

## 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 —

加 藤 誠\*  
穴 瀬 真\*  
竹 本 政 弘\*\*

Some Problems Associated with the Application of Centrifuge  
Method for Measurement of pF of Soil Water ( I )

Makoto KATO\*, Makoto ANASE\* and  
Masahiro TAKEMOTO\*\*

\*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

\*\*Saitama Prefectural Sugito High School of Agriculture.

### 1. まえがき

最近、pF試験は農学分野の研究のみならず、飽和、不飽和の状態の水の浸透問題<sup>1)2)</sup>を取扱う工学分野の研究にも応用され、自然災害、地下水文、ダム工学等の分野からもかなり注目され始めている。そこで、妥当なpF水分曲線を求める必要性が増している。

pFの測定において、低pF領域の測定では、吸引法などの方法を用い、土壌構造をほとんど破壊しないように間隙中の土壌水を吸収又は脱水するような方法をとっている。

一方、高pF領域では、遠心法が普及している。この方法は遠心力によって、土壌骨格構造が圧縮されるため、間隙が狭くなり脱水がさまたげられる。したがって、遠心力によって土壌水分が平衡に達するのに、かなり長時間の運転が必要となる。

またこの圧縮のため、water lodgingの状態が発生することもある。

BriggsやMelane<sup>3)</sup>は一定の遠心力の下で水分平衡に達するまで脱水させた土壌の含水量を、その土壌の水分当量と定義した。重力の1000倍に相当することもある。

これを土質工学会では遠心含水当量試験<sup>4)</sup>として、JIS1207に規定している。

その後、Thomas<sup>5)</sup>は試料の質量と厚さを増せば、水分当量は減少することを見出した。

また、わが国では、最初、美園<sup>6)</sup>らによって研究、利用されて以来きわめて広く普及し、現在でも、土壌の物

理的性質を知るうえで有効な手段となっている。

わが国で最も普及している遠心法は土壌供試体に遠心力を与え、水分を振切る方法（ろ過型）がとられている。

遠心法は簡便な方法ではあるが、土壌供試体が遠心力の作用を受け圧縮されてしまうので、いろいろ困難な問題も発生しているように思われる。そこで、water lodgingを起してしまうような土壌に遠心法を適用する場合に脱水を妨げないような水みちを作るよう、2.3の工夫を試みた。このような試みはすでに多くの研究者によって経験ずみの方法かもしれないが、その結果について議論していただければ有難いと思うものである。

### 2. 実験の方法

遠心法によって、pF水分曲線を求めようとするとき、供試体が遠心力を受けるため、土が圧縮され、土壌骨格が破壊される。それに対し、低pF領域で使用される吸引法の脱水方法は骨格の破壊を伴う脱水ではない。このような脱水方法の相違が遠心法において困難な問題を起している原因となっている。

そこで、今回、下記の実験（I）、実験（II）により遠心法を持つ問題点を検討した。

実験（I）：脱水作用の相違について考察するために遠心脱水と乾燥脱水を行なって、脱水に伴う収縮について考察した。

実験（II）：Water lodgingが起った粘性土に対し、水みちを作ったり、供試体の厚さを変えて、排水径路を短くしてWater lodging

\* 東京農工大学農学部

\*\* 埼玉県立杉戸農業高等学校

## 遠心法によるpF測定の問題(その1)

を起さないよう工夫し、その効果について考察した。

## 1) 実験(I) 遠心力による供試体の圧縮について

## (1) 試料と供試体

使用した試料は表-1に示す5種類で、それぞれの採取場所は、(1)関東ロームは農工大農場、(2)黒ボクは阿蘇の高遊原、(3)沖積粘土は埼玉県志木、(4)泥炭は青森県木造、(5)砂は埼玉県朝霞である。

それらの物理性を表-1に示した。不攪乱試料は100cm<sup>3</sup>の採土管にて採取した。

なお、現地で採取できなかった試料については、室内で一定の条件の下で充填して作製した供試体を使用した。

図-1に粒径加積曲線を示す。

## (2) 遠心分離機とローター

本研究に使用した遠心分離機はSAKUMA冷却式高速遠心機Model50A-1である。

本機は20,000 r.p.m. までの測定が可能であり、ハンドタコメーターにより所定回転数の±10 r.p.m. まで設定できることを確認した。

遠心槽内の温度は-30℃~+40℃まで任意の温度に設定が可能である。

ローターは100cm<sup>3</sup>の採土管4個を設置し、最大回転数10,000 r.p.m. の回転まで使用できるSAKUMA H B-R型ローターで、pF2.0~3.9までの測定に使用した。

