

# 土壌の物理性

第86号

2001年1月

---

## 論文

- 黒ボク上における作土層の深さが作物収量と土壌の理化学性に及ぼす影響  
.....加藤 哲郎・米田 和夫... 1
- Improvement of Physical Condition of Soil with Cattle Slurry Fertilization  
—Mechanical Strength and Water-stability of Soil Aggregates  
.....W. KATO, H. KOBAYASHI, T. SUGIURA and M. BABA...11
- 浚渫土の基本的理化学性と乾燥効果  
.....金 原台・矢橋 晨吾...19

## 総説

- 土壌水のヒステリシス特性: その実態とモデル化の現状  
.....吉田 正則...25
- 植物の根, 菌根の発達と土壌物理性  
.....磯部 勝孝...39

## 研究紹介

- 常陸太田水分試験地におけるマクロポアの形態的特徴と選択的流出経路の分布に関する研究  
.....野口 正二...47

## 書評

- 「環境地水学」 .....井上 光弘...57

会務報告.....59

編集後記.....63

---

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)

### 「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。

## 黒ボク土における作土層の深さが作物収量と 土壤の理化学性に及ぼす影響

加藤哲郎\*<sup>1</sup>・米田和夫\*<sup>2</sup>

Effects of Cultivated Soil Depth on Vegetable Crops Yield and  
Physico-chemical Properties in Andsol Farm

Tetsuo KATO\*<sup>1</sup> and Kazuo YONEDA\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan Agriculture Experimental Station

\*<sup>2</sup> College of Bioresource Sciences, Nihon University

### Abstract

1. The effect of combination of cultivated soil depth and amount of fertilizer on vegetable crops yield and soil

The experiments had two levels of fertilizers, standard and 1.5 times the standard, and three levels of cultivated soil depth, 15 cm, 25 cm and 40 cm.

1) The yield of broccoli (*Brassica oleracea* L.) was larger in the deep cultivated soil plots, but yield was decreased in the 1.5 times fertilizer plot.

2) The yield of Komatsuna (*Brassica rapa* L.) in the deep cultivated soil plot with the standard fertilizer was greater than 1.5 times fertilizer plot.

3) In the 1.5 times fertilizer plots, leaching of CaO and MgO was high, pH of soil was low, and the EC was high.

4) Available P was lower in the deep cultivated soil regardless of the amount of fertilizers.

6) In cultivated soil depth of 15 cm and 25 cm, It was suggested that standard fertilization quantity was too many.

2. The effect of combination of cultivated soil depth and a low amount of fertilizer on vegetable crops yield and soil.

The experiments had two levels of fertilizers, standard and 0.8 times the standard, and three levels of cultivated soil depth, 15 cm, 25 cm and 40 cm.

1) Cucumber (*Cucumis sativus* L.) was increased the yield from the 0.8 times level in the shallow cultivated soil plots, but the yield in the deep cultivated soil was higher in the standard fertilizer.

2) The yield of broccoli in the 0.8 times fertilizer plot was larger in the shallow cultivated soil plots, and did not differ much in the deep cultivated soil plot.

3) The EC value did not differ much in the cucumber experiments, but they were clearly higher in the 0.8 times fertilizer plots in broccoli.

4) Available P, pH and the bases tended to be higher in the shallow cultivated soil plots.

5) Available P and the bases were low in the 0.8 times fertilizer plots, but they tend to be accumulated in the standard fertilizer plots.

<sup>1</sup> 東京都農業試験場

<sup>2</sup> 日本大学生物資源科学部

キーワード: 作物収量, 黒ボク土の理化学性, 作土層の深さ, 施肥量

**Key words** : amount of fertilizer application, cultivated soil depth, physico-chemical properties of andosol, yield of vegetable crops

## 1. はじめに

東京都内の農耕地の調査・分析を行ったところ、野菜畑で問題になったのは、作土の浅層化と多肥に由来する養分の蓄積がみられたことであった(都農試, 1978, 1979~1998)。特に、作付け回数とロータリー耕耘回数の多い野菜畑では、耕盤が形成され、作土層が浅くなり、農作物に影響の出ていることは、多くの農家が認めることである(農水省, 1996, 1979)。また多肥による養分過剰も農作物に害を与えることがひろく知られている(鈴木, 1987)。

そこでこの作土層の深さを人為的に変え、作土層の深さが作物や土壌の理化学性に与える影響について調べた。また現実にも多肥栽培が行われていることを考慮し、作土層の深さと多肥を組み合わせて、作土層の浅い場合の多肥が作物ならびに土壌に与える影響について検討した。

さらに耕盤の形成によって作土層が浅くなると土壌中の水の動きが制限されることから標準的な施肥であっても、養分の蓄積がおこる可能性がある。作土層の深さと減肥を組み合わせて、作土層が浅くなった場合の施肥のあり方についても考察したものである。

本実験では、1992年から1993年まで作土層の深さと標準施肥・多肥との組み合わせについて、1996年に作土層の深さと標準施肥・減肥との組み合わせについて、同一の実験区を用いた連用実験として行った。

## 2. 実験方法

### 1) 作土層の深さと標準施肥・多肥との組み合わせ(第1実験)

#### (1) 作土層の作り方と土壌条件

本実験では作土層を15 cm, 25 cm, 40 cmの3水準とした。栽培圃場は、腐植層が35 cm程度の表層腐植質黒ボク土であり、40 cm区は淡色黒ボク土(一般的にいう赤土)と腐植土が混ざる形になるため、各区が同じ条件になるように地表面から約50 cmにあたる部分までを深耕機およびスコップを用い耕耘混和した。その後約15 cmと25 cmの深さにあたる表土を一度取り去り、露出した面を上から突き固め、山中式硬度計で厚さが10 cm以上にわたって硬度20 mm以上になるように耕盤を作った。さらに一度取り除いておいた土壌を埋め戻し、作土が15 cm, 25 cmになるようにした。40 cm区においては耕耘した状態のままにした。各区とも実験ごとに耕

盤を作ることなく、毎作前にそれぞれ15 cm, 25 cm, 40 cmまでロータリー耕耘機とスコップで耕耘した。作土層は再度作成せず、継続して作付けた。

#### (2) 実験条件(実験区の設定)

15 cm・標準施肥区, 25 cm・標準施肥区, 40 cm・標準施肥区, 15 cm・多肥区, 25 cm・多肥区と40 cm・多肥区の計6区を設けた。なお標準施肥区は東京における標準施肥量とし、多肥は標準施肥量の50%増とした。

#### (3) 供試作物、栽培規模と栽培密度

1992年は秋作としてブロッコリー(緑嶺, サカタのタネ)を1993年は秋作としてコマツナ(寅次郎, トキタ種苗)を供試した。1992春作はチンゲンサイを供試したが、病虫害の被害の影響が大きかったために除外した。1993年春作は無作付けであった。1区当たり5.6 m<sup>2</sup>とし、ブロッコリーは各区21株定植した。コマツナは全面散播方式であった。

#### (4) 栽培期間(定植期または播種期から収穫期まで)

ブロッコリーは9月10日に定植し、12月6日から12月17日までの間収穫をした。コマツナは10月27日に播種し、12月21日に収穫をした。

#### (5) 施肥条件

堆肥は1990年に1 ha当たり牛フンバーク堆肥10 tを一度施用し、その後は施用せずに、1991年までは、1992年からの実験と同様の施肥量を各区に施用し、コマツナとチンゲンサイを春・秋に栽培し、実験は1992年から開始した。石灰質資材は苦土入り炭酸カルシウム(苦土石灰)を毎作ごとに1 ha当たり2 t施用した。

施肥量は、N: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: K<sub>2</sub>O成分(kg/ha)として、標準施肥区のブロッコリーが200:200:200, コマツナが150:150:150, 多肥区のブロッコリーが300:300:300, コマツナが225:225:225となるように、施肥方法は高度化成肥料を全面に散布し、それぞれの深さまで耕耘混入した。

実際の肥料としては、ブロッコリーの標準施肥の各区に化成42号(14:14:14)を元肥で600 g, 追肥で200 gずつ施用。多肥の各区に化成42号を元肥で900 g, 追肥で300 gずつ施用した。

コマツナの施肥は元肥のみで、標準施肥の各区に化成42号を600 gずつ、多肥の各区に化成42号を900 gずつ施用した。

### 2) 作土層の深さと標準施肥・減肥との組み合わせ(第2実験)

#### (1) 実験畑の条件



第1実験で使用した畑を、1994年、1995年の2年間、施肥量を標準施肥量として、作付け前に作土層にあわせた耕耘深度で耕耘し、キュウリ、チンゲンサイ、ブロッコリー、コマツナの栽培を行った後、1996年から第2実験を開始した。

#### (2) 実験条件 (実験区の設定)

15 cm・標準施肥区、25 cm・標準施肥区、40 cm・標準施肥区、15 cm・減肥区、25 cm・減肥区と40 cm・減肥区の計6区を設けた。2年間を経て、肥料分の影響は減少したものと考えられるが、前実験の標準施肥区を減肥区に、多肥区を標準施肥区とし、多肥区から減肥区への急激な変化は避けるようにした。

なお標準施肥は東京における標準施肥量を使用した。減肥は標準施肥量の20%減とした。

#### (3) 供試作物、実験規模と栽植密度

1996年の春作としてキュウリ(南極2号、トキワ種苗)を、1996年の秋作としてブロッコリー(しげもり、協和種苗)を供試した。1区当たり5.6 m<sup>2</sup>とし、キュウリは各区12株定植、ブロッコリーは各区21株定植した。

#### (4) 栽培期間 (定植期または播種期から収穫期まで)

キュウリは5月8日に定植し、5月29日から7月24までの間収穫をした。ブロッコリーは9月20日に定植し、11月15日から12月8日までの間収穫をした。

#### (5) 施肥条件

石灰質資材は苦土石灰を毎作ごとに1 ha当たり2 t施用した。耕耘前に全面散布し、15 cm、25 cm、40 cmまでロータリー耕耘機を用いて耕耘混入した。

施肥量は、N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O成分(kg/ha)として、標準施肥区のキュウリが250:300:250、ブロッコリーが200:200:200で、減肥区のキュウリが200:240:200、ブロッコリーが160:160:160となるように、高度化成肥料と硫酸、過石、硫加を組み合わせる施用した。

実際の肥料としては、キュウリの標準施肥の各区に元肥として、化成42号を600 g、過石を494 g、追肥で硫酸133 g、硫加56 gずつ各2回施用。減肥の各区は元肥として化成42号を480 g、過石を395 g、追肥で硫酸107 g、硫加45 gずつ各2回施用した。

ブロッコリーは、標準施肥の各区に化成42号を元肥で600 g、追肥で200 gずつ施用。減肥の各区に化成42号を元肥で480 g、追肥で160 gずつ施用した。

#### 3) 土壌採取・試料調整方法・分析値表示方法(鬼鞍, 1986; 前田, 1986 a)

化学分析用の土壌の採取は、0~15 cmの深さで、各実験区から3点ずつ採取し、それを均一に混ぜ合わせた。その後風乾し、2 mmの篩を通した後、分析用試料とした。また、pH(H<sub>2</sub>O)、pH(KCl)、電気伝導度(EC)は

風乾土壌を用いて分析した後そのまま表示し、全炭素(T-C)、全窒素(T-N)、陽イオン交換容量(CEC)、可給態りん酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、交換性石灰(CaO)、交換性苦土(MgO)、交換性カリ(K<sub>2</sub>O)は、風乾土壌を用いて分析した後水分ファクターを掛け合わせて乾土当たりで表示した。

#### 4) 分析方法

(1) 三相分布(固相、液相、気相)、仮比重(丹原・美園, 1972 b) 100 mL採土管に圃場で深さ5~10 cmの間から生土を3連で採取し、実験室において電子天秤で生土重を測定した後、実容積計(大起理化製)を用いて実容積(固相+液相)を測定した。その後さらに通風乾燥機により、100℃で24時間乾燥し、乾燥土重を測定し、固相、液相、気相、仮比重を求めた。

(2) pH(H<sub>2</sub>O)(森・嶋田, 1970; 伊達, 1986 a) 土壌: 純水=1:2.5で1時間振とう後 pHメーター(DKK製)により測定した。

(3) pH(KCl)(森・嶋田, 1970; 伊達, 1986 a) 土壌: 1 N塩化カリウム液=1:2.5の比率で1時間振とう後、pHメーター(DKK製)により測定した。

(4) 電気伝導度(EC)(藤沼ら, 1970; 伊達, 1986 b) 土壌: 純水=1:5で1時間振とう後 ECメーター(DKK製)により測定した。

(5) 全炭素(T-C)、全窒素(T-N)(田辺・蘭, 1970, 東, 1986) CNコーダー法, CNコーダー(柳本製, ヤナコ MT-500型)により測定した。

(6) 陽イオン交換容量(CEC)(鎌田, 1986 a; 蔵本ら, 1970 a) ショウレンベレガー法(pH7・1N酢酸アンモニウム液抽出)、ホルモル法(0.1 N水酸化ナトリウム液滴定)により測定した。

(7) 可給態りん酸(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(南條, 1986; 関谷, 1970) トルオーグリン酸分析法、分光光度計(島津製, UV-1100型)により測定した。

(8) 交換性石灰(CaO)(鎌田, 1986 b; 蔵本ら, 1970 b)、交換性苦土(MgO)(鎌田, 1986 b; 蔵本ら, 1970 b)、交換性カリ(K<sub>2</sub>O)(鎌田, 1986 b; 三須・宮里, 1970) CEC分析時にショウレンベレガー法で抽出した液を原子吸光度計(日立製, Z-4000型)により測定した。

(9) 土壌の化学性分析はそれぞれ2連で行い平均化した。両者に5%以上の差が生じた場合には、再度2連で分析を繰り返した。

### 3. 結果および考察

1) 作土層の深さと標準施肥・多肥との組み合わせが作物収量と土壌に及ぼす影響  
東京都の標準施肥区と多肥区(1.5倍量)との間で作物

表-1 ブロッコリー収集調査成績 (1992年秋作)

Table 1 Yield of broccoli in autumn, 1992

処理区		花蕾重		外葉・茎重 kg/ha	地上部重		最大草丈 cm
作土層の深さ cm	施肥重	kg/ha	指数		kg/ha	指数	
15	標準	7,984 c	64	43,879 d	51,863 c	72	58.0 de
25		9,034 bc	73	45,788 cd	54,822 c	76	61.0 cd
40		12,409 a	100	59,640 a	72,049 a	100	67.2 ab
15	多肥	7,395 c	60	45,829 c	53,224 c	74	56.9 e
25		8,351 c	67	52,309 b	60,660 b	84	63.9 bc
40		10,571 b	85	63,416 a	73,987 a	102	68.3 a

花蕾は15cmの長さで採取し、最大草丈は地表面から葉を上へ伸ばした先までの高さとした。指数は40cm・標準施肥区を100とした。列内で異なるアルファベットはDuncan's multiple range testにより5%水準で有為差があることを示す。

表-2 コマツナ収量調査成績 (1993年秋作)

Table 2 Yield of Komatsuna in autumn, 1993

処理区		地上部重		葉長 cm	葉色 SPAD値	地上部水分 %
作土層の深さ cm	施肥量	kg/ha	指数			
15	標準	10,471 b	71	12.0 ab	50.3	88.4
25		12,571 ab	86	12.3 a	49.9	88.7
40		14,657 a	100	12.6 a	51.1	89.2
15	多肥	9,214 b	63	11.6 ab	50.9	88.4
25		11,000 ab	75	10.9 b	50.2	88.8
40		13,143 a	90	12.9 a	50.3	89.2

指数は40cm・標準施肥区を100とした。

列内で異なるアルファベットはDuncan's multiple range testにより5%水準で有為差があることを示す。

生産を比較すると、1992年のブロッコリー花蕾重では、耕耘深度が浅くなるほど収量が減少した。多肥区では、標準施肥区に比較して収量が減少する傾向がみられた。40cm区で特に減少程度が大きく有意差がみられた(表1)。またブロッコリー外葉・茎重では、花蕾重と同様に、耕耘深度が浅くなるほど収量が減少した。多肥区では、標準施肥区に比較して、花蕾重とは逆に、収量が増加していた。25cm区で特に増加程度が大きく有意差がみられた。ブロッコリー地上部重では、重量のうち占める割合の高い外葉・茎重の影響を受け、耕耘深度が浅くなるほど収量が減少した。多肥区では、標準施肥区に比較して、25cm区で特に増加程度が大きく有意差がみられた。

1993年のコマツナ地上部重では、耕耘深度が浅くなるほど収量が減少した。多肥区では、標準施肥区に比較し

て収量が減少する傾向がみられたが、有意差は認められなかった(表2)。コマツナの葉長では、耕耘深度が深いほど長くなる傾向がみられたが、顕著な差ではなかった。多肥区では、標準施肥区に比較して、耕耘深度が浅い場合には、長さが短くなる傾向がみられた。葉色では、耕耘深度および施肥量の違いによる顕著な差はなかった。作物体地上部の水分含量は40cm区で他の区よりもやや高くなる傾向もみられたが、顕著な差は認められなかった。

ブロッコリー跡地土壌(0~15cm)の理化学性をみる(表3)と、三相分布に大きな差はなかったが、40cm区でやや気相の高くなる傾向にあった。多肥の仮比重が多少高めであった。標準施肥に比較して多肥の方では、交換性CaOとMgOの溶脱が大きく、pHも低下していた。また多肥区の中では、作土層の深いほどCaOや

表-3 ブロッコリー跡地土壌理化学性分析値 (1992 年秋作, 0~15 cm)

Table 3 Analytic value of soil physico-chemical retentivity of a former site of cultivation in broccoli in autumn, 1992 (0~15 cm)

処理区		三相分布 %			仮比重 g/ml	pH		EC dS/m	可給態りん酸 g/kg
作土層の深さ cm	施肥量	固相	液相	気相		H <sub>2</sub> O	KCL		
15	標準	22.3	36.3	41.4	0.59	6.52	5.68	0.159	0.31
25		22.1	39.1	38.8	0.58	6.61	5.77	0.114	0.26
40		23.3	35.9	40.8	0.58	6.52	5.80	0.223	0.19
15	多肥	23.6	39.8	36.6	0.61	6.31	5.60	0.289	0.40
25		23.5	40.1	36.4	0.61	6.16	5.41	0.335	0.33
40		22.7	34.3	43.0	0.59	5.64	5.09	0.270	0.27

処理区		陽イオン 交換容量 cmol(+)/kg	交換性塩基 10 <sup>-3</sup> kg/kg			石灰 飽和度 %	塩基 飽和度 %	全炭素 g/kg	全窒素 g/kg	C/N
作土層の深さ cm	施肥量		CaO	MgO	K <sub>2</sub> O					
15	標準	38.0	6.70	1.65	0.39	62.8	86.8	53	4.4	12.1
25		39.2	6.80	1.62	0.34	61.9	84.4	55	4.6	11.9
40		37.6	6.35	1.52	0.42	60.3	83.5	50	4.1	12.2
15	多肥	39.1	4.76	1.16	0.32	43.4	60.1	54	4.6	11.6
25		40.3	4.61	1.15	0.34	40.8	57.1	55	4.7	11.7
40		35.2	3.32	0.62	0.32	33.7	44.6	52	4.4	11.7

MgOの含有量が少なく、石灰飽和度や塩基飽和度が低くなっていた。ECは多肥の区が全体に高かった。しかし異なる耕耘深度間に大きな差異はなかった。施肥したりん酸分はそのままでは土壤中を移動しにくく、耕耘によって土壤中に混入されるため、標準施肥・多肥とも作土層の深い区ほど可給態りん酸の含有量は低下した。

これらにより、作土層が浅い場合には可給態りん酸や交換性CaO、MgOなどの養分集積のおこっていることが認められた。しかしT-NやT-Cは区間の差が少なかった。

コマツナの跡地土壌(0~15cm)をみる(表4)と、三相分布のうちの固相や仮比重に大きな差はないものの40cm区で、液相がやや低下し、気相が上昇している傾向がみられた。化学性については、多肥区でECや可給態りん酸が高くなっていた。特に作土層の浅い区ほどこれらの値が高い傾向がみられ、コマツナ跡地でも浅い作土層では養分集積がおきていた。CECは通常粘土鉱物や有機物含量、りん酸含量の影響を受けやすいが、ここでは可給態りん酸と比較的似た傾向にあった。交換性のCaOやMgOは多肥区で溶脱が激しいことから低下が著しく、また多肥区では、耕耘深度が大きいほど低く

なっていた。T-CやT-Nは作土層の浅い区ほど高い傾向がみられたが、C/N比には顕著な差は認められなかった。

以上より、ブロッコリーでは作土層の深さが花蕾部の収量に大きく影響することが明らかになった。そのため栽培を行う上では耕盤を形成しないような管理を行うこと、具体的には過度の高速ロータリー耕耘を避け、時々ブラウによる耕耘を行うこと、深耕を行うことなどが求められる。また多肥すると、花蕾部の収量は減収した。そのため多肥栽培を避けることも重要であると判断された。また作土層が浅い場合は、根が十分に伸びきれないこと、さらに耕盤によって土壤中の水や空気の流れが悪くなったことなどが減収の原因と考えられた。またコマツナにおいても浅い作土層と多肥は収量を低下させることが認められた。コマツナに関しても作土層が浅い場合には、ブロッコリーでみられたような要因が根圏部に生じ、減収につながったものと考えられた。また浅い耕盤があるとそれ以上の下層部に養分が入っていかないため、養分濃度が高くなるのが推察されるので、作土層の深さに合ったような施肥量にする管理が必要であると考えられた。15cm・25cm区では標準施肥区の施肥量

表-4 コマツナ跡地土壌理化学的分析値 (1993 年秋作, 0~15 cm)

Table 4 Analytic value of soil physico-chemical retentivity of a former site of cultivation in Komatsuna in autumn, 1993 (0~15 cm)

処理区		三相分布 %			仮比重 g/ml	pH		EC dS/m	可給態りん酸 g/kg
作土層の深さ cm	施肥量	固相	液相	気相		H <sub>2</sub> O	KCL		
15	標準	22.8	36.6	40.6	0.61	6.74	6.13	0.215	0.44
25		23.0	36.4	40.6	0.60	6.76	6.22	0.153	0.34
40		22.5	34.5	43.1	0.60	6.92	6.30	0.152	0.27
15	多肥	22.0	35.6	42.4	0.58	6.04	5.55	0.323	0.60
25		22.3	36.6	41.1	0.59	6.47	5.90	0.237	0.50
40		21.0	33.7	45.3	0.56	5.82	5.46	0.235	0.32

処理区		陽イオン 交換容量 cmol(+)/kg	交換性塩基 10 <sup>-3</sup> kg/kg			石灰 飽和度 %	塩基 飽和度 %	全炭素 g/kg	全窒素 g/kg	C/N
作土層の深さ cm	施肥量		CaO	MgO	K <sub>2</sub> O					
15	標準	44.0	6.81	1.33	0.68	55.3	73.5	54	4.5	12.1
25		43.1	6.79	1.20	0.49	56.3	72.6	55	4.6	11.9
40		41.9	6.81	1.24	0.83	58.0	75.2	49	4.1	12.2
15	多肥	42.9	4.56	0.79	0.73	38.0	51.2	53	4.6	11.6
25		43.8	5.91	1.03	0.48	48.8	64.2	55	4.7	11.7
40		40.1	3.89	0.62	0.71	34.6	44.8	51	4.3	11.7

でも多く、養分集積による作物の生育抑制の可能性があった。コマツナで40 cm区の多肥区の収量が減少した要因は、同一の畑での連用実験であることから、蓄積養分が大きくなり、収量減少が発生したと考えられた。

第1実験の結果、東京都の標準施肥量でも、作土層が浅い場合には、根群域が制限されることに加えて養分集積による作物生産への影響が考えられることから、第2実験では標準施肥量より少ない施肥量で作物生産を検討することとした。

2) 作土層の深さと標準施肥・減肥との組み合わせが作物収量と土壌に及ぼす影響

標準施肥区と減肥区を比較すると、1996年のキュウリでは、耕耘深度が浅くなるほど収量が減少した。作土層の浅い15 cm区では減肥によって収量が増加したが、40 cm区では標準施肥区の方の収量が増大した(表5)。

1996年のブロッコリー花蕾重では、減肥した3区と40 cm区の標準施肥区の収量には差がなかった。ブロッコリー全体重は、それぞれの耕耘深度で減肥区が大きくなり、減肥によって収量が増加した(表6)。

この結果、キュウリの40 cm区以外では、減肥によって、収量は向上した。したがって作土層が浅い場合は、

表-5 キュウリ収量調査成績 (1996 年春作)

Table 5 Yield of cucumber in spring, 1996

処理区		果実重			総本数 本/m <sup>2</sup>
作土層の深さ cm	施肥量	kg/ha	指数	g/本	
15	標準	77,540	68	79.9	97.0
25		93,240	82	88.0	106.0
40		113,500	100	89.8	124.0
15	減肥	85,870	76	85.9	100.0
25		91,580	81	84.4	108.5
40		96,860	85	86.9	111.5

指数は果実重 (kg/ha) について、40 cm・標準施肥区を100とした。

果実重は統計処理せず、指数で示した。

減肥は有効な措置であることが示唆された。

キュウリの跡地土壌 (0~15 cm) の理化学性をみる(表7)と、標準施肥区の40 cm区でやや気相が高かったが、全体的には三相分布や仮比重に顕著な差はみられなかった。ECはキュウリでは、養分吸収がよいこともあ

表-6 ブロッコリー収集調査成績 (1996 年秋作)

Table 6 Yield of broccoli in autumn, 1996

処理区		花 蕾			外葉・茎重 kg/ha	地上部重		最大草丈 cm
作土層の深さ cm	施肥重	重・kg/ha	指数	幅・cm		kg/ha	指数	
15	標準	9,735 b	91	12.4 ab	61,166 b	70,901 bc	85	75.8 b
25		10,125 ab	94	12.9 a	60,874 b	70,999 bc	85	78.0 ab
40		10,744 a	100	12.1 ab	72,634 ab	83,378 ab	100	81.9 a
15	減肥	11,546 a	107	12.3 ab	67,106 ab	78,652 b	94	76.3 b
25		11,299 a	105	11.7 b	62,625 b	73,924 b	89	76.3 b
40		11,393 a	106	12.4 ab	76,935 a	88,328 a	106	79.0 ab

花蕾は 15 cm の長さで採取し、最大草丈は地表面から葉を上へ伸ばした先までの高さとした。指数は 40 cm ・標準施肥区を 100 とした。列内で異なるアルファベットは Duncan's multiple range test により 5% 水準で有為差があることを示す。

表-7 キュウリ跡土壌理化学性分析値 (1996 年春作, 0~15 cm)

Table 7 Analytic value of soil physico-chemical retentivity of a former site of cultivation in cucumber in spring, 1996 (0~15 cm)

処理区		三相分布 %			仮比重 g/ml	pH		EC dS/m	可給態りん酸 g/kg
作土層の深さ cm	施肥量	固相	液相	気相		H <sub>2</sub> O	KCL		
15	標準	24.2	31.8	43.8	0.64	7.16	6.37	0.146	0.63
25		23.3	34.3	42.4	0.62	7.12	6.36	0.125	0.48
40		23.3	30.9	45.8	0.62	7.00	6.26	0.136	0.31
15	減肥	23.2	31.9	44.9	0.62	6.71	6.00	0.116	0.62
25		22.2	33.8	44.0	0.58	6.69	5.99	0.142	0.51
40		24.1	33.5	42.4	0.63	6.41	5.71	0.151	0.40

処理区		陽イオン 交換容量 cmol(+)/kg	交換性塩基 10 <sup>-3</sup> kg/kg			石灰 飽和度 %	塩基 飽和度 %	全炭素 g/kg	全窒素 g/kg	C/N
作土層の深さ cm	施肥量		CaO	MgO	K <sub>2</sub> O					
15	標準	44.0	6.81	1.77	0.80	55.1	80.7	55	5.0	11.0
25		44.5	6.44	1.52	0.60	51.6	71.6	53	4.8	11.1
40		39.9	6.01	1.26	0.65	53.7	74.7	47	4.2	11.2
15	減肥	41.7	5.35	1.41	0.44	45.7	66.5	53	4.7	11.2
25		40.7	4.50	1.08	0.41	39.5	57.1	52	4.7	11.0
40		40.0	4.04	0.94	0.38	37.9	54.1	50	4.4	11.2

り、特に大きな差はなかった。pH や可給態りん酸、塩基分は作土層が浅いほど高い傾向にあった。減肥区では、可給態りん酸や塩基分は低くなり、標準施肥区では蓄積傾向がみられた。

ブロッコリーの跡地土壌 (0~15 cm) の理化学性をみる (表 8) と、減肥区の 15 cm 区で気相が高かったもの

の、標準施肥区の 15 cm 区では、気相が小さくなるなど全体的に表層の三相分布の値にはばらつきが大きかった。化学性では、EC 値は減肥区が低くなっていた。可給態りん酸、塩基分や CEC は作土層が浅いほど高い傾向にあり、特に可給態りん酸の蓄積が激しくなっていた。

キュウリ、ブロッコリーとも C/N 比に顕著な区間差

表-8 ブロッコリー跡地土壌理化学分析値 (1996 年秋作, 0~15 cm)

Table 8 Analytic value of soil physico-chemical retentivity of a former site of cultivation in broccoli in autumn, 1996 (0~15 cm)

処理区		三相分布 %			假比重 g/ml	pH		EC dS/m	可給態りん酸 g/kg
作土層の深さ cm	施肥量	固相	液相	気相		H <sub>2</sub> O	KCL		
15	標準	22.1	28.5	49.4	0.59	6.41	5.77	0.661	1.10
25		20.7	26.5	52.8	0.58	6.60	5.91	0.464	0.56
40		20.9	26.7	52.4	0.53	6.54	5.90	0.643	0.62
15	減肥	21.0	21.9	57.1	0.57	6.41	5.69	0.451	0.90
25		20.7	26.6	52.7	0.57	6.29	5.54	0.422	0.51
40		21.2	23.5	55.3	0.57	5.85	5.17	0.472	0.59

処理区		陽イオン 交換容量 cmol(+)/kg	交換性塩基 10 <sup>-3</sup> kg/kg			石灰 飽和度 %	塩基 飽和度 %	全炭素 g/kg	全窒素 g/kg	C/N
作土層の深さ cm	施肥量		CaO	MgO	K <sub>2</sub> O					
15	標準	48.6	5.52	1.50	0.95	40.5	60.2	54	4.9	11.0
25		46.7	5.51	1.40	0.61	42.1	60.0	54	4.7	11.5
40		43.5	4.65	1.52	0.64	38.1	58.7	49	4.1	12.0
15	減肥	46.8	4.61	1.61	0.51	35.1	54.7	53	4.6	11.5
25		43.4	3.97	1.34	0.41	32.6	50.2	54	4.7	11.5
40		41.0	3.66	0.97	0.42	31.9	46.0	51	4.3	11.9

