

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

# 土 壌 の 物 理 性

第 28 号

昭和 48 年 10 月

---

卷 頭 言	木 下 彰	1
北九州の赤色土の土壤微細形態的特徴 ——土壤動物排泄物の微細形態と二、三の理化学性——	有 村 玄 洋	3
土壤構造と微生物の生育	松口竜彦・蘭 道生・石沢修一・鈴木達彦	9
土とくに砂質の土の保水の構造	中 野 政 詩	15
土中水と土の物理的・力学的性質	桑 原 徹	23
力による土の変化	須 藤 清 次	29
質疑応答と総合討論		33
会 務 報 告		41

---

## 「土壌の物理性」投稿規定

- 1) 投稿は本会会員に限る。ただし共著者の場合また編集委員会が依頼した場合はこの限りでない。
- 2) 原稿の採否は編集委員会が決定する。編集委員会は要すれば文章の加除修正を行なう。ただし内容については、これを著者に依頼することがある。
- 3) 投稿には400字詰横書きの原稿用紙を用い、本規定および別に定める原稿執筆規定に従って執筆するものとする。
- 4) 枚数は16枚程度、図表を含めて刷り上がり6ページ以内を規準とする。超過ページならび写真、図表など、特に多額の経費を要するときは実費を申し受ける。
- 5) 投稿は以下に示す種別にしたがい、その内容は土壌の物理性に主体をおくものとする。

「報文」 他誌に未発表のものに限る。書き方は方法結果、考察ならびに総括（摘要）の体裁をとり、引用文献を明らかにすること。

「論説・総説」 土壌の物理性に主眼をおき、広い視野に立って記述したもの。

「資料」 既に発表した報文または発表予定の内容を各分野の参考資料となるよう書き改めたもの。

「解説」 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を含む。

- 6) 原稿には下記形式の送り状をつける。報文のみ初刷りは著者校正とし、印刷ずみの原稿は返さない。

発表年月日	受付年月日	
種 別	原稿枚数	図表、表枚 葉 30部+部
表 題	図表数	
著 者 名	写真数	
所 属	別 刷	

- 7) 印刷は30部を著者に贈呈する。それ以上希望する場合は実費を申し受ける。

付記：投稿及び会誌編集に関する通信は、下記宛のこと

札幌市豊平区羊ヶ丘1 (〒061-01)

北海道農業試験場農芸化学部

土壌肥料第4研究室内

土壌物理研究会編集委員会

## 土 壌 物 理 研 究 会

会 長 木 下 彰

副 会 長 佐久間 敏 雄

### 編 集 委 員 会

委 員 長 前 田 隆

委 員 梅 田 安 治 石 井 和 夫

斎 藤 万 之 助 古 畑 哲

山 本 晴 雄

編 集 幹 事 山 崎 慎 一 桜 田 純 司

---

---

## 巻 頭 言

---

---

### 15 周年を迎える

会 長 木 下 彰

いまから 15 年前、昭和 34 年 3 月に会誌第 1 号が発刊されました。私は、その編集をいたしました  
が、編集後記につきのようなことを書きました。「この小さな芽がやがて大樹となることを夢みなが  
ら……」

当時の会員は 154 名で、会の存続は多分に心もとない話でした。それがいま、会員数 820 名、会誌  
も第 27 号となり、名実ともに日本における土壌物理の唯一の学術誌として生長いたしました。本研  
究会の基礎は固まったといえましょう。

会誌名を「土壌の物理性」としましたのは、土壌物理学を専門にする人のためでなく、土壌の物理  
性に関連した仕事をしている人たちに利用してもらったり、情報交換を行なう場としようと考えた訳  
です。その意味で、英文名を“Soil Physical Conditions and Plant Growth”とすることになり  
ました。

発足当時の昭和 34 年頃は、日本の土壌物理学は黎明期にあたりますので、本会議の第 1 号から現  
在までに収められている題名を通覧しますと、日本の土壌物理研究の歴史を知ることができます。

15 周年を記念して「土壌物理用語集」を発行することになっており、本誌も歴史の一つの道程に  
入って来ました。こんごも着々と確実な歩みを続けてゆくことが予想され、まことにうれしいこと  
です。

会誌の確実な伸びは、会員各位の投稿によって決定されるものであります。質・量とも多くの投稿  
があるようお願いし、研究会の発展を祈念するものであります。

最後に、会員各位とともどもに本会の 15 周年をお祝いいたしたく思います。



## 北九州の赤色土の土壤微細形態的特徴

## —土壤動物排泄物の微細形態と二、三の理化学性—

有 村 玄 洋\*

北西部九州の台地・丘陵・山地には火山灰でおおわれていない赤黄色土が広く分布している。日本の赤黄色土については、従来、現在の湿潤亜熱帯生物—気候条件下で生成した成帯性赤黄色土であるとみなされてきた。近年、日本の赤色土壌はほとんど洪積世温暖期に生成した古赤色土であるとする報告があり、日本の赤色土の生成・分類学的位置づけについて論議がなされている。筆者は現世の赤黄色土と古赤色土について、土壤微細形態学的研究法を適用し、若干の知見をえた。簡単にのべると、①表層部位には現在の生物—気候の影響をうけた土壤動物およびその排泄物が認められ、表層の発達に重要な影響を与えている。②断面内に火山ガラス、IIB層（古赤色土）に由来した土壤物質の存在などにより、層位の堆積状態のちがいがわかった。③断面内における粘土の移動集積の指標として考えられる定配位粘土の分布に3種類のタイプがあること、これら定配位粘土の分布状態のちがいは同一土壌型内での粘土の機械的移動を知る上に有効であることがわかった。今回はこれらの土壤微細形態的特徴のなかから、本地域の若干の赤色土の表層の発達におよぼす主要な土壤動物およびその排泄物の諸性質についてその大要をのべたい。

日本における土壤動物の種類、現存量およびその生態については植物・動物学者達によって多く報告され<sup>1~11)</sup>、土壤動物が落葉枝堆の分解、土壤および植生におよぼす

重要性を指摘している。また諸外国でも各種の土壤動物について多くの報告がある。たとえば、ミミズについては著名な C. R. Darwin の報告<sup>12)</sup> 以来、多くの研究者達によって研究されている。しかしながら、日本では土壤学者によるこの分野での研究はきわめて少ない<sup>13~16)</sup>。したがって、本報では、土壤学的立場からみた土壤動物の重要性にかんがみ、既報<sup>14,15)</sup> および未発表資料より、若干の赤色土の A<sub>0</sub>層、A<sub>0</sub>A層およびA層の発達におよぼす主要な土壤微細動物およびこれらの排泄物の微細形態、ミミズ排泄物の微細形態とその理化学性について報告する。

## 供試土の説明

土壤断面形態：各供試土の試料採取地点は表-1および図-1にしめたとおりである。これらの採取地点は標高45~250mの台地・丘陵地帯にあり、植生はおもにコナラ、クスギ、カンワなどの落葉広葉樹とマツなどの針葉樹を混じた二次林である。断面形態のおもなる特徴はつぎのとおりである。すなわち、A<sub>0</sub>層は一般に層厚が約1~2cmで、きわめてうすく、落葉枝堆は比較的少ない。A<sub>0</sub>A層、A層は層厚が約12~20cmで、比較的薄く、腐植で汚染されている。土色は暗褐または黄褐色でB層とよく区別される。粒度はB層よりやや粗く、土壤構造は発達良好な粒状および発達弱度の果核状構造

表-1 供 試 土 の 説 明

断面 No.	採 取 地 点	層	序	母 材	標 高 (m)
1	長崎県長与町堂崎	A <sub>0</sub> A-B <sub>21</sub> -B <sub>22</sub> -B <sub>3</sub> C		安山岩風化物	60
2	熊本県河内芳野村野出	A-B <sub>21</sub> -B <sub>22</sub>		〃	250
3	長崎県大村市原口郷	A <sub>0</sub> -A-B <sub>21</sub> -B <sub>22</sub>		玄武岩風化物	60
4	佐賀県呼子町殿ノ浦	IA-IB-IIB <sub>2</sub> -IIB <sub>3</sub> C		〃	45
5	福岡県黒木町鹿子生	A <sub>0</sub> A-A-B <sub>21</sub> -B <sub>22</sub>		結晶片岩風化物	240
6	長崎県琴海町長浦郷	A <sub>0</sub> A-B <sub>21</sub> -B <sub>22</sub> -B <sub>23</sub>		〃	230
7	福岡県瀬高町本吉	IA <sub>0</sub> A-IB <sub>21</sub> -IB <sub>22</sub> -IIB <sub>2</sub> -IIB <sub>3</sub> C		〃	70

\* 九州農試環境第2部（現在、宮崎県総合農試）

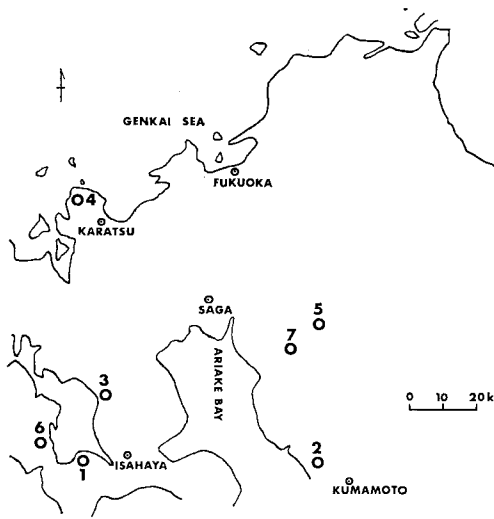


図-1 試料採取地点図

をしめした。B層はA層より細粒質で、黄赤、赤褐または赤色で、とくに古赤色土は赤色味がつよい。土壌構造は発達中度および良好な果核状または角塊状構造をしめした。なお、詳細な土壌断面記載については既報<sup>14)</sup>を参照されたい。

### 結果および考察

1 各供試土の化学性：表にはのせてないが、一般に強酸性（水浸 pH は約 4.3~5.2 付近）で、腐植含量は少なく（A<sub>0</sub>層をのぞき、<7%）、塩基状態は塩基含量が少なくきわめて未飽和（A<sub>0</sub>層をのぞき、<35%）をしめすことから、脱珪酸作用や脱塩基作用をつよくうけて

いるものと考えられる。したがって、本供試土は土壌断面形態、化学性などから、従来の赤黄色土の範囲に含まれるものと考えられる。

2 粒度・三相分布：各供試土の粒度分布図は図-2にしめたとおりである。各試料とも断面をつうじて粘土含量は表層で減少し（約 14~56%）、B層（約 31~71%）で多くなっているのが特徴的であった。この減少の

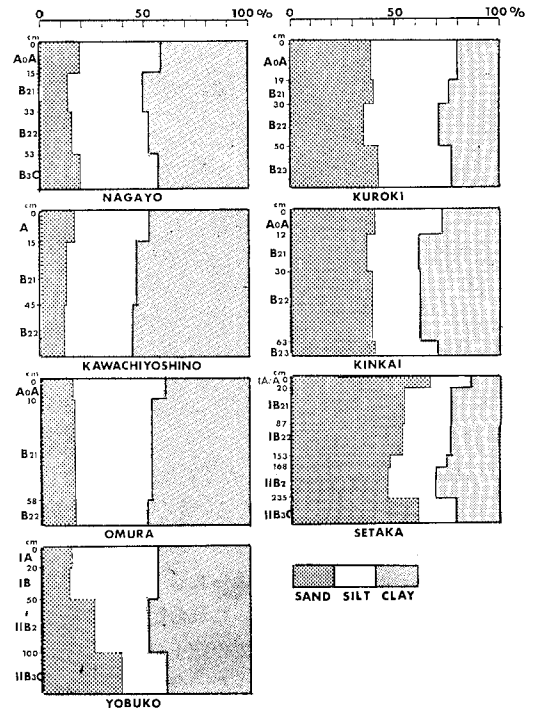


図-2 粒 度

表-2 各種分散性粘土量

Soil	Horizon	Calgon-Dispersed Clay (<2 $\mu$ ) (%) (A)	Water-Dispersed Clay (<2 $\mu$ ) (%) (B)	H <sub>2</sub> O-EXT. Soln* Dispersed Clay (<2 $\mu$ ) (%) (C)	B/A×100 (%)	C/A×100 (%)
NAGAYO	A <sub>0</sub> A	41.6	21.4		51.4	
	B <sub>22</sub>	48.9	0.7	1.8	1.4	3.7
KAWACHI-YOSHINO	A	47.9	15.4		32.2	
	B <sub>22</sub>	56.4	0.7		1.2	
KUROKI	A <sub>0</sub> A	19.7	8.5		43.2	
	B <sub>22</sub>	29.1	2.4	13.3	8.3	45.7
KINKAI	A <sub>0</sub> A	29.3	9.8		33.4	
	B <sub>22</sub>	37.8	0.1	6.2	0.3	16.4
SETAKA	IA <sub>0</sub> A	13.7	8.1		59.1	
	IB <sub>22</sub>	24.0	0.2	8.0	0.8	33.3
	IIB <sub>2</sub>	31.0	0.1	7.2	0.3	23.2

\* 各試料の水浸液は試料（A<sub>0</sub>A層およびA層）：水=1：10の割合で調整した。

原因の1つとして、降雨による粘土の表面流去または下層への粘土の移動の可能性が考えられる。このことはつぎのことから説明されよう。すなわち、各試料の表層および下層中のカルボン分散性粘土、水分散性粘土および表層(A<sub>0</sub>A層およびA層)水浸液分散性粘土量は表-2にしめしたとおりである。水分散性粘土量は、各試料ともA<sub>0</sub>A層およびA層で多く(約8~21%)、カルボン分散性粘土量(約14~48%)にたいする割合がB層のそれ(0.3~8.3%)にくらべて、きわめて高い値(約32~59%)をしめした。また、各断面のB層にたいする表層水浸液分散性粘土量は、いずれの断面でも、水分散性粘土量より多く、カルボン分散性粘土量にたいする割合も水分散性粘土量の場合にくらべて(0.3~8.3%)、かなり高い値(約4~46%)をしめし、粘土がより多く分散していることをしめしている。このことはBlomfield<sup>17)</sup>が指摘したように、表層(A<sub>0</sub>層、A<sub>0</sub>A層およびA層)中にふくまれている有機物のキレート作用により、粘土粒子を結合している三・二酸化物の溶解にともなって、粘土が分散したものと考えられる。また、表層水浸液分散性粘土量がことなっていることは、おそらく、水浸液中の有機物の質と量およびB層中の三・二酸化物の量と形態のちがいでよるものではないかと考えられるが、今後、検討する必要がある。ともあれ、これらの結果から、各断面の表層中の粘土は降雨水によって表面流去されるか、または下層へ移動しているものと考えられる。

三相分布(図-3)は、一般に、B層で固相率(約31~50%)が高く、気相率が減少しているが、A<sub>0</sub>A層およびA層では気相率が高い。このような傾向はつぎの土壤

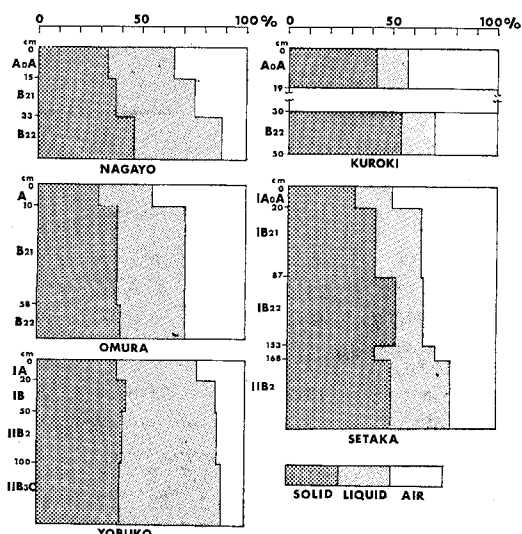


図-3 三相分布

微細形態的特徴からも説明される。

3 土壤微細形態的特徴：各供試土の表層と下層の土壤微細形態的特徴は写真-1にしめしたとおりである。各試料とも表層と下層では明らかに異なった土壤微細形態的特徴をしめした。すなわち、各試料とも表層は孔隙が多く、*spongy fabric* (写真-1, Nos. 1, 3, 5, 7)をしめした。A<sub>0</sub>層はいろいろに分解した植物遺体片、土壤動物排泄物と少量の一次鉱物よりなり、きわめて多孔質(Silicate moder型<sup>18)</sup>)をしめす(写真-2, No. 7)。A<sub>0</sub>A層およびA層は一般に腐植と無機物がよく混合し(Mull型<sup>18)</sup>)、少量の植物遺体片や土壤動物排泄物(写真-1, No. 7)をふくんでいる。B層はいずれも *porphyroscelic fabric*<sup>19)</sup>で、ちみつで孔隙が少ない(写真-1, Nos. 2, 4, 6, 8)。また、孔隙壁に上層より移動してきた粘土(定配位粘土)がみられた(写真-1, Nos. 2, 4)。これらのことは前述の粒度分布、三相分布によく反映しているものと考えられる。

土壤動物とそれらの排泄物：上述したように、表層部位は孔隙にとみ、植物遺体が存在することは土壤動物が生息するのに好適な場所となっているものと考えられる。前掲の土壤動物学者達の報告によれば、土壤表層部位には各種の土壤動物が生息し、土壤小動物として、ダニ類、トビムシ類がもっとも多く、大型土壤動物として、ミミズ類が多いことをのべている。本試料の表層部位にもこれら土壤動物が生息していることがわかった(写真-2, Nos. 1~4)。そのほかに、アリ、ヤスデ類などが観察された。さらにこれら土壤動物の活動の結果として、それらの排泄物が認められた。一般におもなる形態として、つぎの3種類があげられる。すなわち、(1)卵形状粒(径0.01~0.2mm大；ダニ類による排泄物<sup>20)</sup>) (写真-2, Nos. 5, 6)で、高倍率(400倍)で観察すると、多量の微細な植物遺体細片が認められた。(2)小塊状粒(径0.05~0.8mm大；おもに小節足類による排泄物と思われる) (写真-2, Nos. 7, 8)で多量の植物遺体細片と少量の鉱物粒をふくんでいる。(3)小塊状~粒状粒(径>4mm大、4~1mm大；おもにミミズ類による排泄物)で、多くの植物遺体片、土壤物質をふくんでいた。そのほか、土壤動物排泄物上にカビ類菌糸が認められた。これらのことから、土壤動物および微生物が植物遺体の分解に明らかに関与し、腐植形成における植物遺体の初期的分解過程に貢献しているものと考えられる。

#### 4 ヒナフトミミズ (*Pheretima micronaria*) 排泄物の微細形態と二、三の理化学的：

1) 形態と大きさ：本供試土の表層部位の落葉枝堆内に粒径が比較的大きい塊状~粒状排泄物が認められた。

その1例(断面 No. 7 の A<sub>0</sub>層中)を写真-3にしめした。これらの排泄物は一般に暗褐色をしめし、ちみつでかたい。これら排泄物のうち、粒径>4 mm 大のものおよび粒径 4~3 mm 大のものはほとんど排泄物の集合体をなしている。粒径 3~2 mm 大および 2~1 mm 大のものはいずれも単粒、暗褐色で、ややちみつである。これら排泄物の粒径割合とそれぞれの排泄物の粒度は表-3にしめしたとおりである。粒径は F3 (3~2 mm 大) がもっとも多く(60%)、ついで F2 (4~3 mm 大)、F4 (2~1 mm 大) および F1 (>4 mm 大) の順であった。また、それぞれの排泄物の粒度をみると、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 処理後を 100 としてしめすと、粒径が小さい排泄物ほど粘土量が多く、粒径が大きくなるにつれて、砂含量が多かった。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 処理による損失量は F4 (2~1 mm 大) で約 34% でもっとも多かった。このことから、これら排泄物はかなりの量の植物遺体のほか土壌物質もふくんでいることが推定される。

表-3 ヒナフトミミズ排泄物(瀬高土壌 A<sub>0</sub>A 層)の粒度

Sample No.	Size (mm)	Content (%)	Sand (2-0.02 mm) (%)	Silt (20-2 $\mu$ ) (%)	Clay (<2 $\mu$ ) (%)
F1	>4	8.7	44.9	38.0	16.5
F2	4-3	15.0	43.5	38.2	17.9
F3	3-2	60.4	33.1	43.3	23.4
F4	2-1	9.1	25.1	42.6	31.5

2) 最表層部位に存在する小塊状~粒状排泄物、飼育ヒナフトミミズの腸内物質とそれの排泄物との比較: 当該試料の最表層部位の排泄物が何に由来するかについて、その最表層部位に生息していたヒナフトミミズ\*(体長約 5~10 cm 大) を採取し、飼育したのち、その排泄物を採取した(暗褐色、約 3~1 mm 大の粒状)。ヒナフトミミズの切片(横断面)とこれら排泄物の薄片を作製し、観察した結果は写真-3にしめしたとおりである。すなわち、飼育したヒナフトミミズ腸内には植物遺体細片と多量の鉱物粒が含まれており(写真-3, Nos. 1, 2)、その排泄物も同様であった(写真-3, Nos. 3, 4)。これらと断面 No. 7 の最表層部位中の排泄物と比較してみると(写真-3, Nos. 5~8)、いずれも多く植物遺体片と鉱物粒をふくみ、きわめてよく類似していることがわかった。このことから、断面 No. 7 の最表層部位中の小塊状~粒状排泄物はおもにヒナフトミミズによる排泄物であることが確認された。これらのことは、ミミズ類が

\* 同一地点で、1972年6月と9月に採取したミミズ類はすべてこの類のミミズであった(中村好男氏による同定)。

前述した土壌小動物、微生物とともに、植物遺体分解過程に関与していると同時に、従来からいわれているように、表層における土壌物質の攪拌と運搬、土壌粒子の粒団化などに寄与しているものと考えられる。

3) X線回折結果: 最表層部位中の小塊状~粒状排泄物の粉末 X線分析結果は図-4にしめしたとおりである。排泄物中の鉱物粒はおもに長石類(3.17 KX), 石英(4.27 KX, 3.34 KX, 2.46 KX, 2.28 KX, 2.13 KX, 1.82 KX)のほか、粘土鉱物の存在が認められた。Ponomareva<sup>21)</sup> はミミズ排泄物中に方解石が存在することをのべているが、本試料では、薄片観察、X線分析結果および塩酸による発泡テストなどでも方解石の存在を確認できなかった。元来、ミミズには石灰腺と呼ばれる分泌腺があり、炭酸カルシウムを分泌するといわれている<sup>10)</sup>ので、炭酸カルシウム(方解石)の存在についてはさらに検討する必要がある。

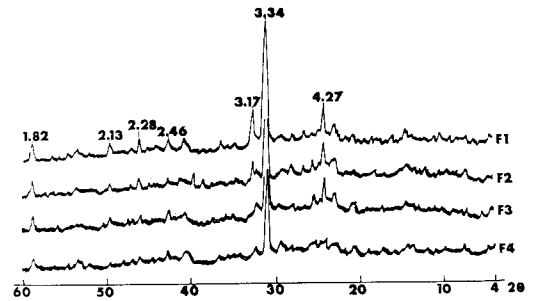


図-4 ヒナフトミミズ排泄物(瀬高土壌 A<sub>0</sub>A 層)の粉末 X線回折図

F1, 粒径>4 mm F3, 粒径 3~2 mm  
F2, 粒径 4~3 mm F4, 粒径 2~1 mm

4) 化学性: ミミズ排泄物とその周囲の土壌および下表-4 ヒナフトミミズ排泄物およびその周囲の土壌(断面 No. 7)の化学的性質

	F1	F2	F3	F4	IA <sub>0</sub> A	IB <sub>21</sub>
pH (in Water)	5.7	5.7	5.8	5.7	4.8	4.8
Organic C (%)	13.2	15.9	18.5	19.7	1.7	0.7
Humus (%)	22.7	27.4	31.8	34.0	3.0	1.2
Total N (%)	0.5	0.5	0.6	0.8	0.1	0.04
C/N	26.4	31.8	30.8	24.6	15.8	17.4
CEC (me/100g)	42.1	41.9	51.7	55.5	14.5	14.1
Exch. Cations (me/100g)						
Ca	13.2	16.1	22.5	22.8	1.7	1.0
Mg	5.1	5.1	4.4	4.3	0.6	0.7
K	3.5	3.3	3.6	3.3	0.5	0.3
Na	1.9	1.9	1.5	2.3	0.4	0.4
Base-Satu. (%)	56	63	62	59	22	20
NH <sub>3</sub> -N (mg/100g)	14.0	9.8	7.7	9.2	2.0	tr.
NO <sub>3</sub> -N (mg/100g)	5.7	3.6	4.2	12.2	1.0	tr.



