

pF 測定における遠心法についての考察*

山 本 晴 雄**

Investigation of the Centrifugal Method in pF Measurement

Haruo YAMAMOTO

遠心法により水分張力と水分含量の関係を求める際に、従来用いられてきた計算式 $\psi=r\omega^2$ は遠心力のみに注目し、毛管ポテンシャルを考慮していない。すなわち上式によると遠心半径 r が大きくなるにしたがい、水分張力 ψ は大とならねばならない。しかし土壌柱を遠心力場においたとき、半径の大きくなる土壌柱下端ほど水分含量が大で、水分張力が小となる実測値と矛盾をきたす。

遠心法は遠心力場での土柱法にほかならないので、水分張力は自由水面とのポテンシャルの差を測定することによって求めねばならない。遠心力場での土壌柱で測定しようとする位置(試料)に働く力は自由水面(r_1)から測定位置(r_2)まで $r\omega^2$ を積分したものでなければならぬ。したがって計算式は $\psi = \int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr$ を採用しなければならない。

また自由水面について検討した結果、必ずしも外部より自由水面を与えなくとも土壌柱下端を自由水面とみなすことができることを確認した。

水分張力を求める際に従来用いられてきた遠心法の理論 $\psi=r\omega^2$ は毛管ポテンシャルを考慮していないので実測値と矛盾をきたす。それゆえ遠心法は遠心力場での自由水面とのポテンシャルの差を測定することによって水分張力を求める $\psi = \int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr$ (RUSSELL) を採用しなければならない。その場合の自由水面は岩田のいうように必ずしも外部より与えなくとも試料下端を自由水面とみなすことができることを実験的に裏づけた。

緒 言

近年、土地改良事業および畑地かんがい事業のための土壌調査が多くなり、土壌物理学的研究が必要となった。しかし土壌物理学的手法についてもいまだ検討する余地が多く、現場での応用的な対応のほか、基礎的な問題もあわせて検討されねばならないのが現状である。土壌水の研究に欠かすことのできない遠心法についてもその一つといえる。

遠心法は1907年にBRIGGS and McLANE¹⁾によって水分当量の測定法としてはじめてとり入れられた。すなわち重力の1,000倍の遠心力にさからって土壌に保持される水分を測定した。これはわが国においても遠心含水当量試験法³⁾として用いられている。

1938年にRUSSELL and RICHARDS¹¹⁾は土壌を自由水面と連絡さす方法を考案し、水分張力を求める

遠心法を理論的に確立したといえる。さらに1952年にCRONEYら²⁾がRUSSELLらの測定法を若干修正して用いている。

わが国においては1953年に美園ら⁷⁾が火山灰土壌の土壌水分系に関する研究において用いて以来、地力保全基本調査事業¹⁰⁾などにも取り入れられ、一般的な分析法として広く普及した。

これらわが国において普及した遠心法はRUSSELLらの自由水面と連絡する方法と異なり、土壌の単位体に遠心力を働かせ、水を張り切るという方法をとってきた。すなわち、「 f なる遠心力を土壌水に働かせて、その遠心力と平衡状態にある残留水分の土壌水分吸引力値は $-f$ に相当する」となす立場であった。しかし、遠心法に関しての論議が十分なされてきたとは言えず、竹中¹²⁾、中村^{8,9)}らにより問題点が論じられていた。また、二、三の著書^{13,14)}では理論的に異なる二つ

* 本報の要旨は日本土壌肥料学会(1970年4月)で発表した¹⁵⁾。

** 北海道立中央農業試験場 夕張郡長沼町

の立場が紹介されていた。

1967年に岩田^{4,5)}は遠心法の原理を考察して、土壌水と自由水面との間のポテンシャルの差を測定して吸引力を求めることをあきらかにし、実験条件として外部から自由水面を与えなくとも試料下端の毛管孔隙の水が自由水の役割をすることを理論的に明確にした。

