

## 遠心法 pF-水分測定における圧縮の影響

軽 部 重 太 郎\*

The Influence of Soil Compression in Determination  
of pF-moisture Curves by the Centrifuging Method,

Jutaro KARUBE

Faculty of Agriculture, Ibaraki University

## Summary

An influence of soil compression on the pF of soil moisture must be considered in using the centrifuging method. Soil used is a volcanic ash soil (Kanto Loam) and the results are as follows.

1. Stress caused by centrifugal force does not hardly affect the pF-moisture of undisturbed soil but it affects that of disturbed one. Furthermore the pF-moisture of disturbed soil changes due to the methods of preparation. So experiment was done under the condition of same preparation and the effect of the compression was expressed in terms of dry density (Fig.8). The pF-moisture curves which are obtained from the soil with different dry density intersected at about pF=2.

2. A phenomenon of soil consolidation in the sample tubes of centrifuge was appeared. The more rotation velocity increases, the more expands the susceptible range of consolidation.

3. It is seemed that the upper limit of pF, which can be determined by the centrifuging method, is about 2.5 according to the experimental data which are obtained under uniform dry density. This value of pF=2.5 is equivalent to the moisture of rupture of capillary.

## I. はじめに

pF の測定法として、外部から自由水面を与えないで行う遠心法の理論は、1967年岩田<sup>1)</sup>の考察によって確立された。この理論の確認と測定上の問題点の整理は中村<sup>6)</sup>、須藤<sup>9)</sup>、山本<sup>10)</sup>、寺沢<sup>5)</sup>、湯村<sup>12)</sup>らによってなされ、遠心法は pF 測定法としてほぼ確立されてきたように思われる。しかし、遠心力場での土壌の圧縮と土壌水の水理学的連続性の問題は、多くの研究者に指摘されながらもあいまいなまま残されており、これが遠心 pF に対する批判の根拠にもなっている。

試料の圧縮は、遠心力が体積力であることから起る不可避的な現象であり、pF-含水比水に影響を及ぼすことが予想される。寺沢<sup>5)</sup>はこの影響を pF 1.8 以下で大きいとし、中村<sup>6)</sup>は砂質土の実験から実用上それほど心配ないとしているが、基準とする土壌の状態(充てん)をどれだけ反映しているかが、ここではむしろ問題になると思われる。

遠心法による pF の測定範囲としては、いくつかの文献<sup>9)11)</sup>でおおよそ pF 2.5~4.2 としている。一方岩田により提唱された pF の計算式は、土壌中の毛管水が連続

しているという条件で意味をもつ。また土壌の毛管連絡切断含水量は pF2.7~3.0<sup>2)</sup>、あるいは pF2.5~2.7<sup>7)</sup>に相当するといわれているから、pF の測定限界が問題になる。これについてはいくつかの議論もあるが、毛管連絡と関連させて遠心 pF の測定限界を具体的に示したものはない。

ここでは、初めに遠心力場で起る圧縮が pF-含水比に及ぼす影響について実験した。また実験の過程で、圧縮が遠心 pF の測定限界を考えるに当たって重要な意味をもっていると考えたので、その点についても検討した。

## II. 実験方法

## 1. 計算式

試料下端を自由水面とみなして、次式によって pF を計算した。 $r_1$  の負圧を  $h$  とすれば、

$$h = - \int_{r_0}^{r_1} \frac{r \omega^2}{g} dr = \frac{\omega^2}{2g} (r_0^2 - r_1^2) \text{ (cm)} \quad (1)$$

