joschko, M., Muller, P.C., Kotzke, K., Dohring, W. & Larink, O. (1993) : Earthworm burrow system development assessed by means of X-ray computed tomography. *Geoderma*, **56** : 209~221.
- Kretzschmer, A. (1978) : Quantification ecologique des galeries de lombriciens. Technique et premieres estimations. *Pedobiologia*, **18** : 31~38.
- Kretzschmar, A. (1982) : Description des galeries de vers de terre et variations saisonnieres des reseaux (observations en conditions naturelles). *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **19** : 579~591.
- Kretzschmer, A. & Aries, F. (1992) : An analysis of the structure of the burrow system of the giant gippsland earthworm *Megascolides australis* McCoy, 1878 using 3d-images. *Soil Biol. Biochem.*, **24** : 1583~1586.
- Lavelle, P. (1978) : Les vers de terre de la savane de Lampto (Côte d'Ivoire). Peuplements, populations et fonctions de l'écosystème. *Publ. Lab. Zool. E.N.S.*, **12** : 1~301.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W. & Dhillion, S. (1997) : Soil function in a changing world : the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.*, **33** (4) : 59~193.
- Laverack, M.S. (1963) : The physiology of earthworms. Pergamon Press, 206 pp. London.
- Lee, K.E. (1985) : Earthworms : their ecology and relationships with soils and land use. p. 411. Academic Press, Sydney.
- Lee, K.E. & Foster, R.C. (1991) : Soil fauna and soil structure. *Aust. J. Soil Res.*, **29** : 745~775.
- Lighthart, T.N., Peek, G.J.W.C. & Taber, E.J. (1993) : A method for the three-dimensional mapping of earthworm burrow systems. *Geoderma*, **57** : 129~141.
- Lighthart, T.N. & Peek, G.J.W.C. (1997) : Evolution of earthworm burrow systems after inoculation of lumbricid earthworms in a pasture in the Netherlands. *Soil Biol. Biochem.*, **29** : 453~462.
- Ljungstrom, P.O. & Reinecke, A.J. (1969) : Ecology and natural history of the microchaetid earthworms of South Africa. 4. *Pedobiologia*, **9** : 152~157.
- Marinissen, J.C.Y. & Dexter, A.R. (1990) : Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. *Biol. Fertil. Soils*, **9** : 163~167.
- Marinissen, J.C.Y., (1996) : Clay dispersability in moist earthworm casts of different soils. *Appl. Soil Ecol.*, **4** : 83~92.
- McKenzie, B.M. & Dexter, A.R. (1987) : Physical properties of casts of the earthworm *Aporrectodes rosea*. *Biol. Fertil. Soil*, **5** : 152~157.
- McKenzie, B. & Dexter, A.R. (1988a) : Axial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biol. Fertil. Soils*, **5** : 323~327.
- McKenzie, B.M. & Dexter, A.R. (1988b) : Radial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biol. Fertil. Soils*, **5** : 328~332.
- Merino-Trigo, A., Sampedro, L., Rodriguez-Berrocal, F.J., Mato, S. & Cadena, M.P. (1999) : Activity and partial characterisation of xylanolytic enzymes in the earthworm *Eisenia andrei* fed on organic wastes. *Soil Biol. Biochem.*, **31** : 1735~1740.
- 毛管浄化研究会 (編) (1983) : 土壌圏の科学~土壌浄化法の基礎, P352, 土壌浄化センター, 東京.
- 中村好男 (1991) : 土壌生態系活用型農業とそれを支える土壌動物. 東北農業研究, (別号) **4** : 43~59.
- 中村好男 (1983) : 汚水処理と土壌動物. *Edaphologia*, **28** : 33~35.
- Nakamura, Y. (1984) : Aspects of colonization by *Enchytraeus albidus* (Enchytraeidae) and *Sinella curviseta* (Collembola) in Niimi waste water treatment trench. *Pedobiologia*, **26** : 381~386.
- 中村好男 (1991) : 土壌生態系活用型農業とそれを支える土壌動物. 東北農業研究, (別号) **4** : 43~59.
- 中村好男 (1996) : 新見式土壌浄化技術を支える土壌生物. 月刊生活排水, **184** : 8~17.
- 中村好男 (1998a) : 土壌小動物の生態研究を通して知る環境保全. 東北農業研究, (別号) **11** : 1~10.
- 中村好男 (1998b) : 土壌動物と作物根の土壌環境~ミミズの活用. 農業および園芸, **73** (1) : 165~170.
- 中村好男 (1999) : ミミズと土と有機農業 (2版), P123, 創森社, 東京.
- Narioka, H. & Nijima, K. (1995) : A new method of estimating burrowing activity of soil animals by

- soft X-ray images. p. 80~90, in Structure and function of soil communities (eds. Edwards *et al.*), Kyoto Univ. Press.
- 鬼鞍 豊編 (1985) : 土壤・水質・農業資材の保全, P 316, 博友社, 東京.
- 小野寺伊勢之助・武田成太郎 (1935) : ミミズの林木苗木成長に及ぼす影響. 土肥誌, **9** : 30~32.
- Parkin, T.B. & Berry, E.C. (1999) : Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. Soil Biol. Biochem., **31** : 1765~1771.
- Pitkänen, J. & Nuutinen, V. (1998) : Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. App. Soil Ecol., **9** : 411~415.
- Rappoldt, C. (1993) : Modelling the geometry of worm burrow systems in relation with oxygen diffusion. Geoderma, **57** : 69~88.
- Roth, C.H. & Joschko, M. (1991) : A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. Z. Pflanzenernahr. Bodenk., **154** : 101~105.
- Satchell, J.E. (1967) : Lumbricidae. p. 259-322. In Soil Biology (eds. Burges & Raw), Academic Press, London.
- Swaby, R.J. (1950) : The influence of earthworms on soil aggregation. J. Soil Sci., **1** : 195~197.
- Schrader, S. & Zhang, H. (1997) Earthworm casting : stabilization or destabilization of soil structure?. Soil Biol. Biochem., **29** : 469~475.
- Tisdall, J.M. (1985) : Earthworm activity in irrigated red-brown earths used for annual crops in Victoria. Aust. J. Soil Res., **23** : 291~199.
- 八幡敏雄 (1989) : すばらしき土壤圏, P167, 地湧社, 東京.

受稿年月日 : 1999年12月20日

受理年月日 : 2000年2月22日

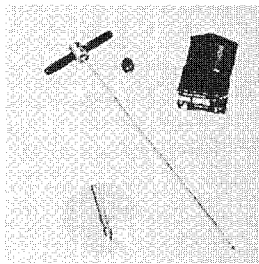
## DIK-321A FDR水分計 自記タイプ



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。



## 軟 X 線による非破壊土壌中の排水機構の解明

森 也寸志\*

### Characterizing Drainage Process of Structured Soils using Soft X-ray Radiography

Yasushi MORI\*

Faculty of Life & Environmental Science, Shimane University

#### 1. はじめに

我々の足下にある土壌には大小さまざまな間隙があり、通水、通気、また保水の役割を果たしている。しかしながら、一般に土壌間隙は、植物根の伸長・枯死、土壌動物の活動、膨潤・収縮などにより不均一な構造を持っている。その空隙が大きいものはマクロポアまたは粗間隙と呼ばれ、逆にそれ以外の密につまった微細間隙から成る部分をマトリックスと呼んでいる。マクロポアは水が迅速に流れる経路となることが多いため、従来の平均化された均一な水移動の解析手法が使えず、土壌汚染などの溶質移動を解明または予測する際には大きな障害となっている。

単純には、水みちを染料で着色することができる（例えば Bouma and Dekker, 1978）。しかしこの手法は、試験後に試料をスライスして染色部分を観察しなければならず、リアルタイムで水移動を観察することはできなかった。現象の的確な理解には、非破壊でこの移動をとらえる必要がある。

放射線ならば土壌を破壊することなく内部を観察することが可能である。ガンマ線は<sup>241</sup>Amなどの放射性同位元素が入手しやすいこと、単一光であること、などから非破壊検査に使うことができた。しかし、放射性同位元素からの光量は微量であるため露出時間を要し、得られる情報は土壌の密度、水分量など静的なものに限定されていた（例えば Aylmore, 1993）。

医療用 X 線 CT を使って直接水移動を観察する例もある。しかしながら、出力が土壌に対して調整されていないわけではない。また、撮影上の機械的な限界や逆解析のアルゴリズムの問題から、三次元構造を再構築する手法では十分な解像度は得られず、最高でもその解像度は

1 mm 程度と言われていた（例えば Hopmans *et al.*, 1994）。植物根の直径はこれより小さく、農地でおこであろうマクロポア流、それに続く排水過程を詳細に観察・解析するためにはさらに高精細な画像を得る必要があった。

一方、我が国では徳永ら（1984）、成岡ら（1988）によって軟 X 線を使った土壌粗間隙の造影手法が示された。土壌粗間隙のステレオ撮影（徳永, 1995）によって、根成孔隙が土壌中で卓越することがわかり、その形態の特徴が明らかにされた。さらに土壌間隙の三次元解析法（成岡, 1987; 岩間ら, 1996）も紹介されている。解像度数十  $\mu\text{m}$  の軟 X 線写真写真は微細な孔隙の観察には最適で、水田耕作方法の吟味（佐藤ら, 例えば 1992）、浸透特性の解明（佐々木, 1991）などに利用されている。このように軟 X 線は、土壌粗間隙の形態学的な考察に使われてきた。

