

# 綜 説

## 土壤水分吸引測定装置の改良について

石川武男・徳永光一・月館光三

岩手大学農学部

### は し が き

遊離エネルギーによる土壤水分の表示とその解析は、土の構造や透水性をはじめとして、その物理的・力学的諸性質の解明にとつて、きわめて有効な方法であつた。しかしながら、その測定法は未だ普遍的なものが確立されているとはいひ難い。ここではpF 3.0以下の低領域での吸引法について、多くの研究者が創作した各種装置の改良と発展の跡をしらべ、筆者らが用いている装置に言及したいと思う。

#### 1. 諸研究者の吸引測定装置

まずこれまでに改良製作されてきた諸装置から、主なるものの特徴と、若干の所感をくわえ改良と発展の跡をたどつてみることにする。

##### 1) Haines<sup>1)</sup>の装置(1930年)

ビューレット内の水位をコックにより調節することで、ブフナー漏斗内の試料に任意のサクシオンが作用する。平衡後のビューレット内水位変化により試料の含水量を知る。試料寸法は、 $\phi 9\text{cm} \times$ 高さ2cm。Hainesはこの装置で理想土壤と砂についてヒステレシス曲線の測定を行つた。

(筆者所感) 後述するRussellの装置の原型に当ると考えられる。これらHaines型の共通点として脱・吸水量によつて、最初の作用圧が変化するため平衡に達した時は、所期の負圧が作用できない欠陥がある。

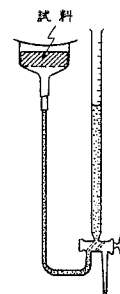
##### 2) Schofield<sup>2)</sup>の装置(1935)

ブフナー漏斗に濾紙を敷き、その上に吸引を行いながらシルトを厚さ1mmに敷いてフィルターとする。吸引圧を一定に保つて脱水の終了後、試料を取出して含水量を測定する。

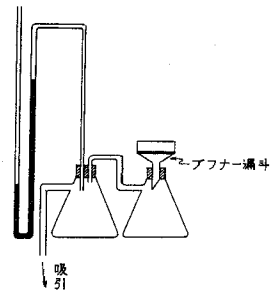
(所感) 圧力を変えて、同一試料を連続的に測定できないこと、吸水系の測定が行えないなどの欠陥がある。しかし、フィルターから多少の空気が洩入しても測定可能なことや、装置の簡便さから今日でもなお用いられているものの一つである。本装置の使用はBouyoucosの方が古く、1927年に同様な装置を用いている。

##### 3) BradfieldとJamison<sup>3)</sup>の装置(1938)

試料からの脱・吸水量は、ほぼ水平に横たえたピペットの目盛変化で観測する。吸引圧は電磁弁の開閉によつて、一定圧に調節させながらサッカーで作用する。フィルターはLivingston蒸発計チューブや $\frac{5}{3}$ バクテリア・フィルター(孔隙径1~1.5 $\mu$ )を用いた。こ



第1図 Hainesの装置  
(1930)



第2図 Schofieldの装置  
(1935)

れらは水銀柱-60cmまで空気の洩入を  
生じない。

(所感) Hainesの装置は脱・吸  
水量によつて作用圧が変化する。しかし  
本装置では量水ビュレットが水平のた  
め、真空調節装置が附属すれば非平衡状  
態においても一定圧を維持できる。測定  
領域も pF 2.9まで拡張されており、吸引  
法として、ほとんど完成の域に近い。

(ただし、真空調節装置はRichards

の考案によるものである。)わが国では、上記フィルターの入手が困難なこと、圧力調節装置が繁鎖で  
高価なため本装置の製作は行われていないようである。

4) Richards<sup>4)</sup>の装置(1938)

正圧と負圧を作用させ、試料に対して水銀柱150cm程度までの張力を加えることができる(張力  
 $T = h_1 + h_2 - \frac{h_3}{13.6}$ )。Richardsはこの装置をPressure cellとよんでいる。二重壁自  
働かん水ボットを利用して、加圧部分を改修した装置である。試料容積は68ccであるが、必要があれば2400ccの自動かん水ボットを用いることもできる。

水分変化はビュレットで観測するから、連続的に圧力を変えて測定できる。0.02cc/day以下の  
水量変化に達した時を平衡状態とする。脱・吸水両過程の測定ができる。

