

## 遠心法による pF 測定の問題 (その 2) — 遠心法と吸引法による pF 水分曲線の接続性 —

加 藤 誠<sup>\*</sup>・穴 瀬 真<sup>\*</sup>  
竹 本 政 弘<sup>\*\*</sup>

Some Problems Associated with the Application of Centrifuge  
Method for Measurement of pF of Soil Water (II)  
Makoto KATO,<sup>\*</sup> Makoto ANASE<sup>\*</sup> and  
Masahiro TAKEMOTO<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

<sup>\*\*</sup> Saitama Prefectural Sugito High School of Agriculture.

### 1. まえがき

遠心法で pF 値を理論的に求めようとする場合、Russell や Richards が行なったように、供試体と下部に設けた自由水面を連結し、その自由水面の位置より、供試体に作用する pF 値を計算する方法が最善の方法と思われる。この方法は通常、自由水連結型遠心法と呼ばれる。

一方、わが国では遠心法として、自由水を与えないる過型遠心法が採用されている。

これは試料下端に敷かれたろ紙面が自由水面になっているとみなし、pF 値を計算しているものである。遠心法の研究は中村<sup>1)</sup>と岩田<sup>2)3)</sup>により、測定法の妥当性等が検討されている。

その後、須藤<sup>4)</sup>によって、力学的平衡の問題や、水理学的連続の問題、さらに遠心機の型などについて、様々な事柄がすでに検討されている。また、軽部<sup>5)</sup>は遠心法における供試体の圧縮性について詳しく実験報告を行なっている。

ろ過型による遠心法の原理は、 $f$  なる遠心力を土壤水に作用させたとき、土壤の中に残った水は  $r = 2a/f$  の曲率を持っているとし、土壤間隙内の水の形は遠心力の作用している方向に平行な毛管となっている場合、土壤水の化学ポテンシャルは

$$\Delta \mu = \int_0^{-f} v dp = -fv$$

となる。しかし、土壤水はリング状になって存在してい

るだけではなく、いろいろな形をなしていると思われるので、Russell や Richards の方法が提案された。

それは自由水面を回転軸より  $r_1$ 、土壤供試体を  $r_2$  に設置し、その間に多孔質体を置いて連絡しうる条件で土壤水を遠心力場にて脱水させる方法である。

自由水面の  $\Delta \mu$  は 0 であるから、

$$\Delta \mu = \frac{\omega^2}{2} (r_2^2 - r_1^2)$$

となり、 $\Delta \mu$  を求めることができるというものである。

理論的には自由水面連結型として遠心力を与える方法が他の試験法に比べて良いことは容易に理解できるが、実験的にこれを求めようとする場合、遠心力の作用する場所と含水比を求める場所は厳密には供試体中の一点である。しかし、一点の含水比を求めることは不可能である。

したがって、遠心法による pF 測定において発生する誤差には理論的に生じる誤差と、実験の操作上生じるものがあり、測定においてできるだけ誤差を取除くよう努力し、そして妥協せざるを得ない問題を含んでいると考える<sup>6)7)</sup>。

そこで筆者らは、本報告で Russell と Richards によって提案された自由水連結型遠心法とろ過型遠心法によって得た pF 水分曲線を比較検討するとともに、吸引法等で行なった低 pF 領域における pF 水分曲線との接続性について実験的に考察した。

<sup>\*</sup> 東京農工大学農学部

<sup>\*\*</sup> 埼玉県立杉戸農業高等学校

2. 実験の方法

1) 実験試料と供試体

実験に供した試料は前報<sup>9)</sup>に使用したものと同一である。物理試験の結果と粒度試験の結果をそれぞれ表一1、図一1に示す。

供試体は不攪乱試料を使用した。遠心法の供試体は高さ2.5cm、直径3.4cm、体積22.7ccの採土管にて採取したものをを使用した。

吸引法の供試体は通常の100ccの採土管で採取したものをを使用した。

供試体は24時間以上水浸し飽和させた後、実験に供した。

2) 遠心法による pF測定

(1) 遠心分離機とローター

実験に使用した遠心分離機は前報の装置と同様でSAKUMA冷却式高速遠心分離機Model50A-1である。

ローターは供試体を水平に設置し、遠心力の作用する方向と脱水の方向を一致させるため、スイング型ローターを使用した。使用したスイング型ローターはSAKUMA HNB-C型で100mlの試料容器を4本設置でき、許容最高回転数は4,000 r.p.m.である。

