

- 23) E. A. Hauser : Silicic Science. 139~145 (1955)
 24) 東久保・奥田 : 土肥誌, 27 (8) (1956), 29 (6, 7, 8) (1958)
 25) 江川他 : 農技研青表紙, (1958) その他,
 26) F. L. D. Wooltorton : Highway. Res. Board Bull. (108) 29~57 (1955)
 26) E. A. Hausr : Idid. 58~66 (1955)
 28) Soil & Soil-Aggregate Stabilization Symposium : Ibid
 29) Altering Soil Properties with Chemicals symposium : Ind. Eng. chem. 47 (11) 2230~2281 (1955)
 30) G. W. Scott Blair, M. Reiner : Agricultural Rheology (須藤・安富の訳あり) 70 (1957)
 31) Ibid, 142~153
 32) Ibid, 127~141
 33) R. L. Rollins : H. Res. Board Bull. (108) 120~127 (1955)
 34) H. F. Winterkorn : Ibid, 1~24
 35) H. F. Winterkorn : Watersupply (Prinst. univ.), 43~84 (1958)
 36) 最上 : 土木誌, 36, 16~20 (1951)
 37) 星野 : 土と基礎, 6 (1), 3~4 (1958)
 38) 村山・柴田 : 土木学会論文集, (40) (1956)
 39) 森 : Ibid, (57) 7~11 (1958)
 40) 赤井 : Ibid, (58) 76~81 (1958)
 41) M. Reiner : Deformation and flow (柳沢の訳あり) 40~41 (1949)
 34) R. Houwink : Elasticity, plasticity & structure of matter, (1953)
 43) 奥田 : 化学技術者のレオロジー, 151~173 (1959)
 44) 梅屋 : Ibid, 174~193
 45) 森他 : 化学工業, 20 (9) 488~494 (1956)
 46) E. K. Fisher : Colloidal Dispersion, 182~191 (1950)
 47) 安富 : 未発表 (1960)

粒径分析法に関する考察

山中金次郎

(農業技術研究所化学部)

1. 序論

土壌中に含まれている異つた大きさの粒子の割合を測定する操作, 方法はすべて粒径分析 (Mechanical Analysis) として総括される。この用語は分析結果が粒径として表示されることも含めて慣習的に用いられて来た「機械分析」に対してずつと適正と考える。

粒径分析の中には粒子の大きさに従つて fraction 別に分析してゆく方法とこの方法の前提条件となつている粒子の完全分散法とが含まれるが, 本質上前者を粒径分析法として代表させる。

粒径分析法の歴史的な発展過程は非常に長年月に亘り, 之等の詳細を述べる事は現在ではあまり意義がないが, この分析自体が土壌学の研究分野の中でどの様な位置を占めるかを確め, 且その結果を有効化するためには粒径分析法の進歩の基礎となる原理の発展と転換との過程を理解しておくことが望ましいと考ふる。

之等について著者はすでに幾つかの解説¹⁾²⁾³⁾を試みて来ているが更に総括的に遡観してみたいと思う。

2. 粒径分析法の進歩

Keen⁴⁾の直裁的な表現に従えば, 粒径分析法程万華鏡的な目まぐるしい転換を示したものは土壌学の分野で

は稀有である。非常に長期間在来的方法が用いられており, それ等の内容は農業, 土木, 窯業等に実際に従事した人々の判定的表現 (砂, 粘土等) 及び土壌調査にとつての重要な項目である土性表示について幾らかの数値的表示を附加するにすぎない程度であるのに対して Oden⁵⁾(1915)の研究はこの程度の在来分析法を一飛びにその外見に於て, 又その方法に於て土壌の研究に対する強力な武器の權威にまで高めてしまつたのである。この間, 有名な Shōne (1867) を起点としても尙50年を経過しているのである。

これに続いて多くの研究者が次々と新しい優れた方法を発展させ土壌学に於ける一つの黄金時代を作つたと云い得よう。これ等の方法によれば僅かの fraction に分けるに止つていた在来法に新しい完全に連続した粒径分布曲線が土壌の粒径組成として得られる事になり, 更にこれらに対する幾つかの自記装置までが考案されたのである。

残念な事には華々しく出現した粒径分布曲線法の研究はあまり長くない期間に凋落を示し, 現在では特殊の研究に用いられるに止つている。この原因は之等の方法が何れも重大な実験誤差を内包し, 従つてその研究の武器としての価値を減殺した事に存する。