そこで筆者ら¹⁶⁾は RUSSELL らの方法までたしかかり、それと従来法ならびに岩田のいう方法とを実験的に検討実証しようとした。

本報は1969年に筆者が元東海近畿農業試験場畑作物部(現野菜試験場)へ派遣され指導を受けた実験が基礎となっている。本研究にあたり懇切に指導をして下さった湯村義男室長(現野菜試験場)、佐藤雄夫技官(現福島県園芸試験場)、石原暁技官(現野菜試験場)の方々に感謝するとともに本報をまとめるにあたって、適切な助言と援助をいただいた元道立中央農業試験場 森哲郎化学部長(現道立天北農業試験場長)、遠心機のロータの試作および貸与をして下さった国産遠心機 長谷川真氏、本報の御校閲を賜った道立中央農業試験場 松代平治化学部長の方々に感謝いたします。

実験方法

1 遠心力場における水分張力の原理

法線加速度系において、質量mが半径rの円周上を角速度ωで等速円運動をする場合、質量mにおよぼす遠心力Fは

$$F = m r \omega^2$$

であらわされる。いま、 $m=1$ 、毎分の回転数をnとして重力場の毛管負圧に換算すると

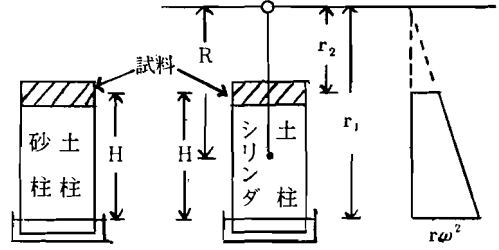
$$h g = r \omega^2$$

$$pF = \log r + 2 \log n - 4.95$$

となる。これが従来から用いられている計算式である。しかしこの計算式は単位体におよぼす遠心効果であって、水を振切る状態で遠心力が働いている土柱内において、遠心力にさからって毛管的に保持されている土壌水の振切面に生ずるメニスカスの表面圧、また

は土壌中に働く毛管ポテンシャルが考慮されていない。

実際には振り切り界面の毛細管に遠心力にさからって保持されている水と土層中の水が水理学的に連続したものと考えられる。従って、試料の厚さが大きくなると試料上端に働く力は図1の r_1 から r_2 まで $r \omega^2$ を積分したものでなければならない。



$$\phi = Hg \quad \phi = \int_{r_1}^{r_2} r \omega^2 dr$$

重力場

遠心力場

図-1 遠心力場における土柱法

$$h g = \int_{r_1}^{r_2} r \omega^2 dr = - \int_{r_2}^{r_1} r \omega^2 dr$$

$$-h = \frac{1}{2} (r_1^2 - r_2^2) \frac{\omega^2}{g} = (r_1 - r_2) \frac{r_1 + r_2}{2} \frac{\omega^2}{g}$$

$$= H \cdot R \cdot \frac{\omega^2}{g} \quad \left(H = r_1 - r_2, R = \frac{r_1 + r_2}{2} \right)$$

$$pF = \log H + \log R + 2 \log n - 4.95$$

h : 水分張力 (水柱 cm)

g : 重力の加速度

r_1 : 回転中心より自由水面までの距離

r_2 : 回転中心より試料中心までの距離

ω : 角速度

結局遠心力場での土柱は重力場における土柱や水柱吸引法を圧縮したものにはかならない。図1はその関係をあらわす。

2 供試土壌

供試土壌は北海道洞爺村の有珠—b 火山灰土壌 (Ap層)、早来町の樽前—C 火山灰土壌 (埋没 A 層)、長沼

表-1 供試土壌の性質

土 壌	塩基置換容量 me/100g	腐 植 %	粗 砂 %	細 砂 %	シルト %	ク レ イ %	土 性
有 珠 — b	15.6	1.8	4.5	60.9	24.2	10.4	SL
樽 前 — c	48.5	12.8	2.3	41.7	43.9	12.1	L
長 沼	19.4	2.3	0.1	17.0	51.9	31.0	SiC
豊 浜	45.7	2.0	12.2	33.7	27.8	26.3	LiC
黒 石 原	37.0	15.2	2.7	13.6	47.2	36.4	SiC

