

規定する因子として、土懸濁液の分散状態と水中沈底容積、分散度、粗粒団と微粒団の粒団化度とその安定度および透水度の測定法を検討した。次に土壌の緊硬度に関連ある諸性質として針入度、圧縮度、固結度および連結度、緊硬限界の各測定法を検討した。その結果、筆者がここに掲げた測定法は何れも Soil tilth の評価、判定法として有意義であることを知った。

筆者は本測定法を用いて、干拓地の重粘土の物理性の改良法としての土壌改良剤の使用、牧草の栽培および土壌の乾湿処理の反復の効果^{15,16)}を、又干拓地土壌の生成過程に伴う土壌の物理性の変化^{17,18,19)}を調べた結果、何れの場合にも Soil tilth の土壌間差異および変化の実態を明確に把握、解明できることを認めた。

文 献

- 1) Bayer, L. D. & Rhoades, H. F. : *Jour. Amer. Agron.*, **24**, 920-930 (1932)
- 2) Bayer, L. D. : *Soil Physics*, London (1948)
- 3) Krynine, D. P. : *Soil Mechanics*, New York

- & London (1947)
- 4) Middleton, H. E. : *U. S. Dept. Agr. Tech. Bul.*, **78** (1930)
 - 5) Puri, A. N., & Puri, B. R. : *Soil Sci.*, **47**, 77 (1939)
 - 6) Russell, E. W., & Tamhane, R. V. : *Jour. Agr. Sci.*, **30**, 210 (1940)
 - 7) Vageler, R., & Alten, E. : *Zeit. Pflanz. DunG.*, **22A**, 21 (1931)
 - 8) 石井訳 テルツアギー : 土質力学 (1940)
 - 9) 山中 : 土肥誌, **15**, 11~27 (1941)
 - 10) 農業改良局研究部 : 土壌分析法, 土壌肥料資料24号 (1956)
 - 11) 米田 : 土肥誌, **26**, 485~8 (1956)
 - 12) 米田・河内 : 土肥誌, **27**, 345~8 (1956)
 - 13) 米田・下瀬・河内 : 岡山農試臨報, **54**, 1~20 (1956)
 - 14) 米田 : 土肥誌, **27**, 123~7 (1956)
 - 15) 米田 : 土肥誌, **29**, 399~402 (1958)
 - 16) 米田・河内 : 土肥誌, **29**, 437~40 (1958)
 - 17) 米田 : 土肥誌, **28**, 416~20 (1958)
 - 18) 米田 : 土肥誌, **30** (予定)
 - 19) 米田・河内 : 土肥誌, **30** (予定)

1960 2A

土壌構造とその測定法

(京大農学部土壌学研究室)

喜 田 大 三

1. はじめに

私たちは昨年7月京大土壌物理研究会を結成し、毎月1回研究例会をひらき、本年7月に第10回の例会をもつに至った。研究会員は芸農化学科土壌学研究室と農林工学科土地改良学研究室の有志の者からなり、例会で報文の紹介あるいは各自の研究発表を行なっている。

私たちは、土壌物理を研究するには、土壌構造を理解しなければならぬと以前から考えていたので、第1回例会には Lambe, T. W. (1953) の *“The structure of inorganic soil”* (Proc., A. S. C. E., Vol. 79) をテキストにして討論会をひらいた。だが、私たちは構造についてはつきりした概念をつかむことができなかつ

た。すなわち、構造をお互いにあいまいな意味に解していることを知った。

その後、土壌構造の概念をはつきりさせるようにつとめ、第10回例会には *“かんがい期における水田の土壌構造の変動”* をテーマにして、構造の解説をこころみた。

ここでは、構造について教科書的に記述するのではなく、とかくあいまいに理解されている構造についてややだいたんな見解をのべ、皆様に検討していただきたいと思っている。また、その見解にもとづく構造の測定法のあらましをかかげる。

なお、編集委員会から *“土壌構造と粒団分析”* について投稿せよとのことであつたが、本稿の内容は *“土壌構造とその測定法”* にふさわしいので、表題を変更した。