ローターの採土管を載せる容器は試料下端を自由水面に接した状態で遠心力を与え、遠心分離された濾液がフィルターの小孔を満すとフィルターと同じ高さにある排水口に導かれ、下部の集水器に流入し、回転停止後も分離液が逆流しないような構造となっている。

## (3) 実験方法

100cm<sup>3</sup>の採土管の不攪乱試料を24時間以上水浸飽和させた後、pF試験と収縮試験を行なった。pF試験では低pF領域では吸引法を、高pF領域では遠心法によりpF水分曲線を求めるとともに、各pF段階における供試体の体積をノギスで測って求めた。

なおpF2.0~3.9までの各pFにつき、遠心時間を6時間とした。

一方、収縮試験では、恒温室内(温度20%, 湿度約60%)で乾燥し、飽和状態から風乾状態まで、各乾燥段階の試料の体積をノギスで測って求めた。

表-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
液性限界(%)		174.10	128.55	58.50	-	-
塑性限界(%)		98.84	79.58	32.34	-	-
スリ塑性指数		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
有機物含有量(%)	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

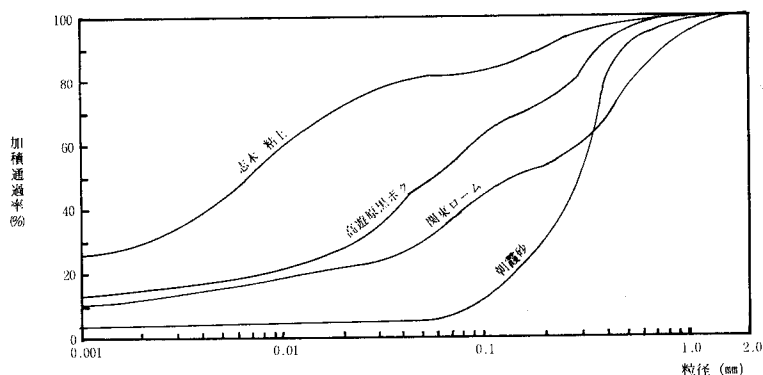


図-1 粒径加積曲線(泥炭はのぞく)

## 2) .実験(Ⅱ) 粘性土におけるWater lodging対策

## (1) 試料と供試体

試料として実験(Ⅰ)に使用した志木粘土を用いた。供試体は100cm<sup>3</sup>の採土管を使用して得た試料を適当な形状にトリミングして作製した。

## (2) 実験方法

粘性土のWater lodging対策として、次の二通りの方法で検討した。

## (対策-Ⅰ)

供試体の高さを小さくする。つまり、100cm<sup>3</sup>の採土管では供試体の高さは約5.1cmである。この供試体の高さを1.5cmになるようトリミングした供試体を使用した。

そして、pF2～3.5までの各pFにつき、遠心時間(T)が30, 60, 180, 360分毎の供試体の含水比を求めた。

## (対策-Ⅱ)

供試体の中や底部に脱水しやすいよう水みちを設けるため、石こうを材料とした多孔質体のスポンサー等を入れた。

その構造を図-2に示した。従来の方法をA法、供試体の底部に石こう板を敷いた方法をB法、供試体の中央部に石こうの柱を挿入した方法をC法と呼ぶ(写真-1参照)。

石こう柱の挿入にあたっては柱と同径の肉厚の薄い円管で中央部分を抜いた後、石こう柱を注意深く挿入した。

上記のように準備した供試体を3日間水浸飽和させた後、pF3に相当する回転を与え、T=15, 30, 60, 180, 360分毎の含水比を測定した。

従来の方法(A法)も比較のため、同一条件で含水比を求めた。

## 3. 実験結果および考察

## 1) 実験(Ⅰ)について

各試料について、初期体積( $V_0$ )と各pFにおける体積( $V$ )との比( $V/V_0$ )を図-3に示した。

これをChangとWarkentin<sup>8)</sup>が提唱したSpecific Pore Volumeを用いてpFとの関係を図-4に示した。

図-5～図-9は遠心脱水による土壌体積の変化と含水比の関係を乾燥収縮の場合と比較したものである。実線は乾燥脱水を、点線は遠心脱水の場合である。

遠心脱水を行なった場合、黒ボクや関東ロームではpF3程度の遠心力を加えると比間隙体積(Specific Pore Volume)が急激に減少することが図-4よりわかる。