(2) 試料容器の構造と特性

a. ろ過型試料容器

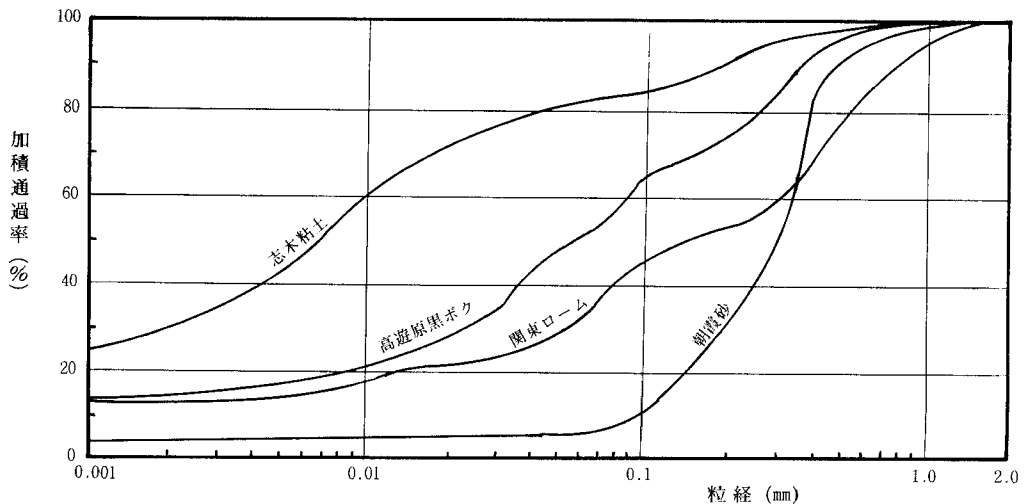
この容器は図一2(a)に示す構造の容器で試料底部の穴よりろ紙を通して脱水される。

形状やその寸法は図一3(a)の通りである。

b. 自由水連結型試料容器

表一1 物 理 的 性 質

試 料		関東ローム	高遊原黒ボク	志木粘土	木造泥炭	朝霞砂
自 然 含 水 比 (%)		122.03	97.77	65.45	202.59	26.85
比 重		2.773	2.415	2.675	2.237	2.748
仮 比 重 (g/cm <sup>3</sup> )		0.477	0.503	0.850	0.395	1.417
間 隙 率 (%)		82.8	79.2	68.2	82.3	48.44
コンシメンス	液 性 限 界 (%)	174.10	128.55	58.5	—	—
	塑 性 限 界 (%)	98.84	79.58	32.34	—	—
	塑 性 指 数 Ip	75.26	48.97	26.16	—	—
粒 度	粘 土	14.3	17.5	43.0	—	4.3
	シルト	23.7	37.5	39.2	—	1.3
	砂	62.0	45.0	17.8	—	94.4
有 機 物 量 (%)	強 熱 減 量 (%)	18.85	36.89	8.04	43.33	1.61
	重 ク ロ ム 酸 法	2.08	13.03	3.04	—	0.23



図一1 粒径加積曲線 (泥炭はのぞく)

遠心法によるpF測定の問題(その2)

