

土粒子の幾何学的表面

(第二報) Microscopic Contour Line 法による土粒子の 幾何学的表面積の測定[※]

小林哲夫^{※※}

Tetsuo KOBAYASHI

Geometric Surface of Soil Particles

(2) Determination of the Geometric Surface Area of Soil Particles by Microscopic Contour Line Method

前報¹⁾で指摘したように、土粒子の幾何学的表面積測定法としての空気透過法は、総合的な再検討を必要とし、それに際しては、まず不規則で複雑な形状をなす土粒子の幾何学的表面積を、直接的に測定する技術の開発がなされなければならない。本報で紹介する microscopic contour line 法 (以後は m. c. l. 法と略記する) は、長時間にわたる複雑な作業を要求する点で、日常的な技法としては問題があるが、粒子の投影面積と表面積に関する Cauchy の定理に準ずる相関関係、および投影面積と体積あるいは比表面積との良好な相関関係を用いることにより、上記の目的には十分かなうことが期待される。

物体の幾何学的表面積を、直接的に測定するということが何を意味するかが、まず明らかにされなければならない。そのためには、幾何学的表面 (geometric surface) の厳密な定義が与えられなければならないが、これに関しては、ERGUN²⁾ がかなり空気透過法を意識した定義を与えているほかは、改めてそれを与えている文献は見当たらない。厳密には、物体の表面、は数学的な意味での「面」ではない。したがって、測定方法と無関係に定義することは実質的に意味がないが、幾何学的表面、に関しては、さらに形状との関係が強調されるべきである。その意味では、空気透過法は不適當であり、形状の分解という直接的な方法を前提とする必要がある。筆者はとりあえず次のように定義する。

幾何学的表面、とは、物体の形状を分解する能力の範囲内で、露出表面 (外部表面) が数学的な面でおおわれているとする理想化表面である。

幾何学的表面積、とは、幾何学的表面、の大きさであり、その値は定量的な分解能に依存する。

Microscopic Contour Line 法

微細粒子の形状特性を知るために顕微鏡を用いる技法はごくありふれたものであるが、投影や一枚の写真を用いる技術は粒子を二次元的にとらえ、また一般には粒形に関して極端な単純化を採用するために多くの不十分な点を持っている。実体鏡 (stereoscope) などを用いて粒子を三次元的にとらえる技術も開発されているが³⁾、本法は顕微鏡の分解能、特に適当な倍率における光軸方向の分解能を利用して、ステージ上の粒子を載せたスライドを一定間隔で上下動させ写真を取り、それによって各粒子の上半部に等高線を引き粒形図を得る。そしてこの粒形図を用いて表面積および体積を計算するのである。

しかし、次の三点に m. c. l. 法の限界がある。

1. スライド上の土粒子は、その最も安定した位置の一つを占め、at random にはならない。
2. 出張りの背後の状態を知ることができない。
3. 粒子寸法の適用可能範囲に限りがある。

次に実際の手順を簡略に記す。



図1. 顕微鏡写真撮影面の高さ

※ 昭和47年5月農業土木学会大会で概要講演

※※ 農地工学研究室

1. スライド上に微量の絶乾土粒子を載せ、分離独立している一つを選び、上下動目盛りを持つ顕微鏡 (olympus 金属顕微鏡MF, 上下動範囲 2mm, 5μ 目盛り付) を用い、適当な倍率 (40×15, 以後一定倍率) で高さ h を測定する。(図1)
2. 粒子の輪郭に關与する最小高 h_0 において写真を撮り、その後一定間隔 δ (5μ) でステージを下降させ撮影し、さらに h と $h/2$ において撮影する。この際並行してスケッチをとっておくと、粒形図を作成する上で大変役立つ。最後に金属対物用マイクロメーター (1mm 100 等分) の写真を撮り、最終的な倍率決定に供する。(図1)
3. 全て同じ倍率になるように仕上げられた写真を用い、並行してとられたスケッチを参考にして、粒子の輪郭を定め、上半部に等高線を引いて粒形図を作成する。ただし、顕微鏡の光軸方向の定量的な分解能がこの場合およそ $2\sim 3\mu$ であるから、まず直接的に等高帯を描い

てから、粒子形を想像しながら等高線を入れる (図2)

4. 粒形図を用いて設定したそれぞれの仮想表面のもとで、粒子上半部の表面積および体積を計算し、その二倍値を粒子の表面積および体積とする。この際面積測定に關してはプランメーターを用い、曲線長は綿糸を用いその伸張を考慮して測定する。(図3)

このようにして、個々の土粒子の表面積および体積を測定することができ、結局比表面積を得ることができるが、これだけでは問題は解決せず、求めなければならないのは試料の平均値、特に平均比表面積である。そのためには多数の土粒子の測定を行なわなければならないが、実際問題として上記の手順を何回も繰り返すことは労多く益少ない。そこで、「同一種の試料土においては、土粒子の形状は粒子寸法によって変化しない。」という前提条件を設け、次のようにして簡略化をはかる。