はみられなかったが、T-CとT-Nは作土層が浅いほど高い傾向がみられた(表7, 8)。

以上より、作土層が浅くなるほど、作物収量は低下することが認められた。キュウリでは、深耕して根が十分に伸びられるのであれば、現行の施肥量が適当であり、減肥する必要はなく、作土層が浅い場合には、現行の施肥量を減らすような栽培管理を行ったほうがよいと考えられた。またブロッコリーにおいては、第1実験では地上部全体重および花蕾重とも多肥の影響が少ないのに対して、第2実験では減肥の効果が認められている。多肥して窒素分が過剰になると茎葉が大きくなり、花蕾重の小さくなることが知られている(鈴木, 1987; 矢崎, 1994)が、第1実験の多肥区で地上部全体が同程度であるのに花蕾重が減少した要因は、このような肥料反応に起因すると考えられた。第2実験では減肥効果が認められたのは、窒素分が過剰から適正化し、花蕾の生育が進んだためと推察された。これらからブロッコリー栽培では、作土層の浅い場合には、土壌中への肥料分の蓄積によって作物収量が低下することから、20%程度の減肥を行った方が良好な生産をもたらすものと考えられた。したがって今後の土壌診断や土壌管理においては、これまでの化学性分析に加え、作土層に対する考慮も導入して

判断する必要があると考えられた。

### 摘 要

1. 作土層の深さと標準施肥・多肥との組み合わせが作物収量と土壌の理化学性に及ぼす影響
  - 1) ブロッコリー花蕾重では、耕耘深度が浅くなるほど収量が減少した。東京都の標準施肥量の区と1.5倍区との間で作物生産を比較すると、1.5倍区でブロッコリー花蕾重の収量が減少する傾向がみられた。40 cm区で特に減少程度が大きく有意差がみられた。
  - 2) コマツナでは、40 cm・標準施肥区で収量が大きかった。
  - 3) 多肥ではCaOとMgOの溶脱が大きく、pHも低下した。ECは多肥で高かった。
  - 4) 可給態りん酸は標準施肥・多肥とも作土層の深いほど含有量は低下した。
  - 5) 15 cm・25 cm区では標準施肥区の施肥量でも多い可能性が認められた。
2. 作土層の深さと標準施肥・減肥との組み合わせが作物収量と土壌に及ぼす影響
  - 1) キュウリでは、作土層の浅い15 cm区では減肥が有効であったが、40 cm区は標準施肥で収量が増大し

た。

2) ブロッコリー花蕾重では、減肥した3区と40 cm・標準施肥区の収量には差がなく、浅い作土層の状態で継続して栽培を行う場合には、時期をみて減肥した方が、増収につながる事が示唆された。

3) EC値はキュウリの区では、特に大きな差はなかったが、ブロッコリーの区では、明らかに減肥区で低くなった。

4) pHや可給態りん酸、塩基分は作土層が浅いほど高い傾向にあった。

5) 減肥区では、可給態りん酸や塩基分は低くなっていたが、標準施肥では蓄積傾向にあった。

### 引用文献

- 伊達 昇 (1986 a) : pH, 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.70~71.
- 伊達 昇 (1986 b) : 電気伝導率 (EC), 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.74~76.
- 東 俊雄 (1986) : 有機炭素, 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.77~85.
- 藤沼善亮・木下 彰・橋田茂和 (1970) : 塩類濃度, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.45~50.
- 鎌田春海 (1986 a) : 陽イオン交換容量 (CEC), 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.150~154.
- 鎌田春海 (1986 b) : 陽イオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.155~160.
- 蔵本正義・小菅伸郎・高橋和司 (1970 a) : 塩基置換容量・全置換性塩基・塩基飽和度, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.33~44.
- 蔵本正義・小菅伸郎・高橋和司・横田志朗 (1970 b) : カルシウム・マグネシウム, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.281~296.
- 前田乾一 (1986 a) : 水分, 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.8~10.
- 前田乾一 (1986 b) : 三相分布・容積重, 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.10~14.
- 三須 昇・宮里 恵 (1970) : カリウム, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.258~277.
- 森 信行・嶋田永生 (1970) : 酸度, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.29~32.
- 南條正巳 (1986) : 可給態りん酸, 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.127~130.
- 農水省農産園芸局農産課監修 (1979) : 日本の耕地土壌の実態と対策, 土壌保全調査事業全国協議会, 東京, p.36~55, p.75~96.
- 農水省農産園芸局農産課監修 (1996) : 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, p.26~51.
- 鬼鞍 豊 (1986) : 試料調製, 土壌標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 土壌標準分析・測定法委員会編, 博友社, 東京, p.5~6.
- 鈴木 皓 (1987) : 施肥の方法, 植物栄養土壌肥料大事典, 高井康雄・早瀬達郎・熊沢喜久雄編, 養賢堂, 東京, p.539~542.
- 東京都農業試験場 (1978) : 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, p.215~301, p.302~310.
- 東京都農業試験場 (1979~1996) : 土壌保全調査抄録, 東京農業試験場成績書, 東京.
- 丹原一寛・美園 繁 (1972 a) : 実容積法, 土壌物理性測定法, 土壌物理性測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.1~24.
- 丹原一寛・美園 繁 (1972 b) : 土壌の3相, 土壌物理性測定法, 土壌物理性測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.24~52.
- 田辺市郎・蘭 道生 (1970) : 炭素窒素同時分析法, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.139~147.
- 関谷宏三 (1970) : りん酸の比色定量法, 土壌養分分析法, 土壌養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京, p.225~229.
- 矢崎仁也 (1994) : 作物の養分過剰と対策, 土壌・植物栄養・環境事典, 松坂泰明・栗原 淳監修, 博友社, 東京, p.215~216.

受稿年月日: 1999年9月22日

受理年月日: 2000年8月7日

# Improvement of Physical Condition of Soil with Cattle Slurry Fertilization—Mechanical Strength and Water-stability of Soil Aggregates

Wataru KATO, Hiroshi KOBAYASHI, Toshihiro SUGIURA and Mitsuhsa BABA

School of Veterinary Medicine and Animal Sciences, Kitasato University, Towada, Aomori 034-8628, Japan

## Abstract

We investigated the strength of air-dried mixtures of sand and cattle slurry using unconfined compression and slaking tests, and obtained the following results: 1. The sand and cattle slurry mixtures hardened when dried. 2. A significant correlation was found between unconfined compression strength and mixed slurry concentration. 3. Air-dried samples showed water-stability. 4. The unconfined compression strength of re-wetted samples (moisture content about  $300 \text{ g kg}^{-1}$ ) was less than that of air-dried samples. These results show that the organic matter in cattle slurry facilitates aggregation.

**Key words:** Aggregation, Cattle slurry, Organic matter, Unconfined compression test, Water-stable aggregate

## 1. Introduction

Dairy farmers in the Konsen area of Hokkaido prefecture spray a mixture of cattle dung and urine on their grasslands as a cattle slurry fertilizer. Cattle slurry is an important organic nutrition fertilizer. Harada (1990) reported that cattle slurry acts as a nitrogen and potassium fertilizer. The effects of the organic matter in slurry fertilizer on the physical and chemical conditions of soil are well known. Continuous spraying of cattle slurry on grassland is effective in increasing soil fertility and soil aggregation. Kobayashi (1980) suggested that decayed roots and some secretions from living plant roots form an aggregated soil structure. The aggregated structure is stabilized by the pressure of roots elongating into the pores between soil particles and by soil water extraction. It is also known that soil animals and soil microorganisms have important effects on the formation of soil ag-

gregate.

The purpose of this study is to clarify the function of cattle slurry as an adhesive agent in soil aggregate formation. To achieve this, unconfined compression and slaking tests were carried out on air-dried mixtures of silica sand and cattle slurry.

## 2. Materials and Methods

### 1) Preparation of cattle slurry

Manure from Japanese short-horn cattle was collected twice, once in May as a spring sample, and once in July as a summer sample, at the experimental farm of Kitasato University. The herd was fed corn silage during spring and fresh grass during summer. The fresh dung was collected from the floors of stalls and a mixture of urine and washing water was collected from a urine storage tank. Twenty-five liters each of the fresh dung and the liquid were mixed. The content of total suspended solid (TS) in the cattle slurry mixtures, after



**Table 1** Chemical composition of cattle slurry samples

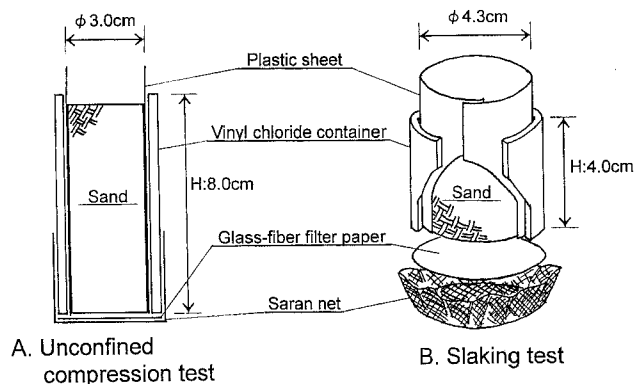
	Sampling season	TS* <sup>1</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> * <sup>2</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> * <sup>3</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> * <sup>3</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	T-C* <sup>4</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	T-N* <sup>4</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	C/N
Unconfined compression test	Spring	9.4	7.80	1.18	177.2	338.9	81.3	—	—	—
	Summer	11.4	7.41	1.66	19.5	326.0	47.0	4.3	0.3	15.89
		28.0	7.32	3.51	53.1	930.0	79.0	10.5	0.6	17.20
Slaking test	Summer	9.9	8.68	1.67	17.2	283.2	79.0	4.0	0.2	23.41
		29.6	8.52	4.06	53.3	931.0	242.8	12.0	0.5	23.90

Methods of analysis \*1: Evaporation dryness (TS=Total content of suspended solid substance in cattle slurry)

\*2: Truog molybdenum blue reaction

\*3: Ion chromatography

\*4: Nitrogen-Carbon analyzer

**Fig. 1.** Container for unconfined compression test and slaking test

aeration in an aeration tank for about 5 weeks for the spring sample and about 3 weeks for the summer sample, was 80 g kg<sup>-1</sup> for both samples. The aerated cattle slurry was divided into three samples after passing it through a screen of 4.76 mm mesh to remove impurities. Total solid contents of the three sub samples were adjusted to 10 g kg<sup>-1</sup>, 30 g kg<sup>-1</sup> and 60 g kg<sup>-1</sup>, respectively, by adding distilled water.

Table 1 shows the chemical compositions of the cattle slurry samples. The concentrations of ammonium and phosphorus differed greatly between the spring sample and the summer sample. It is considered that the composition difference was caused by differences in period of aeration and slurry temperature during aeration.

## 2) Preparation of test samples

Two sizes of tube (Fig. 1) were used to obtain test samples of the cattle slurry and silica sand mixture. The shorter tube (4.3 cm in diameter and 3.0 cm in height) was used for the slaking test and the other tube (3.0 cm in diameter and 8.0 cm in height) was used for the unconfined compression test. The characteristics of silica sand were a specific gravity of 2.63 and a diameter of 0.25 mm to 1.0 mm. The slurry samples were adjusted to 60 mL and mixed with 60 mL of silica sand in a ceramic dish, and the resulting mixtures were poured into the tubes. The filled tubes were air-dried for about 2 weeks in a dry oven at 30 degrees centigrade. The test samples were removed from the tubes after drying, and two types of samples were pre-

pared : 3.0 cm and 4.3 cm in diameter, and 6.0 cm and 2.0 cm in height for the unconfined compression test and the slaking test, respectively. In this study, the control samples were made by adding distilled water to silica sand and treated under the same conditions as the cattle slurry samples.

**3) Measurement of mechanical strength with unconfined compression test and water-stability by slaking test**

The mechanical strength of air-dried samples was measured with the unconfined compression test. Five samples, L (low, 10 g kg<sup>-1</sup> TS), M (middle, 30 g kg<sup>-1</sup> TS), and H (high, 60 g kg<sup>-1</sup> TS) with spring slurry and L and M with summer slurry, were prepared for the compression measurement. Furthermore, re-wetted samples were prepared for strength measurement under wet conditions by adding water gently to air-dried samples.

It is considered that the non-homogeneous distribution of cattle slurry constituents in a sample influences the physical characteristics of the sample. Electric conductivity (EC) as an

indicator of cattle slurry constituents was measured at 1 cm depth intervals with the conventional method using an EC meter.

The slaking process of test samples in water was observed as an indicator of the water-stability of cattle slurry mixture. Two air-dried samples L and M were prepared with summer slurry. Fig 2 shows the apparatus used for the slaking test, which employs the conventional method for recording weight using a spring balance. The air-dried samples taken from the tube were placed on the sieve of the apparatus and soaked in water for 24 hours. During this period, the weight of samples was recorded at elapsed times of 1, 2, 5, 15, 30, 60, 240 and 1440 minutes. The remaining part of each sample was taken out of the water carefully and photographed. The collapse ratio was calculated from the weight of the remaining part of the sample after 24-hour soaking.

**3. Results and Discussion**

**1) Physical and chemical characteristics of the test samples**

Test samples taken from the tube after air-drying are shown in Photo 1. The samples with cattle slurry added maintained their columnar shape when removed from the tube regardless of the slurry concentration. On the other hand, the sample mixed with distilled water collapsed as soon as it was removed from the tube. It was considered that cattle slurry adhered to the surface of the silica sand particles and that the organic matter in the slurry glued the particles together like an adhesive during air-drying.

It is generally known that organic matter forms aggregates, and this was demonstrated in this experiment. The mass-ratios of organic matter among the silica sand particles as an adhesive agent were 3.6 g kg<sup>-1</sup> (1.3 g kg<sup>-1</sup> in total carbon), 11.0 g kg<sup>-1</sup> (4.1 g kg<sup>-1</sup>) and 22.7 g kg<sup>-1</sup> (8.4 g kg<sup>-1</sup>) for L, M and H. These values were calculated from the TS of cattle slurry and the sand particle's specific gravity. This indicates that the organic matter of cattle

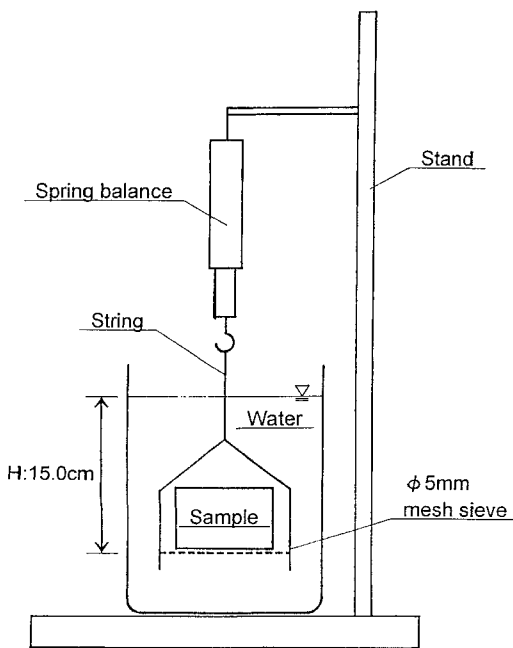
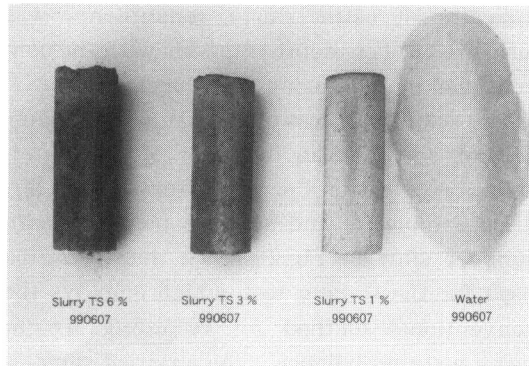


Fig. 2. Apparatus used for slaking test



**Photo 1.** Silica sand and cattle slurry after mixing and drying (From the left, Sample H, Sample M, Sample L, and Water\*<sup>1</sup>)

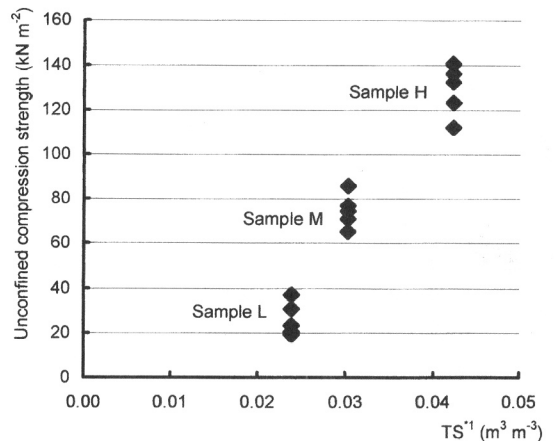
\*1: The sample mixed with distilled water collapsed as soon as it was removed from the tube

slurry can combine with silica sand particles from 44 to 280 times its weight. M.M. Kononova (1976) found that the amount of water-stable aggregate in soil was increased by adding humic acid with 0.7 to 1.0 g of total carbon per 1 kg soil. Yokose and Yamada (1977) stated that organic matter caused coarse aggregate formation, but if the amount was more than 50  $\text{g kg}^{-1}$ , the organic matter hindered aggregate formation. The amount of organic matter in sample L is more than the value of Kononova and the amount in sample H is less than the highest value of Yokose and Yamada.

On the other hand, Kobayashi (1989) stated that organic matter from plant roots is effective for aggregate formation. Our examination also showed that the organic matter in cattle slurry causes aggregate formation.

## 2) Measurement of mechanical strength with unconfined compression test

The unconfined compression strength of each test sample is shown in Fig. 3. The strengths of samples L, M and H were  $26.2 \pm 6.7 \text{ kNm}^{-2}$ ,  $74.7 \pm 6.8 \text{ kNm}^{-2}$  and  $131.0 \pm 10.3 \text{ kNm}^{-2}$ , respectively. There was a significant correlation between unconfined compression strength and the TS of the added cattle slurry. The



**Fig. 3.** Relationship between unconfined compression strength and TS of air-dried samples

strength of samples M and H were similar to that of the surface soil of northern Kanto loam ( $60 \text{ kNm}^{-2}$  to  $160 \text{ kNm}^{-2}$ ) and less than that of Ando-soil aggregate (over  $500 \text{ kNm}^{-2}$  under fresh undisturbed conditions).

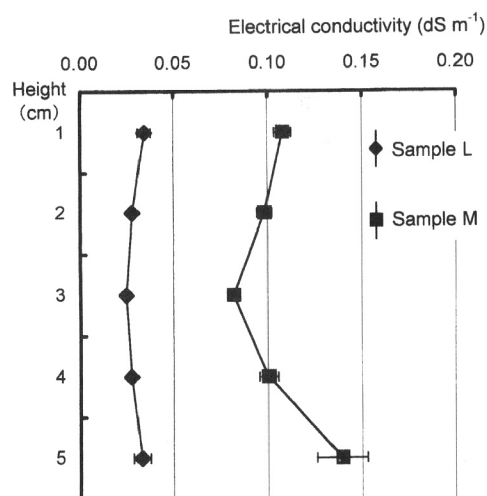
The averaged strengths of the unconfined compression test of the re-wetted sample and air-dried sample are shown in Table 2. Fresh samples after the cattle slurry and silica sand mixed collapsed as soon as it was removed from the tube. On the other hand, re-wetted samples (average moisture content of  $317.9 \pm 5.6 \text{ g kg}^{-1}$ ) maintained their columnar shape and its unconfined compression strength was  $11.6 \pm 0.8 \text{ kNm}^{-2}$ , less than that of the air-dried sample, which was  $40.8 \pm 3.4 \text{ kNm}^{-2}$ . This result shows that the unconfined compression strength decreased with increasing moisture content, and the adhesive strength of the organic matter decreased under wet conditions. The cattle slurry and silica sand mixture maintained their columnar shape after drying and re-wetting.

When the unconfined compression strength was compared between spring and summer samples of cattle slurry with the same TS, the summer sample strength was greater than the spring sample strength by  $15 \text{ kNm}^{-2}$ . This difference might be due to the difference in

**Table 2** Relationship between unconfined compression strength and moisture content of samples

Sampling season	Sample	TS*1 (g kg <sup>-1</sup> )	Moisture treatment	Moisture content (g kg <sup>-1</sup> )	Unconfined compression (kN m <sup>-2</sup> )	Standard deviation
Summer	L	11.4	Air-dried	0.0	40.8	3.4
	M	28.0	Air-dried	0.6	90.1	5.7
	L	11.4	Re-wetted	317.9	11.6	0.8
	M	28.0	Re-wetted	300.7	9.9	0.2

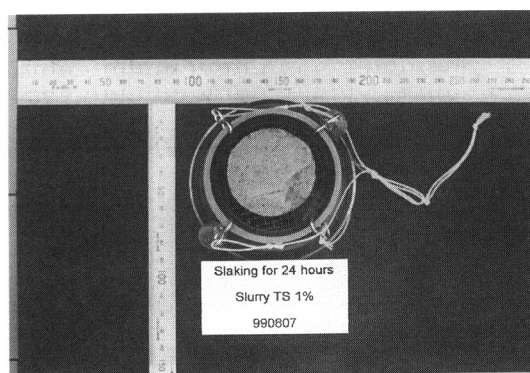
\*1 : TS=see Table 1



**Fig. 4.** Difference in electrical conductivity of air-dried samples

cattle feed, and slurry preparation period. Harada *et al.* (1998) reported that the cattle manure compost preparation period affects the formation of organic matter such as cellulose and lignin by the compost process. Therefore, it appears that more organic matter with high adhesion remained in summer slurry than in spring slurry.

The EC distribution of samples containing silica sand and cattle slurry is shown in Fig. 4. The EC was high in the top and bottom parts and low in the center of both samples L and M. The non-uniform distribution of the EC shows that minerals moved with water during drying. However, the difference in the unconfined compression strength cannot be attributed to the non-uniform distribution of the minerals.



**Photo 2.** Sample L after slaking for 24 hours

### 3) Measurement of water-stability by slaking test

The samples L and M soaked in water for 24 hours are shown in Photos 2 and 3. The collapse ratio caused by slaking is shown in Table 3. Sample L in air-dried condition had a few cracks and some collapsing caused by slaking (See the bottom right of the sample in Photo 2). When the samples were soaked in water, the air entrapped in the samples was released, causing cracking and collapse. The entrapped air in the samples was released for about 30 minutes. However, sample L did not collapse into clods of less than 5 mm and retained its columnar shape.

The above fact suggests that organic matter in cattle slurry works as an adhesive agent, and retains its function even when soaked in water. The Chemical Handbook (Anon., 1995), indicates that volatile solvent leads to adhesion of silica sand, as the samples hardened

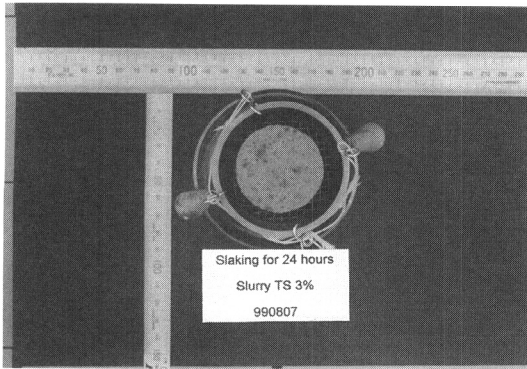


Photo 3. Sample M after slaking for 24 hours

Table 3 Collapse ratio with slaking

Sample	TS* <sup>1</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	Collapse ratio (g kg <sup>-1</sup> )	Remaining ratio (g kg <sup>-1</sup> )
L	9.9	6.41	993.59
M	29.6	1.64	998.36

\*1 : TS=see Table 1

upon drying and become soft when re-wetted. This is broadly similar to the result found with cattle slurry and silica sand in this study.

Sato (1969) described that when clayey soil was dried beyond pF 4 (1000 kPa), the air release phenomenon was drastic, and the collapse ratio decreased, because the combination of the soil particles through the function of the soil colloid prevented collapse. Our results are consistent with the result of this research. Therefore, it is concluded that organic colloid in slurry causes adhesion of sand particles by drying. It is likely that this also happen in soils. Moreover, the dried organic matter of slurry samples absorbed water, and became soft when immersed in water. Organic matter in the slurry hardened in the form of a sponge, and enclosed the whole of the sand particles, and then the dried organic matter in the samples absorbed a large amount of water. Scheffer and Schachtschabel (1979) state that organic matter in soil has a high water-holding capacity, and is able to hold 3-5 times its own weight in water. The above ability is thought

to have enhanced of water retention in the soil, because organic matter in slurry has a high absorption capacity.

#### 4) Suggestion regarding the organic phase

Soil constituents are classified into solid, liquid, and gaseous phase. In this classification, organic matter is included as solid phase even when it is mixed with the soil as in the present study. However, this study clearly shows that organic matter has an adhesive function, which is different from the function of particles. In this paper, particles and organic matter are considered differently, and it is suggested that "solid phase" be classified as "organic phase" and "particle phase". Accordingly, the soil phases used in this study are "organic phase", "particle phase", "gaseous phase", and "liquid phase".

The phase volume ratio of the dried samples is shown in Fig. 5. The volume of the organic matter in samples containing spring slurry was calculated. The bulk densities of samples L, M and H were  $1.37 \pm 0.03 \text{ Mg m}^{-3}$ ,  $1.29 \pm 0.01 \text{ Mg m}^{-3}$  and  $1.23 \pm 0.02 \text{ Mg m}^{-3}$  respectively. The densities of all samples decreased as the organic matter content increased, and the ratio of organic phase increased with increase in TS of cattle slurry, while that of gaseous phase increased even more.

This study indicates that the adhesion of cattle slurry to silica sand has the following characteristics. An increase in the organic matter content results in increases in the adhesion power and the distance between the particles, and adhesion is stronger when cattle slurry penetrates between sand particles. In the case of low-concentration slurry, the space between the sand particles decreases, and the area of surface in contact with slurry increases. Conversely, in the case of high-concentration slurry, the space between the sand particles increases, but the sand is more strongly adhering because slurry penetrates the gaps between particles. Furthermore, it is suggested that slaking depends on the content of organic

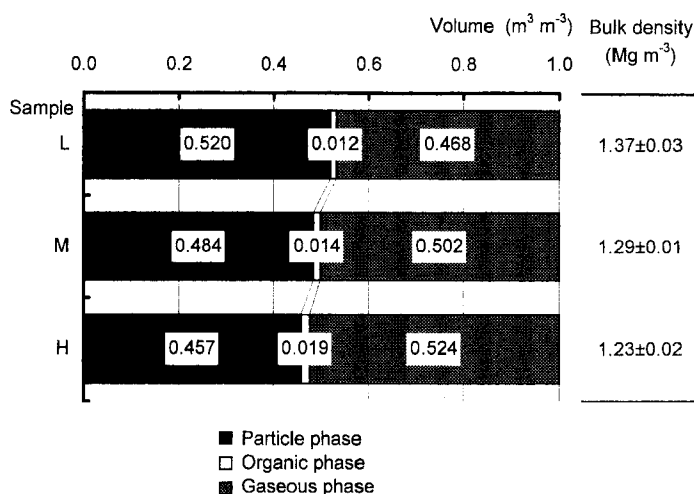


Fig. 5. Phases of dried samples

matter, which hardens the structure when dried and swells again when re-wetted.

#### 4. Conclusion

Cattle slurry contains much organic matter that is effective in aggregation, but this organic matter has not yet been precisely identified. Also, the type of matter involved in the adhesion of soil particles is not clear. Accordingly, the identification of the organic elements, including adhesive agents, in slurry is being attempted.

#### 5. Acknowledgments

We thank the staff of the School of Veterinary Medicine and Animal Science, Kitasato University for helpful guidance. We also thank the students of the Laboratory for Environmental Conservation of Grassland for their assistance in this study. We thank Dr. Hubert Tunney of the Teagasc, Johnstown Castle Research Center, Wexford, Ireland for revising the text.

#### References

Adachi, T., S. Tsutsumi and H. Takenaka (1977) : Studies on the strength characteristic of Organo-volcanic ash soils, *Trans. JSIDRE*, **71** : 39~43.\*  
 Anon. (1995) : Chemical Handbook 5th. Ed. Applied

Chemistry II, The Chemical Society of Japan, Maruzen, Tokyo.  
 Aragaki, M. and N. Nagata (1977) : On the hardness of the aggregates of Kuroboku soil, *Trans. JSIDRE*, **71** : 21~26.\*  
 Harada, Y. (1990) : Characteristics of animal waste and composts, *Animal Husbandry*, **44** (1) : 128~134.\*\*  
 Harada, Y., K. Haga, T. Osada, T. Izawa and Y. Nishimura (1998) : Decomposition of Organic Matter During the Maturing Process of Cattle Waste Compost, *Anim. Sci. Technol. (Jpn.)*, **69** (12) : 1085~1093.  
 Kobayashi, H. (1980) : Role of plant roots in formation of soil aggregates, *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, **42** : 26~32.\*\*  
 Kononova, M.M. (1976) : Soil organic matter, (Translated into Japanese by I. Kanno, K. Kyuma, S. Tokudome and S. Arimura), Rural culture association, Tokyo.  
 Kumada, K., H. Hirose, K. Nakano and S. Kitado (1972) : Decay processes of the rice straw that some kinds of organic matters mixed. 1. Chemical research about decay process of the plant body, *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **43** (1) : 13~20.\*\*  
 Maeda, T., K. Soma and S. Sasaki (1976) : Studies on the relationship between physical properties and organic matter content of soil, *Trans. JSIDRE*, **61** : 9~17.\*  
 Poetsch, Erich M. (1998) : About the impact of fertilizing intensity on the N-cycle in alpine grassland with special consideration of the environmentally friendly use of farm manure.

- Environmentally friendly management of farm animal waste. 165~170.
- Sato, K. (1969) : Changes of the shrinking and slaking properties of clayey soils as a effect of repeated drying and wetting, *Trans. JSIDRE*, **28** : 12~16.\*
- Scheffer, F. and P. Schachtschabel (1979) : *Lehrbuch der Bodenkunde*, (Translated into Japanese by S. Sasaki and K. Hasegawa), Hakuyusha, Tokyo.
- Ukai, N. (1986) : Effect on manure of the livestock dung urine by the microorganism (2), *Animal Husbandry*, **40** (3) : 409~414.\*\*
- Yamane, I. (1980) : The soil that is the food production place, *Sci. J. KAGAKU*, **50** : 98~103.\*\*
- Yokose, H. and N. Yamada (1977) : On the Factors contributing to aggregate formation --Studies on the aggregates of soil (I)--, *Trans. JSIDRE*, **70** : 1~6.\*
- \* : In Japanese with English summary.  
\*\* : In Japanese only.

