

実容積法（付・測定法の現状）

— 土壌の3相構造の測定法 —

農 技 研 美 園 繁

1. ま え が き

土壌の3相・固相・液相・気相の組合せの状態を3相構造とよぶことにする。土壌の3相構造は、団粒構造や柱状構造などと同じように、土壌の構造上の性質の1つである。

土壌の3相構造に関する試験研究は、実容積法の利用によつて新しい分野を開き一定の発展をとげてきた。実容積法は、土壌の全容積 V_t 、全重量 W 、真比重 d とともに実容積 V を基礎量として土壌の物理的諸性質を測定する方法であつて、3相構造の測定のみ利用されるのではないが、容積法の利点をとり入れているので、3相構造の試験研究にとつてきわめて有効な方法である。この報告は、実容積の測定原理、装置、操作、一般的な物理的諸性質を測定するための計算式などについて述べるとともに、実容積法の特長を明らかにする。同時に、土壌の3相構造に関する試験研究の発展のあとをたどりながら、この分野の試験研究が圃場や土壌断面の3相分布を記述的に明らかにしていた段階から、実容積の導入によつて、それと全重量との相関を中心としながら、圃場状態の3相構造の特性を構造量として追及する段階に入つており、土壌固相と水分との相関を中心とするいはば実体論的段階に入りつつあることを明らかにする。

こうして、実容積法と土壌の3相構造の量的な測定法との関係を試験研究の発展の中で明らかにするとともに、土壌固相も水分も単なる物質系ではなく、それぞれに多くの構成要素や運動状態の異なるものによつて組立てられているので、今後の試験研究がより実体論的方向をたどるであろうことを検討する。

2. 実 容 積 法

実容積 V ：土壌3相の模型と物理的性質をしめす用語とその内容を第1図にしめす。

実容積は、固相と液相とのしめる容積のことであつて、土壌の実質部分の容積であるという意味ではない。土壌の3相構造については、固相、液相、気相のそれぞれが対等の構成要素であり、土壌空気に重量表示がないのは、われわれが大気圏の中で測定しているからである。全重量は固相と液相との重量和であるが、空気に重量がないという意味ではない。土壌空気は、土壌の風化生成作用や植物の生育にとつてきわめて重要な実体である。

測定原理：実容積の測定には、ボイルの法則を利用する。温度一定のとき気体の圧力と容積

との積は一定値をしめし、通常の気体にも近似的に成立する。いま、第2図のような単一空気系に、温度一定の下で圧縮を加え、容積と圧力とを同時に変化させると、両者の変化の方向は逆になるが、圧力の変化量は容積変化量に比例し、容積の大きさに逆比例する。

2つの空気系を第3図のようにU字型の圧縮管に連結し、等圧の状態から同時に圧縮をおこなうと、もとの容積の小さいものほど圧力の上昇が大きくなり、E点附近で水面差を生ずる。もとの容積が等しいときは、圧縮終りの状態でも両者の圧力は等しく、E点で水面差を生じない。

実容積の測定には、このような2つの空気系の同時圧縮を利用する。

測定装置：装置は、第4～6図のように、試料室、測定管、圧縮管、操作ポンプおよび各コックからなり、試料室系と測定管系とに2分され、両者は圧縮管を介して連絡され、平圧コックで同時に大気圧に開閉できる。

0点調整：試料室に標準容積片を入れ気密にし、測定管の水位を標準容積と一致するよみにしてコックAを閉にする。微量測定管の水位を管のほぼ中央にシコックBと平圧コックを閉にし全系を気密にした後、IからEまで圧縮をおこなう。Eの附近で水面差を確認し、水面をIにもどし、全系を開にして微量測定管の水位を調整する。調整の方向は、E附近で微量測定管側の水面が高いとき上げ、逆のとき下げとなる。調整量は、E点での水面差にほぼ比例する

水面調整が終つたら再び全系を閉にし、圧縮をおこない操作をくりかえし、圧縮終りの位置Eで水面が等高を維持して静止すれば、0点調整を終る。圧縮管の水面をIにもどし、全系を開にした後、微量測定管の水面に滑尺の0目盛を合せて固定する。