町の沖積土壌 (Ap 層), 愛知県南知多町豊浜の第三紀層中新世の頁岩を母村とする土壌 (Ap 層), 熊本県西合志村黒石原の火山灰土壌 (Ap 層) を用いた。供試土壌の性質は表 1 のとおりである。

3 測定機器

遠心機は主として国産遠心機 H-658 を用い, ロータは遠心機附属の横がけのロータと新たに本実験のために試作した懸垂式のロータおよび遠心筒を用いた。図 2 の A 型は国産遠心機附属の常用の遠心筒で, 高さ 5 cm の土柱自体がシリンダーとなるものである。本実験を始めた当初, B 型の遠心筒と石こうシリンダを用いたが, B 型は自由水面を厳密に定水位におくことができないため, 遠心操作後に補正を必要としたり,

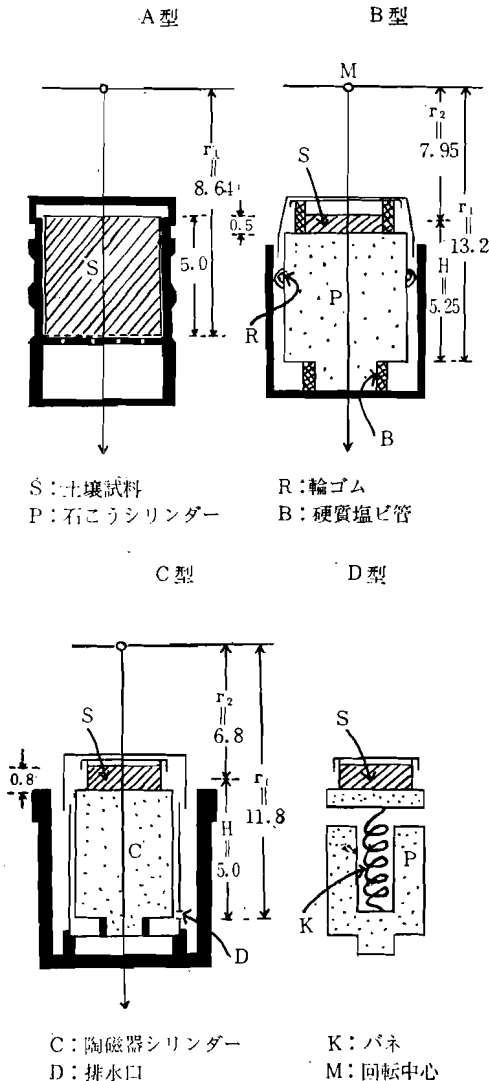


図-2 各種遠心筒およびシリンダー

シリンダの石こうが水に溶解する欠点をもつため, 後に国産遠心機で C 型の遠心筒を試作したのでそれを用いた。C 型のシリンダは直径 4 cm, 高さ 5.5 cm (脚部の底から) の多孔質陶磁器を用いた。D 型のシリンダはバネを内蔵させ, pF 2.4 相当の力以下では自由水面との連絡を断つようにした。

4 測定方法

B~C 型ロータによる場合はシリンダの上端面のリング内に圧密されて 5~8 mm の厚さとなるようにややおおめに風乾土 (2 mm 篩別) を入れ, シリンダの部分を水につけ一夜静置した。シリンダ上の試料が十分飽水したのち遠心筒にシリンダを入れ, ロータ内で対称となるもののバランスを厳密にとった。回転中の温度は 10~13°C に自動制御した。

A 型の従来法による測定は遠心機附属のろ過筒にろ紙をしき, 高さ 5 cm の 100 cc 管を入れ, 風乾土を充填した。試料が 1 cm 位浸漬するように水深を与え, ふたをして一夜静置し遠心機にかけた。遠心操作後, 土柱の所定の高さより約 2 mm の厚さで採土し, 含水比を求めた。