筆者は、造影剤をトレーサとして、ラジオグラフィーによって土壌中の透水現象を可視化することを考えた。土壌間隙が水移動に影響する様子を具体的に表し、その成果の一部を Soil Science (Mori *et al.*, 1999 a) や Soil Science Society of America Journal (Mori *et al.*, 1999 b) に発表した。ここでは特に土壌からの排水過程について筆者の行ってきた研究を紹介する。

#### 2. 排水過程の軟 X 線ラジオグラフィー

土壌間隙構造は土地利用によって異なる（森ら, 1992）ため、水移動形態も土地利用ごとに異なると判断した。そこで、灰色低地水田土壌、くろぼく畑地土壌、褐色森林土壌を現場から非破壊で採取し実験に供した（表-1）。軟 X 線を平均的に透過させるため、5 cm 角で筒状の立方体ジュラルミンサンプラーを用い、撮影には側方照射

\* 島根大学生物資源科学部 〒690-8504 松江市西川津町 1060  
 キーワード: マクロポア, バイパス流, 軟 X 線, 二重間隙

表-1 非破壊土壌の物理性

Table 1 Physical properties of undisturbed core samples

Soil	Paddy soils		Field soils		Forest soils	
Samplig depth (cm)	20	50	30	50	30	70
Soil texture	LiC	CL	SL	LS	L	L
Ks ( $m s^{-1}$ )	$6.60 \times 10^{-8}$	$5.57 \times 10^{-6}$	$4.00 \times 10^{-4}$	$5.85 \times 10^{-5}$	$2.47 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-4}$
Porosity ( $m^3 m^{-3}$ )	0.469	0.552	0.750	0.727	0.715	0.634
Macroporosity ( $m^3 m^{-3}$ )	0.032	0.021	0.097	0.051	0.150	0.120
Bulk density ( $Mg m^{-3}$ )	1.41	1.33	0.64	0.74	0.74	0.95

表-2 ジョードメタンと水の物理性の比較

Table 2 Physical properties of  $CH_2I_2$  and water

Material	Specific gravity	Kinematic viscosity ( $10^{-6} m^2 s^{-1}$ )	Viscosity ( $10^{-3} Pa s$ )	Surface tension ( $10^{-3} N m^{-1}$ )
$CH_2I_2$	3.32	0.818	2.716	3.572
$H_2O$	0.998	1.004	1.002	7.275

型軟 X 線非破壊検査装置 (AW-100 特, SOFTEX) を使用した。これは土壌水が鉛直下方に流れる際の移動を容易に観察できるように軟 X 線が側方から照射されるように改良した装置である。

強い放射線 (医療用 CT やガンマ線) はその吸収量が鉱物によらず、水分量や乾燥密度とほぼ比例するために、これらの定量化に向く。逆に吸収が物質によらないため、コントラストがつかず高解像度の画像は望めない。一方、弱い X 線は物質によって X 線吸収に違いが出るため、高解像度の写真を望むことができる。物質量の定量化には工夫が必要であるが、造影剤を使えば透水現象を効果的に可視化できる。常温で液体であること、密度が土壌の乾燥密度より大きいことを条件に探し、ジョードメタン ( $CH_2I_2$ ) が造影剤としての的確であると判断した。表-2 より、比重が水の 3 倍あるものの動粘性は水のそれに近く、表面張力が水より小さいという特性を持つことがわかる。つまり、粘性の違いを考慮する必要があるが、水が浸入するところには同様に浸入できるため水移動のトレーサの一つとして利用可能である。移動する造影剤の軌跡を追うため、撮影時間が短くなるように高感度 X 線フィルム Fuji IX-150 を使用した。

図-1 に示す装置に土壌を装填し、飽和させた後、自動圧力調節器で負圧をかけ、排水試験を行った。飽和土壌からの排水過程を可視化することで、土壌構造が不飽和状態での水移動に与える状況を調べた。飽和土壌の上面を薄く覆う程度に造影剤を湛剤しておく土壌水の排水と併に造影剤が土壌内に引き込まれていき、排水後退線の移動する様子が造影される。これを一定時間毎に撮影

した。撮影された画像の時間毎の差分を取ると造影剤の移動の様子、すなわち排水面の進行の様子がとらえられる。これはサブトラクションと呼ばれる技法の応用で、同技法は医療診断においては効果的な血管造影のために使われている。骨や脂肪をマスク画像として減算すると、目的とする血管を鮮明に浮かび上がらせることができる (香川, 1997)。

また、実験は One-step または Multi-step outflow 試験 (Kool *et al.*, 1985; Parker *et al.*, 1985; Eching and Hopmans, 1993) にのっとって行い、逆解析から不飽和透水係数も同時に求められるようにした。これにより従来の透水係数の概念が画像とどう関わるのか調べることができる。使用した不飽和透水係数のモデルは van Genuchten 式 (van Genuchten, 1980) の Mualem モデル (Mualem, 1976) で、以下のように表される。

$$S_e = (1 + |ah|^n)^{-m} \quad (1)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s S_e \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここで  $S_e$  は有効飽和度 ( $0 \leq S_e \leq 1$ )、 $K_s$  ( $m s^{-1}$ ) は飽和透水係数、 $\theta_s$  ( $m^3 m^{-3}$ ) は飽和水分量である。また、 $a$  ( $cm^{-1}$ )、 $n$  ( $m = 1 - 1/n$ )、 $\theta_r$  ( $m^3 m^{-3}$ ) は実験によって定められるパラメータである。 $l$  は 0.5 と仮定した。

排水に要したサクションは水田土壌で 31.6 kPa、畑地、森林土壌で 10 kPa であった。なお、予備実験をあらかじめ行ったところ、 $CH_2I_2$  は水を追い越して土壌内に浸入することはなく、また、水が排水された領域には容易に浸入できることを確認した。すなわち、排水形態を

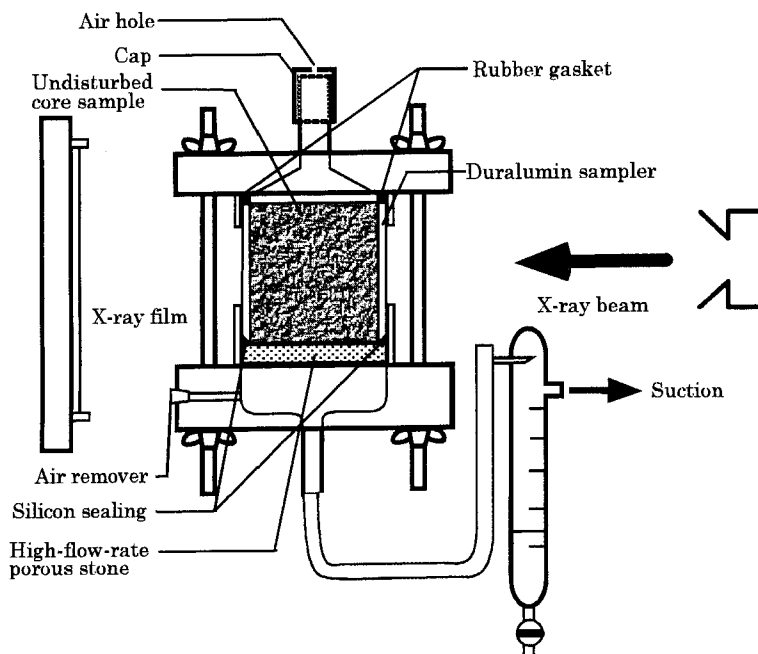


図-1 排水試験の軟 X 線ラジオグラフィー

Fig. 1 Soft X-ray radiography in combination with outflow experiment.

調べる目的であればトレーサとしての問題はあまり生じない。

### 3. 土壌間隙構造が排水過程に及ぼす影響

図-2 に排水試験中の空隙の広がりを示した。さきに記述したとおり造影剤によって造影された部分が排水の進行を表している。まず、水田では鉛直に独立に発達した管状孔隙が、畑地ではネットワークをくんだ管状孔隙が、森林では団粒間隙が卓越することがわかった。そして、土地利用による水移動形態の違いがあり、水田や畑地土壌では、管状孔隙、次いで団粒間隙、最後に土壌マトリックスと排水が進行しており、間隙構造が排水形態に大きく影響していることがわかった。とりわけ水田土壌については排水順序が明瞭であった。一方森林土壌では土壌全体からの排水が進行するだけで、明瞭な排水傾向は観察されなかった。

管状孔隙は明瞭な直線形状、土壌マトリックスは曖昧な雲状と形状が大きく異なるため分離が用意であった。そのため計測された排水量に対して、どの間隙が機能しているかを形状毎に調べた。すると水田土壌と畑地土壌では管状孔隙から土壌マトリックスへの排水過程の変化が画像上で明確に区別でき、そのときの排水量は間隙量割合にして水田土壌で6%（試料体積割合で3.3%）、畑

