

報 文

土壌薄片による土壌の三相分布の測定を試み

平 山 良 治

Attempt to measurement of three phases distribution of soil
by soil micromorphological method

Ryoji HIRAYAMA

National Science Museum, Tsukuba Botanical Garden

Summary

The soil sample was impregnated with the unsaturated polyester resin with 100cm³ made of metal a cylinder core for the actual-volumetric method. The sample of each metal, which did was impregnated, was cut out by using CBN cutting blade with slicing machine. A consecutive soil thin section was easily obtained. There was a very high correlation with gaseous phase ratio of the actual-volumetric method and void ratio of thin section. The gaseous phase ratio was able to be presumed from the void ratio of the soil thin section with a lot of large gravel.

Key words : soil thin section, void, three phases distribution

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 64, 21-26, 1992)

I. はじめに

著者は土壌薄片を使って土壌微細形態の研究を進めてきた。最近土壌薄片の作成の依頼が学会等からくることが多い。しかし未攪乱の土壌採取を依頼しても適切な採取は望めないことが多く、運送途中の破損などの問題も起きている。粘土含量が多い土壌はまだしも砂質の土壌では適当な型枠を用意してそれで採取しなければならない。さらに金属などのように型枠の種類によっては切断できないなど作成上の問題があり、また型枠から試料を取り出すのに破損する可能性が高い。実験によっては、固化させるために液状プラスチックを入れて置く容器を試料の大きさに対応させなければならないなど問題がある。一方、土壌調査に従事する人の多くは、実容積測定用のための100cm³金属円筒による土壌採取をよく行っている。100cm³金属円筒での土壌採取を依頼すれば、依頼される方も認識が楽で運送上の問題も少ない。しかし、現在の技術では土壌薄片を作成する時にダイヤモンド切断刃を使用しているために金属円筒をそのまま切断できないでいる。

土壌三相割合の実容積測定は、一般的な土壌調査の際には非常によく使われる。土壌薄片作成依頼の時によく聞かれることは、大礫の多い土壌では100cm³金属円筒での土壌採取がうまく行かないということである。土壌調査報告書のその欄は空白になるために近似値でも求められないかという要求がある。土壌物理性測定法¹⁾には、実容積2,000cm³の金属円筒での測定法が紹介されている。しかし、大礫のたくさんあるような土壌では大きな金属円筒でも礫を避けて取ることは困難である。また、一般的にはこの様な大型の測定器を持っていることも希である。

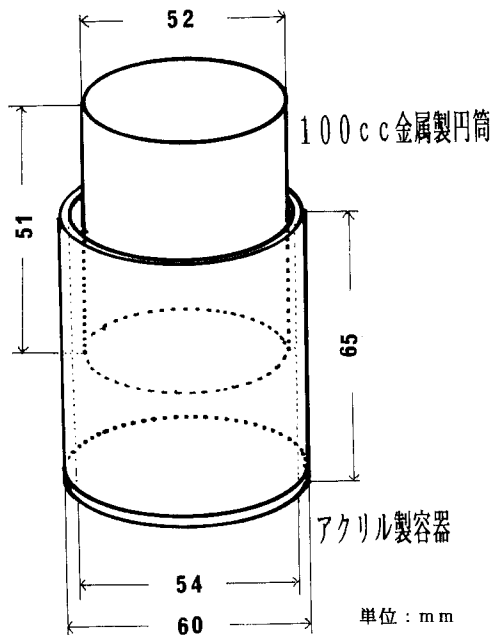
これらの問題の解決のために、金属の円筒試料ごと切断できかつ容易に土壌薄片を作る方法を考案した。さらに金属円筒試料ごと切断した土壌薄片を使って測定した孔隙率と実容積測定から得られた気相率との関係を調べた。この孔隙率と気相率との関係を利用して、100cm³金属円筒で採取困難な土壌三相分布割合の推定を大型の土壌薄片を使って行った。

II. 金属円筒を含んだままの薄片の製作法の検討

1. 実験方法

a) 土壌試料とプラスチックによる固化

実験に使用した試料は筑波実験植物園の土壌で淡色黒



図一 樹脂包埋用容器の形状
Shape of resin impregnation vessel.