この容器は図-2(b)に示す構造の容器である。供試体の底部に自由水面と連結するための石こう製のカップ状の台が設置されている。

脱水された水が石こうの台を通して下部に移動し、ドレーンホールより排水され、常に自由水面の高さは一定となる。

形状やその寸法は図-3(b)に示した通りである。

石こう製のカップは質量比にして、焼石こう7に対し水を4の割合で練混ぜ、型に流して固めたカップである。

このカップの下部のくびれは、試料容器内の自由水面を作る水が壁面に毛管上昇を起さないためのものであり、カップ状とした理由は、自由水面の下端の面積を少なくして、回転停止後の供試体への水の戻りを少なくするために、このような形状とした。

このような形状にすることによって、石こうカップの台は供試体への水の戻り等の問題はないことを、2, 3の予備的な実験によって確かめた。

(3) pF値の計算方法

図-4に示した形状の関係より濾過筒型や自由水連結型の遠心力は $r\omega^2$ と考えられる。

そこで、(a)では試料の底が自由水面と考えて、 $r_0$ を基準面としてポテンシャルを $\varphi_0$ 、試料内の任意の場所のポテンシャルを $\varphi_1$ とすれば両者の差は

$$\begin{aligned} \varphi_0 - \varphi_1 &= \int_{r_1}^{r_0} r \omega^2 dr = \frac{1}{2} \omega^2 (r_0^2 - r_1^2) \\ &= \frac{1}{2} \omega^2 (r_0 + r_1) (r_0 - r_1) \\ &= h \left( r_0 - \frac{h}{2} \right) \omega^2 \end{aligned}$$