地土壌で10%位（同7.5%）であった。この数値は表-1の粗間隙率（2.1%, 9.7%）によく一致した。つまり、土壌からの排水は、管状孔隙がよく発達している場合、まず管状孔隙から排水が進み、ついで周辺のマトリックスへと排水が進むことが明らかとなった。

### 4. 土壌間隙の二重構造性

積算排水量から逆解析によって推測された不飽和透水係数を図-3 に示した。飽和透水係数（以下  $K_s$  と略記）は通常実測値として与えられている。しかしながら、 $K_s$  を固定値として与えると解の収束が極めて不安定になることがわかり、これも変数であると仮定して解析を行った。図では、実測の  $K_s$  を圧力  $1 \text{ cmH}_2\text{O}$  の部分にプロットした。すると不飽和部分と飽和部分で透水係数が不連続に変化する試料が見られた。この傾向は畑地でも見られたもの特に水田土壌で強く1オーダー以上の違いがあった。これはさきの土壌間隙構造の影響であると考えられた。つまり飽和状態では管状孔隙の存在によって飽和透水係数が大きく決定される。ついで、その間隙からの排水が終了したあと周囲の土壌マトリックスからの排水になる。しかし、そこは密に土壌が充填されているために、ある一定の負圧になるまではマトリックスからの排水は生じない。排水が始まったマトリックスはマクロ

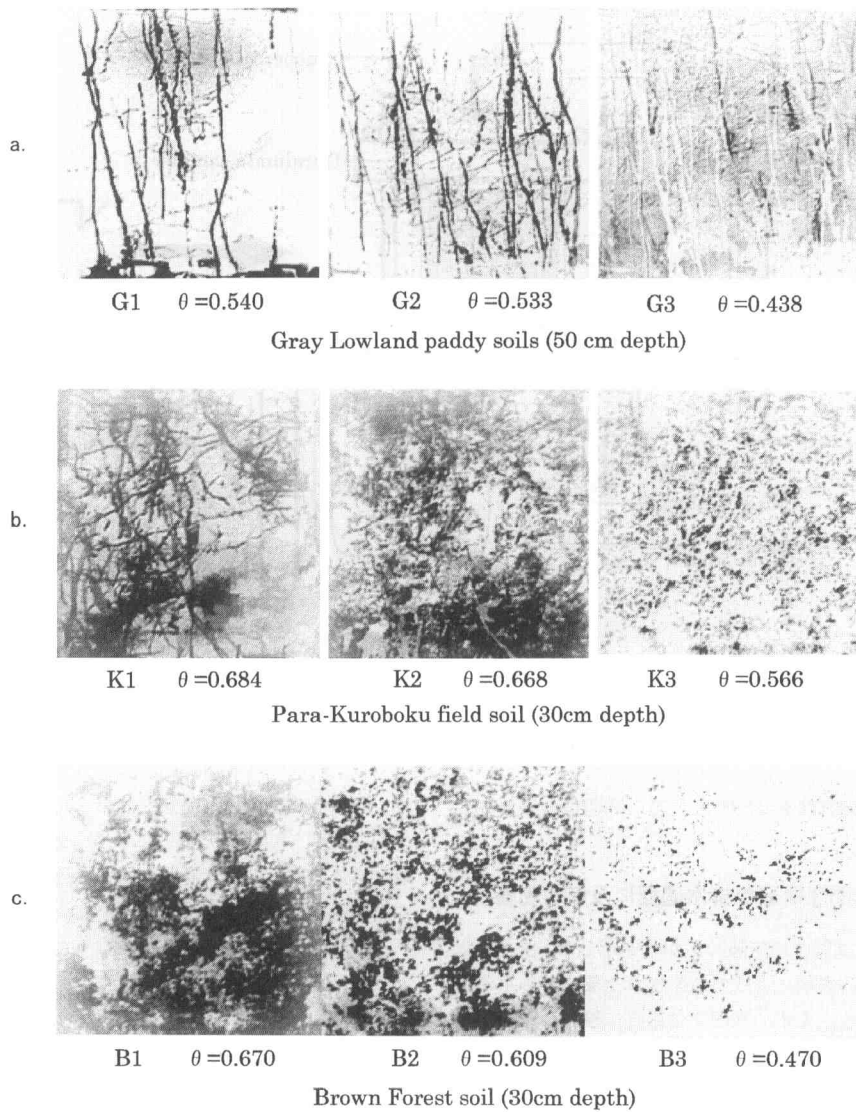


図-2 造影剤の移動で見た排水過程の進行 (a. 水田土壌, b. 畑地土壌, c. 森林土壌)  
(Mori *et al.* (1999b) より)

**Fig. 2** Time sequential drainage patterns of paddy soil (a), upland field soil (b), and forest soil (c).  
After Mori *et al.* (1999 b).

ポアとは物理的に全く異なる存在であるから透水係数も当然異なる。これによって不連続点が生じると考えられた。また、今回使用した Mualem-van Genuchten 式はこのような構造上の不連続性を想定していない。このため、マクロポアの透水特性となる  $K_s$  を不飽和透水係数の推定に使用すると解が不安定になるものと考えられた。

これらは先に軟 X 線画像から得られた各土壌の排水

傾向とよく一致する。これは概念的には二重間隙モデルといわれており, Gerke and van Genuchten (1993) は図-4 のような透水係数の分布モデルを提案している。マクロポアは体積としてはわずかであるため, pF 試験でこの特徴を抽出することは難しい。この特徴はむしろ速さを指標とする透水係数のグラフでははっきり示される。今回はこれを間隙構造の特性・数値解析両者から示せたことになる。先のデータで言うならば, (b) の曲線 3 と

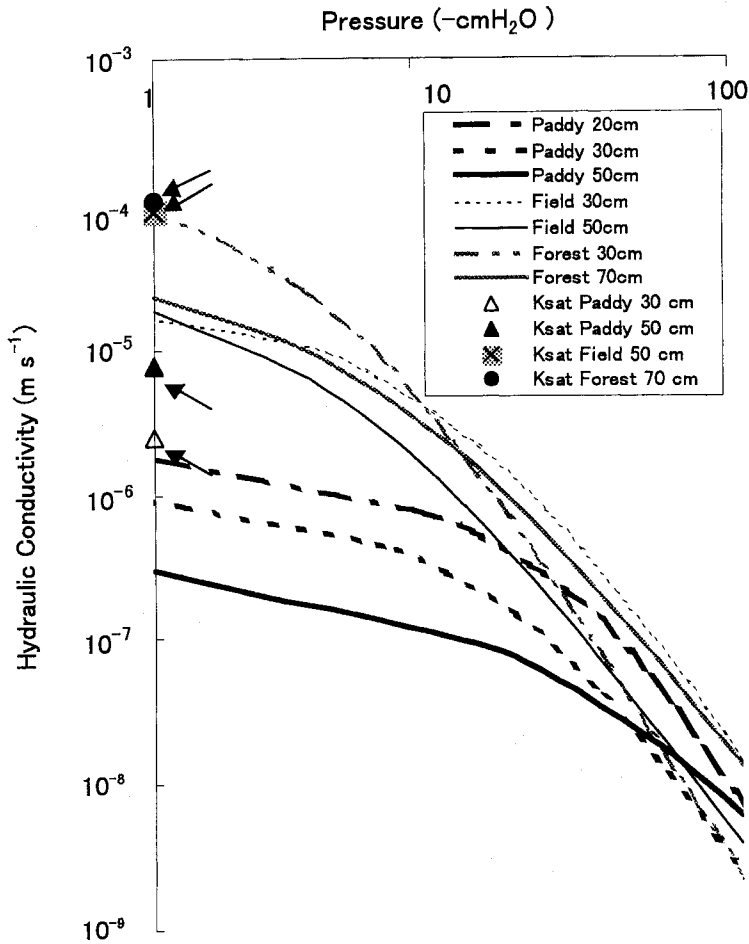


図-3 逆解析によって得られた不飽和透水係数  
矢印先のドットは実測の飽和透水係数  
(Mori *et al.* (1999 b) より)

Fig. 3 Optimized unsaturated hydraulic conductivity.  
Saturated hydraulic conductivity was drawn as single markers (see arrow). After Mori *et al.* (1999 b).