ボク土である。乱さないように試料を100cm³の金属円筒に採取し、実験室に持ち帰り、図一に示す透明アクリル製容器に番号、上下位置などわかるように入れ、そのまま急冷凍乾燥にかけ乾燥した(平山²⁾)。その後、真空浸潤法で不飽和ポリエステル樹脂を注入した。使用した不飽和ポリエステル樹脂は実験の過程がよくわかるように透明性の高いポリライト TC-241(大日本インキ製)を使用した。注入後、数気圧加圧し完全固化するまで放置した(平山²⁾)。

b) 切断刃の選択

切断刃の必要条件は、ダイヤモンドが下記に述べる理由により金属を切断できないために、それ以外の切断刃で金属が切れてなおかつ土壤中に含まれる一番堅い鉱物石英が容易に切断できる能力を持つ物でなければならない。一般の金属加工用切断刃の中で、以下に述べる理由により CBN 砥石とグリーンカーボラダム (GC) 砥石とを選んだ。

CBN 砥石は、一般にはボラゾン (Borazon) と呼ばれている米国 General Electric 社製の立方晶窒化ホウ素 (Cubic boron nitride, 略称 CBN) を砥粒材として使った砥石である(旭ダイヤモンド工業³⁾)。これは鋼材、酸化アルミニウムならびに炭化ケイ素の研削作業に利用されている。ダイヤモンドは、耐熱性が低く空気中では

600℃以上で酸化をおこしたり、炭素と鉄の親和性が強い。そのため鋼に犯されやすい短所がある。よってアルミニウムや炭素を含む鉄類の切断には使用できない。CBN の熱に対する安定性は1,400℃である。物の堅さを示すヌーブ硬度はダイヤモンドが7,000に対し CBN は4,700で、やや低い値である。ちなみに酸化アルミナ系(A 砥粒)2,200、炭化珪素(GC 砥粒)3,000、石英788でこれらと比べると非常に堅い(竹中ら⁴⁾)。ダイヤモンドと CBN の結晶構造はともに良く似ており物理化学的特性に類似点が多い。CBN は、このようにダイヤモンドにつぐ堅さを持ち、温度に対して非常に安定しているために新しい砥粒材として近年脚光を浴び、たとえばファインセラミックスなどの加工にダイヤモンド砥石と共に利用される。金属が切断できなおかつ石英も切断できる砥粒である。しかし反面非常に高価である。

グリーンカーボラダム (GC) 砥石のヌーブ値は前述のように3,000であり、石英より非常に堅い。GC 砥石は、もともと石材、鋳鉄や銅などの研削作業に利用されており、金属が切断できなおかつ石英も切断できる。

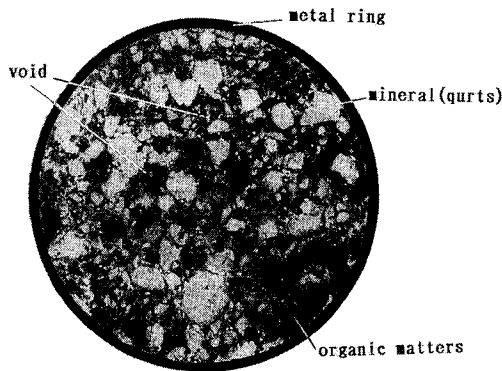
c) 切断機械

試料切断機はスライディングマシン NR-30型半自動型(日興機械製)を使用した。この機械は金属の試料薄片を切り出す金属加工機械で、試料を固定するチャック自体が回転するために切断距離は半径分で済み、水平移動距離が少ないために機械の精度がよい。実容積100cm³円筒では試料の水平送り距離が30mmである。使用できる切断刃は205×0.8×50.8mmが最大である。実験では205×0.8×50.8mmの切断刃を使用した。