層土の若干の化学的性質は表-4にしめたとおりである。ミミズ排泄物では、pH(水)は約5.8前後で、置換性成分にとみ、とくに置換性カルシウムが多く(13~23 me)、塩基飽度もかなり高く(56~63%)、周囲の土壤や下層土のそれらにくらべて、きわめて高い値をしめた。また、ミミズ排泄物中のNH<sub>3</sub>-N量(8~14 mg)およびNO<sub>3</sub>-N量(4~12 mg)も土壤中のそれら(<2 mg)にくらべて多かった。このような傾向は Ponomareva<sup>21)</sup>や Lunt および Jacobson<sup>22)</sup>の報告によく類似している。さらに、ミミズ排泄物中のNH<sub>3</sub>-N量は粒径が大きいかほど多くなり、NO<sub>3</sub>-N量はその逆であった。これは粒径が小さいほどNH<sub>3</sub>-Nが酸化され易く、NO<sub>3</sub>-N量が増加したものと考えられる。このように、ミミズ排泄物中にNH<sub>3</sub>-N量が多いことは、ミミズの腸内およびその排泄物中ではアンモニア化成微生物の活動が土壤中より盛んである<sup>23)</sup>ことから、ミミズ排泄物中に多量のNH<sub>3</sub>-Nが生成されているものと考えられる。また、排泄物中の置換性カルシウムの給源の1つとしては、ミミズ類は落葉(一般に多くのカルシウムをふくんでいる)を好んで摂取するので、排泄物中に集積したカルシウムによるものと思われる。これらのことから、ミミズによる食物の摂取過程は土壤微生物の生活作用と密接に結びついているものと考えられ、ミミズ類と土壤微生物との相互関係は共生的で、植物落葉の分解を促進する重要な因子であると思われる。また、比較的多くの塩基類を含有する土壤動物排泄物が存在することは、A<sub>0</sub>層およびA層における各種成分の生物学的循環、腐植形成に重要な影響をあたえ、肥沃度向上における生物学的因子の重要性をしめすものと考えられる。

### 要 約

北西部九州の赤色土のA<sub>0</sub>層、A<sub>0</sub>A層およびA層中にダニ類、トビムシ類およびミミズなどの土壤動物とそれらの排泄物が存在することは、腐植形成における植物遺体の初期の分解過程に、微生物とともに重要な役割を果たしているものと考えられる。また、これら土壤動物の活動は、表層の土壤微細形態に変化を与え、表層における土壤の攪拌、運搬、粒団化および土壤成分の生物学的循環に重要な影響を与えているものと考えられる。

謝辞；土壤動物について懇切に御教示戴いた京都大学渡辺弘之氏、農林省草地試中村好男氏および九州農試後藤昭氏、岡田忠虎氏、持田作氏に厚く御礼申し上げる次第である。

### 引用文献

- 1) 北沢右三：ペドロジスト，**6**，37 (1962)
- 2) ———，倉沢秀夫，中村方子：資源研彙報，**No. 52/53**，57 (1960)
- 3) 森川国康，大上正善，松本礼三枝：日生態誌，**9**，189 (1959)
- 4) 青木淳一：応動昆誌，**5**，81 (1961)
- 5) ———：土壤動物学—分類・生態・環境との関係を中心に—830頁 (1972)，北隆館
- 6) 渡辺弘之：森林における大型土壤動物の落葉粉砕と土壤耕耘に関する研究，89頁 (1971)
- 7) ———：日林誌，**50**，204 (1968)
- 8) ———，四手井綱英：日生態誌，**13**，235 (1963)
- 9) 中村好男：応動昆誌，**16**，18 (1972)
- 10) 三坂和英：応動誌，**1**，14 (1929)
- 11) 宮坂増穂：ペドロジスト，**5**，32 (1961)
- 12) Darwin, C. R. : The formation of vegetable mould through the action of worms. Murray, London, pp. 326 (1881)
- 13) 小野寺伊勢之助：盛岡高農同窓会学術彙報，**9**，35 (1936)
- 14) 有村玄洋：九州農試報告，**15**，547 (1971)
- 15) Arimura, S. and Kanno, I. :九州農試彙報，**12**，93 (1966)
- 16) 河井完示：農技研報告，**BNo. 20**，77 (1969)
- 17) Blomfield, C. : *Trans. Fifth Int. Congr. Soil Sci.*, 280 (1954)
- 18) Kubiena, W. L. : The soils of Europe. 317 pp. Thomas Murby, London (1953)
- 19) Brewer, R. : Fabric and Mineral Analysis of soils. 470 pp. John Wiley, New York (1964)
- 20) Kubiena, W. L. : In K. McE. Kevan's *Soil Zoology*, 73-98. Butterworths Scientific Publications, London (1955)
- 21) Ponomareva, S. I. : *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenkd.*, **97**，205 (1962)
- 22) Lunt, H. A. and Jacobson, H. G. M. : *Soil Sci.*, **58**，367 (1944)
- 23) 農林省技術会議調査資料 **53**，1~33 (1968)



## 土壌構造と微生物の生育

松口 龍彦\* 蘭 道生\* 石沢 修一\*\* 鈴木 達彦\*

### はじめに

土壌微生物の生態を支配する要因として土壌の物理性のもつ意味は大きい。土壌の構造が通気、水分や養分の供給、根の伸長などに難易をもたらして高等植物の生育を左右するように、微生物の生育にもさまざまな影響をもたらすことは容易に理解できる。不均一な構造をもつ土壌中での微生物生態を調べるにさいしては Winogradsky (1952)<sup>1)</sup>が指摘したように微細構造における微生物の存在状態を描写できる技法の導入が必要である。この要求にそった方法として、埋没スライド法<sup>2)</sup>、固結剤で固めた土壌フィルムを直接検鏡して土壌粒子周辺での微生物分布を調べる方法<sup>3,4,5,6)</sup>や土壌粒子を洗滌<sup>7)</sup>、コロジオン液<sup>8)</sup>や超音波処理<sup>9)</sup>して粒子内外両部の微生物を企画する方法などが提案されてきた。

わが国におけるこの分野の研究はまず石沢ら<sup>10)</sup>により直接検鏡法を用いて試みられ、土壌の孔隙、粒子組成や有機・無機コロイド物質と微生物の生育との関係について多くの示唆が与えられた。その後、服部<sup>9)</sup>は土壌の固粒構造に着目し、洗滌法と超音波処理を併用して環境変化の大きい固粒外部と小さい内部での微生物の住み分けを明らかにするとともに、この住み分けが環境変化に対応する微生物の生育や微生物同志の相互関係に大きな意味をもつことを報告している。しかし彼の言う固粒は20~50 $\mu$ の粒径の耐水性2次粒子<sup>11)</sup>に相当し、その内外両部を画別した知見と理解される。

一般に土壌の微細構造は結合次数のことなる大小さまざまな粒子(粒径数 $\mu$ ~数mm)の配列と粒子内外に張りめぐらされた粒子間隙(孔隙)によって特徴づけられ、2次粒子のみを固粒と仮想することには多くの問題が残る。

筆者らは固粒構造のもつ通気性、保水性などの諸性質が、その孔隙性に由来するものと考え、土壌構造の問題を孔隙性の面から捉えようとした。そのために充填密度のことなる土壌および粒径のことなる石英砂およびペーライト固体培地を用い、孔隙量、大きさ、および水分条

件の変化に対応する微生物の生育を追跡し、土壌孔隙内での微生物の住み場の問題を検討した。

### 実験 I 土壌を用いた実験

#### 1 方法

厨川洪積性黒色火山灰土と武豊洪積性赤褐色土の熟畑表層土新鮮土壌を2mm篩別し、養分として乾土100g当たりクローバー乾燥粉末1.0gと過リン酸石灰、硫酸

表-1 充填土壌の三相分布とpF水分

土壌	区	三 相 分 布			pF
		固相%	液相%	気相%	
厨川土壌	密-高水分C-h	32.2	46.5	21.3	2.7
	密-低水分C-l	34.0	35.5	30.5	3.9
	粗-高水分L-h	24.4	40.6	35.0	2.1
	粗-低水分L-l	20.0	28.5	50.0	3.3
武豊土壌	密-高水分C-h	50.0	31.5	18.5	2.0
	密-低水分C-l	50.0	21.5	28.5	3.4
	粗-高水分L-h	34.5	22.5	43.0	2.3
	粗-低水分L-l	34.5	15.5	50.0	3.0

カリを成分0.1g相当量ずつ混合し、表-1に示す三相分布とpF水分を与えるようにガラス容器に充填し、28°Cで1ヵ月量培養し、細菌、放線菌、糸状菌の生育経過を調べた。

#### 2 結果と考察

##### a 土壌の三相分布と微生物の生育との関係

平板法による好気性細菌、グラム陰性細菌、嫌気性細菌、放線菌、糸状菌の菌数変動および直接検鏡法(埋没スライド法)による放線菌、糸状菌の菌糸密度を図-1、図-2に示した。

厨川土壌では、平板法による好気性細菌数、グラム陰性細菌数、嫌気性細菌数は時期により程度の差はあるが一般に C-h>L-h>C-l>L-l で土壌の液相率とほぼ一致した。これに対し放線菌と糸状菌の生育は細菌の場合と傾向をことにし、平板法の菌数、直接検鏡法による菌糸密度のいずれも L-l>L-h $\approx$ C-l $\approx$ C-h の順となり土壌の気相率とよい対応を示した。

類似の傾向は武豊土壌においてもみられた。平板法による好気性細菌数、嫌気性細菌数はともに C-h $\approx$ L-h>C-l $\approx$ L-l で液相率にほぼ一致し、放線菌は平板法

\* 現・神戸大学農学部

\*\* 農業技術研究所

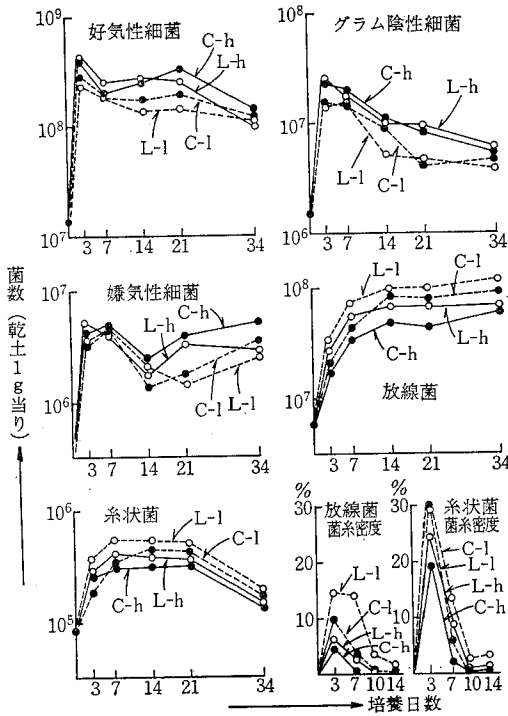


図-1 各種微生物数の生育および放線菌，糸状菌の菌糸密度（厨川土壌）

の菌数，菌糸密度のいずれも  $L-l > C-l > L-h > C-h$  の順で，気相率の最も大きい  $L-l$  で最大値を示し，最も小さい  $C-h$  で最小値を示した。一方，糸状菌では，菌糸の生育は  $L-l > L-h \approx C-l > C-h$  で土壌の気相率と同じ傾向がみられたが，平板法の菌数は菌糸密度で最大値を示した  $L-l$  でも  $L-h$ ， $C-l$  とほぼ同じ菌数で推移した。平板法の糸状菌数が主として孢子に由来することを考慮すれば，この結果は， $L-h$ ， $C-l$  にくらべ  $L-l$  では糸状菌の生育が，菌糸型であったことを示すものであろう。

供試した両土壌は腐植質土壌と鉍質土壌で対照的な物理性をもつが，いずれの土壌においても細菌の生育は土壌の液相率，放線菌および糸状菌の生育は気相率とよい対応を示した。このことは細菌が主として土壌の飽水孔隙中に生育するのに対し，放線菌と糸状菌はむしろ気相孔隙中で生育していることを物語っている。石沢ら<sup>12)</sup>は火山灰土壌表層土の水分量と微生物の生育との関係でほぼ同様の結果をえ，特に放線菌，糸状菌の生育が気相，液相の両相で行なわれるとしている。土壌液相，気相中での菌糸生育の難易については不明の点が多いが，液相では細菌の増殖に伴う嫌気条件の発達や微生物相互間の競合作用が気相にくらべ著しい点が菌糸生育の抑制要因として考えられる。

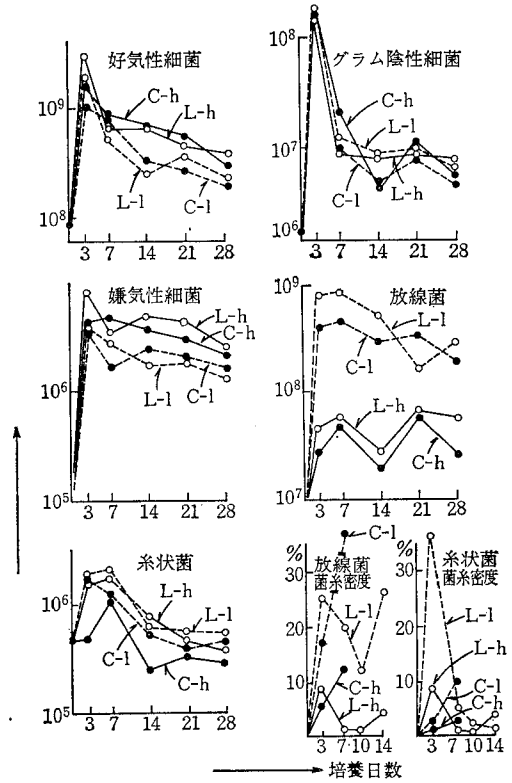


図-2 各種微生物菌数および放線菌，糸状菌の菌糸密度（武豊土壌）

b 土壌孔隙と微生物の生育

以上に土壌の水分条件が各種微生物の生育を著しく左右することを明らかにしたが，それでは各微生物の生育に適した飽水孔隙あるいは気相孔隙は一体どのような性質のものであろうか。微生物の生育に関係の深い孔隙の性質に水分張力，通気性があり，いずれも孔隙の大きさに支配される。そこで微生物の生育と孔隙の大きさとの関係を検討した。

図-3に示すように本実験で設定した各区の pF 水分曲線，最小気相孔隙径 (pF 値から求めた孔隙の当量直径) および飽水孔隙，気相孔隙の容積率 (対土壌三相) と細菌，放線菌，糸状菌の生育との関係から，これら微生物の生育に適した孔隙の大きさを知ろうとした。

第3図によれば，厨川土壌では  $C-h$  と  $C-l$  の孔隙性の差は  $0.4 \sim 6.0 \mu$  の孔隙 (容積率 11%) での水の存否であり， $L-h$  と  $L-l$  の差は  $1.5 \sim 24 \mu$  の孔隙 (容積率 12.1%) での水の存否である。この差を微生物の生育差と比較検討してみよう。

厨川土壌は細菌数の高水分区 > 低水分区で，その差は密充填区 (C) と粗充填区 (L) でほぼ同程度であった。

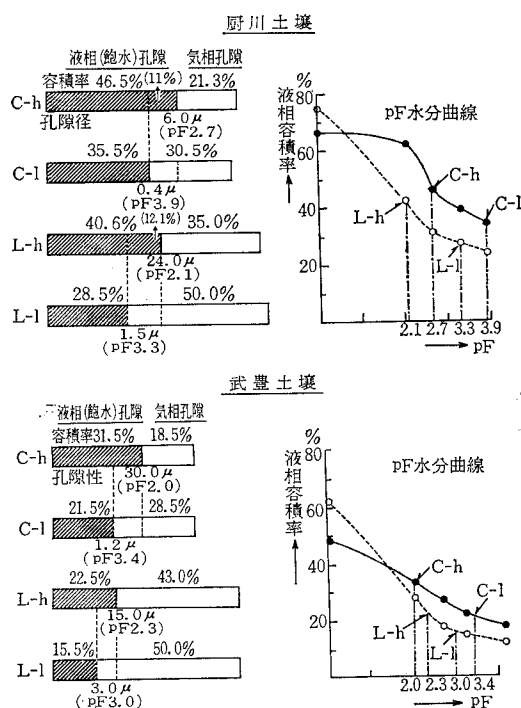


図-3 土壌の孔隙性と pF 水分曲線

このことは、ほぼ同容積を占める 0.4~6.0 μ の飽水孔隙と 1.5~24 μ の飽水孔隙が細菌数の増加に同程度の効果を持ったことを示し、換言すれば 0.4~24 μ の飽水孔隙中ではほぼ同密度の生育を示したものと考えられる。また武豊土壌ではほぼ同容積を占める 1.2~30 μ の飽水孔隙と 3.0~15 μ の飽水孔隙中ではほぼ同密度の生育を示したと思われる。Seifert<sup>12)</sup>は土壌細菌数が最大容水量の 60~80% までの範囲内では水分量とともに増加すると報告しているが、本実験の結果からも、細菌は一般に孔隙の大きさに関係なく飽水孔隙中に生育することが示された。

放線菌の菌糸密度は厨川土壌では C-l>C-h, L-l>L-h であり、0.4~6.0 μ の気相孔隙にくらべ 1.5~24 μ の気相孔隙で旺盛な菌糸生育がみられた。この結果は 6.0 μ 以下の微細な気相孔隙が放線菌の菌糸生育にとって好適でなかったことを示している。これに対して、武豊土壌における菌糸密度は C-l>C-h, L-l>L-h であり、3.5~15 μ の気相孔隙および 1.2~30 μ の気相孔隙のいずれにおいても菌糸は旺盛に生育したことを示している。このことから、武豊土壌では厨川土壌よりも小さい 1.2 μ の気相孔隙でも放線菌の菌糸生育に好適な条件にあったことが理解される。

さらに糸状菌の菌糸密度をみると、厨川土壌では L-l

≒L-h, C-l≒C-h であったが、いずれの区でも菌糸の生育は旺盛であった。これに対し武豊土壌では L-l>L-h≒C-l>C-h の順となり、L-l 以外の区では糸状菌の菌糸生育は著るしく劣った。これらの結果を気相孔隙の大きさとの関係でみれば、厨川土壌では菌糸は主として 24 μ 以上の比較的大きな気相孔隙に生育したのに対し、武豊土壌では 3~15 μ のかなり小さい気相孔隙であったことを示している。

以上に述べたように、放線菌と糸状菌の菌糸の生育に適した気相孔隙の大きさは、厨川土壌ではそれぞれ 6.0 μ 以上と 24 μ 以上、武豊土壌ではそれぞれ 1.2 μ 以上と 3~15 μ であり、土壌によってちがう結果が得られた。この相違は何に起因するものであろうか。放線菌や糸状菌の菌糸生育が主に気相孔隙中で行なわれるにしても、同時に適量の酸素と有効水分の供給が不可欠である。Griffin は土壌糸状菌の菌糸生育と酸素分圧<sup>13)</sup>、相対湿度<sup>14)</sup>との関係を調べ、一般に菌糸の生育は酸素分圧 4% 以下では急激に低下すること、また相対湿度 94~97% では 100% での生育の約半分以下に低下し、菌糸生育には最少限 70~95% の相対湿度が必要であると報告している。これらの点を考慮すれば、両土壌の気相孔隙中でのガス拡散速度と蒸気圧が問題となろう。腐植に富み多孔質粒子からなる厨川土壌では、鉱質粒子を主体とする武豊土壌に比較すれば、粒子表面積が大きいためガス拡散速度が小さく、その結果、菌糸生育に必要な酸素供給と炭酸ガスの拡散が比較的大きな気相孔隙でしかえられないこと、しかもその大きな気相孔隙でも飽水した微細孔隙が豊富に露出しているため菌糸生育に必要な蒸気圧がえやすいものと考えられる。

c 土壌の呼吸作用

図-4 に示すように、土壌の炭酸ガス発生量に対する孔隙性の影響は厨川土壌と武豊土壌でちがった結果が得られた。厨川土壌ではほぼ L-l>L-h>C-l>C-h の

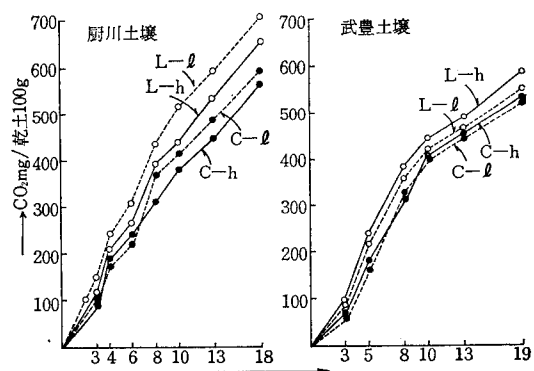


図-4 土壌の呼吸作用

順で土壌の気相率とよい対応を示したが、武土壌豊では  $L-h > L-l > C-h \approx C-l$  となり区間の差も厨川土壌の場合よりは明らかに小さかった。このように厨川土壌の炭酸ガス発生量は初期の放線菌、糸状菌の菌糸密度とほぼ同じ傾向を示したが、武土壌では初期の放線菌、糸状菌の菌糸生育に伴う呼吸量が、それを上回る細菌の増殖に伴う呼吸量にアスクされたものと思われる。このことは武土壌の初期の細菌数が厨川土壌のその約10倍に達している点からも理解される。

**実験Ⅱ 石英砂およびパーライト固体培地を用いた実験**

土壌を用いた実験Ⅰの結果を細菌、放線菌および糸状菌のそれぞれについてさらに検討するため、粒径の異なる石英砂とパーライトの固体培地に細菌、放線菌、糸状菌を単独接種し、孔隙性のちがいが菌の生育と呼吸作用におよぼす影響を調べた。

**1 方 法**

粒径のちがう石英砂 (0.28~0.18 mm と 0.10~0.07 mm) とパーライト (1.0~0.5 mm と 0.25~0.10 mm) を定法により十分洗滌、乾燥し、予め液体培養した分離菌 (*Penicillium* sp. *Streptomyces* sp. *Bacillus* sp.) のサスペンションを単独接種し、下記の微生物養分とともに所定量の無菌蒸溜水を加えて、表-2の三相分布を与えるように200 ml 容広口ビンに充填した。28°C で無菌的に培養し、経時的に菌の生育 (平板法による菌数、埋没スライド法による菌糸密度) と呼吸作用 (CO<sub>2</sub> 発生量)