(所感) 正圧と負圧を用いた点が  
独特である。吸引法装置というよりは、  
1947年にRichardsが完成する圧  
膜脱水装置の原型とみられる。

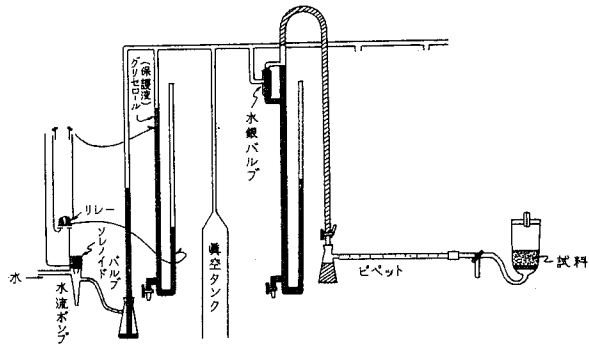
5) Russell<sup>5)</sup>の装置(1942)

外管を上下することにより、試料に  
張力をあたえる。重液と水の界面変動  
により水分変化量を測定し、張力は  
 $H = a + b + s \cdot c$  (水柱 cm) であたえ  
られる。重液はテトラブromエタン  
( $s = 2.97$ )又は水銀を用いる。フィ  
ルターはシンタードガラスを用いて  
-140cm(水柱)まで測定している。

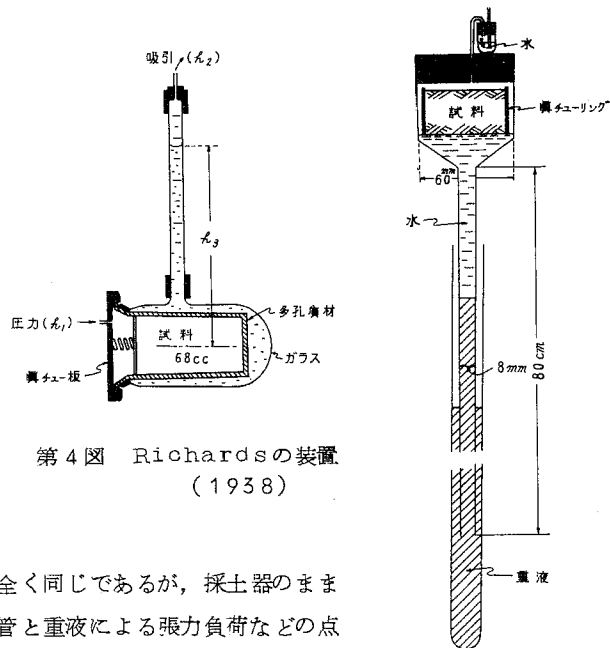
(所感) 原理はHainesのものと同じであるが、採土器のまま  
不攪乱試料をセットできることや、二重管と重液による張力負荷などの点  
で一步前進しているとみられる。しかし8)に述べるような欠陥がある。

6) BendixenとSlater<sup>6)</sup>の装置(1946)

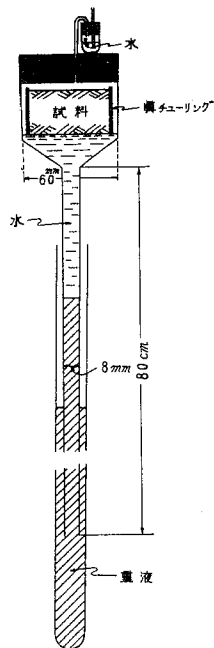
主として、野外試験に用いる装置で、-60cmの負圧で1時間観測を続け



第3図 BradfieldとJamisonの装置(1938)



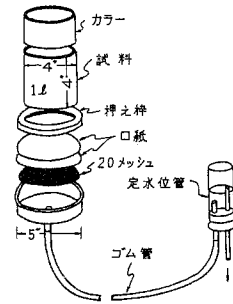
第4図 Richardsの装置(1938)



第5図 Russellの装置(1942)

て終了する。1時間以内における脱水量～時間曲線の形から、孔隙分布の傾向と透水係数の大小を知ることが目的とする。フィルターは濾紙2枚を重ねて用いる。定水位管を上下して所定の負圧を作用させ、脱水量は定水位管からの溢流水を測定する。Smith, Browning, Pohlman らの装置を現地試験用に単純化したものである。

(所感) 水柱差によつて負圧を作用させる点はHainesの装置と同じ原理であるが、定水位管を用いて脱水量による圧力変化を防止した点は注目してよい。但し吸水系は測定できない。現場で短時間に測定が可能なこと、不攪乱採土による透水係数の測定よりも本装置の測定結果の方が、浸透速度の判定に信頼性が高い点などBendixenらの主張は今後も検証するに値する。なお筆者らの経験によれば国産濾紙の漏気圧も2枚重ねで-60cm程度であつた。