2. 結果と考察

数多く作成した土壌薄片の一部について透過光で写真に拡大した一例を写真一に示した。これは花崗岩風化物に有機物を混入した人工土壌で、切りだした断面である。周囲には金属円筒が輪郭として写っている。円筒の内部は透明な石英や長石などの鉱物と黒色味の強い有機物が観察できた。この試料の有機物は完熟した腐葉土である。腐葉土は何も処理しないで乾燥させると収縮し、すき間があき、孔隙ができる。この薄片ではこの有機物の周りに孔隙がほとんどないので収縮しなかったと推定できる。

試料を固める不飽和ポリエステル樹脂はこの製品でも良いが、この実験では大日本インキ製のポリライト TC-241という透明性の高いものを使用した。以前は樹脂の浸潤が非常に難しいといわれてきたが、最近ではアセトン等の希釈液を不飽和ポリエステル樹脂と等量近くまで混合し、固化時間を長くすることで比較的簡単に浸潤できるようになった。ただし TC-241はあらかじめ希釈され



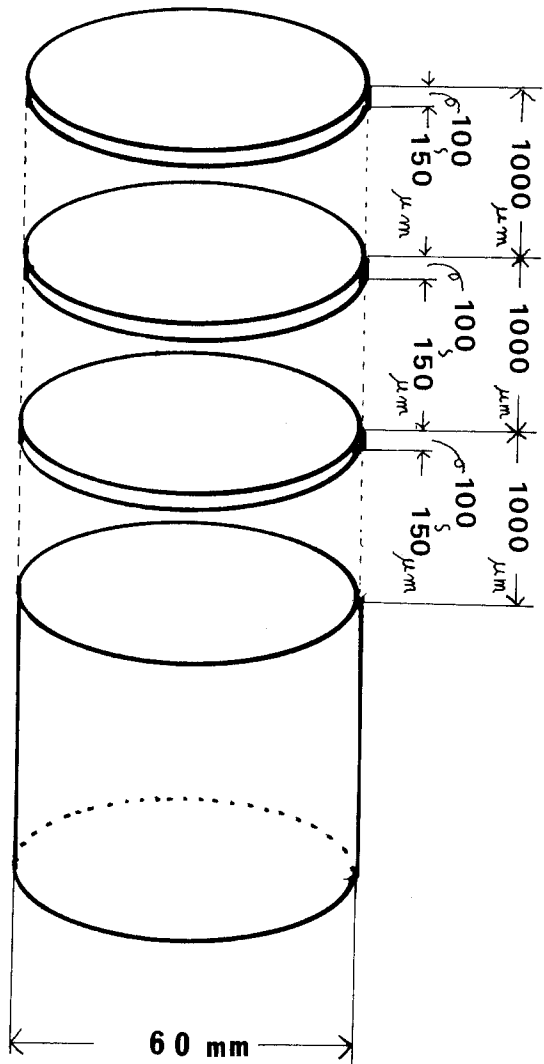
写真—1 金属試料円筒を含んだまま切断した土壌薄片
白色光，黒い金属の直径は54mm
Soil thin section which contains metal
cylinder ring. Plane light, the metal cyl-
inder ring which looks black, its diameter
are 54 millimeters.

ているため，この場合のアセトンの量は樹脂本剤の25%程度となる。この実験では，プラスチックの浸潤面が上面だけに限られているために，アセトンの量を5%上げ30%にし浸潤を助けた。さらに触媒（メチルエチルケトンパーオキシド）と促進剤（6%ナフテン酸コバルト）をプラスチックの浸潤時間を長く維持するためにそれぞれ0.1%と0.05%の低濃度にした。この調合で浸潤が成功した。できた固化物は従来の物より柔らかい。

切断は，CBN 切断刃と GC 切断刃ではどちらも遜色なく切断できた。ただし GC 砥石は，強度が非常に弱く加工中に壊れることが多かった。切断途中で刃を取り替える事は切断精度上好ましくない。よって試料切断中は壊れにくい切断刃 CBN 砥石を用いるべきである。

切断方法は，スライシングマシンのチャックに試料をとりつけ CBN 砥石で一回切断したのち，切断刃の取りしろ800 μm に対して，残す試料の厚さ100 μm ，それに切断誤差100 μm を加えた計1,000 μm を送り出し切断した。これを図—2に示した。この方法では，約100 μm の厚さの試料ができるが，これ以上薄いと安定して試料の切り出しができなかった。土壌微細形態学で使用する土壌薄片の理想的厚さは，含まれる石英の最大干渉色が灰色から淡黄色になる約30 μm である。よって，ここで得られた試料の厚さは理想より厚い事になる。

固化物は余り堅くないが，機械の精度の向上と砥石の切り込み量の設定により加工時の歪みもほとんど生じなかった。



図—2 樹脂固化物の切断方法
Method of cutting resin solidification thing.