を測定した。

表-2 石英砂、パーライト固体培地の三相分布、pF 水分および最小気相孔隙径

固体培地	粒径 (mm)	区	三 相 分 布			pF	最小孔隙径
			固相 %	液相 %	気相 %		
石英砂	0.28~0.18	A (A')	66.2	17.7	26.6	2.0	30 <sup>μ</sup>
	0.10~0.07	B (B')	62.3	17.7	30.5	7.2	2.0
パーライト	1.0~0.5	C	21.1	17.3	61.6	2.0	30
	0.25~0.10	D	18.6	17.3	60.8	2.0	30

\* A', B' 区は、それぞれ A, B の 1/5 の微生物養分を添加した。

ビン当たりの添加微生物養分量：

A, B, C, D 区： グルコース 0.935 g, ペプトン 0.194 g, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.058 g, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.0025 mg, MnCl<sub>2</sub> 4 H<sub>2</sub>O 0.0025 mg, CuSO<sub>4</sub>·7 H<sub>2</sub>O 0.001 mg, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.0025 mg

A', B' 区： いずれも上記添加量の 1/5

**2 結果と考察**

**a 糸状菌 (*Penicillium* sp.)**

図-5に示すように菌糸の生育は石英砂固体培地の上半部と下半部で様相をことにした。下半部では気相率の大きいA区では初期から旺盛な生育がみられたが、B区では初期5日間はほとんど生育せず以後急速に回復しついにA区とほぼ同菌糸密度に達した。一方、上半部では下半部にくらべA区の菌糸生育が明らかに劣った反面、B区では逆に促進され、A区の生育を上回った。この結果は固体培地全体について調べた菌数と呼吸作用にも反映され、A, B両区で大差ないばかりか呼吸作用は

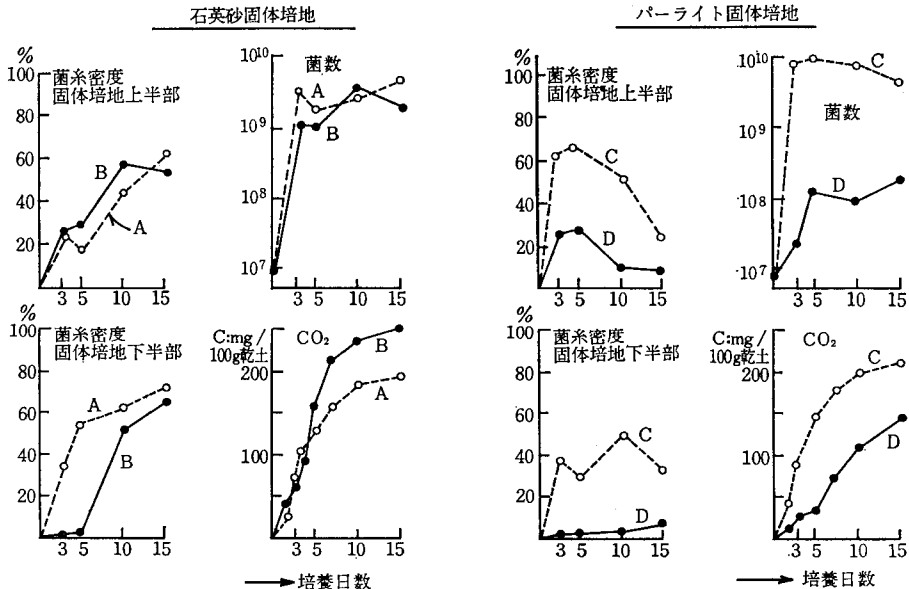


図-5 *Penicillium* 菌の生育と CO<sub>2</sub> 発生におよぼす固体培地構造の影響、三相分布の影響

B区がA区より高い値を示した。

これに対してパーライト固体培地では菌糸の生育は一般に上半部が下半部より旺盛だったが、両部とも気相率の大きいC区がD区より旺盛な生育を示し、平板法の菌数、炭酸ガス発生量にも同様の結果を得た。

両固体培地での結果は、土壌の場合と同様、糸状菌の菌糸が主に気相孔隙に生育するとしても、水分供給が極めて重要であることを示している。すなわち菌糸生育が気相孔隙量とよい対応を示したパーライト培地では粒子が多孔隙でかなり大きな気相孔隙中にも微細な飽水孔隙が多数露出しているため有効水分の供給が比較的円滑に行なわれたのに対し、非孔隙質の石英砂粒子の固体培地の場合、気相孔隙中での有効水分不足がA区の上半部にみられたような菌糸生育の阻害をもたらす原因と考えられる。

b 放線菌 (Streptomyces sp.)

図-6のように、石英砂培地では気相率の大きいA区の菌数がB区よりも著しく低いばかりか3日目以降急減した。この現象は微生物養分添加量を1/5にしたA'区では著しく回復し、A区の増殖阻害が液相の高浸透圧に原因したものと思われる。しかしながら、いずれにせよ菌の生育は液相率の大きいB、B'区がA、A'区を上回

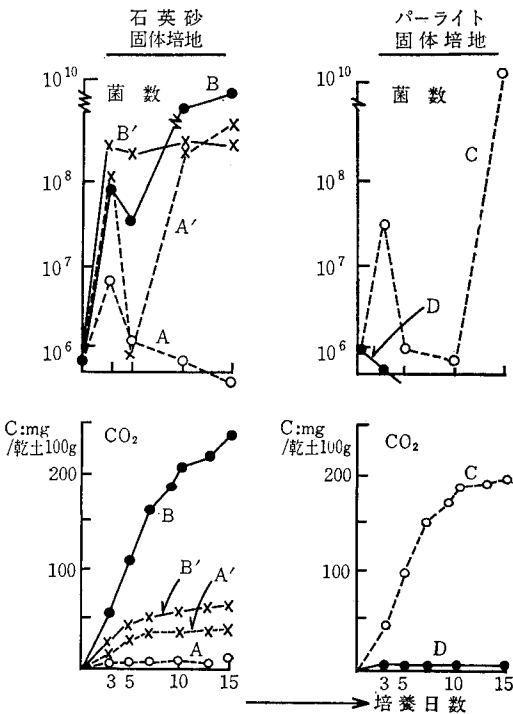


図-6 Streptomyces 菌の生育と CO<sub>2</sub> 発生におよぼす固体培地 3 相分布の影響

り、同様の傾向は呼吸作用にもみられた。一方、パーライト培地では気相率の大きいC区がD区より菌数、呼吸作用のいずれも高い値を示した。以上、石英砂、パーライト両固体培地での逆の結果、および武豊土壌での放線菌の生育を考え合すると、放線菌は糸状菌よりも水分に対する要求性が大きいものと考えられる。

c 細菌 (Bacillus sp.)

図-7によれば、石英砂培地では液相率の大きいB区が菌数、呼吸作用とも終始A区を上回る結果を得たが、パーライト培地では、液相率の小さいC区で初期から菌数増大がみられたのに対し液相率の大きいD区では放線菌と同様、初期から菌数は急激に減少した。接種菌のこの死滅現象の原因は明らかでない。

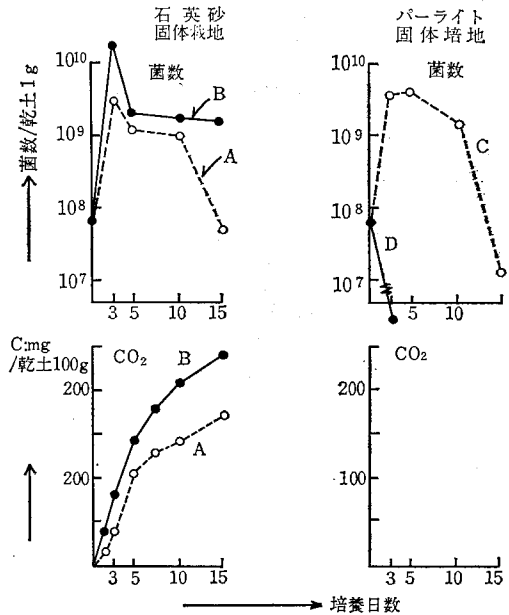


図-7 Bacillus 菌の生育と CO<sub>2</sub> 発生におよぼす固体培地 3 相分布の影響

要 約

土壌構造と微生物の生育との関係を解明するため充填密度のことなる土壌、および粒径のことなる石英砂、パーライト固体培地を用いて、孔隙の量、大きさおよび水分条件が細菌、放線菌、糸状菌の生育に与える影響を調べた。

A 厨川黒色火山灰土および武豊赤褐色土を用いた実験。

1) いずれの土壌でも細菌群(好気性細菌, グラム陰

性細菌、嫌気性細菌)の菌数(平板法)は土壤の液相率が大きい程、また放線菌と糸状菌の菌数(平板法)、菌糸密度(埋没スライド法)は気相率が大きい程、高い値を示した。この結果から細菌群が主に土壤の飽水孔隙中で生育するのに対し、放線菌と糸状菌はむしろ気相孔隙中で生育しているものと推察された。

2) 上記微生物の生育に適した孔隙の大きさを検討した結果、細菌群は飽水孔隙であればその大きさに関係なくほぼ一様に生育したのに対し、放線菌、糸状菌の生育に適した気相孔隙の大きさは土壤の種類によって違い、厨川土壤では前者が $6\mu$ 以上、後者が $24\mu$ 以上であるのに対し、武豊土壤では前者が $1.2\sim 15\mu$ 、後者が $3\sim 15\mu$ であると思われた。この差は気相孔隙中での酸素供給速度および蒸気圧に起因するものと考えられる。

3) 土壤の呼吸活性は厨川土壤では気相孔隙率が大きい程高く、放線菌と糸状菌の呼吸活性が細菌群のそれを上回ったが、細菌に富む武豊土壤ではむしろ液相孔隙率が大きい程高く、細菌による呼吸活性が放線菌、糸状菌のそれを上回った。

#### B 石英砂およびパーライト固体培地を用いた実験。

土壤での結果を細菌、放線菌および糸状菌のそれぞれについてさらに検討するため、それぞれの分離菌(Bacillus 菌, Streptomyces 菌および Peucillium) 菌の上記固体培地中での行動を調べた。

1) 糸状菌(Penicillium sp.)は石英砂、パーライトいずれの固体培地中에서도ほぼ気相孔隙中で菌糸生育するが、そのためには、同時に円滑な水分供給が必要である。

2) 放線菌(Streptomyces sp.)の生育には、糸状菌の場合よりもさらに豊富な水分が必要と考えられ、酸素と水分が保障されれば、気相、飽水いずれの孔隙にも旺盛な生育を示すものと推察される。

3) 細菌(Bacillus sp.)の生育は石英砂培地とパーライト培地で著しくちがいが、前者では飽水孔隙の増大とともに促進されたが、後者ではこの傾向はみられなかった。パーライト培地高水分区(液相60.8%)での細菌の増殖阻害の原因は明らかでない。

#### 文 献

- 1) Winogradsky, M. S.: Soil Microbiology. Methods of soil microbiology part 6. Izd AN SSSR (1952)
- 2) Cholodny N.: Arch. Mikrobiol. 1, 620 (1930)
- 3) Jones, P. T. C. and Mollison, J. E.: J. Gen. Microbiol. 2, 54 (1948)
- 4) Alexander, F. E. S. and Jackson, R. M.: Nature, Lond., 174, 750 (1954)
- 5) Zvyagintsev, D. G.: Pochvovedeniye. 18 (1962)
- 6) Kubiena, W. and Renn, C. E.: Zbl. Bakt. II, 91, 267 (1935)
- 7) Krasilnikov, N. A.: Soil Microorganisms and Higher plants, Acad. Sci. USSR. Moscow. (1958)
- 8) Tyagnii-Ryadno: Soviet Soil Sci 1378 (1958)
- 9) 服部勉: 東北大農研報告, 18, 159 (1967)
- 10) 石沢修一, 鈴木達彦, 甲田知則, 佐藤修: 農技研報告, B 8, 1 (1958)
- 11) 美園繁, 木下彰, 須藤清次, 寺沢四郎: 農技研報告 B 2, 125—145
- 12) Seifert, J.: Folia Microbiol. Praha. 6, 268 (1960)
- 13) Griffin, D. M. and Nair, N. G.: J. Exper. Bot. 19, 812 (1968)
- 14) Griffin, D. M.: Biol. Rev., 38, 141 (1963)



## 土とくに砂質の土の保水の構造

中 野 政 詩\*

### はじめに

pF 8 程度の水は土粒子の表面に単分子層で吸着されている。pF 5.2~4.2 程度の水は数分子層で同じく土粒子表面に吸着されている。この程度までの水は物理吸着の水といわれるもので、土粒子と水分子、水分子と水分子など分子間力によって土に保持されている。これより小さい pF 値を示す水は土粒子のつくる間隙をうめている。それは毛管力によって保持されている<sup>1)</sup>。ところで、前者の水は土の比表面を知れば単位体積の土について容易に量で表わされる<sup>2)</sup>。土の比表面は土を特徴づける基本的指標の一つであると考えてやれば、この程度のところで低水分の際の土の保水の構造がわかったといっても差支えはあるまい。ところが、後者の水を対象とする際には、いまのところ、これと同じ調子にはゆかない。間隙をうめている水の量を算出するために使いうる土を特徴づける基本的指標が確立されていないからである。筆者は間隙の確率密度関数がこの基本的指標に当たると考えている<sup>3)</sup>。この報告は、この間隙の確率密度関数を明らかにし、この水の量の計算の手法を述べるものである。後者の水を対象とする際、この全体をもてば、土の保水の構造が説明されたことになりはしないだろうか。

### 1 連続する間隙の離散的な捉え方

間隙は、土粒子でいわれるように1つ1つなど個々離散的に存在するものであるかのような印象を与える言葉で述べられるには不適當なものである。だいたい、土のどこへにも連続して連結していくものであろう。このような間隙に確率密度関数を指定するには、まず間隙を片端しから千切って、丸めるなり角を作るなり整えて、1つ1つと数えられるようなものに作り変える必要がある。従来のパイプとかセルとかの間隙の表示はこういう操作に従ったものといってよい。パイプやセルを云々するとき、土のもう1つの成分の固相はどう扱っているのだろう。土の粒子を考えて生まれたセルを除いては、それについてはあまり聞かない。

土に間隙があると知るときは当然土に固相があると承知のはずである。そこで、片方だけでなく、間隙と固相共に理解出来るようなやり方で、ここでは間隙をみてみたい。それには、土を微小な要素に千切ることを考えてやればよい。その微小要素の1つ1つが間隙を所有するというイメージにその結果はなるだろう。これでも、必然的に間隙は千切られているから、ここに間隙の確率密度関数の指定は可能である。こうすれば、間隙の確率密度関数を考えることは固相のそれを考えることに通じよう。前者を指定したことは後者を指定したことになる。間隙の性格を明らかにすれば、それは土の構造を明らかにしたことになる。土の構造の指標の1つに“土の三相”がある。この指標をセミミクロの次元で使ってみようというこれは提案といつてよい。

### 2 土の微小要素中の間隙とそこでの水

従来のパイプとかセルとかは千切った間隙を整えたものと前に言った。土の微小要素で、土の三相を考えて、今後間隙を扱ってゆくとき、この整え方は、土の間隙が水がうめてそこに水が保たれる機構に関与する因子が微小要素に与えられてさえいけばよいという立場で次のようになる。すなわち、間隙は水をその全てにうめる、その一部にうめる、全くうめない、この三種の状態のいずれかの状態をとると考えてみる。どの状態をとるかは、微小要素が特徴的にもつであらう最大の間隙径と最小の間隙径とによってきめられると考えてみる。中間の大きさの間隙径は最大の間隙径と最小の間隙径とを関係づける1つの関係式できめてみる。微小要素中の間隙量は間隙径を径とする微小厚さの円板の和で与えてみる。間隙中にある水の量はその水が占める間隙の間隙径を径とする微小厚さの円板の和で与えてみる。ここまでのような間隙の整え方は、従来のものにくらべて大同小異といふべきものである。

ところで、従来拡がったり縮まったりしながら連続して連結する間隙を千切るとき、その切断場所は拡がった所だろうか縮まった所なのだろうか。パイプに整える試みの場合、パイプが透水の研究との関連でイメージされ

\* 東京大学農学部

たことを想い起こせば、それは縮まった所であろう。セルの場合、球粒子によってそれが生まれるとすれば、さしづめ縮まった所であろう。あってもよかったであろうに、広がった所で千切った間隙というイメージは従来あまり使われていない。間隙の広がりや縮まり、これは保水にたいして何か重要な役割を果しているにちがいない。微小要素の間隙にこの側面をとり入れてみる。微小要素の最大間隙と最小間隙、このいずれが間隙を水でうめる際に専行する支配権をもつのか。これは5分5分であるとしよう。そうすると、間隙の量ではまったく等しい大きさをもつが、水にたいする専行する支配権が最大間隙にある微小要素と最小間隙にある微小要素が必ず対にな

って土には存在すると考えるのが適当である。前者を X 型の間隙、後者を O 型の間隙と名付ける。こうすると、間隙と水とのかかわりあいを前よりもつめて次のように指定してみることが出来る。脱水過程では、X 型の間隙は確かに前に述べた三つの状態のどれをもとりうる。しかし、O 型の間隙はその全てに水をうめるか全くうめないかどちらかの状態のみとりうる。吸水過程の場合には、X 型と O 型とにおける事情がまったく逆転する。この考え方は、太い細いが滑らかにつながるパイプの毛管降下および上昇の現象から類推して一部は理解されようが、まったくの仮設としてしか理解されにくい部分も含むようである。こうして整えた間隙は図で示せば Fig. 1, 2 のようなものになる。

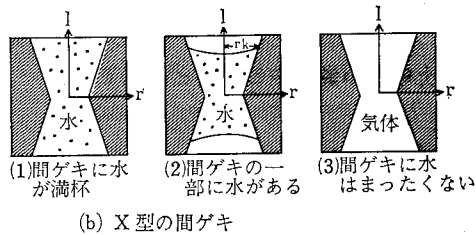
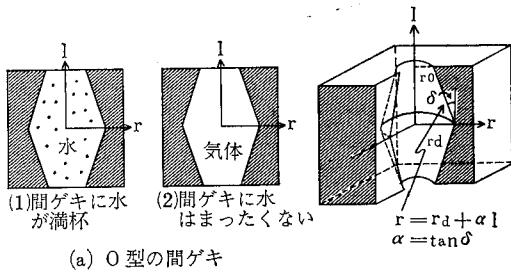


Fig. 1 脱水過程の間隙中の水の状態

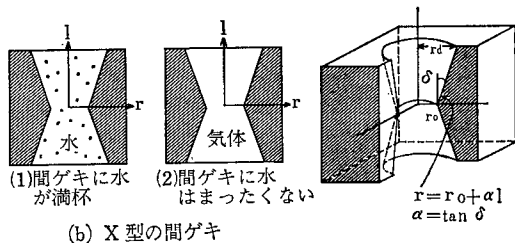
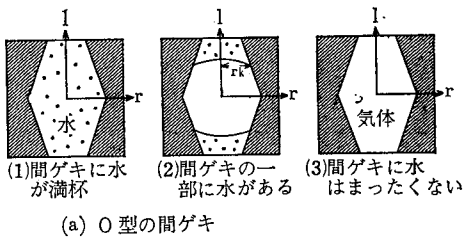


Fig. 2 吸水過程の間隙中の水の状態

### 3 微小要素の誕生と間隙の確率密度関数

千切り方に話をうつそう。間隙をパイプに千切る場合、これはラプラス式 ( $h=0.15/r$ ,  $h$  はサクション,  $r$  はパイプ半径) による。セルの場合、それはネックでおこなう。前者では間隙が水をもつ作用を利用し、後者では土粒子の空間での配置が描き出す図形を利用する。いずれにしても道具を使う因果的な千切り方である。土を千切るための道具はなにか。なにもない。単位の土を同じ大きさで  $N$  個に千切ったとしよう。  $V_1$  という間隙量をもつ微小要素が  $N_1$  個、  $V_2$  という間隙量をもつ微小要素が  $N_2$  個、以下同順に  $V_n, N_n$  になるだろうと想定出来る。水分量でも間隙量でも、測定値は単位の土で得られるものが実際に意味があって、微小要素で得られるものにはそれほど意味は置けない。微小要素で得られるものは  $N$  個について加え合わされてはじめて意味をもつ。この考えは、任意の間隙量  $V_i$  をもつ微小要素が占める位置をあえて因果的に問うことは不要であって、  $N$  個の微小要素の種別の数さえわかればよいことを示してくれる。他方、測定値を得るに使った単位の土は、たまたまそのために、より大きい土から千切り取られたものと考えることが出来る。

さて、  $N$  個の微小要素で  $V_1$  を  $N_1$  に、  $V_2$  を  $N_2$  に、以下同順に  $V_n$  を  $N_n$  に置く置き方の数  $W$  は

$$W = \frac{N!}{N_1! \cdot N_2! \cdot \dots \cdot N_n!} \quad (1)$$

で与えられることをまず知ろう。そのうえで、間隙量と同じくし、含む微小要素の個数を同じくすると考えられる単位の土を集めてみよう。この集まりでは、例えば、  $V_i$  をもつ微小要素が占める場所はちがうが、  $N_1, N_2, \dots, N_n$  の数をまったく同じくするものがいくつか出来ていると想定出来る。前にのべた考え方にのると、このい

くつかの単位の土は、間隙量や水分量を考える限りでは、同価値のものと考えることが出来る。1つの単位の土を  $V_1$  を  $N_1$  に、 $V_2$  を  $N_2$  に、以下同順で  $V_n$  を  $N_n$  に配置する1つの配置の仕方に対応させてみれば、 $W$  を最大にする  $(N_1, N_2, \dots, N_n)$  が測定値を得るために使った土における微小要素の内訳になるだろう。無数の単位の土のうちの  $(N_1, N_2, \dots, N_n)$  を同じくする最も数多いものの中から、測定値を得るための単位の土がとり出されていると考えられるからである。土を千切るための道具は見当らないが、土を千切るためのこのような確率的な考え方はありうるのではないだろうか。

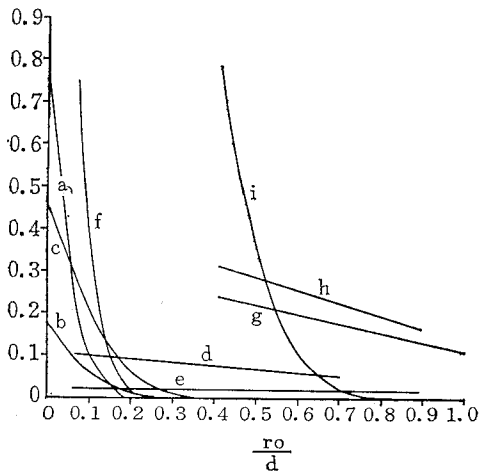
対数をとって、未定乗数法を使って、 $W$  を最大にする  $(N_1, N_2, \dots, N_n)$  は計算出来る。この結果は  $V_i$  を確率変数とする確率密度関数を与える。前に、間隙量はある種の整え方を施してもち込んだ間隙径で表わそうではないかと述べた。これに従えば、この確率密度関数は間隙半径を確率変数とするものにかきかえることが出来る。すなわち、

$$f = A \cdot \exp \left\{ -K \left( \frac{r_0}{d} + \frac{\alpha}{2} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 $f$ : 相対度数、 $r_0$ : 最小の間隙半径、 $d$ : 微小要素のサイズ、 $\alpha$ : 土に固有の定数。ただし、

$$K = 2\pi\beta d^3 \quad (3)$$

$$A = A(k, \alpha, \nu) \quad (4)$$



(a)	$K = 50.0$	$\nu = 1 \times 10^{-4}$	$\alpha = 0.3$
(b)	$K = 50.0$	$\nu = 1 \times 10^{-4}$	$\alpha = 0.1$
(c)	$K = 20.0$	$\nu = 1 \times 10^{-4}$	$\alpha = 0.3$
(d)	$K = 1.0$	$\nu = 0.06$	$\alpha = 0.3$
(e)	$K = 1.0$	$\nu = 0.06$	$\alpha = 0.1$
(f)	$K = 50.0$	$\nu = 0.06$	$\alpha = 0.3$
(g)	$K = 1.0$	$\nu = 0.4$	$\alpha = 0.01$
(h)	$K = 1.0$	$\nu = 0.4$	$\alpha = 0.1$
(i)	$K = 10.0$	$\nu = 0.4$	$\alpha = 0.1$