縦軸の交点に  $K_s$  がプロットされ、そこから不連続に下がった位置から曲線 2 が始まるような現われ方をしたことになる。さらに、管状孔隙を流れる飽和流の速さを造影剤の移動速度から推測すると、レイノルズ数が 10 を越え、層流から乱流への遷移状態に近いことが確認された。このように土壌の中には二重間隙構造を持つものがあり、そのうち管状孔隙を持つものについては、環境負荷物質の移動モデルを作成する際には特に考慮する必要がある。つまり、通常仮定される移流・分散方程式はもちろん、動・不動水 の概念を用いたモデル (Coats and Smith, 1964; van Genuchten and Wierenga, 1976) でも、いずれも粘性項が卓越することが仮定されており、

慣性項の影響が無視できない移動は想定されていない。また、これまでは領域を二分割するだけにとどまっていたが、今後は更にマクロポアの形状、マクロポア・マトリックス間の連続性の問題にも焦点を当てる必要があると考えられた。

## 5. まとめ

水移動は土壌間隙構造に大きく影響され、排水傾向には管状孔隙から土壌マトリックスへという順序が存在することがわかった。この変化点は粗間隙量とよく一致し、飽和から不飽和への透水係数の不連続点として現れることが逆解析からわかった。飽和時に管状孔隙が強く

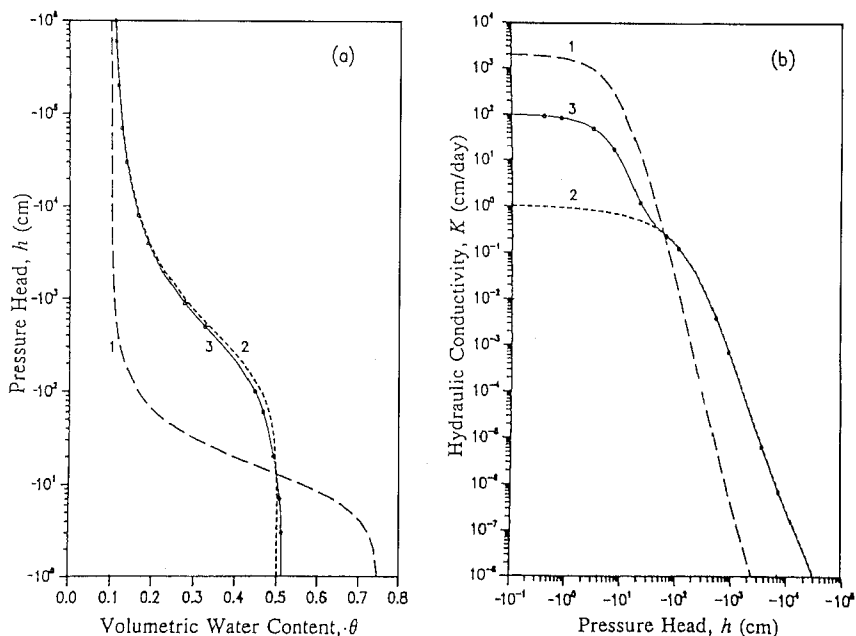


図-4 二重間隙モデルの土壌水分特性曲線 (a) と透水係数 (b)  
1: マクロポア, 2: マトリックス, 3: 土壌総体  
(Gerke and van Genuchten (1993) より)

Fig. 4 Hydraulic properties of a dual-porosity medium: (a) Retention and (b) hydraulic conductivity of macropore (1), matrix systems (2), and total porous medium (3).

After Gerke and van Genuchten (1993).

機能する場合には不連続の度合いが強く、団粒間隙が発達している場合は不連続の度合いが小さいことも示された。土壌間隙の二重構造性を立証するデータが得られ、物質移動の解明に役立つことが期待された。

また、徳永、成岡らに始まる軟 X 線造影法を動的な現象に応用し、発展の方向性を示すことができた。軟 X 線造影法は、土壌中の物質移動のメカニズムを目に見える形で示し、今まで不明であった現象を明らかにする可能性を持つ。本研究手法が土壌に関わる問題解決の一手段として利用されることを期待したい。

#### 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、軟 X 線非破壊検査装置は、京都大学農学部水環境工学分野所有のものを使用させていただいた。京都大学名誉教授、現石川県農業短期大学の丸山利輔学長、京都大学農学研究科の三野 徹教授のご提案・ご厚意に深謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

Aylmore, L.A.G. (1993): Use of computer-assisted

tomography in studying water movement around plant roots. *Advances in Agronomy*, Vol. 49: 1-54.

Bouma, J and L.W. Dekker (1978): A case study on infiltration into dry clay soil. 1. Morphological observations. *Geoderma*, 20: 27-40.

Coats, K.H., and B.D. Smith (1964): Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 4: 73-84

Eching, S.O. and J.W. Hopmans (1993): Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1167-1175.

Gerke, H.H. and M.T. van Genuchten. (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.* 29: 305-319.

Hopmans, J.W., M. Cislerova, and T. Vogel (1994): X-ray tomography of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Special Publication no.* 36: 17-28.

- Kool, J.B., J.C. Parker and M. Th. van Genuchten. (1985): Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory and numerical studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 1348-1354.
- Mori, Y., K. Iwama, T. Maruyama and T. Mitsuno. (1999 a): Discriminating the influence of soil texture and management-induced changes in macropore flow using soft X-rays. *Soil Science*, **164**: 467-482.
- Mori, Y., T. Maruyama and T. Mitsuno. (1999 b): Soft X-ray radiography of drainage patterns of structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**: 733-740.
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **12**: 513-522.
- Parker, J.C., J.B. Kool and M. Th. van Genuchten (1985): Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: II. Experimental studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 1348-1354.
- van Genuchten M. Th. and P.J. Wierenga (1976): Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**: 473-481.
- van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**: 892-898.
- 岩間憲治, 堀野治彦, 丸山利輔, 渡邊紹裕 (1996): 土壌孔隙構造の3次元分布解析と孔隙特性の定量化, *農土論集*, **182**: 103-108.
- 香川 威 (1997): X線の医学利用, X線ハンドブック, 電子科学研究所: 369-371.
- 佐々木長一 (1991): 火山灰下層土の限界間隙に関する研究, *農土論集*, **151**: 65-73.
- 佐藤照男 (1992): 不耕起栽培による低湿重粘土水田の土地改良と汎用化の展望, *農土誌*, **60** (8): 11-16.
- 徳永光一, 成岡 市, 深谷高俊 (1984): 重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟 X 線透写像についての考察—X 線透写像による土壌と間隙に関する研究 (I)—. *農土論集*, **114**: 61-68.
- 徳永光一 (1995): 土壌間隙の X 線立体造影法, 畑地農業振興会.
- 成岡 市 (1987): 軟 X 線映像による土壌孔隙の立体計測法, *農土誌* **55** (9): 29-35.
- 成岡 市, 駒村正治, 高須俊行 (1988): 立川ルームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割. 土壌の物理性, **56**: 2-13.
- 森也寸志, 志賀慎子, 岩間憲治, 渡邊紹裕, 丸山利輔 (1992): 土地利用による土壌間隙構造の差異—軟 X 線による観察を中心にして—, 土壌の物理性第 66 号: 19-27.

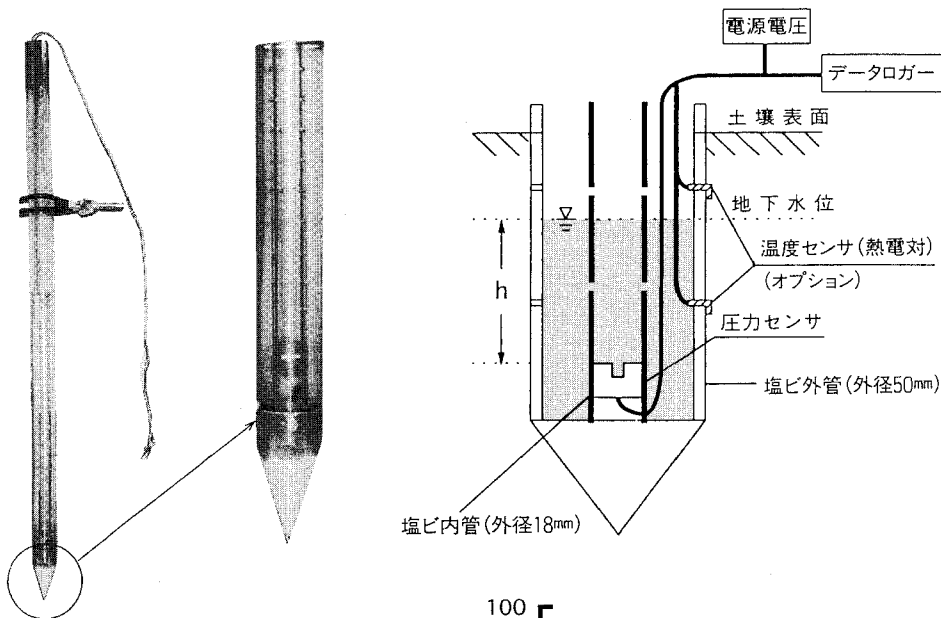
受稿年月日: 2000 年 1 月 31 日

受理年月日: 2000 年 2 月 29 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



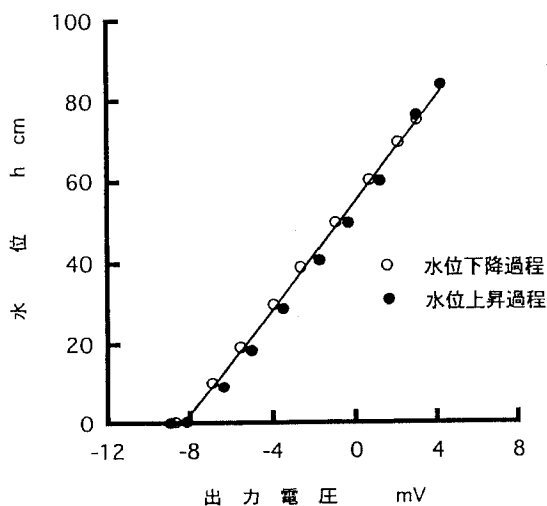
### 2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

#### 1)仕様

定格圧力	0~9.81×10 <sup>-2</sup> MPa (0~1000cmH <sub>2</sub> 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<br>延長ケーブル 5 m     |
| 2)オプション | 外管・内管1 m以上<br>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