$$pF = \log h$$

ここで  $r_0$  は試料下端の回転半径(cm)、 $\omega$  は角速度(rad/sec)、pF の成分は毛管ポテンシャル。

## 2. 遠心機

回転中には濾過筒が水平になる swing 型の遠心機を

\* 茨城大学農学部

用い、濾過筒は円筒形にした。 $r_0$ は11.0cmであった。

### 3. 回転時間

回転中の時間と含水量の関係式として次式が考えられる<sup>8)</sup>。

$$\frac{dw}{dt} = -k(w - w_\infty)^n \quad (2)$$

但し、 $w_\infty$ は時間  $t \rightarrow \infty$  の時の含水比で、 $k$ 、 $n$  は定数。

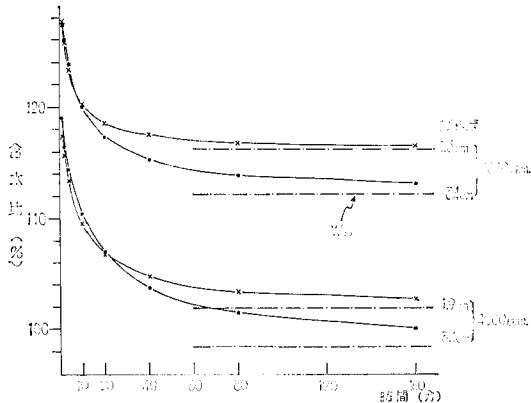
この式は  $n = 1$  の時

$$w = ce^{-kt} + w_\infty \quad c: \text{定数} \quad (3)$$

$n = 2$  の時

$$w = \frac{1}{kt+c} + w_\infty \quad (4)$$

となる。これを実測値（薄層法ではない）に当てはめると、(4)式によく一致し、残差は充分に測定誤差の範囲に入った。



第1図 回転時間と含水比（関東ローム）

第1図は回転数、試料厚さ（回転後の）を変えた場合の曲線で、(4)式から  $w_\infty$  を計算して示した。遠心機の回転時間は、土壌の種類に加えて回転数、試料の厚さなどから総合的に判断すべきであるといえる。回転数を長時間安定に保つのが難しい遠心機では、回転時間が長すぎても心配が残る。

なお、粘質土では、濾過筒内の高さ方向の水分分布が中間で大きくなる（逆くの字形になる）ことがある。しかし回転時間を充分長くすれば消えるので、これは一種の waterlogging であると思われた。

### 4. 供試土壌

試料には、茨城県稲敷郡阿見町茨大農学部構内で採取した深さ90cm（茨大90）又は50cm（茨大50）の関東ロームを用いた。その物理性は第1表に示す。

### 5. 実験（A）

（茨大90）の生土を調製して次のような試料を準備した。①2mmフルイを通してゆるくつめたもの。②それを

第1表 供試土の物理性

	（茨大90）	（茨大50）	
土性	LiC	SiCL	
粒	2.0~0.2mm	3.2%	3.6%
	~0.02	32.7"	22.5"
度	~0.002	34.3"	53.0"
	0.002以下	29.8"	21.0"
真比重	2.753	2.678	
L. L.	生土	148.3%	131.5%
	風乾土	64.2"	68.2"
P. L.	生土	98.9"	83.8"
	風乾土	50.5"	58.2"

最高回転（5,000r.p.m.）で脱水圧縮させたもの。③脱水圧縮させた試料を再び2mmフルイにかけて、ゆるくつめたもの。④不攪乱のまま整形してつめたもの。以上の4通りの試料を毛管飽和させた。

回転中の水分蒸発を防ぐためにアルミ箔でふたをし、回転停止後直ちに試料の重量（または脱水量）や体積変化を測定した。試料高さは1.5~3.5cmであったが、各回転毎に高さが変わるので、回転半径  $r_1$  もその都度測って pF を計算した。

他の方法との連続性をみるためには、試料①と④について pF2.0 以下を吸引法で、pF2.7~4.2 を加圧膜法で測定し、これらを比較した。

### 6. 実験（B）

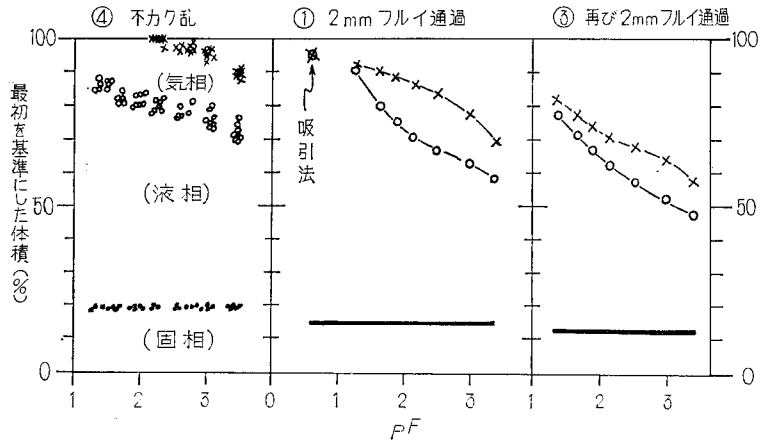
直径3cm、高さ1cmの輪切り円筒を重ね、これに（茨大50）の生土で2mmフルイを通したものをに入れて遠心脱水させた。このとき、同じ条件で2組の試料をつくり、そのうちの1組は遠心脱水後直ちに含水比と乾燥密度 ( $r_d$ ) を高さごとに測定した。他の1組は圧縮したまま再び毛管飽和させて加圧板法にかけ、前と同様に含水比と  $r_d$  を測定した。