精緻な粒径分布曲線は比較的小さい誤差に対してすら

厳しい批判の対象となるが、素朴な在来法の大きな誤差は極めて寛大に見逃されて来た事は一般的な見地から当然の帰結と言へるかも知れない。

更に筆者の見解に依れば土壌の様な異質物質に対しては粒径分布曲線の特徴は一般の研究目的に対しては実用価値が稀薄と見た事にも起因する。然し乍ら、曲線がかなりの正確さで得られたならば、その価値が一般目的に対しても再認識される日の来るのは遠くはないと考える。要言すれば粒径分布曲線は土壌学の一般的な進歩を飛越えて発展したとも見られるのである。

現在標準的に用いられる分析法は周知の様にピペット法であり、又は補助的な目的に於て比重計法が挙げられよう。之らは外見的には在来法の延長ともみられるが、実は難解な原理の上に築かれた粒径分布法という険しい山を乗り越えて得られたものであつて、この点を特に強調する事は現在に於ても尙重要な意義を有するであろう。

3. 粒径分析法の原理

土壌中の粗い粒子は篩別によつて分別する事ができる。この操作は如何にも Mechanical Analysis という用語にある程度適はしいとも云えよう。

個々の異つた大きさの土壌粒子群或は fraction は重量的に分析される必要が先ず考えられ、次で篩別の不可能な微細な土壌粒子群を篩に代る可き方法によつて同様に分別し定量する事が考えられた事は当然である。

然し乍ら之ら微細粒子群の分離は粒子の完全分散が行はれたとしても容易なものではなく、又正確に行われ難い事が土壌学者の長い間の重荷となつていたのである。

Clay (<0.002mm) 部分の持つ意義と重要性は Atterberg 以前から認識されており、この定量は先ず考えられる可能な唯一の方法、原理である、沈底法によつて行われ、ピーカー法はその代表的なものとして比較的近年迄英米等の諸国で用いられた。

然し乍ら当時用いられた之等の沈底法方法は現在の見地からは殆んど不可能或は無意味と判定される程、手数と時間を要するものであつた事は次の表から明らかであろう。

Clay 粒子の沈降速度 (深さ 10cm, 20°C)

粒径	沈底時間
2 μ	8 時間
1 μ	32 "
0.5 μ	128 "
0.1 μ	3200=133日

ピーカー法或は之に類する方法ではサイフォン操作を

数十回は反復する必要がある、この間の操作に依る誤差をしばらくおくとしても現在から見ると驚くべき労作といわなくてはなるまい。

この様な粘土の定量に要する大きな負担に対する反撥は淘汰分析法の出現と云う形で現われた事は一つの啓示である。即ちピーカー法と云う凡そ外見的に魅力のない操作に代つて一定速度の上昇水流を与えて粒子を自動的に淘汰する方法 (Elutriation method) が生れてヨーロッパでかなり広く用いられたのである。

この方法が外見上遙かに分析法らしく魅力的であるにしろ、この方法にはピーカー法に対して大きな学問的な引け目を持ち、この引け目は現在では到底うけいられない程度の大きなものである。先ず 1) この方法で分別定量される粒子群の最小限は約 0.02~0.015mm と云うシルトの粗い部分にすぎず、2) この分別された部分は大量の流水と共に大円筒から排出され且操作上棄てられるのであるからより粗い部分を 100 から引いてこの細い部分を算出する必要があり、これは実質上分析の名の下では簡略法と評価されよう。又 3) 流水の運動はピーカー法の様な均質な粒子の落下 (上昇) を到底与え得ない事、及びその他の重大な引け目が多く存する。

それにも拘らず淘汰法がヨーロッパ大陸である期間愛好された事は次のような考察によつて或る程度説明されよう。

Kopecky⁶⁾ が日本農学会法として採用⁷⁾ された方法を考案した時代 (1900) の前後では Clay (<0.002mm) の機能の重要性が認識される程土壌学は進んでいなかったであろう事が考えられ、換言すればピーカー法による Clay の定量の一般的利用価値はその大きな労作に報いよう程大きくなかつたであろう事が推定されよう。

序で乍らこのような理化学的測定の価値判断が多数の人に与えられるまでには長い時間が要求されるであろうことを附言したい。而も農業の研究のような自然的生産に関する場合には特に然りであろう。

4. 粒径分布曲線法の原理

Oden⁵⁾ (1915) の研究は在来法の停滯を越えて粒径分布の将来をトシ、且土壌物理の分野をより高いレベルにひきあげる、開拓的にも輝しいものであつた。

Oden は微細粒子を幾つかの部分に機械的に分離し、之らを夫々定量する在来法に対し、分散液中の懸濁相そのものから、且連続的な fraction 別に然も半ば自動的に定量する方法を発見したのである。この飛躍こそは当時の土壌学分野に於て驚感そのものであり、如何なる高い評価にも値したであろう。