2. 土壌構造とはなにか

研究者により、土壌構造 (soil structure) なる術語は異なる意味に解釈されている。

すなわち、構造の定義はつぎの3つに大別できる。

(1) 土壌粒子の粒団化 (aggregation) あるいは粒団 (aggregate)

(2) 土壌粒子の配列 (arrangement)

(3) 土壌粒子、間げきによりえがかれる土壌の構成

(1)(2)でいう土壌粒子とは一次粒子 (基本粒子のレキ、砂、粘土など) および二次粒子 (一次粒子の集合体) であり、(1)の土壌粒子とは一次粒子のみをさす場合、一次粒子および二次粒子の両者をふくむ場合がある。

かように構造の定義はきわめてあいまいであるが、構造の研究はつぎの3つに大別することができよう。

(a) 構造の構成粒子である一次および二次粒子の研究

(d) 土壌粒子相互の結合によりもたらされる安定性の研究

(c) 土壌粒子の配列によりもたらされる孔ゲキ (間げき) の研究

なお、結合物質 (安定性物質) の研究は(a)の研究にふくめる。

そこで私は構造をつぎのように解している。「土壌粒子 (一次粒子および二次粒子) が各種の結合と配列とによつて立体的にえがく土壌の構成状態」この定義によると、一次粒子および二次粒子からなる構造もあれば、二次粒子自体もまた構造をもつ。

さらに、構造の本質的な性質は構造の安定 (stability) 性と、構造の孔ゲキ性 (porosity) とである。安定性は相対的な性質であり、破壊力の種類によつて異なるが、

土壌粒子相互の結合状態をあらわす。また孔ゲキ性は土壌粒子の配列による孔ゲキの状態を示す。なお、粒子の配列状態をあらわすのに構造の配列性という概念もある。ここでは配列性は一応孔ゲキ性にふくめておき、配列性は将来土質工学の部門で重要視されるであろう。なお、構造の安定性と孔ゲキ性とは互いに密接に関連しあっている。

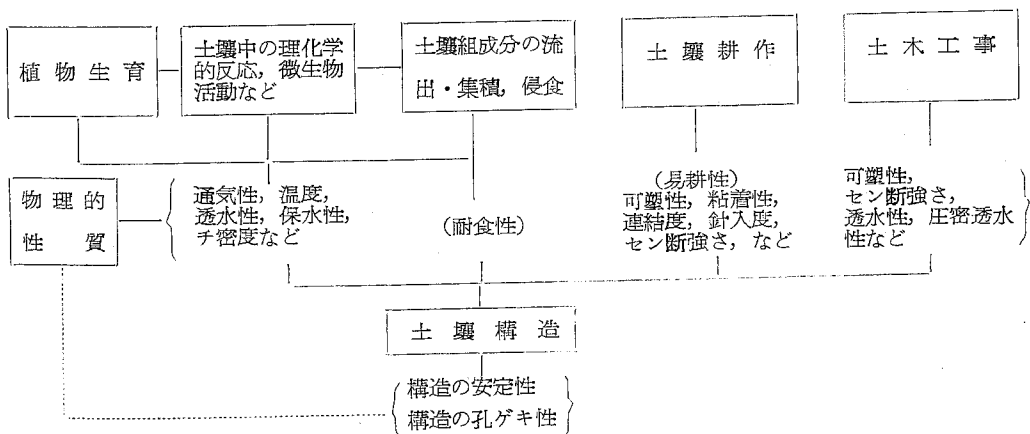
つぎに、構造の研究は前述の(a)(d)(c)の研究であつて、(b)の研究は安定性を、(c)の研究は孔ゲキ性を主として研究することになる。また(a)の構成粒子の研究は同時に構造の安定性、孔ゲキ性の研究に関係している。

3. 無構造とはなにか

平素「無構造」という言葉を口にしたり、聞いたりする。しかし、すべての土壌は構造をもっている。そこで無構造も構造であるとの診説もできる。よく調べてみると、無構造とは肉眼的な粒団 (約0.2~0.5mm以上の粒団) をもつ粒団状構造に対する反語であつて、正確には無構造を無粒団構造とよぶべきであろう。

