

# 遠心力場における水分張力について

—遠心法についての考察—

山 本 晴 雄\*

## 1. はじめに

1907年に Briggs および McLane らが水分当量の研究において遠心法をとり入れた。すなわち重力の1000倍の遠心力に抗って土壌に保持される水分を測定した。わが国においても、遠心含水当量試験法<sup>1)</sup>として用いられている。

1938年に Russell および Richards<sup>2)</sup> らが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。更に1952年に Croney<sup>3)</sup> らが 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<sup>4)</sup> 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<sup>5)</sup> などにも取入れられ、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、水を振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、遠心法に關しての論議が十分なされてきたとは言えず、竹中<sup>6)</sup>、中村<sup>7)8)</sup>らにより問題点が論じられていた。また、二、三の著書<sup>9)10)</sup>では理論的に異なる二つの立場が紹介されていた。

1967年、岩田<sup>11)12)</sup>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事をあきらかにし、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事を理論的に明確にした。

そこで筆者<sup>13)</sup>らは Russell らの方法まで立返り、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した。

## 2. 遠心力場における水分張力

### 1. 計算式の考察

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 $\omega$ で等速円運動をする場合、質量 $m$ におよぼす遠心力 $F$ は

$$F = mr\omega^2$$

であらわされる。いま  $m=1$  として常圧下の毛管負圧に換算すると

$$hg = r\omega^2$$

$$pF = \log r + 2 \log n - 4.95 \dots \dots \dots (1)$$

となる。これが従来から用いられている計算式である。この計算式は単位体におよぼす遠心効果であって、水を振り切る状態で、遠心されつつある土柱内において、遠心力に抗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、または土壌中にはたら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抗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 $r\omega^2$ を積分した型でなければならない。

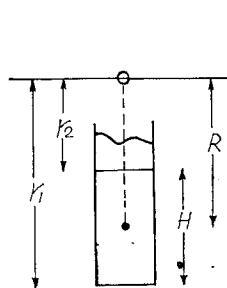


図 1 (2)式の関係

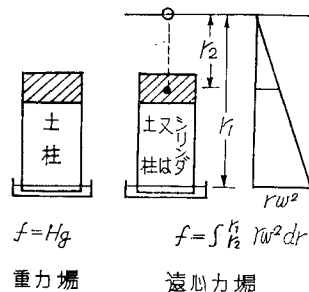


図 2 遠心力場における土柱法

\* 北海道立中央農業試験場

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

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

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

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

結局、遠心力場での土柱は重力場で行なわれる土柱法や水柱吸引法を圧縮したものにほかならない。図-2はその関係をあらわす。遠心力場のそれが異なる点は重力場における土柱はどの位置をとっても重力は一定であるとみなしうるのに対し、遠心力場においては、遠心力 $rw^2$ は回転半径 $r$ が大きくなるにつれて著しく増大する点である。

2. (1), (2)式の実験上の比較

100cc 管につめた土壌を2,430 rpm で回転した時の土柱の水分分布は図-3のとおりである。土柱の水分分布

表-1 供試土壌の性質

土 壌	CEC me/100g	腐植 %	粗砂 %	細砂 %	シルト %	クレイ %	土性
黒石原	37.0	15.2	2.7	13.6	47.2	36.4	SiC
*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
豊 浜	45.7	2.0	12.0	33.2	27.4	26.0	LiC
*長沼沖積	19.4	2.3	0.1	17.0	51.9	31.0	SiC

\* 0.25mm篩別

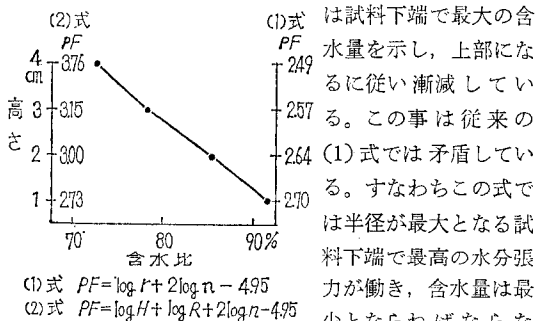


図-3 土柱の水分分布とpF値  
(2,430rpm) 樽前C土壌

従来の(1)式についても、小型遠心機を用いた場合、試料が小さいがために $H$ を1cmとみなし、 $\log H=0$ とし

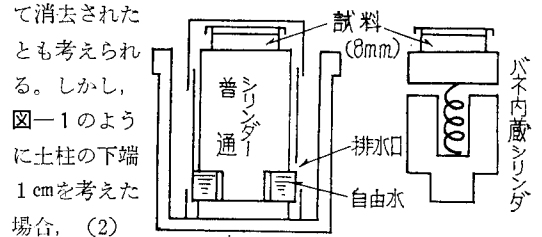


図-4 遠心筒とシリンダ

て消去されたとも考えられる。しかし、図-1のように土柱の下端1cmを考えた場合、(2)式において  $\log H=0$ で、 $pF = \log R + 2 \log n - 4.95$  の求める水分張力の位置は下端より1cmの点であって、(1)式のように下端より0.5cmの点ではない。