## 土壌物理学会シンポジウムおよびポスターセッション報告

鈴木 創三\*

平成 11 年 11 月 20 日、土壌物理研究会が学会に模様替えしてから初めてのシンポジウムおよびポスターセッションが、世田谷区三軒茶屋の日本大学東京校舎で開催され、会員、非会員を交えて約 100 名が参集した。

シンポジウムのテーマは「生態系をめぐる土壌物理の諸課題」であり、このテーマに沿って以下の 5 つの講演発表が西村 拓（東京農工大学農学部）および加藤英孝（農業環境技術研究所）両氏の座長で進められた後、小林裕志（北里大学獣医畜産学部）および粕淵辰昭（山形大学農学部）両氏の司会による総合討論が行われた。

1. 「森林の土壌生態系と物質循環」  
生原喜久雄（東京農工大学農学部）
2. 「植物の根、菌根の発達と土壌物理性」  
磯部勝孝（日本大学生物資源科学部）
3. 「土壌動物の生態と土壌物理」  
中村好男（東北農業試験場畑地利用部）
4. 「土壌微生物と生態系」  
太田寛行（茨城大学農学部）
5. 「堆肥連用土壌の理化学性と作物収量」  
加藤哲郎（東京都農業試験場）

各講演者の発表内容は今後の本学会誌に掲載される予定であるため、ここでは総合討論で論議された問題等を含めて簡単に概要を紹介する。

1. 「森林の土壌生態系と物質循環」  
生原喜久雄（東京農工大学農学部）

森林の重要性に簡単に触れた後、森林の有機物分解、裸地化、CO<sub>2</sub> フラックスおよび植生・地形について説明し、最後に森林生態系の総合的な調査法を紹介した。

総合討論では、窒素固定のメカニズム、植生・地形と保水性等の土壌物理性との関係および土壌の孔隙構造と化学的緩衝能との関係の 3 つが質問された。とくに微生物が関与する窒素固定については土壌物理学の分野ではそのメカニズムについては馴染みが薄いためか、土壌化学あるいは生物学の分野で常識的な知見についての質疑が続けられた。このことは、土壌の動物や微生物の活動と土壌水分および空気中で代表される液相および気相の物理性との関係についての研究が今後残されていることを示唆していると思われた。

また、森林生態系の総合的な調査法は、斜面の上部と下部の土壌の理化学的な性質の差異から物質動態を総合

的に捉えようとしたもので、点から面へ調査域を広げた小流域での水文・水質を主体とした調査研究法である。この調査法では水系としての変化は把握出来るが、土壌層内での水分移動や溶存物質の変化がブラックボックスとして残されており、今後の課題であることが生原氏から述べられた。

2. 「植物の根、菌根の発達と土壌物理性」  
磯部勝孝（日本大学生物資源科学部）

土壌の作物生産力の改善には土壌の養分・水分・通気の供給能と生物相の改善が重要であり、植物の根や菌根の発達はこれらと深く関係があることを、菌根の作用を中心に説明された。

菌根とは土壌中のある種の糸状菌が植物の根に感染して共生的または非病原的關係を形成した状態のもので、植物の根よりもさらに細い菌糸を伸ばして養分を吸収したり、土粒子を結び付けたりする作用をもつことから、根圏土壌生態系においてはその働きが注目されている。

総合討論では菌根による団粒化作用、菌根の吸水作用およびモデル解析について質問があった。団粒化については明確な結果は得られていないが、菌根感染個体の菌根の量は多く、その耐旱性は増加することなどから吸水能力は大きいとのことであった。また、根による養分吸収は水を介して行われるわけであるが、菌根は自身の菌体を伸ばして積極的に養分を吸収する。根と菌根の吸水作用は生物的要因と物理的要因との境界の問題と認識され、それぞれの伸長速度と吸水能力とのバランスで総合的に決まってくるとの論議があった。

菌根については古くから蘭やツツジの例が知られていたが、火山灰土壌では不可吸態になりやすいリン酸の吸収についても積極的な意味を持つことができることで、新たに注目を浴びており、根圏土壌生態系における菌根の重要性が認識されたようであった。

3. 「土壌動物の生態と土壌物理」  
中村好男（東北農業試験場畑地利用部）

多種多様な動物の集合体である土壌動物のうち、土壌物理性に関係するのは土壌環境形成動物群に分類されるミミズやシロアリであること、土壌動物の生育には土壌の硬度、粒径組成、孔隙、水分および温度のような土壌物理性が制限要素となることを述べた後、畑地の耕起と作物根の伸長に関連する硬度や孔隙の問題、汚水処理装

\* 東京農工大学農学部 〒183-8509 府中市幸町 3-5-8

置中のヒメミズミズの生育条件と不飽和水の流動性との関係等について説明された。

総合討論では団粒形成や畑地と草地でのミズミズの作用の差異等について質問があった。ミズミズの糞も団粒と認識され、それには多糖類等の有機物が含まれている報告があること、耕耘によってミズミズはいなくなるため畑地よりも草場が、また同じ草場では自然生態型の不耕起造成草場のほうがその作用は大きいとのことであった。

土壌動物は土壌微生物に比べて単位面積あたりの生息数は少ないが、体が大きい。その作用によって、土壌の物理性のみならず化学性を変化させる作用も大きいことが容易に予測される。しかし、このような土壌動物と土壌物理性との関係についての報告例は少ない。今後、発展が期待される分野である。

#### 4. 「土壌微生物と生態系」

太田寛行(茨城大学農学部)

講演は、1) 元素循環と土壌微生物、2) 窒素、硫黄の循環と好気/嫌気界面の必要性、3) 火山泥流被災地における植生回復と土壌微生物の3つに分けて話された。今回、太田氏が強調した酸化-還元系における物質循環の重要性は、マクロに見れば還元的に見える水田土壌の還元層でもミクロに見れば硫酸還元菌が存在するような酸化-還元系が存在することを示したもので、太田氏が在籍した東北大学農学研究所の土壌微生物研究室で行われた硫酸還元菌や土壌団粒の内部と外部の微生物相の研究成果をさらに集大成した概念と理解された。

総合討論では直接DNA法で検知される微生物が間接的な培養法では検知されないような土壌微生物の測定法等についての質問があった。直接法と間接法の測定結果の差は、培地の選択性、DNAはあるが機能は持っていない、等の問題があることが説明された。

また、逆に太田氏からの酸化還元の場合としての物理的モデルはとの質問に、座長の粕淵氏から田んぼは好気的な湛水層(酸化層)と嫌気的な還元層から成る大きな団粒と考えられることが述べられ、菊地氏(帯広畜産大学)からはビナツボの泥流の微生物相の遷移の検討に物理的性質も加えると酸化-還元系の解析が出来ることが指摘された。

#### 5. 「堆肥連用土壌の理化学性と作物収量」

加藤哲郎(都農試 大島園芸技術センター)

立川市にある東京都農業試験場で20年間にわたって牛糞バーク堆肥を連用して来た腐植質黒ボク土の畑地土壌の理化学性の変化とキャベツ、ダイコン等の収量との関係が以下のように述べられた。

堆肥連用区土壌の理化学性は対照区に比べて、気相の増加、土壌の膨軟化、pF 1.5~2.7の有効水分含量の増加

全炭素・全窒素含量の増加、pH・EC・交換性カリ含量への影響が認められた。また、堆肥連用区のキャベツおよびダイコンの収量は2作目に対照区より10~30数%程度高くなったが、それ以降はその差は開かなかった。

総合討論では深さ20~30cmにできる硬盤のコーン指数が堆肥連用区では対照区に比べて小さい原因として、pH低下に伴うセメンティング物質や粘土鉱物の種類の影響等が論議され、多湿黒ボク土と普通の黒ボク土とでは硬盤層の硬度が異なることが指摘された。また、堆肥連用区の窒素利用率、土壌生産力評価のための3要素連用試験とpH低下の関係についても質問があり、堆肥連用区の窒素利用率は化学肥料と共用した方がよいこと、3要素試験区の収量低下の原因はむしろpH低下によるものと指摘されることが多いことが、長期的な現場試験を行う上で問題となることが述べられた。

今後は、このような土壌物理性の変化がどのように化学性の挙動に影響するかを土壌粒子表面の吸着水のオーダーから重力水のオーダーまで、根による水の吸収のリズムミカルな運動を含めながら検討する可能性が残されていると思われた。

以上のような5課題についての総合討論の後、若手およびベテラン研究者の藤川、吉田両氏からコメントを頂いた後、「土壌生態系の研究には物理性に限らず様々な分野からのアプローチが可能であるが、土を扱う以上、各分野相互に関係を深くして実態に迫ることが大切と考えている。」という粕淵氏のことばをまとめとして、シンポジウムは幕を閉じた。

最後に、今回から新たに行ったポスターセッションについて簡単に報告する。

企画側として留意したことは、1) 土壌物理の最前線、最先端の研究を行っていると自負している学会員に発表の場を与えること、2) 発表者および準備側の両方にとって準備が比較的簡単なこと、以上の2点である。このため、テーマは「土壌物理研究の最前線」とし、ポスターは模造紙にA4サイズの図表を5~6枚程度並べたもの、パネルも衝立てではなくテーブルにした。