無構造という言葉をつかうのは、構造は粒団化あるいは粒団であると解しているからである。たしかに粒団は構造に重要な影響をあたえる。たとえば、粘土質土壌において、massiveな無粒団状構造と肉眼的な粒団をもつ粒団状構造とでは、土壌の物理的性質たとえば透水性、セン断強さなどは全くちがう。

また、どのような粒径範囲の粒団より構成されている土壌が作物の生育に適しているかということは研究されている。そして、粒団の大きさ、形状、配列などにより規定される孔ゲキ性と、粒団の安定性 (主として耐水性) から推定しうる構造の安定性とが作物生育上問題にな



第1回 農耕地における土壌構造を中心とする物理学の一体系

る。もつと正確には、構造にもとづく物理的性質が作物生育に影響する。そこで次項にすすもう。

4. 農耕地の土壤構造と物理的性質との関連

「土壤の物理的性質を調べる」というとき、物理的性質として一体いかなる項目を測定するのであろうか。

いま、土壤構造を中心として、農耕地における構造と物理的性質との関係の概要を模式的に第1図に示す。

たとえば、透水性は物理的性質であつて、その研究目的的研究対象によつてちがう。そして透水性は構造の孔ゲキ性に大いに影響をうけるが、長期かんがい条件下では孔ゲキ性の変動を考慮しなければならぬから、当然水中における構造の安定性を調べる必要もある。

また、傾斜地で降雨に対する土壤の耐食性を研究する場合、降雨に対する粒団の安定度を調べる。この場合、粒団の安定度は構造の本質的な物理的性質である。農業耕作では土壤の凝集力を測定して易耕性をしるが、この測定は構造の本質的な性質を間接的に調べていることになる。

すなわち、土壤の物理的性質は、構造の本質的な、あるいは構造により規定される物理的性質をふくむ。

応用面では、構造を直接測定するより物理的性質を分析する方がより意義がある場合が多い。だが、第1図に示した構造と物理的性質との関連からわかるように、物理的性質を研究する際には土壤構造を理解することが基本的に重要である。

5. 粒団とはなにか

「構造は土壤粒子による土壤の構成状態」であるから、構造の構成単位の土壤粒子について考察してみよう。

レキとか粗砂よりなる自然条件下の土壤では、粒子は個々に分離しており、いわゆる単粒状構造をもつ。だが、粘土や有機質・無機質コロイドの結合物質をふくむ土壤では、一次粒子は集合して二次粒子になつている。この二次粒子を粒団とよぶ。なお、粒団を団粒ともいう。

アメリカ土壤学会術語委員会 (Soil Sci. Soc. Am. Proc., 13, 547(1949)) は粒団をつぎのように定義している。

粒団 (aggregate) : 一単位として機械的に行動する土壤粒子の集合体。

構造的粒団 (structural aggregate) : 構造の一般的な構成要素であり、自然状態における基本的な粒団。

耐水性粒団 (water-stable aggregate) : 水による破壊に対して抵抗性をもつ粒団。

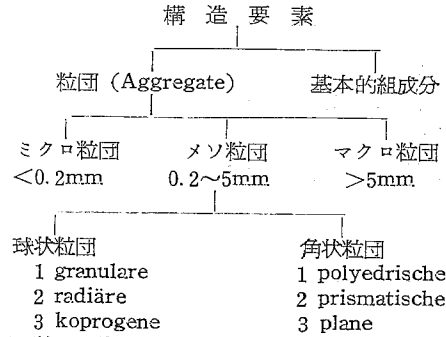
土塊 (碎塊) (clod) : 普通耕土層にみられる粒団。土塊は耕作などの人為的な作用でつくられるから構造的粒団ではない。

さて、構造的粒団と土塊とをどうして区別するのであろうか。構造的粒団は未耕地で自然に生成した粒団であるが、耕地に構造的粒団がないといえまい。ただ、耕地の粒団 (土塊) は未耕地の粒団 (構造的粒団) に比べ、その大きさや形状などが激しく変化しているのだから、耕地では粒団 (土塊) を構成しているより基本的な単位の耐水性粒団が重要視される。