従って、従来の方法ではやや低張力側にかたよっていたと思われる。以上の事より(2)式が採用されるべきと考えられる。

3. 実験上での自由水面

実験上、自由水面を外部に求める場合と試料下端に求める場合がある。前者はRusselらの方法であり、後者は岩田の方法である。

自由水面を試料下部に求める場合は100cc管を用い、試料下端より2cm、3cmの点の水分を測定した。

自由水面を外部より求める場合は図-4のような遠心筒とシリンダを用いた。

1. 自由水面を外部に求める場合の問題点

遠心力場で平衡に達した試料ならびにシリンダは回転の漸減停止に伴い、水が再上昇するおそれがある。また圧力勾配をつけ、自由水面と試料とを連絡さすシリンダの材料に適当なものをえらばねばならない。水の再分布については次のような実験により回避しようと考えられた。

高さ5cmの石こうシリンダに試料をのせ、十分飽水させ、シリンダ下端にリングを置いて3200回転で脱水した。一定の平衡状態にした後、回転を停止し、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)与えたのち、取り出し含水量を調べた。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。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る。この程度であれば無視しようと考えられる。

参考までにもう一つの方法として、図-4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

表-2 遠心力低下に伴う土壌水分の変化の推定

脱水時間	土壌	(a) 遠心停止直後の水分	(b) 続いて自由水面を与えた水分	a-b	$\frac{a-b}{a} \times 100$
3時間	豊浜	24.1	24.1	0.0	0.0
3時間	黒石原	39.1	39.6	0.5	1.5

数値は含水比

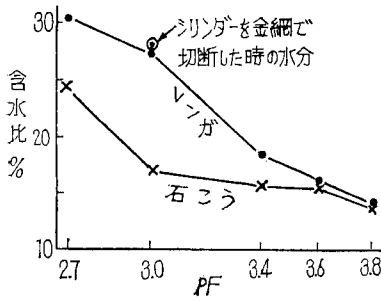


図-5 バネ内蔵シリンダーと材質(有珠b土壌)

自由水面との連絡が断たれる試みをした。結果は図-5のようにシリンダーにレンガを用いたものは上下シリンダーの境界で連続が断たれた。石こうの場合はある程度、目的が達せられたが、高 pF になるとやはり上下シリンダーの境界面に問題がある。遠心力場で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。従って、素焼きシリンダーでは自由水面を外部より与えない岩田の方法と直接比較した。

シリンダーの材質についてはレンガのように孔隙のあ

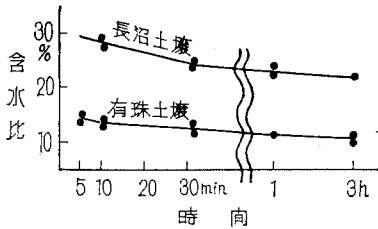


図-6 素焼シリンダーによる pF3.80 (3470rpm) の平衡時間

らものは水理学的連続が断たれ易い事を考えると、石こうや素焼きの方が適当と考えられる。しかし、石膏は水にとけやすい欠点をもっている。素焼きの場合は透水性が心配であるが、図-6のようにほぼ1時間で供試土壌を平衡にさす事ができるので、実用的には素焼物シリンダーが適当と考える。

2. 自由水面を試料下端に求める場合の問題点

岩田のいうように試料下端を自由水面とみなせる事は実験上、非常に便利であり、実用的でもある。これは Russell らの方法を更に発展させた方法ともいえる。しかし、圧力勾配を試料土そのものでつけるので、粗粒質の土柱は水理学的連続が断たれ易い事と細粒土の土柱では logging 現象がおきる場合がある。

図-7 のように0.25mmで篩別した砂の場合、pF 3.0以

上になると水理学的連続もあやしくなる。すなわち、異なるpF値で同値のあるいは逆転した含水量をとる事がある。

結局、砂の土柱そのものを長くして圧力勾配をつけるのは限界がある。又下端より1cmの点では砂にかぎらず含水量がばらつく傾向がある。

細粒質の土壌は water lodging 現象を生じ平衡に要する時間も長い。図-8のように長沼土壌では3時間でも水分分布が逆転する場合がある。このような土壌では試料の厚さを薄くして、圧力勾配をシリンダー(多孔質物)でつけるのも一つの方法と考える。

3. 外部より与えた自由水面と試料下端を自由水面とみなした場合の比較

自由水面をシリンダーを介して与えた場合と試料下端

を自由水面とみなした場合と比較するに、得られた結果はほぼ同値を得た。図-9のように pF 3.0, 3.4, 3.8 で0.3~0.6%の差であり、pF 2.7ではやや大きく2.5%の差であった。