一方、砂では体積の減少はほとんどない。そして、関東ロームでは20%、黒ボクや粘土では30%、泥炭では50%の体積の減少が見られる。

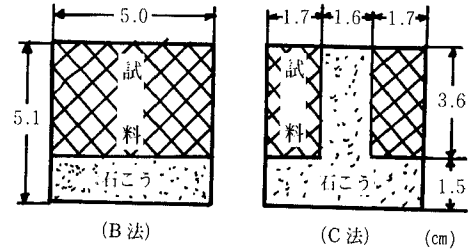


図-2 石こうブロックを挿入した試料

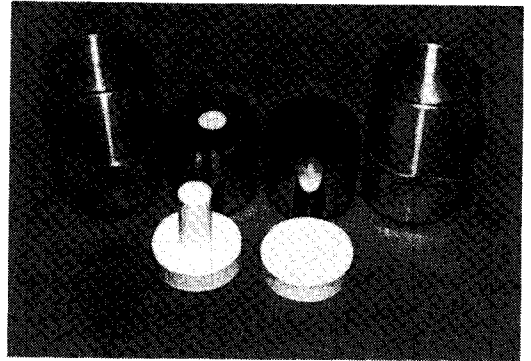


写真-1 石こうブロックと供試体

遠心脱水と乾燥脱水の場合と比較すると、同一量の体積変化( $V/V_0$ )では水分の低下量は乾燥脱水の場合の方が多い。

逆に、同一量の水分量を脱水すると遠心脱水の場合の体積変化が大きい。したがって、乾燥脱水による体積変化を脱水に伴う土壌構造の収縮のみによるものと考えらるならば、遠心法による体積の減少には脱水収縮に遠心力による圧縮作用が加わっていることがわかる。

図-10～図-14に供試体の、pF-飽和度曲線を示した。

pFの変化に対し、土壌間隙体積の減少より脱水量が相対的に多ければ飽和度は低下し、その逆に少なければ飽和度は上昇する。

遠心力による圧縮作用を受けた土壌骨格構造の形態を飽和度の増減によって区別すると、pF測定に遠心法を用いた場合、他の測定方法と同様な脱水形態を行なった方が望ましいと考えられるので、飽和度の増加するpF値に転ずるまでは遠心法を適用できるとしても、それ以上のpF測定では土壌骨格構造の圧縮の影響が現われるので遠心法の適用には問題があると思われる。

## 2) 実験(Ⅱ)について

対策-Ⅰとして行なった厚さ1.5cmと厚さ5.1cmの供試体の場合を比較するために、pF2.0の回転速度で30分の遠心脱水を行なったときの含水比を0とし、pF3.5で360分の遠心脱水を行なったときの含水比を100とし

遠心法によるpF測定の問題(その1)