Fig. 3 確率密度関数  $f$

ここで、 $\beta$  と  $\nu$  はそれぞれ土に固有の定数。Fig. 3 に  $f$  を図示してみる。

#### 4 毛管力と水分量

間隙をうめる水は毛管力で保持されている。微小要素の間隙は間隙径であらわす。すでにここまで考えをまとめてきた。つぎにやることは、毛管力と間隙をうめている水との関係をつけることである。まず、毛管力と水-空気界面を張るところの間隙径との関係を、ラプラスの式にもとづいて次のように書く。

$$\frac{h_0}{h} = C \cdot \frac{r_k}{d} \quad (5)$$

ここで、 $h$ : サクション、 $h_0$ : サクションの最小値、 $r_k$ : 水-空気界面がある間隙半径、 $C$ : 間隙への水の出入りの際の接触角の差異を補正する係数。

水-空気界面が  $r_k$  という間隙径のところら形成されたときの単位の土——すなわち、 $N$  個の微小要素が集まったもの——に含まれる水の量が  $r_k/d$  の関数で書ければ、 $r_k/d$  がなかだちして、毛管力と水量との関係が知れる。この水量の算出は、水にたいする間隙の状態をすべての間隙について1つ1つきめてやった上で、水をもつ間隙についてその水について加算しさえすればよい。

保水に関する間隙の状態は、すでに3つないし2つを指定した。実は、それは可能性として指定していたにすぎない。実際に水の減少ないし増加にもなるとなると間隙がそのような保水の状態をどのように移り転じて経験するかは、個々の間隙における最大と最小の径を関係づける一次式の勾配の大きさがきめる。Fig. 1, 2 に図示されている  $\alpha$  がきめるのである。脱水過程でみてみよう。 $\alpha$  が大きい ( $\alpha \approx 1$ ) と、X 型の大部分の間隙はほとんどいつも部分的に水をうめ、O 型のほとんどの間隙はほとんどいつも水で満杯の状態になる。すなわち、このとき空(から)の間隙はさがしにくい。 $\alpha$  が極度に小さい ( $\alpha \approx 0$ ) と、X 型の間隙が部分的に水をもつことは瞬時的になる。すなわち、すべての間隙は水で満杯か空(から)かどちらかをとることになる。間隙を X 型、O 型に区別することの必要性が失われる。吸水過程の場合には、 $\alpha \approx 1$  のとき O 型の間隙の部分的保水が恒常的、X 型の間隙の空(から)状態が恒常的というように変わる。すなわち、満杯の間隙はみつげにくい。 $\alpha \approx 0$  のとき、O 型の間隙の部分的保水が瞬時的となる。

筆者はここでまったくの仮想をした。粘土、泥炭等特殊な土でなく普通の砂質の土をまず対象としてみよう。こうした土では、いま述べたような“ほとんどいつも”とか“これかあれか”という極端さを意味する形容詞を

必要とするような状態変遷はとらないであろう。同程度の重みをもってとりうる状態を経験するにちがいない。どの状態の発現も等確率であることが砂質の土で支配的ではあるまいか。発現確率がかたよることは特殊な土で支配的なのではないかと考えてみる。この考えのもとでは、 $\alpha$ に $0 < \alpha < 1/2$ の制限をつければよい。このとき、間隙の水にたいする状態はどうか。

脱水過程では、X型の間隙の場合、 $1 - \alpha < r_k/d \leq 1$ のとき最大間隙半径 $< r_k$ の間隙は水を満杯、その他の間隙は部分的保水である。 $\nu + \alpha < r_k/d \leq 1 - \alpha$ のとき最大間隙半径 $< r_k$ の間隙は満杯、 $r_k < \text{最大間隙半径} < r_k/d + \alpha$ の間隙は部分的保水、その他の間隙は空(から)である。 $\nu < r_k/d \leq \nu + \alpha$ のとき最大間隙半径 $< r_k/d + \alpha$ の間隙が部分的保水、その他の間隙は空(から)である。O型の間隙の場合、 $\nu < r_k/d \leq 1 - \alpha$ のとき最小間隙半径 $< r_k$ の間隙は水を満杯、その他の間隙は空(から)である。吸水過程では、X型の間隙の場合、 $\nu < r_k/d \leq 1$ のとき最大間隙半径 $< r_k/d$ の間隙は水で満杯、その他の間隙は空(から)である。O型の間隙の場合、 $1 - \alpha < r_k/d \leq 1$ のとき最小間隙半径 $< r_k/d - \alpha$ の間隙は水で満杯、その他の間隙は部分的保水である。 $\nu + \alpha < r_k/d \leq 1 - \alpha$ のとき最小間隙半径 $< r_k/d - \alpha$ の間隙は水で満杯、 $r_k/d - \alpha < \text{最小間隙半径} < r_k/d$ の間隙は部分的保水、その他の間隙は空(から)である。 $\nu < r_k/d \leq \nu + \alpha$ のとき、最小間隙半径 $< r_k/d$ の間隙は部分的保水、その他の間隙は空(から)である。

間隙中の水量  $w$  は、満杯の場合、

$$w = 2\pi d^3 \left( \frac{r_0}{d} + \frac{\alpha}{2} \right)^2 + \frac{\pi}{6\alpha} (ad)^3$$

または

$$= 2\pi d^3 \left( \frac{r_d}{d} - \frac{\alpha}{2} \right)^2 + \frac{\pi}{6\alpha} (ad)^3 \quad (6)$$

部分的保水の場合、

$$w = \frac{2\pi d^3}{3\alpha} \left\{ \left( \frac{r_k}{d} \right)^3 - \left( \frac{r_0}{d} \right)^3 \right\}$$

または

$$= \frac{2\pi d^3}{3\alpha} \left\{ \left( \frac{r_k}{d} \right)^3 - \left( \frac{r_d}{d} - \alpha \right)^3 \right\} \quad (7)$$

さて、単位の土——微小要素の  $N$  個の集まり——の間隙中の水量は、 $r_k/d$ の区分帯毎にこの水量と間隙の確率密度関数とを用いてそこでの総水量を算出し、 $r_k/d$ の大きさに従ってそれを順次加算してゆけば求められる。この結果は  $r_k/d$ の関数となる。 $K, \nu, \alpha$ をパラメータとする。 $r_k/d$ に区分帯があるために、それは3つに区分されて求められる。 $\nu \leq r_k/d < \nu + \alpha, \nu + \alpha \leq r_k/d \leq 1 - \alpha, 1 - \alpha \leq r_k/d < 1$ の区分である。この区分は脱水過程、吸水過程の区別は問わず、共通なものになる。

最終的には、この結末は水分量が飽和度様式であらわされて終る。いうまでもなく、間隙中の水のあり方の違いによって、脱水過程の「飽和度」と  $r_k/d$ の関数関係と吸水過程のそれとは違ったものとなる。

$r_k/d$ の関数としての間隙充填水の「飽和度」をあらわす式は、大変長大になる。式の記載はここでは省略し、Fig. 4にそれを図示して式の記載に替えたい。

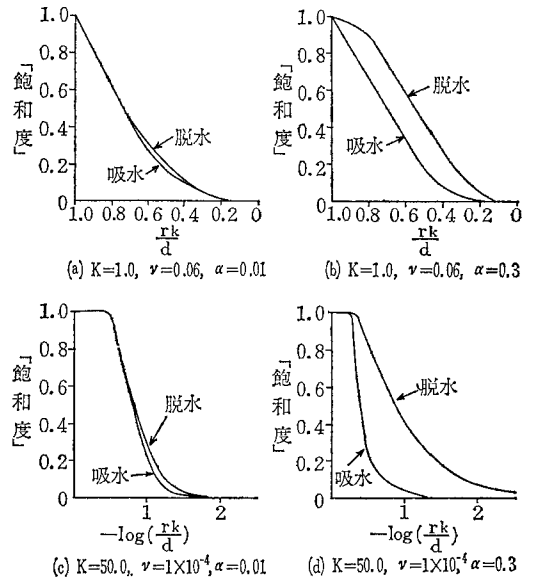


Fig. 4 「飽和度」曲線の例

ここで飽和度に「」印をつけたのは、普通に飽和度というときのものと違い、それは間隙をうる全水量にたいする水量の比をさすものであるからである。

### 5 間隙の形による水分ヒステリシス<sup>4)</sup>

これまで、脱水過程と吸水過程とを対比して水分量の計算の仕方を考えてきた。特にヒステリシスという問題の立て方では話題をすすめてはきていない。実は、これまでの話の中には間隙の形による水分ヒステリシスが、その一面ではあるが、巧妙に考慮されていたのである。

間隙の形による水分ヒステリシスは、1つには、間隙の拡大縮小のため脱水過程では水の貯留場所となっていた間隙の一部が吸水過程では同じ大きさの毛管力のもとではもはやそうはならない、より小さい毛管力のもとで水の貯留場所となるために生ずる。2つには、“脱水過程”では水の貯留場所であった間隙の一部が吸水過程では絶対的にそうはならないために生ずる、と考えられている。前に述べた脱水過程と吸水過程とにおける間隙の水に関してとりうる状態の差異は、この第一の事項を

とり込んでいるのである。例えば次のように前述の一部を言い換えればそれでこのことが理解されよう。X型の間隙の場合、脱水過程では水が在る間隙は最大間隙半径が $r_k$ より小さいものと $r_k$ より大きくても最小間隙半径が $r_k$ より小さいものであるのに、吸水過程ではそれは最大間隙半径が $r_k$ より小さいものだけになる。O型の間隙では、脱水過程ではそれは最小間隙半径が $r_k$ より小さいもので満杯だったのに、吸水過程ではその間隙の一部すなわち最大間隙半径が $r_k$ より大きいものが満杯でなく部分的保水に変る。すなわち、X型の間隙、O型の間隙双方共に、吸水過程では脱水過程に比してその保水量がすくなくなるように考えていたのである。

第2の事項は、区分帯毎の総水量を計算する際に、その区分帯に属する間隙の数の配慮にあたって使われたものである。いま、いろいろの大きさの間隙が集ってN個ある。吸水過程の場合どの大きさの間隙がそれぞれどの位の数で水の貯留場所に使われなくなるのだろうか。次のような研究が最上によって報告されている。 $V_1$ という大きさの粒が $N_1$ 個、 $V_2$ という大きさの粒が $N_2$ 個、以下同順に $V_n$ という大きさの粒が $N_n$ 個からなるN個の粒の集りからM個をとり出すとき、M個の内訳が、 $V_1$ という大きさの粒が $C \cdot N_1$ 個、 $V_2$ という大きさの粒が $C \cdot N_2$ 個、以下同順に $V_n$ という大きさの粒が $C \cdot N_n$ 個となるのが確率的に最も起こりやすい。ここで、 $C=M/N$ である<sup>5)</sup>。

これにならえば、吸水過程で水の貯留場所に使われなくなる間隙の内訳はどの大きさの間隙でも一定の比率で生じているとして差支えなかろう。こう考えると、確率密度関数は“脱水過程”と吸水過程とでは共通のものとなる。結局、水の貯留場所に使われる間隙の総数がNからMに減ることだけが、第2の事項による“脱水過程”と吸水過程とでの差異としてみられることになる。しかし、保水量を求めたとき、保水量を絶対量ではなく飽和度様式であらわしてしまうと、このNとMという個数の因子はここでは消えてなくなり、この差異はなんの役割も果さない。

ところで、いままでずっと脱水過程という4文字は黙ってそのまま使用してきた。ところがここで“ ”印を附した“脱水過程”を突如使用した。脱水過程には、まったく脱気して水で飽和された状態から脱水される過程、1度間隙をうめる水がまったく脱水されてその後の吸水操作によってつくられた気相を若干含む疑似飽和の状態から脱水される過程、更に吸水操作がその途中で打切られてその水分状態から脱水される無数の過程等種々のものがある。この研究ははじめの2つをその対象としている。いままで無印で脱水過程と称したときにはこの

2つのもので共通した事項について述べていたときだったのである。ところが、NとMの問題に関してはこの2つの脱水の過程では事情がちがっている。すなわち、まったくの飽和のとき、間隙の総数と水をもつ間隙の総数とは等しい。それで、まったくの飽和からの脱水の場合はNが採用される。疑似飽和のとき、吸水の前歴のため水をもつ間隙の総数はMとなる“ ”印つき“脱水過程”は前者の脱水の過程を指していたのである。以後、この2つを分ける必要がある場合、前者を脱水過程(I)、後者を脱水過程(II)ということにしよう。念のためつけ加えるなら、脱水過程(I)と脱水過程(II)とでは、確率密度関数は共通のものでよい。NとMの因子は飽和度様式であらわした保水量の式では消えてしまうので、両過程の保水量の式は同等のものとなる。くどいようだが、確率密度関数の対象となった間隙について念のためまとめをしておく。

はじめに、間隙の確率密度関数を求めた。そのときの間隙は容易に土の外に排出しうる水がうめうる間隙のすべてのものを考えていた。脱水過程(I)ではこの間隙の確率密度関数をそのまま用いた。脱水過程(II)および吸水過程では、この間隙のうちの疑似飽和に貢献する間隙を考えて、その間隙の確率密度関数を導いた。導びいた結果は、はじめに求めたものと式の上でたまたま同等であったにすぎない。

## 6 毛管力による水分ヒステリシス

水分ヒステリシス発生の第3の原因は、水の固相に対する接触角に求められている。接触角の変化を配慮することから言えば、ひとつには水分変化の過程を同じくする場合の水分量の違いによる接触角の違いを配慮すべきであろうし、ふたつには水分変化の過程を異にする場合のそれぞれの過程のあいだでの接触角の違いを配慮すべきである。主に、水分ヒステリシスに関係するものは後者に関するものである。しかしながら、話は前者に関するものから始めよう。それは、前者に関するものもこの報告の中では考慮のうちにあるからである。蒸発による水分減少、降雨による水分増加等を頭に浮べてみると、この場合水分の増減に伴う溶質の濃度変化が考えられてそれぞれの過程の経過の中で接触角の違いを配慮する必要が生じよう。土柱法、吸引板法、遠心法のように溶質も水と共に排出されてしまうような水分減少過程を念頭に置けば、この配慮は不要であろう。吸引板法による水分増加を念頭に置くときはどうだろうか。供給水に溶質を含む水を使わず蒸留水を使つたとすれば、これは配慮せざるをえまい。筆者は、とりあえず、吸引板法、土柱

法、遠心法による水分減少過程を、そして蒸留水を供給水に用いる吸引法による水分増加過程を念頭においてみた。それで、この報告では、脱水過程の場合は接触角の変化は無視することにし、吸水過程の場合にはそれを尊重することにした。

ところで、後者のような脱水過程と吸水過程とは接触角に違いがあることは従来からも明らかに称されてきたことである。ここでも、これは素直に認めるものである。水分変化の過程を異にする場合の接触角とヒステリシス発生機構とのつながりをいままでの話の中で理解するには、脱水過程で  $r_k$  の間隙半径のところに水一空

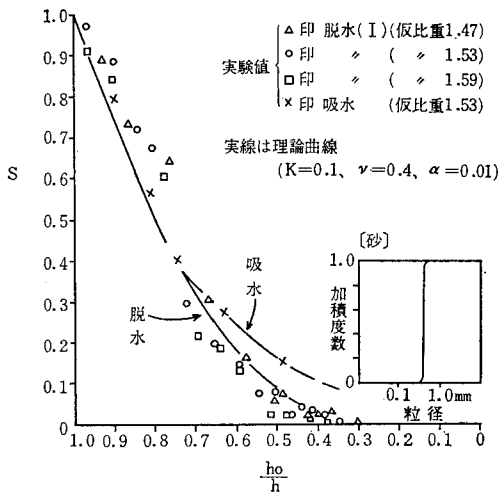


Fig. 5  $S - \frac{h_o}{h}$  曲線 (その 1)

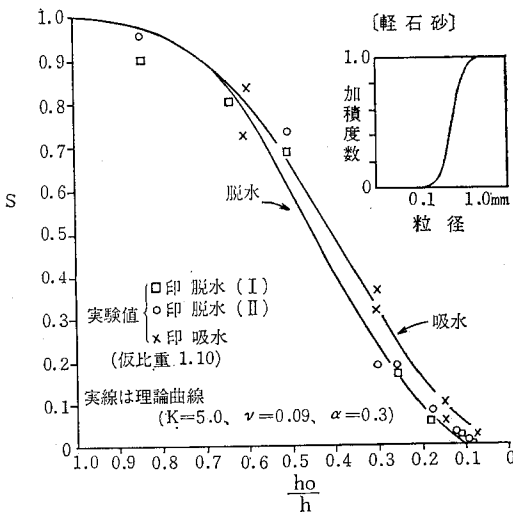


Fig. 6  $S - \frac{h_o}{h}$  曲線 (その 2)

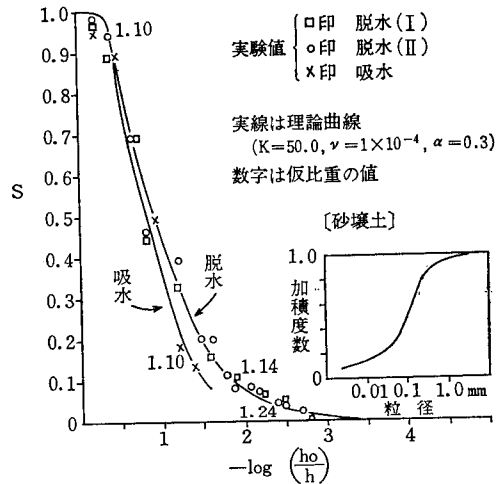


Fig. 7  $S - \frac{h_o}{h}$  曲線 (その 3)

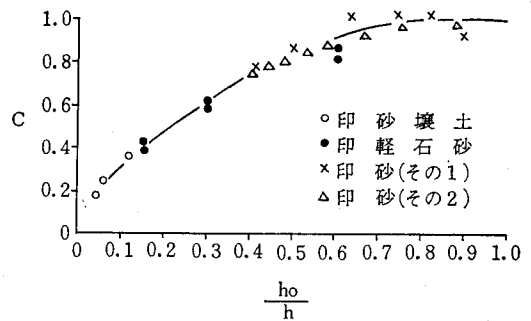


Fig. 8  $C - \frac{h_o}{h}$  曲線

気界面が張られている場合と吸水過程で同じく  $r_k$  の間隙半径のところに水一空気界面がはられている場合とをくらべてみればよい。両過程で接触角が違うとすると、両過程の毛管力の大きさは違うことになる。それで、水分ヒステリシスが発生すると理解することが出来る。

いままで述べてきたことは、(5)式中の  $C$  でとらえられる。脱水過程では  $C=1$ 、吸水過程では  $C=C(h_o/h)$  と考えてやればよい。すなわち、 $C=C_o/C$ 、ここで  $C_o$  は  $h=h_o$  のときの  $C$ 、 $C$  は 1 過程中の接触角の違いを補正する係数で  $C=C(h)$ 、と考えることにしたからにはほかならない。

毛管力によるヒステリシスに関しては、実は、もう 1 つ考えてやらねばならないことがある。それは、水の表面張力の大きさの溶質を含むことによる補正である。ここでは、吸水の場合の水分増加の際に、接触角の違いを考察したときの理由とまったく同じ理由で、これを考慮する必要がありそうである。しかしながら、それは、溶

質による水の表面張力の大きさの変化が普通の土壌溶液中の溶質でみる限り無視しても差支えないぐらい小さいということで、ここでは無視することにしておこう。

毛管力～水分量曲線の理論値と実験値との対置を Fig. 5, 6, 7 に示す。実験的に求めた  $C \sim h_0/h$  曲線を Fig. 8 に示す。

## 7 体積変化による水分ヒステリシス

更に、脱水過程での土の体積減少が吸水過程で元に復さないための水分ヒステリシスがあるろう。

脱水, 吸水それぞれに独自の過程をたどる間で, 収縮膨張による土の体積変化が生じ, 水分量と毛管力がそれがない場合に比べて異なるであろう数値を示すことがある。ここでのヒステリシスは, この事実の内容を極めて知ることによって理解することが出来る。脱水過程で体積収縮が生じた場合を考えてみよう。体積収縮によって, 微小要素の大きさがすべてについて均一に小さくなったと考えてみよう。単位の土を構成する微小要素の数は  $N$  から  $L$  に増えたことになる。どの大きさの間隙をもつ微小要素がいくつ増えているのだろうか。前に述べた最上の理論にもとづいて, やはり同じ比率ですべてのものが増加していると考えるのがもっともらしい。さて間隙の図形的表現では収縮前後に相似の変化を考えてみる。相似比を  $\xi$  であらわす。そうすると, 間隙量は収縮後はもとの  $\xi^3$  倍となる。 $r_0/d$ ,  $r_a/d$ ,  $r_k/d$  等は, それを構成する  $r_0$ ,  $r_a$ ,  $r_k$ ,  $d$  等はもとの  $\xi$  倍であるが, これは変わらない。 $\beta$  は, ここでは説明を省略したところでそう結論づけられるのだが, 間隙量との関連でもとの  $1/\xi^3$  倍である。 $K$  は,  $\beta$  との関連でもとの値と変わらない。 $\alpha$  や  $\nu$  は, それぞれ次元のない数であるためにもとの値と変わらない。1 個の間隙中にある水の量はもとの  $\xi^3$  倍となる。こういうことがわかってみると, 収縮後の間隙の確率密度関数は収縮前のそれと同等になる。 $r_k/d$  の関数としての飽和度様式であらわした保水量の式は,  $N$  と  $L$  との違いが前に述べたとまったく同じ事由で消えてしまい, 収縮前のそれと同等な式であらわせることになる。このことは Fig. 5 で実験的にもうなずけるものである。これから類推して, 吸水過程の膨張の過程でも, 膨張後であっても, 水をうめる間隙の確率密度関数は膨張前のそれと同等な式となろうし,  $r_k/d$  の関数としての飽和度表示の保水量の式は膨張前のそれと同等な式となろうことが考えられよう。

さて, 話を元に戻して, 過程を異にする際のヒステリシスを総合的に明らかにしよう。脱水過程での体積減少が吸水過程で完全には元に復さないということの実験事

実にもとづく正確な理解は, 脱水過程で毛管力が大きくなるにしたがって体積減少が少しずつ発生し最終的にそれが積み重なってみられる。吸水過程に転じて膨張の体積増加が少しずつ発生し最終的にそれが積み重なってみられる。同じ毛管力の値のところで乾燥密度が異なる。もちろん脱水過程のそれが吸水過程のそれより小さい。こういうものである。

$r_k/d$  の関数としての保水量はそれぞれの過程で体積変化によって左右されない, それはそれぞれの過程に 1 つしかないことがいまわかった。

ところで, 飽和度表示の保水量と称してきたものは,

$$S = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \quad (8)$$

であらわされるものである。いままでの話から,  $\theta$  は任意の水分状態のときの体積含水率,  $\theta_0$  は間隙充填水を除いてしまったときの体積含水率である。 $\theta_s$  には, 脱水過程 (I) ではまったく空気のないときの飽和体積含水率をあてればよく, 脱水過程 (II) と吸水過程では疑似飽和体積含水率をあてればよい。