この結果，試料チャックを連続的に繰り出すことにより，100 cm^2 円筒からは数十枚程度の連続した土壌薄片が得られる。

Ⅲ. 土壌薄片の孔隙と実容積の気相の関係

前出の実験の結果が示すように多少厚めであるが連続的に土壌薄片が金属型枠を含んだままの試料から切り出せた。

土壌薄片による物理性測定の数少ない例としては，田淵⁹⁾が土壌間ゲキを調べる方法として土壌薄片法を採用している。また田淵⁹⁾は土壌薄片のデータと限界間ゲキの

性質、通気性、透水性等を総合比較している。土壌薄片法による土壌の物理性の測定について、田淵⁹⁾も述べているように、薄片試料によるばらつきや、薄片試料作成時における乾燥収縮の土壌物質の変化等があり、観察に供するためには薄片の試料数について検討する必要がある。統計的に処理するとしても数十 μm の薄片一枚では誤差論上問題が多く、薄片の枚数を増やす必要がある。土壌薄片を使ったデータに対する他の物理化学データの比較は、同じ断面または同じ層位など近傍点で採取した別個の試料で求めたデータとの比較である。田淵⁹⁾の研究も土壌薄片のデータに対するその他の物理性の測定は別個の試料で行っている。土壌という不均質な物質の実験では、実験に供試した材料そのもので複数のデータが得られる方がデータ相互間の信頼性が高い。そのために非破壊状態で複数のデータが得られた方が望ましいが、それができない場合はなるべく復元可能な方法が望ましい。

その第一歩として、薄片の孔隙と実容積測定器による気相率の比較を行った。

1. 土壌孔隙と気相率との関係

a) 供試土壌とプラスチックでの固化

使用した土壌は、北海道の粗粒火山灰表層と下層、静岡の黄色土表層と下層、北海道重粘質土壌の表層と下層、それに関東ローム層の表層から下層まで日本各地の土壌と人工的に岩石や砂などを混合して作った土壌（以下人工土壌と称する）つまり花崗岩由来のマサ土や安山岩碎屑物と腐葉土や火山灰を混合した人工土壌の合計31点である。

100 cm^3 の金属円筒試料の実容積を直ちに測定器で測定した。測定した試料は、土壌水分を自然含水比としたまま図一に示す透明アクリル製容器に入れ、そのまま急冷凍結乾燥にかけ乾燥し（平山⁹⁾）、水分減量を測定した。前述と同様の方法で不飽和ポリエステル樹脂を浸潤させ、固化させた。

b) 薄片中の孔隙の測定

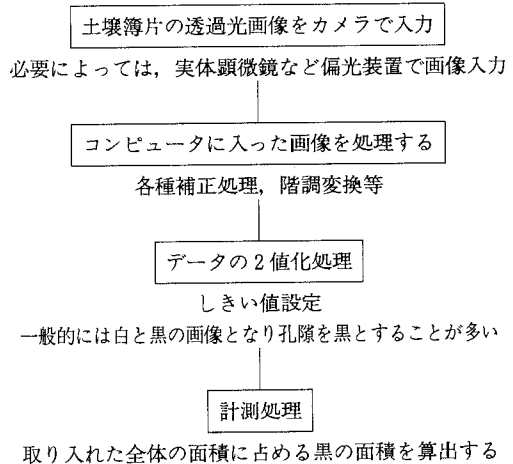
土壌薄片中の孔隙の測定は、ピラス製 LA 555型画像解析装置を使用し、作成した土壌薄片を切り出したそのままの厚さで孔隙率を測定した。