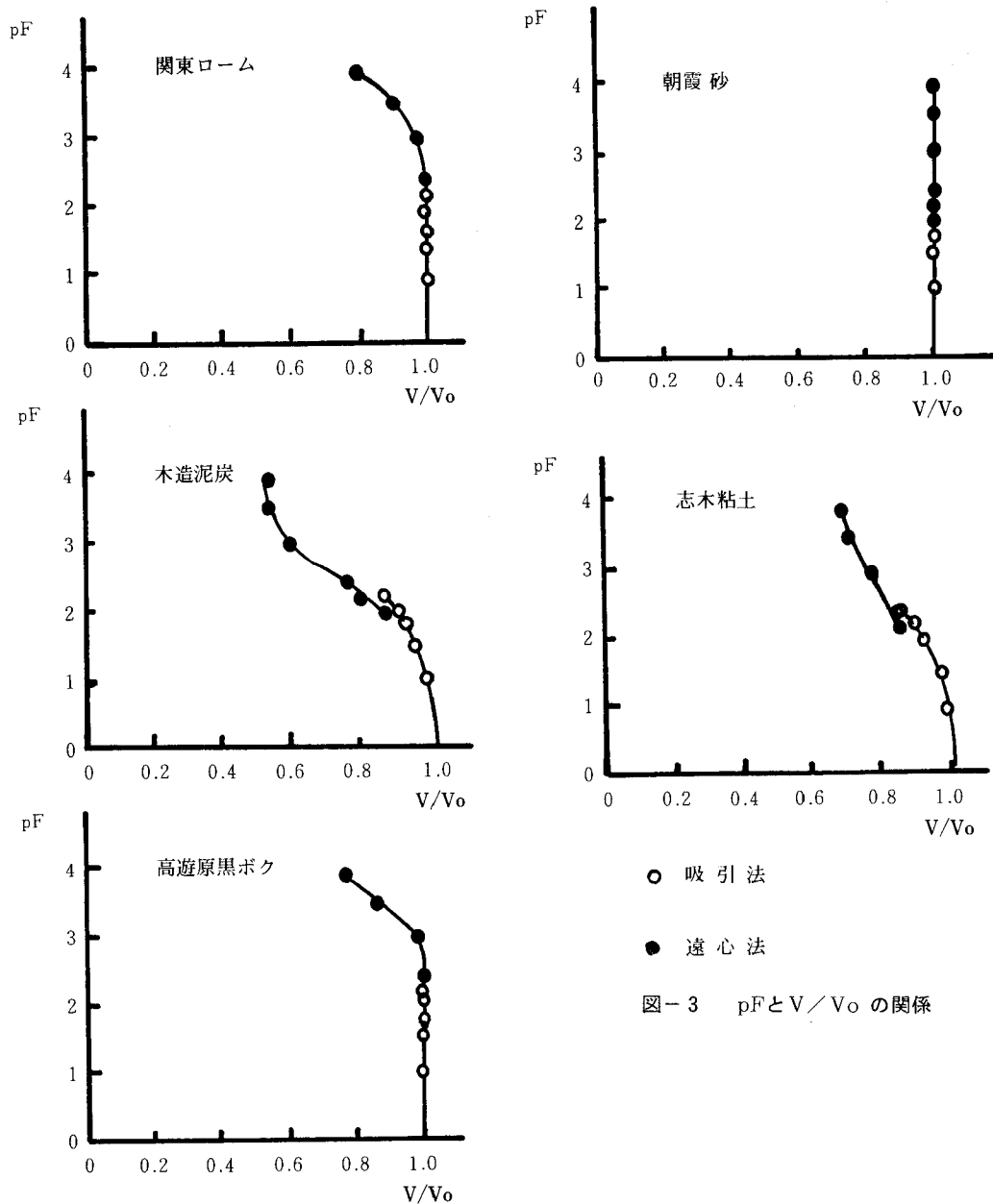


図-3 pFと $V/V_0$ の関係

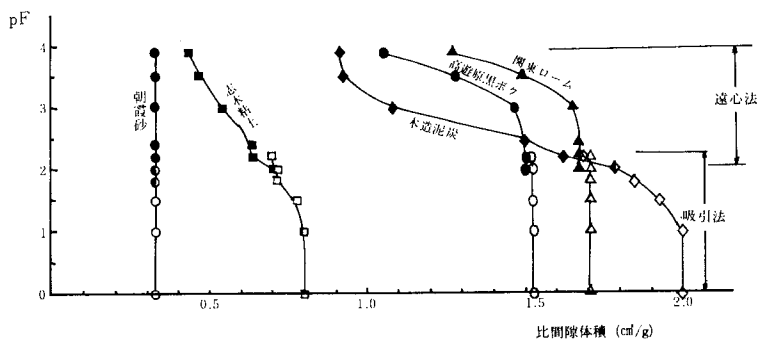


図-4 pFと比間隙体積の関係

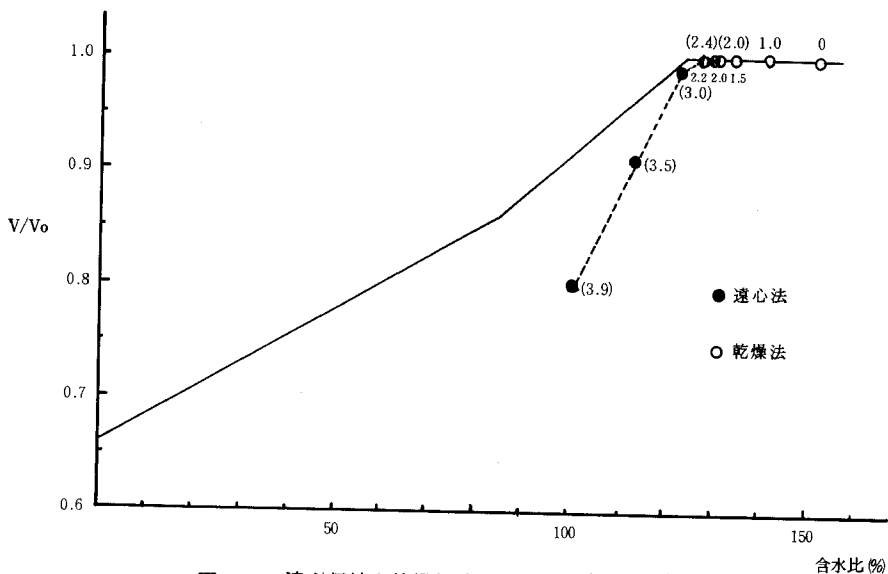


図-5 遠心収縮と乾燥収縮の比較 (関東ローム)