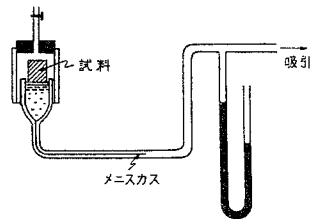


第6図 Bendixenと  
Slaterの装置  
(1946)

#### 7) Cronneyの装置(1952)

原理図のみで詳細図は示されていないが、フィルターはシンタード・グラスで測定結果はpF 2.8まで示されている。非圧縮性、半圧縮性、圧縮性の三種土質についてヒステシスを測定している。試料土は路床・路盤のものである。

(所感) 原理はBradfieldのものと同様であるが、試料土を採土環からはずして収縮・膨張を自由に行っていることは注目すべきであろう。



第7図 Cronneyの装置  
(1952)

#### 8) 内山・西塚の装置(1954)

Russellの装置では次のような欠陥があるので、これを改良した装置である。i) 吸引圧零点の位置を精確に求められない。ii) 脱水量が多い時は重液界面が甚しく低下し所定の負荷圧を作用できなくなる。iii) 試料飽和のための給水装置が必要である。iv) 重液・テトラブromエタンは高価で、数回使用の後は白濁して使えなくなる。

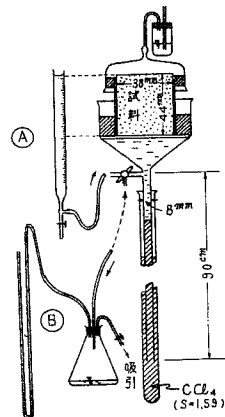
これらの点を改良して装置④により試料飽和の便をはかり、⑤によつて過剰水の排除を可能とし、重液として安価な4鉛化炭素を用いた。また、吸引圧零点は飽和試料表面にとるべきことを明らかにした。フィルターはG4シンタードグラスを用いた。

(所感) Russellの装置を大きく改良した意義は認められるが、Haines型共通の欠陥として非平衡時の圧力が一定に維持できない点は本装置においても改良されていない。

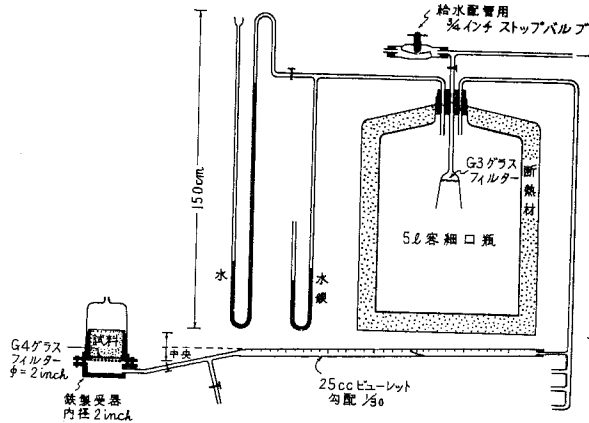
#### 9) 北岸・沖田の装置(1956)

Bradfield型3)について次の点を改良したものである。i) 吸引圧調節装置を簡便化した、ii) 不攪乱試料をセットできるようにしたこと。

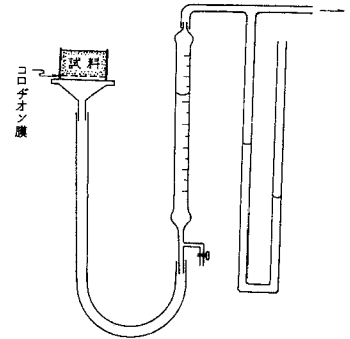
(所感) 後述する。



第8図 内山・西塚の装置  
(1954)



第9図 北岸・沖田の装置(1956)



第10図 真下の装置(1957)

10) 真下の装置(1957)

フィルターはコロジオン膜を用い(3.3%のコロジオン水醋酸溶液に炭酸カリをコロジオン量の $\frac{1}{4}$ に加え,真空乾燥濾紙をこの溶液に浸漬し,引上げて余瀝を除き手早く水中に入れて固まらせ,よく水洗いする), $pF 0 \sim 2.7$ の測定を行つている。減圧吸引によつて土壌より引き出された水の量をビュレットで読み取る。試料は400caの採土円筒で採取したものを飽和後円筒のまま漏斗にセットする。脱・吸水両系の測定が可能である。