結 果

1 予備実験

遠心力場での平衡状態に達する所要時間, および平衡に達した状態から回転を漸減停止し, 重力場に取り出す間の水の再分布について検討した。

(1) 平衡状態に達する所要時間

図 3 のように長沼, 有珠土壌については 3 時間でほぼ平衡状態に達した。しかし土壌によってはさらに所要時間を要する場合¹⁰⁾もあるが, 本実験においては一応 3 時間とした。

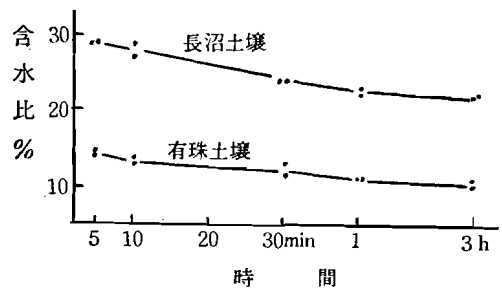


図-3 陶磁器シリンダーによる pF 3.80 (3,470 rpm) の平衡時間

(2) 回転の漸減停止にとまう水の再分布

高さ 5 cm の脚部のない石こうシリンダに試料をのせて十分飽水させ, シリンダ下端にリングを置いて 3,200 回転で脱水した。平衡状態にしたのち遠心機を

止め、試料を左右対称に半量を取り出し含水量を調べた。残りの半量はシリンダ下端に約1mmの自由水面を、回転停止までに要する時間7分30秒間(佐久間製作所の遠心機使用)与えたのち取り出し含水量を調べた。結果は表2のごとくで、豊浜土壌は変化がなく、黒石原土壌はもとの含水比の1.3%の増分を示した。しかし遠心力場ではシリンダ下端を毛管水帯と仮定してもこの増分より小さいであろうと推定され、この程度であれば通常の実験誤差として無視しようと考えられる。

表-2 遠心力低下に伴う土壌水分の変化の推定

遠心操作時間	土 壌	(a)遠心停止直後の含水比	(b)続いて自由水面を与えた時の含水比	b-a	$\frac{b-a}{a} \times 100$
3時間 + 3時間	豊 浜	24.1	24.1	0.0	0.0
	黒石原	39.1	39.6	0.5	1.3

水分の再分布をさける技術的な方法として図-2のD型のようにシリンダにバネを内蔵させ、pF 2.4相当の力以下では自由水面との連絡が断たれる試みをした。結果は図4のようにバネ内蔵用のシリンダにレンガを用いたものは金網で上下シリンダを完全に切断した場合のpF 3.0値と同じ結果となった。pF 2.4以上の力で上下シリンダは接触するが、下部シリンダへの毛管連絡が不完全で、境界面が毛管水の下端の位置となったと推定され、材質の粗いレンガは不適当であった。石こうの場合はある程度目的が達せられたが、高pFになるとやはりレンガを用いたものと同じような値をとり、上下シリンダの境界面についてさらに検討する必要がある。

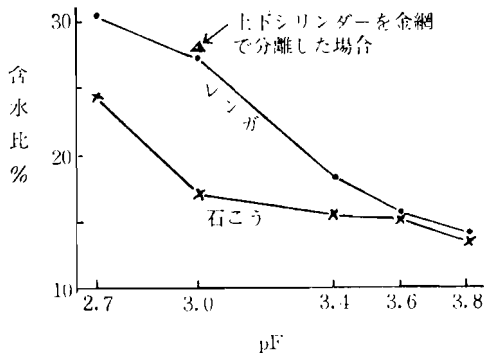


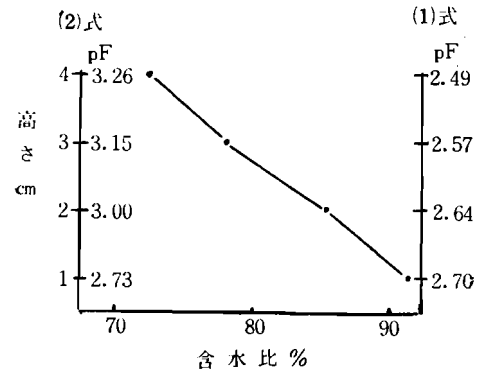
図-4 バネ内蔵シリンダでの pF 水分曲線 (有珠-b土壌)