## III. 実験結果

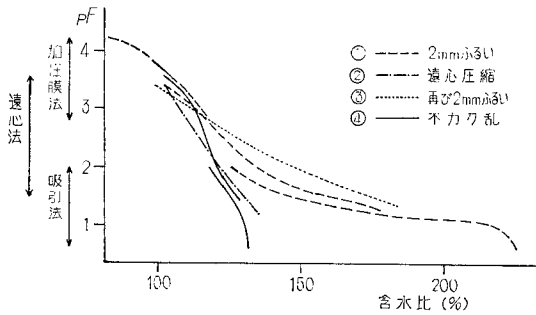
### 1. 三相分布

実験(A)より得られた濾過筒内の各 pF における三相分布を第2図に示す。吸引法によれば、乱した土①は5%程度体積が減少する（この時  $r_d \approx 0.4$ ）まで脱水量と体積の減少量が等しく、それ以後体積は一定になる。

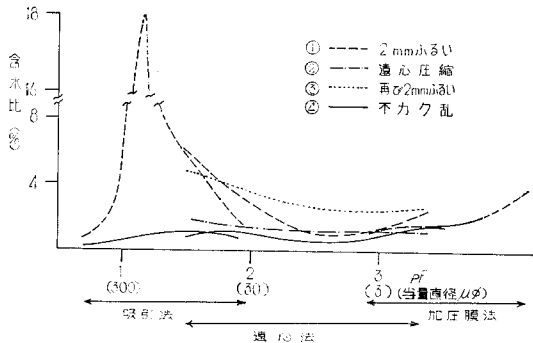
これに対して遠心法では、回転数を上げるに従って体積減少が徐々に進み、脱水量との関係で pF 2~3 のときに空気間隙の占める割合が最大になった。圧縮は pF3 を越えても進行し、空気間隙の占める割合は次第に小さくなる。



第2図 濾過筒内試料の三相分布 (炭大90)



第3図 試料の調製を変えたpF—水分曲線(炭大90)



第4図 pF—水分分布曲線 (炭大90)

2. 圧縮応力

遠心力場で試料に作用する体積力を  $f_v$  とすれば、

$$f_v = \int_{r_2}^{r_0} \frac{r_1 r \omega^2}{g} dr = \frac{r_1 \omega^2}{2g} (r_0^2 - r_2^2) [g/cm^2] \quad (5)$$

ここに  $r_2$  は試料上端の回転半径 (cm),  $r_1$  は湿潤密度 ( $g/cm^3$ )。

罐との摩擦ゼロの条件で、試料下端には  $f_v$  に等しい応力 ( $\sigma$ ) が生じる。これから pF と圧縮応力の関係を

略算すると、試料厚 2 cm,  $r_1=1g/cm^3$  が与えられたとき、pF2.5では約0.6kg/cm<sup>2</sup>, pF 3では1.9kg/cm<sup>2</sup> の圧縮応力が試料下端に生じることになる。