(所感) 外観はHainesのものと同様であるが,負荷を水柱差であたえるのではなく,減圧吸引によつている点は,SchofieldやBradfield型と同じである。取扱い簡便であるが,抽出水による圧力変化の調節は人為操作にまたねばならぬようである。しかし,コロジオン膜の作成に改良を試みている点を注目すべきである。

## 2. 装置改良の問題点

### 1) 装置に必要な機能

前節で年代順に各種装置を概観したが,これらの装置がそれぞれに有する特長や,筆者らの経験を総括して,より優れた機能をもつために装置の機能にはどのような点が必要であるかを挙げて見る。たゞし,実験の目的に応じて,必要な機能も多少異ってくるが,ここでは $pF$ -水分特性曲線の観測を目標として論ずる。

- (i) 同一試料について,各張力段階に応じた平衡水分を連続的に測定できること。
- (ii) 脱・吸水系の切替え測定が連続的に行えること。
- (iii) 水分の非平衡時における負荷張力が,一定値を維持するよう自動調節されること。
- (iv) 試料に接触するフィルターの精能(漏気圧,透水性,耐用性)が優れていること。
- (v) 水分変化に応じて試料容積の収縮・膨脹が自由なこと。試料は自然状態のものもセットできること。

以上の各要素はいずれも,その重要性において優劣をつけがたいが,(i)(ii)(iii)は装置の機構全体に関係し,(iv)(v)は装置の部分的改良に待つことができるので本稿では主として(i)(ii)(iii)の諸点を問題として,前節に述べた各種装置を検討する。

## 2) 水頭負荷式と気圧差負荷式の比較

従来、わが国では吸引装置を垂直型と水平型に分類することが行われているが、これは量水ビュレットが外見的に垂直か水平かということに着目した分け方で、きわめて便宜的なものと思われる。

しかし、筆者らは各装置の特性を比較し、さらに今後の装置改良の方向を明らかにする立場から、試料に対する張力負荷方式によつて前述の各種装置を大別してみたい。装置1) 5) 6) 8)などは、いずれも水柱(重液柱)の水頭差で負荷されるから水頭(または重力)負荷式とよぶことにする。これに対して2) 3) 4) 7) 9) 10)などは真空ポンプによる気圧差で負荷を行つているから気圧差負荷式と呼ぶことにする。

この両方式が前項で述べた“装置に必要な機能”(i)(ii)(iii)を、いかに満足させたかについて以下に検討する。

(i)の連続測定については、装置(2)を除けば負荷方式の如何を問はず可能であり、大部分の装置が量水ビュレットを用いて解決している事は、今後の装置改良においても継承されるであろう。

次に(ii)の脱・吸水系の切替についても装置(2)、6)を除けばいずれも可能であり、その特長は試料・フィルター・量水管の三者が連続水柱によつてつながっていることである。この点も今後にうけつがれる方法と思われる。

第3に負荷方式によつて異なるのは(iii)の張力変化に対する自動調節の問題である。前節の各種装置で見た通り、水頭負荷式ではこの点がすべて人為調節にまかされており、自動化されたものは一つもなかった。これに対して気圧差負荷式の3)では自動化されている。そこで自動化を可能あるいは不可能にした理由について考えると、(i)水頭負荷式では、量水管中の水位増減による張力変化を調節するには量水管の位高調節をはからねばならなかつたが、これは装置として自動化が困難であつた。しかし、(ii)気圧差負荷式では、張力変化が空気圧変化として現われるから、真空調節装置を用いればよい。空気圧調節の方が、量水管の位高調節に比べて、自動化が容易であつたと思われる。したがつて、従来の装置を気圧差負荷式と水頭負荷式に分けて考えた場合、張力自動調節については前者が後者より優れていたと云うことができる。

しかし、張力の自動調節の可能性についての、より本質的な問題は装置が次の2つの機構的条件を満足していることにあると思われる。この条件が満たされていれば、水頭負荷式であつても将来においては張力の自動調節が可能になると思われる。すなわち、

a) 量水管と張力負荷源が分離していること。

b) 量水管が定水頭であること。

a)については、気圧差式では総て必然的に分離が行われている。これに対し水頭負荷式では殆ど行われていない。しかし水頭負荷式でも装置6)のような方式で、定水位管の下部に量水管を設置すれば分離は可能となるのである。b)は装置3) 7) 9)では量水管を水平にすることで解決しているが、後述する筆者らの装置のように垂直型でも解決は可能である。