## 牛スラリー施用による土壌物理性改善効果に関する研究 牛スラリーによって結合したケイ砂粒子の一軸圧縮強度および耐水性

加藤 亘・小林裕志・杉浦俊弘・馬場光久  
北里大学

### 要 旨

牛スラリー施用が土壌の物理性に与える影響のうち、団粒形成についての検討は少なく、団粒形成因子としての牛スラリーの役割を明らかにする必要がある。本研究では、その基礎実験として、植物根や土壌生物の影響のないケイ砂培地に濃度の異なるスラリーを投与し、力学的な試験によってケイ砂粒子の結合の強さを求めた。ケイ砂粒子の結合の強さは、スラリーとケイ砂の混合体を風乾後、一軸圧縮試験とスレーキング試験から検討した。スラリーとケイ砂の混合体の力学的な特徴を次に示す。

- ① 風乾処理によりスラリー中の有機物がケイ砂粒子を接着して固結する。
- ② スラリーの全蒸発残留物濃度の増加にともない一軸圧縮強さは増加する。
- ③ 24時間の静水中への浸漬においてスレーキング耐性を示す。
- ④ 再湿潤処理後の一軸圧縮強さは、風乾時の半分以下に弱まる。

以上の結果から、スラリー中に含まれる有機物は、ケイ砂粒子間の接着物質として作用し、湿潤乾燥の繰り返しにより耐水性団粒を形成する可能性を持つと考えられる。

キーワード：一軸圧縮試験，牛スラリー，スレーキング試験，耐水性団粒，有機物

受稿年月日：2000年1月8日  
受理年月日：2000年9月27日

## 浚渫土の基本的理化学性と乾燥効果

金 原台\*・矢橋晨吾\*\*

Effect of Drying on the Physico-Chemical Properties of Dredged Soils

Wontae KIM\* and Shingo YABASHI\*\*

\* Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho,  
 Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522 Japan

\*\* Faculty of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Matsudo-shi, Chiba 271-8510 Japan

### Abstract

We investigated the fundamental physical and chemical properties of dredged soils (hedoro) taken from Haneda, Kasumigaura, Saga and Ohbagawa. We also investigated the changes of consistency index, pF-moisture curves and saturated hydraulic conductivity of Haneda and Kasumigaura soils at different drying stages.

The results are summarized as follow ;

1. There were large variations in fundamental physical and chemical properties of dredged soils collected from different places.
2. In air - dried soils, hydraulic conductivity increased while increasing in dry density.
3. The drying caused an irreversible effect on consistency index, pF-moisture curves and saturated hydraulic conductivity. These facts indicate that the effects of drying on these properties are considered to be resulted from irreversible changes in the structural status of the soil.

**Key words** : dredged soil, soil drying, consistency, pF-moisture curve, saturated hydraulic conductivity

### 1. はじめに

建設工事に伴い副次的に発生する土砂や汚泥は発生土または建設発生土として区別される(建設発生土利用技術マニュアル検討委員会, 1998)。また, 発生土は浚渫土, 浚渫以外の建設発生土, 建設汚泥と大きく分けられる。平成7年度の建設省の調査によれば, 日本の発生土の総量は約4.4億 $m^3$ であるが, 内陸部公共工事や海面埋立工事等での利用は, 約3割に止まっている現状である。今後も発生土の増加が予想されているところであるが, 都市化の進展等に伴い, 受入適地の不足, 不法投棄等不適正処分の問題が発生し, また発生土や廃棄物等による環境への負荷の増大が将来の発展の支障となることについて広く認識されつつある。

また, 発生土のうち浚渫土とは, 港湾・河川等の浚渫

に伴って生ずる土砂, その他これに類するものである。茨城県霞ヶ浦を例にして, その量的並びに処理方法上の問題について述べると, 湖底に堆積したヘドロの量は約4,000万 $m^3$ 以上であり, 平成4年度から約720万 $m^3$ を浚渫し, 河川環境の整備並びに河川機能の維持を図っている。このような過程で発生した浚渫土は一般的にセメントで固めて埋立て処分されている。しかし, 浚渫土においても例外なく処分の確保は年々困難となってきた。

一方, 公園や緑地帯等の緑地造成には, 造成の基本形状となる構造基盤と, 植栽を行うための表層部を形成する植栽対象基盤がある(建設発生土利用技術マニュアル検討委員会, 1998)。このうち構造基盤の造成に浚渫土の利用は有限な資源のリサイクルであり, 環境保全にも有効であると考えられる。

\* 千葉大学大学院自然科学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33, \*\* 千葉大学園芸学部 〒271-8510 松戸市松戸648 番地  
 キーワード: 浚渫土, 土壌乾燥, コンシステンシー, pF-水分曲線, 飽和透水係数



構造基盤が土質によって土中水の滞留が予想される場合には、地中水の排除による構造基盤の安定化を図ることが重要な課題となる。特に、本研究で用いた浚渫土は生成過程において周辺環境に強く影響を受け、高含水比の粘性土となっているものとして取り扱った。しかし、細粒分を多く含んでいる土壌、すなわち粘土質土壌は乾燥により土壌水分が不可逆的に脱水され、土の理工学的挙動が顕著に変わることがすでに多くの研究で明らかにされている(前田, 1987; 久保田徹, 1976; 竹中・江崎, 1973)。これらの乾燥による諸特性の変化をもたらす原因は、①微細粒子が結合し、団粒化する(神山, 1959)。②土の界面構造特性が変わり、親水性から疎水性に変わる(山崎・竹中, 1965)。③土粒子の集合化による上の比表面積が減少する(相馬・前田, 1974)、ことなどから論じられている。さらに軽部・佐藤(1998)はヘドロが大きい風乾の影響を示す主な原因は遊離酸化物によるものであると報告した。

こうした点を踏まえて、本研究の目的は乾燥による浚渫土の高含水状態の改善とそれに伴う土壌構造の変化機構を明らかにすることである。このことは浚渫土を構造基盤として利用するための改良方法を確立する上で重要な意味をもつものと考えられる。そのため、まず4種類の浚渫土の基本的物理性および化学性を把握した。その後、高含水状態かつ粘性土であった2種類の浚渫土を対象とし、生土から風乾土に至るまで乾燥の進行に伴う土粒子表面の性質変化をコンシステンシー特性並びにpF-水分特性から、また乾燥亀裂発生によるマクロ的構造変化を透水特性から検討を行った。

## 2. 供試土および実験方法

### 1) 供試土

供試土は東京湾羽田沖の東京国際空港拡張工事に伴って浚渫された海水ヘドロおよび茨城県霞ヶ浦の西浦、佐賀県佐賀市兵庫町のクリーク、埼玉県八潮市の大場川の浚渫現場から採取した淡水ヘドロである。以下、それぞれ(羽田沖)、(霞ヶ浦)、(佐賀)、(大場川)と略記する。現地における供試土の採取は、雑物の混入していない箇所を選び、長柄杓でプラスチックコンテナに入れてから移送し、分析に用いた。

また、上述した4種類のうち粘質状を呈した(羽田沖)と(霞ヶ浦)に対しては乾燥による土壌構造の変化機構を把握するため、生土、風乾土、そして生土をプラスチック箱(規格; 20×15×15 cm<sup>3</sup>)に詰めた後、室内で自然乾燥させながら土壌水分状態並びに土壌表面の亀裂等を考慮し、各乾燥段階における供試土を採取し、分析に用いた。なお、各乾燥段階における供試土は竹中・江崎

表-1 各乾燥段階における供試土の水分状態

Table 1 Moisture condition of selected soils in different drying process stages

乾燥段階	(羽田沖)		(霞ヶ浦)	
	含水比 w (kg/kg)	pF	含水比 w (kg/kg)	pF
生 上	1.268	0.5	2.401	0.5
乾燥段階 1	1.107	1.7	2.209	1.4
乾燥段階 2	1.012	2.0	2.055	1.7
乾燥段階 3	0.929	2.6	1.669	2.3
風 乾 土	0.109	5.5	0.086	5.5

(1973)の研究を参考にし、作成した。その作成状況は以下のとおりである。まず乾燥段階1は乾燥開始から31日目のもので、まだ湿潤状態で発生した亀裂も浚渫土の流動性により再び消失してしまう程度まで乾燥した試料、次に乾燥段階2は乾燥開始から55日目のもので、乾燥段階1の亀裂がはっきり痕跡を残し、浚渫土が流動性を完全に失った時期まで乾燥した試料、さらに乾燥段階3は乾燥開始から91日目のもので、土中に微細な2次亀裂が発生し始めた時の試料である。なお、生土、風乾土並びに各乾燥段階の供試土の含水比並びに水分張力を表-1に示す。

### 2) 実験方法

供試土の基本的物理性および化学性としては、浚渫土の特性を把握するため、一般的な実験項目である土粒子の密度、自然含水比、粒度組成、pH、強熱減量を土質工学会(現地盤工学会)規準(土質工学会, 1991)に準じ、その他、酸性硫酸塩土壌の判定(過酸化水素処理による村上の方法)、水溶性イオン(水溶性-S)、電気伝導率(Electric Conductivity, 1:5水浸出法)、有機炭素含量(チューリン法)、腐植含量、全窒素量(ケルダール法)、C/N比、陽イオン交換容量(セミマイクロ・ショーレンベルガー法)、リン酸吸収係数(リン酸アンモニウム液法)を土壌環境分析法(土壌環境分析法編集委員会, 1997)並びに土質工学会規準(土質工学会, 1991)に準じ、測定した。

また、供試土の乾燥特性としては、乾燥による浚渫土の土壌構造の変化機構を把握するため、コンシステンシー限界、pF-水分分布、飽和透水係数を土質工学会規準(土質工学会, 1991)に準じて測定した。

## 3. 結果および考察

### 1) 供試土の基本的物理性および化学性

供試土の基本的物理性および化学性を表-2と表-3に

表-2 供試土の基本的物理性

Table 2 Fundamental physical properties of selected soils

供試土	土粒子の密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	自然含水比 $w_n$ (kg/kg)	粒度組成			土性
			砂分	シルト分	粘土分	
			(%)	(%)	(%)	
(羽田沖)	2.662	1.256	2.0	20.0	78.0	HC
(霞ヶ浦)	2.545	2.475	1.0	22.0	77.0	HC
(佐賀)	2.464	1.631	2.6	21.5	75.9	HC
(大場川)	2.739	0.449	72.7	8.5	18.8	SCL

表-3 供試土の基本的化学性

Table 3 Fundamental chemical properties of selected soils

供試土	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	pH (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	水溶性	EC	強熱	有機	腐植	全窒素	C/N 比	陽イオン	りん酸	
				-S	(dS/m)	減量	炭素	(g/kg)	交換容量		吸収係数		
				(g/kg)	(dS/m)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)			(cmol(+) /kg)	(gP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg)
(羽田沖)	8.2	7.6	3.0	2.86	1.18	97.5	23.6	40.7	1.71	13.9	34.2	24.9	
(霞ヶ浦)	6.5	5.8	2.8	3.68	0.79	170.2	48.4	82.7	5.80	10.1	38.1	20.3	
(佐賀)	6.8	5.6	2.2	3.42	0.31	119.2	40.9	80.8	3.97	10.3	35.0	21.6	
(大場川)	7.6	6.5	2.3	3.26	0.42	25.4	5.1	8.9	0.48	10.6	8.7	19.6	

まとめて示す。これらの表から、浚渫土は堆積場所によって粒度組成が大きく異なり、また粒度組成が類似しても、堆積場所が海水と淡水の違いにより pH や EC 等がかなり異なることがわかる。次に日本の土壌分類では、硫化物または硫酸を含み pH (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 3 未満、もしくは pH (H<sub>2</sub>O) 4 未満のものを酸性硫酸塩土壌として分類基準に取り上げ、その位置付けがなされている(農耕地土壌分類委員会, 1995)。それに基づいて、本研究で用いた供試土を分析した結果、いずれも酸性硫酸塩土壌として判断された。次にリン酸吸収係数 20 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/kg 以上は火山灰土壌、15~20 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/kg は火山灰の影響の強い土壌といわれている(三好ら, 1996)。従って、いずれの供試土も火山灰土壌ないしは火山灰土壌の影響の強い土壌であると判断される。

2) 供試土の乾燥特性

(1) コンシステンシー特性

(羽田沖) と (霞ヶ浦) のコンシステンシー限界を表-4 に示す。表から、(霞ヶ浦) の生土は (羽田沖) に比べて、液性限界 ( $\omega_L$ )、塑性限界 ( $\omega_P$ )、塑性指数 ( $I_p$ ) がともに 2 倍以上高い値を示す。また、生土を乾燥段階 1, 2, 3 並びに風乾上にした場合の  $\omega_L$ ,  $\omega_P$ ,  $I_p$  はいずれも生土に比べて低い値を示す。この場合も、(霞ヶ浦) が (羽田沖) に比べ、コンシステンシー限界値が高くなり、生土

の場合と同様の傾向を示す。流動指数 ( $I_f$ ) は、いずれの供試土も生土と風乾土の間では顕著な差がみられるものの、生土から乾燥段階 3 まではわずかな変化のみを示す。

次に、表-4 の  $\omega_L$  と  $\omega_P$  の結果から塑性図を求め、図-1 に示す。図から、乾燥による供試土の塑性図上のプロットがほぼ A 線に沿って左下に移動する。また、(霞ヶ浦) と (羽田沖) の塑性図上の移動は相似で、(霞ヶ浦) が (羽田沖) に比べて大きい変化を示す。

浚渫土は水中に堆積しているため、自然含水比が生土の  $\omega_L$  に比べて高い。しかし、いずれの供試土も乾燥により  $\omega_L \cdot \omega_P$  が低下する。この  $\omega_L \cdot \omega_P$  の低下は、乾燥による土粒子の粗粒化が比表面積の減少をもたらし、粒子間力が低下したためと考えられる。このことは、浚渫土を乾燥させることによって、圧縮性や粘性が低下して構造基盤として利用しやすい土に変わることを意味する。

(2) pF-水分特性

供試土の pF-水分分布を図-2 と図-3 に示す。なお、pF 試験については、いずれの供試土も水浸により飽和状態にし、測定はすべて脱水過程で行った。

これらの図から、乾燥の進行に伴って低 pF 領域から高 pF 領域に至る pF-水分分布曲線は左側へ移動しながら、立ち上がりが著しくなっていることがわかる。これは、

表-4 各乾燥段階における供試土のコンシステンシー限界

Table 4 Consistency of selected soils in different drying process stages

乾燥段階	(羽田沖)				(霞ヶ浦)			
	液性限界	塑性限界	塑性指数	流動指数	液性限界	塑性限界	塑性指数	流動指数
	$\omega_L$ (kg/kg)	$\omega_P$ (kg/kg)	$I_P$	$I_f$	$\omega_L$ (kg/kg)	$\omega_P$ (kg/kg)	$I_P$	$I_f$
生 土	1.112	0.380	0.732	0.620	2.455	0.843	1.612	0.750
乾燥段階 1	1.075	0.377	0.698	0.440	2.430	0.837	1.593	0.730
乾燥段階 2	1.065	0.376	0.689	0.390	2.408	0.832	1.576	0.630
乾燥段階 3	1.029	0.375	0.654	0.320	2.278	0.818	1.460	0.590
風 乾 土	0.705	0.351	0.354	0.260	1.266	0.653	0.613	0.350

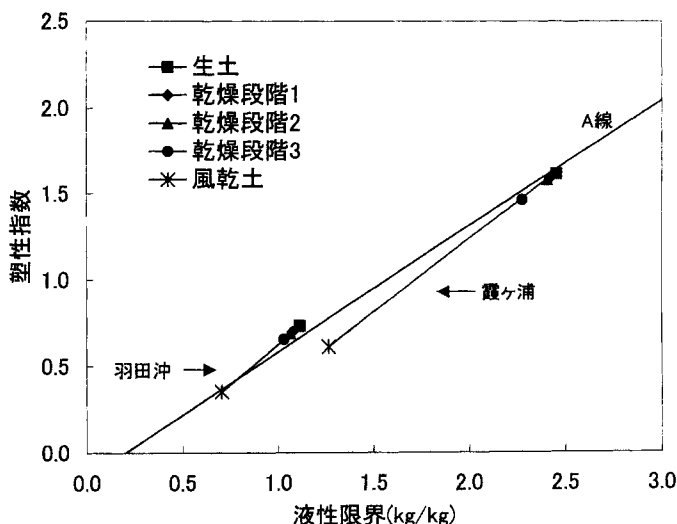


図-1 各乾燥段階における供試土の塑性図

Fig. 1 Plasticity chart of selected soils in different drying process stages

乾燥の進行とともに、不可逆的に保水量が低下していくことを示す。この保水量の減少は、表-5に併記した乾燥密度の変化からも考察することができる。乾燥密度の増加やそれに伴う保水性の低下は、乾燥の進行により粒子間の微細間隙の水が除去されて不可逆的に収縮し、微細間隙の量が減少したためと考えられる。このことは、前述したコンシステンシー特性と合わせて、浚渫土の改良方法を具体化する上で重要な意味をもつものとする。

### (3) 透水特性

供試土の飽和透水係数 ( $k$ ) と乾燥密度 ( $\rho_d$ ) を表-5に示す。表から、供試土ともにかなり小さい  $k$  値を示す。従って、透水性が極めて低いことがわかる。また、生土から乾燥の進行に伴って  $\rho_d$  は増大し、 $k$  は低下した。こ

れは、土壌の乾燥密度が高まったことによって、透水に有効な間隙量が減少したためと推定される。しかし、風乾土は  $\rho_d$  が最大値を示すものの、 $k$  が逆に増大し、生土に近い値となった。これは、乾燥によって土粒子が不可逆的に凝集した結果、透水に関与するセミマイクロ間隙が増加したためと考えられる。しかしながら、本実験の目的であった、乾燥亀裂発生によるマクロ的構造変化はあったものの、それに伴う透水性の増大は得られなかった。これは乾燥段階2と3の  $k$  が亀裂を含まない、または亀裂が連続しないマトリックス部分の測定によるものと考えられる。しかし、既往の研究(井上ら, 1988)で亀裂を含むブロックと土壌マトリックスの透水性に4~5オーダーの違いがあると報告されており、小さな亀

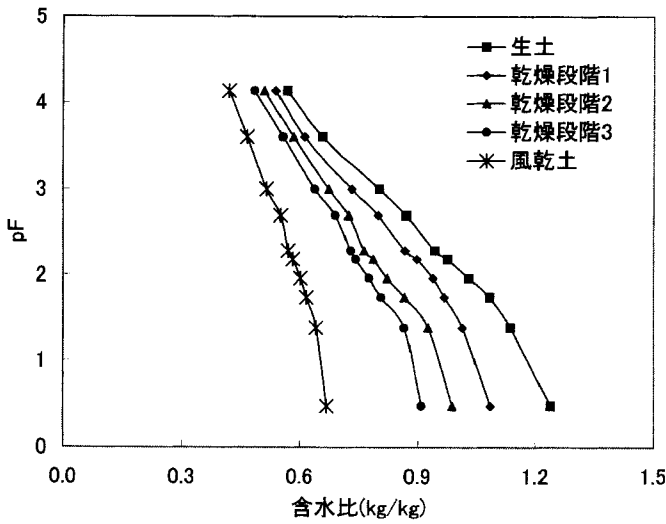


図-2 各乾燥段階における（羽田沖）の pF-水分分布曲線

Fig. 2 pF-soil moisture distribution curves of Haneda soil in different drying process stages

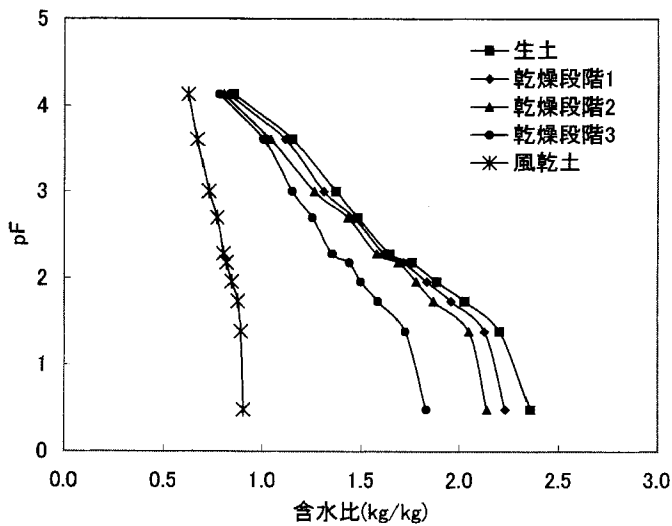


図-3 各乾燥段階における（霞が浦）の pF-水分分布曲線

Fig. 3 pF-soil moisture distribution curves of Kasumigaura soil in different drying process stages

裂でも透水性に大きな影響を与えることは容易に推察できる。以上の結果を踏まえて、浚渫土の安定化を図る上でいかに亀裂の発生によるマクロ的土壌構造の発達を促進するかが前提となってくる。また、亀裂の表面はもちろん亀裂内部まで乾燥させるためには、数多くの亀裂を発生させることが望ましいと考えられる。

#### 4. ま と め

港湾・河川に堆積するヘドロは膨大な量であり、必要に応じて浚渫を行わねばならない。しかし、浚渫土の処理もまた重要な課題である。従って、本研究は浚渫土の処理が課題となっている現状において、その改良方法を求めるための、基礎資料を得ることを目的とした。その

表-5 各乾燥段階における供試土の乾燥密度並びに飽和透水係数の関係

Table 5 Relationship between bulk density and saturated hydraulic conductivity of selected soils in different drying process stages

乾燥段階	(羽田沖)		(霞ヶ浦)	
	乾燥密度	飽和透水係数	乾燥密度	飽和透水係数
	$\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	k (m/s)	$\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	k (m/s)
生 上	0.602	$1.32 \times 10^{-8}$	0.354	$1.20 \times 10^{-8}$
乾燥段階 1	0.687	$8.95 \times 10^{-9}$	0.371	$4.17 \times 10^{-9}$
乾燥段階 2	0.700	$8.79 \times 10^{-9}$	0.389	$4.02 \times 10^{-9}$
乾燥段階 3	0.755	$2.08 \times 10^{-9}$	0.488	$1.83 \times 10^{-9}$
風 乾 土	0.932	$3.26 \times 10^{-8}$	0.764	$1.27 \times 10^{-8}$

ため、まず4種類の浚渫土の基本的物理性および化学性を把握した。その後、生土から風乾土に至るまで乾燥の進行に伴う土変化をコンシステンシー特性並びにpF-水分特性から、また乾燥亀裂発生によるマクロ的構造変化を透水特性から検討を行った。

基本的物理性および化学性、乾燥特性の検討より得られた結果は以下に要約される。

1) 浚渫土は堆積場所によって粒度組成が大きく異なる。また、粒度組成が類似しても、堆積場所の周辺環境の影響により諸物性がかなり異なる。

2) 供試土は乾燥の進行に伴って液性限界の低下に向かっている。また、乾燥の進行に伴って乾燥密度の増加が保水性の低下をもたらす。

3) 透水特性については、供試土は乾燥の進行に伴って乾燥密度は増大し、飽和透水係数は低下した。しかし、風乾土の飽和透水係数は乾燥密度が最大値を示すにもかかわらず逆に増大した。

4) 浚渫土の安定化を図るために、乾燥処理が有効な改良方法の一つであると考えられる。

## 謝 辞

本研究を進めることに当たり、尾瀬林業株式会社微生物的環境技術研究所の御支援を賜り、パンフィックコ

ンサルタンツ株式会社総合技術本部港湾部並びに日本ソイルエンジニアリング株式会社土木本部営業部の御厚意により、試料を提供して頂いた。ここに記して深く感謝の意を表する。

## 引 用 文 献

- 土壌環境分析法編集委員会(1997):土壌環境分析法:p. 202~301, 博友社.
- 井上久義・長谷川周一・宮崎 毅(1988):亀裂が発達した圃場における水の横浸透, 農土論集, 134: 51~60.
- 神山光男(1959):試料の乾燥状態が土の稠度に及ぼす影響, 土と基礎, 7(1): 44~47.
- 軽部重太郎・佐藤和彦(1998):過酸化水素水処理による土からの非品質物の溶出および土のコンシステンシー限界の変化, 農土論集, 195: 85~91.
- 建設発生土利用技術マニュアル検討委員会(1998):建設発生土利用技術マニュアル:p. 1~6, 土木研究センター.
- 久保田徹(1976):火山灰土壌の界面化学的研究—脱水に伴う土壌の不可逆的凝集の現象と機構を中心として—, 農技研報告 B, 28: 1~74.
- 前田 要(1987):土壌水分の変動と物理・化学性の変化, 土壌の物理性, 55: 37~43.
- 三好 洋・嶋田永生・石川昌男・伊達 昇(1996):土壌肥料用語事典:p. 103~104, 農文協.
- 農耕地土壌分類委員会編(1995):農耕地の土壌分類第3次改訂版, 農業環境技術研究所資料, No. 17: p. 11~12, 29~36.
- 相馬尅之・前田 隆(1974):火山性ローム土の初期含水比が液性限界に及ぼす影響, 農土論集, 49: 27~34.
- 竹中 肇・江崎 要(1973):ヘドロの土壌工学的特性とその改良, 土と基礎, 21(6): 67~74.
- 土の試験実習書(第二回改訂版)編集委員会(1991):土の試験実習書:p. 15~120, 土質工学会.
- 山崎不二夫・竹中 肇(1965):風乾がアッタベルグ限界に及ぼす影響, 農土論集, 14: 46~48.

受稿年月日:2000年2月4日

受理年月日:2000年10月6日

# 土壌水のヒステリシス特性：その実態とモデル化の現状

吉 田 正 則\*

## Hysteresis of Soil Water : the Phenomenon and Modeling

Masanori YOSHIDA\*

\* Shikoku National Agricultural Experiment Station

### Abstract

Hysteretic behavior between soil matric potential and water content relationship is reviewed in concern with its models. Mechanistic models, namely (1) inkbottle model, (2) contact angle model, (3) air entrapment and solution/dissolution model, and (4) capillary condensation model, have been proposed to explain the hysteresis. However, none of these models has explained quantitative aspects of the hysteresis so far.

Alternatively, quantitative models involving empirical ones, namely (1) domain model coupled with similarity hypothesis, (2) interpolation model, (3) linear model, and (4) parameter scaling model, were incorporated into numerical simulation of soil water dynamics. In these models, the domain model with similarity hypothesis appears to be the most appropriate for the reasons that which has theoretical background, good estimation in high hydraulic conductivity area, and no "pumping" effect.

To clarify effects of soil water hysteresis under *in situ* conditions and to improve the quantitative models applicable to long-term monitoring of soil water movement are in great necessity.