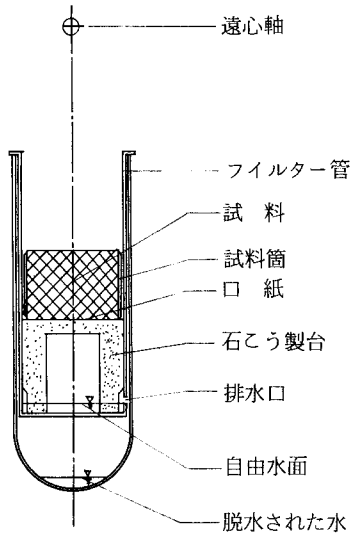


図-2 (a)ろ過型遠心法に使用した遠心管詳細図

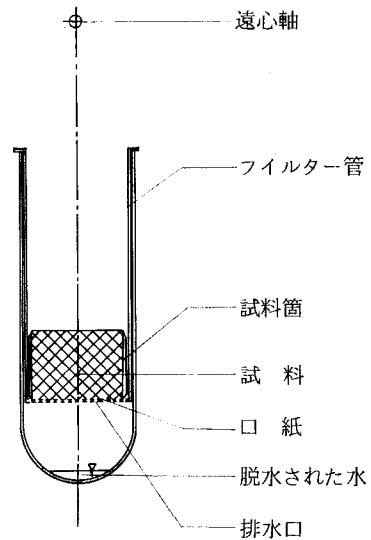


図-2 (b)自由水連結型遠心法に使用した遠心管詳細図

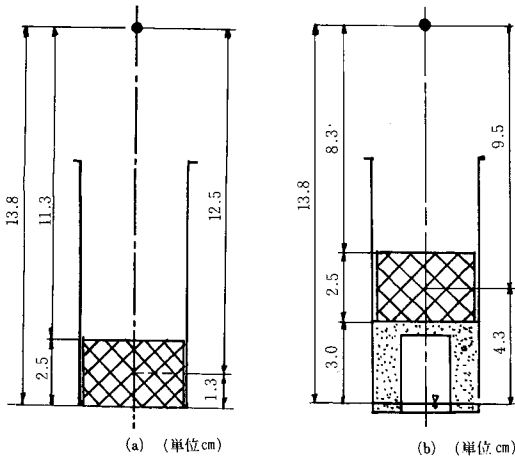


図-3 寸法図

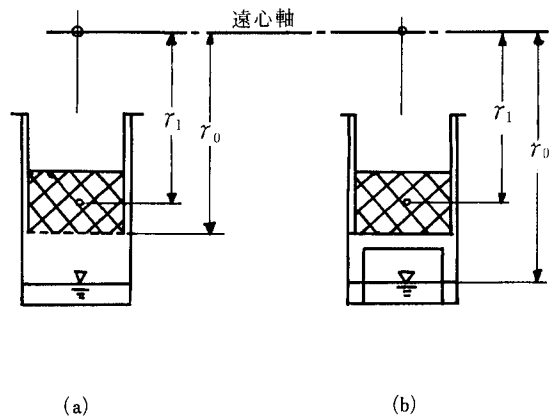


図-4 pFを求めるための説明図

ただし、

$r_0$ : 基準水面の回転半径 (cm)

$r_1$ : 基準水面より  $h$  の高さにある試料の  
回転半径 (cm)

$h$ :  $r_0 - r_1$

となる。

このようなポテンシャルを重力場に換算して、

$$\begin{aligned} \rho g H &= \rho h \left( r_0 - \frac{h}{2} \right) \omega^2 \\ \therefore H &= h \left( r_0 - \frac{h}{2} \right) \cdot \omega^2 / g \\ &= h \cdot \left( r_0 - \frac{h}{2} \right) \cdot \frac{\left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2}{980} \\ &= n^2 h \left( r_0 - \frac{h}{2} \right) \times 1.118 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

ただし

$$\omega = \frac{2\pi r}{rT} = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi n}{60}$$

$T$ : 周期 (sec)

$n$ : 毎分の回転数 (r.p.m.)

$g$ : 重力の加速度 ( $g = 980 \text{ cm/sec}$ )

すると

$$pF = \log H = 2 \log n + \log h + \log \left( r_0 - \frac{h}{2} \right) - 4.95$$

より、 $pF$  値を求めた。

#### (4) 測定の手順

不攪乱試料を24時間以上、水浸飽和させ、所定の  $pF$  回転速度で360分間、遠心分離した後、脱水量を測定した。

測定後の供試体を再びローターに戻して、次の  $pF$  段階の回転速度で遠心分離した。そして、 $pF 2.0 \sim 3.9$  までの含水比を求めた。

このようにして、 $pF$  水分曲線をろ過型と自由水連結型の両方の供試体について求めた。

#### 3) 吸引法による $pF$ 測定

$pF 0 \sim 2.2$  までは吸引法により  $pF$  水分曲線を求めた。

##### (1) 吸引法の測定装置

広く普及している吸引法又は水頭法と呼んでいる方法と原理的には同一のものである。

ただし、フィルターにはガラスフィルター又は電解隔膜を使用した。測定範囲は  $pF 0$  附近より  $pF 2.2$  程度の装置である。したがって、遠心法とは  $pF 2.0 \sim 2.2$  の範囲で重なっている。

##### (2) 測定の手順

水浸して、飽和させた供試体を測定容器に設置し、一定の  $pF$  値が得られるよう吸引圧を作用させた。

作用させた吸引圧に対し、脱水が平衡に達したことを確認した後、次の  $pF$  段階の吸引圧を作用させた。そして、 $pF 0 \sim 2.2$  までの各  $pF$  段階の含水比を測定し、 $pF$  水分曲線を求めた。

### 3. 実験の結果

ろ過型と自由水連結型による  $pF$  水分曲線を図-5～図-9に示した。

測定方法の異なった  $pF$  水分曲線の接続性を考察するため、両者の方法より得た曲線と吸引法によって得た  $pF$  水分曲線を重ねたものを図-10～図-14に示した。

図-10～図-14には SAKUMA HB-R 型ローターにより得た  $pF$  水分曲線や加圧板法で得た  $pF$  水分曲線も参考のため示した。

### 4. 考 察

1) ろ過型と自由水連結型について図-5～図-9の結果をみると、自由水連結型の  $pF$  水分曲線はろ過型のそれより高水分側にある。

このことを詳細に検討するために、ろ過型の含水比を  $W_a$ 、自由水連結型の含水比を  $W_b$  とし、 $pF$  と  $\{ (W_b - W_a) / W_b \}$  との関係を図-15に示した。