Oden の装置は操作がわづらわしいために Keen⁴⁾ は自動自記な装置に改良し現在日本でもこの型が市販されている。

又 Oden の数学的処理は洗練さを欠いていたが R. A. Fisher⁸⁾ によつて数学理論的に完成され、この原理に從つて次々と新しい方法が提起される事になつた。

この理論を目下の必要の最小限度に圧縮すると次の様に表現されよう。

すべての fraction が均等に分散された懸濁液を静置した場合、 t_1 時間後に深さ d の位置の変化を考える。始め表面にあつた粒子の中、落下速度が d/t_1 より大きい粒子は d の位置を通過するから d より上の層には之より大きい粒子はない。ここまではピーカー法の原理そのものに過ぎない。

(A) $[d/t_1]$ より小さい粒子はすべて d を通過すると同時に上方からの同じ粒子の落下によつて補われるから増減はない。従つて d の位置の懸濁層は $[d/t_1]$ より小さい粒子については始めの懸濁液の濃度 (或は密度) を「代表」している。故にこの層の濃度或は密度 (比重) が測定されれば $[d/t_1]$ より小さい粒子の fraction が測定される。之が現在主流となつている分析法 (ピペット法等) の原理となつている。

(B) 一方において d の位置に沈底する粒子の変化を考えるに、 t_1 時間後には $[d/t_1]$ より大きい粒子は全部沈底し、(w_1)、それより小さい粒子は各々その落下速度に相当する比率で沈底する。例えば落下速度が $1/2$ の粒子は t_1 後に 50% 沈底する。この場合若し $[d/t_1]$ より小さい粒子の沈底量 (W_2) がわかれば $W_1 = \text{全量}(W) - W_2$ によつて得られる。

上の二つの場合 (A, B) に対し若し d の位置の変化が連続的に測定されれば、粒径分布は今までの限られた少数の fraction 分別を脱却して各 fraction は連続的に測定されることになる。Oden は後者 B の原理を適用した測定装置 (Automatic balance) を始めて考案した。之によれば $0.03\text{mm} \sim 0.001\text{mm}$ ($30\mu \sim 1\mu$) の範囲の粒径分布が連続的に測定され、更に Keen らによつて自記装置として改良された。

Oden の Automatic balance は懸濁液中の一定の深さ (d) に静置されたバランスの秤皿の上に沈積する実量を自動的に秤量するものであつて、その結果として細い時間間隔 (t_1, t_2, t_3, \dots) に対する沈積曲線が得られる。 t_1, t_2, t_3, \dots は落下速度、 $d/t_1, d/t_2, d/t_3, \dots$ に相当する r_1, r_2, r_3, \dots としても表現される。

かくして得られた沈積曲線 (Accumulation Curve) そのもの丈では何らの分析結果は得られないが之を困難

な数学処理をはなれて簡単な図式解析によつて W_2 が求められ従つて W_1 が得られる。

図式解析は Bayer⁹⁾ が紹介している外に筆者¹⁾ が別の観点から簡易に解説しているので興味のある方は之を参照されたい。

5. ピペット法の現在の位置

現在ピペット は粒径分析の標準的分析法として世界中で殆んど統一的に用いられている。この根本理由はこの方法が粒径分布曲線法の研究のうけた約 10 年間の厳しい試験の中からその新しい原理を身につけて生れた事に存する。この一見単純な方法の原理及び技術的な点は他の文献にゆずるとして粒径分析に於ける現在の位置を確認するためには次の様な考察が役立つと考える。

ピーカー法及び淘汰法などの在来法を含めて現在の土壌学の立場からそれらの基本的な欠陥を考えると

- 1) 操作に多くの手数と時間を要する。
- 2) 分散液中で分析が行われない。
- 3) Fraction が僅かに限られる。
- 4) 超粘土部分の分析が不可能である。

等が考えられるが 2) の項はここにあげられてない多くの項を含めて分析結果の不正確を招来する代表的なものであり、他は之等の方法の原理からして技術的には改善し得ない基本的なものとして抽出される。

粒径分布曲線法は新しい原理の発展により之の欠陥を殆んど払拭し去つたのであるが、連続的な曲線を正確に表示するための装置の改善に対して行きづまつてしまつたのである。

ピペット法はこの行き悩みの中から宿命的と思はれる程、殆んど同時に異なる国の 3 人以上の研究者によつて提起されたのである。この方法は 3) 及び 4) に対して若干の難点を残したが、これとて在来法とは問題外の高い可能性をもち、一般目的に対して最も歓迎される 1) 及び 2) の欠点を埋め、然も 3) 及び 4) の代償として最も決定的な分析結果の満足すべき正確さを獲得したのである。均等に分散させた懸濁液につき、一定時間後一定の深さで、一定の少量の懸濁液をピペット或は他の装置によつて採取するに過ぎないこの方法の簡単さは又、世界中で使用される大きな理由の一つであるに相違ない。