**Key words** : hysteresis, soil water, mechanistic models, *in situ* effects, quantitative models

### 1. はじめに

土壌中の水の移動は、雨水や灌漑水の浸潤、地下水涵養、地下からの毛管上昇、蒸発散、土壌中の水分変化などの諸過程を互いに関連づける重要な現象である。土壌中の水移動はこれらの諸過程を通じて土壌中の水分環境を調節するとともに、栄養塩類の媒体として作物や土壌微生物などの生育環境を維持することに貢献している。今日では、過剰な施肥窒素が溶脱し、地下水や河川水の水質を悪化させることが問題とされているが、その主要成分である硝酸態窒素の移動が主に土壌中の水移動を介して行われていることから土壌中の水分動態に関する研究の重要性が理解される(粟生田・吉田, 1995)。

このような認識から、土壌中の水移動に関する研究は土壌物理学の中核として古くから行われており、すでに多数の研究が蓄積されている。しかしそこで開発された理論的・実験的手法は、室内カラム試験など人為的に整

理された条件のもとではじめて適用可能となるものが多く、圃場ないし流域スケールへ応用するにはなお多くの課題を残しているのが現状である。今日われわれが最も関心を寄せなければならないのは、現位置で生じる水・溶質移動の実態とそのメカニズムを、圃場あるいは流域スケールで明らかにすることであり、その作業を通じてはじめて、われわれは合理的養水分管理に基づく低環境負荷型農業の確立に貢献することができるであろう。

さて、実験室レベルで確立された水移動法則を現地土層中に適用するにあたり、今後解決を図らなければならない課題として筆者は、(1)流れの空間分布に関する知識の集積、(2)土壌の水理特性に関する知識の集積の2点が重要であると考えている。

(1)に関しては、地表面の窪みや間隙特性の空間変動などにもなう浸透水の水みちのふるまいに加え、土壌の乾燥収縮による亀裂、作物の腐朽根やミミズ、モグラなどによる粗孔隙など、いわゆるマクロポアを通じた流れ

\* 四国農業試験場 〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575

キーワード：ヒステリシス、土壌水分、機構モデル、現地での役割、定量モデル

(バイパス流)の重要性が指摘されている。これらの部分的集中流れの実態を明らかにするためには、圧力トランスデューサー式テンシオメータ、TDR 土壌水分計、大容量データロガーなどを組み合わせた同時多点測定が有効と考えられるが、センサーの設置にかかる経費や労力の軽減、システムの保守管理の省力化など今後の改良を待たなければならない点が多い。またバイパス流に関しては、マクロポア的位置や分布を原位置で非破壊的に探査する手法の開発が緊急の課題となっている。

(2)には、マトリックポテンシャル $\phi$ 、体積含水率 $\theta$ 、不飽和透水係数 $K$ など水移動評価に必要なパラメータを現地土層中でいかに正確かつ詳細に把握するかという問題が含まれる。このうち $\phi$ と $\theta$ に関しては、(1)で述べた方法によりある程度の進展が期待できるが、 $K$ に関しては、現在もおお原位置での直接測定がむずかしい。そこで、あらかじめ現地から不攪乱採取した試料の $\phi$ - $K$ ないし $\theta$ - $K$ 関係を求めておき、現地でモニタリングした $\phi$ ないし $\theta$ から $K$ を推定する方法が用いられる。とくに $\phi$ から $K$ を推定する方法は、試料採取深をはさむ2地点の $\phi$ をモニタリングすることによって水移動解析に必要な動水勾配を得ることができ、しかも $\theta$ を測定する必要がないのでその分モニタリングシステムの簡素化が図れるなどの利点をもつ(吉田, 1999)。しかしこの方法を用いた場合、 $\phi$ と $K$ のあいだに生じるヒステリシスの影響が無視できなくなる(粟田原ら, 1992; Beese and van der Ploeg, 1976; Hillel, 1980; Royer and Vachaud, 1975; Tizmas, 1979; Watson *et al.*, 1975)。とくに、降雨、蒸発散、内部排水、地下水位変動などの要因により、吸水と脱水を交互に、かつ不規則に繰り返す現地土層中では、ヒステリシスが $K$ の推定精度におよぼす影響は大きいとみられる。

上に述べたふたつの課題は、いずれも実験室レベルの研究だけでは解決が困難な要素を含んでおり、現地における現象の把握とその機能の解明が不可欠となる。ここでは、そうした課題に含まれる問題のひとつとして土壌のヒステリシス現象をとらえ、既往の研究成果や水移動解析への応用例などを整理、総括する。それは、土壌のヒステリシスを正しく評価することが、現地土層中の $K$ の推定精度を改善し、ひいては水・溶質移動の予測に寄与するところが大きいとの考えに基づいている。本報を通じて、既往のヒステリシス理論が現地土層中の移動現象を理解するうえで有用であることが認知され、同理論が新たな応用の場へ発展するきっかけとなれば幸いである。

## 2. ヒステリシスとはどのような現象か

土壌のマトリックポテンシャル $\phi$ と体積含水率 $\theta$ 、ないし $\phi$ と不飽和透水係数 $K$ とのあいだには、土壌ごとに固有の関係が存在することが知られているが(これらのうち $\phi$ - $\theta$ 関係は、水分保持曲線、または水分特性曲線などと呼ばれる)、それらの関係は水分が増加するとき(吸水過程)と減少するとき(脱水過程)では一致しないことが多い。このように $\phi$ - $\theta$ 関係や $\phi$ - $K$ 関係が吸水過程と脱水過程で異なる現象を土壌のヒステリシスと呼ぶ(Dane and Wierenga, 1975; Everett and Whitton, 1952; Haines, 1930; Miller and Miller, 1955 a, b, 1956; Philip, 1964; Staple, 1966; Topp, 1969; Topp and Miller, 1966)。厳密には、 $\phi^a \rightarrow \phi^b$ の変化によって生じた $\theta_A$ (または $K_A$ ) $\rightarrow \theta_B$ (または $K_B$ )なる変化の道筋が $\phi^b \rightarrow \phi^a$ による変化の道筋 $\theta_B$ (または $K_B$ ) $\rightarrow \theta_A$ (または $K_A$ )と異なっており、かつ両経路とも定常で再現可能な値をとることを意味する(Everett and Whitton, 1952; Iwata *et al.*, 1995)。 $\phi$ - $\theta$ 、 $\phi$ - $K$ の関係に加えて $\theta$ - $K$ 関係のヒステリシスも考究されたが、通常はその存在が認められないか(Gillham *et al.*, 1976; Talsma, 1970; Topp, 1969; Vachaud and Thony, 1971)、無視できるほど小さいこと(Mualem, 1976 b; Topp and Miller, 1966)が知られている。そのため $\theta$ - $K$ の関係は吸水、脱水にかかわらずひとつの関数で表現できることが多く、土壌のヒステリシス問題は $\phi$ - $\theta$ 間のヒステリシスに帰着させることができる。

その他、吸・脱水とともに土壌が膨潤・収縮するときにもヒステリシスが生じることが指摘されているが(Aylmore and Quirk, 1959; Hillel and Mottes, 1966; Homes, 1955; Jury *et al.*, 1991)、この場合は乾燥が進むにつれて空隙体積が不可逆的に減少し、 $\phi$ と含水比で描かれる吸・脱水曲線が必ず閉じる(ヒステリシスループを形成する)とは限らない(加藤, 1984)。このように、膨潤・収縮土壌(例えば低湿地土壌)におけるヒステリシス現象は、粘土粒子の配列変化など複雑な要因に基づいて生じることから、ヒステリシス研究の対象として取り上げられることは少なく(Jury *et al.*, 1991)、湿潤条件のもとで一定の骨格構造を維持する土壌に対しては、考察の必要性も乏しいと考えられる。以上の理由から本報では、土粒子配列や空隙体積の変化を生じない土壌または水分条件での $\phi$ - $\theta$ 間のヒステリシス現象を中心に検討を進めることにする。

## 3. ヒステリシスの実際と現地土層中での役割

乾いた土壌が水を吸って飽和するとき、あるいは飽和状態から脱水して乾いていくときにたどるふたつの水分保持曲線は、それぞれ主吸水曲線(CDA)、主脱水曲線

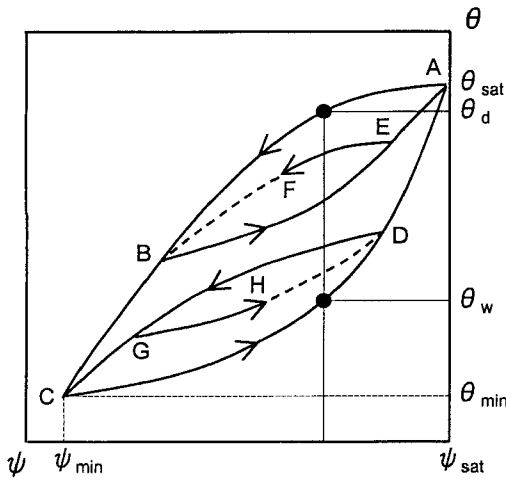


図-1  $\phi$ - $\theta$ 間に生じるヒステリシスの模式図

(ABC) と呼ばれ (図-1)、同じ  $\phi$  に対する  $\theta$  の大きさは、脱水中の体積含水率  $\theta_d$  のほうが吸水中の体積含水率  $\theta_w$  より常に大きい。飽和状態 ( $\psi_{sat}, \theta_{sat}$ ) から脱水した土壌が乾燥状態 ( $\psi_{min}, \theta_{min}$ ) に達するまえに吸水し始めたり、乾燥状態から吸水した土壌が飽和に達するまえに脱水し始めると、 $\phi$ - $\theta$  曲線はふたつの主曲線のあいだを移動する中間的な曲線となり、それぞれ1次吸水走査曲線 (BEA)、1次脱水走査曲線 (DGC) と呼ばれる。さらに1次吸・脱水走査曲線から分岐した走査曲線はそれぞれ2次脱・吸水走査曲線 (EF・GH) と呼ばれ、より高次の走査曲線も同様に定義される (Poulovassilis, 1962)。なお、図-1における  $\psi_{min}$  と  $\theta_{min}$  の値は、ある条件のもとでその土壌が経験する最も乾燥したときの値として定義されるもので、その条件が満たされているかぎり、いかなる走査曲線も主曲線がつくるループのなかに含まれるという意味で、主曲線を境界曲線と呼ぶことがある。

ヒステリシスが現地土層中の水分状態や水の流れにおよぼす影響としては、次のような事例が報告されている。

(1) 地下水面上にできる毛管水縁の厚さは、地下水位が上昇するとき (吸水過程) と下降するとき (脱水過程) では異なるため、地下水の横流れや川岸の浸み出し面の発生速度などに影響をおよぼす (Brock and Amar, 1974; Martinec, 1975; Nieber and Walter, 1981; Stauffer and Dracos, 1986; Stauffer *et al.*, 1992)。

(2) 再配分過程でヒステリシスの影響を強く受けた土壌は、そうでない土壌よりも、地表面付近により多くの水分を保持し続ける (Ibrahim and Brutsaert, 1968;

Watson, 1986; Watson and Sardana, 1987)。その理由として Jaynes (1990) は、表層付近の下向き動水勾配がヒステリシスによって小さくなり、再配分が遅くなることを挙げている。

(3) 浸潤直後は、ヒステリシスが再配分を停滞させ、表層付近に多くの水を蓄えるため、蒸発が促進されるが (Bresler *et al.*, 1969; Jaynes, 1990)、蒸発が進んで表層の水分が失われると、ヒステリシスは湿った下層から乾いた表層への水移動を遅らせるため、逆に蒸発を抑制する (Hillel, 1977)。

(4) ヒステリシスの強い土壌は、下方への水移動を妨げることで肥料や農薬の成分を表層に保持し、溶脱を防ぐ作用がある (Jones and Watson, 1987)。

これらの研究に共通しているのは、ひとつの土層内で吸水中の土壌と脱水中の土壌が共存したり、ひとつの土塊内で吸水過程と脱水過程が交互に繰り返される現象を扱っている点である。その結果、隣接する個々の土壌が、ヒステリシスループ内にプロット可能な固有の  $\phi$ - $\theta$  関係を持ち、それらが時間とともに独自の走査曲線上を移動するようになるため、 $\phi$ ,  $\theta$  の土層内分布は複雑になる。さらにこうした  $\phi$ ,  $\theta$  分布が  $K$  や動水勾配にも影響を与えるため、土層内の水の挙動もまた複雑なものになる。

もうひとつ注意すべきことは、これらの研究の多くが、土層内の水分分布やその動態を知るうえで、ヒステリシスの考慮が欠かせないことを強調している点である。ヒステリシスの影響を受けて複雑に進行する水や溶質の動きをいかにしてモデル化するか。このことがヒステリシス研究の主要課題のひとつとなってきた理由はそこにある。不飽和土壌中の水フラックスを現位置で測定する方法が存在しない現状では、ヒステリシスモデルを流れの数値シミュレーションに組み込むことによって、必要最小限の実測データから水フラックスを予測する試みは、重要な意味をもつと考えられるのである。そこで以下の章では、これまでに提案されたヒステリシスモデルの内容およびその特徴を概観する。

#### 4. 機構モデル

ヒステリシスのモデル化のひとつの流れとして、ここではまず“機構モデル”について述べる。このモデルは、ヒステリシスの成り立ちをその発生メカニズムから説明しようとするもので、主に以下の4つの方式が提案されている。

- 1) インクビンモデル (Hillel, 1980; Iwata *et al.*, 1995; Jury, *et al.*, 1991)

径の大きな空間に径の小さな流路が連結した構造を間



隙の基本単位と考える。すると、基本単位から水が抜けるときの $\phi$ は径の小さな流路に支配されて低い値を示すのに対し、水が浸入するときの $\phi$ は大きな空間の径に支配されて高い値を示す。この基本単位が多数連結してひとまとまりの間隙を形成すると、同じ $\phi$ に対する $\theta_w$ は $\theta_d$ よりも小さな値となる。このように、間隙の基本単位を大きな空間とそれに連なる小さな流路の組み合わせとする考え方は、“ネック・ボディ間隙”の概念を経て領域理論(後述)へ発展する。

2) 接触角モデル (Hillel, 1980; Iwata *et al.*, 1995; Jury *et al.*, 1991)

土粒子表面がざらざらしていたり有機物などの疎水性物質で覆われていると、土粒子表面における水の接触角は、メニスカスが前進するときのほうがメニスカスが後退するときよりも大きな値を示す。キャピラリーの法則によると、接触角が大きいほど水に生じるポテンシャル $\phi$ は大きくなる。そのため同じ $\theta$ であっても、吸水時(前進メニスカス)の $\phi$ は脱水時(後退メニスカス)の $\phi$ よりも大きな値を示すようになる。このことは、ある $\phi$ に対する $\theta_d$ が、 $\theta_w$ よりも大きな値を示すことを意味する。

3) 空気の封入、溶解、析出モデル (Hillel, 1980; Jury *et al.*, 1991; Poulouvassilis, 1970)

完全に飽和した土壌をひとたび脱水すると、 $\phi=0$  cm H<sub>2</sub>Oのもとで吸水を行っても完全飽和に達しないことが多い。これは脱水中に間隙内に浸入した空気が吸水中に気泡として残存し、間隙内への水の浸入を阻害するた

めと考えられる。しかし長期にわたって吸水を続けると、間隙内に閉じこめられた空気が水中に徐々に溶解して飽和度が高まる。脱水時には水中に溶解していた空気が徐々に析出し、間隙内からの水の放出を促進する。こうした空気の封入、溶解、析出効果によって、 $\theta_w$ はより低く、 $\theta_d$ はより高く推移するようになる。

4) 毛管凝縮モデル (Iwata *et al.*, 1995; Jury *et al.*, 1991)

板状構造をした粘土がつくる間隙では、水蒸気の凝縮によって凸型メニスカスが互いに向き合うように成長し(図-2, a→b→c)、水ポテンシャル $\phi$ と含水比 $\omega$ はともに上昇する(吸水過程; 図-2, I→II)。凸型メニスカスの頂点が接触すると、両者は一体化して凹型メニスカスを形成する(図-2, c→d)。このとき、 $\phi$ は瞬時に低下するが $\omega$ の変化はほとんどない(図-2, II→III)。その後間隙内の水が蒸発に転じると、 $\phi$ 、 $\omega$ はともに低下する(脱水過程; 図-2, d→e→f, III→IV)。凹型メニスカスが後退してその中心部がちぎれた瞬間、再び凸型メニスカスを生じる(図-2, f→a)。このとき、 $\phi$ は瞬時に上昇するが $\omega$ の変化はほとんどない(図-2, IV→I)。このサイクルで同一 $\omega$ に対する $\phi$ を比較すると、吸水時の $\phi_w$ は脱水時の $\phi_d$ よりも大きな値を示すことになり(図-2)、ヒステリシスの一要因となる。

これら4つの方式のうちどれがヒステリシスの発生要因として重要になるかは、粒径、間隙特性、粘土の種類や界面特性などによって異なると考えられ、一概に断定することはできない。ガラスビーズや砂質土など粒径の

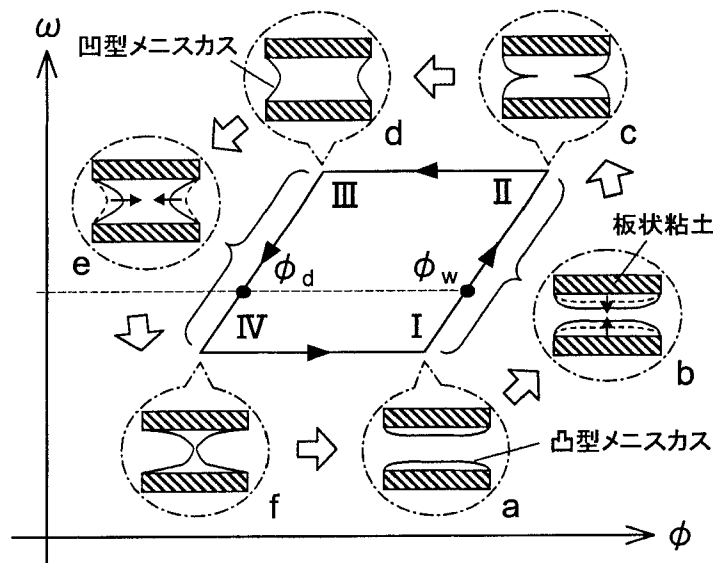


図-2 毛管凝縮モデルの模式図 (Iwata *et al.*, 1995; Jury *et al.*, 1991 より作成)

粗い多孔質体ではインクビン効果が主因とされるが (Hillel, 1980; 加藤, 1984), 板状粘土が卓越する土壌では毛管凝縮の効果が無視できないかもしれない。また接触角効果は、林地や山火跡地における撥水性 (DeBano *et al.*, 1977; 小林ら, 1996) や過去の乾燥履歴 (仲谷, 1981) などに左右され、空気の封入、溶解、析出効果は、空気と水の接触時間に影響される (Hillel, 1980)。しかし実際の土壌では、それぞれのモデルがヒステリシスの発生にどの程度関与しているかを同定することがむずかしい。そのため、機構モデルを出発点にして主曲線と走査曲線群を描き出す試みはほとんど行われていない。

### 5. 定量モデル

前章では、機構モデルによるヒステリシスの定量化がほとんど行われていないことを述べた。そうしたなか、モデル化のもうひとつの流れとして、ヒステリシスの発生メカニズムにはあまりとらわれず、水分保持特性に関する数少ない情報 (例えば主吸・脱水曲線の実測値など) から走査曲線群を描き出す試みがなされてきた。次に、そのような趣旨で提案されたモデル (定量モデル) の概要を紹介する。

#### 1) 領域モデル

##### (a) 独立領域理論

独立領域概念に基づくヒステリシスの一般理論は Preisach (1935), Neel (1942, 1943) によってはじめて提唱され、Everett and Whitton (1952), Everett and Smith (1954), Everett (1954, 1955) によって発展した。土壌物理学の分野では、Poulovassilis (1962) が土壌水のヒステリシス現象にはじめて応用した。独立領域理論によれば、ひとつの間隙は、インクビンモデルの“小さな流路”と“大きな空間”に対応するネック半径とボディ半径によって特徴づけられる。間隙が空になるときの  $\phi$  はネック半径に支配されて小さな値 ( $\phi_n$ ) を示し、水で満たされるとき  $\phi$  はボディ半径に支配されて大きな値 ( $\phi_w$ ) を示す。そしてすべての間隙は、 $\phi_n$  と  $\phi_w$  の組み合わせによって定義される“領域”に配分される。ひとつの領域は、水で満たされているか空気であらうかによって決められる。どちらかしか許されないため、そこへの水や空気の入りは非線形遷移 (Haines ジャンプ, Haines, 1930) によって瞬間的に起こると仮定される (Mualem, 1973)。独立領域理論の“独立”とは、 $\phi_n$  と  $\phi_w$  の組み合わせによって分類された“領域”の大きさが、そこに属する間隙の幾何学的特性 (ネック半径とボディ半径) のみによって決まり、他領域とのあいだの水や空気のやりとりには影響されないことを意味する。

独立領域理論は、任意の吸・脱水過程における  $\theta$  を、

領域分布関数 (領域の大きさを  $\phi_n$ - $\phi_w$  平面上に表したときの分布関数) の足し引きによって表現できるところに特色があり、主吸・脱水曲線に加えて、吸水、脱水いずれかの1次走査曲線群さえ測定しておけば、あらゆる次数の走査曲線を計算で求めることができる。Poulovassilis (1962), Talsma (1970), Poulovassilis (1970) は、この方法によって、さまざまな粒径からなる焼結ガラスビーズおよび砂質土の走査曲線を表現した。しかし実用に耐える領域分布関数を求めるためには、走査曲線群に関する詳細なデータの蓄積が必要であり (Ibrahim and Brutsaert, 1968; 加藤, 1984; Mualem, 1973), そのために費やされる時間と労力はかなり大きい (Philip, 1964)。

##### (b) 相似仮説

そこで実験手続きを簡略化し、領域分布関数を手際よく求めるために提案されたのが、Philip (1964) の相似仮説と Mualem (1973) の相似仮説である。Philip の相似仮説は、 $\phi_w$  (ボディ半径に対応) の  $\phi_n$  (ネック半径に対応) に対する比率  $\phi_w/\phi_n$  が等しい領域であれば、その領域の大きさは間隙の空間スケールによらず一定であること (間隙構造の幾何学的相似性) を仮定している。したがって Philip の相似仮説を適用するにあたっては、ボディ半径とネック半径に関する幾何学的相似性が成り立つことが前提となる。また彼の相似仮説は、領域分布関数を求めるのに難解な数学的手続きを必要とし、しかもその関数形の中に可逆的領域 (後述) を取り込むことが難しいなど、実際の土壌には適用しにくい面があった。

これに対し Mualem の相似仮説は、領域分布関数が、 $\phi_w$  と  $\phi_n$  を独立変数とするふたつの関数  $h(\phi_w)$ ,  $l(\phi_n)$  の積で表せると仮定する。その結果、ある  $\phi_w$  (ボディ半径) における  $\phi_n$  (ネック半径) 方向の領域分布は、比例定数  $h(\phi_w)$  の寄与を除けば  $\phi_w$  の大きさに関わらず一定となり、ある  $\phi_n$  (ネック半径) における  $\phi_w$  (ボディ半径) 方向の領域分布は、比例定数  $l(\phi_n)$  の寄与を除けば  $\phi_n$  の大きさに関わらず一定となる。このように、Mualem の相似仮説における相似性は、単に数学的な意味をもつに過ぎず、このような考え方がなぜヒステリシスを表現しうるのかについての説明は十分行われていない。しかしながら、Philip が主張するような間隙の物理的相似性を無視することで領域分布関数の数学的取り扱いを簡素化し、領域理論の実用化への道を容易にしたことは賞賛に値する。

##### (c) 従属領域理論と可逆領域概念

独立領域理論は Poulovassilis らの研究で一定の成果を収めたものの、さまざまな土壌に適用されるにつれ

て、ヒステリシスを表現するうえで限界があることが明らかにされた (Morrow and Harris, 1965; Poulovassilis and Childs, 1971; Poulovassilis and Tzimas 1974; Talsma, 1970; Topp, 1969; Topp, 1971a; Topp and Miller, 1966; Vachaud and Thony, 1971)。また平衡状態や定常流では成り立つが、非定常流では成り立たないという指摘もある (Topp, 1971a)。これらのことは、領域分布関数が間隙の幾何学的特性以外のさまざまな条件 (完全飽和を起点とするか毛管飽和を起点とするか、定常流れか非定常流れか、空気浸入値や水浸入値が明確に定義できるかなど) によって変化しうること、つまり領域が従属的であることを示唆している。そこで領域分布関数をもつ条件依存性を考慮することによって、独立領域理論に汎用性を持たせようとする試み (従属領域理論) が行われるようになった。従属領域理論に関する一連の取り組みをまとめると以下ようになる。

(1) Topp (1971b) は、間隙どうしの相互作用を考慮することによって、飽和近くでの空気浸入阻害と乾燥域での水浸入阻害を表現できる理論を提案した。

(2) Poulovassilis and Childs (1971), Poulovassilis and El-Ghamry (1978) も領域の非独立性に着目して領域理論を一般化しようとしたが、この試みはキャリブレーションのために多くのデータを必要とすること (Jaynes, 1990) や理論の難解さ (Iwata *et al.*, 1995) のために普及しなかった。

(3) Mualem (1974) は、 $\phi_w$  と  $\phi_d$  が  $\phi_w > \phi_d$  なる条件を満たす場合にのみ領域が存在しうるとする前提を無視すること (すなわち  $\phi_w = \phi_d$  のもとでも領域の存在を認めること) によって、可逆的領域を考慮した従属領域理論を提唱し、Mualem の相似仮説を組み合わせることによって、より少ないデータから実験結果を説明する方法を提案した (モデル II と呼ばれる)。

(4) Mualem and Dagan (1975), Mualem (1976b) は、Mualem のモデル II を一般化して、より簡易な計算手順を確立した。これらの理論は、空気浸入阻害が著しい土壌に対してはよい結果をもたらした。

(5) Mualem and Dagan (1975), Mualem (1977, 1984), Mualem and Miller (1979) は、領域理論の相似取扱いを修正して、間隙の非独立性を説明しようとした。その結果完成した修正従属領域モデル MODD (Mualem, 1984) は、主吸・脱水曲線のみから飽和付近の脱水走査曲線を正確に予測するという点で、Mualem のモデル II 以来著しい改善をみせた (Jaynes, 1990)。

これらの研究を総合すると、独立領域理論に代わって従属領域理論が必要となった背景として、(1) 領域の非独立性、すなわち多数の間隙が複雑に連結し合うと水や空

気の出入りが隣りの間隙に制限され、領域が瞬間的に水や空気で満たされなくなることに加えて、(2) 可逆的領域の存在、すなわち間隙の内部には  $\phi \rightarrow \phi + d\phi$  なる変化で  $d\theta$  の水を吸収 (あるいは放出) し、かつ  $\phi + d\phi \rightarrow \phi$  なる変化で同量の  $d\theta$  を放出 (あるいは吸収) する領域が存在しており (このことは、前述したように、 $\phi_w = \phi_d$  なる条件のもとで領域が存在することと同義である)、間隙内のすべての空間が常に満水か空の状態を二者択一しているわけではないこと (Iwata *et al.*, 1995) が重要であることがわかる。

独立領域理論が現象を十分に説明できない理由として、ジャンプ遷移の条件が満たされていないことを挙げる点では(1)も(2)も同じ立場であるが、その原因を間隙どうしの繋がり具合に求めるか、それとも間隙内の可逆的領域の存在に求めるのが異なっている。後者は従属領域理論の一連の展開のなかで提起された問題ではあるが、本質的には領域の非独立性とは異なる次元の問題とも考えられ、水浸入阻害や空気浸入阻害が生じにくい土壌 (あるいは水分条件) であれば、独立領域理論に可逆的領域を加味するだけでヒステリシスを表現できる可能性がある。

## 2) 主曲線内挿モデル

このモデルは、吸・脱水のある段階の  $\theta$  が、直前の脱水  $\rightarrow$  吸水または吸水  $\rightarrow$  脱水転換ポテンシャルに対応する  $\theta$  の主吸・脱水曲線間配分比率、および主曲線への接近速さに関するパラメータによって決まるとするもので、その代表的なものに Dane and Wierenga (1975) のモデルがある。

## 3) 直線近似モデル

このモデルは Hanks *et al.* (1969) によって提案され、Bresler *et al.* (1969), Bresler and Hanks (1969) によって利用された。このモデルは、任意の走査曲線を、主吸・脱水曲線のあいだに引かれた直線によって近似するもので、直線の傾き (水分容量,  $d\theta/d\phi$ ) は主吸・脱水曲線の形と吸・脱水転換ポテンシャルから計算される (Jaynes, 1985)。また Hasegawa *et al.* (1993) が用いた方法は、直線の求め方は異なるものの、最も簡易な計算手続きによって走査曲線を近似しようとした点で、Bresler *et al.* (1969) のモデルと共通している。

## 4) パラメータスケールモデル

このモデルは、主吸・脱水曲線を、経験パラメータを含む適当な関数で表現しておき、その中のパラメータをスケールリングすることによって、主吸・脱水曲線と類似したふるまいをする任意の走査曲線を求めようとするものである。走査曲線の基礎となる関数形としては、Klute and Heerman (1974), Perrens and Watson

(1977)らが用いた方程式とその改良型 (Gillham *et al.*, 1976, 1979; Pickens and Gillham, 1980), Hoa *et al.* (1977)の方程式などがある。この手法による最も完成したモデルは, Kool and Parker (1987)によって提出された。彼らのモデルは, 主吸・脱水曲線を表わす関数形として Van Genuchten (1980)の式を採用し, その中に出てくる4つのパラメータのうちひとつをスケールリングすることによって, 任意の走査曲線を表している。この方法は粟生田・吉田 (1995)の研究にも応用され, よい成果を収めた。

## 6. 定量モデルの性能比較

前章で紹介した4つの定量モデル (領域モデル, 主曲線内挿モデル, 直線近似モデル, パラメータスケールリングモデル)を土壌中の水移動解析に適用するにあたっては, それぞれのモデルがどのような特性をもち, どのような目的に適しているのかを検討しておく必要がある。この問題について, Jaynes (1990)は興味ある報告を行っている。彼の研究によると, 定量モデルの能力は, (1)1次走査曲線の予測精度, (2) $\phi$ の周期変動に対する $\theta$ の安定性, (3)有限差分法への適用性の3つの点から整理される。以下にその概要を述べる。なおここでは, 一連の領域モデルの代表として, Mualem (1984)の修正従属領域モデルが使われているが, 以下では簡単に“領域モデル”と呼ぶことにする。

### 1) 1次走査曲線の予測精度

これは, 主吸・脱水曲線から, それぞれ3ないし4本の1次脱・吸水走査曲線を予測する能力を比較するもので, 具体的には, Gillham *et al.* (1976)が測定した細砂の水分保持特性データをもとに, 1次吸・脱水走査曲線の計算値と実測値の比較が行われた。その結果, どのモデルも実測値をおおむね再現できることが確認されたが, その精度は $\phi$ によって異なっており, 低 $\phi$ 領域 ( $-30\text{ cm H}_2\text{O}$ 以下)では主曲線内挿モデルと直線近似モデルが, 高 $\phi$ 領域 ( $-30\text{ cm H}_2\text{O}$ 以上)では領域モデルとパラメータスケールリングモデルが優れていることが明らかにされた (図-3, 1次吸水走査曲線は省略)。

### 2) $\phi$ の周期変動に対する $\theta$ の安定性

これは ( $\phi, \theta$ ) = ( $-36\text{ cm H}_2\text{O}, 17\%$ )を起点とする1次吸水走査曲線が,  $\phi = -36\text{ cm H}_2\text{O}$ と $\phi = -25\text{ cm H}_2\text{O}$ のあいだを3往復したときに描く軌跡を比較したもので, 乾湿の繰り返しが $\theta$ の計算値に与える影響を調べようとしたものである。その結果, 領域モデルと直線近似モデルでは,  $-25\text{ cm H}_2\text{O}$ で折り返したあとの脱水曲線の終点が, 主脱水曲線上の起点 ( $-36\text{ cm H}_2\text{O}, 17\%$ )と

必ず一致するのに対し, 主曲線内挿モデルとパラメータスケールリングモデルでは, 終点の $\theta$ が起点の $\theta$ より低くなる現象が認められた (くみ出し効果, 図-4)。このようなくみ出し効果は, 実際の土壌では観察されない現象であり, 明らかに事実とは異なるふるまいである (Jaynes, 1990)。もし主曲線内挿モデルやパラメータスケールリングモデルを, 主吸・脱水曲線のあいだで吸・脱水を頻繁に繰り返す土壌に適用した場合,  $\theta$ の値を過小に評価するおそれがある。

### 3) 有限差分法への適用性

これは, 4つの定量モデルを1次元リチャーズ方程式の有限差分法に組み込んで, 実際に水移動シミュレーションを行い, Shen and Jaynes (1988)による砂柱カラムの実験結果と比較したものである。その結果, 浸潤 (30分間)→再分配 (15分間)後の $\theta$ の計算値は, どのモデルも実測 $\theta$ とよく一致した。また浸潤-再分配を5回繰り返したときの $\phi, \theta$ の計算結果を比べても, どのモデルもほぼ同様な結果を与えており, 実測値との一致もおおむね良好であった (Jaynes, 1990)。主曲線内挿モデルとパラメータスケールリングモデルではくみ出し効果の影響が予想されたが, 実際にはその影響は現れなかった。これは, 浸潤-再分配周期における $\phi$ の変動幅が大きかったため, 走査曲線の折り返し点が主吸・脱水曲線に十分近づいたことによる (Jaynes, 1990)。

## 7. 現地適用にあたって定量モデルが具備すべき要件

前章をまとめると, 現地土層中のヒステリシスを評価するために必要なモデルの条件とは, (1)走査曲線の軌跡をよく再現し, (2)計算手続きが簡単で, (3)記憶容量が節約でき, (4)小刻みな吸・脱水の繰り返しによるくみ出し効果がなく, (5)流れの数値解析に組み込んで妥当な結果が得られることの5点である (Jaynes, 1990)。表-1は, これらの観点から, それぞれのモデルの長所と短所を整理したものである。この表から明らかなように, すべての要件を十分満足するモデルは存在しない。したがって, 取り扱う現象やその性質に合わせてモデルを選ぶことが肝要になる。現地土層中への適用を考えた場合, われわれが最も重視しなければならないのは, 土壌が降雨, 蒸発散, 内部排水, 地下水位変動などによって乾湿を繰り返すたびに,  $\phi$ が小刻みかつ周期的に変動するという点である。このような条件のもとで高精度かつ安定した $\theta$ の予測値を得るためには, くみ出し効果の影響はぜひとも避けなければならない。また, 土壌中の水フラックスが $K$ に強く支配されていることを考えると,  $K$ が最も上昇したとき (すなわち高 $\phi$ 領域)の水フラックスの予