土壌微細形態学では、薄片中の未充填部分を「土壌孔隙」としている。この用語と土壌物理分野で使われる「土壌間隙」と言う用語の使用がどのような関係かはっきりしないが、ここでは土壌微細形態学上での「土壌孔隙」として取り扱う。画像解析によると薄片中の土壌孔隙の形状や分布状態など求まるが、ここでは孔隙の平面上の面積を求めた（神保、⁴⁾）。

薄片から孔隙率を求める方法は、表一に示した。薄片を実体顕微鏡の透過光でカメラ撮像し、その画像をパ

表一 画像解析処理の流れ

Flow schema of image analysis

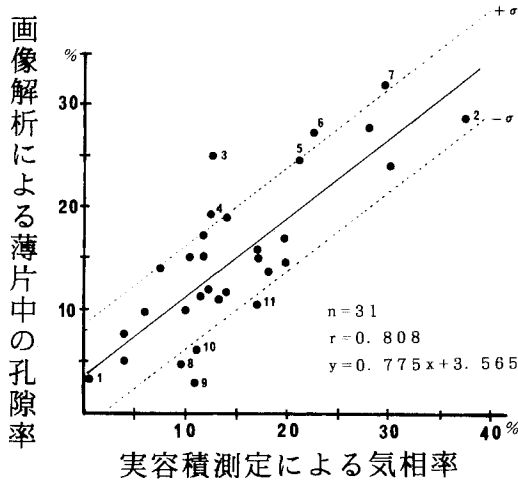


ソコンに取り込む。取り込んだ画像に各種の画像補正処理をした後、薄片中の孔隙に値する輝度値で2値化処理する。2値化処理した数値を計測すると孔隙率が得られる。

輝度値とは、真っ黒で光を通過させない場合を0とし、100%光を通過した場合を255とし、この間を255段階に区分した値である。孔隙を示す輝度値は薄片の状態によりいろいろな値を示す。これをテレビ画面と実体鏡をながめながら実際の孔隙の縁を確認して決める。たとえば孔隙は224以上の輝度値を示し、他の土壌物質はより低い値を示したとする。孔隙割合を求めるためには、孔隙の輝度値224から1を引いた値をしきい値とし、224から255までをすべて255（白色表示で孔隙部分）、223から0までを0（黒色部分で土壌物質部分）にした。このとき白と黒の画像ができるが、これを2値化処理という。取り込んで2値化した画像の内255の輝度値の割合を求めるとそれが即孔隙割合となる。一般には、得られた2値化画像は他の計測処理をするために白と黒を反転させる。

c) 結果と考察

試料が多少厚め（約100 μm ）であるから透過光でみると孔隙以外は暗い、実体顕微鏡での同時観察により孔隙の境をより正確に決定し、孔隙の輝度値を決定できた。精度的には、全視野を直径52mmで計測した場合、直径50 μm 程度の孔隙は識別可能であるが、光の透過条件により光の屈曲のノイズを拾っているのが考えられる。よって画像処理により約300 μm 以下の大きさを自動的に計測しないようにし、さらに厚さが100 μm あるので安全率を見越して500 μm の大きさ以下も計測しなかった。これは、面積では1%以下の誤差におさまっていた。1試料当たりの薄



図一三 実容積による気相率と薄片中の孔隙率との関係
Relation between gaseous phase ratio by actual volumenometer method and void ratio on thin section.