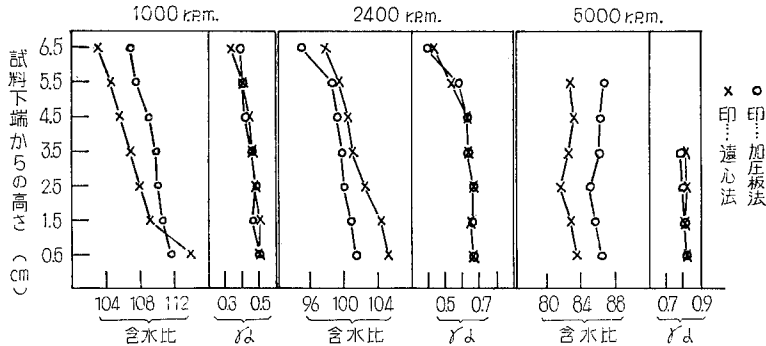
不攪乱の土では構造的のために pF 2.5 ぐらいまで体積減少が起こらない(第2図)。この土が初めて体積減少を起こした時の応力を(5)式から計算した結果、 $\sigma=0.5 \sim 1.0kg/cm^2$  であった。

3. 試料の調製を変えた場合のpF—水分曲線

実験(A)で得られた pF—水分曲線を第3図に示す。吸引法、加圧法は、遠心法と同じく毛管ポテンシャルのみを測定しているの、三つの方法で得られた曲線は連続していなければならない。不攪乱の土④では、吸引法と遠心法の平均値(8コ)のズレは含水比にして3~4%, 加圧法とのズレは2~3%であり、曲線の連続性は一応よいといえる。これに対して乱した土①では、吸引法とのズレが10%前後あり、加圧法との連続性もよくない。この吸引法とのズレは、pF 1.5~2.0に相当する孔隙が遠心法の場合に増加している(第4図)、圧縮によって孔隙分布が変わったために生じたと考えられる。

試料の調製を変えた各々の曲線は、pF 2.7~3.0のところでは交差し、その上と下で離れている。pF の低い側で離れているのは、前と同じく圧縮による孔隙分布の変化として理解できる。但し、この場合特に調製の異なる土では、孔隙の分布を  $r_d$  から推定する事ができない。例えば pF 2.0 で①と③を比較すると、 $r_d$  は①が0.47, ③が0.49で③の方が密であるのに対して、pF2.0に相当する孔隙量は(第4図から)③の方が多。ここでは含水比も③の方が大きくなっているが、含水比は孔隙径の小さい方からの積分値に相当するものである。

低 pF, すなわち孔隙分布を考えるには、 $r_d$  のほかに



第5図 土柱の水分と密度の勾配 (茨大50)

土のもつ構造性を考慮する必要がある。

#### 4. 土柱の水分と密度の勾配

前述のように  $r_d$  と孔隙分布の関係は単純ではないが、他の条件をできるだけ等しくすれば、 $r_d$  は一つの指標になるであろう。

実験(B)から遠心法と加圧板法の結果を比較して第5図に示す。遠心法によれば、含水比は一部を除いて回転軸に近い(上層)ほど小さい。遠心法についてのこの含水比の傾向は(1)式の実験的な根拠でもある<sup>6)10)</sup>。一方遠心法で得られたのと同じ  $r_d$  の勾配をもつ試料を加圧板法で測定した結果、pF の高い部分では遠心法のものと同様に平行した水分勾配が得られた。加圧板法では試料の pF は同一と見なせるから、加圧板法で生じた水分勾配