いずれにしても、張力調節の自動化を計る場合、上記a) b)の機構的条件を満足する装置が今後の改良の方向とならう。以下に述べる筆者らの装置もその試みの一つである。

### 3. 筆者らの装置

筆者らは1.9)に述べた北岸・沖田らの装置を2~3年使用してきた結果、その簡便さにおいて有用

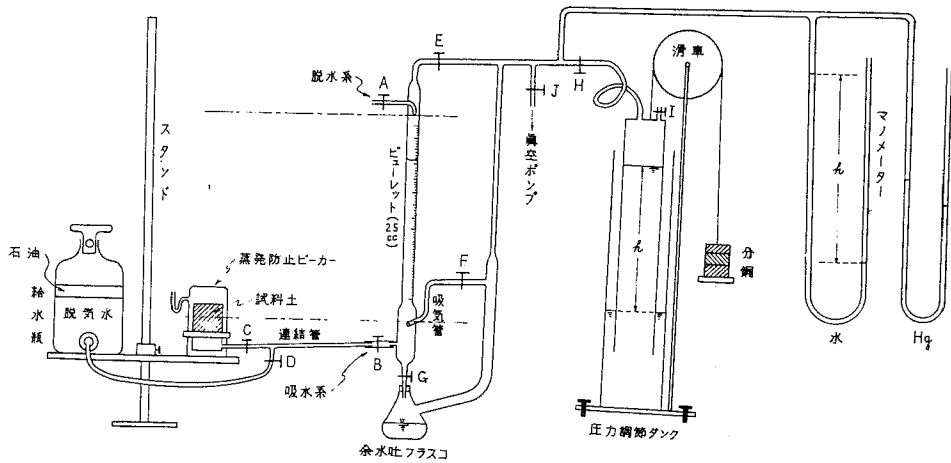
な測定法であることを確認したが、次に述べるような二三の欠陥をも認め漸次改良の末、今日では殆ど原型をとどめなくなった。まず北岸式装置の欠陥を要約しよう。

1) 北岸式では圧力調節を人為操作で行うのが原則である。緩衝タンクにより調節操作を軽減しようとしているが、この緩衝機能はほとんど期待できない。(特に夜間など無人で実験を継続できない。)

2) 北岸式はG4 グラスフィルターを用いてpF 230まで測定する。それ以上の高圧はG4 フィルターの上にZsigmondyのメンブラン・フィルターを貼付する。筆者らの経験ではメンブラン・フィルターは、1~2回で破損した。又貼付作業もなかなか困難であった。国産のG4 グラスフィルターはpF 2.0程度が限度であった。

3) 量水ビュレットがほぼ水平( $\frac{1}{90}$ の傾斜)である。そのためメニスカスが長円形となる。したがってメニスカスはビュレット内の位置によつて、形状が不規則となり観測誤差は大きくなり易いなどである。

筆者らはこれらの点を改良したが、その概要は第11図に示す。(改良された装置は2連式であるが、図は1連式を図化してある。)



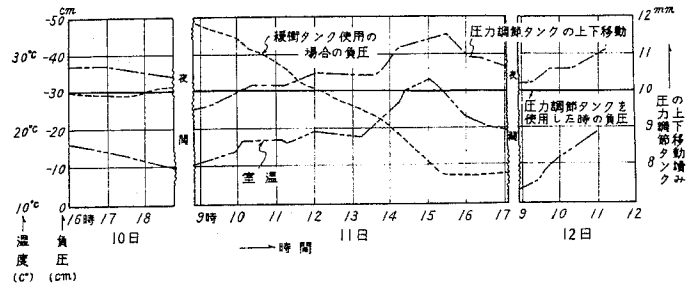
第11図 土壌水分吸引測定装置(改良型)

### 1) 圧力タンク

吸引圧は滑車を通じカウンターウェイトによつて作用させる。ウェイトを調節することにより任意の負圧 $h$ を得る。気温変化と脱・吸水量による圧力変化は、ウェイトと滑車で自動的に調節され、恒圧を維持する。理論上はタンクの上げ下げにより水中部分のシリンダー壁(高さ $\Delta h$ )の排除する水の浮力だけウェイトの相対的重量に変化が生じ、圧力調整に誤差が生ずるはずである。しかしタンクの断面積が十分に大きいので、実験的にはほとんど完全な恒圧が得られる。第12図は改良タンクと北岸らの緩衝タンクによる、圧力調節機能の比較試験結果(試験中人為調節を加えない)である。改良タンクは気温の変化 $10^{\circ}\text{C}$ に対し、圧力の変化は $\pm 0.2\text{cm}$ で、ほとんど恒圧とみなすことができる。気温変化に対するタンクの上下移動はきわめて敏感であった。