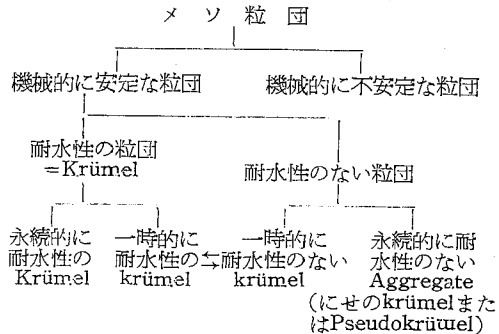
つぎに、*crumb* (*Krumel*) とよばれる粒団はどんなものであるのか。*aggregate* と *crumb* とは同意語でなく、*crumb* は *aggregate* の一種であり、*crumb structure* (*Krumelstruktur*) は農業上適した土壤条件をあたえる。

crumb について明確な定義はないが、最近 *Kullmann* は *Krumel* を模式図にて定義しているのだから第2図にかかげる。0.2~5mm の大きさのメソ粒団のうち、機械的に安定であり、さらに耐水性をもつ粒団を *Krumel* とよぶ。この場合、風乾状態の試料をふるい分けて機械的に安定あるいは不安定であるかをきめ、つぎに風乾粒団を真空状態 (40mm 水銀柱に相当する) にて毛管水で湿らせたのち、水中で安定 (耐水性) であるかどうかをしらべている。

(1) 形態的な観察によると



(2) 粒団の安定性によると



6. 現地で土壤構造をどんな方法で分類するのか

構造をただ一つの指標で分類することはできない。しかし、現地調査では普通肉眼的な粒団によつて構造を判定している。

粒団状構造：球状あるいは粒状 (*granular, crumb*) 0.2(0.5)mm~5(10)mm; 塊状 (*cloddy*) 約 1~5(10)cm; 大塊状 (*lumpy*) 約5(10)cm以上; 板状; 柱状。

無粒団状構造：単粒状 (*single grain*); 粉状 (*pulverulent*) 約0.2(0.5)mm以下の粒団; 固 (団, 集) 塊状 (*massive*); 泥状 (*buddled*)。

この肉眼的粒団にもとづく構造の分類法は、実は構造の構成因子の土粒子の形、大きさ、明確さなどを分類基準にしており、土粒子の配列性、安定性、土粒子自体の孔ゲキ性などは一応基準からはふいている。しかし、この分類法は構造を推定し、さらに物理的性質を考察するのに役だつてあろう。ただし、耕地の粒団 (土塊) はのちにのべるように激しく変動しているから、特に耕地では肉眼的粒団による構造の分類は経時的な観点で行なわれなければならない。

なお、肉眼的粒団と耐水性粒団とは量的に直接関係をもたない。そして単粒状構造および一部の泥状構造以外の構造をもつ土壌では普通耐水性粒団が認められる。

また、青峰²⁾はかんがい期の水田耕土層の構造をつぎのように分類している。

一次構造：ノリ状、砂層状。

二次構造：粒団状、パン状、管状。

私たちは乾田 (水田) 耕土層の構造の調査^{3) 4)}、耐水性粒団の研究⁵⁾ からえた見解にもとづいて、第3図に構造の模式図の概要をかかげる。なお、泥状・固塊状構造は青峰の分類法により細分できよう。

Deboody⁶⁾ は土壌構造を全孔ゲキ量、粒団、割れ目などにより分類する案を提出しており、現地の構造を分類するのにこのアイディアは参考にならう。

7. 土壤構造は絶えず変動している

構造はダイナミックに変化していることを忘れてはならない。この変動は未耕地よりも既耕地において激しい。

構造の変動性を支配する因子は内的条件の土壌構成組成成分の動的性格と、外的条件の気候、植生、人為的作用とに大別されよう。そして、これら因子の研究により構

造の変動性を明らかにすることができる。

第3図には乾田耕土層における肉眼的粒団による構造の変動性を図示しているが、私たちは最近土壌中の結合物質の研究から、乾田耕土層の構造の変動性の機構についてきわめて興味ある結果をえた⁷⁾。すなわち、少量の結合物質の質的变化によつて構造の安定性、孔ゲキ性、さらに保水性、透水性などがはげしく変化することを明らかにした。