岩田の方法

をモデル実験

によって観察

するため、重力場すなわち1gの場で0.2~1.0mmの毛細管を用いて、図-10のような実験をした。毛細管下端が連絡ある場合には自由水面を与えようが、与えまいが

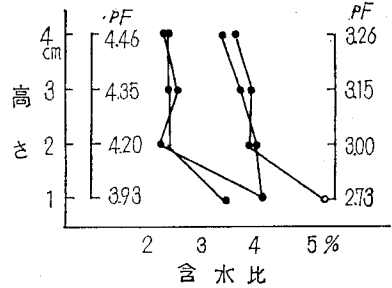


図-7 砂の水分分布(1時間)

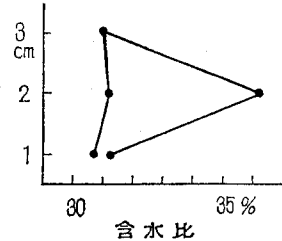


図-8 長沼土壌(Silty clay)の水分分布(2430rpm-3時間)

自由水面をシリンダーを介して与えた場合と試料下端を自由水面とみなす場合と外部より自由水面を与える場合の pF 水分曲線 (有珠b土壌)

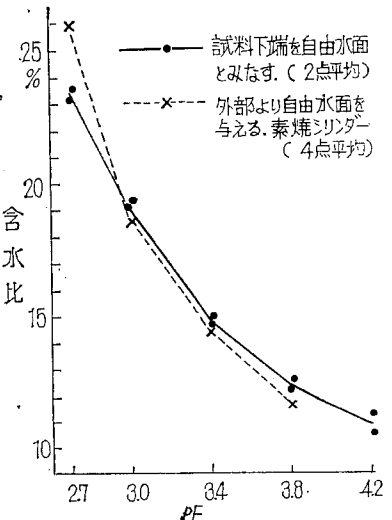
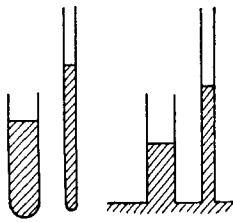
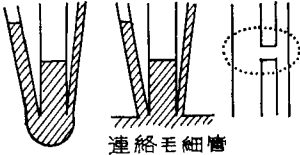


図-9 (2)式による試料下端を自由水面とみなす場合と外部より自由水面を与える場合の pF 水分曲線 (有珠b土壌)

するため、重力場すなわち1gの場で0.2~1.0mmの毛細管を用いて、図-10のような実験をした。毛細管下端が連絡ある場合には自由水面を与えようが、与えまいが



单独毛细管



連絡毛细管

図-10 1gの場合で自由水面を与える場合と与えない場合の毛管上昇高

4.95」を採用しなければならない。

遠心法を検討するにあたって、実験法を Russell らの方法までさかのぼって検討したが、外部より自由水面を与えなくとも試料下端を自由水面とみなす岩田の理論を実験的に裏付けることになった。

遠心法については批判的な意見<sup>14)</sup>もあり、解明あるいは工夫されねばならない問題がある。すなわち毛管水の領域について、あるいは試料の圧密などである。

さらに遠心法を発展させるために安定した低速遠心機の開発が望まれる。

毛管上昇高はほぼ同じように観察された。

### むすび

土壌水は水理学的連続のもとで脱水され、遠心力場での土柱法といえる。従来の(1)式はこの点を考慮していない。従って遠心法で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水分張力を求める(2)式「 $pF = \log H + \log R + 2 \log n -$

### 引用文献

- 1) 土質工学会：土質試験法，111～118 (1969)
- 2) M. B. Russell and L. A. Richards：The Determination of Soil Moisture Energy Relation by Centrifugation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 3, 65～69 (1938)
- 3) D. Croney, J. D. Coleman, and Pamela M. Bridge：The Suction of Moisture Held in Soil and Other Porous Materials., Road Research Technical Paper No. 24, 19～23 (1952)
- 4) 美園繁，寺沢四郎，木下彰，須藤清次：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 (1953)
- 5) 農林省振興局：地力保全基本調査における土壌分析法，地力保全対策資料第1号，50 (1959)
- 6) 竹中肇：遠心法についての一考察，研究の資料と記録，No. 13，東大，33～34 (1963)
- 7) 中村忠春：pF測定法について，研究の資料と記録，No. 16，東大，24～34 (1967)
- 8) ————：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 (1968)
- 9) 寺沢四郎：土壌水の吸引力 (pF) の測定法，土壌の物理性，No. 11, 12, 77～79 (1965)
- 10) 山崎不二夫監修：土壌物理，95，養賢堂，(1969)
- 11) 岩田進午：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 No. 2 (1967)
- 12) ————：遠心法によるpFの測定について，土肥誌 39, 177～178 (1968)
- 13) 湯村義男，佐藤雄夫，山本晴雄：遠心力場における水分張力について，土肥学会講演要旨集，第16集 (1970)
- 14) Helmut Kohnke：Soil Physics, 47—48 McGraw-Hill, Inc.