(改良タンクの寸法) 内側シリンダー  $\phi 11.0\text{cm} \times 125\text{cm}$   
外側シリンダー  $\phi 12.0\text{cm} \times 115\text{cm}$

(構造上の注意) シリンダ  
 ーの材料は 1.5 mm 厚の鉄板、ペ  
 ンキ塗装で、とくに内側シリン  
 ダー断面は上下一様にするこ  
 とが原理的に必要である。又滑  
 車は軸受にベアリング付とし、  
 直径の大きい (φ 2.2 cm) 単一  
 滑車が良い。10 gF の重量差  
 でも滑動するよう配慮した。



第 12 図 圧力調整機能比較試験 (負圧 30 cm における試験)

(操作並に利点) ウェイトを加減するだけで所要の圧がえられる。-100 cm には約 15 kg の分銅を  
 必要とし、100 gF が約 1 cm に相当する。構造・操作が単純であるため、故障はほとんどない。

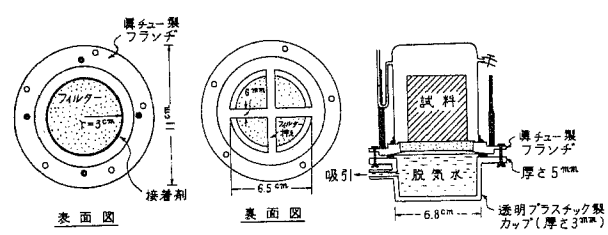
(使用限度) 構造上 -100 cm 程度が限界であり、pF 2.0 以上については目下研究中である。

2) フィルター及び試料セット

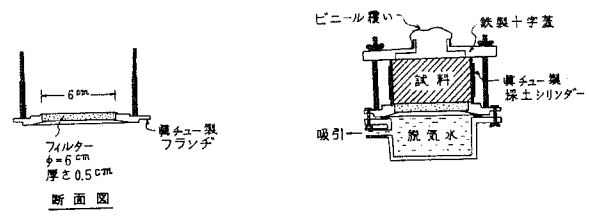
(フィルター) フィルターは、G 4 グラス・フィルターと石膏フィルターを用いた。前者は pF 0  
 ~ 2.0, 後者は pF 0 ~ 2.8 まで測定可能である。石膏フィルターはテンションメーターのポーラスカ  
 ップと同一の材質である。フィルター寸法は直径 60 mm, 厚さ 5 mm の円盤で第 13 図のような真鍮製フ  
 ランヂに固定した。又フィルターの透水係数は次のとおりである。

ガラスフィルター  $k = 3.41 \times 10^{-5} \sim 9.47 \times 10^{-6} \text{ cm/s} \cdot \text{sec}$   
 石膏フィルター  $k = 1.35 \times 10^{-7} \sim 2.24 \times 10^{-8} \text{ } \quad \text{''}$

石膏フィルターは、k の値から  
 推定できるように、通水が悪く、  
 測定に長時間を要するのが欠点で  
 ある。けれども測定領域をかなり  
 大巾に広げることができる。又両  
 フィルターはくり返し使用に耐え、  
 筆者らのガラスフィルターは 3 年、  
 石膏フィルターは 1 年間用いてい  
 る。



(フランヂ) フランヂは脱気  
 水中で、カップとボルトで接合す  
 る。フィルター底面は、気泡附着  
 を防止する意味では全面露出させ  
 たかつたが、pF 3.0 近くの吸引



第 13 図 フィルター、フランヂ並に試料取付図

圧でフィルター破損のおそれもあつたので、十字型の支えを残した。この支えとフィルター底面との間  
 は、接着剤で密着し、空間を生じない。

(接着剤) フランヂは真鍮製で、これと上記各フィルターとの接着は、実際にとつて重要である。  
 筆者らは木材用ボンド、セメダイン 1.500 等を用い、負圧をかけながら、更にパラフィンを塗布した。

フランジが鉄製又はガラス製のときは、歯科用のセメントでもよい。

(試料) 供試土は $\phi$  5.0 cm, 高さ約 5.0 cm (100 cc) の採土シリンダーから抜きだした状態で、直接フィルターにのせる。したがって吸水・脱水による試料容積の膨脹・収縮を自由に行わせることができる。今後は測定前後における試料の容積変化を、測定できる方法が必要と考える。砂土のように自立できない試料は、採土シリンダーをフランジに固定したまま供試する。