図-15で、 $\{ (W_b - W_a) / W_b \}$  をろ過型と自由水連結型を評価する尺度として考えると、関東ロームでは両者の差は無く、志木粘土や木造泥炭では2～10%、荒川砂では0～15%、黒ボクでは14～18%の中で  $pF$  水分曲線がずれていることを示している。

志木粘土や木造泥炭では含水比の測定精度を加味すれば、粘土では多少ずれが大きいと思われるが、この程度ならば両者の差はあまり無いと考えて良いと考える。

黒ボクは14～18%とかなり大きくずれているが、その中は狭く、サンプリング時の試料の不均一性等の初期の

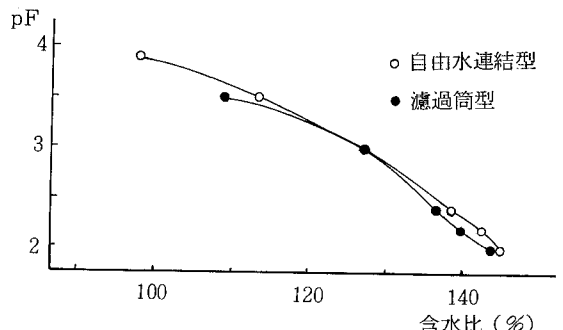


図-5  $pF$  水分曲線 (関東ローム)

遠心法によるpF測定の問題(その2)

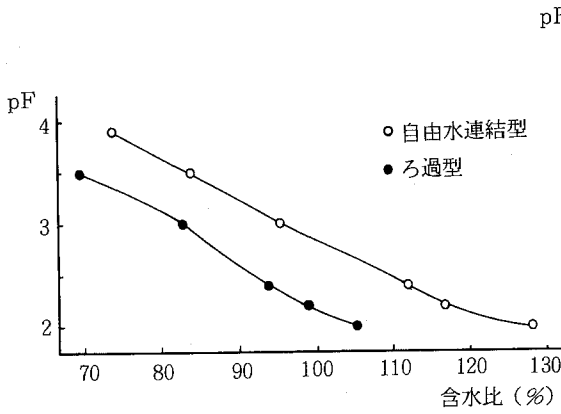


図-6 pF水分曲線(高遊原黒ボク)

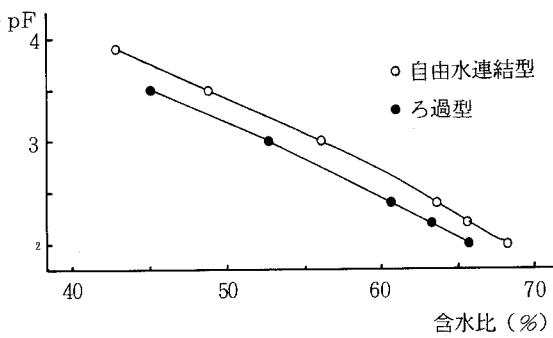


図-7 pF水分曲線(志木粘土)

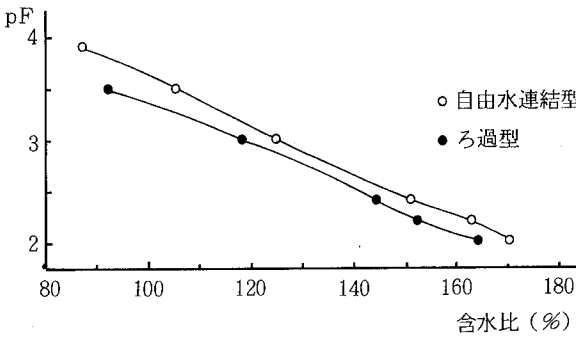


図-8 pF水分曲線(木造泥炭)