又粒径分布曲線に対して遙かに簡単な積算曲線法が新しい表示として提起され、一見して土壌の粒径組成を観取するに役立つ。3) 及び 4) の難点は現在では著しい技術的改善によつて一般目的に対して殆んど埋められたと云つてもよいであろう。

超粘土分析に対してはピベット法自体としてPuri¹⁰⁾, Russell¹¹⁾, 遠心ピベット法としてSteele¹²⁾, Kamack¹³⁾, Marshall¹⁴⁾らの方法があり, fraction 制限の難点は懸濁液の採取を浅い位置で行うことによつて解決される。著者ら¹⁵⁾の実験では1 cm の深さで採取しても大した誤差は認められなかつた。

6. 粒径組成と土性名との関係

粒径分析の結果は粗砂, 細砂, シルト, 粘土などのfractionによつて表示されるが, 之らは更に三角図表によつて位置づけられ, 適当な区画内の土壌群に対して10種以上の土性名が与えられる。

現在粒径分析の結果は土性名を与えるための方法と考える様な倒錯が一部残っているのではないかと危ぶまれる。この様な考えはもしありとすれば始めに紹介したKeenの表現の様に現在の粒径分析の位置を原始時代にひきもどす事になり, その進歩の恩恵を最少限度にしか利用しない事を意味しよう。

念のために詳言すれば, 土性名は極めて便宜的なものにすぎず, Tommerupの三角図表中のClay loamはSilty clayにもSandy clayにも点ではあるが共通し, 土性としての両極端に通じているとも云い得る。この点はこの三角図表の区分の一つの欠点であるとしても, 土性名に対してあまり拘泥する事は却つて誤解を招き易い。重要なものは分析にあらわれた現実の数値であつて便宜的土性名ではないのである。この考え方を更に推しすすめる事によつて近い将来我々は連続的な粒径分布曲線の価値の再認識に到達するのであろう。

土壌を区分する場合でも, 単純に土性名で類別する事は多くの場合誤り易い。三角図表上の位置で決めるのが一つの正しい方法である。

尙礫含量が比較的無視される傾向にあるが, 土性は礫を含めて考察表示し, 更に礫の種類, 形態, 腐朽程度迄を含めて考察するのが正しい土壌類別の基礎となると考える。

7. 分散法に関する考察

土壌粒子の完全分散は粒径分析の前提となる根本課題であるが, 之は操作上土壌物理の分野から多少離れているものである。

粘土のfractionの定量が長年の重荷であつたように, 分散法もある意味から同じような発展過程を経て現在に及んでいるのであるが, その内容は更に地味であつて一般の注意からそれているようである。

Robinson¹⁶⁾はNH₄分散とNaOH分散とを比較し,

後者の分散性能がより優れている事によつて推奨しているが, その差は僅かであつて加えたNaOHの量を引けば更に少くなる。尙同氏が提唱したH₂O₂による有機物の分解は分散の予措として現在広く行はれている。

然し乍ら国際法として提起された塩酸(N/5)処理が一番の重荷として長く残されたのである。

塩酸処理は元来土壌中の石灰の除去を目的としたものであり, 日本の様に石灰の少い湿潤地帯では便宜上この操作は従来省略されあまり痛痒を感じなかつたのであるが, 之を必須とするある程の土壌については塩酸処理操作は大きな悩みの種であつた筈である。この操作が如何に煩雑であり且好ましくないかは多くの種類の土壌についてこれに就て実験した人が了解し得るものであつて煩雑に加へていろいろの欠陥が之と随伴して来るのである。

Tyner¹⁷⁾(1939)はヘキサメタ磷酸ソーダ(NaPO₃)₆が分散剤として有効であり, 且その処理は塩酸処理を不要化するものである事を発表した。この研究はある意味では土壌物理に対する画期的な貢献と云い得る。この研究によればカルシウム塩はメタ磷酸ソーダ溶液中に不活性化して溶解し, 分散処理は一段処理に縮まり極めて簡単化するのである。