(カップ及び給水びん) フィルター、フランジを取り付ける下部の受器は、透明硬質ビニール製のカップとして、気泡発見を容易ならしめる。又給水びんには、 $-70$  cm Hg で脱気した水を用い、上部に石油を厚さ約 1 cm 入れ、空気の溶解を防いでおく。

### 3) 脱・吸水量測定のビュurette

第 1 1 図に示したように量水ビュuretteは垂直にした。25 cc で最小目盛  $\frac{1}{10}$  cc である。吸水系の場合図のようにビュurette B 孔に試料部を接続する。ビュuretteはマリオット管として働く。したがって吸水孔と試料中心高さを同一水準に調節しておけば、量水ビュurette内の水位が変化しても、恒圧下に試験が行われる。

脱水系の場合はスタンドに沿って試料を上部に固定し、ビュuretteの A 孔に接続する。ビュurette下部の零目盛まで満水しておき、脱水量は A 部先端の細孔より滴下し管壁を伝わってビュurette内に貯留される(したがって、この場合ビュuretteはマリオット管ではない)。細孔先端の水準に試料土中心高さが一致するようにスタンドを固定すれば、恒圧下に試験が行われる。ビュuretteは垂直であるから、水平型の欠陥であるメニスカスの不規則は生じない。

(操作) 脱水系については 1) コック E, F, J を閉じ、H を開き分銅を調節し (pF 2.0 以上の時は、H を閉じ J を開き真空ポンプによる) 所定の圧を作用させた後、脱気水で満水させた連結管をコック A に接続させる。2) D, A, F を開きビュurette下部を F の高さまで満水し、D, F を閉じる。G を開きビュuretteの零目盛に水位を合わせる。3) E, C を開くと A から滴下、脱水がはじまる。

吸水系については 1) 連結管を B に接合し、A を閉じ所定負圧を作用させた後、F を閉じ D, B, E を開いてビュurette内に満水させ再び D を閉じる。2) E を閉じ、F を開いた後 G により水位を調節する。3) C を開くと試料が吸水をはじめ、吸水につれて吸気管から気泡が吸入される。

### 4) 測定法

試料の飽和は脱気水によつて 2 4 時間行い、フィルター上に直接のせて軽く密着させる。前述のように石膏フィルターは透水係数が低いので、吸水・脱水がおわるまで約 1 0 時間を要する。ガラスフィルターでは約 2 時間で平衡に達するから、測定圧を多くとるときは、pF 2.0 以下はガラスフィルターで、以上では石膏フィルターを用いる。実験の途中で試料を移動することは好ましくないが、注意して行う場合は、えられる pF 曲線からみてほとんど支障がない。

その他測定上の一般的なことや、測定結果の整理、表示方法などは、文献 3), 9) 等を参照されたい。

### 4. 測定例

試験を行つた土壌はシルト質砂土で、18%のシルト及び粘土を含む。この試料を液性限界以上の水分でこねかえた状態での透水係数と、自然含水比で突き固めた透水係数を比べると、下記のように約  $\frac{1}{10}$  に低下している。



	乾燥密度	透水係数
突き固め	1.35	$(2.79 \sim 3.00) \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$
こねかえし	1.34	$(2.50 \sim 3.20) \times 10^{-6} \text{ "}$

即ちこねかえした場合、試料の密度は多少減少するにもかかわらず、透水係数は低下する。この原因を明らかにするため、上記両状態における水分特性曲線を測定した。第14図がその結果である。えられた水分特性曲線の大部分は、上記の改良型吸引測定装置によつた。ただし pF 3.0~4.0 は超遠心分離機で、又風乾状態含水比を pF 5.5 と仮定した。