片は3～5枚で、孔隙率はその平均である。1枚の薄片中の誤差は1%以下で、薄片3～5枚間の誤差は最大5%以下であった。

これら土壌薄片から得られた孔隙率と、実容積測定による気相率の関係を図一三に示した。孔隙率と気相率は非常に高い正の相関を示した ($r=0.808$)。一例を示すと図中の1は、北海道の重粘質疑似グライ土の薄片でほとんど水で満たされているために気相率は非常に低いが、微小な孔隙があった。図中の2は静岡の赤色土表層である、大孔隙が多く中小の孔隙はほとんどない。特定の分布パターンは、土壌型に依存することがなく、土壌の孔隙の種類や大きさによっているようである。このことを検討するには分析点数が少なく、図中の点線は、孔隙のばらつきを標準偏差 σ の幅で示したものである。この回帰直線 $+\sigma$ の線より孔隙が多く測定されたのは、花崗岩由来のマサ土、腐葉土や火山灰を混合した人工土壌(3, 5, 6)と北海道の粗粒火山灰表層(4, 7)であった。回帰直線 $-\sigma$ の線より孔隙が少なく測定されたのは、静岡の黄色土表層(9, 10)、安山岩碎屑物で作った人工土壌(8)、それに北海道重粘質土壌の微小孔隙のまったく見られない土壌(11)であった。回帰直線の $+\sigma$ の線より外では大孔隙が多くみられた。孔隙率の測定値は小さい孔隙を切り捨てているために小さな値になるはずである。孔隙の測定値が大きくなった理由は、次の二つが考えられる。一つは、実容積測定器で測定できない独立した孔隙が存在した。もう一つは、孔隙の分布が偏った試料で、孔隙の多い部位を薄片化したことが考えられる。

回帰直線 $-\sigma$ の線より外にでたものは、粒団間に孔隙はあるけれども土壌基質の中には孔隙が余りみられない土壌であった。孔隙の測定値が小さくなった理由は、次の二つが考えられる。一つは、前述の孔隙の測定値が大きくなった理由と同じく、孔隙の分布が偏った試料で、分布が少ない部位を薄片化した。もう一つは、二次元の薄片では微小な点であるが立体的に見ると非常に細長く、大きな容量を持つ孔隙である可能性が考えられる。土壌孔隙の立体的な配置なども含めもっと詳細な研究が必要である。

2. 大礫が多く存在する土壌での三相割合の推定

100cm³の円筒では、実容積が測定できない大礫混じりの土壌で大型の薄片を作成し、その孔隙率から三相割合を推定した。

a) 実験法

試料採取には、精確に切り出した直径12cm、長さ10cmの塩ビ管を使用した。土壌を採取する前に、塩ビ管の質量を測定しておき、少しずつ土壌中にこの塩ビ管を押し込み、礫が邪魔にならないように注意して土壌を採取した。続いて一回り大きいあらかじめ質量を測定したステンレスのピーカーにこの試料を入れ質量測定する。液体窒素で急冷した後前述した方法で凍結乾燥を行い、乾燥後の重量を求める。ここで容積内の全水分量が得られる。前述した方法で樹脂を注入し、固化後薄片にした。

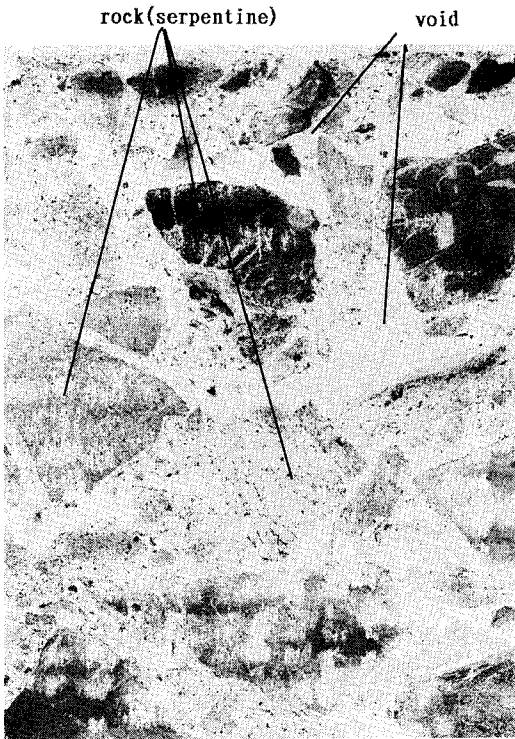
b) 結果と考察

薄片の一部を写真一に示した。30 μ mと薄いために岩石(この写真の場合は蛇紋岩)も透明になる。よって孔隙量を画像処理で求める場合は次のように工夫した。最初は通常の白色透過光で画像をコンピュータに取り込み、次に偏光をかけた画像をコンピュータに取り込む。孔隙は白色光で白、偏光で黒になるが、岩石は、白色で白、偏光でも白くなる。よってその差を求めると孔隙を求める事ができる。この結果、孔隙率が30.5%であった。気相率は、図一三の回帰直線から求めた。それから求めた気相率は27.2%となる。固相、液相は概算式で計算すると、液相率は最初に求めた全水分量で3.9%、固相率は気相率と液相率から求め、 $100 - (27.2 + 3.9)$ で68.9%となり、おおよその推定値が求められた。