は pF のちがいによるものではなく  $r_d$  の差によるものである。従って、遠心法で水分勾配のできる原因の一つに  $r_d$  を上げることができる。

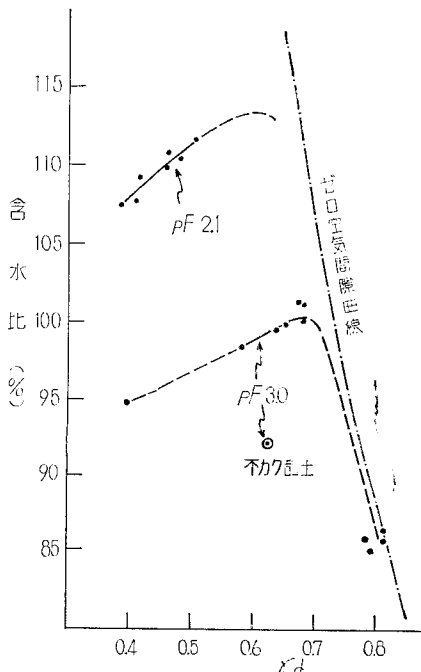
### IV. 考察

#### 1. 圧縮の補正

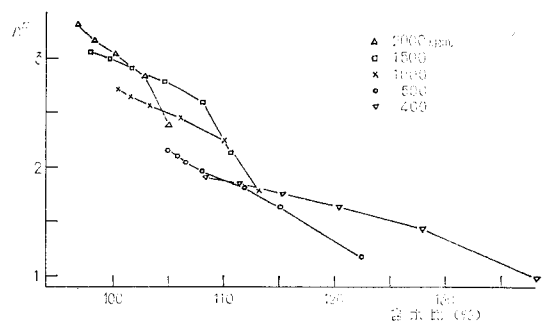
圃場における土壌の水分特性を調べるには、現場の土壌の状態を反映させる必要がある。特に毛管領域の pF 測定は孔隙分布に大きく影響されるので、圧縮を補正することが必要である<sup>5)</sup>。補正の指標としては、試料の調製を等しくするという条件で  $r_d$  を用いた。

実験(B)の加圧板法で得られた  $r_d$  と含水比および pF の3者の関係をもとに、同じ pF の点を結んで  $r_d$  と含水比の関係(第6図)を得た。次にはこれと同じ関係を、 $r_d$  を指標として遠心法で求めた。

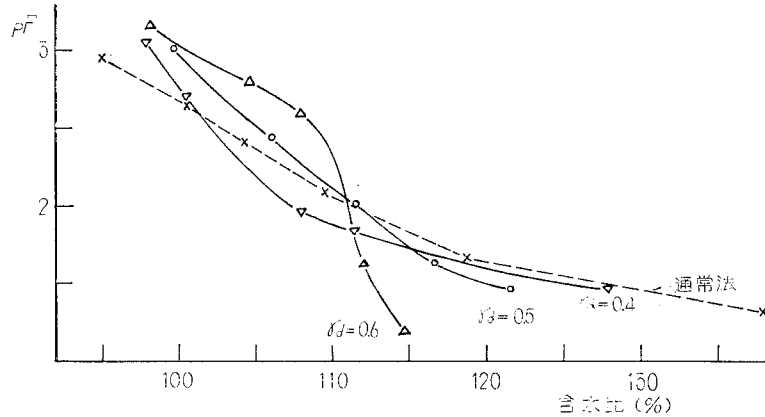
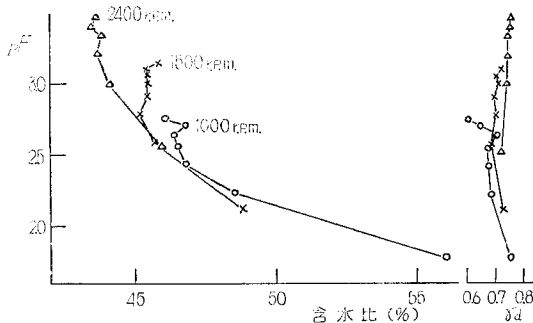
前述の輪切り円筒を用いて pF—含水比と  $r_d$  を測り、第7図のように pF—水分曲線を重ね合わせる<sup>3)</sup>。さらに前もって圧縮させた試料を使って、重ね合わせにおける  $r_d$  の範囲を拡げる。そうして得られた曲線群の、同じ  $r_d$  の点を結ぶと  $r_d$  がいろいろに変化した場合の pF—水分曲線(第8図)が得られた。この図から、圃場の  $r_d$  を測ることによって、遠心法でも圧縮を補正した pF—水分曲線を得ることができる。



第6図 加圧板法による  $r_d$  と pF—含水比 (茨大50)



第7図 pF—水分曲線の重ね合わせ (茨大50)

第 8 図  $r_d$  を指標にした pF—水分曲線 (茨大 50)

第 9 図 つまみ方を調整した pF—水分曲線の重ね合わせ (関東ローム風乾土)

$r_d$  の異なる pF—水分曲線が pF 1.7~2.1 で交差しているのは、この付近が水分特性の一つの変化点であることを示すものと考えられる。

## 2. 濾過筒内での圧密現象

遠心圧縮により  $r_d$  が増大すると、ゼロ空気間隙曲線に添って含水比が低下する現象(圧密)が起こる(第 6 図)。圧縮は下層から進行するので、全層で測定した三相分分布(第 2 図)からはこの現象はわからない。