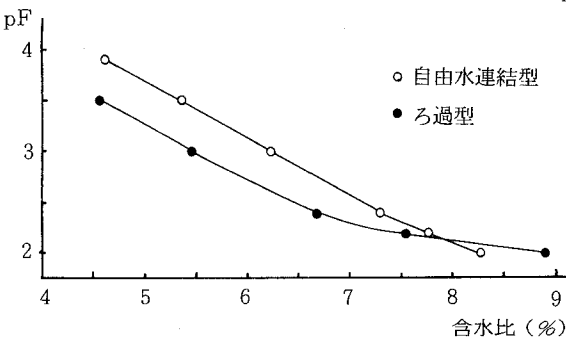


図-9 pF水分曲線(朝霞砂)

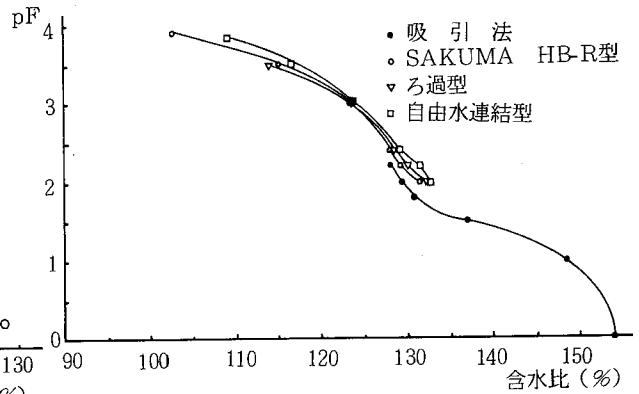


図-10 種々の方法により得たpF水分曲線(関東ローム)

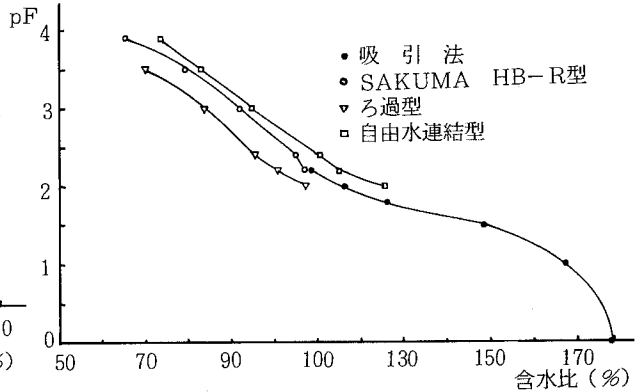


図-11 種々の方法により得たpF水分曲線(高遊原黒ボク)

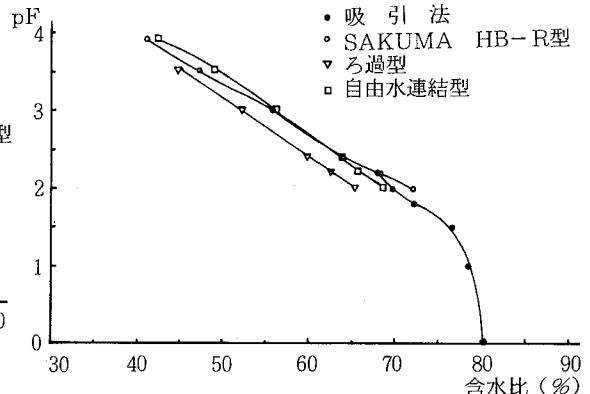


図-12 種々の方法で得た pF水分曲線(志木粘土)

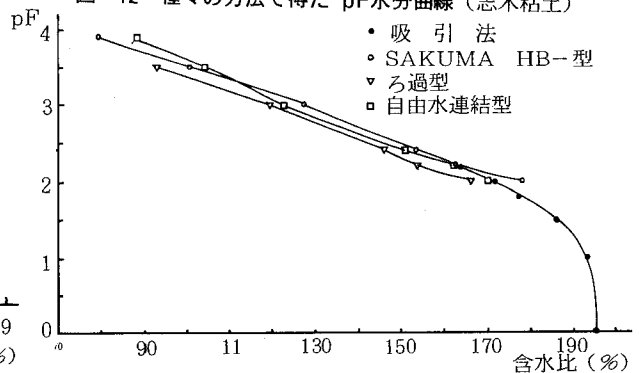


図-13 種々の方法で得た pF水分曲線(木造泥炭)