以上のような内容で会員に呼び掛けたところ、1か月余りの公示、切り期間内に10余りの課題の参加が集まり、発表当日も極めて盛況で、熱心な質疑が見られた。また、その内容は土壌の水分、塩類、微生物、粘土鉱物、孔隙および有機物-団粒等と広い範囲に渡っており英文の発表も1件含まれていた。惜しむらくは発表時間帯が昼休みと重なって短かったために、ポスターセッションの一番の利点である討論時間が若干短くなってしまったことである。次回はこの点を改善して、行うとよいと思っている。

## 世界の水田 日本の水田

田 淵 俊 雄 著

山崎農業研究所 1999 年発行 (農山漁村文化協会発売)

A 4 版 220 ページ 2,500 円

著者の「水田のことをもっと多くの人に知ってもらいたい」との思いから、写真と図表とを多く用いて、本書が刊行された。平易な文章で書かれているので、水田と言われて春の耕起・代掻き・水張り田・田植え、秋の稲刈り・稲架(はざ)かけされた刈り稲などの風景を直ぐに思い浮かべられる方々ならば誰でもすんなりと読める。土壌物理や農業土木を広く一般の人が知るようにしてくれる書がなかなか現れないといわれてきたが、本書はそれを払拭する一冊であるといえる。

著者は水田の浸透、排水、水質、環境などに関する実証的な学術研究業績を多大に積まれて来られた方である。それらがベースにあってこそであるが、本書の内容は分かり易くて歯切れのよいものとなっている。

先に、本書でも紹介されている筑波水田工学研究会のメンバーが中心となり、「水田のことをもっと多くの人に知ってもらいたい」の前段階である「水田のことをもっと多く知りたい」との思いで研究調査を行い、その成果が英文の「Paddy Fields in the World (農業土学会刊)」として出版されている。著者は研究調査の統括者、英文書の編著者であった。評者も、当研究会のメンバーに加えて載っているところから、英文書の一部を執筆させて戴いた。本書における世界の水田の部分の多くはその英文書をベースにされている。

本書は3部構成であり、各部は次のような観点から記述されている。

「第1部 水田とは何か—水田工学の視点から」では、水田の起源としくみ、水田の多種多様なタイプと農作業の機械化のための圃場整備、漏水の激しいザル田に端を発する浸透研究の展開と浸透制御法、機械の高効率利用のための排水改良などが記述されている。「第2部 世界の水田—風土と歴史が生み出す多様性」では、先ず日本とはかなり異なる5つの大区画水田地帯が紹介されている。それらは、塩除去のための巨大蒸発池を持ったオーストラリア乾燥地のもの、塩を含む水の排水と水源の地下水依存の問題を持ったアメリカ乾燥地のもの、広大な湿地に拓かれたワニ保護と共存するブラジルのもの、直播栽培・大規模経営のイタリアのもの、フラミンゴ保護と共存するフランスのものである。

次いで、日本とかなり類似する水田地帯や稲作状況についていくつか。それらは、大峡谷一帯の大斜面に極小水田が所狭しとびっしり張り付いたフィリピン・イフガオ地方の世界文化遺産棚田地帯、ヒンズー神の下で規則を決めて守り合うという伝統を千年も引き継ぐ水管理組織を持ったインドネシア・バリ島の美しい棚田地帯、侵食土砂のダム堆積に悩まされつつも発達したダム灌漑水路網を持ったインドネシア・ジャワ島の水田地帯、田に直接降る雨水を水源とする天水田や深湛水でも十分生育できる浮稲の栽培水田が広がるタイの水田地帯、春秋戦国時代末期に堰の礎が築かれた四川省・都江堰掛かりの水田地帯や湖南省・長江南部地域、黒竜江省・三江平原地域および香港近接の広州市郊外地域の稲作状況などである。この他に、アジアの稲作技術をそのまま導入できない西アフリカの稲作状況も。

「第3部 新しい課題—環境と食料と私たち」では、新しい「食料・農業・農村基本法」の大きな柱ともなった多面的な機能に代表される水田と環境とのかかわり、窒素成分の流れを事例とした水田の水質環境、文化・情操、景観・水生生態系維持、自然保護・保全および国土保全のための「神々の住む棚田」、「棚田ルネッサンス」、「名月の里、おぼすて棚田」、「田植え唄フェスティバル」などのある棚田地帯における保全の取り組みと棚田オーナー制度、丘陵地の谷間にある谷津田の保全の必要性、21世紀に向かって益々日本の「水田」を保持していかねなければならないことなどが記述されている。

特に、第3部の水田の水質環境の部分は、著者の学術業績の積み重ねならではのところといえる。また、「世界の水田」の部分は多くの読者がかなりの臨場感を持って読めるといえる。そういえるのも、イフガオ地方、バリ島、ジャワ島、タイ、四川省および「名月の里、おぼすて棚田」における著者の調査に、評者が同行、論議にも加わらせて戴いたからだろう。

我々人類はこれまで地球とその環境は壊れないもの、傷まないものとして、農地を開き、農業を営んできた。日本でも、農業は環境と調和している産業であると思ひ込みのもとで、極めて集約的な農業が特に多肥料・多農薬・多エネルギーの体系で長らく展開されてきた。そ

の結果、農業・農村で多くの環境問題が発生することとなった。これは地球とその環境への思遣りや労りをほとんど感じて来なかったからである。

今日、「環境と調和する農業」、すなわち「地域の自然的固有的環境の保全を大切に持続的農業」の重要性が叫ばれている。日本を含むモンスーン・アジアにおい

て、これを達成できるのは「水田農業」ではないだろうか。21 世紀・環境の時代を迎えるに当たって、アジアではこの視点の理解が、特に都会人において必要である。本書により、その理解を深めることができる。多くの方々に一読をお勧めする。

河野英一（日本大学生物資源科学部）

I. 1999年度第1回評議員会

開催日時: 1999年8月5日(木) 12:10~14:00  
 開催場所: 明治大学リパティタワー 151158教室  
 出席者: 河野, 渡邊, 佐藤, 矢沢, 粕淵, 古賀,  
 軽部, 宮崎, 成岡, 井上, 取出, 塩沢,  
 事務局(鈴木, 重松, 石川), 他(委任状  
 6)

議事

1. 会則変更について  
 「土壌物理研究会」から「土壌物理学会」への名称  
 変更に伴う会則変更について討議され, 下記Ⅲ. の  
 「土壌物理学会会則」のアンダーライン部分を変更  
 した。
2. 学会の英名変更について  
 会則第1条の学会英文名は「Japanese Society  
 of Soil Physics」と改められた。
3. 学会誌「土壌の物理性」の英名変更について  
 会則第3条2項の会誌名は「Journal of the Jap-  
 anese Society of Soil Physics」と改められた。
4. 会誌のA4版化について  
 経費(郵送料, 印刷代, 紙代等の割増し), 保管等  
 の問題, その他多くの反対意見が出され, 当面は現  
 状で行くこととなった。
5. 編集委員会報告  
 編集委員長より, 会誌発行等の進捗状況の報告と  
 投稿規定, 執筆要領等の改訂に関しての報告がなさ  
 れた。
6. 40周年記念事業の件について
7. 学術研究団体登録申請の件について  
 会長より, 学会名称変更に伴う学術会議学術研究  
 団体登録の申請を行った旨について報告がなされ  
 た。
8. その他

II. 1999年度第2回編集委員会

日 時: 1999.10.15(金) 15:00-18:50  
 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), 加藤英孝, 島田 清, 関 勝寿, 原口

暢朗, 青木正雄(編集幹事)

報告

1. 会誌第82号について  
 編集・発行の経過が編集幹事から報告された。
2. 第42回シンポジウムについて  
 シンポジウム(11月20日開催)のプログラムと  
 準備状況が会長から報告された。

議事

1. 会誌第83号の投稿原稿の状況について  
 現在閲読中の原稿は多いが, 閲読が完了した原稿  
 が少ないので, もう少し経過を見ないと目次案がま  
 とまらないことが編集幹事から報告された。第83  
 号のための編集委員会はこのあと特に開かず, 見通  
 しができた段階でEB on ML(編集委員会メーリン  
 グリスト)で連絡・調整することにした。
2. 「土壌の物理性」投稿規定について  
 あらかじめEB on MLに流しておいた改定案を  
 たたき台にして討議した。時間が足りなかったの  
 で, 一旦取りまとめてから引き続きEB on MLで  
 意見交換を行うことにした。10月末まで編集委員  
 会で討論を続けてこの改定案をまとめ, 11月に入っ  
 てから評議員にメールで改定案を流し, 11月20日  
 のシンポジウムの際に開かれる評議員会で決めるこ  
 ととした。
3. その他
  - 1) 従来の「シンポジウム特集号」と今後の方向に  
 ついて(評議員会に報告する)
    - ・シンポジウム講演者には, いずれかの投稿区分  
 で, 講演後できるだけ早く投稿してもらおう。
    - ・投稿原稿は各投稿区分に従って取り扱い, 従来の  
 ように特集号にまとめることをせず, なるべく  
 早く掲載する。その際, 脚注に当学会シンポジ  
 ムで発表したことを記す。
    - ・従来の「総合討論」に替えて「シンポジウム報告」  
 を掲載する。
  - 2) 閲読報告書の書式の見直し案
  - 3) 今後の検討事項について
    - ・原稿執筆要領, SI単位の使用例
    - ・投稿規定と原稿執筆要領の英文化