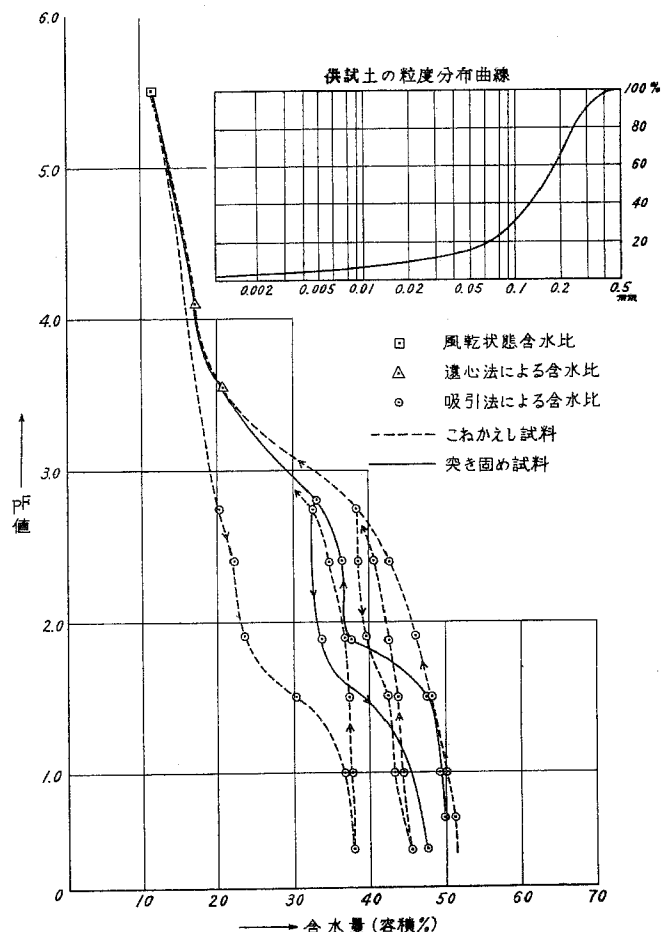
1) こねかえし試料と突き固め試料について特性曲線を比較すると、脱水曲線で pF 1.5~3.5 に大きな差異がみられる。即ち自然含水比(この試料では 24.0%)で突き固めた場合は pF 1.75 に変曲点がみられ、こねかえした場合は、ほぼ pF 3.0 に変曲点がみられる。pF 1.75 は大略 -60 cm の負圧に相当する。pF 0~1.75 で、前者の試料では約 12.5% の非毛管孔隙が存在するが、こねかえし土では約 5% に減少している。

2) 吸水過程をみると両状態の試料を pF 2.75 (圃場含水量)まで乾燥させても、上記の非毛管孔隙量の関係は変わらない。又こねかえし土を風乾状態まで乾燥させ、再び飽和させると、約 15% の収縮率が残り、前記の非毛管孔隙量はほとんど 0% になる。

3) 非毛管孔隙量と透水係数の関係について、Nelson, Baverらは pF 1.6 (-40cm) が非毛管孔隙の指標だと主張し、Bendixen, Slaterらは -60cm までの非毛管孔隙量を重視している。本実験では pF 1.75 (大略 -60cm) までの非毛管孔隙が、透水係数に重要な影響を与えることを確認した。

#### む す び

以上、本報告では北岸・沖田氏らによる装置について、いくつかの欠陥を指摘した。しかし筆者らの改良装置は、同氏らの装置から出発したものであり、多くの点において学ぶことがあつたことを附記してむすびとする。



第14図 供試土の水分特性曲線

## 文 献

- 1) Haines, W.B.: The hysteresis effect in capillary properties and the mode of moisture distribution associated there with J. Agr. Sci., 20, 97~116 (1930)
- 2) Schofield, R.K.: The pF of the water in soil. Trans. 3rd Int cong. Soil Sci., 2, pp37~48 (1935)
- 3) Bradfield, R. and Jamison, V.E.: Soil structure-attempts at its quantitative characterization. Soil Sci. Amer. Proc., 3, 70~76 (1938)
- 4) Richards, S.J.: Soil moisture content calculations from capillary tension records. Soil Sci. Amer. Proc., 3, 57~64 (1938)
- 5) Russell, M.B.: Pore-size distribution as a measure of Soil structure. Soil Sci. Amer. Proc., 6, 108~112 (1942)
- 6) Bendixen, T.W. and Slater, C.S.: Effect of the time of drainage on the measurement of soil pore space and its relation to permeability. Soil Sci. Amer. Proc., 11, 35~42 (1946)
- 7) Croney, D.: The movement and distribution of water in soil. Geotechnique, Vol 3, No. 1 pp1~16 (1952)
- 8) 内山修男, 西塚良一: Russell の低吸圧空隙量測定装置の改良について。土肥誌, 24, 318~324 (1954)
- 9) 北岸隆三, 沖田正: 土壤構造に関する研究(第1報)。東北農試研究報告 No. 8, pp55~61 (1956)
- 10) 真下育久: 森林土壤の水湿状態(pF値)。林野土壤調査報告 No. 8, pp43~64 (1957)