構造が激しく変動しているから、構造の安定性あるいは粒団の安定性が重要視され、また盛んに研究されているのである。

また既に述べたように、土壌の物理的性質は構造と密接にむすびついているから、構造の経時的な変動は同時に物理的性質の経時的な変化としてあらわれる。

8. 土壤構造はどうして測定するのか

断片的ではあるが構造という概念をこねまわしてきた。「さて、土壌構造をどんな方法で測定するのか」と問われると簡明に答えられない。単一の方法で構造を測定することができないからである。

だが、構造の測定はつぎの3つの項目に大別できる。

(a) 構成粒子および結合物質の分析。

(b) 構造の安定性の測定。

(c) 構造の孔ゲキ性の測定。

この3項目は「2. 土壌構造とはなにか」の箇所でも述べた構造の研究項目とむすびついている。そして、この3項目の測定により得た結果を総合して、土壌構造を明らかにしようと考えられる。さて、研究目的によつて、いかなる項目を測定するかを決め、つぎにその項目について後述の分析法のうち適当な方法をえらんで構造を測定すればよろしい。

おのおのの測定項目について簡略に説明しておく。もし詳しく調べられる場合には文献を参照して下さい。

(8-1) 構成粒子および結合物質の分析

乾式(空気中にて)フルイ分ケ法 (京大農芸学実験書⁸⁾によつて、肉眼的な粒団の粒径分布を測定する。しかし自然条件下の土壌特に耕土層の土壌では肉眼的な粒団は激しく変動しているため、より基本的な耐水性粒団を分析するのがよい。すなわち、湿式(水中にて)フルイ分ケ法 (京大農芸化学実験書⁸⁾、農林省土壌肥料全編⁹⁾により耐水性粒団の粒径分布を測定する。また、水中洗浄法、水中沈降法によつても耐水性粒団を測定することができる。(京大農芸化学実験書⁸⁾) なお、本分析用の

試料の採取、調整、分析前の前処理について現在なお論議されている。

肉眼的粒団、耐水性粒団は一次粒子により構成されており、自然界ではこの粒団もその一次粒子に分解されることもあるから、一次粒子の粒度分布を測定する必要がある。

また、粒団の構成組成成分として、結合物質のうちすくなくとも有機物、活性(遊離)鉄・アルミナ・珪素を分析しておくようにしたい。なお、結合物質の分析は後述のように構造の安定性を判定するのに役立つ。

ところで、構成粒子を分析しても、粒子の結合や配列の状態はわからない。この状態はつぎの安定性と孔ゲキ性との測定によつて認識することにしよう。

(8-2) 構造の安定性の測定

農耕地の構造の安定性は一般に粒団の安定性より推定している。粒団は風、降雨、浸透水、耕作などにより破壊されるから、いかなる破壊力に対する粒団の安定度を測定するかによつて、その測定法は当然異なる。なお安定性は相対的な概念である。

乾式フルイ分け法でフルイ分け回数をますことにより機械的破壊力に対する粒団の抗抵性を調べる。(Chepil 10)

水中フルイ分け法など(前述)によつて耐水性粒団の粒度分布を測定するとともに、粒団の耐水性をも測定することができる。

水中振動法(Gishら²⁾;米田・河内²⁾;川口・喜田¹³⁾では、振トウビンに粒団を入れ、水を加えて振トウして、水中でのカキマゼ作用に対する粒団の安定度を測定する。