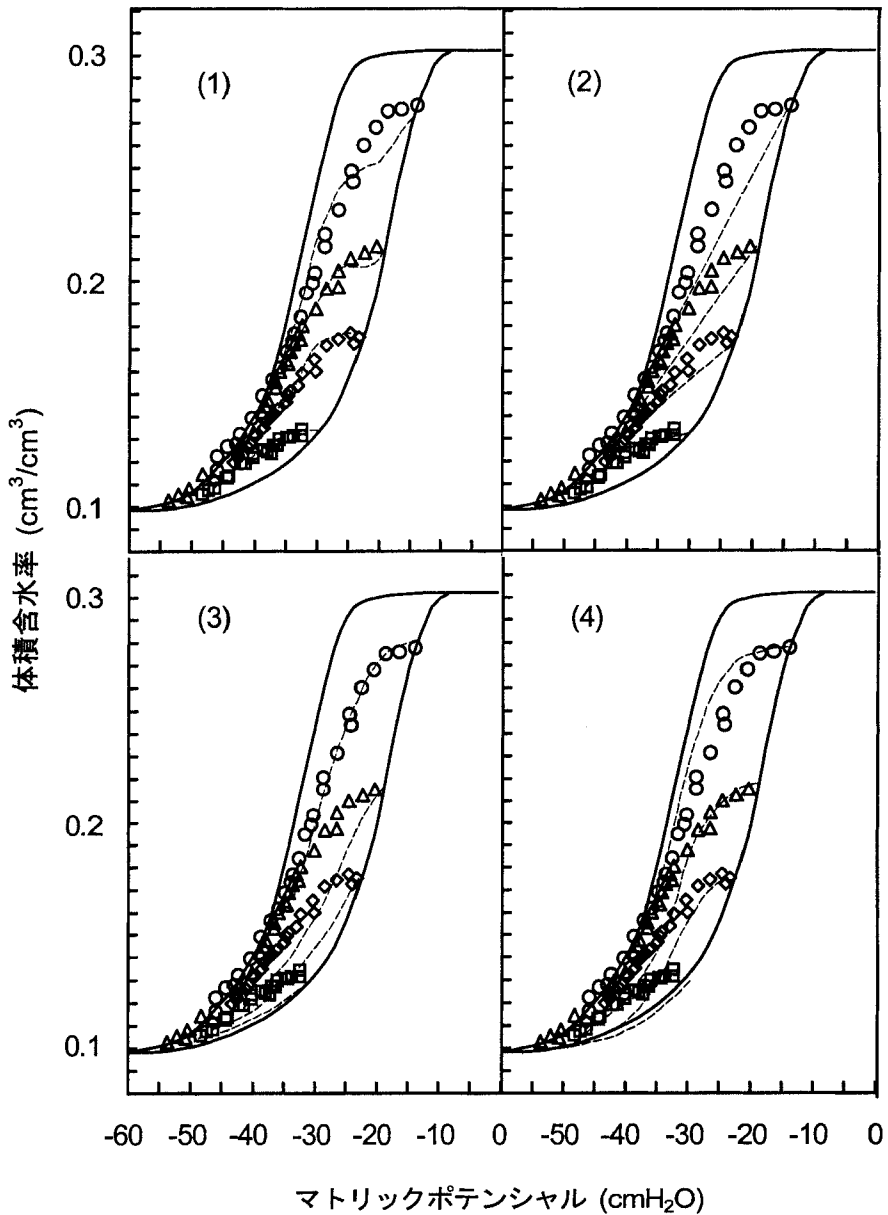


図-3 1次脱水走査曲線の実測値(点)と(1)主曲線内挿モデル, (2)直線近似モデル, (3)領域モデル, (4)パラメータスケールモデルによる計算値(破線)の比較(Jaynes, 1990より)

測精度を確保することも重要である。

以上のことから、現地土層に適用する定量モデルとしては、くみ出し効果の抑制および高 $\phi$ 領域での走査曲線の予測精度に優れた領域モデルが最も妥当であると判断される。またこのモデルは、ヒステリシス現象を、間隙内部への水や空気の出入り特性と関係づけて定量化しようとする点で、他の定量モデルとは異なる背景をもって

おり、ヒステリシスを間隙特性や土粒子の界面特性と関連づけるモデルとしても活用できる。ただし、本モデルを実際に運用するためには、計算手続きの複雑さと記憶容量の消耗という問題を解決しなければならない(Jaynes, 1990)。とくに記憶容量の問題は、高次の走査曲線を計算するたびに、それまで経過してきたすべての吸・脱水折り返し点の $\phi$ ,  $\theta$ を必要とするため、本モデ

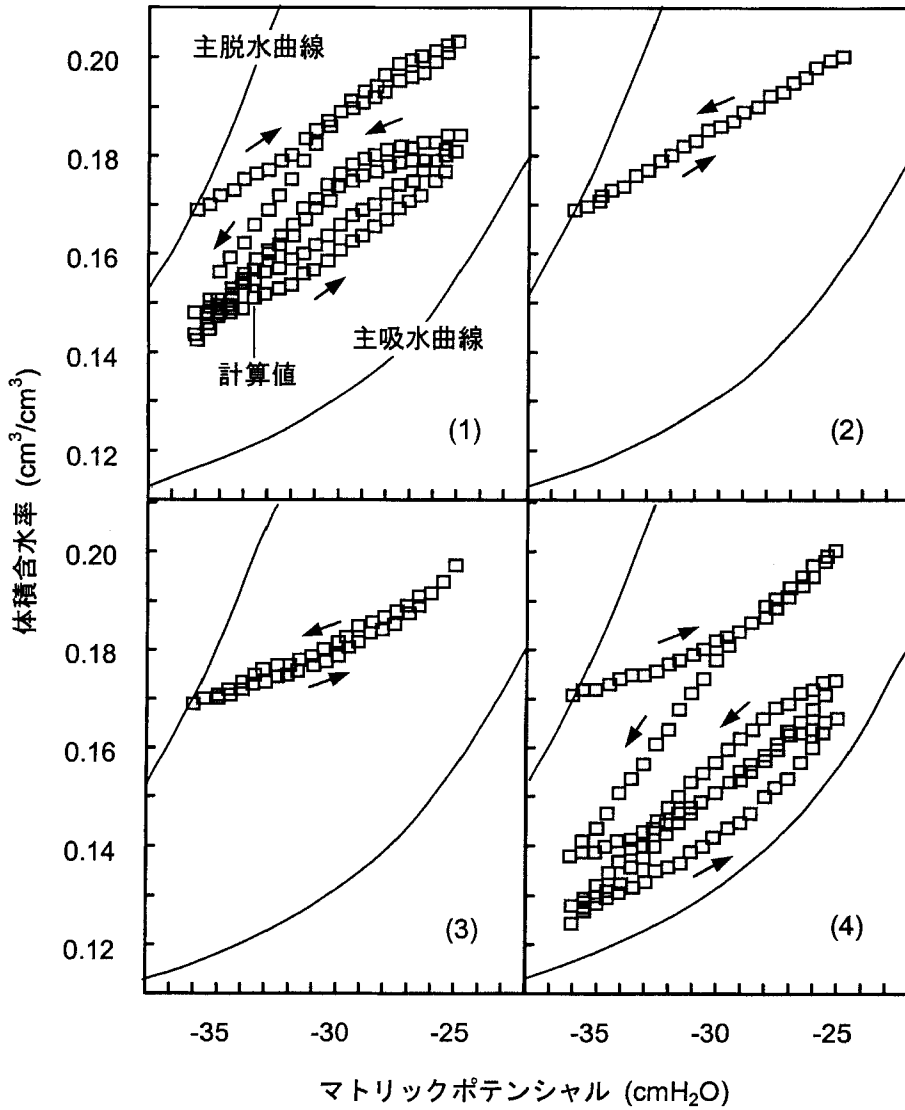


図-4 (1)主曲線内挿モデル, (2)直線近似モデル, (3)領域モデル, (4)パラメータスケールモデルにおけるくみ出し効果 (Jaynes, 1990 より)

表-1 定量モデルにおける長所と短所の比較

	走査曲線		計算手続き	記憶容量	くみ出し効果	数値解析への適用
	高φ領域	低φ領域				
修正従属領域モデル	○	×	×	×	○	○
主曲線内挿モデル	×	○	△	○	×	○
直線近似モデル	×	△	○	○	○	○
パラメータスケールモデル	△	△	○	○	×	○

○, 有利; △, 中間; ×, 不利

ルの実用的価値を著しく阻害する要因となっている。領域モデルを長期モニタリングなどに活用するためには、記憶容量を節約するアルゴリズムの開発が不可欠になるだろう。

一方パラメータスケールリングモデルは、計算処理が簡素であることや記憶容量が小さくてすむことなど、領域モデルにはない長所を有しており(表1)、高 $\phi$ 領域での走査曲線の予測精度もある程度確保されているなど、実用モデルとしての存在価値は高い。ただし、 $\theta$ の“くみ出し効果”が生じる場合には、それが水移動の解析に誤差を与えない範囲でモデルを利用するか、あるいはくみ出し効果を抑制するための何らかのアルゴリズムをモデルに付け加える必要がある。このことは、吸水と脱水を交互に繰り返す現地土層ではとくに注意しなければならない点である。

## 8. おわりに

これまでの水移動研究が、ヒステリシスの影響をとくに考慮しなくても一定の成果を収めてきたのは、吸水過程あるいは脱水過程のどちらか一方しか関わらないような現象(あるいは条件)を設定していたためと考えられる。また、ヒステリシス現象の解明を目的とした研究でも、実験規模や測定精度、計算処理の簡略さなどの理由から、室内カラム試験を中心に行われたものが多く、その成果を現地圃場に適用した例は少なかった。

しかし、ヒステリシス現象が水移動におよぼす影響の度合いは、間隙組成や土粒子の界面特性など、土壌本来の性質に加え、降雨、蒸発散、地下水位など、土壌を取り巻く環境に支配されて多様に変化するとみられることから、ヒステリシスが水移動におよぼす影響を立地環境とのかねあいで検討する必要がある。また近年、圃場スケールあるいは流域スケールで物質移動現象をとらえる視点が重要になってきており、現地土層中の硝酸態窒素などの動態を評価するうえでも、ヒステリシス現象を正しく位置づける必要がある。

今後は、土壌水理特性の面的評価法の開発や土壌構造の不均一性によるバイパス流の解明などとあわせて、現地土層中におけるヒステリシス現象の機能・役割の解明、ならびに長期モニタリングに耐えうる新たな定量モデルの開発が望まれるところである。

## 謝 辞

本報をまとめるにあたりご指導、ご助言をいただいた農業環境技術研究所の長谷川周一氏、同土壌物理研究室の加藤英孝氏、農業工学研究所土壌物理セミナーの皆様様に深く感謝の意を表す。

## 引用文献

- 粟生田忠雄・吉田昭治(1995): ヒステリシスを考慮した土壌-植物-大気連続系の土壌水分動態モデル, 水文・水資源学会誌, **8** (3): 322~334.
- 粟生田忠雄・吉田昭治・中野俊郎・山田秋夫(1992): ヒステリシスを考慮した砂質土への降雨浸潤の基礎的研究-下方境界に地下水面がある場合-, 農土論集, **157**: 35~44.
- Aylmore, L.A.G. and Quirk, J.P. (1959): Swelling of clay-water system. *Nature*, **183**: 1752~1753.
- Beese, F. and van der Ploeg, R.R. (1976): Influence of hysteresis on moisture flow in an undisturbed soil monolith. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**: 480~484.
- Bresler, E. and Hanks, R.J. (1969): Numerical method for estimating simultaneous flow of water and salt in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33**: 827~832.
- Bresler, E., Kemper, W.D. and Hanks, R.J. (1969): Infiltration, redistribution, and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33**: 832~840.
- Brock, R.R. and Amar, A.C. (1974): Ground-water recharge strip basin-experiments. *J. Hydraul. Div., ASCE*, **100**: 569~592.
- Curtis, A.A. and Watson, K.K. (1984): Hysteresis-affected water movement in scale-heterogeneous profiles. *Water Resour. Res.*, **20**: 719~726.
- Dane, J.H. and Wierenga, P.J. (1975): Effect of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil. *J. Hydrol.*, **25**: 229~242.
- DeBano, L.F., Dunn, P.H. and Conrad, C.E. (1977): Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soil. *Proc. Symp. Environ. Consequences Fire Fuel Manage. Medit. Ecosyst., U. S. For. Ser. Gen. Tech. Report WO-3*, p. 65~74.
- Everett, D.H. (1954): A general approach to hysteresis: 3. A formal treatment of the independent domain model of hysteresis. *Trans. Faraday Soc.*, **50**: 1077~1096.
- Everett, D.H. (1955): A general approach to hysteresis: 4. An alternative formation of the domain model. *Trans. Faraday Soc.*, **51**: 1551~1557.
- Everett, D.H. and Smith, F.W. (1954): A general ap-

- proach to hysteresis : 2. *Trans. Faraday Soc.*, **50** : 187~197.
- Everett, D.H. and Whitton, W.I. (1952) : A general approach to hysteresis : 1. *Trans. Faraday Soc.*, **48** : 749~752.
- Gillham, R.W., Klute, A. and Heerman, D.F. (1976) : Hydraulic properties of a porous medium : measurement and empirical representation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40** : 203~207.
- Gillham, R.W., Klute, A. and Heerman, D.F. (1979) : Measurement and numerical simulation of hysteretic flow in a heterogeneous porous medium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43** : 1061~1067.
- Haines, W.B. (1930) : Studies in the physical properties of soils, 5. The hysteresis effect in capillary properties and the models of moisture distribution associated therewith. *J. Agric. Sci.*, **20** : 97~116.
- Hanks, R.J., Klute, A. and Bresler, E. (1969) : A numerical method for estimating infiltration, redistribution, drainage, and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.*, **5** : 1064~1069.
- Hasegawa, S., Osozawa, S. and Ueno, H. (1993) : Measurement of soil water flux in andisols at a depth below a root zone of about 1 meter. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **40** (1) : 137~147.
- Hillel, D. (1977) : Isothermal evaporation of soil water under fluctuating evaporativity, including the role of hysteresis, *Computer Simulations of Soil-Water Dynamics, A Compendium of Recent Work*, International Development Research Center, Ottawa. p. 35~60.
- Hillel, D. (1980) : Hysteresis, Soil water : content and potential, *Fundamentals of soil physics*. p. 152~155, Academic Press, New York.
- Hillel, D. and Mottes, J. (1966) : Effect of plate impedance, wetting method and aging on soil moisture retention. *Soil Sci.*, **102** : 135~140.
- Ho, N.T., Gaudu, R. and Thirriot, C. (1977) : Influence of the hysteresis effect on transient flows in saturated-unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, **13** : 992~996.
- Homes, J.W. (1955) : Water sorption and swelling of clay blocks. *J. Soil Sci.*, **6** : 200~208.
- Ibrahim, H.A. and Brutsaert, W. (1968) : Intermittent infiltration into soils with hysteresis. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, HY1 : 113~137.
- Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P. (1995) : Hysteresis in soil water phenomena, *Soil-water interactions*. p. 39~68.
- Jaynes, D.B. (1985) : Comparison of soil-water hysteresis models. *J. Hydrology*, **75** : 287~299.
- Jaynes, D.B. (1990) : Soil water hysteresis : models and implications. *Process studies in hillslope hydrology*. p. 93~126.
- Jones, M.J. and Watson, K.K. (1987) : Effect of soil water hysteresis on solute movement during intermittent leaching. *Water Resour. Res.*, **23** : 1251~1256.
- Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner, W.H. (1991) : Hysteresis in water content-energy relationships, *Soil physics*. p. 65~68, John Wiley and Sons, New York.
- 加藤英孝 (1984) : 土壌水分のヒステリシス現象, *土壌の物理性*, **50** : 46~51.
- Klute, A. and Heerman, D.F. (1974) : Soil water profile development under a periodic boundary condition. *Soil Sci.*, **117** : 265~271.
- 小林政広・小野寺真一・加藤正樹 (1996) : 撥水性が森林土壌の水分特性曲線に与える影響, *水文・水資源学会誌*, **9** (1) : 88~91.
- Kool, J.B. and Parker, J.C. (1987) : Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, **23** : 105~114.
- Martinez, J. (1975) : Subsurface flow from snowmelt traced by tritium. *Water Resour. Res.*, **11** : 496~498.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1955 a) : Theory of capillary flow : 1. Practical implications. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19** : 267~271.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1955 b) : Theory of capillary flow : 2. Experimental information. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19** : 271~275.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1956) : Physical theory for capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.*, **27** : 324~332.
- Morrow, N.R. and Harris, C.C. (1965) : Capillary equilibrium in porous materials. *Soc. Pet. Eng. J.*, **5** : 12~14.
- Mualem, Y. (1973) : Modified Approach to Capillary Hysteresis Based on a Similarity Hypothesis.



- Water Resour. Res., **9** : 1324~1331.
- Mualem, Y. (1974) : A conceptual model of hysteresis. Water Resour. Res., **10** : 514~520.
- Mualem, Y. (1976b) : Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., **12** : 1248~1254.
- Mualem, Y. (1977) : Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics. Water Resour. Res., **13** : 773~780.
- Mualem, Y. (1984) : A modified dependent-domain theory of hysteresis. Soil Sci., **137** : 283~291.
- Mualem, Y. and Dagan, G. (1975) : A dependent domain model of capillary hysteresis. Water Resour. Res., **11** : 452~460.
- Mualem, Y. and Miller, E.E. (1979) : A hysteresis model based on an explicit domain-dependence function. Soil Sci. Soc. Am. J., **43** : 1067~1073.
- 仲谷紀男 (1981) : 有機物が関与する土壌の水分特性について, 農技研報告, B32, 1~74.
- Neel, L. (1942) : Theories des lois d'aimantation de Lord Rayleigh : 1. Cah. Phys., **12** : 1~20.
- Neel, L. (1943) : Theories des lois d'aimantation de Lord Rayleigh : 2. Cah. Phys., **13** : 19~30.
- Nieber, J.L. and Walter, M.F. (1981) : Two-dimensional soil moisture flow in a sloping rectangular region : experimental and numerical studies. Water Resour. Res., **17** : 1722~1730.
- Perrens, S.J. and Watson, K.K. (1977) : Numerical analysis of two-dimensional infiltration and redistribution. Water Resour. Res., **13** : 781~790.
- Philip, J.R. (1964) : Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials. J. Geophys. Res., **69** : 1553~1562.
- Pickens, J.F. and Gillham, R.W. (1980) : Finite element analysis of solute transport under hysteretic unsaturated flow conditions. Water Resour. Res., **16** : 1071~1078.
- Poulovassilis, A. (1962) : Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. Soil Sci., **93** : 405~412.
- Poulovassilis, A. (1970) : The hysteresis of pore water in granular porous bodies. Soil Sci., **109** : 5~12.
- Poulovassilis, A. and Childs, E.C. (1971) : The hysteresis of pore water : the nonindependence of domains. Soil Sci., **112** : 301~312.
- Poulovassilis, A. and El-Ghamry, W.M. (1978) : The dependent domain theory applied to scanning curves of any order in hysteresis soil water relationships. Soil Sci., **126** : 1~8.
- Poulovassilis, A. and Tzimas, E. (1974) : The hysteresis in the relationship between hydraulic conductivity and suction. Soil Sci., **117** : 250~256.
- Preisach, F. (1935) : Uber die magnetische Nachwirkung. Z. Phys., **94** : 277~302.
- Royer, J. M. and Vachaud, G. (1975) : Field determination of hysteresis in soil water characteristics. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **39** : 221~223.
- Russo, D., Jury, W.A. and Butters, G.L. (1989) : Numerical analysis of solute transport during transient irrigation. I. Effect of hysteresis and profile heterogeneity. Water Resour. Res., **25** : 2109~2118.
- Shen, R. and Jaynes, D.B. (1988) : Effect of soil water hysteresis on simulation infiltrated and redistribution of water in a soil column. J. Hydraul. Eng., **10** : 11~20.
- Staple, W.J. (1966) : Infiltration and redistribution of water in vertical columns of loam soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **30** : 553~558.
- Stauffer, F. and Dracos, T. (1986) : Experimental and numerical study of water and solute infiltration in layered porous media. J. Hydrol., **84** : 9~34.
- Stauffer, F., Franke, H.J. and Dracos, T. (1992) : Hysteretic storativity concept for aquifer simulation. Water Resour. Res., **28** : 2307~2314.
- Talsma, T. (1970) : Hysteresis in two sands and the independent domain model. Water Resour. Res., **6** : 964~970.
- Tizmas, E. (1979) : The measurement of soil water hysteretic relationships on a soil monolith. J. Soil Sci., **30** : 529~534.
- Topp, G.C. (1969) : Soil water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteresis domain model. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **33** : 645~651.
- Topp, G.C. (1971a) : Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils. Water Resour. Res., **7** : 914~920.
- Topp, G.C. (1971b) : Soil water hysteresis : the domain model theory extended to pore interaction conditions, Soil Sci. Soc. Am. Proc., **35** : 219~225.
- Topp, G.C. and Miller, E.E. (1966) : Hysteresis mois-

- ture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30** : 156~162.
- Vachaud, G. and Thony, J.L. (1971) : Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resour. Res.*, **7** : 111~127.
- 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.
- Watson, K.K. (1986) : Numerical analysis of natural recharge to an unconfined aquifer. *Conjunctive Water Use (Proc. Budapest Symposium, July 1986)*, IAHS, **156** : 323~333.
- Watson, K.K., Reginato, R.J. and Jackson, R.D. (1975) : Soil water hysteresis in a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **39** : 242~246.
- Watson, K.K. and Sardana, V. (1987) : Numerical study of the effect of hysteresis on post-infiltration redistribution. *Proc. Intern. Conf. on Infiltration Development and Application*, Water Resour. Center, Honolulu, HI, 241~250.
- 吉田止則 (1999) : 土壌浸透水調査法 (フラックス法), 水環境保全のための農業環境モニタリングマニュアル, 農業環境技術研究所, IV-2, 1~6.

受稿年月日 : 2000年 6月 27日  
 受理年月日 : 2000年 8月 29日

## 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〉



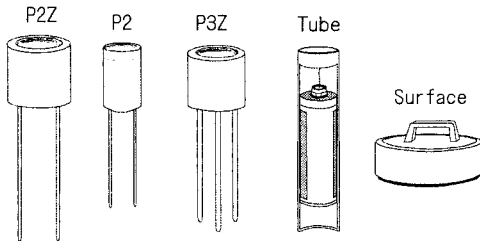
### ●特長

- 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できる。
- 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応可能
- 6) 現場設置用システムのマジュールによる対応

### ●使用分野

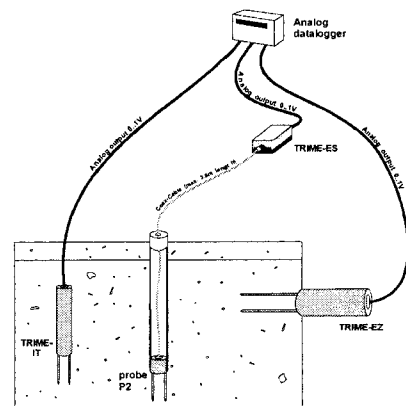
土壌、石材、穀物、また水による自然災害の常時モニタ、構造物や土壌の含水量モニターあるいは森林、水源地帯や農業計画の一環としての含水測定、モニターなど

### 【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 7ホ ービル新丸子 207  
TEL:044-411-1263 FAX:044-411-1839

★利府事業所 営業部

〒981-0134 宮城県利府町しらかし台 6-6-6  
TEL:022-356-6111 FAX:022-356-6120

# 植物の根、菌根の発達と土壌物理性

磯 部 勝 孝\*

The Development of Root, Mycorrhiza and Soil Physics

Katsunori ISOBE\*

\* College of Bioresource Sciences, Nihon University

## Abstract

The relation between plant root and mycorrhiza and the soil environment were reviewed. The existence of root and mycorrhiza in soil promoted the aggregation of soil and increased available nutrition. As a result, it improved soil productivity and prevented soil erosion. The colonization of mycorrhizal fungi and sporulation was affected by soil moisture and soil structure. For the germination of spore, the oxygen was necessary. On the other hand, carbon dioxide promoted the spore germination of mycorrhizal fungi.

**Key words** : soil productivity, soil erosion, soil physics, mycorrhiza, root

## 1. はじめに

「土壌」という言葉は「土」と「壤」の二つの文字から成り立っている。このうち「土」は「土壌」と同じ意味で使われることもあるが、それ以外に大地、地面、値打ちのないものといった意味もある。一方、「壤」には豊か、柔らかい、細かい、肥えた土といった意味がある。したがって「土」と「土壌」は同じように使われる場合もあるが単に「土」といった場合、それは物質または材料としての土の意味が強く、「土壌」といった場合は土に長い時間をかけて作物がよく育つように改善したものを指し、主に農耕の対象となる土を示すことが多い。

作物の生育には光、温度、空気、水分、養分が必要で、これに生育を阻害する有害因子がないことが重要である。このうち光を除く他の因子は何らかのかたちで土壌と関わりがある。例えば、植物は土壌から水分と養分を吸収し、地温や土壌中での酸素供給量の違いは根の生長や養分吸収に著しい影響を与える。これらは土壌が作物の生育にとっていかに重要であるかを示す一例である。作物がよく育つ土壌とは作物生産力のある土壌とも言え、これは土壌の持つ養分供給能、養分保持能、水分供給能、通気能および生物相の総合的なものである。したがって、土壌の作物生産力を改善するには土壌の養分供給能、養分保持能、水分供給能、通気能および生物相を

作物の生育に最も良い状態にすればよいと考えられる。土壌の作物生産力を短期間に改善するには化成肥料や堆きゅう肥などの有機物を施用することが効果的であるが、植物の根や菌根もこれらと同様な働きをしている。そこで植物の根や菌根が土壌環境にどのような影響を及ぼし、さらにそれに伴う土壌の作物生産力の変化について述べる。

## 2. 植物の根が土壌環境に及ぼす影響

根は土壌中から養分や水分を吸収するが、一方で根冠細胞や根毛から様々な物質を分泌している(飯島, 1998)。分泌物質の主体は糖類であり、その他に有機酸、アミノ酸、酵素および植物ホルモンなどを分泌している(Isobe *et al.*, 1998)。根が物質を分泌するのは伸長の際に土壌から受ける様々なストレスを軽減するためと考えられている(Iijima *et al.*, 1992; Read *et al.*, 1997)。しかし、同時に根が物質を分泌することによって土壌中に固定されているミネラルの可溶化や土壌構造の団粒化が促進される。

インドのデカン高原にはパーテイソルというアルカリ性土壌が広く分布しているが、この土壌に含まれているリンはカルシウムと結びついて結晶化が進んでいるため植物がこれを吸収するには土壌を酸性化する必要がある。土壌を酸性化するには土壌中に酸を分泌するのが最

\* 日本大学生物資源科学部 〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866

キーワード: 土壌生産力, 土壌侵食, 土壌物理性, 菌根, 根

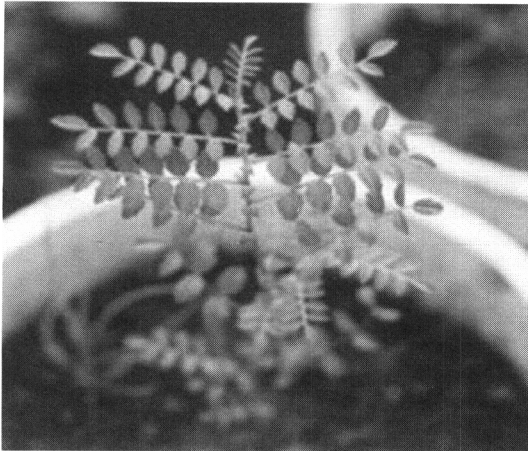


図-1 ヒヨコマメの幼植物

も容易であると考えられるが、多くの植物はパーティソルを酸性化するほど酸性物質を分泌していない。そのため多くの作物はパーティソルに含まれているリンをほとんど吸収することができない。また、パーティソルにリン肥料を施用してもリンがカルシウムと結合して施用したリンはほとんど作物に吸収されない。この結果、パーティソルで作物を栽培する際、リン肥料を施用してもリン欠乏によって多くの作物は正常に生育することができない。しかし、ヒヨコマメ (*Cicer arietinum* L.) (図-1) は根からクエン酸やコハク酸などの有機酸を多く分泌して土壌の pH を下げるためパーティソルからリンを吸収することができる (Ae *et al.*, 1990; Arihara *et al.*, 1991)。その結果、ヒヨコマメとソルガムを混植するとソルガムを単独で栽培した場合に比べ生育が良好となる。さらにヒヨコマメの栽培跡地では他の作物の栽培跡地に比べ土壌中の可吸態リンが増え後作の生育が良好となる (有原, 1999)。これと同様な現象はヒヨコマメのほかにかマメ (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) やルーピン (*Lupinus* sp.) でも認められている (Arihara *et al.*, 1991)。従ってこのような特性を持つ作物を作付け体系の中に組み込めば、パーティソルのような通常の方法では作物の栽培が困難な土壌でも作物が直接吸収できるリンの量が増え作物の生産性を安定化させることができると考えられる。

作物は根によって土壌中から養分を吸収して生長するが、根が養分を吸収するには土壌中に適度な水分と空気が必要である。根が養分吸収をするのに必要な水分と空気を土壌中に保つには土壌の保水性と透水性を高め、それを長く維持させることが重要である。土壌の団粒化が発達すると養分吸収に好適な保水性、透水性を保持で