以上のように回転の漸減停止の間の水の再分布については厳密な検討はできず、推定の域を出ないが、試料の含水比におよぼす影響は許容誤差と考えられる。

なお石こうは水にとけやすい欠点をもつので、以後の実験は遠心筒の改良と同時にさらに堅硬緻密な陶磁器を用いた。

2 従来法による土柱の水分分布と pF

100 cc 管につめた有珠-b土壌を2,430 rpmで回転したときの土柱の水分分布は図5のとおりである。土柱の水分分布は試料下端で最大の含水量を示し、上部になると漸減している。このことは従来の $\psi=r\omega^2$ の式を基礎とする pF 値と含水量の関係と矛盾する。すなわち、この式では半径が最大となる試料下端で最高の水分張力が働き、含水量は最少とならねばならない。これに対して毛管ポテンシャルを考慮する $\psi=\int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr$ の式による pF 値と含水量の関係は pF の増大とともに含水量が減少し妥当と考えられる。



(1)式 $\psi=r\omega^2(pF=\log r+2\log n-4.95)$

(2)式 $\psi=\int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr(pF=\log H+\log R+2\log n-4.95)$

図-5 土柱の水分分布と pF 値
樽前C土壌(2,430 rpm)

3 毛管ポテンシャルを考慮したときの自由水面の有無と pF

従来の $\psi=r\omega^2$ での pF 値は土柱の水分分布と矛盾をきたすことがあきらかになったので、遠心力場での毛管ポテンシャルを考慮に入れた理論の実験的裏づけをしなければならない。土柱法のように明らかに自由水面を与えるために図2のC型の装置をもちい、試料と自由水面の間をシリンダで結び水理的に連続せしめた。有珠-b土壌を用いた pF-水分曲線は図6のとおりである。

また図5の土柱の水分分布は試料下端に外部より自由水面を与えていないが、その水分分布は $\psi=\int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr$ での pF 値の傾向と矛盾をきたさない。岩田^(4,5)は外部より自由水面を与えなくとも試料下端は自由水面とみなすことができることを理論的に証明したので、実

験的に試料下端に自由水面を与えないでA型の遠心筒を用い新しい式を適用して求めた有珠—b 土壌の pF—水分曲線は図6のとおりであり、自由水面を与えたとはほぼ同じような結果を得た。

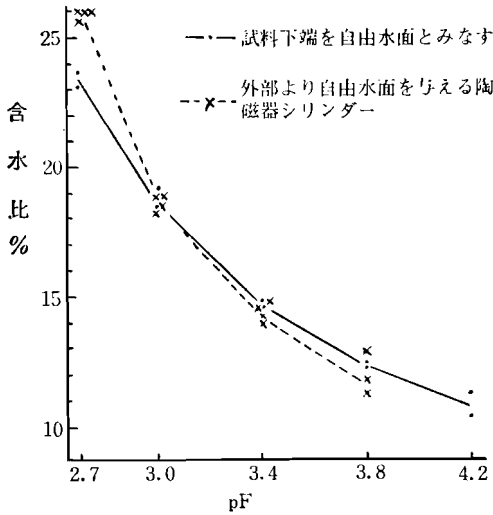


図-6 $\phi = \int r\omega^2 dr$ を適用したときの外部より与える自由水面の有無による pF 水分曲線 (有珠 b 土壌)