体積変化が生じたとき,  $\theta_s$  の値はその前後で異なるだろう。水分—毛管力曲線上で,  $\theta_s$  の値をとることをやめる脱水過程の毛管力  $h_0$ , はじめて  $\theta_s$  の値をとる吸水過程の毛管力  $h_0$  の値等もその前後で変るだろう。 $\theta_s$  は述べてきたところからいえば間隙の大きさと数でできる。同じく  $h_0$  は間隙の最大のものできまる。かくして, このヒステリシスは, 間隙の形, 確率密度関数や保水の形態等の変化によりみられるのではなく, 間隙の大きさと数の変化によりみられるものと考えてよいのである。

ふり返って, 脱水過程 (I) と脱水過程 (II) との間にみられるヒステリシスを思い直してみよう。脱水過程 (I) と脱水過程 (II) との間ヒステリシスの発生事由が, 丁度この体積変化による発生事由と似たものであることに思い当たる。違うところは当然ある。それは間隙の大きさに関しての理解である。体積変化によるもの場合は間隙の大きさの変化がその事由の一つになっているのに脱水の過程の違いの場合のヒステリシスではそれは発生の事由にはしない。それは, 脱水過程 (I) と脱水過程 (II) とでは水分—毛管力曲線上にみられる  $h_0$  の値が違いはないということがその際の背景に考えられているからである。

水分—毛管力曲線に直接かかわる話はこれで止める。それにあたって一言つけ加えるなら,  $S \sim r_k/d$  曲線を通常の水分—毛管力曲線に移すには  $S$  を (8) 式にもとづき,  $h$  は (5) 式にもとづいてそれぞれ体積含水率, サクションに移してやればよいのである。

## 8 土を特徴づける因子

土を特徴づける因子として従来いわれていたものはもちろんここで使用している。それは、ほとんど空気を含まないような飽和のときの体積含水率、吸水過程にみられる疑似飽和のときの体積含水率、間隙充填水を除いてしまったときの体積含水率、脱水のときにみられる急激に排水が始まるときの毛管力、吸水過程で疑似飽和に達したときの毛管力、間隙充填水を失ったときの毛管力等である。

ここで新しく使用を試みた因子は、土を構成する微小要素の大きさ  $d$ 、単位の土を構成する微小要素の数  $N$ 、間隙径のうち最も小さいものをあらわす数  $\nu$ 、間隙形の複雑さの程度を示す数  $\alpha$ 、間隙分布を特徴づける数  $K$  等である。新しくといっても、 $d$  は間隙の最大径に等しいと考えているためそれは上に述べた毛管力のうちのはじめの2者の代名詞である。 $\nu$  はその3番目のものの代名詞である。体積含水率のうちのはじめの2者は、間隙の大きさ、数、確率密度関数等が一緒になってきまるものであって、従ってそれはここでは  $d$  から  $K$  までそれぞれであらわしているものと考えて差支えない。3番目のものは、この話しの相手とするものではないために、それをあらわす因子はここにはない。結局、間隙をうめる水を相手にして、 $d$  から  $K$  まで5個の因子を使用している。これら因子を単なるパラメータと単純に理解すると、パラメータ数が多すぎる、5個もパラメータを使えば実験値をよくあらわす式が出来るのは当たり前である等の言葉が聞かれよう。しばし考えてみるべきである。土は、表現するにはあまりにも複雑なものである。このことだけからも土の表現は、ある程度の数の因子の集団をもたなければ出来にくいと知るべきである。そして、土の表現にも、物の大きさや個数、それらの混じり方を示す数値など通常の物の表現に欠くことの出来ない因子はやはり必要である。 $d$ 、 $\nu$ 、 $N$ 、 $K$  等はこの類の因子である。 $\alpha$  にだけパラメータの匂いがしないでもない。しかし、それも物理的意味がきちんとつけられていることでそれはかなり割り引きされると考えたい。

諸因子の数値のだいたいのメドを次につけておこう。砂も含めて砂質の土ということで、 $d$  は  $0.1 \text{ mm}$  前後である。 $N$  は、 $100 \text{ cm}^3$  の土を考えると、 $10^8$  個前後の程度である。 $\nu$  は、砂で  $0.01 \sim 0.3$ 、土となると  $10^{-4}$  程度をとる。 $\alpha$  は、粒径の比較的大きい砂で  $0.01$  に近く、粒径の小さい砂とか粒径分布の幅が広い土となると  $0.1 \sim 0.3$  になる。 $K$  は、 $\alpha$  でみた区分けでいって、前者のもので  $0.1$  に近く、後者のもので  $5 \sim 50$  になる。

## おわりに

従来、pore size distribution なるものがあつた。これをいままでの言葉で書けば、

$$\text{pore size distribution} = \frac{1}{d} \cdot \frac{dS}{d\left(\frac{r_k}{d}\right)} \quad (9)$$

となろう。従来、 $S$  の内容は理解に苦しむところが多かつた。いままでの話はこの  $S$  の内容をそれなりの立場と仕方でも明確にしてきたものであると考えてもよい。

ところで、数学的な厳密さをいうと、それに欠けるところがないこともない。間隙の扱いがはじめ離散的であつた。保水量をあらわす式は連続変化をするように考えられている。離散的な扱えの連続的表現への移行のところに、すなわちそれがある。これは  $\nu$  に影響を与えている。 $\nu$  が大きいと数学的厳密さが保てなくなる。この意味でいえば、この話しは、粒径の大きい、そろった粒の集まりといえるような砂にはあまり適用すべきではないのだろう。

物理的にも厳密さを欠くところがなくもない。 $N$  の数の小ささによって来るものである。確率的考察がこの程度の  $N$  の数の大きさのところで許されるものだろうか。確からしさが若干そこなわれているのではないかと考えられる。

さて、将来にいままで述べてきた話が根本的に破綻をきたすとすれば、それは間隙の確率密度関数がここで述べたものでは不適であるとされるときであろう。例えば、 $100 \text{ cm}^3$  の土を  $10^8$  個とまでいわないまでもかなり多数に切り分けて、その1つ1つについて顕微鏡的に間隙量をはかり、間隙量の分布を実験的に求めてみる。この結果が出たときがそのときであろう。

とまれ、以上をもって、土特に砂質の土の保水の構造は一通り理解することが出来よう。そして、例えば粘質の土への発展、透水との関連の追求などやってみる必要はありそうな気がする。

紙数の関係で、説明、式の記載のかなりの部分、用いた実験法、実験値等の記述を省略し、概念的なところの説明に終始した。省略した部分については文献3, 4, にゆだねたい。

## 引用文献

- 1) 妹尾 学：農土論集，14，(1965)
- 2) 岩田進午：土壤肥料の研究（第2集），養賢堂(1971)
- 3) 中野政詩：農土論集，35，(1971)
- 4) 中野政詩：昭和47年度農土学会大会講演要旨集(1972)
- 5) 最上武雄：土木学会誌，28，(1943)



## 土中水と土の物理的・力学的性質

桑 原 徹\*

## はじめに

土の物理的・力学的性質を決定する要因としては、土を構成する素材に固有な性質、たとえば粒度組成、粘土鉱物組成、溶液その他の共存物質などの一次的性質と、その土がおかれた環境条件などによって決定される間隙比や含水量、土の構造などの二次的性質とがある。

また、土の物理的・力学的性質を決定する機構としては、主として次の2つがあり、1つは粒子間力であり、一方は土の構造である。

ここでは、土の性質がどのような機構によって支配されているかを簡単にふりかえりながら、土中の水分が、それらの機構をどのように表現し得るかを議論してみたい。

## 1 粒子間力と吸着水膜層

粘土粒子表面には、結晶末端部を占める酸素原子に水素結合によって強く吸着された数分子層の水膜層が形成されている。さらに、平板状を呈する粒子の面上に発生する負の電荷によって、水中の陽イオンは coulombic 力によって引きよせられ、いわゆる電気2重層を形成する。電気2重層は、鉱物自体の帯電荷量以外の図-1に示したような種々の要因によっても、その発達状況が異なってくる。電気2重層中の陽イオンは周囲の水和水分子と共に粒子表面に吸引されており、従って電気2重層を形成する範囲内の水分は一種の吸着水膜層を形成している。こうした水膜層の厚さは条件に応じて数Åから1000Å付近まで変化し得るとされている(van Olphen 1963)。

粒子が接近すると、粒子表面に発達した電気2重層の相互作用によって粒子間には電気的な反発力が生ずる。こうした反発力は、粘土の水中での安定分散や、粘土の swelling 現象、rebound 現象などを説明してくれる。

一方、粒子間の引力成分は、粒子が極く接近した場合の van der Waals 力や、粘土粒子の結晶破端部が一般には正に帯電することから逆に帯電した粒子表面との間に働く coulombic 力、それに、粒子表面が15Å付近ま

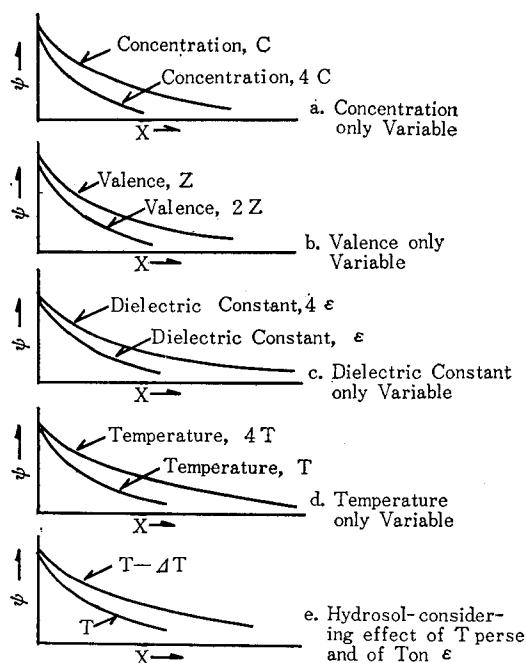


図-1 系の性質が変化した場合の電気2重層に与える影響

y: 電気ポテンシャル  
x: 粒子表面からの距離

で互いに接近した場合双方の電気2重層が一体化し、そのために粒子間に働く吸引力などがある。<sup>\*1</sup>

実際の粒子間に働く力は、これらの吸引力と反発力が合成された結果である。高電解質濃度下での粘土粒子の綿毛化現象などは、電気2重層による反発場の縮小によって吸引力場の作用が強まり粒子接合が促進された典型的な事例である。

電気2重層的な吸着水膜層の発達状態は、粒子間の力場を反映しているといえよう。そして次の土の構造を支配する要因となっている。

## 2 土の構造

土の構造、つまり粘土粒子の配向もまた粘土の力学的性質を大きく左右するものである。土の構造にも種々の

\*1 Rosenquist (1959) は吸着水と液体間隙水の2つの水の間の界面張力を粘土粒子間の粘着力の原因としている。

\* 名城大学理工学部応用地質研究室

過程で形成されるものがあるが、ここでは堆積性の粘土についてふれることにする。

堆積性の粘土の場合、1つには粘土の堆積時の粒子の力場によって堆積時の基本的粒子の配向が決定される。さらには、堆積後の応力履歴、乾燥履歴、続成作用などの地史によって最初の基本的構造は修正され変化して行く。

粘土粒子が作る構造の思考モデルは、Casagrande (1932) から Lambe (1953), Tan (1957), Trollope and Chan (1959) へと発展した。そして高塩分水(海水)中の堆積物は電気2重層が圧縮されているため、粒子の接合が容易となり、flocculationをおこし易く特に負に帯電した面と正の結晶端が接合するような構造を含む、いわゆる random structure が発達する。淡水中の低塩分下では電気2重層が発展し粒子の分散は良好で、沈積物には面を水平にした粒子が多くなり、全般に平行配列構造 oriented structure (parallel orientation) が形成さ

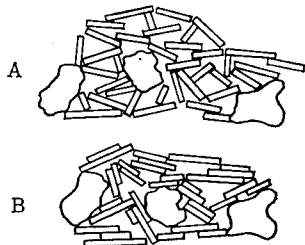


図-2 海水(A)、淡水(B)中の粘土質堆積物の構造モデル (after Lambe 1953)

れ易いという基本概念がたてられた(図-2)。

その後、土の力学的性質との対応や、粘土粒子の構造を直接実体視する方法、\*2 光学的または、X線回折によって orientation をしらべる手法によって、種々の pattern が提起されてきた。

基本的には、次のような Type の構造に類別されそうである(図-3)。つまり、電気2重層が発達し易い粘土鉱物(active clay, モンモリロナイトなど)と電気2重層の発達しにくい粘土鉱物(inactive clay, カオリンなど)とでは差があり、同じ環境下でも堆積構造にかな

\*2 方法的には、構造を乱さないように脱水固定化した試料を作ることが問題である。1つは、吸着水膜の構造に類似の氷の状態に間隙水をかえ、そのまま昇華させて脱水固定化する凍結乾燥法、また、メソソラスを作らないように Critical point 下で乾燥する方法(実際には低 Critical point のアルコールなどで間隙水を replace して行なう)がある。これらで得られた試料の破断面を、電顕でそのレプリカをまたは、走査型電顕で直接観察する。この種の方法は、粒子の配向は判るが間隙の形態が正確にわかり難い。一方、間隙水を、構造を乱さないような材料を工夫して置換固定化し、これから超薄片を作成して電顕で観察する方法がある。この方法は間隙の二次元的な発達状態を知るのに有効である。

りの差が生じる。淡水環境下でも inactive clay の場合、pH が低く結晶端の正電荷が発達する場合には a のよう

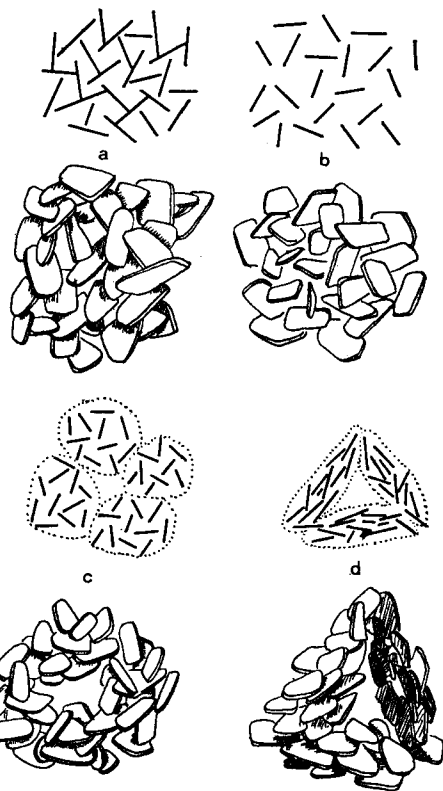


図-3 土の構造モデル  
a : flocculated structure  
b : random structure  
c : flocculation units in random orientation  
d : packet flocculation  
e : semi-oriented structure  
f : oriented structure (parallel orientation)

な flocculated structure を作り、e のような semioriented structure を作らない場合もある。また、active clay の場合、電気2重層の発達が良い場合には高間隙の b のような dispersed structure (random) が形成され、これが圧密もしくはせん断作用をうけて始めて e→f

の構造に発展して行く。

高塩分中では、active clayはCのようなrandomな配列をしたfloc unitsの集団として堆積するし、inactiveな場合には面接合に近いfloc unitsの集合体になり易い。こうしたfloc unitsが存在するような構造は一般的にも認められ、しかも、粒子間の小間隙とfloc units間の大きい間隙とが含まれているため特異な力学的性質を示す原因にもなっている。

構造が土の性質に影響をもたらす例をあげると土の乾燥収縮の場合にparallelな構造をもつ土の方が、randomな構造をもつ土よりも収縮が大きいこと(Lambe 1960)。また、floc unitsの大きいものや、大きい団粒構造が発達した土では粗構造の間の大間隙は収縮過程でつぶれずに残ってしまい乾燥と共にair intrusionが早く起ってしまい易い。

乾燥後の膨潤過程でも、activeな粘土は、parallelな構造の方がswellingが強くと現われるが、inactiveな粘土では、randomな構造の方が容積回復が大きい。

また、力学的性質についても、構造は重要な意義をもっている。Leda clayについて行なった圧密試験の $e - \log p$  曲線(図-4)に示されるように、乱さない状態で

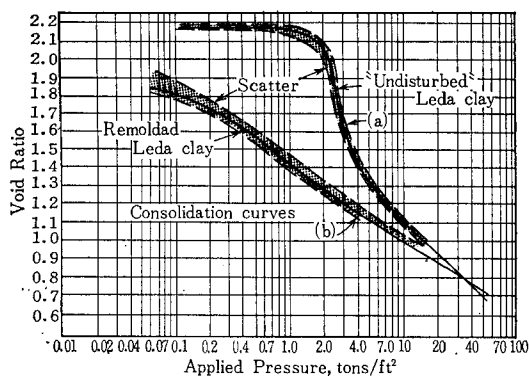


図-4 Leda clayの圧密曲線  
(after Quigley and Thompson 1966)

採取された試料は flocculated structure を示し、その圧密曲線(a)は一定の荷重段階まで容積変化を示さない、つまり、明瞭な圧密降伏点が見られる。これに対して、同じ粘土を練りかえし最初の構造を破壊して平行配列になってしまった粘土(b)は、小さい荷重段階から容積変化を示し、明瞭な降伏点も示さない。aの曲線が示す降伏点は、粘土の最初の構造がもっていた強度を示すものにほかならない。こうした構造のもっている強度は、構造自体が過去に受けた荷重に応じて変化して行くので、その「構造の強さ」は、そのまま過去に受けた荷重の大きさを反映している場合があり、こうした降伏点が先行圧

密荷重値と呼ばれたりした。

構造の影響が顕著に示されるものに、quick clayがある。これは、北欧やカナダ地方に発達する氷期の海成粘土である。この粘土は乱さない状態で細い円柱状の試料として切り出したものは、10数kgの荷重を支えることが出来るが、一度練り返えしてしまえば、同じ含水比でも粘稠な液状になってしまう。

Push (1966)は北欧に発達するquick clayの構造を電子顕微鏡によってしらべた結果、図-5に示すような構造が発達していることを示している。黒くぬりつぶ



図-5 Quick-clayの超薄片電子顕微鏡写真(上)厚さ500 Å, 8000倍, と同写真から構造を示した図(下)自拔部は間隙 push (1966)

した部分は粘土粒子が密に集合している部分であり、それらの密な集合部を細い鎖状に連結した粒子が結びつており、その間には比較的大きな(最大長径4μ程度)間隙が存在し水で満たされている。

この種の構造は、先にも示した図-3のdの海成粘土にみられる構造の一種であるが、比較的大きな間隙がflocの間隙に存在するのが注目される。

Quick clayはBjerrum (1954)らを初めとして多くの研究者によって特性が研究されているが、特に注目す

べきことは、quick clay となるものは同じ粘土層でも low activity で、高い液性指数を示していることである。そして、quick clay は海成環境で堆積した粘土層が、陸水の滲透によって間隙水中の電解質が leaching されたものであるといわれている。つまり、高電解質下で電気2重層は圧縮され粒子の接合が進んでいたものが、塩分の溶失によって、粒子表面の電気2重層は拡大しようとしており、最初の構造はもはやそぐわない状態になっているといえる。

従って、一度既成の構造が破壊されると、構造中の大間隙中に dead volume として含まれていた水分は、拡大した電気2重層をもった粘土粒子の分散に役立つ事になり、系全体が液状を呈することになるのである。

図-6に示したように密な集合部の組合せとして構造

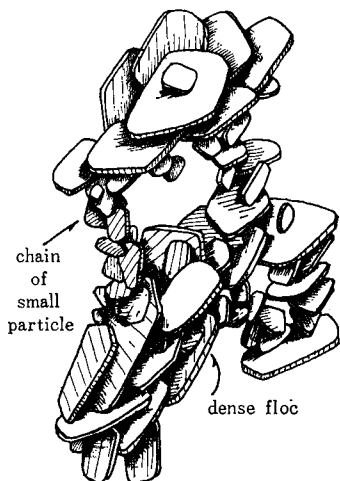


図-6 Quick clay 中の構造の model

が作られていると考えた場合、間隙は、密な集合部内の小さい間隙と、集合部の間に存在する粗なものから成り立っている。圧密の場合などで、最初につぶされるのはこの粗の間隙部分であり、比較的透水性も大で、いわゆる一次圧密と呼ばれる部分を占めているのであろう。試験片中の過剰間隙圧が0になってからも進行する二次圧密の現象は、粘土粒子表面に引かれた吸着水膜部分が大部分を占める集合体中の小さな間隙中の動きにくい水分の排出（集合体がつぶれる）によって生ずると理解することが出来よう。また、このことは集合体の内部の小間隙の間隙水圧と粗間隙中の水圧とに、ずれが存在することも示唆している。

### 3 土の中の水分量

いままで、粘土粒子と水の相互作用として生ずる力場の問題や、土の構造のもっている意義について2・3の事

例をあげて素描してきた。土の構造を固体の側から描いてみる代りに、固体の間隙の側から構造を描き出してみることを考えてみよう。

飽和土である限り、すべての間隙は水分によって満たされており、間隙量は含水比によって示され得る。炉乾燥によって求められる含水比中には、ハロサイトののように crystal phase に含まれるような水分まで含むことになるし、ハロサイトの管状結晶管中の間隙や、珪藻遺体などの殻中の間隙などの dead volume も一切を含めた“間隙の総量”を与えてくれるにすぎない。

Atterberg Limits も物性と関係のない dead volume の水分などを区別し得ない欠陥(桑原 1970)もある。しかし、その液性限界(WL)は対象となる土の粒子間力が一定の(実質的な rigidity を保ち得るような程度の)強さまで粒子間隙が広がったときの含水比を示し、また塑性限界(WP)は、極めて強固な状態で粒子表面に吸着された水分の上に、粒子間引力が弱まってしまわない程度までの範囲で粒子間の潤滑作用を果す程度の水分が含まれた状態と解釈されており(Grim 1962)、粘土と水との相互作用を反映した土の素材としての性質を巧みに表現し得るものとして広く使われている。

自然状態の土の含水比を WL や WP などの含水比量との関係値で表わしている液性指数<sup>\*3</sup>(IL)は、その土の履歴に対比して考えた場合、過剰な含水分、つまり過大な間隙量を有しているかどうかの判断するのに役立つ。“過剰な間隙量”は土の構造によってもたらされる粗間隙などの発達を示唆している。

このように単純に間隙量を示す含水比を他の特定の含水比との関係によって間隙の状態を知ろうという方法がある。

一方、間隙の形態が異なると、そこに含まれる水のエネルギー状態も異なってくるので、そこに注目して、含水分をエネルギーレベル別に測定すれば間隙形態についての情報が得られることになる。こうした目的に適したものが moisture tension curve である。

いろいろな text に述べられている水の状態名を pF に対応させてまとめて表示してみると図-7のようになる。

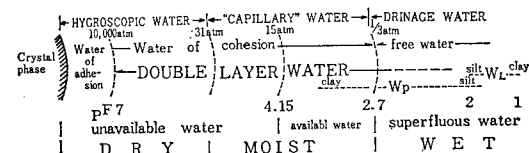


図-7 土中水の区分

<sup>\*3</sup>  $IL = \frac{W - WP}{WL - WP}$  W: 自然含水比

これらの表現も実験的な裏づけにとぼしく、理念的なものである。とくに電気2重層中の水分には粒子表面からのへだたりによってエネルギーレベルはかなり変化し、末端部では普通の状態の水分と明確な境界がつけ難いし、電気2重層に毛管張力の影響が加わった場合どうなるかはっきりしない。また水分状態名の定義もあまり明確ではないし、状態区分の境界も明確ではないのでこうした表現では実用性にとぼしい。