メタ磷酸ソーダの性能が確認されるに従い, 土壌の分散剤は迅速に殆んどこれに統一され塩酸処理は事実上世界的に消失したと云い得る。

我が国の土壌についての研究によれば塩類の多い干拓地土壌には勿論各種の土壌に対して過去のアルカリ分散より優れている事が確認された。

特に従来から問題となつた火山性土壌の分散に基だ有効である事はある程度PO₃⁻¹がAl⁺³を不活性化する性能に帰する事が推定され¹⁸⁾¹⁹⁾, メタクロマジー現象に於ても例証された²⁰⁾。

火山性土壌の下層土(ローム)は広い範囲の風化腐朽状態に於て全国に分布し, 一般に未風化に近いものが多いために試料の細砕等の予措によつても結果にかなり影響し, 従て之等は粒径的に不安定な土壌群と云い得る。特に弱酸に溶解するAl₂O₃が多い傾向があり, 従来多少試みられた塩酸処理は分散ではなくむしろ分解になつて了うことを注意したい。例えばこの処理によつて10%以上の溶解を示した実例がある²¹⁾。この様な溶解過程はClayを同時に分解的過程に依つて著しく増加させる事は当然である。

8. 考察

粒径分析は永い試練的な帰結として現在の様に簡素化され且合理的な姿となつていがある意味から一つの約

束にすぎない性質のものである。例えばヘキサメタ磷酸ソーダの商標によつても多少異つた結果が報告されている。従つてできる限り細部に亘つて操作方法を一定にして分析する事が多くの土壌間の関係を理解するために重要であり、同時に研究者相互の利益でとなるものである。

文 献

- 1) 山中金次郎：土質改良，3. No. 30 (1955)
- 2) 山中金次郎：農業及園芸，30. (1955)
- 3) 山中金次郎：土壌肥料全編，P. 747 (1958)
- 4) Keen B. A. : The physical properties of the soil. P. 37. (1931)
- 5) Odén, Sven : Eine neue Methode zur mechanischen Bodenanalyse, *Intern. Mitt. Bodenk.*, 6, 257~311 (1915)
- 6) Kopecky, J. : Bodenuntersuchung zum Zwecke der Drainage-Arbeiten, Prag (1901)
- 7) 農学会：土壌ノ分類及命名並ニ土性調査及作図ニ関スル調査報告(1926)
- 8) Fishre. R. A. and Sven Odén : The theory of the mechanical analysis of sediments by of the automatic balance. *Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, 44, 98~115(1923~1924)
- 9) Baver, L. D. : Soil Physics, p 50~54. (1948)
- 10) Puri, A. N, Puri B. R. : Ultra-mechanical analysis of soils. *J. Agr. Sci.* 31. 171~7(1941)
- 11) Russell, E. W. : *J. Agri. Sci.*, 33, 147(1943)
- 12) Steele, J. G, and R. Bradfield, : The significance of size distribution in the clay fraction, *Am. Soil Survey Assoc.*, 15, 88~93(1934)
- 13) Kamack, H. J. : Particle-size determination by centrifugal pipet sedimentation, *Anal. chem.* 23, 844~850(1951)
- 14) Marshall, C. E, Whiteside, E.P. .. Studies in the degree of dispersion of the clays. The two layer method as applied to the Sharples supecentrifuge. *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.* 4, 100~103(1939)
- 15) 山中, 中村, 松尾：ピペット分析法に関する研究, 農研土壌2科3科研究成績(昭和31年度)
- 16) Robinson, G. W. : The disperion of soils in mechanical analysis. Imperial Bureau of soil Science. Technical communication No. 26
- 17) Tyner, E. H. : The use of sodium metaphosphate for dispersion of soils for mechanical analysis, *J. Am. Proc.* 4, 106(1939)
- 18) 藤原彰夫：わが国に於て採用すべき機械分析ならびに土性の命名法に関する研究, 1956年3月
- 19) 藤原彰夫：同上, 1957年3月
- 20) 藤原彰夫：同上, 1958年3月
- 21) 藤原彰夫：同上, 1957年3月

自記蒸発散位計

灌漑用水の配分に科学的基礎を与える「定水位装置付自記蒸発散位計」が完成し、渗透蒸散が同時に自記出来るようになりました。只今神奈川県相模原等で使用しております。

— 主 要 製 品 —

森 式 長 期 雨 量 計
 精 密 自 記 蒸 発 計
 簡 易 自 記 水 位 計
 雨 量 水 位 自 記 計
 自 記 風 向 風 速 計
 農 業 用 微 気 象 測 器 各 種
 土 壌 溶 液 採 取 装 置
 其 の 他 各 種 測 定 器 設 計 製 作

合資会社 ウイジン工業社

東京都世田谷区玉川用賀町1~8

電話 玉川(70) 0531番