IV. おわりに

実容積測定用の100cm³金属円筒を含んだまま十数枚の薄片が簡単に得られた。実容積測定による気相率との薄片の孔隙の関係から、従来の測定とは異なった三相分布割合の推定ができるようになった。

ここで得られた薄片は100 μ mと多少厚めであるが、これ



写真—2 大きな石を含む大型の土壌薄片白色光，横幅 80mm
Soil large thin section which contains large stone. Plane light, wide length 80 millimeters.

らをさらに研磨して約 $30\mu\text{m}$ 程度に仕上げれば，本格的な微細形態学の連続薄片も簡単に得られる事になる。土壌薄片を作ることはとりもなおさず，土壌微細形態学の手法である。土壌微細形態学は日本においてはあまり発展していない。しかしながら微細形態学的記載データは，国際的なシンポジウムやワークショップなどの土壌断面データに併せて，物理性，化学性のデータと共に必須のデータとなっている。土壌微細形態学は，土壌内部の組成や内部組織の変化などの観察には有効な手段である。しかし，土壌微細形態学が余り土壌の分析法として取り入れられることが少ない理由にはいくつか考えられる。第一に土壌の物理化学分析と異なり経験を必要とする野外の断面調査の記載と類似点が多く，見た目は一目瞭然であるが偏光顕微鏡による微細形態の観察記載が経験不足によりできない。第二に薄片の作成が困難である。第

三に微細形態学で使用する用語等が煩雑で理解が困難であるなどが考えられる。

しかしながら土壌微細形態学的観察がなくてもこの報告書のような実験には試料として使用できる。また連続した切片では，ある特定の孔隙やフィーチャー（土壌物質内の認知可能な集合体）に焦点を合わせて，これらを立体的に把握できる。さらに孔隙と粒団との関係，粘土の移動状態や量の概算ができる。現在非常に発達してきた画像解析用コンピュータで処理すればさらに孔隙の詳細な立体画像ができる。この方法で土壌内部の孔隙の配置や内部組織の変化などの観察が目視できるようになる。

まだこの実験方法は緒についたばかりであるから今後の研究によっては新しい段階に発展できると確信する。

謝 辞

この報告をまとめるに当たり，筑波実験植物園の矢野義治育成主幹と筑波大多田敦教授には貴重な御助言をいただいた，また（株）東電設計の村岡政行氏と（株）クレアテラ的美濃又哲男氏には人工土壌の試料を提供していただいた，記して感謝する次第である。

引用文献

- 1) 旭ダイヤモンド工業：ASAHI BORAZON（テクニカルマニュアル），pp 1—20, 1986
- 2) 平山良治：巨大サイズの土壌薄片の作成法について，筑波実験植物園研究報告，2，47—54, 1983
- 3) 平山良治：土壌薄片作成のための脱水法。森林立地，33（1），19—24, 1991
- 4) 神保徹：パソコンによる画像処理入門，pp 1—70, 地人書館，東京，1990
- 5) 田淵公子：土壌薄片の観察による土壌間ゲキの研究—関東ロームと磐田原赤黄色土—農業土木研究，別冊7，21—31, 1963
- 6) 田淵俊雄，田淵公子，長田昇：関東ロームの大間ゲキと透水性との関係，農業土木研究，別冊7，53—60, 1963
- 7) 竹中規雄，佐藤久弥：研削砥石の使用法と選択（機械加工技術シリーズ1），pp 1—180, 誠文堂新光社，東京，1971
- 8) 土壌物理性測定委員会編：土壌物理性測定法，1—24, 養賢堂，東京，1978

（受理年月日1991年6月3日）