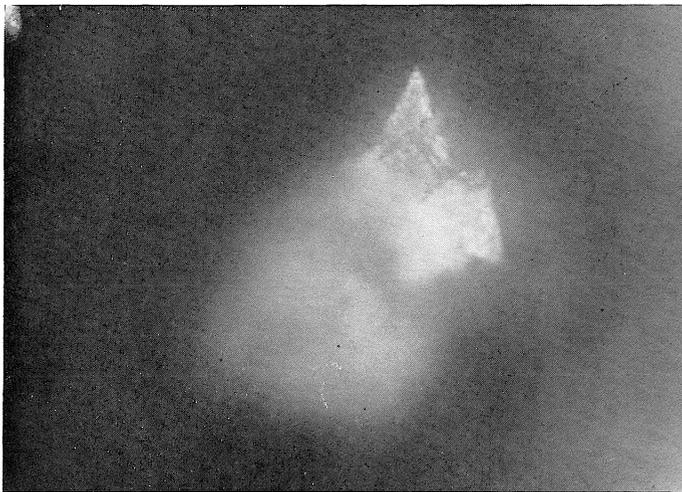
1. 粒子寸法を表わす指標として投影面積を採用する。
2. 測定のために選出する粒子は、粒子寸法に關しては

一様に、他の条件に關しては at random になるようにする。またその数は、可能な範囲で最大値とするが、40~50 個程度あることが望ましい。

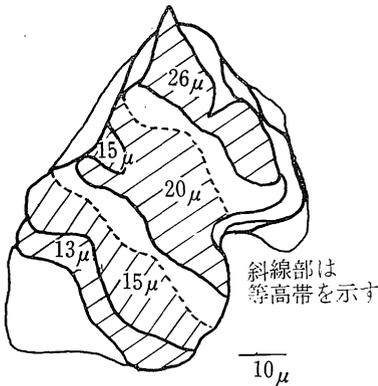
3. 投影面積と他の測定値、計算値との關係を表わす実験式を、最小自乗法により求める。この際その関数形は前提条件より定まる。

4. 測定数の 8~10 倍程度の数の粒子を at random に選出し、個々の粒子の投影面積を測定し、上に得た実験式を用いて試料の平均比表面積を計算する。

次に、このような前提条件と簡略化の妥当性について、実際の測定結果をもとに検討する。



a. 土粒子頂面 ($h = 26\mu$) の顕微鏡写真



b. 粒形図 ($h = 26\mu, h_0 = 5\mu$)

図2. 粒形図の作成例

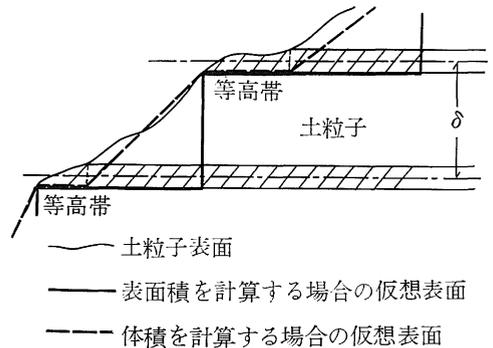


図3. 仮想表面の設定

測定結果および考察

個々の分離独立した粒子を得る必要があること、および顕微鏡の構造等の限界より、m. c. l. 法の適用可能範囲の下限はおよそ 15~20 μ となる。またその上限は 40 \times 15倍を採用する場合、100 μ 程度となるから、