き、土壌侵食に対する抵抗力が高くなる。このようなことから作物栽培において耕地土壌の保水性と透水性を改善することは、作物の生育に必要な養分を供給することと同様に極めて重要なことである。土壌の団粒化をはかるには土壌改良資材を施用することが有効であるが、植物の根が土壌中に存在することでも土壌の団粒化ははかれる。団粒構造の発達は土壌粒子どうしが結合する段階と土壌粒子が結合した構造に耐水性が備わる段階があるが、このうち根は後者の段階において重要な働きをしている (小林, 1994)。すなわち、根からはペクチン様物質が分泌しているが、この物質によって土壌団粒どうしが結びつきあう。たとえば、土壌から根を引き抜いた際、根のまわりに土壌粒子が付着していることがあるが、これは根から分泌されたペクチン様物質が接着剤のような働きをして根の表面に土壌粒子を付着させているためである。さらに、根は土壌から水分を吸収するがそれによって団粒構造を乾燥させ耐水性のある構造へと発達させる。そして、同時に根から分泌されたペクチン様物質は枯死した根とともに根周辺の微生物の餌にもなる。その結果、根の周辺ではこれらを餌とする微生物の密度が高まる。この微生物は根と同じように粘性物質や有機酸を産出するため土壌の団粒化を促進し、ミネラルを可溶化して地力を高めることに貢献している (飯島, 1998)。

### 3. 菌根とは

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である (図-2)。菌根には外生菌根と内生菌根があるが、この両者は菌糸が根の表面でとどまるか細胞の内部まで侵入するかで分けられる。そして植物に菌根を形成する糸状菌

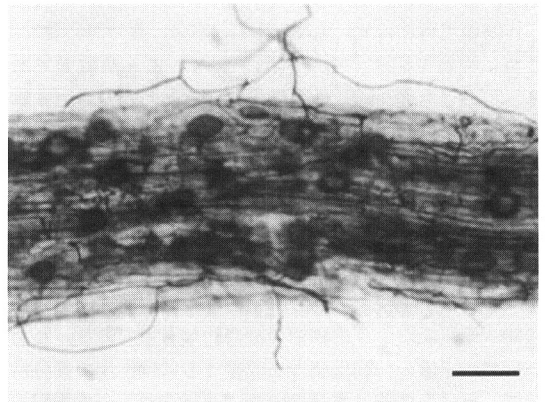


図-2 菌根菌が感染したインゲンマメの根  
スケールバーは 200 $\mu$ m

を菌根菌と言う。菌根は植物が陸上に進出し始めたと推定される3億数千年前の根の化石にも形成されていたことから植物が陸上に進出して間もなく菌根菌と植物が共生関係を結んだと考えられている (Stubblefield *et al.*, 1987)。菌根菌は植物の根に感染すると土壌中に外生菌糸を伸ばし、土壌中からミネラルや水分を吸収して宿主植物に供給する (Harley, 1971; Mosse, 1957)。その結果、菌根菌が感染した植物では生育が促進され、収穫量が增大することがあり (磯部ら, 1999 a; Puthur *et al.*, 1998; 依谷ら, 1996)、さらに宿主植物の耐病性や耐乾性が高まることも報告されている (Allen *et al.*, 1986; Matsubara *et al.*, 1995; Niemira *et al.*, 1996; Simpson *et al.*, 1990)。このようなことから近年作物栽培や造園緑化において菌根菌の利用が広まりつつある (丸本ら, 1999; 依藤ら, 1995)。

植物の根に感染した菌根菌の外生菌糸は植物の根毛と同じようなはたらきをしている。すなわち、植物は根毛を形成してミネラルや水分の吸収範囲を拡大させているが、菌根菌の外生菌糸は根から土壌中に伸長すると根では吸収できない範囲からもミネラルや水分を吸収してこれを宿主植物に供給する。外生菌糸は根毛に比べて著しく長く、根の表面から12 cm離れたところまで伸長してミネラルを吸収したケースもある (Li *et al.*, 1991)。また、Nicolson (1959) の報告によると外生菌糸の直径は2~27 $\mu\text{m}$ で、植物の根より著しく細い。その結果、菌根菌の外生菌糸は植物の根が侵入することができない小さな土壌孔隙にも侵入することができる。このように細くて長い形態は菌根菌の外生菌糸が土壌中からミネラルや水分を効率的に吸収できる一因とも考えられる。

#### 4. 土壌環境，特に土壌物理性が菌根の発達に及ぼす影響

植物の根における菌根の発達は土壌環境の違いによって大きく異なる。具体的には土壌の肥沃度、水分、pH、温度などが菌根の発達に影響を与える (鈴木, 1987)。ここでは菌根の発達に影響を及ぼす要因のうち、土壌物理性の影響について最近農業分野で利用され始めているアーバスキュラー菌根菌 (以下、AM菌とする) を例にして述べる。

磯部ら (1993) はダイズの根における菌根の発達と孢子形成におよぼす土壌水分や土壌構造の影響について調べている。すなわち、AM菌を接種した土壌にダイズを播種し、このダイズを上壌の水分ポテンシャルがpF 1.2, 2.0, 2.8の条件下で育てた場合、ダイズの根における菌根の発達はpF 2.0の時に最も著しく、ポット中に形成された孢子の数もpF 2.0の場合が最も多かった (図-3, 4)。また、土壌の粒径を2.0 mm以上、0.5~2.0 mm, 0.5 mm以下に分類し、土壌粒子の大きさが異なる3種類の黒ボク土壌でダイズ (*Glycine max* L.) を育てた場合、粒径0.5 mm以下の土壌で育てたダイズでは菌根の発達が悪く、形成された孢子数も土壌の粒子の直径が小さくなるほど少なくなった (図-5, 6)。このように同じ土壌でも土壌水分や土壌粒子の大きさが異なると菌根の発達や形成孢子数に変化が生じる (磯部ら, 1993)。この原因は土壌水分の違い (Daniels, 1980; Koske, 1981) や土壌粒子の大きさの違いなど物理的な要因がAM菌の孢子発芽や菌糸伸長ならびに孢子形成に影響を与えたと考えられる。しかし、土壌水分や土壌粒子の大きさが異なると土壌中のガス組成にも変化が生じると考えられるため土壌水分や土壌構造の違いに伴う土壌中

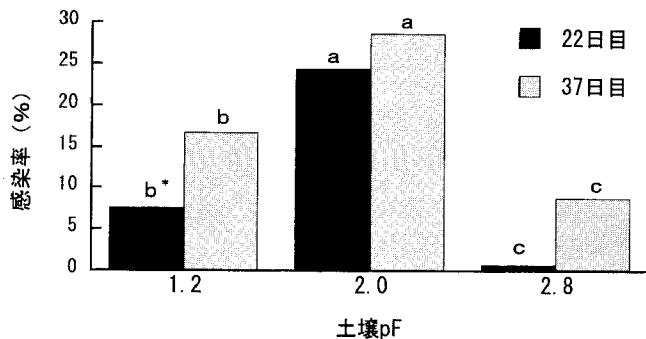


図-3 土壌水分の違いがダイズにおけるアーバスキュラー菌根菌の感染に及ぼす影響

\*: 同一アルファベット間には同じ調査日の感染率に Tukey 法 (5% レベル) で有意差がないことを示す

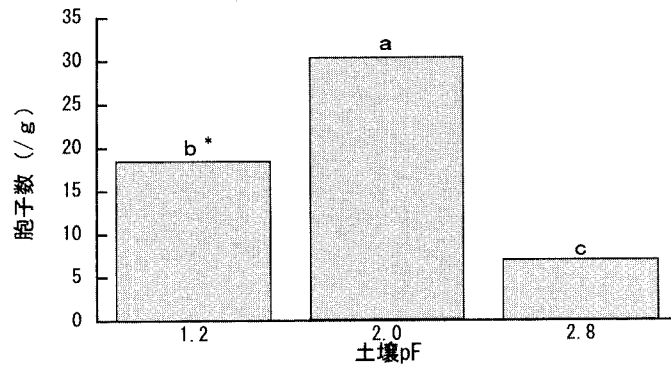


図-4 土壌水分の違いがアーバスキュラー菌根菌の胞子数に及ぼす影響  
\* : 同一アルファベット間には胞子数に Tukey 法 (5% レベル) で有意差がないことを示す

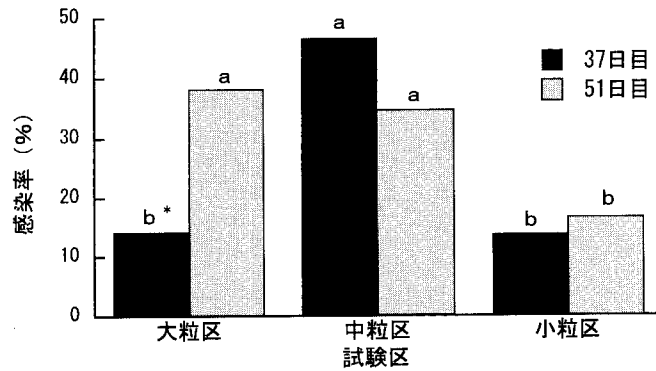


図-5 土壌粒子の大きさの違いがダイズにおけるアーバスキュラー菌根菌の感染に及ぼす影響  
\* : 同一アルファベット間には同じ調査日の感染率に Tukey 法 (5% レベル) で有意差がないことを示す

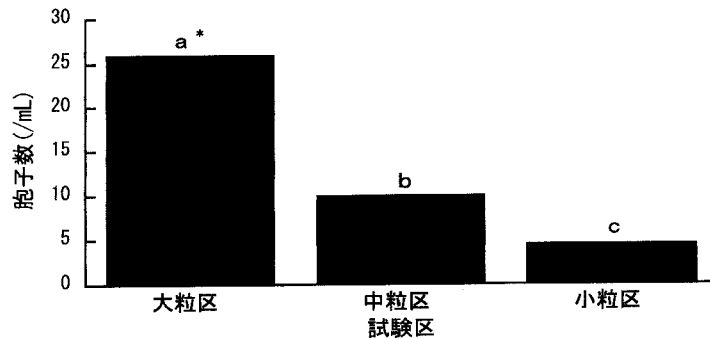


図-6 土壌粒子の大きさの違いがアーバスキュラー菌根菌の胞子数に及ぼす影響  
\* : 同一アルファベット間には胞子数に Tukey 法 (5% レベル) で有意差がないことを示す

のガス組成の違いも AM 菌の生態に影響を与えている可能性もある。

AM 菌の胞子は水中でも発芽するが、土壤が乾燥して土壤水分が極めて低くなると発芽や菌糸伸長を停止する (Daniels, 1980; Koske, 1981)。このことから水生植物の根にも菌根が発達すると考えられるが、実際には水生植物では菌根があまり発達していない。例えば、イネ (*Oryza sativa* L.) には湛水状態で生育する水稲と畑状態で生育可能な陸稲があるが、このうち陸稲の根には菌根がよく発達している。しかし、湛水状態で生育する水稲には菌根は殆ど発達していない。ところが、水稲でも落水後の根には菌根が発達する。さらに、菌根は水耕で栽培した作物の根でも溶液中に酸素を十分に供給すれば発達する。これらのことから AM 菌の胞子から菌糸を発芽させるには水分が必要であるが、発芽した菌糸を植物の根に感染させて菌根を発達させるには根の周辺に酸素が必要であると考えられる。しかし気体の中では酸素のみが AM 菌の胞子発芽や感染を左右しているかと言えば必ずしもそうとは限らない。例えば、Becard ら (1989) は寒天培地上で AM 菌の胞子を培養する際、二酸化炭素濃度を 0.03% から 0.5% に高めると菌糸の伸長が促進されたことを報告している。一般的に大気中の二酸化炭素濃度は 0.03% 程度であるが、土壤中は微生物や植物の根がエネルギー獲得のため酸素を消費して二酸化炭素を排出しているので大気中のガスに比べ二酸化炭素濃度が高い。さらに土壤の通気性は土壤中のガス組成に大きな影響を与えることから同じ土壤でも場所や地表からの深さによってもガス組成は著しく異なる。このことは土壤中の AM 菌は生息場所のガス組成の違いによって菌糸の伸長や根への感染状況が大きく変化することを意味する。したがって、土壤物理性の違いが AM 菌の生態にどのような影響をおよぼしているか明らかにするには土壤中に存在する個々のガスが AM 菌の生態にどのような影響をおよぼしているか明らかにするとともに AM 菌の胞子発芽や菌糸の伸長、根への感染を最も促進するガス組成と土壤水分について調査する必要がある。

## 5. 菌根の発達が土壤環境に及ぼす影響

土壤中に根が存在すると土壤の団粒化がはかれることはすでに述べたが、その根に菌根菌が感染していると土壤の団粒形成はより促進される (Tisdall *et al.*, 1982)。土壤からインゲンマメの根を引き抜いた際、菌根菌が感染していない個体に比べ菌根菌が感染した個体では根の周りに 5 倍以上も土壤が付着する (Sutton *et al.*, 1976)。これは植物の根に感染した菌根菌の外生菌糸が微細な土壤粒子を結びつけた結果である。AM 菌の外生菌糸は土

壤からリンをはじめとするミネラルや水分を吸収するために土壤中に伸び、長いものは数 cm にも達する (Li *et al.*, 1991)。そしてこの菌糸は根や根毛に比べて極めて細い (2~27 $\mu$ m) のでシルト粒子の孔隙中まで侵入することができる (Allen, 1982)。このことは菌根菌の外生菌糸が植物の根より効率的にミネラルや水分を吸収できる要因であるが、同時に外生菌糸が土壤粒子の孔隙中に侵入して土壤粒子をより強固に結びつける一因でもある。

根の表面に根毛が発達すると根と土壤溶液が接触する面積が増え、植物の養分吸収が有利になる。植物の根に感染した菌根菌は土壤中に外生菌糸を伸ばすが、この外生菌糸は植物の根の根毛と同じように養分の吸収面積を拡大させているだけにすぎないと考えられていた。しかし、近年外生菌糸は様々な方法によって土壤中のミネラルを可溶化していると考えられるようになってきている。例えば、Graustein ら (1977) は菌根菌の菌糸からシュウ酸カルシウムが産出され、このシュウ酸によって土壤中のミネラルの風化速度が増し植物が吸収できる養分が増加することを明らかにしている。また、Jurinak ら (1986) は AM 菌の外生菌糸の表面にシュウ酸塩を発見し、このシュウ酸が菌根菌のリン吸収を促進していると考えている。これらのことから植物の根が存在すると土壤の団粒化やミネラルの可溶化が促進されるが、その根に菌根菌が感染して菌根が発達していると土壤の団粒化やミネラルの可溶化はより促進され、土壤の作物生産力を向上させると推察される。

## 6. 根や菌根の発達が土壤侵食防止に果たす役割

土壤侵食とは雨水や風の作用によって土壤が流失または飛散する現象である。土壤侵食は土壤の中でも粒子が小さく腐植や養分を多く含む部分ほど受けやすい。したがって、著しい土壤侵食を受けると土壤の作物生産力が低下し、場合によっては施肥量の増大につながり生産コストの増加を招くこともある。さらに、土壤侵食によって耕地から流失した土壤粒子が河川や湖沼、海洋に流れ込むと水質汚染を引き起こすこともある。このようなことから土壤侵食の防止は作物生産の安定化や環境保全のために極めて重要と考えられる。土壤侵食を防ぐには土壤の表面を植物などで覆って雨水や風が直接土壤と接触しないようにすると効果的である。また、土壤構造を団粒化して土壤粒子を大きく重くすることによっても抑えることができる。このようなことから畑地においては常に作物を栽培して土壤表面にできるだけ風や雨が直接あたらないようにし、土壤中に根を存在させ、しかもその根に菌根菌を感染させることで土壤侵食の進行を抑制させることができると考えられる。このことを応用して近



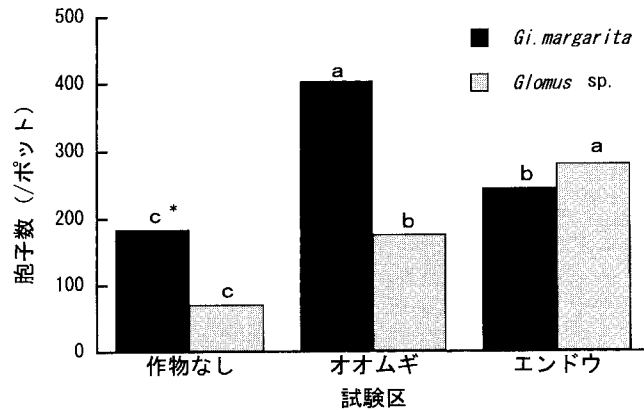


図-7 冬作物の導入が土壌中のアーバスキュラー菌根菌の孢子数に及ぼす影響  
\*: 同一アルファベット間にはそれぞれの菌について孢子数に Tukey 法 (5% レベル) で有意差がないことを示す

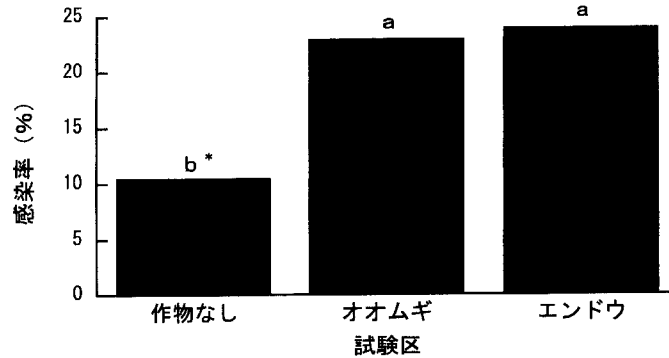


図-8 前作の違いが後作インゲンマメにおけるアーバスキュラー菌根菌の感染に及ぼす影響  
\*: 同一アルファベット間には Tukey 法 (5% レベル) で有意差がないことを示す

年、自然災害による荒廃裸地や開墾に伴う裸地傾斜では二次災害の防止や表土の侵食を防ぐため植物の種子に菌根菌を混合して播種し、植物の根に菌根菌を感染させ被覆植物の生育を促進させている事例もある (丸茂ら, 1999)。

AM 菌は植物の根に感染して新たな孢子を形成する。しかし、長い間土壌中に植物の根がないと新たな孢子が形成されず孢子数が減少する。したがって、耕地土壌中の AM 菌孢子数を維持するには常に土壌中に植物の根を存在させればよいと考えられる。磯部ら (1999b) は AM 菌の孢子を接種した土壌をポットに充填し、そこに冬作物を栽培した場合としない場合で AM 菌の孢子数がどのように変化するか明らかにしている。この報告によると冬の間ポットに作物を栽培しない場合に比べオオ

ムギ (*Hordeum vulgare* L. emend. Lam.) やエンドウ (*Pisum sativum* L.) を栽培したほうが翌年の春における孢子数が多かった (図-7)。その結果、冬作物を導入すると後作インゲンマメ (*Phaseolus vulgaris* L.) における菌根菌の感染率が高くなり生育も冬作物を導入しなかった場合に比べ著しく良好となった (図-8, 9)。このことから圃場に常に作物を栽培することは土壌侵食を防止するだけでなく菌根菌孢子の密度維持と後作物の菌根発達を促すことがあり、土壌の生物相から見た地力維持につながると考えられる。

## 7. おわりに

これまでの長年の研究によって植物の根や菌根の発達と土壌の作物生産力との間には深い関係があることがわ



図-9 前作の違いが後作インゲンマメの生育に及ぼす影響

かってきた。そして今回述べてきたように根や菌根の存在は土壤物理性を改善し、可給態のミネラルを増加させ土壤の作物生産力向上に貢献していると考えられる。しかし、両者の間には様々な要素が絡んでおり、その全容を明らかにするまでには至っていない。また、根や菌根は土壤中で発達するため直接これを確認することが難しく、この問題を解決する上で大きな障害になっている。今後、土壤の作物生産力に対して根や菌根がどのような役割をになっているのか明らかにするには様々な学問分野の研究者が協力し、この問題を多角的に捕らえて研究を進める必要があるのではないかと。

また、土壤や根の研究をする際、よりクリアーな結果を得るために実験系を単純にして圃場よりポットさらに試験管レベルの単純な実験系で試験を実施することがある。しかし、単純な実験系で得られた結果はあくまでひとつの事例にすぎず、それがそのまま圃場での現象を示しているとは考えにくい。農業という産業の上に成り立っている我々の研究においては常に現場のことを意識した研究を行う必要があると考える。従って土壤や根の研究をする際にも圃場レベルで行う試験をより重視すべきではないかと。

### 引用文献

Ae, N., Arihara, J., Okada, K., Yoshihara, T. and Johansen, C. (1990): Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent, *Science*, **248**: 477~480.  
 Allen, E.B. (1982): Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on water movement through *Bouteloua gracilis* (H.B.K.) Lag ex Steud, *New Phytol.*, **91**: 191~196.

Allen, E.B. and Allen, M.F. (1986): Water relations of xeric grasses in the field: Interactions of mycorrhizas and competition, *New Phytol.*, **104**: 559~571.

Arihara, J., Ae, N., Okada, K. and Johansen, C. (1991): Improvement of soil productivity through legume-based cropping system in Indian Alfisols and Vertisols under semi-arid environments, *Tropical Agriculture Research Series*, **24**: 157~173.

有原丈二 (1999): 第一章リン酸からみた輪作の効果と作付戦略, *現代輪作の方法*, 39~64, 農文協, 東京.

Becard, G. and Piche, Y. (1989): Fungal growth stimulation by CO<sub>2</sub> and root exudates in vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis, *Appl. Environ. Microbiol.*, **55**: 2320~2325.

Daniels, B.A. (1980): Factors affecting spore germination of the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus epigaeus*, *Mycologia*, **72**: 457~471.

Graustein, W.C., Cromack, K. Jr. and Sollins, P. (1977): Calcium oxalate: Occurrence in soils and effect on nutrient and geochemical cycles, *Science*, **198**: 1252~1254.

Harley, J.L. (1971): Fungi in Ecosystems, *J. Appl. Ecology*, **8**: 627~642.

Iijima, M. and Kono, Y. (1992): Development of golgi apparatus in the root cap cells of maize (*Zea mays* L.) as affected by compacted soil, *Annals of Botany*, **70**: 207~212.

飯島盛雄 (1998): 根の分泌物, 根の事典編集委員会編,

- 根の事典, 292~295, 朝倉書店, 東京.
- 磯部勝孝・藤井秀昭・坪木良雄 (1993): ダイズの VA 菌根の発達におよぼす土壌物理性の影響, 日作紀., **62** (別2): 236~237.
- Isobe, K. and Tsuboki, Y. (1998): Relationship between the amount of root exudates and the infection rate of arbuscular mycorrhizal fungi in gramineous and leguminous crops, *Plant Prod. Sci.*, **1**: 37~38.
- 磯部勝孝・坪木良雄 (1999 a): インゲンマメ栽培におけるアーバスキュラー菌根菌の利用に関する研究—接種々間でのインゲンマメの生育の違い—, 日作紀., **68**: 112~117.
- 磯部勝孝・坪木良雄 (1999 b): 冬作物の導入がアーバスキュラー菌根菌の密度と後作インゲンマメの生育に及ぼす影響, 日作紀., **68**: 118~125.
- Jurinak, J.J., Dudley, L.M., Allen, M.F. and Knight, W. G. (1986): The role of calcium oxalate in the availability of phosphorus in soils of semiarid regions: A thermodynamic study, *Soil Science*, **142**: 255~261.
- 小林裕志 (1994): 根による団粒形成, 森田茂紀・阿部淳編, 根ハンドブック, 123~124, 根研究会, 東京.
- Koske, R.E. (1981): *Gigaspora gigantea*: Observations on spore germination of a VA-mycorrhizal fungus, *Mycologia*, **73**: 288~300.
- Li, X-L., George, E. and Marschner, H. (1991): Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil, *Plant Soil*, **136**: 41~48.
- 丸本卓哉・河野伸之・江崎次夫・岡部宏秋 (1999): 火山灰荒廃地の菌根菌利用による植生復元, 土と微生物, **53**: 81~90.
- Matsubara, Y., Tamura, H. and Harada, T. (1995): Growth enhancement and verticillium wilt control by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus inoculation in eggplant, *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **64**: 555~561.
- Mosse, B. (1957): Growth and chemical composition of mycorrhizal and non-mycorrhizal apples, *Nature*, **179**: 922~924.
- Nicolson, T.H. (1959): Mycorrhiza in the gramineae, *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, **42**: 421~438.
- Niemira, B.A., Hammerschmid, R. and Safir, G.R. (1996): Postharvest suppression of potato dry rot (*Fusarium sambucinum*) in pre-nuclear minitubers by arbuscular mycorrhizal fungal inoculum, *American Potato J.*, **73**: 509~515.
- Puthur, J.T., Prasad, K.V.S.K., Sharmila, P. and Saradhi, P. (1998): Vesicular arbuscular mycorrhizal fungi improves establishment of micropropagated *Leucaena leucocephala* plantlets, *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, **53**: 41~47.
- Read, D.B. and Gregory, P.J. (1997): Surface tension and viscosity of axenic maize and lupin root mucilages, *New Phytol.*, **137**: 623~628.
- Simpson, D. and Daft, M.J. (1990): Interaction between water-stress and different mycorrhizal inocula on plant growth and mycorrhizal development in maize and sorghum, *Plant Soil*, **121**: 179~186.
- Stubblefield, S.P., Taylor, T.N. and Trappe, J.M. (1987): Fossil mycorrhizae: A case for symbiosis, *Science*, **237**: 59~60.
- Sutton, J.C. and Sheppard, B.R. (1976): Aggregation of sand-dune soil by endomycorrhizal fungi, *Can. J. Bot.*, **54**: 326~333.
- 鈴木達彦 (1987): VA 菌根に関する諸問題 [9], 農及園: **62**: 817~821.
- 俵谷圭太郎・木根淵高秋・渡辺重樹・我妻忠雄・鈴木源士 (1996): Arbuscular 菌根菌の接種がネギ (*Allium fistulosum*) の生育とリン吸収に及ぼす影響, 土肥誌., **67**: 294~298.
- Tisdall, J.M. and Oades, J.M. (1982): Organic matter and water-stable aggregates in soil, *J. Soil Science*, **33**: 141~163.
- 依藤敏昭・鈴木源士 (1995): 菌根菌の活かし方, p.167, 農文協, 東京.

受稿年月日: 2000年7月27日  
 受理年月日: 2000年10月19日

# 常陸太田試験地におけるマクロポアの形態学的特徴と 選択的流出経路の分布に関する研究

野口 正二\*

Morphological Characteristics of Macropores and the  
 Distribution of Preferential Flow Pathways at  
 Hitachi Ohta Experimental Watershed

Shoji NOGUCHI

\* Forestry and Forest Products Research Institute

## 1. はじめに

自然斜面の水移動は一般的に一様とはならず、水がよく透るところと透らないところが存在する。特に、林地斜面ではマクロポア・パイプが多く存在し、地中における水移動経路を複雑にしている。これらマクロポア・パイプに関する研究は、数多く報告され、マクロポア・パイプからの流出が洪水時の重要な構成要素であることが認識されている (Tanaka *et al.*, 1988; Tsukamoto and Ohta, 1988; 北原・中井, 1992; Sidle *et al.*, 1995)。

土壌のマクロポア・パイプの構造に関する研究は、実験室レベルでいくつかの方法によって調べられてきた。代表的な手法としてコンピュータ化断層撮影法 (CT) を用いた方法 (Anderson *et al.*, 1990; Joschko *et al.*, 1993) や軟 X 線を用いた方法 (Tokunaga, 1988; 成岡, 1990) が挙げられる。また、その他の手法として樹脂や石膏を用いて調べた報告がある (北原, 1989; Mortan *et al.*, 1989; Singh *et al.*, 1991)。

土壌のマクロポアに関する物理的特性の空間的平均値を得るためには、比較的広い領域 (およそ 1-10 m) を調査する必要があると Beven and Germann (1981) は指摘している。しかし、実験室レベルで行われる上記の方法は 1-10 m のスケールで適用することが不可能であり、得られた情報は野外土壌におけるマクロポア・パイプの平均的な特徴を把握しているとは言い難い。一方、土壌断面の観察により 1-10 m スケールでマクロポアの調査が実施されてきた (Jones, 1978; 北原ら, 1988; Tsukamoto and Ohta, 1988)。しかし、これらの報告は

マクロポアの直径や密度に関するもので、その他の形態学的特徴に関する情報は十分でない。また、染料を用いて 1-10 m スケールで、マクロポア・パイプを含む地中の選択的流出経路についても調査されてきた (Bouma and Dekker, 1978; 波多野ら, 1983; van Stiphout *et al.*, 1987)。しかし、これらの報告は農地での適用が多く、場が異なる林地斜面での適用例はあまり多くない。林地斜面での地中水の挙動を明らかにし、マクロポアを含む流出モデルの構築を図るため、マクロポアの勾配・方位・長さ・屈曲度などの形態学的特徴や地中での選択的流出経路を明らかにすることが重要な課題の一つである。

著者は、林地斜面の土壌断面におけるマクロポアの密度、直径、勾配、方位について調査し (Noguchi *et al.*, 1997 b)、さらに、斜面長 2 m の土壌セグメントを対象にマクロポアの長さや屈曲度を測定した (Noguchi *et al.*, 1999)。加えて、2 つの染色方法を用いてその土壌セグメントにおける選択的流出経路の分布を調査した (Noguchi *et al.*, 1999)。本報では、これらの研究を紹介し今後の研究課題について考える。

## 2. 試験地の概要及び試験方法

### 2.1 試験地の概要

本研究は、常陸太田試験地 (HO: 36° 34' N, 140° 35' E, 15.68 ha) 内の 8 ヶ所 (A~H) と流域外の 1 ヶ所 (I) を対象に実施された (図-1)。本試験地の年間平均降水量は 1,485 mm で、地質は緑色変成岩である。流域 HB (2.48 ha) は 1919 年頃植栽されたスギ・ヒノキで覆われ

\* 森林総合研究所森林環境部

〒305-8687 茨城県稲敷郡笠崎町松の里 1

キーワード: 林地, マクロポア, 形態学的特徴, 選択的流出経路

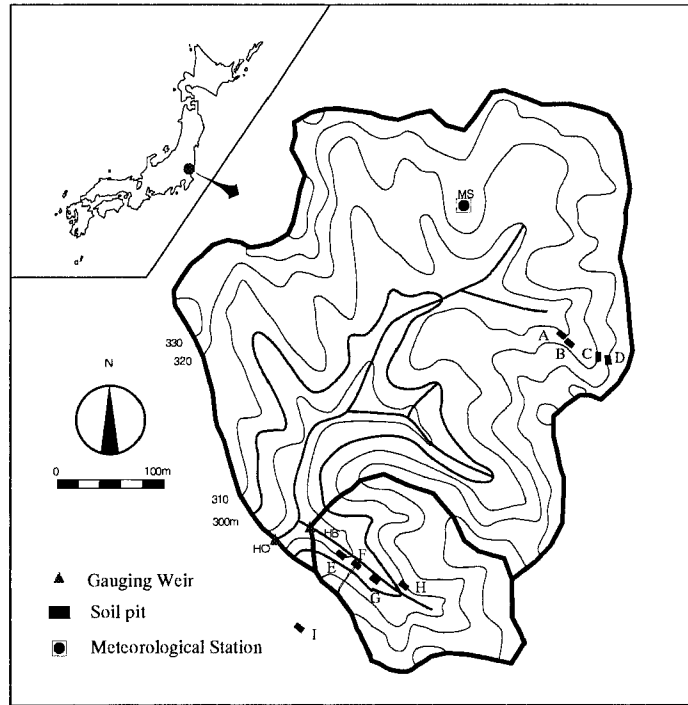


図-1 調査対象地の位置と地形図

Fig. 1 Location and topographic maps of observation sites.