実際には、試料下端では pF がゼロに近い上に圧縮応力は最大になるから、粘質土の場合は多かれ少なかれ圧密が生じているものと考えられる。回転数を増すにつれて圧密は次第に上層に及び、その分だけ含水比は過少になるであろう。

土層厚を 2 cm になるようにして、全層で測定した pF—水分曲線を第 8 図に破線で示した。試料全体の  $r_d$  は 0.4~0.6 の範囲に入るにもかかわらず、高回転になると含水比は過少な値になった。第 3 図の pF 3 付近で、構造がこわれたものほど含水比が小さい傾向を示すのは、これと同じく圧密のためと考えることができる。

圧密は、負圧と無関係な外力によって含水比を低下させる。これに対して不飽和での圧縮は、およそ pF 2 以上の含水比を増加させる役割を果たす。従ってこの 2 つの現象が濾過筒内で同時に起これば、含水比は結果的に適当な値を示す事があるといえる。

中村<sup>6)</sup>は遠心機の回転数を上げるよりも、土柱を長くしてより高い pF を測る事を提案している。この方法は、比較的高い pF でも圧縮応力を少なくすることができるから、圧密を除くためにも有効と思われる。

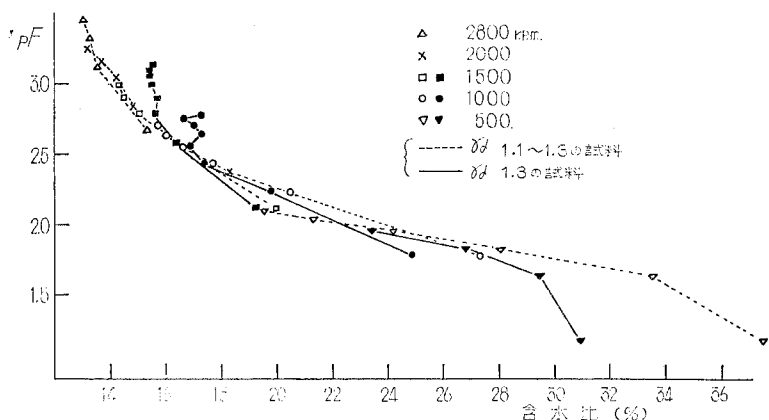
## 3. 遠心 pF の測定限界

今までは、pF 3 付近まで土壤水が連続することを仮定して、圧縮の問題を検討した。そして試料が圧縮や圧密を受ければ、含水比はそれに伴って変動することがわかった。今度は、圧縮を取り除いた時に(1)式がどこまで適用できるかを問題にしなければならない。

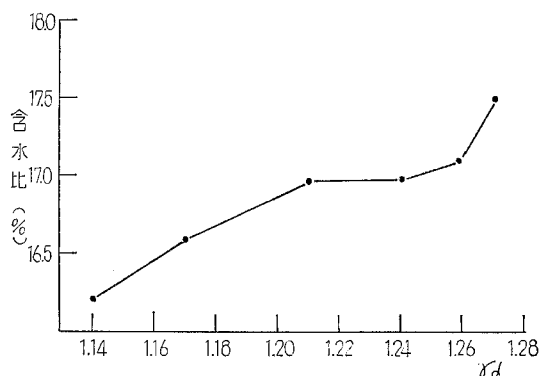
圧縮のできるだけ少ない試料としては、関東ローム風乾土が有効であった。これを輪切り円筒に一樣につめて測定し、pF—水分曲線を重ね合わせると第 9 図が得られた。pF 2.5 前後で各曲線は離れており、(1)式は適用できないことがわかる。この場合  $r_d$  も若干ズレしているが、これは IV—1 で検討した結果から考えて、離れた曲線を近づけるものではない。

同じことを、成田層群と呼ばれる洪積砂層から採取した Loamy fine sand (粗砂 1.1%, 細砂 85.7%, シルト 9.1%, 粘土 4.1%) を用いて確かめた。机上で軽くたたきながらつめた試料では、第 10 図の破線のように pF—水分曲線はきれいに重なった。この時の  $r_d$  は 1.1~1.3 であった。次に、あらかじめ  $r_d$  を全層 1.3 程度に圧縮させたもので測定すると実線のようになり、前と同じく pF ≧ 2.5 以上で曲線は重ならない。