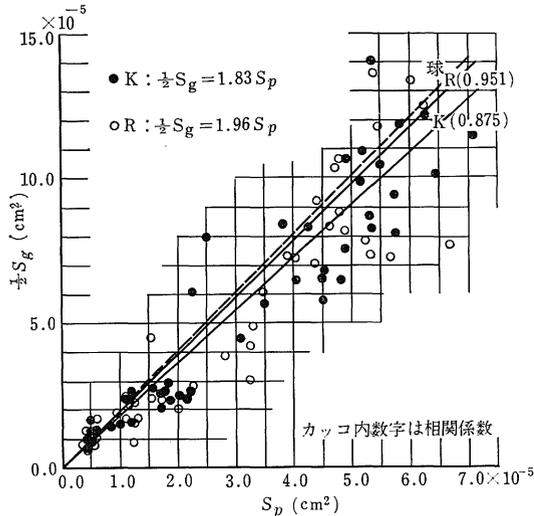


図4. 幾何学的表面積 (S_g) と投影面積 (S_p) の関係

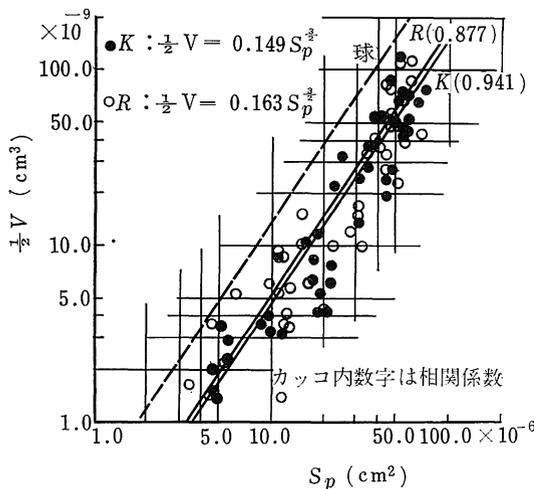


図5. 体積 (V) と投影面積 (S_p) の関係

表1 試料土の性質

試料土	比重	74 μ フルイ通過分(%)	液性限界	塑性限界
K	2.64	44	NP	NP
R	2.78	57	48	23

試料として自然土をそのまま用いることはできず、両限外部を除去して調製する必要がある。

二種の自然土K, R (表1) の 74 μ フルイ通過分のうち、沈降法によりストークス径 25 μ 以下を除去して試料を調製し、上記簡略化の方針に従い、各試料K, R を 53 μ フルイで大小二つのグループに分け、各グループからそれぞれおよそ25個の土粒子を選び測定、計算した結果を図4, 5, 6に示す。

図4は幾何学的表面積 S_g の半値と投影面積 S_p の関係を示す。Cauchyの定理に準ずる S_g と S_p の良好な相関関係を見ることが出来る。図5は体積 V の半値と S_p の関係を、図6は個々の粒子に関して得られた S_g と V 、および密度 ρ を用いて計算した幾何学的比表面積 S_{gw} と S_p との関係を示す。

これらの結果より、与えられた前提条件は、ここで用いられているような粒子寸法のせまい領域においては、大きな間違いの原因にはならないと考えられる。しかし、たとえば S_{gw} と S_p の関係 (図6) をみると、 S_p がある程度大きくなると粒子形が球に近づく傾向が表われる。

次に、試料の各グループより at random に取り出した土粒子群の投影写真を、低倍率 (7 \times 10) で何枚かに分けて撮影し、その中から分離独立している粒子を at random におよそ200個選び、その投影面積を測定する。この結果と上に得た実験式により、i番目の粒子の $\frac{1}{2}S_{gi}$, $\frac{1}{2}V_i$ および S_{gwi} を読みとり、次式より求めた平均比表面積推定値を表2に示す。

$$\overline{S_{gw}} = \frac{\sum_i \frac{1}{2} S_{gi}}{\sum_i \frac{1}{2} V_i} \cdot \rho \quad (a)$$

$$\overline{S_{gw}'} = \frac{\sum_i \frac{1}{2} V_i \cdot S_{gwi}}{\sum_i \frac{1}{2} V_i} \quad (b)$$

なお、実際に計算する場合は、 S_p を適当な巾で分割し度数表を作成して利用するのがよい。

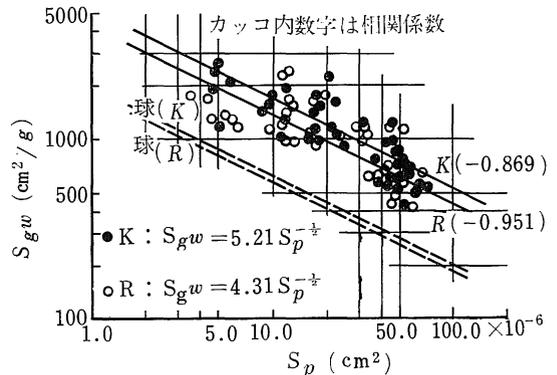


図6. 幾何学的比表面積 (S_{gw}) と投影面積 (S_p) の関係

$\overline{S_{gw}}$ と $\overline{S_{gw}'}$ の相違は、前提条件をも含めた簡略化の限界を間接的に示していると考えられる。しかし両推定値の平均をとって試料の平均比表面積とすれば、かなりの再現性を期待できるであろう。しかも、具体的な報

表2 平均比表面積推定値(cm²/g)

試料		$\overline{S_{gw}}$	$\overline{S_{gw}'}$	平均
K	小	650	740	700
	大	1150	1260	1210
R	小	585	540	560
	大	1130	1050	1090

告は次報で行なうが、m. c. 1. 法と空気透過法は、同一試料土に関しては単に倍率の異なる結像系のような関係にあることが認められる。このことは、逆に m. c. 1. 法の妥当性を示唆していると考えられることもできる。

最後に、本実験を行なうに際しては、専攻生村井敏(現・五洋建設) および余繩誠一(現・森本組)の両氏に多大な御協力をいただいたことを記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

1. 小林哲夫：島大農研報 5：86-89, 1971.
2. ERGUN, S.: Anal. Chem. 24(2): 388-393, 1952.
3. ASCHENBRENNER, B. C.: Photogrammetric Eng. 21: 376-382, 1955.

Summary

Microscopic contour line method for determining the geometric surface area of soil particles directly has been developed to reexamine air-permeability method.

Although the process of this method is fairly complicated and tedious, when the projected area of soil particle is used for particle size index and the correlations between the index and such quantities as surface area, volume, and specific surface are utilized, the purpose above-mentioned will be accomplished.