水分のエネルギーを毛管力にのみ起因するとして、それぞれの pF に対応する孔径の孔隙を対応させて孔隙径の分布を求める考え方もあるが、粘土分を含む土の場合これも電気2重層中の吸着エネルギーや脱水進行にともなう構造変化などが考慮に入られていない。

飽和状態の土の tension curve を描いてみると、砂質土やシルト質の土では勾配がゆるくなる部分 (pF range がせまい範囲で含水量減少が大きく生ずる部分) があり、その両側に屈曲点が現れる (図-8a)。この低勾配部分は

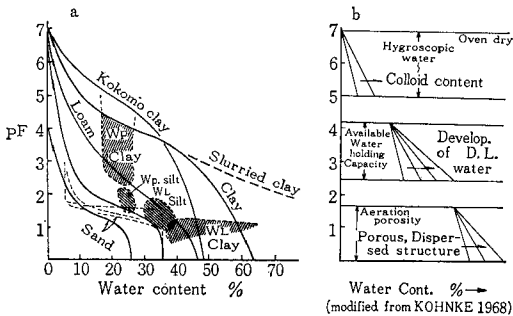


図-8 各種の土の代表的な moisture curve (a) と curve の形態を支配する要因を説明する図(b) (図 a 中の斜線部は, clay, silt の個々の試料について curve 上に WL, Wp をおとし, それらの分布範囲を示している)

砂質粒子間の pore 中の水分の排出であると説明される (Baver 1956), この低勾配部の上方の屈曲点は, 砂質土などの間隙水が失なわれ, 粒子表面の吸着水分が残される状態になった点と考えられる。

シルト質土の場合, Wp 値の含水量の位置はこの上方屈曲点よりはやや含水量の高い位置にあり, Grim(1962) などの考えた Wp 値の実体論に合致する。

一方, 下方の屈曲点は, 粗粒子の接触点に近いことを示しており, それ以上の含水量に対しては保持力を示さないことを示している。Russell and Mickle (1970) らは多数のシルト質土の tension curve 上に, それらの土の WL 値を plot すると, この下方屈曲点にはほぼ一致するとした。

図-8a 中には Russell and Mickle の資料の他に利用できる資料を加えて簡略化して示したものである。この

図からもわかるように, 粘土質の多い土では, あまり明瞭な低勾配部分は現れないために, 屈曲点ははっきりしない。これは, 間隙孔径の分布が広く, 極めて小さい孔径のものまで分布していることと, 一方では, 粘土粒子表面に発達する電気2重層中の水分のエネルギーが連続的に変化することによるものと思われる。

今, これらの現象を厳密な意味で解釈することは困難であるが, Kohnke (1968) が試みた soil moisture tension の解釈を参照しながら, 他の資料を考慮に入れて考えると図-8b のような説明が可能と思われる。つまり, pF 5~7 付近の高 pF 部分で含水量が多い(勾配がゆるい)土は, colloid やこまかい粘土粒子に富むために, 粒子表面に adhesion された水分や結晶と化学的な結合状態にあるような水分(ハロイサイト, アロフェン中の水)が多く存在することを意味し, pF 2.5~4.2 付近の中位の部分の含水量が多いものは, 電気2重層(吸着水膜層)の発達のよいもので, 間隙の size range も広いものと考えられる。また, 低 pF 部分の含水量が大きいものは, 比較的粗な間隙が発達した土(粘土質でも構造的に粗な間隙が発達するもの)が粘土で吸着水膜層が非常に発達し, いわゆる dispersed structure を呈しているような場合を考えることが出来よう。

文 献

- 1 Baver, L. D. : Soil Physics, 3rd Ed., J. Wiley. (1956)
- 2 Bjerrum, L. : Geotechnical properties of Norwegian Marine clays, Pub. No. 4. Norwegian Geotechnical Inst. (1954)
- 3 Cassagvande, A. (1932) Jour. BSCE.
- 4 Grim, R. E. : Applied Clay Mineralogy, Mc Graw Hill. (1962)
- 5 Kohnke, H. : Soil Physics. Mc Graw Hill. (1968)
- 6 桑原 徹: 粘土科学, 9, 3-4号. (1970)
- 7 Lambe, T. W. Proc. ASCE, 315 (1953)
- 8 ———: Trans. ASCE, 125. (1960)
- 9 Push, R. : Eng. Geol. 1. (6) (1966)
- 10 Rosenquist : Proc. ASCE. 85, SM.2 (1959)
- 11 Russell, E. R. and Mickle, J. L. : Liquid Limit Values by Soil Moisture Tensiou, Proc. ASCE. 96. SM.2. (1970)
- 12 Tan, T. K. : Structure Mechanics of Clays, Acad. Sinica, Soil, Mech, Lab., Inst. Civil, Eng. and Arch., Harbin, China. (1957)
- 11 Trollope, D. H. and Chan C. K. : Proc ASCE. 86. SM.2 (1959)
- 12 van Olphen, H. : An Introduction to Clay Colloid Chemistry, J. Wiley. (1963)



## 力による土の変化

須藤 清 次\*

土に外力が加えられたとき土壌構造がどう反映するかということは、一軸圧縮強度の鋭敏化や突固め最適含水比などの個々の課題についてはよく知られている。土壌構造そのものは inter-particle の問題であるから、物理化学的方法で取扱われる。いま土壌構造についてはわれわれなりに一定の理解をもっている。そのとき土の塊に力が作用して応力が発生する場合の土の変化を、いわゆる土壌構造論とは異なる観点で考えてみたい。すなわち土の変化の評価を行なうための変化の基準や方向を問題にする。

## I 耕地土壌

今世紀のはじめ Vernadsky は“地質時代の現時期においては、人類による地球科学的活動すなわち緑色植物の生産したものを収穫する農業はますます有勢かつ多様になった”と述べたのであるが、今日ではさらに工業および人間生活による大地と水の変化の方向はわれわれ人間をおびやかしている。

土壌を認識するにあたり、まず物質の分散状態を考えるとということが、塩入土壌学の一稿に述べられている。地表の岩石の始原である火成岩の風化から出発すると、内層は未風化の岩石である。地中から上空へ向って、風化圏(土壌母材)・土壌化圏(土壌)・水圏・気圏へと順次に分散度が高い配列になっている。

このような視野で耕地での力学的問題の1例として水田について考えてみる。雄大な八郎潟干拓において、計画としては干陸にひきつづいてすぐに水田化が追求された(いまでは畑が取沙汰されているが、当初は全部水田をめざしたのであった)。もともと大部分のわが国の水田は、海退により——干拓と同じように——生れてきたものである。干拓の場合のように短期に水田の機能を持たせようとするときは、それなりの水田の構造が条件づけられる。農業のための最初の物理的条件は耕盤の形成であろう。

耕盤形成の機構は多くの経験や調査結果から次のようにまとめられる。植物(稲)の吸水による脱水・収縮が不可逆的に進行することがつまり耕盤形成過程といえ

る。それに加えて踏圧(機重を含む)による間隙の締固め作用が補足的な役割を果たす。その際に土壌が分散的であることが必要であり、排水・溶脱による不可逆過程が保障されなければならない。湛水条件下の分散過程については、斎藤により生物・腐植の分散作用や結合物質としての鉄の移動についてのすじ道が示された。

水田の耕作は分散をうながす。水田は土がゲルからゾルにかわり、水に分散して流れて溝に入る一步手前で利用されている農業の場であると考えられる。分散してゆく寸前で、水田という地形形態が、1年サイクルの農耕で力学的作用が加わって維持されている。そこでは耕

表-1 水田のサイクル

夏	冬
稲作	休耕または畑作
代かきによる表土の分散	根の吸水・蒸発・踏圧による耕盤の固化

耘・代かきによる〔分散〕と前述の〔固化〕とのサイクルのなかで稲作が行なわれているといえる。

## II 応力による変化

地汜りや地盤沈下のような巨大な力を伴う場合も、前述の耕地と同様に考えられる。

土中の主応力を  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  とする。この応力はそれによる変形特性に対応して分類すると、二つの成分に分けられる。すなわち一つは圧力(等成分)で ( $\sigma_2 = \sigma_3$  の場合)  $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 、他の一つはせん断応力(偏差成分)で、後者は主軸に  $45^\circ$  の二つの面で ( $\sigma_2 = \sigma_3$  の場合には)  $(\sigma_1 - \sigma_3)/3$  のせん断応力を表わす。圧力によっては体積変化変化だけが進み、その際に土粒子または団粒の相互位置はほぼ同形態のままであるが、粒子の接近により粒子間力は強まる。一方せん断応力は体積変化には無関係でずりのみを進め、粒間力を弱める。しかしせん断応力によっても、粒子相互のかみ合いまたは回転の効果により体積変化をもたらす。この場合の体積増(減)を正(負)のダイラタンシーと呼ぶ。

次に具体的な例について考える。締固めについてみ

\* 茨城大学農学部

ると、粒子間関係を変えない体積変化のみが現われる場合は静的全面一軸締めめでみられるが、棒による突固めでは土粒子は縦の配向に向う（縦方向のせん断力により）。

圧密は脱水を伴いつつ土の固化が進むが、圧密方向に垂直な配向も進む。一次元圧密の全応力を $\sigma_1$ とすると、

$$\sigma_1 = u + \bar{\sigma}_1, \quad u: \text{間隙水圧}, \quad \bar{\sigma}_1: \text{有効応力},$$

半無限地盤または圧密リング内では $\sigma_2 = \sigma_3$ あるから、横方向の歪 $\epsilon_3$ は、

$$\epsilon_3 = -\nu(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2)/E + \bar{\sigma}_3/E, \quad \nu: \text{ポアソン比}, \quad E: \text{ヤング率}$$

ここで $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ ,  $\epsilon_3 = 0$ であるから、

$$\bar{\sigma}_3 = \{\nu/(1-\nu)\}\bar{\sigma}_1,$$

$\nu = 0.4$ とすると、 $\bar{\sigma}_3 = (2/3)\bar{\sigma}_1$ となるから、土粒子に働く有効応力は偏差成分（せん断応力）を持つ。したがって圧密によって配向が進むことになる。この論理はさきに触れた静的締め固めの場合も同様であるが、歪が圧密と比して小さいために、配向が識別し難いのであろう。

非排水の場合に起こる歪の連行で配向と固化が行なわれるクリーブは、フォークト一般化模型で表わすと図-1

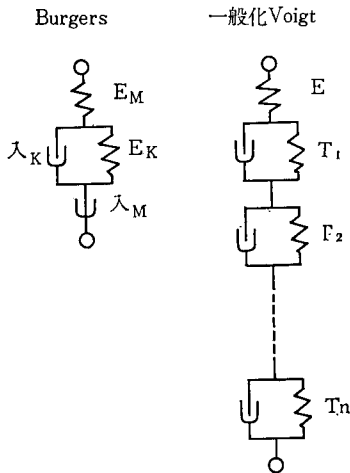


図-1 機 械 模 型

ようになる。一次元式は、

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \sigma_1 \sum_{i=1}^{\infty} J_i (1 - e^{-t/T_i})$$

$$= \frac{\sigma_1}{E} + \int_0^{\infty} \Phi(t) (1 - e^{-t/T}) dt$$

t: 経過時間

$T_i$ : 遅延時間のシリーズ

$J_i$ : コンプライアンス (1/E) のシリーズ

$\Phi$ : 遅延スペクトル

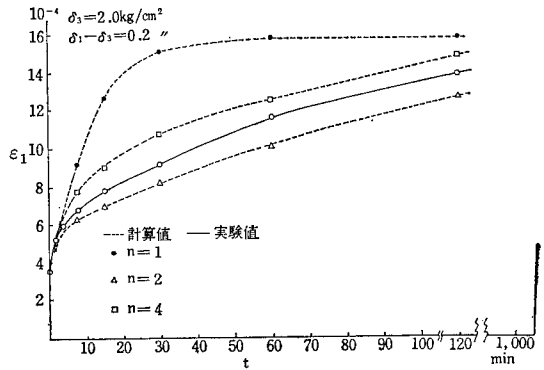


図-2 (a) クリーブ

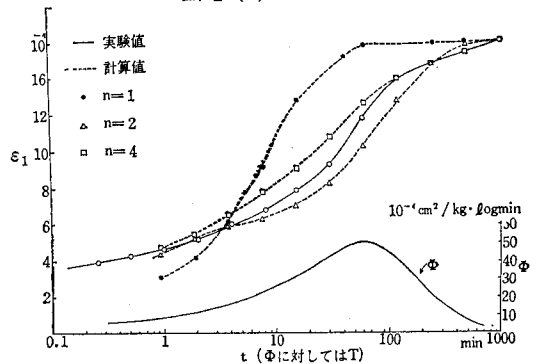


図-2 (b) 遅延スペクトル

で一般的に表わされるが、このままでは計算値が得られないから Yong・Chen の方法で第二項を書きなおすと、次式により実際のクリーブを表わすことが可能になる。

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \sigma_1 \sum_{i=1}^n [\Phi(\log T_i) (1 - e^{-t/T_i}) \Delta \log T]$$

成田層砂質ロームの一例を示すと図-2 のようになる。遅延スペクトルの分割数は  $n=3$  でかなり 実際値に近くなる（遅延スペクトルがベル形のとき）。

三軸試験機内で  $\sigma_3 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$  の条件で、軸差応力  $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  のときのクリーブによる体積変化をみると表-2 のようになる。体積圧縮歪  $\epsilon_V$  と縦歪  $\epsilon_1$  との関係は、みかけ（遅延弾性）ポアソン比を  $\nu_R$  とすると、 $\epsilon_V = 1 - (1 - \epsilon_1)(1 + 2\nu_R \epsilon_1)$  であるから  $\nu_R = (1 - \frac{\epsilon_V}{\epsilon_1})/2$  と表わすことができる。 $\nu_R$  は負の値が現われるから、横

表-2 クリーブによる体積変化

t	$\epsilon_1 (10^{-3})$	$\epsilon_V (10^{-3})$	$\nu_R$
2 min	1.76	2.35	-0.17
1 h	4.96	6.67	-0.21
4 h	6.16	10.2	-0.31
(24 h)	(7.35)	(26.7)	(-1.31)



方向も縮小したことになる。このような横方向の縮小は圧密の場合と同様に現地では起こりえないことであるが、土の構造変化が新たに体積縮小を再起させることを意味する点は興味深い。

破壊は正のダイラタンシーのなかで起き、体積増→分散方向の進行する。破壊線では土粒子の配向をもって終了すると見えるが、この形態は一つの結果論であろう。破壊により土は水に溶けまたは空中に散じる方向に向うのであるが、水がなくまた飛散するには土が過大であれば、クリープと同様にその流動の効果は固化して次の幾何的形態で二次的安定に入る。

固い土での圧力による締固めとせん断応力による流動の方向をまとめると表-3のような図式によるサイクルを繰返して、遂にはすべては流れ去ることであろう。

表-3 固い土のサイクル

圧力に対してせん断応力	小	大	
クリープ		破壊	
時間の経過とともに固化		塑性流動	水・粉碎の条件あり
		固化	分散
二次的安定		流出	

### III まとめ

土の變化の駆動力は、太陽の熱エネルギーによる水の海→空→地の循環とそれに伴う生物の作用が主であっ

て、それに加えて地下の熱エネルギー・地盤變動が補足的役割を果たすといえる。しかし地史的タイム・スケールで見れば後者の方が主になる。

いま大地は交通・土地利用の点で、その広さが実感されるほどに狭くなってきた。ついに最近までは水も無限と思われたが、水道水をみても海をみても、いまは誰もが水の有限性をひしひしと感じている。大地も土も昨日の水の位置におかれているとあってよい。

力の作用は実用的には巨大である。しかし土の流れの運命のなかでは、生産・生活のためのつかの間の地形の維持に、圧力とせん断応力の相互のかかり合いが、流れの進行を制御しているに過ぎない。

### 文 献

- 1) 斎藤：北海道開発局土試報，56，1，(1971)
- 2) 佐藤：土壌の物理性，10，39，(1964)
- 3) 塩入：土壌肥料講話，朝倉，261，(1933)
- 4) 須藤・東山・山崎：土と基礎，13(9)，29，(1965)
- 5) 須藤：研究の資料と記録(東大農地工学研)，14，69，(1965)
- 6) 須藤・神尾：農土誌，35，20，(1967)
- 7) 山田：土壌の物理性，10，31，(1964)
- 8) 米田：同上，10，20，(1964)
- 9) Yong・Warkentin(山崎・山内監訳)：土質工学の基礎，鹿島出版，211，(1972)
- 10) Yong・Chen：Proc. 5th. I. C. Rheology. 2，501(1970)



## 質疑応答と総合討論

司会 八幡敏雄(東大農) 木下 彰(北海道農試)  
 講演者 有村玄洋(九州農試) 松口竜彦(農技研) 中村政詩(東大農)  
 桑原 徹(名城大理工) 須藤清次(茨城大農)

(木下・北海道農試) 土壌物理研究会には自分の研究の一場面を発展させるために加入されている方が多いと思います。多分、本日の5題の講演の全部を理解された人は少ないと思いますので、気軽に御意見、御質問を受けたいと思います。なお時間と編集上の都合で、今日の講演の順序に従って進めたいと思います。

(湯村・野菜試) ①ダニ・トビムシのふんは粗しょう有機物が大部分だとすると、これら微小土壌動物の土壌構造への寄与の程度はかなり小さいと思うがどう考えられますか。②ダニ・トビムシ類とミミズ類との生息する土層の深さは一般的にはどちらが深いのか。

(有村) ①の御質問ですが、微小土壌動物の1個体の作用はミミズなどの大型土壌動物にくらべると、土壌構造に及ぼす影響は小さいと思います。しかし、自然状態の表層内には相当数( $\times 10^5/m^2$ ともいわれています)のダニ・トビムシ類のような小節足動物が生息していること、これらの遺体・排泄物 $\rightarrow$ 微生物による分解 $\rightarrow$ 大型土壌動物による摂取・攪拌・運搬および排泄物 $\dots$ と土壌生物系の複雑な変化を考えますと、微小土壌動物といえども、直接・間接に植物遺体の分解、土壌構造に及ぼす影響は無視できないものと思います。②の御質問ですが、一般的にはミミズ類の方が深いようです。

(佐久間・北大農) 排泄物中の団粒の安定性あるいは崩壊の状態は微細形態の方法で、どの程度明らかにできるか。

(有村) 微小土壌動物の場合は土壌中における微小土壌動物の種類と排泄物の形態との関係や、土壌中の微小動物排泄物の分離法が、まだ明確にされていないようですので、薄片観察からだけで排泄物の安定性・その崩壊過程について考察するには困難性をともなうと思います。しかし、粒径が比較的大きい排泄物、たとえばミミズ類の排泄物などは微細形態の方法その他の理化学的方法を適用し、かなりくわしくしらべられると思います。

(山口・道立中央農試)  $A_0$ 層、 $A_0A$ 層、 $A$ 層中の各種土壌動物をB層またはC層のような有機物の少ないところでそれぞれ繁殖させて、土壌構造の造成に役立てる

ことができないか。

(有村) ミミズ類を繁殖させてA層の土壌構造の改善をねらった試験がおこなわれていることは聞いていますが、下層土にたいしてはよく知りません。

(湯村・野菜試) ミミズのふんに無機粒子が多いのに対して、ダニ・トビムシのふんには無機粒子はないのか。

(有村) 一般にダニ・トビムシ類は腐植性のものが多いといわれています。武田氏によると、一般にリター層内に生息するある種のトビムシ類の体内は植物遺体が大部分で、そのほか菌糸破片、胞子を含んでいるとのべています。また、ダニ類のふん中には検鏡した限りでは、無機粒子はきわめて少ないと思います。

(佐久間・北大農) ①微細構造を検鏡する手法によって、既墾地を含めた土壌構造およびそれに対する地中動物の影響の dynamicsなどをどの程度追求できるか。②構造単位間の amorphous matter の効果はどのような方法でチェックするか。また、thin sectionの調整の際にこれが変化する可能性は?

(有村) ①の御質問ですが、既耕地土壌については調査していないのでわかりませんが、現在までとり扱った試料からいえることは、一般的にその土層内で活動している土壌動物の排泄物の形態と量、植物遺体の分解程度また土壌微細形態の変化などを詳細にしらべることにより、それらの影響を知ることができると思います。②の御質問ですが、現在のところ、微細形態観察結果だけから構造単位間の amorphous matter の効果を知るのは困難なような気がします。したがって、固化した試料について脱鉄処理などをして、微細構造の変化を比較したり、化学的方法によって量的に補足することにより、ある程度のことは推察することができると思います。また、現在使用している thin section 作製法ではこれら物質が変化する可能性は考えられます。

(多田・農土試) ①プレパレート作り方—②因子(土壌構造生成のための)をいかに区分するか。たとえば土壌動物、植物の影響はどのようにわかるか、具体的に教えてほしい。

(有村) ①の御質問ですが、土壤薄片作製法についてはペドロジスト誌(5巻1号)、土肥誌(33巻4号)を参照して戴きたいと思ひます。チェックの面積は観察した全薄片面積がほぼ100 cm<sup>2</sup>程度になるまでです。②の御質問ですが、土壤動物の影響は植物遺体内または遺体間、孔隙内における各種土壤動物排泄物の存在、それら排泄物の形態と量、植物遺体の分解程度などを観察する。また植物根の分布状態、土壤孔隙の形態と量、土壤基質のちみつさなどより、その層位における生物の活動程度および微細構造に及ぼす影響を考察しています。

(佐藤・愛媛大農) ミミズは排泄粘液?のようなもので土壤を団粒化するように考えていたところ、排泄物そのものは植物質と鉱物質の混合した団粒状をなす一方、ミミズ(遺体)の周囲の土壤はむしろ単粒化されているような写真に見えた。これは動きまわることによってむしろ土壤を単粒化するのでしょうか(写真のスケールの問題で小団粒だったのかしれません)。

(有村) ミミズ類はすみかをつくるのに自分の周囲の土壤を食っては排泄しながら、穴をほって行くといわれています。この写真の場合は微小ミミズの例ですが、この場合でもミミズの周りはその排泄物で小団粒化したものと思ひます。

(木下・北農試) 微細構造を顕鏡した結果をどのように分類するつもりか。

(有村) 現在のところ、Brewer や Kubiena の分類方法を参考にしたいと思ひています。

(久保田・農技研) 見せて頂いた写真によると、赤黄色土の表層は膨軟であるという印象をうけるが小動物の頭著などところを選んだ結果か、それとも一般に表層では海綿状構造が発達していると理解してよろしいか。

(有村) 一般的にみて、自然状態の赤黄色土の表層の微細構造は下層土のそれにくらべて海綿状構造(もちろん、植生、土壤動物の活動程度などにより、その発達程度はことなっていますが)が発達しているとみてよいと思ひます。

(木下・北農試) 細菌は液相中に棲息しているというが、液中に浮遊しているのか、あるいは土壤粒子に吸着されているのか。また細菌は荷電をもっているのか。

(松口) 細菌は液体培養においても、固体表面の存在で増殖はいちじるしく促進される。土壤孔隙中での細菌の分布をみても、土壤粒子周辺にコロニーを作っていることが観察される。その原因は、土壤粒子表面での養分濃縮による間接的なものと、細菌細胞を直接的に吸着する場合がある。細菌細胞の荷電については、イオン交換樹脂等への吸着現象として扱えられているが、直接的な

知見は少ない。

(八幡・東大農) インキュベーションを終った状態の土壤についてpF水分分布曲線を改めてはかると、孔隙量が微生物増殖によってどうか変わったかを知ることにはできないものか。