一方、この砂質土の毛管連絡切断含水量<sup>2)</sup>を測定した結果(第 11 図)、 $r_d$  によって若干のちがいがあ



第10図 pF—水分曲線の重ね合わせ (loamy fine sand)



第11図 飽和水蒸気中で風乾土に吸水させた時の含水比 (46時間後)

含水比は16.2～17.5%となった。これは第10図では pF 2.4～2.6に相当し、前述の曲線が重ならなくなる pF と対応する。以上のことから、遠心 pF の(1)式が成立する限界は毛管連絡切断含水量にほぼ一致し、pF2.5 前後であると考えられる。

ところで、これらの限界を越えても通常はなめらかな曲線が描ける。その理由を次に考えた。

1つには前述の圧密現象が上げられる。粘質土の場合はすでに述べたが、砂質土の場合も、微視的に見れば粒子間にはさまれたシルトや粘土が圧密を受ける可能性がある。また圧密は(5)式によって進むが、これは pF の(1)式と似ているために、回転数の増大に対しては同じ傾向で脱水が進むと考えられる。しかし、飽和のまま脱水が進む現象に対しては pF を定めることができない。

第2に、毛管連絡の切れた懸垂水は、遠心力  $f$  に抗して保持されなければならない。

$$f = m\omega^2 \quad [\text{dyne}] \quad (6)$$

( $m$ は水塊の容積に水の密度をかけたもの)

(6)式で、回転数が大になれば  $m$  は小になり、含水比は低下する。この場合、土粒子は必ずどこかで支えられているから、懸垂水の下端にも凹のメニスカスができる可能性が大きい。その時懸垂水には遠心力の他に下向きの表面張力も働くから、懸垂水は下方に移動しやすくなる。

第3に、影響はわずかであるが、毛管凝縮が考えられる。一度毛管が切断されても、密につまっていた微細孔隙が多ければ、水蒸気が再び凝縮して含水比を増加させるものと思われる。そのとき、毛管連絡の切れた領域では、上層で  $r_d$  が小さければ含水比もその分だけ相対的に小さくなるであろう。

## V. まとめ

関東ロームを用いて、遠心法で pF を測定する際の圧縮の問題を検討した。

1. 不攪乱の関東ロームでは圧縮をほぼ無視できるが、乱した土の場合は試料の調製によって pF—水分曲線が異なる。試料の調製を等しくする条件で  $r_d$  を指標に用い、圧縮を補正する方法を提案した。 $r_d$  の異なる pF—水分曲線は pF 2 付近で交差した。

2. 濾過筒内での圧密現象を見いだした。圧密の範囲は回転数の増大に伴って拡がり、含水比の過少として表われる。

3. 試料の  $r_d$  をできるだけ等しくして測定した結果、pF2.5 付近が遠心 pF の測定限界と考えられた。これはほぼ毛管連絡切断含水量に相当した。この限界を越えた時の水分について若干の考察をした。

〔謝辞〕論文をまとめるにあたり、茨城大学須藤清次教授、同安富六郎助教授、田淵俊雄助教授の有益な助言をいただいた。また実験には久保田悦子氏の援助を得た。厚く感謝申し上げます。

## 引 用 文 献

- 1) 岩田進午：土肥誌 39, 3, 177 (1968)
- 2) 椎名乾治, 野中仙三郎：土壌の物理性 24, 14 (1971)
- 3) 須藤清次：土壌の物理性 22, 35 (1970)
- 4) T. J. Marshall : Relations between Water and Soil 18 (1959)
- 5) 土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法 150 (1972)
- 6) 中村忠春：研究の資料と記録 16, 30 (1967)
- 7) 中村忠春：愛媛大学農学部紀要 14, 1, 98 (1969)
- 8) 安富六郎：材料 20, 212, 129 (1971)
- 9) 山崎不二夫監修：土壌物理 95 (1969)
- 10) 山本晴雄：土壌の物理性 24, 3 (1971)
- 11) 八幡敏雄：土壌の物理 61 (1975)
- 12) 湯村義男ほか：東海近畿農試報告 26, 79 (1973)