土壌はいわば大小無数の孔隙をもつ多孔質体である。しかし毛管孔隙が下端で互いに連結されたとき下端に自由水を与えた場合と同じ働きをするという岩田の説をさらにモデル実験によって観察した。重力場すなわち 1g の場で 0.2~1.0 mm の毛細管を目盛のついた板にはりつけ、図7のような観察結果を得た。すなわち毛細管に水を満たし、水中から引きあげた単独毛細管(a)は自由水面を与えた(c)よりも毛細管の水柱高は高く、毛細管の径の小さいものほどその差 Δh は大きい。しかし、さらに大きな毛細管に下端で連結した

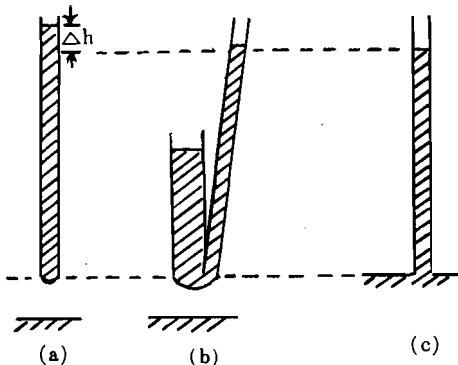


図-7 重力場 (1g) での毛細管連結による毛管上昇高

場合(b)の水柱高は自由水面を与えた(c)とはほぼ同じであった。

考 察

現在わが国で常用されている遠心法は毛管力を考慮していない点で誤りをおかしていることは実験でもあきらかにできた。本報で検討した遠心法は毛管力を考慮した遠心力場における土柱法にほかならない。従って pF 2.3 以下の水分張力範囲でも、理論的にも、実験的にも首尾一貫した連続性が得られるであろう。さらに従来法では測定できなかった吸水過程も自由水面を与えることによって可能となろう。また本報での遠心法は遠心力場での土柱法を圧縮した形であるので、高水分張力も試料から自由水面までの距離を大きくすることにより低回転数で求められる。そうすれば試料の圧密は遠心力、毛管負圧、試料の厚さなどを詳細に検討しなければならないが、小さくすることはできる。

岩田^{4,5)}は従来の遠心法に理論的基礎づけをなそうと試み、試料下端の毛管水帯を自由水面とみなし、 $\phi = \int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr$ の理論を適用した。すなわち、毛細管内の水は上端に働く毛管力と下端液面に働く表面張力によってささえられ、管内のポテンシャル 0 の位置は下端液面より Δh の高さにある。そして管の半径が大きくなるにつれて Δh は小さくなり自由水面を与えた場合の位置に近づく。大小の毛細管を下端付近で連結するとポテンシャル 0 の高さは大きい毛細管に支配され自由水面を与えた時と同じ現象となると述べている。本実験においても明らかに自由水面を与える方法と与えない方法を比較したが、ほぼ実験値は一致した。また、毛細管を用いてのモデル観察でも岩田の説を是認する結果となった。しかし CRONEY らが自由水面を与える方法でシリンダの材質を問題としたように、自由水面を与えないで土柱自体で圧力勾配をつけることは試料の土性によっては、その水理学的連続すなわち圧力勾配が保証されない場合があるのではないだろうか。この点は今後検討を加えねばならない。

遠心法については以上の論議のほか遠心力による土壌構造の破壊という問題があり、現在諸外国では用いられていない。KOHNE⁶⁾もその点を批判し、遠心法は単なる比較値を求めるにすぎないと言っている。遠心力による構造の破壊などは今後さらに検討を加えねばならない。

次に 100 cc 管で採土した試料を一つの単位体として、 $\phi = r\omega^2$ を適用していた従来のデータを生かすためには近似的な換算法をとるしかない。すなわち試料