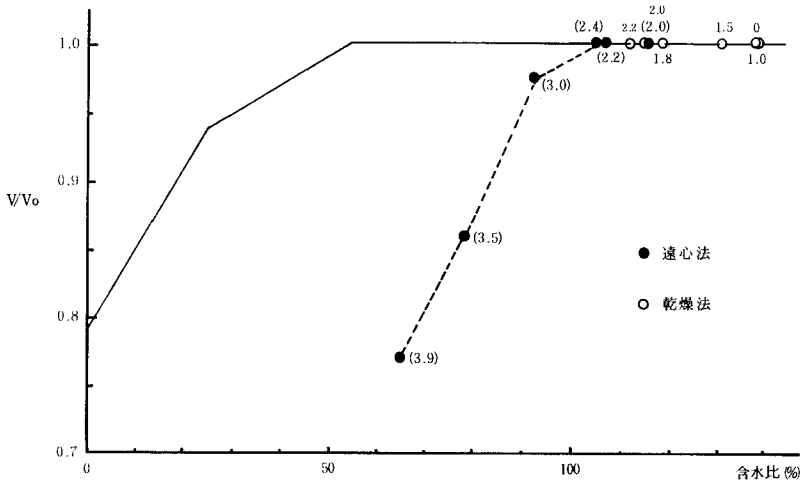


図-6 遠心収縮と乾燥収縮の比較 (高遊原黒ボク)

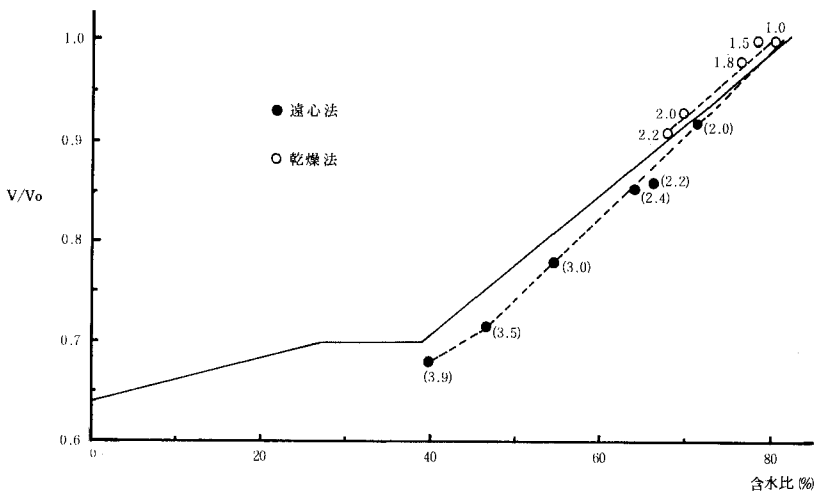


図-7 遠心収縮と乾燥収縮の比較 (志木粘土)

遠心法によるpF測定の問題(その1)

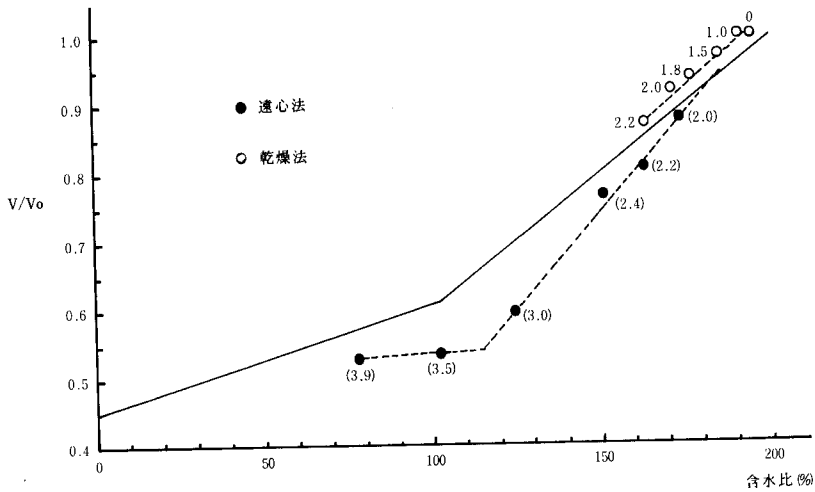


図-8 遠心収縮と乾燥収縮の比較(木造泥炭)

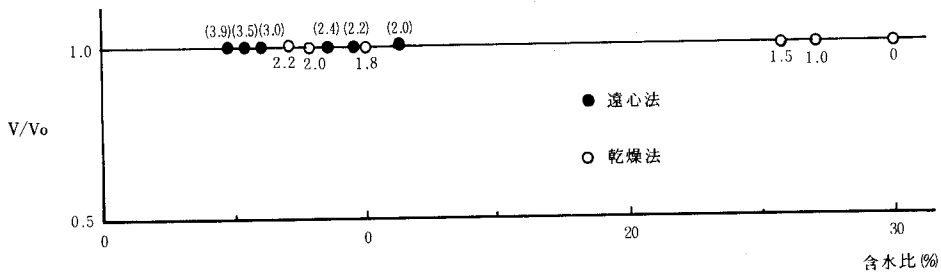


図-9 遠心収縮と乾燥収縮の比較(朝霞砂)