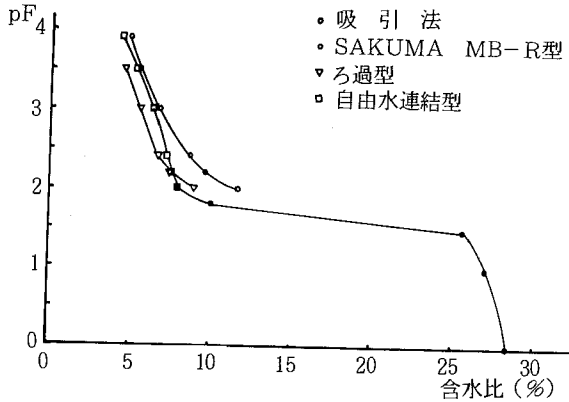


図-14 種々の方法で得た pF水分曲線 (朝霞砂)

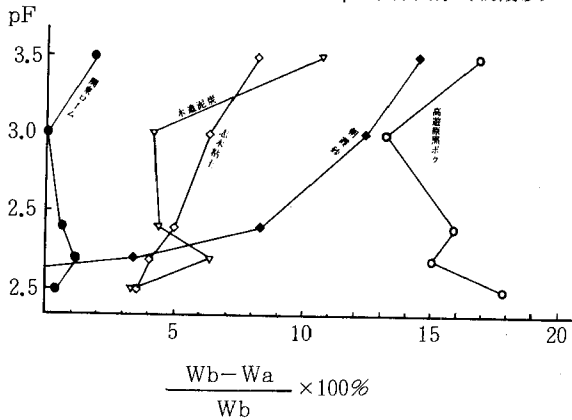


図-15 pFと (Wb-Wa) / Wbの関係

ずれが、そのまま反映されていると考えられる。

一方、荒川砂の大巾なずれは、ろ過型と自由水連結型とのちがいを如実に示しているものと思われる。

それはpF2.5附近において両者は異なった特徴を示していると思われる。

pF2.5附近では土壤中の毛管水の連絡が断れると言われており、砂の場合、両者の遠心作用の違いにより脱水中の水分の移動が異なっていることを顕著に示していると思われる。

他の土壤でも、pF2.5附近で、多少、水分移動の様子の違いのため起ったと思われるpF水分曲線上への反映が認められるが、砂はその程度が大きく、自由水連結型の方が含水比は高くなっている。

そのため、次で述べる吸引法を使用したpF水分曲線との接続性等を考えると、粒子の大きい砂のような材料を用いた場合、ろ過型の方が不安定な曲線となりやすいと思われる。

2) 接続性について

飽和状態の供試体を吸引法で脱水し、吸引圧と含水比をプロットしたpF水分曲線と、飽和状態の供試体に遠心力を作用させて求めたpF水分曲線を同一紙面にプロッ

トすると、しばしば、両曲線の接続が困難となる場合が発生する。

これは、脱水された後、土壤間隙中に保持されている水分の形態が違っているためであろうと思われる。

自由水連結型の遠心法は、吸引法で行なわれる脱水方法を遠心力場において、行なう方法で、原理的には同質の方法である。

遠心力場において吸引法を行なえば、相似律の関係より、高pF領域までのpF水分曲線を得ることができる。したがって、pF2.0よりも低い領域の回転速度を十分作用できるの遠心分離機を使用して、現在吸引法で行なわれている領域までのpF水分曲線を求めることができるならば、接続性の問題は発生しないと思われる。しかし低速回転となり、重力の方向と遠心力の方向が異なるための影響が無視できなくなり、遠心分離機でのpF測定には限度があると思われる。