水滴落下法(Mc Calla¹⁴⁾;Cernudaら¹⁵⁾では、降雨に対する粒団の抗抵性を調べる。

透水性法(Kullmann¹⁾;Reeve¹⁶⁾では、浸透水に対する粒団の安定度を測定する。

化学的処理法(Emerson¹⁷⁾では、化学薬品をいつかつて粒団の安定度を研究している。

針入度、連結度、圧密セン断強さ、可塑性などの測定により土粒子の結合状態にもとづく構造の安定性について知見を得ることができよう。

結合物質の分析(川口・喜田¹⁸⁾ 土壌中の有機無機コロイドの結合物質を分析することは土粒子の結合力を間接的に判定する有力な手段である。

さらに、構造は経時的に変動しているから、構造の経時的な安定性を今後大いに研究する必要がある。

(8-3) 構造の孔ゲキ性の測定

土粒子の配列状態ならびに孔ゲキを直接顕微鏡でみることもできる。これはマイクロな分析法である。

さらに、マクロな方法としてつぎのような方法があげられる。

容積重法では、土壌の容積重、真比重から全孔ゲキ量を測定する。

実容積法(農林省:土壌肥料全編⁹⁾;美園¹⁹⁾では、容積重法とちがつて、湿つた土壌についてボイルの法則を応用して孔ゲキ量を算出する。

吸引圧法(農林省:土壌肥料全編⁹⁾)ではある吸引圧で排出される水分の容積を測定して、吸引圧に相当する孔ゲキの粒径や孔ゲキ量を算出する。

ケロシン浸漬法(川口・虎谷²⁰⁾)により粒団内孔ゲキ量を測定し、さらに fult sample の全孔ゲキ量から粒団内孔ゲキ量をさし引いて粒団間孔ゲキ量を求める。

透水性、保水性の測定ならびに通気性の測定は間接的に孔ゲキ性を測定していることになる。

9. む す び

初めにも断つておいたように、土壌構造を既成の概念によつて解説するのではなく、既成の概念を消化吸収したのち、構造についての新しい見解を述べるようにつとめました。なにぶん、もともと消化器官が丈夫でないので、はたしてどこまで既成の概念を消化吸収しているか疑わしい幸いです。皆様のご意見を期待しています。

川口教授のご指導のもとに本稿を作成しました。記して厚く感謝する幸いです。

文 献

- 1) Kullmann, A: Probleme der Krümelstabilitätsmessung und der Krümelbildung (Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften) 7~33 (1958)
- 2) 青峰 農業技術, 10, 300 (1955)
- 3) 川口・喜田・久馬:土肥誌, 27, 7 (1956)
- 4) 川口・喜田・久馬・畑中:土肥学会講演要旨集, 第3集, 3 (1957)
- 5) 川口・喜田:土肥誌, 28, 153 (1957)
- 6) De Boodt, M. and DeLeenheer, L.: Reports Vith Jnt. Cong. Soil Sci., Vol. B 69(1956)
- 7) 喜田・川口:土肥学会関西支部講演会で発表。(1959年7月京都において)
- 8) 京大農学部農芸化学教室編:農芸化学実験書, 第3巻, 1027~1038頁 (1957)
- 9) 農林省振興局研究部:土壌肥料全編, 770~795頁 (1958)
- 10) Chepil W. S.: Soil Sci. Soc. Am., Proc.,

16, 113 (1952)

- 11) Gish, R. E. and Browning, G. M. : *Soil Sci. Soc. Am., Proc.*, 13, 51 (1948)
- 12) 米田・河内 : 土肥誌, 27, 345 (1956)
- 13) 川口・喜田 : 土肥誌, 29, 13 (1958)
- 14) Mc Calla, T. M. : *Soil Sci.*, 58, 117 (1944)
- 15) Cernuda, C. F., Smith, R. M. and Vicente-Chandler, J. : *Soil Sci.*, 77, 19 (1954)

- 16) Reeve, R. C. : *Soil Sci., Soc. Am., Proc.*, 17, 324 (1953)
- 17) Emerson, W. W. : *J. Soil Sci.*, 5, 233 (1954); 6, 160 (1955)
- 18) 川口・喜田 : 土肥誌, 29, 47, 247, 286 (1958)
- 19) 美園 : 土肥誌, 29, 67 (1958)
- 20) 川口・虎谷 : 土肥誌, 29, 338 (1958), 土肥誌投稿中 (1959)

第3図 乾田(水田) 耗土層の構造の横式図