測定：試料室に試料を入れ、全系を閉にして圧縮をおこない、E附近での水面差を確認した後水面をIにもどし全系を開にする。E附近での水面差が大きいときは測定管Aの、水面差が小さいときは微量測定管Bの水面を調整する。調整の方向は、圧縮管の水位の高い側の測定管の水位を上げる。

調整が終つたら再び全系を閉にし、操作をくりかえし、圧縮終りのときE点で水位が等高で静止するまでつづける。圧縮管の水位が等高を維持して静止したら水位をもとにもどして測定操作を終る。

測定管A、Bの水面のよみをそれぞれa、bとすると、実容積Vは

$$V = a + b$$

となる。bの値は、1000CC型の装置では0より上方が負、下方が正となり、2000CC型の装置では逆になる。

実容積の測定の終つた試料は、直ちに全重量の測定に供せられ、第1表の計算式にもとづい

て物理的諸性質がつつぎと求められる。

実容積法の特長：実容積法は圃場状態の構造を維持したまま、一般的な土壌の物理的性質を統一的に測定することができる。同時に、容積法の利点をもっているので圃場における問題に直接的な解答を用意し、これがまた3相構造を量として追及できる道を用意する。

3. 土壌の3相構造の測定

土壌の3相構造の試験研究は、土壌断面や圃場状態の3相分布を測定し、第7~8図のように表示する記述的な段階からはじまった。この時期の測定には必ずしも容積法が採用されていたわけではなく、固相率 S_V あるいは孔隙率 P の測定にも、真比重 d と仮比重 d_a とを用い

$$P = (1 - d_a / d) \cdot 100$$

$$S_V = 100 - P$$

水分率 M_V は水分重量から求める方法が採用されていた。また、3相分布の変化も3相相互の関連としてではなく、主として孔隙内の水分と空気との相互関係を重視していた。

実容積の導入によつて、3相構造の状態が直角座標上の点 (W, V) によつて表示されるようになる。当然、3相構造あるいはその変化の定量的、かつ法則的な追及がはじめられた。全重量 W と実容積 V との相関を中心とする研究はその1例である。第9図に示められているように、通常、圃場状態では両者の相関は直線で表示できる。

このことから回帰係数 m および常数項 C は構造変化の特長をしめす量であるという意味で構造量として提唱された。

ところで、 $V = mW + C$ の直線相関が成立すると、第2表のように固相率と水分率との相関が形式的にみちびき出せる。それを、 $M_V = m'S_V + C'$ とすると、 m と m' との間には、真比重 d を媒介として、第2表のような関係がある。形式的にみちびき出された m' の物理的内容は、全面的には検討されていないが、3相構造の中での固相と液相との相互関係を表示するものとして、重要な意味をもっている。例えば、 $m' > 0$ とすると、固相率の増加は水分の増加をとまらうことを意味し、固相率の増加が粗孔隙の減少、毛管孔隙の増大、空気率の減少、水分率の増大をとまらうことを意味する。実験例を第10、11図に示した。

また、 $m' < 0$ とすると、固相率の増加は水分率の減少をとまらうことを意味し、それには第12図のように固相率は比較的小さいが飽和に近い湿田の例と、固相率は大きく、緻密になつている乾田スキ床の例(第13図)とがある。 $m' < 0$ は、 $m < 1/d$ とまらうので、全重量と実容積との相関の程度は一般に低いか、あるいは認められない場合が多い。このように m, m' あるいは検討は十分におこなわれていないか、 C, C' は土壌の3相構造の性質を表示する構造量とすることが可能である。

構造量としては、いま述べたものの外に実比重 d_m 、分布角 θ 、水分一固相率 M_v/S_v などが提唱されているが、その物理的な意義は今後の研究によつて明らかにされるであろう。