(松口) 本実験では調べてないが、細菌の増殖による土壤孔隙の目づまり問題とも関連するのでおもしろい御意見と思ひます。ただ測定のための脱水過程で水分とともに微生物細胞が移動する可能性があるのでは、この点をどう解決するかが問題でしょう。

(岩田・農技研) 土壤中の空間は、微生物にとって単なる住むための空間と考えてよいのか。土壤表面に存在する諸現象が微生物にあたる影響は大きいのか。

(松口) 木下氏の御質問とも関連するが、固体表面では養分の濃縮、代謝排出物、抗生物質の濃縮、微生物細胞の物理的、電気的吸着が起こり、微生物細胞の機能に様々な影響を及ぼす。しかし一般的には、イオン交換樹脂からガラス球まで、固体表面の存在が細菌細胞の増殖を促進する効果がみられている。土壤空間(孔隙)の性質は、酸素の供給、水分、養分の供給を支配するので、単に住むための空間だけの意味ではない。

(久保田・農技研) 茨城県の赤ノッポに腐植がたまらないのは、風蝕以外にその土壤によく発達したマイクログリゲートが関係していないか。アロフエン質土壤のグリゲートは腐植の吸着や微生物活性と何か関係がないか。

(松口) 一般に黒色火山灰土壤は細菌が少なく、放線菌、糸状菌型のマイクロフロラを形成している。腐植の生成にリグニン、セルロース、特に前者の関与が大きく、また低分子のグルコース、酢酸のCが短期間のうちに腐植のCに変化することも明らかにされていることから、微生物の関与が大きいと考えられる。火山灰土壤で腐植が生成しやすい原因に、放線菌、糸状菌に富むマイクロフロラが考えられよう。石沢らは火山灰土壤にメラニン生成性放線菌が多いことを明らかにしている。一方、腐植分解菌として子のう菌、キノコなど特殊な糸状菌が報告されているが、赤ノッポに腐植が集積しにくい原因として、これらの菌の関与も考えられよう。

(吉田・新潟大農) ①土壤水分のしめる容積に対する菌体のしめる容積は、どの程度であるのか。②土壤水分の移動とともに、菌体も流されるものなのか。

(松口) ①一般に土壤孔隙が全て細菌細胞で飽和されたと仮定すれば1g土壤中約10<sup>12</sup>の菌数と考えてよい。実際に土壤の細菌数を検鏡すれば10<sup>9</sup>~10<sup>10</sup>前後であり、全孔隙量の0.1~1%しかしめていない。このことから土

壤中での微生物は飢餓状態にあると考えられる。②水田土壌の断面での細菌の分布を調べた結果では、たて浸透の水みちによって細菌数が増加している現象がとらえられている。この現象は、水分移動とともに細菌の下層への移動の可能性を示すものであろう。

(保坂・東北大農研) 土壌構造のもつ、微生物に対する影響の1つとして、吸着がある。これに対して、氏はいかなる考えをもつか。

(松口) 細菌の化学的活性に対する界面の影響については、McLaren, 服部らの考察がある。それによれば、吸着菌のpH—活性曲線や、基質濃度—活性曲線が遊離菌とちがったパターンを示すことが明らかである。

これは主に単一種の細菌での現象だが、実際の土壌では、粒子界面に数種の菌が混在する場合もあり、吸着の影響も混在する微生物間の養分競合、拮抗作用、食物連鎖の面から把握する必要がある。

(竹下・神奈川園試) 菌糸生育をおこなう微生物の中で、糸状菌よりも放線菌が高浸透圧条件によわいののは何故か。特にどのようなイオンに対してよわいか。

(松口) 糸状菌と放線菌の細胞壁の質のちがいに関係するものと思われる。放線菌の細胞壁は10~20 $\mu$ mの厚さを持ち、主として糖—アミノ酸の複合体から成っている。これに対し、糸状菌の細胞壁はprotein, 脂質とともに80~90%がセルロース, キチン等の多種類を含有する上、いちじるしく厚い放線菌の細胞壁にくらべこの性質の差が、細胞壁の浸透性に関係するのであろう。イオンの種類については、よくわからない。

(田淵・茨城大農) 微生物の生育が土壌構造にあたえる影響についてどうお考えですか。

(松口) 土壌の団粒形成に対する微生物の寄与については、いくつかの報告がある。細菌類には、粘着性物質(主としてpolysaccharide)を分泌し、また、放線菌、糸状菌は菌糸の伸長により微細な土壌粒子(低次)を結合させる作用を持つことが観察されている。しかし、微生物の生育は、時間とともに変化するので、その効果も動的にとらえる必要があろう。

(岩田・農技研) ①氏の仮定によると、エレメントのスケールは大分大きく、100 $\text{cm}^3$ 位のサンプルでは、ゆらぎの問題がでてくると思われるが、この点どうお考えになっておられるのか。②定数はどの物理量が明らかになれば、理論的に計算されるのか。

(中野) 微小要素の大きさは、私が使ったサンプルでは、砂壤土で0.075 mm, 軽石砂で0.3 mm, 砂で0.1 mmという辺長をもつ立方体です。従いまして、辺長2 cmのサンプル(体積は8 $\text{cm}^3$ )を考えますと、砂壤土で

は10<sup>6</sup>個, 軽石砂で10<sup>4</sup>個, 砂で10<sup>6</sup>個の程度の微小要素を含むことになります。100 $\text{cm}^3$ のサンプルではこれより1オーダー大きくなるかと思えます。ところで、アボガドロ数とくらべれば、この数は非常に小さいのですが、たとえば、2種類のエレメントで考えたとき、10<sup>4</sup>個程度の数で最もらしい分布の状態数と状態の数との比が最もらしい分布の状態数を与える分布の附近にかなり鋭く集まってきます。

第2の御質問ですが、定数は3個使っています。いずれも土中の間隙に関するものです。間隙の大きさや形や集合状況などが土粒子の大きさや形や集合状況から計算出来るものなら、粒径分布曲線にもとづいてこの定数は算出される可能性があります。

(岩田・農技研) ①あたえられている条件はなにか、たとえばマクロに測定された密度なのか。②エレメントの孔隙の変化は連続的なのか、不連続なのか。

(中野) 間隙量の分布を求める計算のときに使われる条件は、マクロに測定された間隙量がモデル中にそのまま保存されているということであらわすもの、および、その測定値をあたえる土塊中に想定した微小要素の数がその土では特徴的な一定値を示すもの、この2つです。2番目の御質問ですが、モデル中の微小要素は各々間隙をもつことにしていますが、この微小要素を間隙の大きさの順に並べてみたときの間隙の変わるようすは、初めに不連続に考えてますが、その総和をとるとき積分演算をしますので結局は連続的なものと考えていることになると思います。

(木下・北農試) 保水機構について、新たに提案する考え方の背景または経緯は、また現在までの保水機構に関する学説と提案する案の位置づけをどう考えておられるか。

(中野) 構造の1つの表現形成では、ある間隙のようすを確率密度関数の形式で表現してみたいという意図のもとでこの研究は進められました。さらに、その背後には、土をいわゆる物性論的なみかたで、そしてその手法で把えてみたいという意図もありました。ついでですが、この際の最初の山は、土とか間隙とか不連続なようすで連続なような物体を、“集まりの物体”として把えることを最初にしなくてはならなかったのですが、それがここにあったように思います。この試みは、この分野ではこれが最初のものであると思われる。この試みによって、土ないし土中水のなにか理解しにくい内部のようすが鮮明さをもって理解出来るようになったのではないかと思います。もちろん、この試みは1つの試みにすぎないことはいうまでもありませんけれども、また純保水

機構という点では、従来の研究成果を全面的に踏えています。

(辻・大林組技術研) 土の保水性に与える因子は多々あると思います。特に土に含まれている粘土の表面活性が与える影響は大きいと思われませんが、今回は砂土についてですので、この点は考えないと思いますと、間隙の大小とか、その大小別の存在量の違いが保水性に与える影響は異なると思われる。この時、土塊を有限の要素に分解してその存在を考慮してしまう場合、土の保水性の再現性がどの程度あるとお考えですか。

(中野) 土の保水性の再現性は、ヒステリシスも含めて挙動するものと考えます。このモデルで、たとえば、水が1度排除されて次に再びそこに水がもどるもどり方はどうか、というようなことを考えることは、問題の性格上意味がないと思います。いまの問題は水分変化の1ループ上で水分変化が静定した1時点で水のあり方がどうなっているかということとして、このモデルはそれを表現する以外のなにものでもないからです。モデルは、そのとき間隙充填水と間隙非充填水の混在のようすだけを表現しているにすぎないからです。

(高橋・岡山大農) 土壌構造自体の収縮膨脹によるヒステリシスはどうか考えるか。また、測定の際、メニスカスによるものと、収縮膨脹によるものと両方のヒステリシスが表われる場合、どのように考えられるか。

(中野) 収縮膨脹の際、土中の間隙の変化のようすがどうなるか。これを確率密度関数で表現すれば、私の場合、そのテイ減係数が変化することで表現出来ます。一方、マクロな間隙量が当然ながら変わります。最終的には、このマクロな間隙量だけが計算に関与するものとなります。従いまして、測定中つぎつぎに収縮膨脹がみられるときには、その時々々の密度のときのマクロな全水分量を求めて、これを使って計算をすることになります。ヒステリシスがある場合、そのヒステリシスがどのようなループのものかを明らかにすれば必然的にそのループの際の全水分量がわかりますから、それで計算はすすめられると思います。

#### 討 論

(湯村・東近農試) 固結母岩の *in situ* 風化生成物の一次粒子(一次鉱物)の配列のしかたと、母岩の種類、風化条件、深さなどとの間には図-3のような一般的関係が認められるか。

(桑原) 一般に容積変化や粒子の移動が少ない深部風化などでは、母岩の一次鉱物の方位を *inheritate* して粘土鉱物化が進んでおり、巨視的な母岩の *texture* は保存されている。しかし、一次鉱物の粒子内では、必ずしも二

次鉱物の特定の配列が認められるとは限らないようだ。

長石からカオリン鉱物に変る場合、ハロイサイトの管状結晶が定方向に配列しているらしい場合もみられるが、*fan like type* のカオリナイト結晶がモザイク状に成長している場合もある。雲母等は *psuedmorph* カオリナイトになっていることが多いが容積変化があるのでその結晶周辺部はかなりみだされてしまっている。ポーキサイト化したような母岩の激しい風化条件では、物質の出入りが激しく母岩の構造はほとんどこわされ別の構造が発達したりする。

一般に *micro* な構造と生成条件との間の一般関係は現在でははっきりしていない。

(湯村・東近農試) 母岩がその場で粘土化した時、深層の土圧下で、特に二次鉱物は図-3 e, f のように緻密な配向をとることは考えられるか。

(桑原) 最初、極めて粗間隙の状態で二次鉱物の配列が形成された後、土圧の増大が生じたような場合でない限り、*micro* な構造は変りにくいと考えられる。軽石のようなものは土圧によって風化後押しつぶされている場合があるが、一般に数 10 m 程度の土圧では粘土粒子のつくる *micro* な構造は、それ程簡単には折りたたまれることはない。セン断作用や *flow* したような部分では極めて効果的に平行配列が成長する。

(久保田・農技研) 示された粒子の水中堆積モデルは荷電のある粒子のモデルであるが、アロフエンの場合、または等電点堆積のモデルはどのようなものか、また、もしアロフエンの表層地質規模の水中堆積物を観察したことがあれば、それを示して欲しい。

(桑原) アロフエンが主体をなして構造を作ったような沈積物で、その後の変化(ハロイサイト化など)も受けずもとの構造を留めていると思われるものはまだみていない。アロフエンのように脱水過程で性状や形態が変りやすいものは観察技術上もむずかしい問題がのこされよう。また、等電点で電気2重層の電位が消えた点で、*eage charge* がどうなるかによって構造も変るであろう。

(久保田・農技研) 水中堆積物は圧縮により水が逃げないという条件では、その固相率・仮比重は深さによって異なるか、同じか。

(桑原) 非排水条件では圧縮しても圧密しないので固相率・仮比重は変らない。従って深さ、つまり荷重が増大しても変化しない。しかし、 $H_2O$  が粘土鉱物中に結晶水化して固相にとりこまれるとか、溶出作用などの化学的な変化は起り得る。また、浸透圧差などによる物理化学的な排水作用は起り得る可能性があるので注意しなけ

ればならない。

また、非排水の圧縮の場合、水の弾性圧縮分の容積変化は生ずる。間隙水圧は高くなり異常間隙水圧が発生し、固相部分が支える有効応力に比してこの水圧が大きくなるような場合にはせん断、流動化現象が発生しやすくなるので、実際にはこの面での影響の考察が必要となる。

(佐久間・北大農) 構造形成における歴史性、とくに diagenesis の意義について。

(桑原) diagenesis には、圧密・せん断変形 cementation、再結晶作用など多様な物理・化学的变化が含まれている。圧密・せん断変形の場合には構造を折りたたみ平行配列にかえて行く、間隙水中のイオンが leaching されて行くような場合、電気2重層の発達度によって粒子間力がかわると考えられるとまでも、一度作られていた構造はなかなか変化し難いようだ。特に active な粘土では分散・膨潤を示すことが知られている。

弱変成作用に近い再結晶作用を伴わない限り、一般の diagenesis の範囲では、粘土鉱物の basic lattice まで変化させることはまれであるとされているので、元来の粘土鉱物の集合体を作る基本構造は、化学的な作用によってあまり変わらないと考えた方がよい。

火山ガラスのような変質しやすい一次鉱物が多く含まれている場合は別である。

(佐久間・北大農) cementing material の効果、clay 粒子表面を coating している物質がある場合の構造 model はどのようなものを考えるか。

(桑原) cementation など一般に粘土粒子の間隙、接合部に沈殿・充填作用を行なう程度で構造を大きくかえる程のことは期待し難い。cementing material は粘土粒子接合部に link bond を形成し「構造を補強する」という説明がされている程度で、詳しいことはよくわかっていない。アロフエンのような物質が、概存の構造と結合して、特定の鉱物相の link bond を形成したり、粘土鉱物の out growth を促進したりすることも事実考えられる。

coating material の問題についてはあまりよく判っていない。有機物質などが存在すると粘土粒子間に bridge をかけたりして間隙量が大きくなるような構造ができることが示唆されている場合がある。

(岩田・農技研) 乾燥して行く過程(凝集過程)におけるメニスカスの役割をいかに考えるべきか。

(桑原) 一般に飽和した土の乾燥過程では、脱水量と土の収縮量が等しいので、粒子の接近、構造の折りたたみが効果的に行なわれていると考えられる。こうした、

脱水量と容積収縮量が対応し得るような限界点が、粘土粒子の hygrosopic layer 部分の水分量に近いところまで続くものがあり、極めて効果的に粒子の再配列と粒子接近が起っていることを示している。上記の限界点以上に乾燥すると若干の容積膨脹が認められる場合があり、これは結晶粒子をたわませていた水分が最後に失われ粒子が弾性的に回復するからと説明されている。このように、粒子間の水分は最後には粒子をたわめる程の力を発揮するようである。しかし、これが、メニスカスによるものと、吸着水膜層の作用とがどのような形で貢献しているのか明らかでない。

(佐藤・専修大) 電気2重層に与える温度の影響図で土粒子の表面電荷、イオン、水分子のどれが最も大きな影響因子となるのか、水分子の活性変化によるものだと思うが、その他は全く影響しないのか。

(桑原) 電気2重層の電気ポテンシャル $\psi$ は、その点におけるイオンの濃度に関係する。このイオン濃度は、粘土表面の電場によってイオンが引かれる力と温度によって与えられるイオンの拡散エネルギーなどのかね合いで決まると考える(Boltzmannの式)ので、温度が上昇すると拡散力が大となってイオンは遠くまで拡散しようとするからである。

もともと、図-1は、GouyとChapmanの求めた理論式の対象項だけを変化させた場合の $\psi$ の値の変化を解いて図示したものである。

(辻・大林組技術研) 土の物理的・工学的性質を論じる際、ゲルを骨格としたハチの巣構造中に水が存在して、その相互関係で考えていた方がいいのではないかと先生ごの提案で、私もまったく同感であります。これと関連して土のせん断圧密を論じる時、先生は土の成分として固めようとする成分と破壊しようとする成分を考えて、その成分の相対的大小で考えて行こうということでしたが、先生は以上の2成分は土中の何によると考えておられますか。

(須藤) 試料が $\sigma$ の一軸圧縮を受けるとき、圧力は $\sigma/3$ 、せん断応力は $\sigma/3$ の大きさとなる。つまり等方的外力を除いては、いつも外力により2つの成分が存在する。土の膨脹、収縮のような体積変化以外の形の変形には、いつも両成分が関与し、変形は主にせん断応力によるせん断歪の合計によって起きている。

(山本・東大農) ①一次元一般化フォークトモデルを三次元の問題に適用しようとする場合、どのように考えればよいか。②今日述べられた線形連続体の理論と、土の破壊の問題とどのように関連すると考えられているか。③土の塑性をどのように考えればよいか。

(須蔵) ①三次元の粘弾性は山本三三三氏の著書で取り扱われているが、私には十分読みきれない。私の報告は三次元的実験ではあるが、三軸試験機内での例というべきものだと思う。平面歪の条件などは、いま考えに入っていないから。②破壊の力学的条件は、Mises Schleicher の条件で弾性項が切れるという考えをとり、粘弾性体ではそれに粘性抵抗が追加される。問題は強度のばらつきであるが、これは Weibull 分布で処理すればよいと思う。Weibull 分布の物理モデルも調度よくシリーズにつながっている。強度試験値の Weibull 処理して平均強度を通常の安全率で割ると強度の最低値が得られる。③工学の分野では塑性とクリープを混合して使用している場合が多い。普通は土の歪ではクリープが主であって、塑性降状の挙動は  $W_L$  以下あたりの高水分のときに問題になると思う。

(八幡・東大農) 時間が超過して、総合討論の時間がなくなりました。最後に座長として、本日のシンポジウムを整理してみます。土壌構造は particle の arrangement という定義がありますが、中野さんは pore の面を、松口さんは solid と微生物を、有村さんは生物を介した構造の変化を述べられました。また桑原さんは、particle の orientation と organization の点から arrangement を整理され、須藤さんは構造をやや横目でにらみ、構造の連続的な breakdown を扱い、力学的取扱いの限界について考えを述べられたように思います。

最後にあと 1 人だけ発言を受けたいと思います。

(渡辺・千葉農試) 現在、土壌構造については、微細構造からかなり大きな土壌構造に対して、土壌構造という用語が用いられている。微細構造とは、どの位の大きさのものを示すのか、土壌構造の役割を力学的に担う最小粒径はどの位でしょうか。これを農業生産と関連の深いと思われる通気性、透水性との関連で考えてみて下さい。現在、ふつうに用いられている構造の定義で、日本にむくと思われる構造の分類に、コメントをつけて発表して下さい。

(木下・北海道農試) お尋ねのすべての事柄について公定的に認められたものがないので、個人的な意見にならざるをえません。この点、御諒承いただきたいのですが、しかし、学問の進歩は多くのばあい、個人的な意見で発展すると思っておりますので、あえて卒直に述べさせていただきます。

微細構造について； 一般にいう土壌構造と微細構造の区別をどのような基準でするかという問題は、これはあくまで相対的なものと受けとめて考えればよいと思う。土壌構造を macroscopic structure と考え、これは

肉眼で識別しうる構造と考え、微細構造を microscopic structure と考え、これを肉眼でなく顕微鏡に頼らなくては識別できない微細な構造と考えればよいと思う。

微細構造をどの位の大きさ、すなわち粒径のものを示すかという質問への答は、以下に述べるようにきわめてむつかしいことである。1950 年以降に土壌微細形態学 (soil micromorphology) が急速に発展し、Kubiena や Brewer によって広範で、しかも精密な体系ができ上ってきた。この学問のもっとも欠点とされる点は、これは形態を微細に解析しているが、通気とか透水のような機能の面と、直接的に結びつけるような方向で発展していないことである。この学問の影響で、土壌構造を微細に観察し、これと機能面と結びつけようとする風潮が生まれ、それから微細構造 (micro-structure) なる用語が生まれてきたような感じがする。

ご質問の通気、透水に関連の深い土壌構造の単位としての粒径の大きさは、従来からいわれている土片 (ped) の大きさとして、1~100 mm の粒径のものを考えればよいと思われる。微細構造というのは、いま述べたふつうの土壌構造の内部を構成しているより微細な構造単位をさしていると考えのが適切である。つまり、50 mm の粒径の土片でも、内部には微細構造があるとみるべきである。この微細構造は、工学的性 (コンシステンシー) に密接に関連しているものである。

土壌構造の分類について； 一般的にいう土壌構造の分類は、土片 (clod, fragment, ped など) の大きさ、形状を基にして行なわれており、系統的な分類としてもっとも古いのは Zakharov (1924) の分類であると思われる。これ以降いくつかの分類が提案されているが、いずれも Zakharov の分類を基にして、修正した分類となっている。前にも述べたように、土壌構造は肉眼的観察をもとにして識別するものであるが、大きな違いがあるはずはない。いままでの分類の基調となっているものは、まず土片の形状で分け、ついでその大きさで分けている。

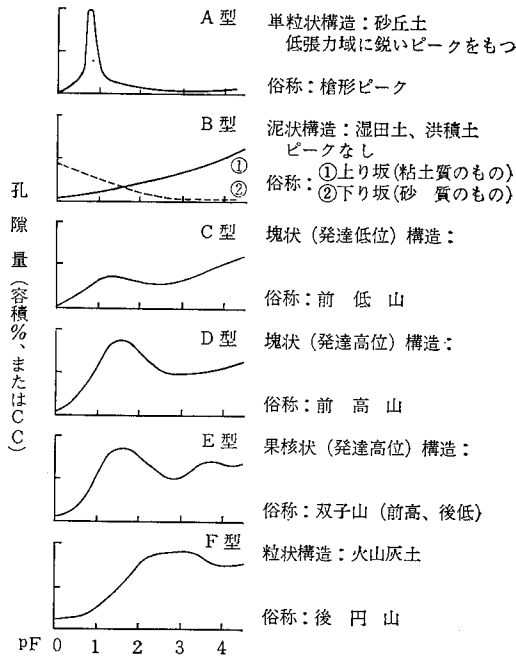
日本にむくと思われる構造分類は何か、という質問ですが、筆者がいままで提案された分類を集め (Zakharov の分類、ドクチャーエフ研究所〈ソ連〉の分類、Nikifoloff の分類、Kohnke の分類、Schefferら〈ドイツ〉の分類、アメリカ土壌調査スタッフの分類、Baver の分類、菅野の分類、近藤の分類、川口の分類、青峰の分類、林野庁による森林土壌の分類、農林省の各種事業〈施肥改善、地力保全など〉の分類、経済企画庁の土地分類調査の分類)、これを通覧・検討した結果、これらの集大成が現在提案されている FAO の第 7 次試案に盛り込



まれているように思われる。もちろん、分類法であるからこれにも日本の実状に合わない点が指摘され、日本向きに修正の必要がある。第7次試案については、農技研資料B8号(1964), pp. 543~548に記載されている。

以上のような土片による構造の分類は、あくまで形態による分類であって、土壌の機能面への結びつきが薄いものであり、これの欠陥を補う分類が必要であると考

える。筆者は、通気、透水、保水などの機能をヨリ判別できるような分類を試みたので、参考までにつぎに掲げておく。これをさらに定量的に区分けすれば、構造機能より土壌型の特長を明確にし、edaphicにみた土壌の構造機能を分類できると思われるが、どうでしょうか、ご批判下さい。