一方、ろ過型においても、供試体底部に自由水面が存在するとして考えられるならば、吸引法と同質であると考えても良い。

しかし、供試体底部で、大気に接触する部分があると、メニスカスを発生させてしまうので、供試体内の水の受ける吸引圧は異なってしまふことになる。

そこで、供試体の底部の含水量をpFに対応する含水量に算入しないで、供試体の底部から1cm以上上部の土壤の含水比を求めるような方法も考えられている。

しかし、供試体の大きさから局所的な含水比を求めるために発生する測定誤差の方が大きくなることも予想される。

したがって、現在広く普及している遠心法の有利な点を生かして、土壤のpF水分曲線を求めようとするとき、供試体全体より含水比を求めることから、高さを低くし、なるべく体積が多くなるような供試体を使用した、自由水連結型の方が適当と思われる。

図-10から図-14に示されるように、試料の種類にかかわらず、接続性は自由水連結型の方が良いようである。

5. 結 論

ろ過型と自由水連結型と比較した場合、自由水連結型より得られる pF水分曲線は高水分側に位置する。

そして、砂では土壤水の毛管連結切断現象が生じると考えられるpF値附近で土壤水は複雑な形態となるため、pF水分曲線は安定しない。

したがって、接続性も困難となると思われるので、試料によっては、ろ過型が適さない場合がある。

ここに使用した5つの試料とも、自由水連結型の遠心方法の方が接続性も良く、原理的にも無理のない方法であると思われる。

## 6. あとがき

遠心法における自由水連結型や濾過筒型などのpFの定義と測定法の問題については、中村、岩田によって、エネルギー論的な考察もなされ、すでに結論が出されている。

本報告は、代表的な土壌を5種類を使用して、両者を比較した場合についての報告である。

その結果、砂のような粒子の大きい土壌では他の土壌とかなり異ったpF水分曲線を示すことがわかった。

今後、試料に粗粒材を使った場合の供試体の大きさ、粒度等によるpF水分曲線の違い、また粘土のような細かい粒子を使用した場合など、遠心法の適用について、材料の物理化学的な組合せによる検討をさらに行なう必要があると思われる。

## 7. 参考文献

- 1) 中村：pF測定法，研究の資料と記録，16，24～34，1967.
- 2) 岩田：土壌水のエネルギー概念，土肥誌，32，572～580，1961
- 3) 岩田：遠心法によるpFの測定について，土肥誌，39，177～178，1968
- 4) 須藤：遠心pFとその測定法，土壌の物理性，22，35～39，1970
- 5) 軽部：遠心法pF-水分測定における圧縮の影響，土壌の物理性，31，14～20，1975
- 6) 土の理工学性実験ガイド編集委員会：pF，農業土木学会，p 72～82，1983.
- 7) 中村：実際のpF測定法，農業土木学会誌，37，5～8，1969.
- 8) Russell. M. B. and Richards. L. A : The determination of soil moisture energy relations by centrifugation, Soil Sci. Soc. Amer. Procc. 3, 65～69, 1938.
- 9) 加藤，穴瀬，竹本：遠心法によるpF測定の問題(その1) - 供試体の圧縮の影響とwater lodging対策，土壌の物理性，53，42～50，1986.

## Summary

There are two ways of using the Centrifuge method to measure pF of soil water. One is to drain off water from a sample into free-air, and another is to drain off water from linked free water by centrifuging.

Following are the results of using these two methods on five samples - kanto loam, kuroboku soil, clay soil, peat, and sand.

) In sand, when soil water was drained off at pF 2.5, the capillary bonds of soil water was cut off, then water existed in a complicate state in soil pores.

It appears that pF-soil moisture curve derived using the centrifuge method with linked free water is more reliable than the other method. The former had good connection to the pF - moisture curve obtained by the suction method.

) The pF-soil moisture curve from the former method is in higher water content side than that from the latter.