表-1 土壌断面 F における A 層と B 層の土壌物理特性

Table 1 Physical properties of the A and B soil horizons at soil profile F

層位	砂	シルト	粘上	密度	飽和透 水係数	圧力	水頭に	対する	体積含	水率	(Mpa)
	(0.02-2mm)	(2-20 $\mu$ m)	(<2 $\mu$ m)			0	-0.0031	-0.0098	-0.0309	-0.0491	-0.0980
	%	%	%	Mg m <sup>-3</sup>	ms <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>					
A	50.3	33.6	16.1	0.690	2.9 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	0.765	0.503	0.445	0.388	0.360	0.323
B	47.3	36.8	19.5	0.857	3.1 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	0.695	0.421	0.374	0.324	0.304	0.271

ている。また、流域 HB を除く領域は 1985~1986 年に皆伐され、翌年の 1987~1988 年にスギ・ヒノキが植栽された。調査地 F における土壌物理特性の測定結果を表-1 に示す。土壌断面は有機物層を含む A 層が薄いことが特徴である (表-2)。

## 2.2 試験方法

マクロポアの定義に関する統一見解はなく、マクロポアの語句に対して各研究者によって異なった定義がなされている (Luxmoore *et al.*, 1990)。また、土壌におけるパイプとマクロポアの語句を明瞭に区別するための統一見解もなく、一般的に径が大きいマクロポアがパイプと考えられている (Anderson and Burt, 1990)。本調査に

おいては、土壌断面におけるマクロポアを目視により識別し、直径 2 mm 以上、長さ 20 mm 以上を対象として測定を行った。

調査地 A~I において、土壌断面 (幅 100~160 cm) を人力で可能な深さまで掘削し、その断面に対して、1) マクロポアのマーキング、2) 土壌断面に 10 cm の格子をかけ、マクロポアの位置および土壌層位の測定、3) 定規 (最小スケール: 1 mm) を用いてマクロポアの直径の測定、4) アクリル棒 (直径: 2 mm、長さ 10-12 cm) をマクロポアに挿入し、断面におけるマクロポアの勾配および方位として、断面から突き出たアクリル棒に対してコンパスを用いて勾配と方位の測定を行った。測定方法

表-2 土壌断面におけるマクロポアの密度と土層深さ  
**Table 2** Density of macropores on the soil profile and soil depth

場 所	層 位	密度 (macropores m <sup>-2</sup> )					厚さ (cm)
		最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数	平均値
地点 A-I	断面	5.4	63.9	25.7	19.7	0.77	68.0
	有機物層を含む A 層	0	114.8	26.0	38.5	1.48	7.6
	B 層	6.0	84.0	28.7	24.0	0.84	35.1
	BC 層	1.5	11.5	5.4	4.3	0.80	45.6
地点 F における断面 No. 1~No. 20	断面	16.8	75.1	43.0	16.2	0.38	31.8
	有機物層を含む A 層	36.2	168.1	95.9	40.7	0.42	4.5
	B 層	4.9	78.1	32.9	20.7	0.63	27.3

地点 A-I での結果について地点 F は最初の断面 (No. 1) での測定結果を含む

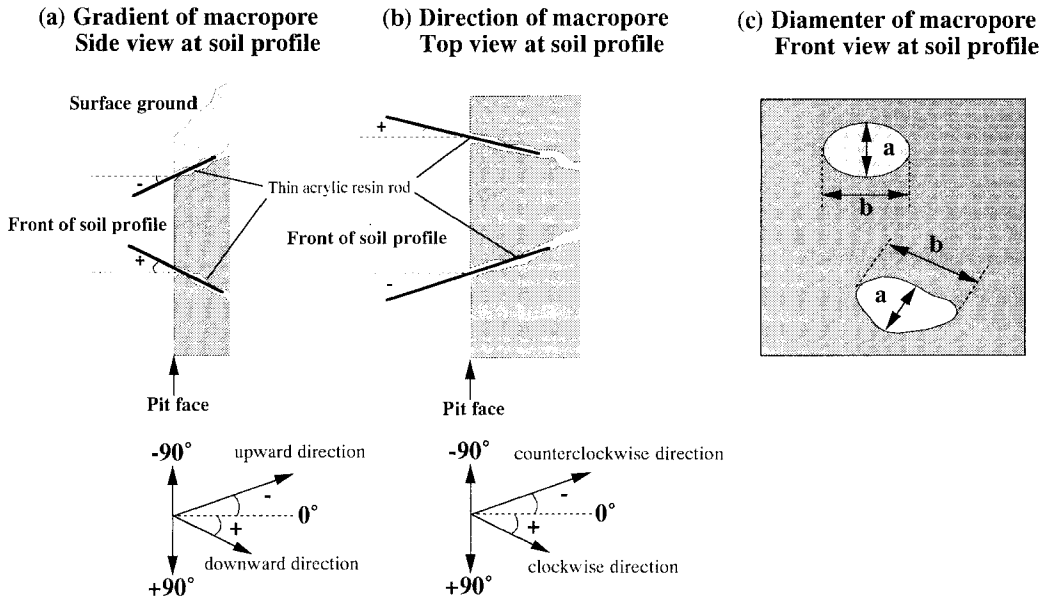


図-2 土壌断面におけるマクロポアの直径、勾配、方位の測定  
 (a) 土壌断面に対して直角をなす方向を 0 とし、上向きと下向きをそれぞれ負および正と定義した。(b) マクロポアの方位は土壌面を 0 とし、時計回りおよび反時計回りの向きをそれぞれ正および負と定義した。(c) "a" および "b" をそれぞれ短・長の直径を示す。

**Fig. 2** Measurement of morphological characteristics of macropores in the soil profile.  
 (a) The gradient of macropores was defined as 0 for orientation perpendicular to the pit face, with the angles in the upper and lower directions assigned negative and positives, respectively.  
 (b) The planar orientation of macropores was defined as 0 for the azimuth angle of the pit face, for clockwise and counterclockwise was assigned positive and negative values, respectively.  
 (c) "a" and "b" are small and large diameters.

の概念図を図-2に示す。さらに、土壌断面のマクロポアの形態学的特徴に対して、異なる空間的スケール（流域内の9地点（A～I）とある1地点）での測定結果を検討するため、調査地Fにおいて、斜距離10cm間隔で斜面上方に向かって20断面（斜面長2m）を対象に同様の調査を行った。その際、土壌断面にマーキングされたマクロポアに粉チョーク（赤、青、黄色）を吹き付けてマクロポアのトレースを行い、マクロポアの長さおよび屈曲度を求めた。なお、近接するマクロポアをトレースする際、異なる色の粉チョークを使用した。調査地Fにおける20断面のマクロポアを対象とし、マクロポアの離心率 ( $Ecc$ ) および屈曲度 ( $T$ ) を以下の式から求めた。

$$Ecc = [(d_i/2)^2 - (d_s/2)^2]^{0.5} / (d_i/2) \quad (1)$$

ここで、 $d_i$  と  $d_s$  はそれぞれマクロポアの最大直径と最小直径である。また、

$$T = \sum l_i / L \geq 1 \quad (2)$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = \left[ \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$L = [(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2 + (z_c - z_b)^2]^{0.5} \quad (4)$$

ここで、 $L$  は各マクロポアの起点 ( $x_b, y_b, z_b$ ) から終点 ( $x_c, y_c, z_c$ ) までの直線距離、 $l$  は土壌断面上のマクロポ

アをトレースした距離、( $x_i, y_i, z_i$ ) は断面  $i$  における位置、 $n (\geq 3)$  はマクロポアをトレースした際の土壌断面の数である。 $n \geq 3$  のマクロポアに対して、式(2)から屈曲度を求めた。マクロポアの長さは、 $n=1$  のとき土壌断面から消失した位置までの距離で、 $n \geq 2$  のとき式(3)から求めた距離に観察された最後の土壌断面から消失した位置までの距離を加えた長さとした。

調査地Fにおいて、土壌断面のマクロポアをトレースする前に、白色ペイントを散水した。白色ペイントは有機物層における吸着の影響が少なく、林地での地中水の挙動をトレースするための染料として使われている（辻村ら, 1991; Noguchi *et al.*, 1997a）。散水装置は、土壌断面から斜面長で2.0m山側に設置し、始めに河川水を散水 (60 L h<sup>-1</sup>, 2 h) し、断面からの流出が定常状態になったのを確認後、水性白色ペイント (20%) に置き換えて散水 (60 L h<sup>-1</sup>, 1 h) した。なお、散水装置については、Tsuboyama *et al.* (1994) が詳細に報告している。

### 3.1 マクロポアの形態学的特徴

土壌断面におけるマクロポアの密度の測定結果を表-2に、直径、勾配、および方位の測定結果を表-3に示す。マクロポアの密度は、有機物層を含むA層において0～114.8 macropores/m<sup>2</sup>、B層において6.0～84.0 macropores/m<sup>2</sup>であった。マクロポアの直径は、有機物層を含

表-3 マクロポアの形態的特徴

Table 3 Morphological characteristics (diameter, gradient and

場 所	層 位	直 径				勾 配		
		最小値	最大値	算術平均 mm	標準偏差	最小値	最大値	算術平均 degree
地点	断面 (n=140)	2	40	12.3	9.7	-46	90	1.1
A-I	有機物質を含むA層 (n=20)	4	30	16.9	8.6	-38	36	-13.0
	B層 (n=103)	2	40	10.9	9.6	-46	90	1.6
	BC層 (n=17)	5	40	15.4	9.4	-14	54	14.2
地点Fにおける	断面 (n=453)	2	60	16.0	9.8	-72	67	-18.0
	有機物質を含むA層 (n=129)	2	48	20.2	8.6	-66	36	-26.0
断面 No. 1～No. 20	B層 (n=318)	3	60	14.2	9.7	-72	67	-14.9
	C層 (n=6)	7	38	17.3	11.7	-31	10	-8.3

ただし、 $n$  は測定されたマクロポアの数、地点A-Iでの結果について地点Fは最初の断面 (No. 1) での測定結果

む A 層に存在するものが、B 層に存在するものより大きい傾向があった。マクロポアの勾配は、斜面勾配と同じ向きの負の勾配を持つものが多くを占めた。マクロポアの方位は、80%以上が土壤断面に対して  $-50^{\circ} \sim +50^{\circ}$  の範囲に存在した。土壤断面のマクロポアの形態学的特徴に対して、異なる空間的スケール（流域内の 9 地点（A～I）間と F 地点での 20 断面）における測定結果の相違は見られず（表-3）、勾配や方位は同様の頻度分布を示した（図-3）。

マクロポアの成因について、全マクロポアの 40、37 および 19% がそれぞれ地中水による侵食によるもの、植物根系によるもの、および植物根系と地中水の相互作用によるものと推定された。一方、地中水のフラックスの方向は、鉛直方向と斜面勾配との合力で示される（Harr, 1977）。また、スギの根系の分布について、刈住（1979）および福永・山寺（1994）によって調査されている。マクロポアの勾配と方位の測定結果は、地中水のフラックスの方向とスギの根系分布調査結果に類似するものであった（図-3）。このことから地中水や根系がマクロポアの勾配および方位の形成に影響を及ぼしているものと推察される。これらの関係を実証するためには、さらなる野外での調査や実験室での試験が必要であろう。

記載されたマクロポアの約 80% は楕円で近似され、その離心率は 0.256～0.998（平均値：0.652）であった。

(直径、勾配および方位)

direction) of soil macropores

標準偏差	方 位			
	最小値	最大値 degree	算術平均	標準偏差
26.3	-85	90	2.4	39.2
17.2	-50	68	4.6	32.1
27.1	-86	88	4.0	40.5
23.3	-85	90	-4.2	45.0
22.3	-90	84	-3.7	35.5
17.3	-80	84	-7.3	33.7
23.4	-90	80	-2.3	35.7
15.2	-90	74	1.3	60.1

を含む

マクロポアに粉チョークを吹き付けトレースした結果、約 70% のマクロポアは 1 断面内でとぎれ、1% のマクロポアが 5 断面にわたり連続していた ( $\geq 40$  cm)。多くのマクロポア ( $\geq 80\%$ ) は、土壤マトリックス内に終結していることが観察された。マクロポアの長さは 2.0～61.8 cm（平均値：11.6 cm）であった（図-4）。しかし、マクロポアが白色ペイントに染色された土壤マトリックスと連結して終結していることが観察された。このことは、マクロポアは選択的流出経路として機能している土壤マトリックスと連結して流出に寄与していることを示している。また、いくつかのマクロポアは基岩の亀裂に接続し、その亀裂から流出水が観察された（図-6d）。

図-5 にマクロポアの屈曲度と長さの関係を示す。マクロポアの屈曲度は、1.00～1.52（平均値：1.14）であった。軟 X 線を用いて 84 cm<sup>3</sup> の土壤サンプルにおけるマクロポアの屈曲度を求めた結果、1.2～2.0 の値であった（成岡, 1990）。本研究の結果は、北原（1989）が 2,708 cm<sup>3</sup> の土壤サンプルを対象に石膏を流し込み、土壤パイプの屈曲度を求めた結果（1.0～1.1）と同様の値であった。これらマクロポアの屈曲度の値について測定方法が異なるため、直接的に比較することはできない。しかし、軟 X 線を用いた方法は、本研究での測定方法と石膏を用いた方法と比較して、対象とするマクロポアと測定可能なサンプルサイズが小さい。これらが測定されたマクロポアの屈曲度の値が、本研究や北原（1989）による結果より大きくなる理由と考えられた。

### 3.2 選択的流出経路

図-6 に白色ペイントによって染色された選択的流出経路の例を示す。いくつかのマクロポアは、周りの土壤マトリックスと交わらず、流出に寄与していた（図-6a）。しかし、多くのマクロポアは周辺の土壤マトリックスに拡大し、流出に寄与していることが観察された（図-6b）。一方、土壤断面においてマクロポアでなく、ち密度が疎である土壤マトリックスの領域が染色されているのが観察された（図-6c）。この部分は B 層に存在するが、A 層と同じ暗褐色を示し根系が集中していた。また、基岩の亀裂から流出水が観察された（図-6d）。興味深い点として、20 断面全てにおいて白色ペイントによって基岩直上の B 層の部分が染色されていることが観察された（例えば図-6c）。このことは、基岩に沿って流下する選択的流出経路が存在し、地中水の挙動を考える上で基岩地形が重要であることを示している。

### おわりに

マクロポアの密度は、有機物層を含む A 層において



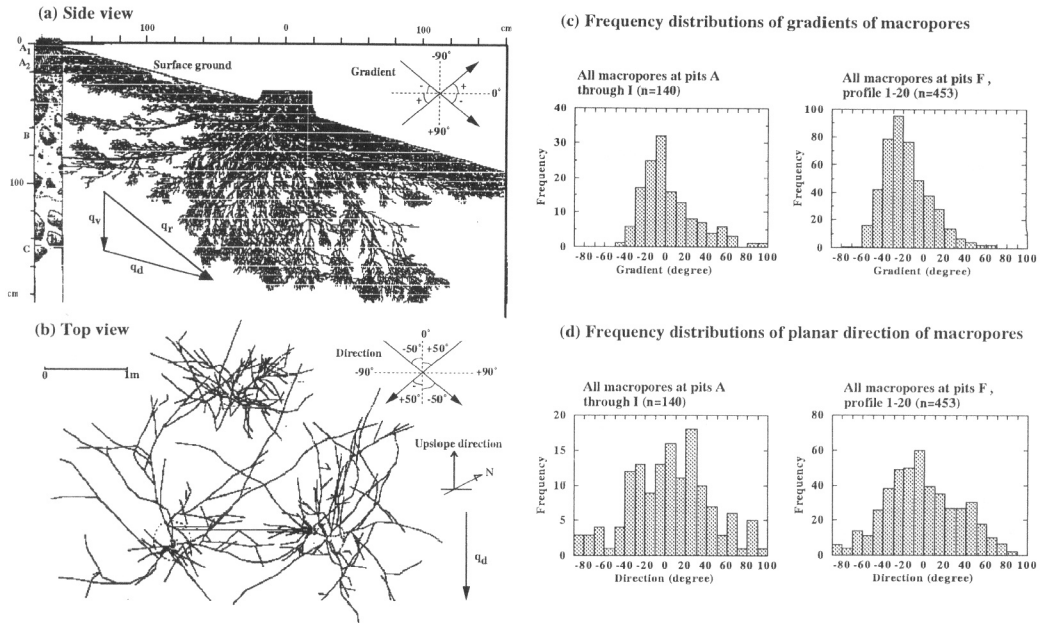


図-3 斜面における水フラックスと根系の方向とマクロポアの勾配・方位の頻度分布  
 (a) ヒノキの根系分布の例 (刈住, 1979) (b) スギの根系分布の例 (福永・山寺, 1994) (c) マクロポアの勾配の頻度分布 (d) マクロポアの方位の頻度分布, ここで  $q$  は水フラックス, 添え字の  $r, d, v$  はそれぞれ合力, 斜面および鉛直方向を示す。

Fig. 3 Directions of water flux and root systems on a slope, and frequency distributions of gradients and planar direction for macropores. (a) An example of *Chamaecyparis obtuse* roots (Karizumi, 1979) (b) Horizontal distribution of *Cryptomeria japonica* roots (Fukunaga and Yamadera, 1994) (c) Frequency distributions of gradient of macropores (d) Frequency distribution of planar direction of macropore. Where  $q$ =water flux;  $r, d, v$  denote resultant, downslope, and vertical directions.

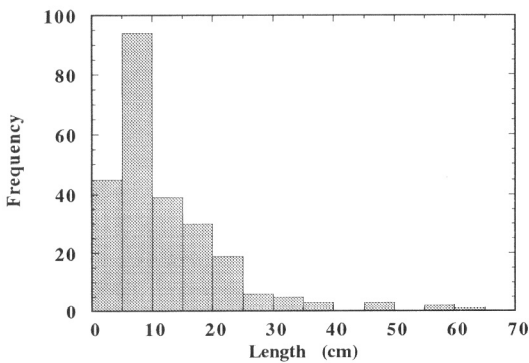


図-4 マクロポアの長さの頻度分布  
 Fig. 4 Frequency distribution of length for macropores.

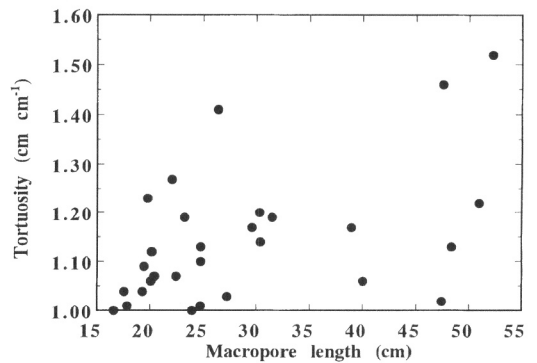


図-5 マクロポアの屈曲度と長さの関係  
 Fig. 5 Relationship between tortuosity and length of macropore.

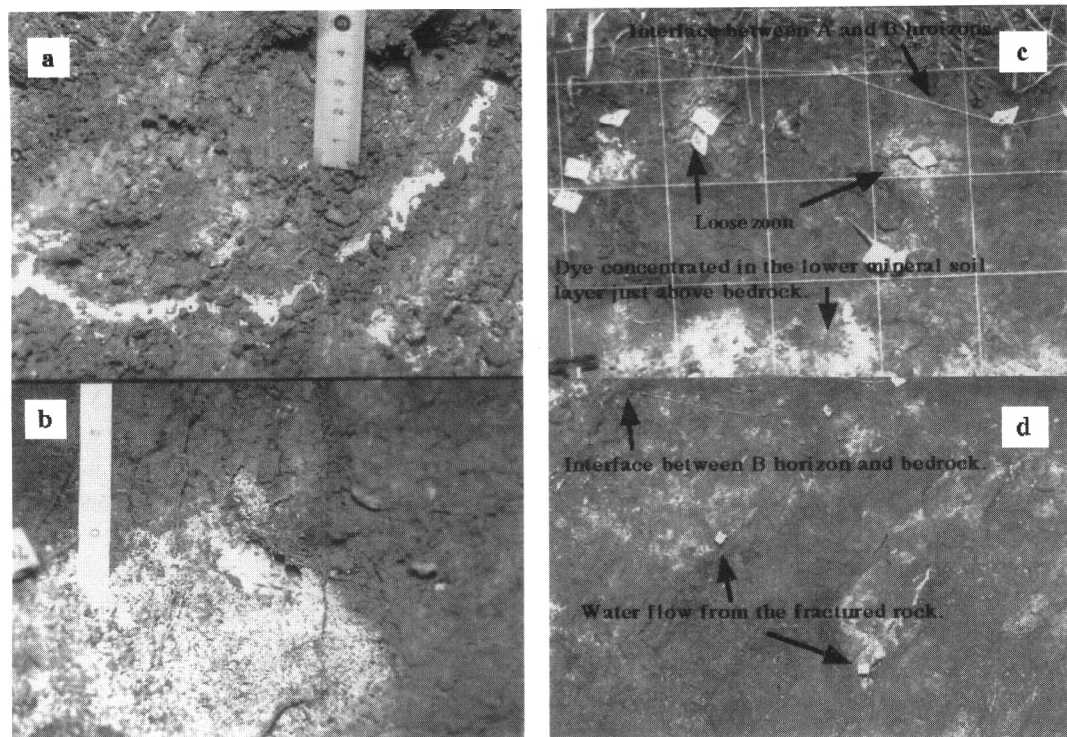


図-6 染料によって示された土壌の水移動のいくつかの形態 (a) マクロポアに沿って白色ペイント; (b) 染色されたマクロポアとその周辺の土壌マトリックス; (c) 染色された垂直密度が疎な部分; (d) 亀裂からの流出

Fig. 6 Various patterns of water movement in the soil as indicated by dye (a) dye stained along a macropore; (b) stained macropore and soil matrix around it; (c) dye distributed vertical loose zone; (d) water flow from the fractured rock

0~114.8 macropores/m<sup>2</sup>, B層において6.0~84.0 macropores/m<sup>2</sup>であった。マクロポアの直径は、有機物層を含むA層に存在するものが、B層に存在するものより大きい傾向があった。マクロポアの勾配は、斜面勾配と同じ向きの負の勾配を持つものが多くを占めた。マクロポアの方位は、80%以上が土壌断面に対して-50°~+50°の範囲に存在した。土壌断面のマクロポア直径、勾配および方位に対して、異なる空間的スケール(流域内の9地点(A~I)間とF地点での20断面)において、同様の傾向を示した。斜面長2mの土壌セグメントにおけるマクロポアを追跡した結果、マクロポアの屈曲度は1.00~1.52(平均値:1.14)で、マクロポアの長さは2.0~61.8cm(平均値:11.6cm)あった。マクロポアが白色ペイントに染色された土壌マトリックスと連結して終結していることが観察され、マクロポアは選択的流出経路として機能している土壌マトリックスと連結して流出に寄与していると考えられた。また、白色ペイントを用いた

染色試験により、多くのマクロポアは周辺の土壌マトリックスに拡大し流出に寄与していること、亀裂からの流出や基岩地形が地中水の挙動を予測するために重要であることなどが指摘された。

常陸太田試験地では、マクロポアを含む土壌断面からの流出に対して混合置き換え実験が実施され、その結果からマクロポアと相互に作用する周辺土壌層の拡大や斜面方向へのマクロポアの伸長が推察された(Tsuboyama *et al.*, 1994)。本研究は、混合置き換え実験の結果を支持することを示した。さらに、今回の選択的流出経路の調査結果を踏まえて、自然降雨時におけるマクロポアを含む土壌断面からの流出特性について考察された(Noguchi *et al.*, 2000)。今後、森林流域におけるマクロポア・パイプ流出を含む地中水の挙動を明らかにするために、複数の手法(形態調査、流出・土壌水分の観測、トレーサー試験など)でアプローチすることが有効であるといえよう。

近年、ファイバースコープを用いて第四紀砂礫層のパイプの形態的特徴を調査した結果、1 m以上の長さがある土壌パイプの存在が報告されている (Terajima *et al.*, 2000)。本研究は緑色変成岩を母材としたスギ・ヒノキを植生とする森林斜面において調査したものである。今後、異なる地質、気候、植生におけるマクロポア・パイプの形態学的特徴および選択的流出経路についての調査事例を積み重ねる必要がある。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、フィールドでの測定や議論をして頂いた森林総合研究所・坪山良夫主任研究員、細田育広主任研究員およびシンガポール大学・ロイ・サイドル教授に感謝致します。

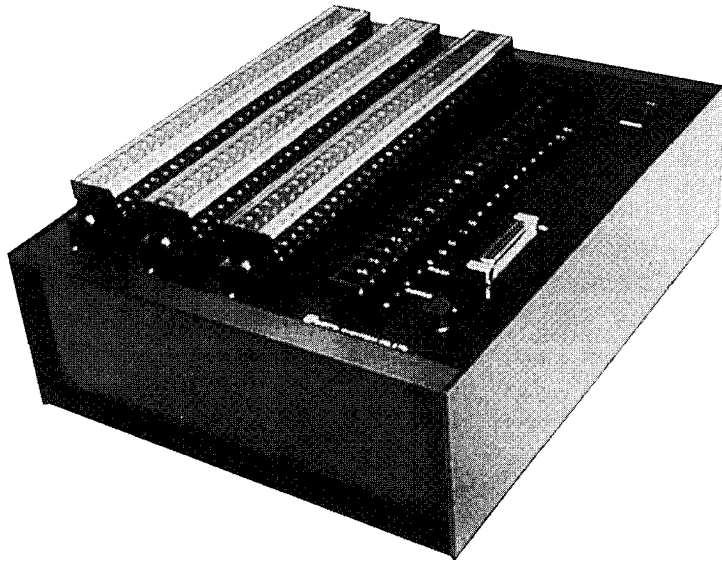
## 参 考 文 献

- Anderson, M.G. and Burt, T.P. (1990): Subsurface runoff. In *Process studies in hillslope hydrology*. Anderson, M.G. and Burt, T.P. (eds.), 539 pp, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 365-400.
- Anderson, S.H., Peyton, R.L. and Gantzer, C.J. (1990): Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. *Geoderma* **46**: 13-29.
- Beven, K. and Germann, P. (1982): Macropores and water flow in soil. *Water Resour. Res.* **18**: 1311-1325.
- Bouma, J. and Dekker, L.W. (1978): A case study on infiltration into dry clay soil morphological observations. *Geoderma* **20**: 27-40.
- 福永健司・山寺喜成 (1994): 山地斜面におけるスギ植栽木の根系分布に関する調査研究 (II) 個体間における根系の水平分布. 1994年日本緑化工学会大会要旨集, p. 90-93.
- 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫 (1983): メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態. *土壌肥料学会誌*, **54**: 490-498.
- Harr, R.D. (1977): Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *J. Hydrol.* **33**: 37-58.
- Jones, J.A.A. (1978): Soil pipes network: distribution and discharge. *Gambria* **6**: 1-21.
- Joschko, M., Muler, P.C., Kotzke, K., Dohring, W. and Larink, O. (1993): Earthworm burrow system development assessed by mean of X-ray computed tomography. *Geoderma* **56**: 209-221.
- 刘住 昇 (1987): 樹木根系図説. p. 1121, 誠文堂新光社, 東京.
- 北原 曜・清水 晃・真島征夫 (1988): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性, *日林誌*, **70**: 318-323.
- 北原 曜 (1989): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性 (II) パイプの水理特性, *日林誌*, **71**: 317-322.
- 北原 曜・中井裕一郎 (1992): 1次谷流域における河川流量とパイプ流量の関係, *日林誌*, **74**: 49-54.
- Luxmoore, R.J., Jardine, P.M., Wilson, G.V., Jones, J. R. and Zelazny, L.W. (1990): Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma* **46**: 139-154.
- 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 Sci. Soc. Am. J.* **53**: 921-928.
- 成岡 市 (1989): 土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究. *東京農業大学総合研究所紀要*, **1**: 1-58.
- Noguchi, S., Abdul Rahim, N., Baharuddin, K., Sammori, T., Tani, M. and Moridada, K. (1997a): Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia. *J. For. Res.* **2**: 115-120.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (1997b): Spatially distributed morphological characteristics of macropores in forest soils of Hitachi Ohta Experimental Watershed, Japan. *J. For. Res.* **2**: 115-120.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (1999): Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63**: 1413-1423.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (2000): Subsurface runoff characteristics from a forest hillslope soil profile including macropores, Hitachi Ohta, Japan. *Hydrol. Process.* in press.
- Sidle, R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M. and Shimizu, T. (1995): Seasonal hydrologic responses at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. *J. Hydrol.* **168**: 227-250.
- Singh, P., Kanwar, R.S. and Thompson, M.L. (1991): Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. *Soil*

- Sci. Soc. Am. J. **55** : 1674-1679.
- Tanaka, T., Yasuhara, M., Sakai, H. and Marui, A. (1988) : The Hachioji Experimental Basin study --Storm runoff processes and the mechanisms of its generation. *J. Hydrol.* **102** : 139-164.
- Terajima, T., Sakamoto, T. and Shirai, T. (2000) : Morphology, structure and flow phases in soil pipes developing in forested hillslope under by a Quaternary sand-gravel formation, Hokaaido, northern main island in Japan. *Hydrol. Process* **14** : 713-726.
- Tokunaga, K. (1988) : X-ray stereoradiographs using new contrast media on soil macropores. *Soil Sci.* **148** : 199-207.
- Tsuboyama, Y., Sidle, R.C., Noguchi, S. and Hosoda, I. (1994) : Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment. *Water Resour. Res.* **30** : 879-890.
- 辻村真貴・田中 正・島野安雄 (1991) : 川上試験流域における浸透能と湿潤後の水の流動経路について, 筑波大演習林報告, **7** : 137-161.
- Tsukamoto, Y. and Ohta, T. (1988) : Runoff process on a steep forested slope. *J. Hydrol.* **102** : 165-178.
- Van Stiphout, T.P.J., Van Lanen, H.A.J., Boersma, O. H. and Bouma, J. (1987) : The effect of bypass flow and internal catchment of rain on the water regime in a clay loam grassland soil. *J. Hydrol.* **95** : 1-11.