土壌の3相構造に関する研究が、全重量と実容積との相関を中心としながら、固相率と水分率との相関を中心とする分野に発展していつた経過をみると、この研究が実体論的段階に入りつつあることをしめしている。もちろん、土壌の固相は有機物、無機物を含む複雑な物質系であるし、土壌水分も重力水、毛管水、膨潤水、吸湿水など、その状態によつて性質の異なるものを含んでいるから、決して単純な実体ではないが3相構造の構成単位であるという意味では実体論的な取扱いを可能にする。

この方向をさらに進めているのが丹原、栗原氏の研究で、第14図はその1例である。100ccの試料円筒に種々の充填密度で土壌を充填し、そのままの状態、PF 1.5、PF 2.7、PF 4.2の状態、固相率と水分率との相関を求める。試料採取のままの状態では両者の相関は直線で示されるが、PF 1.5では、固相率のある値を境にして両者の相関は正から負にかわる。PF 2.7では、固相率がある値までは正の相関をしめすが、それより大きな固相率の範囲では、水分率はほぼ一定になり、PF 4.2では、固相率のある値をこえると、回歸係数に若干の変化はみとめられる。が、全体を通じて正の相関が維持される。

相関にこのような変化を生ずる固相率の値は、土性によつて変化し、腐植含量の多い表層土では、その下層土よりも小さな値をしめす。

これらの実験結果は、多くの興味ある事実をしめし、今後の検討によつてその内容も豊富になるであろうが、少なくとも、固相率と水分率との相関をしめす量が、3相構造の特長をしめす構造量となりうることをしめすとともに、実体論的な研究が今後必要であることをしめしている。3相構造に関する研究の将来の発展は、このような実体論的な分野の強化を1つの方向とするであろう。

固相率と水分率との相関を中心とする研究から、水分一固相率 M_v/S_v が構造量として採用できるかどうかの検討がはじまつている。水分一固相率は、これまで広く利用されていた含水比とは、真比重のみの違いであるが、前者は容積法にもとづき、後者は重量法にもとづいて採用されている量である。

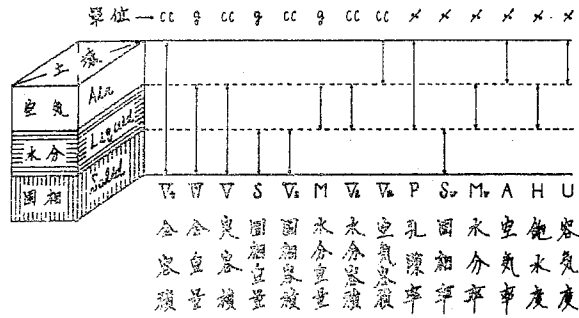
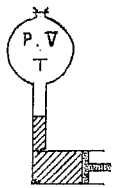


圖 1 土壤模型と定義



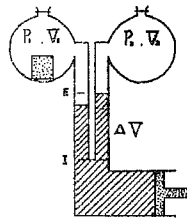
$$P \nabla = \text{Const.} \quad (T = \text{const.})$$

$$(P + \Delta P)(\nabla + \Delta \nabla) = \text{Const.}$$

$$P \Delta \nabla + \nabla \Delta P + \Delta P \Delta \nabla = 0$$

$$\Delta P = -P \Delta \nabla / (\nabla + \Delta \nabla)$$

圖 2 單一空氣系



壓縮 (I → E)