孔隙分布特性による土壌構造の分類  
(木下試案)



## 会 務 報 告

(昭和47年11月1日～昭和48年1月31日)

### 15周年記念出版編集委員会(第1回)

47. 11. 9 於・農技研

〔出席者〕 藍, 岩田, 小川, 粕淵, 河井, 川田, 国分,  
多田, 寺沢, 増島, 三好

土壤物理用語の分類およびデータ整理の項目について検討し, それぞれ項目毎の分担を決定した。

### 第13回事務局会議

47. 11. 15 農技研

〔出席〕 国分, 横井, 増島, 久保田, 仲谷, 長野間,  
根本

- 1 庶務・会計・編集関係経過報告
- 2 第3回評議員会提出議題の検討
- 3 第14回シンポジウムの準備について
- 4 その他

### 第3回評議員会

47. 11. 15 農技研新館会議室

〔出席〕 国分, 横井, 湯村, 木下, 寺沢, 中村, 岩田,  
竹中各評議員, 草野選挙管理委員長, 増島,  
久保田, 仲谷, 長野間, 根本各幹事

〔議題〕

- 1 経過報告(47. 6. 23以降)について承認された。
- 2 評議員選挙結果報告
- 3 総会提出議案(予算・決算)の検討
- 4 15周年記念出版編集委員会について, ほかの分野の事典の集語数および会員から広く意見を聞いて進めて欲しいとの意見があった。

### 5 新会長選出

会 長 木 下 彰  
副 会 長 佐久間 敏 雄  
編集委員長 前 田 隆  
会計監査 後 藤 計 二  
会計監査 塩 崎 尚 郎  
在京連絡係として 寺沢四郎  
根本清一

### 15周年記念出版編集委員会(第2回)

47. 12. 20 於・農技研

〔出席者〕 藍, 岩田, 小川, 河井, 川田, 国分, 増島,  
三好, 八幡, 山田

それぞれの分担に基づいた項目毎の内容案および編集方針などについて討議した。

## 会 務 報 告

(昭和48年2月1日～昭和48年7月5日)

昭和47年度より本会の事務局は北海道農試に移転し, 昭和48年2月7日に新旧事務引継ぎを行ないました。

### 第1回事務局会議

48. 2. 7

〔出席〕 木下, 佐久間, 前田, 桜田, 山崎, 竹内, 吉  
野

(前幹事: 根本, 長野間)

- 1 事務局の編成及び事務引継
- 2 編集関係一委員会構成及び出版計画
- 3 シンポジウムについて
- 4 その他

昭和47. 48年度役員

### 1 事務局構成

会 長 木 下 彰 (北海道農試)  
副 会 長 佐久間 敏 雄 (北大農学部)  
庶務幹事 吉 野 昭 夫 (北海道農試)  
会計幹事 竹 内 豊 (北海道農試)  
編集幹事 山 崎 慎 一 (北海道農試)  
桜 田 純 司 (北大農学部)

### 2 会長委嘱評議員(3名)

森 哲 郎 (道立中央農試)  
千 葉 豪 (北海道農試)  
泉 谷 毅 (道開発局土木試)

### 3 編集委員会

委 員 長 前 田 隆 (北大農学部)  
委 員 梅 田 安 治 (北大農学部)  
委 員 石 井 和 夫 (北海道農試)  
委 員 斎 藤 万之助 (土木試)  
委 員 古 畑 哲 (北海道農試)  
委 員 山 本 晴 雄 (道中央農試)

### 4 会計監査

後 藤 計 二 (道立中央農試)  
塩 崎 尚 郎 (北海道農試)

### 5 在京連絡係

寺 沢 四 郎 (農 技 研)  
根 本 清 一 (農 事 試)

### 第1回拡大幹事会

48. 4. 23 於・北農試

〔出席者〕 木下, 佐久間, 前田, 竹内, 山崎, 吉野,  
千葉, 森, 斎藤, 山本

## 〔議題〕

- 1 昭和48年2月1日以降の経過報告について承認された。
- 2 木下会長転勤にともなう今後の会の運営方針について。
- 3 シンポジウム関係 (第15回目)
  - 1) 日 時 7月27日 (金)
  - 2) 場 所 北海道農業試験場大会議室
  - 3) テーマ 土壌のコンシステンシーをめぐる諸問題
  - 4) その他 シンポジウムの運営方針について
- 4 富士岡評議員逝去あとの後任に、川口桂三郎氏 (京大農) を推薦, 決定。
- 5 その他, 会誌第28号の編集方針について。

## 第2回事務局会議

48. 6. 18 北海道農試

- 1 会誌の編集方針について
- 2 総会及び評議員会開催の準備, 日程, 議題, 旅費の支給について
- 3 シンポジウム開催準備の進行状況報告及び当日の運営方針  
役員, 機器の展示会, 懇親会について
- 4 その他, 投稿規定の一部改正, 執筆規定 (案) について

## 第1回評議員会

48. 7. 26 於・北農試

〔出席者〕 木下, 佐久間, 千葉, 寺沢, 国分, 鬼鞍, 森, 八幡, 前田, 竹内, 山崎, 吉野

## 〔議題〕

- 1 昭和48年2月以降の経過報告
- 2 15周年記念出版編集委員会経過報告
- 3 会費値上げについて
- 4 シンポジウム・総会準備
- 5 投稿規定の一部改正 (案) 及び執筆規定 (案) について
- 6 その他

## 総会決定事項

総会はシンポジウム当日, 議長に佐々木清一氏 (北大農) を選出, 議事に入り, 第1回評議員会で審議された事項が提案され全て原案通り決定されました。

会費値上げについては, 昭和48年度より下記のようになりました。

正 会 員	年	額	2,000 円
-------	---	---	---------

学 生 会 員	年	額	1,500 円
---------	---	---	---------

(大学院生を含む)

賛 助 会 員	1 口	年 額	10,000 円
---------	-----	-----	----------

購 読 会 員	会 誌 年 額	2,500 円
広 告 料	賛 助 会 員	実 費
	賛 助 会 員 以 外	実 費 の 5 割 増

## 新入会員 (48年7月31日現在)

(購 読)

静岡県農試海岸砂地分場 437-16 静岡県小笠郡浜岡町新田 5585

沖縄県農試 903 沖縄県那覇市崎山町 4-222

岐阜県農試環境部土壌科 501-11 岐阜市又丸

九大農図書掛 812 福岡市東区箱崎町大字箱崎 3575 の

1

(賛助会員)

国産遠心器KK 065 札幌市東区北6東2 卸センター内

(一 般)

軽 部 重太郎 茨城大農農業工 学 科 300-03 茨城県稲敷郡阿見町

堀 川 郁 朗 大起理化 116 東京都荒川区町屋 1-30-7

高 尾 英 男 帯広開発建設部 080 帯広市西4条南8丁目

河 野 英 一 東大農農業工 学 科 農 地 工 学 研 究 室 (学 生) 113 東京都文京区弥生 1-1-1

古 賀 潔 東大農農業工 学 科 農 地 工 学 研 究 室 (学 生) 113 東京都文京区弥生 1-1-1

下 田 健之介 鳥取農試 680 鳥取市橋本

上 坂 晶 司 道立中央農試 069-13 北海道夕張郡長沼町北長沼

矢 部 勝 彦 大阪府立大農 591 堺市百舌鳥梅町4-804

竹 内 豊 北海道農試 061-01 札幌市豊平区羊ヶ丘 1

萩 原 守 空知支庁南部耕地事務所 069-15 夕張郡栗山町松風3丁目

山 崎 慎 一 北海道農試 061-01 札幌市豊平区羊ヶ丘 1

吉 野 昭 夫 北海道農試 061-01 札幌市豊平区羊ヶ丘 1

加 藤 正 青森りんご試 036-03 黒石市大字牡丹平字福民

浜 崎 忠 雄 農技研 114 北区西ヶ原 2-1-7

藤 井 信一郎 689-06 鳥取県東伯郡泊村大字原

松 尾 良 満 佐賀農試 840-23 佐賀郡川副町南里

五十嵐 孝 典 九州農試畑作部 885 宮崎県都城市横市町 6644

浅井 甲子男	たばこ試 891-01 鹿児島市上福元町 5648-2	塚本 吉郎	広島県試 729-24 広島県豊田郡安芸 津町三津 2835
長谷川 周一	北大農 060 札幌市北区北9西9	徳富 雅博	790 松山市高砂町3丁目3-2 県営ア パート7号
佐藤 照男	県立農業短大 010-04 秋田県南秋田 郡大瀧村官有地	松行 輝夫	中部農林振興局 880 宮崎市橘通り東 1丁目9-10
平山 力	茨城農試 310 茨城県水戸市具和町 127-184	手島 三二	府大農 590 堺市茶山台27団地3-30 号館203号
前田 要	道立上川農試 078-02 旭川市永山町 302	小林 荘司	道立上川農試 078-02 旭川市永山町 8-69
退会者(48年7月31日現在)			
本荘 吉男	茶試枕崎支場	東海林 覚	山形県蚕試 995 村山市楯岡
有田 昌雄	鳥取農試	栗原 浩	鳥取大農 680-11 鳥取市湖山町1-1
渡辺 信二	山形農試	近野 雅子	990 山形市妙見寺 434-14
金子 良	秦野市鶴巻	横山 偉和夫	065 札幌市東区苗穂町13丁目13
中原 孫吉	千葉大園芸	島田 俊介	土木化学コンサルタント 113 文京区 本郷3-15-1 美工ビル
新井 真杉	(埼玉)	野村 憲二	空知支庁北部耕地出張所 078-23 雨 竜郡北竜町字和28-2
林 堯	(東京)	板川 秀雄	山梨農試, 山梨農技研の移転にとも ない。 470-01 北巨摩郡双葉町下今井1100
西川 光一	(石川)	徳永 雄治	
小倉 祐幸	秦野たばこ試	山泉 辰雄	
逝 去		夜久 孝	
大長 正文	静岡農試	飯田 周治	富山農試, 同機械化実験農場移転にと もない。 931-11 富山市吉岡1124-1
高橋 功	新潟農試	久津那 浩三	
富士岡 義一	京大農	滝川 圭吾	
〔住所変更〕(新住所のみ記載)(昭和48年7月5日現 在)		中村 茂男	
江川 友治	農技研 114 北区西ヶ原2-1-7	新村 善男	
木下 彰	九州農試 833 福岡県筑後市和泉496	山森 鉄郎	
佐久間 敏雄	北大農 060 札幌市北区北9条9西丁目	野口 純隆	鹿児島農試 891-01 鹿児島市上福元 町5500
平島 利昭	道立根釧農試 086-11 標津郡中標津 町東1南6	福桜 盛一	島根大農 690 松江市西川津町1060
丸山 明雄	林試東北支場 020-01 盛岡市下厨川 字鍋屋敷72	藤沼 善亮	農政局肥機課 100 千代田区霞ヶ関1- 2-1
出井 嘉光	北海道農試 061-01 札幌市豊平区羊 ヶ丘1	桜井 俊武	県農試 893-16 鹿児島県肝属郡串良 町細山田農試大隅支場専技室
蜂須 信治	埼玉県蚕試 360 埼玉県熊谷市大字石 原3-12	松井 健	地域開発コンサルタント 102 東京都 千代田区麴町1-6 相互第3ビル
佐藤 末男	富士平工業研 113 文京区本郷6-11-6	佐藤 吉之助	280 千葉市都町843
中川 昭一郎	農土試 254 平塚市八幡1943	長谷川 新一	野菜試 514-01 津市一身田大古曾1454
西山 信一	公害センター湘南支所 253-12 神奈 川県高座郡寒川町宮山4271	永石 義隆	農土試佐賀支場 840 佐賀市日の出2- 1-1
加藤 芳郎	静岡大農 420 静岡市大谷836	湯村 義男	野菜試環境部 514-01 津市一身田大 古曾670
吉川 重彦	三重農技センター 514 三重県津市安 東町1330	中川西 弘之	草地試 329-27 栃木県那須郡西那須 野町
森田 修二	京都府大農 606 京都市左京区下鴨北 園町80		

- 吉 田 栄 一 南九州化学工業KK 884 宮崎県児湯  
郡高鍋町蚊口浦 5029
- 黒 田 正 治 九大農農工科 812 福岡市東区箱崎町
- 住 田 章 県立農短大農工科010-04 秋田県南秋  
田郡大瀧村官有地西 2-4 短大公舎A-8
- 瀬野尾 昭 吾 山形県立農試 990 山形市鉄砲町 2 丁  
目 10-75
- 宮 内 定 基 愛媛大農 790 松山市樽味町 118
- 松 居 勝 広 北大農 060 札幌市北区北 9 西 9
- 岸 洋 一 土木試験所 062 札幌市豊平区平岸無  
番地
- 岡 本 恭 二 九州農試草部 861-11 熊本県菊地  
郡西合志町須屋
- 藤 谷 武 弘 567 大阪府茨木市北春日丘 2 丁目 11  
~11
- 苔米地 勇 作 県立農短大 010-04 秋田県南秋 田 郡  
大瀧村西 2 丁目 短大宿舎
- 久保田 正 光 農技研 114 北区西ヶ原 2-1-7
- 鬼 鞍 豊 農事試 365 鴻巣市大字鴻巣 1227
- 有 村 玄 洋 県綜合農試 880-12 宮崎県宮崎 郡 佐  
土原町大字下那珂字峰前 5851
- 香 山 達 男 府林試 629-11 京都府船井郡和知町  
字本庄

### 新刊紹介

#### 土質工学の基礎 ——土の力学的挙動——

山崎不二夫・山内豊聡監訳  
R.N.Yong, B.P. Warkentin 著

土に関する研究は、これまで多くの分野で行なわれてきた。すなわち荷重に対する挙動を主として研究する土質力学や、植物生育に関連して土壌水や土壌構造の問題を取扱う土壌物理学や粘土や、コロイドの化学的性質、肥料養分の吸収や保護に関連した方面を扱う土壌化学の分野などでは、それぞれに長い豊富な歴史を持っている。

しかしこれまでの土の研究において、お互いの分野での交流をはかる体系的な試みは、必ずしも十分であったとはいえない。しかし今回のYongとWarkentinの労作は土の挙動に関する研究を単に土の力学のみの見地だけではなく、土壌物理学、土壌化学、鉱物学、地質学など多くの分野からの境界領域の体系として整理した画期的なものである。

本書の特徴の一つとして、砂質土と対比しつつ、粘質土を取扱い、粘土・水系としての物理化学的認識に立ち、粘土の挙動を一貫して検討した点があげられる。このほか土中の水分の移動、収縮と膨潤、土の凍

結などについても特徴ある整理と展開が認められる。

本書は土の研究者はもちろんのこと、土の性質をもっと知りたい現場技術者、学生などのテキストとしてまことに恰好のものといつて差支えない。山崎不二夫、山内豊聡両氏が本書の監訳の言葉の中で「……テルツァギの土質力学は大幅に書き直さるべき時期にさしかかっている。本書は種々の分野で得られた土の物性、とくに土の挙動に関する今日までの知見を整理し体系づけ、まさに新しい土質力学を作り出す萌芽を感じさせる内容を持っている……」と述べられたのはまことに適切な表現という外はない。

最後に本書の各章の配列を記しておこう。

第一章 序論、第二章 土の鉱物成分の性質、第三章 粘土の物理化学的特性、第四章 レオロジーと塑性、第五章 土の構造、第六章 土の水分、第七章 粘土の体積変化、第八章 圧縮と圧密、第九章 砂質土の強さと強度論、第十章 粘性土の強さ、第十一章 土中の水分移動、第十二章 土の凍結と永久凍土

体 裁 B 5 判, 434 ページ

定 価 2,400 円

発行所 鹿 島 出 版 会

発 行 47 年 6 月 10 日

(農林省農技研 岩田進午)

## 土壤物理性測定器

実容積測定装置（孔隙率測定装置）

土壤透水性測定装置

土壤団粒分析装置

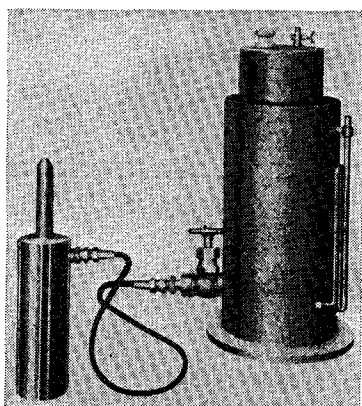
土壤pF測定装置

土壤通気性測定器（Gasometer）

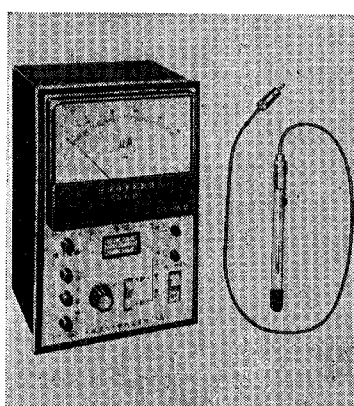
土壤酸素拡散計（Oxygen Diffusion Rate Meter）

土壤圧膜装置

テンシオメーター



土壤通気性測定器



土壤酸素拡散計

その他、土壤物理性測定、土壤水分測定に関する製品を各種取り揃えています。

## 大起理化工業株式会社

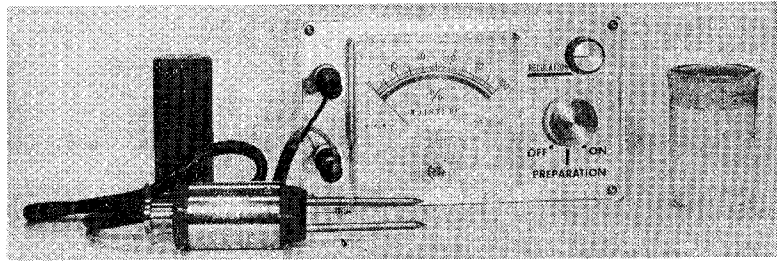
東京都荒川区町屋 2-16-2

電話 03 (892) 2191 (代表)

[水分]  
理研式簡易水分計

[pH]  
理研式簡易 pH 計

土壤調査と農産加工に最適



- ◎本器は現場的であり、実用向であるので欧米各国にも  
広く輸出され好評を得ております。
- ◎携帯用で、いつ、どこでも、だれでも利用できます。

理研科学測定器研究所

東京都足立区伊興町前沼1254  
〒121 電話899-4874・897-8860

H-65S型土壤 pF 水分測定用  
冷却装置付高速遠心機

特長

1. 自然原土のまま測定できます。
2. pF 2.0~4.2まで測定できます。
3. 大容量100ml, 4本架
4. 土壤水は各資料管ごとに採取出来ます。
5. 自然原土の土壤を採土器に組合せることによつてそのまま連続的に、pF 値が測定できます。
6. 資料管を水平に位置して遠心分離するため正確な測定が出来ます。
7. 遠心室使用温度範囲

0℃~+25℃ 仕様 最高回転数 13500 r. p. m.

ローター半径 77mm

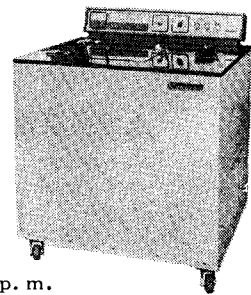
架数 100ml×4本架

電動機 100V 2.2KW 直流複巻式

冷凍機 100V、又は、200V 600W 全密閉型

価格 本体 590,000

ローター 360,000



国産遠心器株式会社

本社 東京都台東区台東2-3-9 TEL 東京03-833-5631

出張所 札幌、京都、北九州



## 原稿執筆規定

- 1) 文体 平かな漢字混じりの横書き口語文として、できるだけわかりやすい表現にする。
- 2) 術語以外はなるべく当用漢字を用い、かなは現代かなづかいとする。
- 3) 句読点、括弧、ハイフンには1画を与える。数字・ローマ字は1画に2字を充てる。
- 4) 数字 アラビア数字を用い、漢数字は普通の字句についてのみ用いる。
- 5) 外国人名は欧字とする。最初の文字のみ大文字とする。
- 6) 外国地名はカタカナを原則とするが、必要に応じて欧字を用いる。
- 7) 字体の指定は、ゴシック、イタリックのように鉛筆で下線を書く。紛らわしい文字は誤植防止のための指示を鉛筆で記入する。(例：ℓーエル、1ーイチ、Iーアイなど)
- 8) 術語 原則として文部省編：学術用語集による。普通に用いられる外国語の術語、物質名などはカタカナで書く。
- 9) 略字、略号を使うときは、はじめにそれが出る個所で正式の名称とともに記す。例：液性限界 (L L)
- 10) 数量の単位は原則としてCGS制を用いる。
- 11) 表・図・写真などは必要最小限とし、同一事項を表と図に重複して示すことは避ける。
- 12) 表・図・写真は本文のあとに1枚ごとに原稿用紙あるいはこれとほぼ同大の別紙に書き、またははり付ける。1枚ごとに著者および表題を鉛筆で略記して事故の発生を避ける。本文中欄外に挿入位置を指定し空白はあけない。ただし指定の位置にはならないことがある。
- 13) 空欄の多い表は避け、注を使うなどして紙面の節約をはかる。
- 14) 図は上質白紙または淡青色方眼紙に黒インキで明確に書く。トレースに適しない図は書き直しを要求することがある。図中の文字は鉛筆でうすく記入するにとどめる。
- 15) 図は刷り上がりの大きさを指定し、1.5~2倍長ぐらい大きく書く。ただし必ずしも指定の大きさにならないことがある。図中の字の大きさおよび線の太さは刷り上がりを考慮して定める。
- 16) 表の番号は「表-1」のようにし、説明とともに表の上に記入する。
- 17) 地図には定尺をつけ、何万分の1などの縮尺を指定しない。
- 18) 文献は本文のあとにまとめて通し番号順に書く。通し番号は引用の順序または著者名のABC順とする。本文の引用個所の右肩に番号を片括弧で小さく入れる。論文名は記載しない。

### 土壌物理研究会会則

- 第1条 本会は土壌物理研究会と称する。
- 第2条 本会は土壌の物理性を中心とする試験研究の発展と農業技術への貢献を図ることを目的とする。
- 第3条 本会はその目的を達成するため次の事業を行なう。
- 1 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
  - 2 土壌の物理性 (Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan 会誌という) 並びにその他の印刷物の発行
  - 3 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
  - 4 その他本会の目的を達成するため必要な事業
- 第4条 本会の会員は正会員、学生会員及び賛助会員、購読会員の4種とする。
- 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 | 2,000円 |
| 学生会員 | ク |   | 1,500円 |
- (大学院生を含む)
- |      |      |         |
|------|------|---------|
| 賛助会員 | 1口年額 | 10,000円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | 2,500円  |
| 広告料  | 賛助会員 | 実費      |
- 第6条 賛助会員以外実費の5割増  
本会に次の役員をおく。任期は2年とし、選出方法は別に定める。
- (1) 会長1名、副会長1名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (2) 評議員  
イ 15名 正会員から互選される。  
ロ 3名以内 会長が委嘱する。
  - (3) 会計監査 2名  
正会員の中から評議員会によって選出される。
  - (4) 幹事 若干名  
会長委嘱
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- 第8条 本会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会  
正会員の中から評議員会によって選出され、本会の評議員選挙を管理する。
  - (2) 編集委員会  
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、会誌その他の印刷物の編集に当る。
- 第9条 本会の経費は会費その他の収入をもってあてる。
- 第10条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。

**土壌の物理性 第28号**

(会 員 配 布)

1973年11月1日 発行

発 行 土 壌 物 理 研 究 会

札幌市豊平区羊ヶ丘1

北海道農業試験場内

電 話 851-9141

振替口座 小樽 19109