### Ⅲ. 会則の新旧対比

アンダーライン部分が会則の変更部分。

#### 土壌物理学学会会則

- 第1条 本学会は土壌物理学学会 (Japanese Society of Soil Physics) と称する。
- 第2条 本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り、農業技術及び環境科学の発展に貢献することを目的とする。
- 第3条 本学会はその目的を達成するために次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
  - (2) 学会誌「土壌の物理性 (Journal of the Japanese Society of Soil Physics)」並びにその他の印刷物の発行
  - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
  - (4) その他、本学会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本学会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。会員となるには、評議員会の承認を受けなければならない。退会するには、その旨を本学会に書面により届け出なければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- |           |        |         |
|-----------|--------|---------|
| 正会員       | 年額     | 5,500円  |
| 学生会員      | 年額     | 3,000円  |
| (大学院生を含む) |        |         |
| 賛助会員      | 一口年額   | 22,500円 |
| 購読会員      | 会誌年額   | 7,000円  |
| 広告料       | 賛助会員   | 15,000円 |
|           | 賛助会員以外 | 22,500円 |
- 第6条 本学会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は次による。
- (1) 会長1名、副会長1名、編集委員長1名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (2) 評議員  
イ 15名 正会員の中から互選する。  
ロ 3名以内を会長が正会員の中から委嘱する。
  - (3) 会計監査 2名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (4) 幹事 若干名  
若干名の庶務、会計、編集の幹事を会長が委嘱

#### 土壌物理研究会会則 (旧名称会則)

- 第1条 本会は土壌物理研究会 (Research Association of Soil Physics, Japan) と称する。
- 第2条 本会は土壌の物理性を中心とする試験研究の発展と農業技術への貢献を図ることを目的とする。
- 第3条 本会はその目的を達成するため次の事業を行う。
- (1) 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
  - (2) 土壌の物理性 (Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan 会誌という) 並びにその他の印刷物の発行
  - (3) 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
  - (4) その他本会の目的を達成するために必要な事業
- 第4条 本会の会員は、正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。会員となるには評議員会の承認を受けなければならない。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- |           |        |         |
|-----------|--------|---------|
| 正会員       | 年額     | 5,500円  |
| 学生会員      | 年額     | 3,000円  |
| (大学院生を含む) |        |         |
| 賛助会員      | 一口年額   | 22,500円 |
| 購読会員      | 会誌年額   | 7,000円  |
| 広告料       | 賛助会員   | 15,000円 |
|           | 賛助会員以外 | 22,500円 |
- 第6条 本会に次の役員をおく。任期は2年とする。ただし、3期連続の重任は認めない。選出方法は別に定める。
- (1) 会長1名、副会長1名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (2) 評議員  
イ 15名 正会員の中から互選する。  
ロ 3名以内 会長が委嘱する。
  - (3) 会計監査 2名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (4) 幹事 若干名  
会長委嘱

する。

第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。

- (1) 総会は本学会の最高議決機関であって、事業計画、予算・決算、会則の変更等を決定する。総会は正会員及び学生会員で構成される。
- (2) 評議員会は、会員の選挙によらない役員の選出、総会議案、その他の重要事項を検討する。評議員会の議長は会長がこれにあたる。
- (3) 総会及び評議員会の議決は委任状を含む多数決とする。ただし、会則の変更は、総会出席者の3分の2以上の賛成を要する。

第8条 本学会の会務は、評議員会及び総会の議を経て、会長、副会長、編集委員長及び幹事がこれを執行する。会務執行に必要な規程は別に定める。

第9条 本学会に次の委員会をおく。

- (1) 選挙管理委員会  
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
- (2) 編集委員会  
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、学会誌その他の印刷物の編集に当たる。

第10条 本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてゑる。本学会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。

附則 (1)本学会の連絡先は、これを当分の間次に置く。

〒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

(2)本会則は、1999年4月1日より施行する。

(1999. 8. 5 改正)

第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。

第8条 本会に次の委員会をおく。

- (1) 選挙管理委員会  
正会員の中から評議員会によって選出され、本学会の評議員選挙を管理する。
- (2) 編集委員会  
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、会誌その他の印刷物の編集に当たる。

第9条 本会の経費は会費その他の収入を持ってあてゑる。本会の会計年度は毎年4月1日に始まり翌年3月31日に終わる。

第10条 本会の会務執行に必要な規程は別に定める。

(1996. 9. 30 改正)

# 土 壤 物 理 学 会

(1999年4月1日~2001年3月31日)

## 事 務 局

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 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)

## 編 集 委 員 会

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	(東京農工大学農学部)
	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	(東京農業大学農学部)

## 評 議 員

委 嘱	大 塚 紘 雄	(神戸大学農学部)
	佐 藤 泰 一 郎	(高知大学農学部)
北 海 道	吉 川 省 子	(農林水産省四国農業試験場)
	波 多 野 隆 介	(北海道大学大学院農学研究科)
	菊 地 晃 二	(帯広畜産大学畜産学部)
	相 馬 尅 之	(北海道大学大学院農学研究科)
	矢 沢 正 士	(北海道大学大学院農学研究科)
東 北	粕 渕 辰 昭	(山形大学農学部)
	古 賀 潔	(岩手大学農学部)
関 東	長 谷 川 周 一	(農林水産省農業環境技術研究所)
	軽 部 重 太 郎	(茨城大学農学部)
	塩 沢 昌 昌	(筑波大学農林工学系)
	宮 崎 毅	(東京大学大学院農学生命科学研究科)
中 部	天 谷 孝 夫	(岐阜大学農学部)
近 畿	久 馬 一 剛	(滋賀県立大学環境科学部)
中国・四国	成 岡 市	(岡山大学環境理工学部)
	井 上 光 弘	(鳥取大学乾燥地研究センター)
九 州	取 出 伸 夫	(佐賀大学農学部)



## 一編集後記一

### 土壤物理学会ホームページについて

今期、はじめて編集委員のお手伝いをさせていただいています。

これまで土壤物理研究会（黄表紙）のホームページをボランティアで管理されていた溝口先生が、昨年4月に三重大学から東京大学に異動しました。これに伴い、昨年11月の総会で土壤物理学会のホームページを東京大学で正式に立ち上げることが提案され、正式に承認されました。

新しいホームページの URL は、

<http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jssp/>

です。このページの更新の実質的な管理は私が担当しています。会則、英文会則、入会申込み用紙、「土壌の物理性」投稿規定、英文投稿規定、原稿送り状を公開しています。ホームページの管理は編集委員の仕事とは別であると考えていますが、事務局、編集委員会からの依頼により、情報を更新していく予定です。

どうぞよろしく申し上げます。

＜編集委員 関 勝寿（東京大学大学院）＞

### 土壤物理学会

事務局	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）
	編集委員会	委員長
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（東京農工大学農学部）
		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（東京農業大学農学部）

土壌の物理性 第83号（会員配布） 2000年3月15日発行

### 発行 土壤物理学会

〒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「土壤物理学会」

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

# 土壤をそのまま測定!!

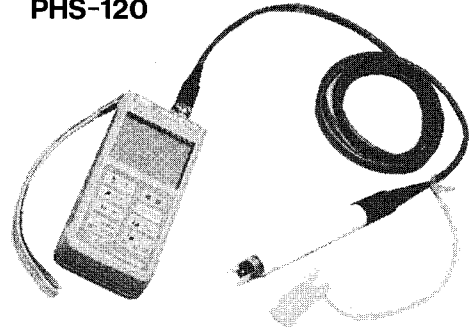
**NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 土壤用硝酸イオンメーター**

NOS-120



**pH 土壤挿入式 pH 計**

PHS-120



**EC 土壤用 EC メーター**

PK-33



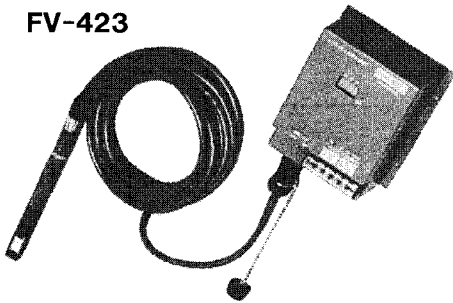
**pF セラミックス土壤水分計**

pF-33



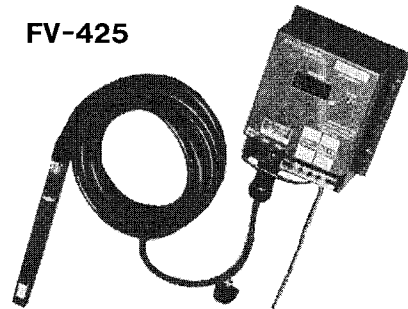
## 土壤 pF を連続測定及び自動灌水!!