$$V_1 < V_2 \quad \bullet \bullet \bullet$$

$$P_1 > P_2, \Delta V_1 < \Delta V_2$$

$$V_1 > V_2 \quad \bullet \bullet \bullet$$

$$P_1 < P_2, \Delta V_1 > \Delta V_2$$

$$V_1 = V_2 \quad \bullet \bullet \bullet$$

$$P_1 = P_2, \Delta V_1 = \Delta V_2$$

圖 3 2 空氣系

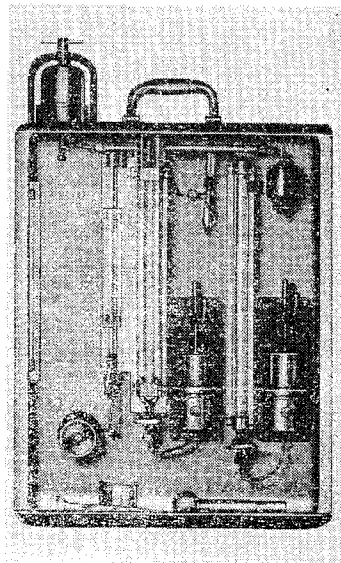


圖 4 真空測定裝置

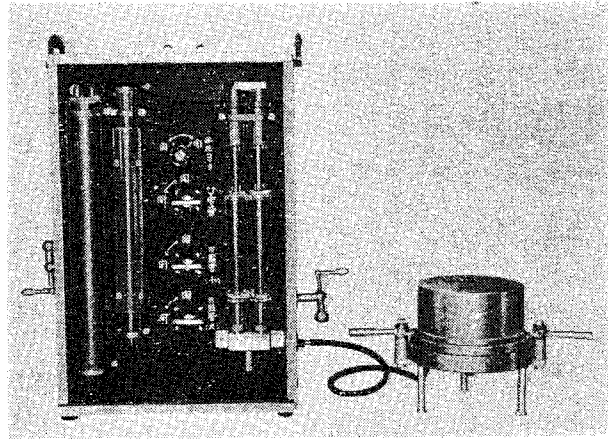


図 5 大型実容積測定装置

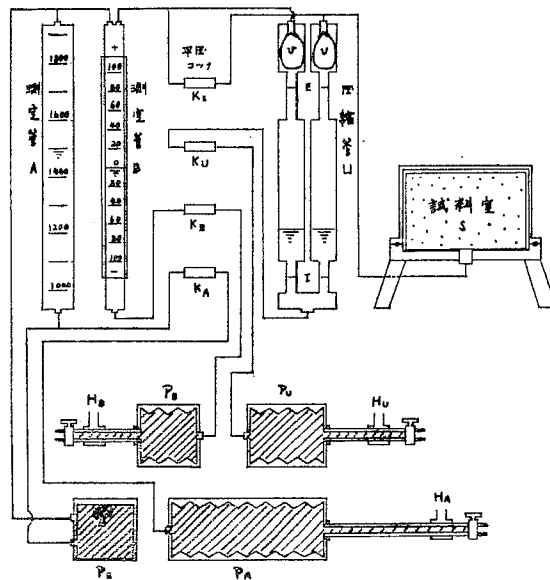


図 6 大型実容積測定装置の構造

計算式 1

$$\begin{aligned} \text{固相容積 } V_s &= (W - V) / (\alpha - 1) & V_s &= 100 \\ \text{固相率 } S_s &= V_s / V_s \cdot 100 & S_s &= V_s \\ \text{水分容積 } V_w &= V - V_s & & \\ \text{水分率 } M_s &= V_w / V_s \cdot 100 & M_s &= V_w \\ \text{空気容積 } V_a &= V - V & V_a &= 100 - V \\ \text{空気率 } A &= V_a / V_s \cdot 100 & A &= V_a \\ \text{孔隙容積 } P &= V - V_s & P &= 100 - V_s \\ \text{孔隙率 } P &= P / V_s \cdot 100 & P &= P \\ \text{水分含量 } M &= V_w & & \\ \text{固相含量 } S &= W - M & & \\ \text{飽和度 } H &= V_w / P \cdot 100 = M_s / P \cdot 100 & & \\ \text{空氣度 } U &= V_a / P \cdot 100 = A / P \cdot 100 & & \end{aligned}$$

計算式 2

$$\begin{aligned} \text{真比重 } \alpha &= (W - V) / (V - M) \\ &= W / (V - M) \cdot 100 / (W - V) \\ \text{土層の全水分 (M/kg/cm)} & \\ Q &= M \cdot h \\ Q &= \sum M_w \cdot h_w \\ \text{雨量換算 } \beta &= Q / I_0 \\ \beta &= \sum M_w \cdot (k=10) \\ \text{灌漑水量 (ha, h, cm)} & \\ Q_n &= P \cdot h \cdot n \quad (H \rightarrow +n \cdot \alpha) \\ Q_n &= \alpha \cdot h \cdot n \quad (M_s \rightarrow +n \cdot \alpha) \\ Q_n &= \alpha \cdot h \cdot n \quad (M_s \rightarrow +n \cdot \alpha) \\ \text{実比重 } \alpha_n &= W / V \end{aligned}$$