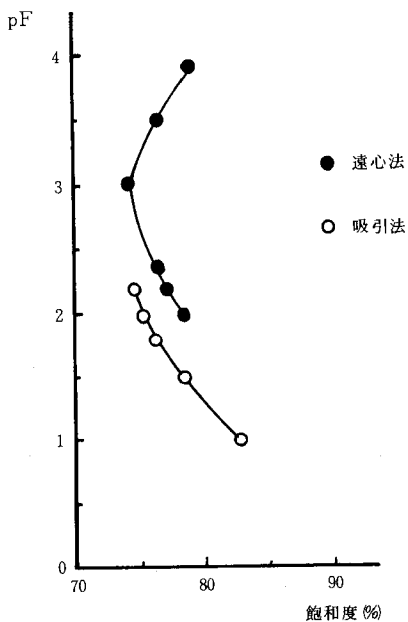


図-10 pFと飽和度の関係(関東ローム)

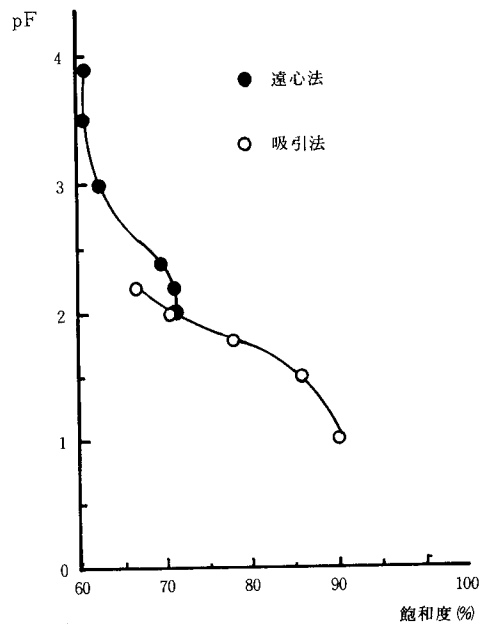


図-11 pFと飽和度の関係(高遊原黒ボク)

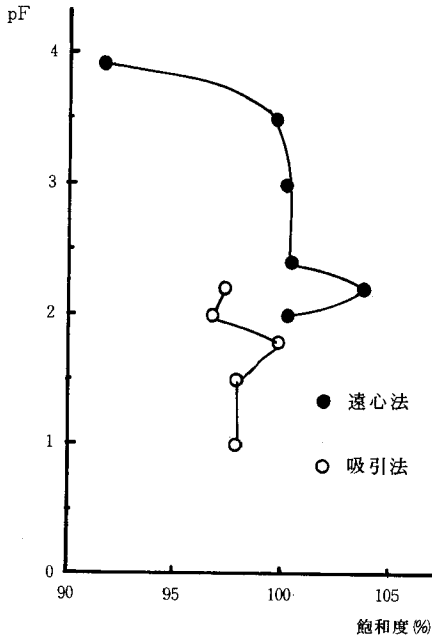


図-12 pFと飽和度の関係 (志木粘土)

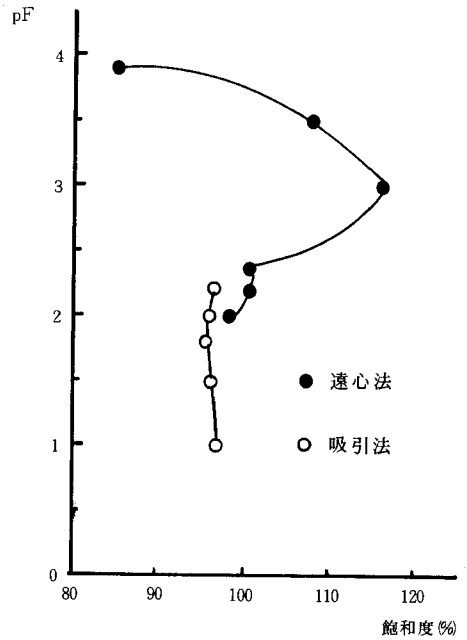


図-13 pFと飽和度の関係 (木造泥炭)