受稿年月日：2000年11月11日  
受理年月日：2000年12月18日

# 最も進んでいるパソコン時代のロガー「IDL-3200」



## センサ対応がマルチ

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

## センサ電源を供給

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

## 多チャンネル

アナログセンサ入力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

〒062-0001 札幌市豊平区美園1条8丁目1-28

TEL. 011-833-4386 FAX. 011-833-4387

## 環境地水学

宮崎 毅 著

東京大学出版会 2000年発行

A5版 196ページ

筆者も示しているように、本書は、農業地水学から環境地水学へと発展の道をたどってきたこの学問を筆者の目から総括し、21世紀へ持ち込もうとの目論見で書かれた本である。

本書の内容は、「土壌物理学」、「土の物質移動学」、「環境土壌学」、「環境土壌物理学」、「土壌水文学」等と、一見して、類似した点があるように思われるが、地水とは何か？、地下水涵養とは何か？、不均一とは何か？、泥炭とは何か？と、意欲的に探求した力作で、新しい学問分野を構築している。

随所に(問)、(答)の形式で、読者に「問いかけ」があり、ベイドスゾーン(地表面から地下水面までの土壌領域)で見られる現象を、身近な例題や平易な例で解説している。また、浸潤の可視化、浸透流の屈折など土壌水の挙動を写真で示し、多くの図や表を用いて、読者にできる限り理解しやすいように配慮されている。特に、不飽和水分移動の中で、重力卓越流、集積流、最近の国際シンポジウムでしばしば取り上げられている選択流にも触れて、浸潤に対する地表クラストやマクロポアの影響など、多くの新しい知見が盛り込まれている。また、マクロポア内の水移動の論述で、「上中水が負圧の場合、マクロポアには水が浸入しない、という単純な法則が、現場的には、まだ理解されない場合が少なくないのである。……」など、読者に強調する部分もあり、興味をそそる内容が豊富である。

各章での論述の方法については、まず、圃場で観測した現象や実験データを紹介し、次に、その現象を理論的に解説するなど、読者に対して、イメージが容易にできて内容が理解しやすい。まず、自然現象があって、これを忠実に測定し、理論を組み立てていく論法は、現象を再認識しながら興味深く通読できる。また、掲載された実験データの多くが、筆者が直接携わったオリジナルデータであり、説得力がある。

土壌の透水性に及ぼす細菌、糸状菌などの土壌微生物の影響、湿原泥炭地における水移動や熱移動など、精力的に未知の世界にチャレンジした本で、今後の研究課題を含んでいるが、限るある地球環境と人間との持続的共存条件を考究すべき21世紀を目前にして、タイムリー

に発刊された本である。

小流域、圃場レベルのベイドスゾーンの水、熱の移動に興味のある多くの読者に対して、是非一読をお勧めする。なお、以下に本の構成を示す。

### 第1章 地水の存在と挙動

1.1 地水とは何か。1.2 地水の役割。1.3 地水の存在様式。1.4 地水の動き。

### 第2章 水の土壌中への浸潤 —理論と実際—

2.1 浸潤の理論。2.2 浸潤の実際。

### 第3章 地下水涵養流

3.1 地下水涵養とは何か。3.2 ベイドスゾーンの波動理論。3.3 波動理論の系譜。3.4 地下水涵養流の物理的イメージ。3.5 押し出し流の可視化実験。3.6 ラドン濃度を指標とする新しい地下水流動解析。

### 第4章 蒸発に伴う水と物質移動

4.1 ポテンシャル蒸発と土壌面蒸発。4.2 土壌面蒸発と不飽和水分上昇移動。4.3 定常蒸発下の土壌水分移動。4.4 非定常蒸発下の土壌水分移動。4.5 ライシメータを用いた土壌面蒸発測定。4.6 熱収支法による蒸発フラックスの推定。4.7 土壌乾燥の極限值推定。4.8 蒸発と塩類集積。4.9 蒸散のSPACモデル。

### 第5章 土壌中の熱・物質同時移動

5.1 土壌含水率の24時間経時変化。5.2 土の中の温度勾配と物質移動。5.3 土壌中の熱移動。5.4 温度勾配による水蒸気の移動。5.5 温度勾配下の液状水移動。5.6 実際のフィールドで起こる温度勾配下の水分移動。

### 第6章 微生物と土の透水性

6.1 土壌微生物。6.2 土壌微生物と飽和透水係数の変化。6.3 好気性微生物の増殖モデル。

### 第7章 斜面中の水移動

7.1 斜面の水収支。7.2 斜面構造と水移動。7.3 斜面における浸透流理論。7.4 流れの屈折則と斜面中の水移動。7.5 キャピラリーバリアー。

### 第8章 上の不均一性と水移動

8.1 不均一とは何か。8.2 代表要素サイズ。8.3 マクロポアと暗渠問題。8.4 亀裂が発達した水田の横

浸透。8.5 土の不均一性の定量化。

#### 第9章 土壌劣化と地水

9.1 世界の土壌劣化問題。9.2 日本の土壌劣化問題。  
9.3 日本の沖積土畑作地帯における土壌劣化問題の  
事例。9.4 酸性雨が土壌へ及ぼす影響。9.5 土壌の  
回復。

#### 第10章 湿原保全と地水

10.1 湿原の土壌 —泥炭とは—。10.2 湿原のおけ  
る土地改良の得失。10.3 湿原泥炭地に生ずる問題の  
実体。10.4 湿原と泥炭地の地水学。

井上光弘(鳥取大学乾燥地研究センター)

I. 2000 (平成 12) 年度第 2 回評議員会及び総会

(1) 評議員会

開催日時: 2000 年 11 月 18 日 (土) 11:25~12:30  
 開催場所: 日本大学生物資源科学部東京校舎 6 号館 3 階第 2 会議室  
 出席者: 河野会長, 渡辺副会長, 井上, 粕淵, 軽部, 古賀, 佐藤, 塩沢, 相馬, 取出, 成岡, 長谷川, 宮崎, 矢沢, 吉川, 松川 (会計監査) 事務局 (鈴木, 青木, 重松), 他 (委任状 4, 欠席 1 名)

議 題: 下記の総会議題と同様。それらを審議

(2) 総 会

開催日時: 2000 年 11 月 18 日 (土) 12:30~13:20  
 開催場所: 日本大学生物資源科学部東京校舎 6 号館 3 階第 1 会議室  
 出席者: 約 100 名  
 議 長: 古賀 潔氏 (岩手大学農学部)  
 議 題:

(1) 1999 年度会務報告 (土壌の物理性第 84 号掲載に同じ)

(2) 会員入会退会者及び現在会員数報告

(3) 1999 年度事業報告 (評議員会・総会承認)

1) 評議員会を 2 回開催 (第 1 回 1999. 8. 5, 第 2 回 1999. 11. 20)

2) 第 41 回土壌物理学会シンポジウム及びポスターセッション (1999. 11. 20)

3) 研究会誌「土壌の物理性」81, 82 号発行

(4) 1999 年度決算報告 (評議員会・総会承認)  
 会計監査報告 (評議員会・総会承認) を含む

(5) 2000 年度事業計画 (評議員会・総会承認)

1) 評議員会を 2 回開催 (第 1 回 2000. 8. 4, 第 2 回 2000. 11. 18)

2) 第 42 回土壌物理学会シンポジウム及びポスターセッション

・開催日時: 平成 12 年 11 月 18 日 (土)

・開催会場: 日本大学生物資源科学部東京校舎 6 号館 3 階第 1 会議室

●シンポジウム・テーマ「新世紀の土壌物理研究に向けて」

セッション I 座 長: 藤井克己 (岩手大学農学部)

① 「土粒子と土壌構造—火山灰土を中心として—」

軽部重太郎 (次城大学農学部)

② 「土壌水分野から見た 21 世紀の土壌物理研究」

宮崎 毅 (東京大学大学院農学生命科学研究科)

セッション II 座 長: 長谷川周一 (農業環境技術研

究所)

① 「溶質移動—特に, 硝酸態窒素の溶脱について—」  
 前田守弘 (農業研究センター)

② 「温度と熱の流れ」

粕淵辰昭 (山形大学農学部)

総合討論: 長谷川周一 (農業環境技術研究所)・藤井克己 (岩手大学農学部)

●ポスターセッション「土壌物理研究の最前線」

① 「畑土壌における物理性の時空間変動について」

柏木淳一 (北海道大学大学院農学研究科)

② 「アラスにおける表層土壌の空間変動性およびその特徴」

田中久則 (筑波大学), 溝口 勝・近藤伸彦 (東京大学大学院農学生命科学研究科), 清沢秀樹 (三重大学農学部), R.V. Desyatkin (IBPC: Russia), 石井古之 (北海道大学), 矢吹裕伯 (地球観測フロンティア)

③ 「圃場における土壌物理性分布の把握」

中川雅允・西村 拓・加藤 誠 (東京農工大学農学部)

④ 「根系が重粘土壌の粗間隙形成に与える影響」

吉田修一郎 (北陸農業試験場)

⑤ 「砂丘砂の不飽和溶質分散について」

取出伸夫 (佐賀大学農学部), 井上光弘 (鳥取大学乾燥地研究センター)

⑥ 「傾斜地の森林伐採による土壌および栄養塩類の動態変動」

三原真智人 (東京農業大学地域環境学部), 陳 嫣 (東京農業大学大学院農学研究科)

⑦ 「乾いた砂層におけるフィンガー流の発生と t grav」

川本 健 (埼玉大学工学部)

⑧ 「土壌の熱伝導率の気圧依存性」

百瀬年彦 (岩手連合大学院), 粕淵辰昭 (山形大学農学部)

⑨ 「生育初期の牧草のもつ土壌保全効果」

山本 博 (農林水産省草地試験場), 小島 誠 (農林水産省北海道農業試験場), 山田大吾・渋谷岳 (農林水産省草地試験場)

⑩ 「根圏における一次鉱物成分溶解の動態」

森本かや子 (東京農工大学大学院農学研究科), 鈴木創三・田中治夫・坂土寛一 (東京農工大学農学部)

⑪ 「ESTIMATION OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES USING THETA PROBE」

Krissandi WIJAYA・T. NISHIMURA and M. KATO



- ⑫ 「アメリカの土壌物理—過去・現在・未来—  
(2000 Annual Meetings の報告)」  
溝口 勝 (東京大学大学院農学生命科学研究科)
- 3) 研究会誌「土壌の物理性」83, 84, 85, 86, 87 号  
発行
- (6) 2000 年度予算 (評議員会・総会承認)
- (7) 評議員選挙結果報告 (詳細は次号掲載)
- (8) 40 周年記念事業等関連報告
- 土壌物理用語事典編集委員会 (幹事) 確認事項について  
の報告
- ① 「土壌物理標準用語」の進捗状況等について
- ② 執筆要項について
- ③ 改訂版コンセプトについて
- ④ 出版社からの確認事項  
・書名: 土壌物理用語事典  
・体裁: A5 判  
・定価: 3,000~3,500 円
- (9) 学会誌編集委員会状況報告
- (10) その他

## II. 1999 年度会計収入・支出決算と会計監査報告

### (1) 1999 年度会計収入・支出決算

収入の部				自 1999.4.1-至 2000.3.31	
項 目	予 算 額	決 算 額	増 減	内 訳	
繰 越 金	4,347,661	4,347,661	0		
正 会 員 会 費	2,471,700	2,437,000	▲34,700	1999 年度, 約 320 人	1,733,000
				滞納分	643,600
				2000 年度分	60,500
学 生 会 員 会 費	81,900	45,000	▲36,900	1999 年度, 7 人	21,000
				滞納分	24,000
購 読 会 費	444,150	233,250	▲210,900	1999 年度分	67,750
				滞納分	165,500
賛 助 会 費	204,750	0	▲204,750		
出 版 物 売 上	100,000	245,832	145,832	別刷り, 超過頁他	
雑 収 入	100,000	159,705	59,705	広告掲載料他	
合 計	7,750,161	7,468,448	▲281,713		

▲: 収入減

支出の部					
項 目	予 算 額	決 算 額	増 減	内 訳	
会 誌 製 作 費	4,520,000	1,610,770	▲2,909,230	第 81, 82 号分	
総 会 費	350,000	187,102	▲162,898	総会, シンポジウム開催費等	
通 信 費	300,000	179,930	▲120,070	原稿, 請求書送料等	
文 具 費	150,000	83,787	▲66,213	封筒代等	
賃 金	150,000	72,000	▲78,000	業務手伝等料	
交 通 費	200,000	31,815	▲168,185	幹事会交通費等	
会 議 費	100,000	15,640	▲84,360	評議員会昼食代等	
幹 事 手 当	60,000	0	▲60,000		
編 集 委 員 会 費	200,000	52,448	▲147,552	会誌査読料等	
40 周 年 記 念 事 業 費	400,000	0	▲400,000		
予 備 費	1,320,161	31,432	▲1,288,729		
次 年 度 繰 越 金	—	5,203,524	—		
合 計	7,750,161	7,468,448	▲281,713		

▲: 支出減

## (2) 会計監査報告

土壌物理学会

会長 河野英一様

土壌物理学会

会計監査 小川 吉雄

小川 吉雄

## 会計監査報告書

1999年度、土壌物理学会会計の収入支出決算書ならびに関係帳簿類について、2000年3月31日に厳正に監査をおこなった結果、それらの執行は適正であり、提出のとおり相違ないことを確認した。

## III. 2000年予算

収入の部		自 2000.4.11-至 2001.3.31
項目	予算額	備 考
繰越金	5,203,524	
正会員会費	2,532,950	(2000年度分 2,640,000 + 未納分 978,500,000) × 0.7 = 2,532,950
学生会員会費	84,000	(2000年度分 66,000 + 未納分 54,000) × 0.7 = 84,000
購読会費	525,875	(2000)年度分 406,000 + 未納分 345,250) × 0.7 = 525,875
賛助会費	409,500	(2000年度分 292,500 + 未納分 292,500) × 0.7 = 409,500
出版物売上	100,000	
雑収入	100,000	
合計	8,955,849	

## 支出の部

項目	当年度予算額	前年度予算額	増 減	備 考
会誌製作費	4,500,000	4,520,000	▲20,000	会誌 83, 85, 86, 87号発行料等
総会費	350,000	350,000	0	総会, シンポジウム開催費等
通信費	300,000	300,000	0	原稿, 請求書送付料等
文具費	150,000	150,000	0	封筒代等
賃金	150,000	150,000	0	業務手伝料等
交通費	200,000	200,000	0	幹事会交通費等
会議費	100,000	100,000	0	評議員会昼食代等
幹事手当	120,000	60,000	60,000	幹事6人分(2年度分)
編集委員会費	200,000	200,000	0	会誌査読料等
40周年記念事業費	600,000	400,000	200,000	土壌物理用語事典出版関係費
選管委員会費	350,000	0	350,000	名簿作成費, 投票用紙・名簿送付料等
業務委託費		0	900,000	会員管理委託費((財)日本学会事務センターへ)
学会運営積立金	1,000,000	0	1,000,000	学会賞設立及び学会運営業務委託化等のため
予備費	35,849	1,320,161	▲1,284,312	
合計	8,955,849	7,750,161	1,205,688	

▲: 当年度減

(補足資料)

収入の部	単 価	人 数	2000年度分	未 納 分
正 会 員 会 費	5,500	480	2,640,000	978,500
学 生 会 員 会 費	3,000	22	66,000	54,000
購 読 会 費	7,000	58	406,000	345,250
賛 助 会 費	22,500	13	292,500	292,500

## IV. 会員入会退会者及び現在会員数

(1) 入会者数 (1999.11.1～2000.10.31)

[正会員]: 1名

① 内ヶ崎万蔵 神奈川 日本大学生物資源科学部

(2) 退会者数 (2000.4.1～2000.10.31)

1) [正会員]: 14名

① 小豆沢 齊 島 根 島根県農業試験場果樹科

② 市来 征勝 鹿児島 鹿児島県農業試験場

③ 江川 友治 東京

④ 大塚 紀夫 佐 賀 佐賀県農業試験研究センター

⑤ 大山 信雄 熊 本 九州東海大学農学部

⑥ 加藤 虎治 愛 知

⑦ 佐藤辰一郎 北海道 北海道立天北農業試験場

⑧ 須藤 清次 茨 城

⑨ 清野 豁 茨 城 農業環境技術研究所  
⑩ 富永 重敏 長 崎 対馬農業改良普及センター

⑪ 野村 安治 福 岡

⑫ 前田 隆 北海道 物故

⑬ 宮内 定基 愛 媛 物故

⑭ 山下 恒雄 香 川 四国農業試験場地域基盤研究部

2) [購読会員]: 3機関

① 鹿児島葉たばこ技術センター

日本たばこ産業(株)

② 高塚 信一 高塚書店

③ 鳥取大学附属図書館

(3) 現会員数 (2000.10.31.現在)

1) 会員内訳: 正会員数 473, 学生会員数 21, 購読会員数 55, 賛助会員数 13

2) 総会員数: 562

以上

## 一編集後記一

本号は、20世紀最後の発行となる記念すべき「土壤の物理性」である。

めまぐるしく変化する社会情勢の中、新世紀を迎える不安と期待が合い半ばしている今日である。

現在、私の所属する東京農業大学では、技術者教育プログラム(JABEE)の試行校となり、自己点検書の作成に追われている毎日である。

大学における改組の波が一段落し、従来の農業工学分野においてもハードからソフトな分野へ多様な教育シフトとなった。しかし、波の寄せ返しのようになり、専門性向上の必要性が大学の外部を中心に指摘され始め、大学内

においても改組によるアフターケアを開始しようとしていることとJABEEが重なった。

農業工学プログラムの分野別基準のうち、土に関するキーワードが重要視されている。すなわち、土壤の物理性の位置付けが改めて認識されているようである。

土壤物理学の求心力を高めるために「土壤の物理性」の活躍の場が重みを増したといえる。

会員皆様の活発な投稿と積極的な土壤物理学会の参加を期待し、編集後記といたします。

＜編集委員 駒村正治(東京農業大学)＞

### 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)	

土壤の物理性 第86号(会員配布) 2001年1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

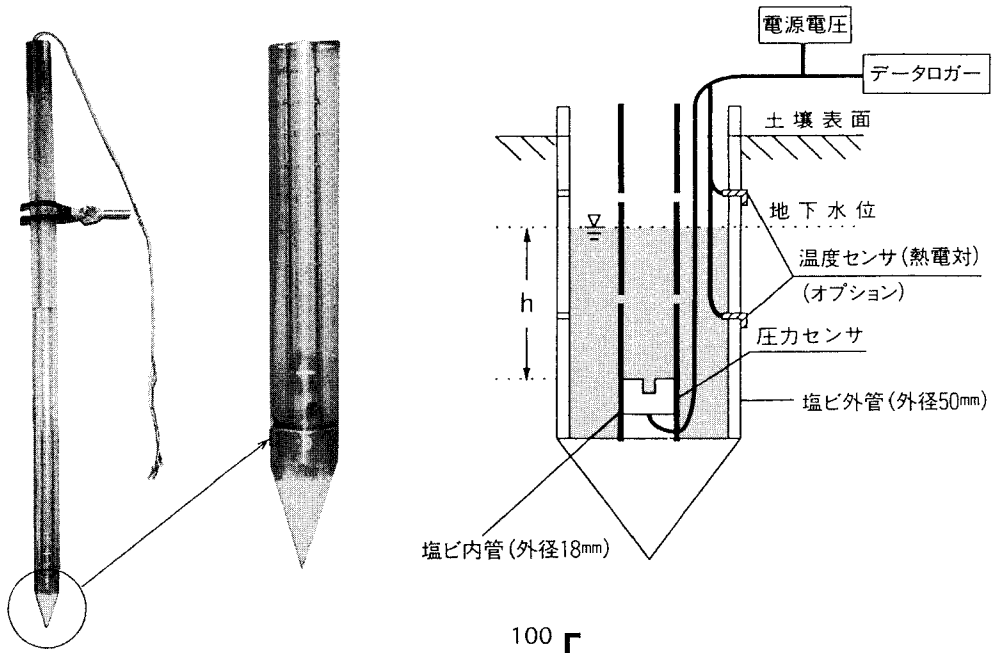
〒116-0011 東京都荒川区西尾久 7-12-16

# 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



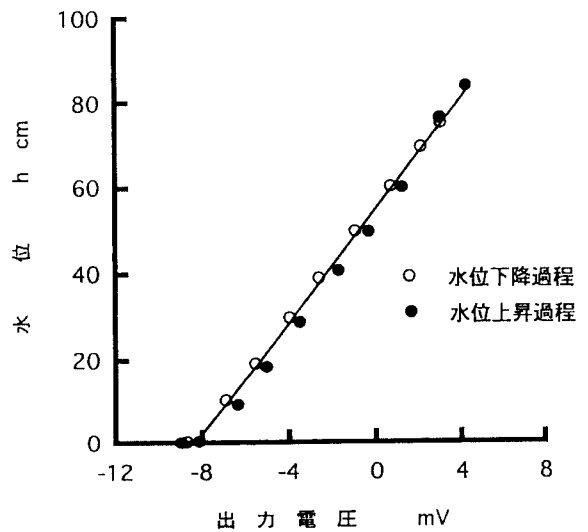
### 2. 圧力センサ (拡散型半導体圧力変換器)

#### 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 (0 MPa)
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)



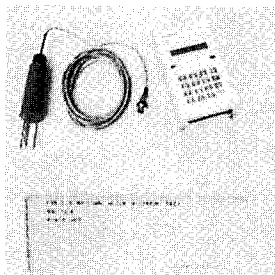
### 3. 地下水位メータ仕様

- |         |                             |
|---------|-----------------------------|
| 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

〒001-0910 札幌市北区新琴似10条7丁目3-16  
 ☎ (011) 763-1088  
 FAX (011) 763-1667

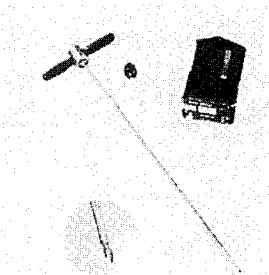
## DIK-321A FDR水分計 自記タイプ



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

## DIK-100A ハンドオーガー

土壌汚染調査用



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



ダイキ  
大起理化工業株式会社

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

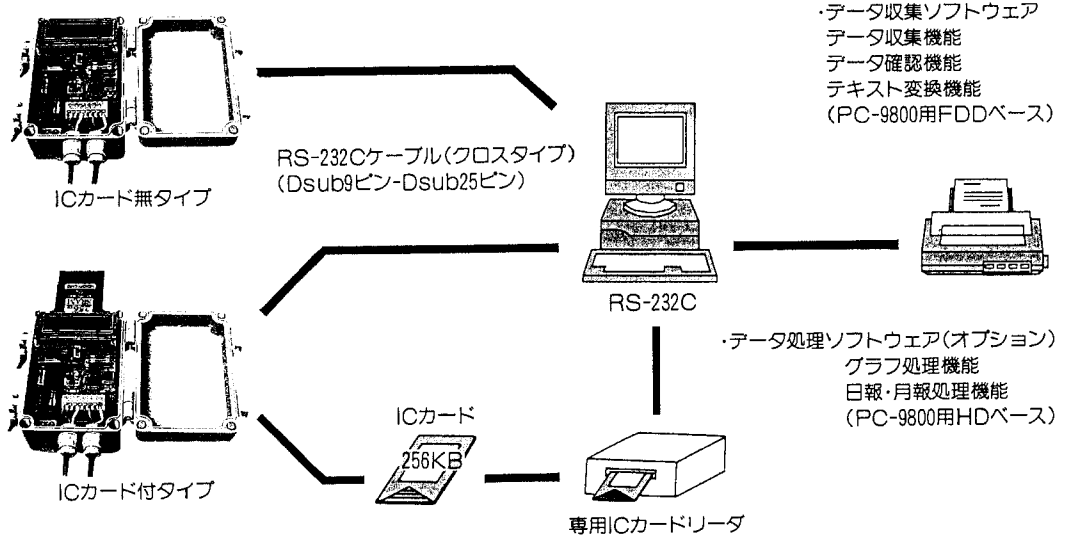
センサ入力固定型フィールドデータロガー

# 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

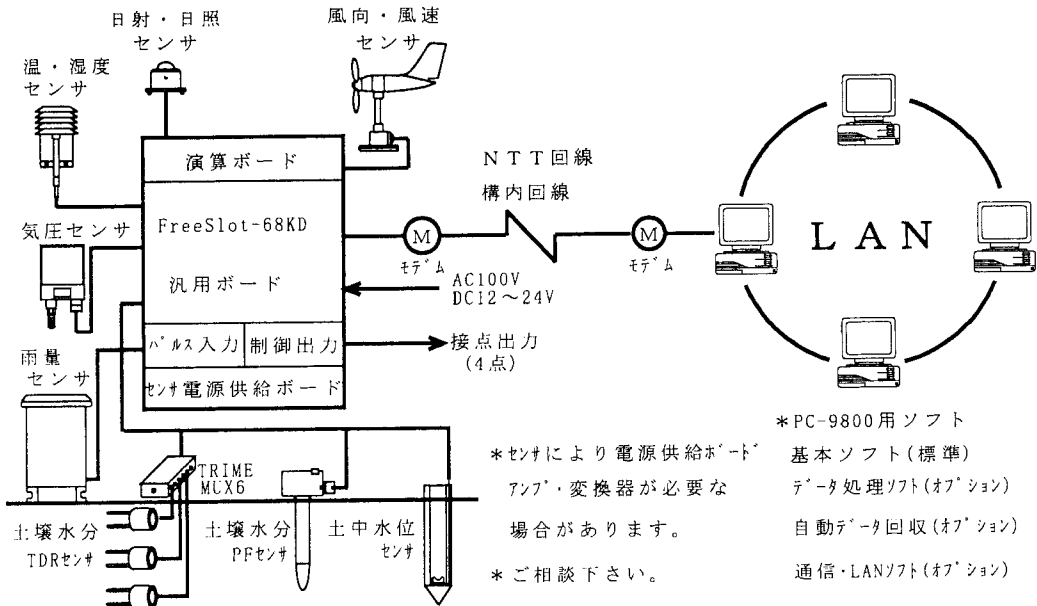
## <データ収集とデータ処理方法>



多機能・多チャンネル データロガー

# FreeSlot-68KDシリーズ

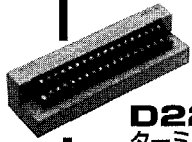
## <気象観測システム例>



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

開発・製造元 **M-G** 有限公司 **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

## 各種センサ



### D220 ターミナルボックス

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



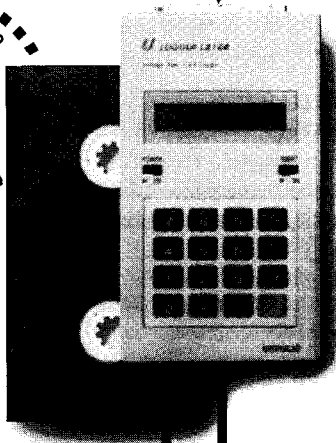
### D200A 熱電対アンプユニット

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

各社  
シグナル  
コンディショナ

ダイレクト接続

ビデオテープ  
サイズが  
うれしい!



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

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

## DATA LOGGER

### データロガーLシリーズ

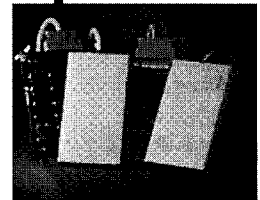
- L810B/電圧入力・長期間タイプ ●L840/電圧入力・超高速タイプ
- L822/熱電対入力・温度記録タイプ ●L830/测温抵抗体入力・温度記録タイプ ●L835/温湿度センサ入力・温湿度記録タイプ

RS-232C



### メモ리카ード

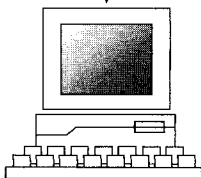
- L810B、L840で使用できます。
- JC128、JC256、JC512、JC1024、JC2048



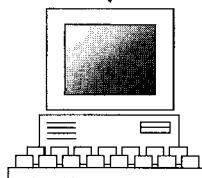
### RW98A RWAT RW98AN

#### メモ리카ードドライバ

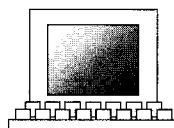
- PC9801シリーズ、PC/AT互換機、PC98noteシリーズ専用のメモ리카ードドライバです。
- メモ리카ードに記録したデータをパソコンに高速送信するのに最適です。



PC9800シリーズ



PC/AT互換機



PC98noteシリーズ



# 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



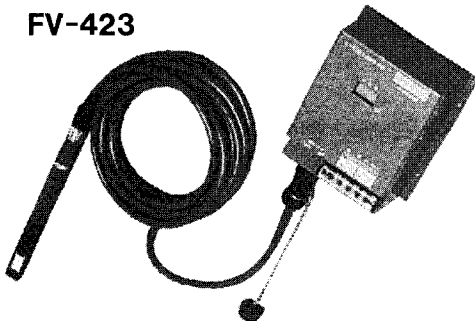
**pF セラミックス土壤水分計**

pF-33



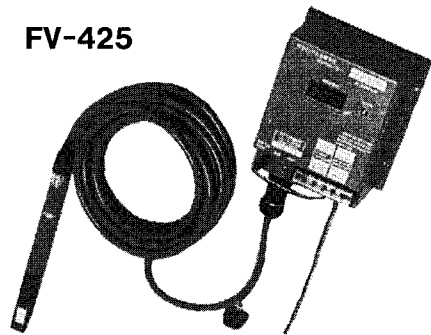
## 土壤pFを連続測定及び自動灌水!!

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**

〒114-0024 東京都北区西ヶ原1-46-16

TEL 03(3918)8111(代)

FAX 03(3918)8119

### 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. 86

January 2001

---

## Contents

### Original papers

- Effects of Cultivated Soil Depth on Vegetable Crops Yield and  
Physico-chemical Properties in Andsol Farm  
.....T. KATO and K. YONEDA... 1
- Improvement of Physical Condition of Soil with Cattle Slurry Fertilization  
—Mechanical Strength and Water-stability of Soil Aggregates  
.....W. KATO, H. KOBAYASHI, T. SUGIURA and M. BABA...11
- Effect of Drying on the Physico-Chemical Properties of Dredged Soils  
.....W. KIM and S. YABASHI...19
- Hysteresis of Soil Water : the Phenomenon and Modeling  
.....M. YOSHIDA...25

### Reviews

- The Development of Root, Mycorrhiza and Soil Physics  
.....K. ISOBE...39

### My Research

- Morphological Characteristics of Macropores and the Distribution of  
Preferential Flow Pathways at Hitach Ohta Experimental Watershed  
.....S. NOGUCHI...47

Book Review .....57

Announcements .....59

Editor's Postscript .....63

---

## 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