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)

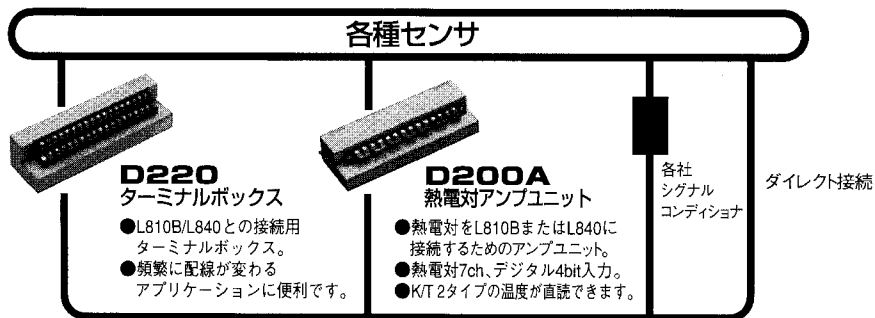


**株式会社 藤原製作所**

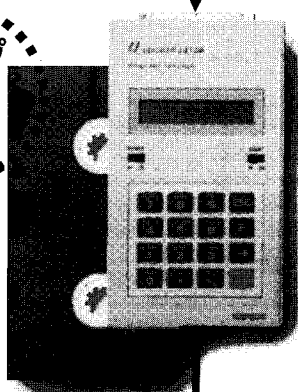
〒114 東京都北区西ヶ原1-46-16

TEL 03(3918)8111(代)

F X 03(3918)8119



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

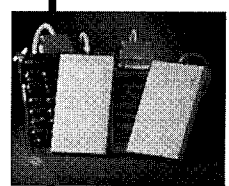
- L810B/電圧入力・長期間タイプ ●L840/電圧入力・超高速タイプ
- L822/熱電対入力・温度記録タイプ ●L830/測温抵抗体入力・温度記録タイプ ●L835/温湿度センサ入力・温湿度記録タイプ

RS-232C



メモ리카ード

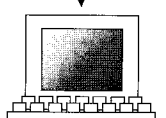
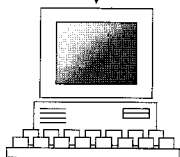
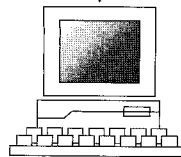
- L810B、L840で使用できます。
- JC128、JC256、JC512、JC1024、JC2048



### 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。



**UNIPULSE**

ユニプルス株式会社 ※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

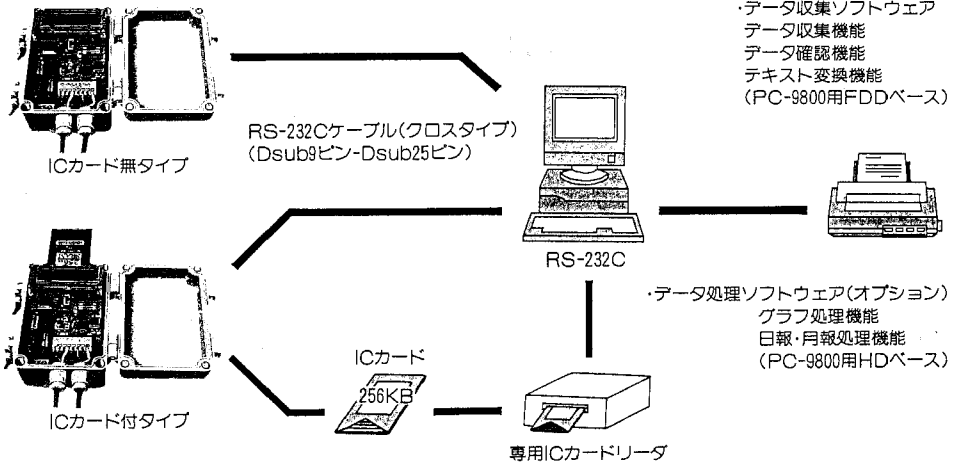
センサ入力固定型フィールドデータロガー

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

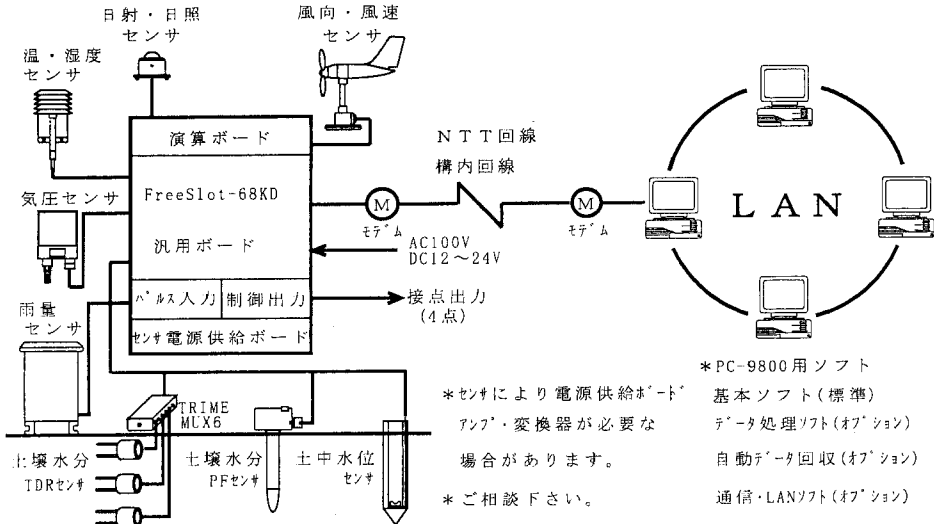
<データ収集とデータ処理方法>



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Windows 95対応ソフトウェア (オプション)

開発・製造元 **M-C** 株式会社 エム・シー・エス  
〒064-0804 札幌市中央区南4条西10丁目1004番1 南4条ユニハウス  
TEL 011-562-5547 FAX 011-563-2555

## 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〉



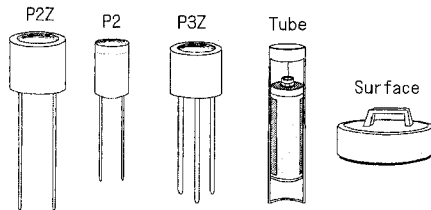
### ●特長

- 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

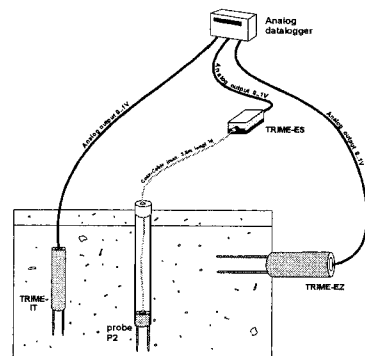
土壌、石材、穀物、また水による自然災害の常時モニタ、構造物や土壌の含水量モニターあるいは森林、水源地帯や農業計画の一環としての含水測定、モニターなど

### 【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

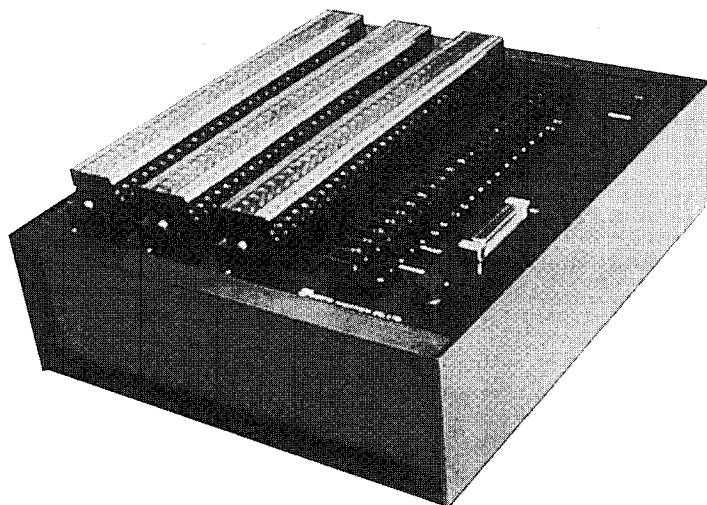
★東京支店 応用計測機器グループ

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

★利府事業所 営業部

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

## 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 数きい値積算 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

### 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. 83

March 2000

---

## Contents

<b>Foreword</b> .....	J. KARUBE	1
<b>Original Papers</b>		
Crack Pattern Analysis for Moisture Prediction in Drying Dredged Material .....	P.O. BODUN, S. SHIBUSAWA, A. SASAO and K. SAKAI	3
Land Use Change followed by Soil Erosion in Songkhla Lake Basin .....	M. KOMAMURA, K. PHOUANGPHET, C. TANAVUD and C. YONGCHALERMCHAI	17
Effects of Long-Term Application of Organic Matter and Rotary Tilling on Physico- Chemical Properties of Surface Soil and Crops Yields .....	T. KATO, I. HASEGAWA and K. YONEDA	29
Field Capacity of a Volcanic Ash Soil—the real conditions .....	S. HASEGAWA	41
<b>Review</b>		
Ecology of Soil Animals and Soil Physics .....	Y. NAKAMURA	47
<b>My Research</b>		
Characterizing Drainage Process of Structured Soils using Soft X-ray Radiography .....	Y. MORI	59
A Report of Symposium and Poster Session .....	S. SUZUKI	67
<b>Book Review</b> .....	E. KOHNO	69
<b>Announcements</b> .....		71
<b>Editor's Postscript</b> .....		75

---

## 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