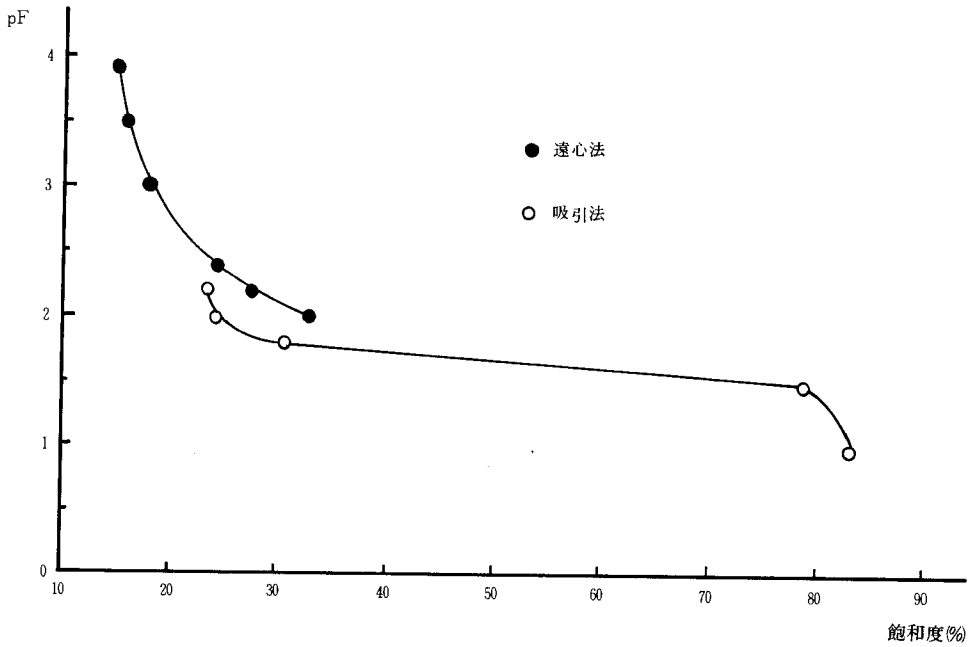


図-14 pFと飽和度の関係 (朝霞砂)

て、各 pF の遠心力を与えた場合の含水比を換算した。その結果を図-15に示した。

一方、対策-Ⅱにより遠心脱水を行なった結果を図-16に示した。

図-15から、薄い供試体は低い pF (pF2.0) で急速

脱水されるが、その後 pF3.0 までは供試体の厚さに関係なく同じ割合で脱水され、pF3.5 では両者は全く同じ含水比となることからわかる。すなわち、pF2.0 で薄い試料における脱水の割合が多く、供試体が厚い試料では pF3.0~3.5 における脱水の割合が高いことを示し

遠心法によるpF測定の問題(その1)

ている。

ここで使用したWater lodgingを起す試料は粘土であるが、供試体の厚さの違いによって土壌内の空隙構造の変化が生じる遠心力の大きさが異なるためと考えられる。

本研究では二種類の厚さの異なる供試体を使用しただけなので供試体の大きさ又は厚さについてはさらに検討しなければならない。

また、供試体が圧縮され、破壊することによる影響のみならず、供試体の場所によって含水比が異なっていることが予想される。

したがって遠心法によるpF測定には困難な問題があることを予じめ考慮する必要がある。

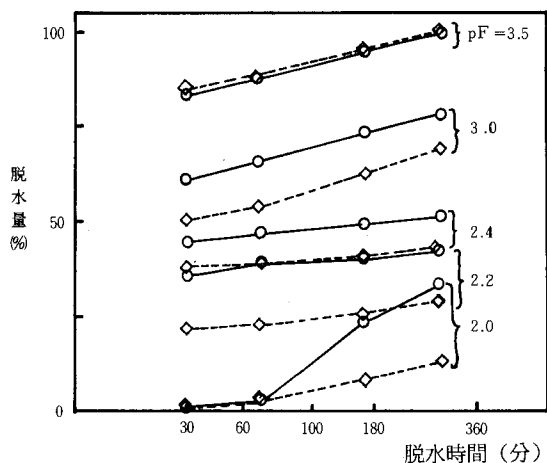
一方、供試体の中に多孔質の石こう柱を挿入し、供試体の脱水を助けるように工夫した場合、図-16からわかるように、water lodgingに対して、かなりの効果が期待できる。

また、水分の平衡に到達する時間も短縮できることがわかった。

4. 結 論

以上のことから

- (1) 遠心法の適用範囲は関東ロームではpF3.0, 高遊原黒ボクはpF3.5附近まで、志木粘土や木造泥炭では飽和度が100%以上となりWater lodgingを起す場合があるので、やや問題があると思われる。荒川砂の場合には十分適応できると思われる。
- (2) 供試体厚を一般的な採土管の1/3 ~ 1/4程度にした場合、Water lodging現象は起さない。しかし供試体厚によりpF水分曲線が異なる可能性がある。
- (3) 供試体の中央部と底部に多孔質体を置いて排水を助長する方法は、water lodgingを起さなくなるのみならず、水分平衡時間が短くなり有効な手段である。