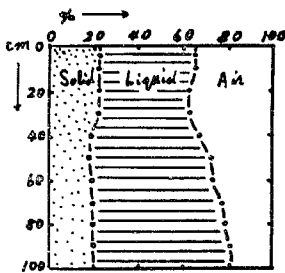


図7 土壤断面の3相分布

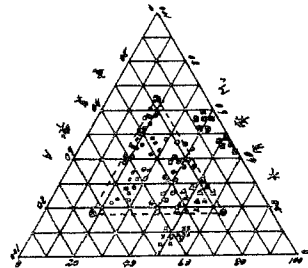


図8 畑土壤の3相分布
○ 元土質土壤, □ 砂質畑土壤
△ 砂質畑土壤, □ 砂質水田土壤
× 砂土

図8 畑土壤の3相分布

全重量と実容積，固相率と水分率との相関関係

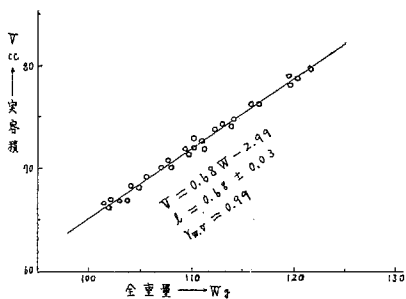


図 9 全重量と実容積との相関，銚田火山灰土壌，表層土

$$\begin{aligned}
 V &= mW + c \\
 V_1 + V_2 &= m(dV_1 + V_2) + c \\
 V_1 &= (m d - 1)/(1 - m) \cdot V_2 + c/(1 - m) \\
 M_1 &= m' S_1 + c' \\
 m &= (m d - 1)/(1 - m), \quad c' = c/(1 - m) \\
 m &= (1 + m)/(d + m), \\
 c &= c'(d - 1)/(d + m) \\
 m &= \Delta V / \Delta W = (1 - d - 1) \Delta V' / (d' \Delta V_1 + \Delta V_2) \\
 &= 1/d(1 + (d - 1) \Delta V' / (d' \Delta V_1 + \Delta V_2)) \\
 \Delta V_1 > 0, \Delta V_2 > 0; \quad 1 > m > 1/d; \quad m' > 0 \\
 \Delta V_1 > 0, \Delta V_2 < 0; \quad 1 > 1/d > m; \quad m' < 0 \\
 d m &= W/V \\
 \theta &= 2m' V/W = \cot^{-1} dm
 \end{aligned}$$