下端までの半径 r_1 は遠心機固有の定数であるので、古いデータの試料中心までの半径を r_2 とし、その時の回転数よりあらたな pF 値を求める。含水量測定のための厳密な試料の採取位置は r_2 の点であるが、 r_2 点の含水量が土柱の高さごとの水分分布の平均値と近似であるとみなす。そうすれば 100 cc 全体の試料の含水量を測定していた従来のデータは生かすことができる。ただし、 r_2 点の含水量が全体の平均値とみなすことは、水分張力と含水量の関係が一次函数であるという前提に立っているので、あくまでも近似的である。

引用文献

- 1) BRIGGS, L. J. and J. W. MCLANE, 1907: The moisture equivalents of soil. U. S. Dept. Agric. Bureau of Soils Bull. 45.
- 2) CRONEY, D., J. D. COLEMAN and P. M. BRIDGE, 1952: The suction of moisture held in soil and other porous materials., Road Res. Tech. Paper. 24: 19—23.
- 3) 土質工学会編 1969: 土質試験法, 111—118. 土質工学会
- 4) 岩田進午 1967: 遠心法の原理について, 東海近畿地域土壌の物理性測定に関する検討会資料 2.
- 5) ———— 1968: 遠心法による pF の測定について, 土肥誌 39: 177—178.
- 6) KOHNKE, H., 1968; Soil Physics. 47—48. McGraw-Hill. New York.
- 7) 美園 繁, 寺沢四郎, 木下 彰, 須藤清次 1953: 火山灰土壌の土壌水分系に関する研究, 農技研報告 B2: 95—124.
- 8) 中村忠春 1967: pF 測定法について, 研究の資料と記録, 16: 24—34.
- 9) ———— 1968: 現実的な pF 測定法, 農業土木学会土壌物理研究部会第 7 回研究討論会資料 土木学会.
- 10) 農林省振興局編 1959: 地力保全基本調査における土壌分析法, 地力保全対策資料, 1, 50.
- 11) RUSSELL, M. B. and L. A. RICHARDS, 1938; The determination of soil moisture energy relations by centrifugation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 3: 65—69.
- 12) 竹中 肇 1963: 遠心法についての一考察, 研究の資料と記録, 13: 33—34.
- 13) 寺沢四郎 1965: 土壌水の吸引力 (pF) の測定法, 土壌の物理性 11: 77—79.
- 14) 山崎不二夫監修 1969: 土壌物理, 95. 養賢堂, 東京.
- 15) 湯村義男, 佐藤雄夫, 山本晴雄 1970: 遠心力場における水分張力について, 土肥要旨集, 16.
- 16) 湯村義男, 佐藤雄夫, 山本晴雄, 石原 暁, 元木征治 1973: 遠心法による土壌水分張力—含水比関係の測定について, 東海近畿農試研究報告 26: 85.

Investigation of the Centrifugal Method in pF measurement

Haruo YAMAMOTO*

Summary

In this paper, the author studied the centrifugal method in pF measurement. The results obtained are as follows;

- 1) The centrifugal method that has been used in Japan is based on the following equation;

$$\psi = r\omega^2$$

ψ : potential

r : the distances between the centre of rotation and middle of the sample

ω : angular velocity

But it does not take into account the capillary potential, and as a result the pF value obtained in this method contradicts the water distribution in the soil column.

- 2) From the above point of view, it is correct to adopt the following equation;

$$\psi = \int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 dr$$

r_1 : the distance between the centre of rotation and the water table

r_2 : the distance between the centre of rotation and the middle of the sample

3) In studies of the centrifugal method, the author used a cylindrical plaster of paris block or ceramic block beneath the soil sample instead of the soil column. And free water was given at the lower end of the cylinder. But Iwata (1967), working with the connecting capillary-tube model, reported that the bottom of the soil column was regarded as a free water table without giving it from the outside. In either case, nearly the same results were obtained.

4) About the centrifugal method, there are some critical opinions, and some problems to be explained or to be devised, relating to the above limit of capillary water, and the de-structure of the soil structure by compression.

* Hokkaido Central Agricultural Experiment Station, Naganuma, Hokkaido, 069-13 Japan