○—○ 試料厚 1.5cm      ◇—◇ 試料厚 5.1cm

図-15 供試体厚の違いによる脱水時間の関係

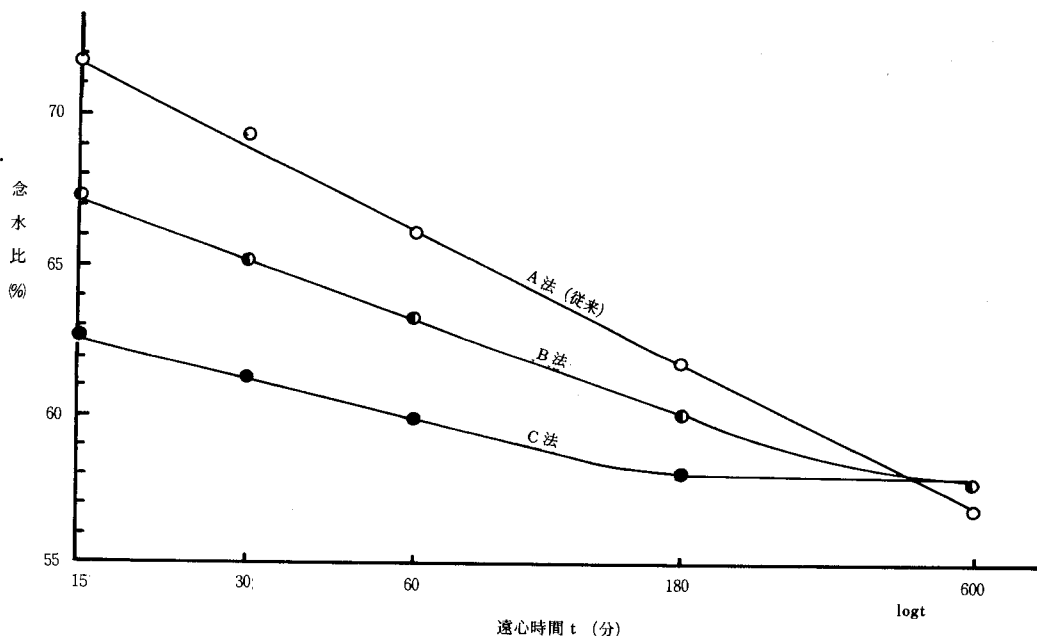


図-16 三種類の脱水状況を示す図(志木粘土)



## 5. あとがき

pF測定における遠心脱水の方法は、世界的な普及を見ているが、供試体に遠心力が作用することによる問題が発生するため、試料の種類による使い分けが必要であることを痛感した。

なお、試料の採取の際には千葉大の矢橋先生、実験にあたっては、東京農大の田中先生や高橋先生には有益な助言をいただきましたことを御礼申し上げます。

## 6. 参考文献

- 1) 赤井, 大西, 西垣「有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析」  
土木学会論文報告集 264, 87~96 1977.
- 2) 駒田「飽和-不飽和土中の非定常浸透流解析」  
電力中央研究所報告No.377015, 1978年.
- 3) Briggs, L. J. and J. W. Mclane  
「The moisture equivalents of soils」  
U. S. Dept. Agric. Bureau of soils Bull. 45, 1907.
- 4) 土質工学会編「土質試験法」p148~150 土質工学会 1979
- 5) Thomas, M. D「Aqueous vapor pressure of soils」  
Soil Science, 11, 409~434 1921.
- 6) 美園ら, 「火山灰土壌の土壌水分系に関する研究」  
農技研報告B 2, p95~124 1953
- 7) 軽部 「遠心法pF-水分測定における土壌圧縮の影響」  
土壌の物理性31, 14~20 1975.
- 8) Chang, R. K. and Warkentin, B. P.  
「Volume change of compacted clay soil aggregates」  
Soil Science, 105, 106~111 1968.  
(1985. 10. 28受理)

## Summary

In this paper, the authors studied various problems concerning the use of the Centrifuge method for measurement of pF-soil moisture relation.

This paper addresses two problems : one concerns the influence of soil compression, the other is about the water lodging phenomenon.

This report describes also a few devices to counteract the water lodging phenomenon.

Concerning soil compression, dehydration by air-drying was compared with centrifugal dehydration by measuring the relative volume vs. moisture content relation.

Consequently, it was found that the difference between the two dehydration was due to the destruction of soil structure which did or did not follow dehydration.

In another problem, water lodging occurred with 5.1cm thick soil sample, was not present when the soil sample was 2.7cm thick.

The pF-soil moisture curve of the former was different from the latter.

The centrifuging time is shortened and water lodging does not occur when porous material(e.g. plaster) is inserted in the soil sample or under its bottom.