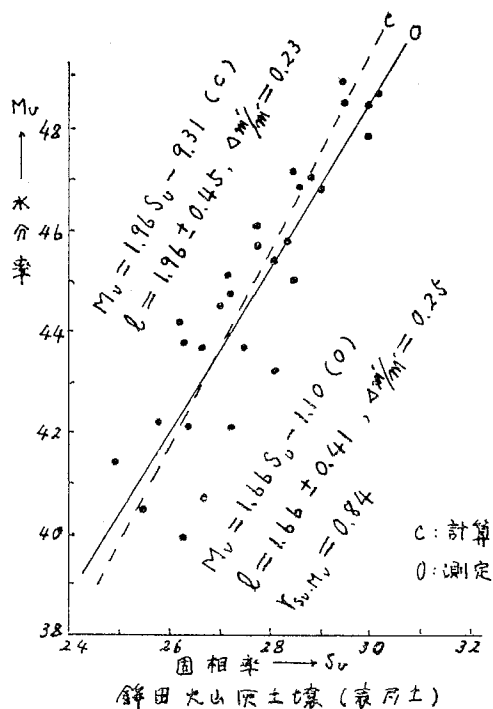


図 10 固相率と水分率との相関

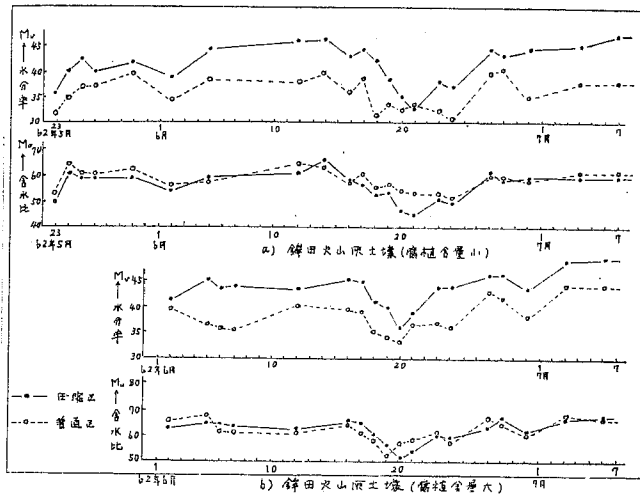


図 11 土壤の圧縮と保水性

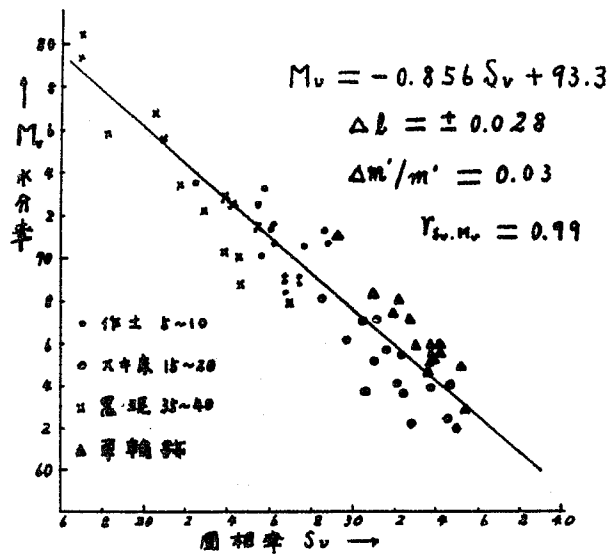


図 12 鴻の巣湿田土壤の固相率と水分率との相関

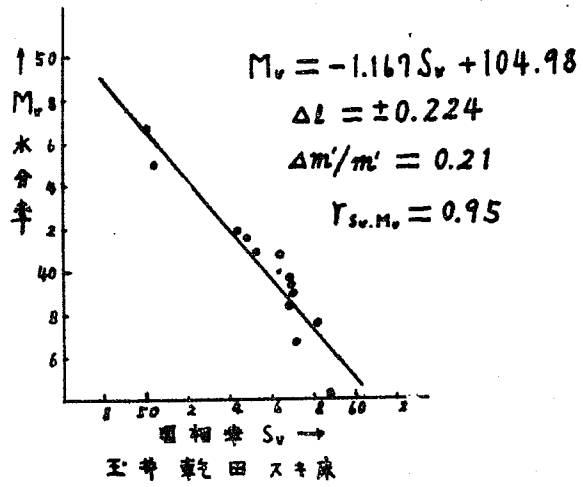


図 13 玉井乾田土壤の固相率と水分率との相関 (スギ床)

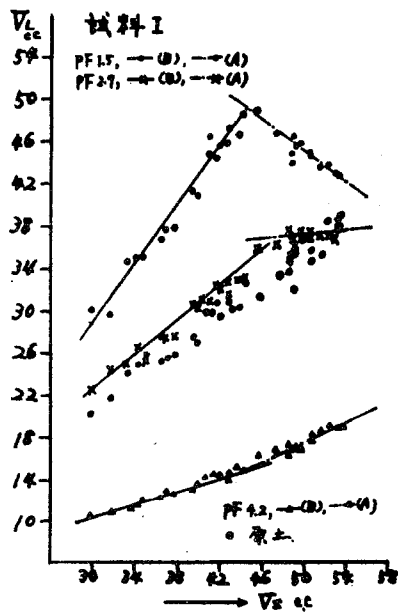


図 14 固相率と水分率との相関
(愛媛農試, 丹原)