

圧力変換型テンシオメータの問題点と 現場水分測定法について

西出 勤*・加藤 善二*

Problems and Measurement for Soil Moisture in
situ of the Pressure Transducer Tensiometer

Tsutomu NISHIDE and Zenzi KATO

Faculty of Agriculture, Gifu University

1. ま え が き

畑地における自然状態の土壤水分測定法については、古くからきわめて多くの方法が研究され、実用化されてきた。しかし、現場において連続的に、しかも広範囲な土壤水分が測定できる方法は数少ない。中でも、テンシオメータ法は他の方法に比べて迅速に測定できる上、原理、構造および取扱いが簡単などの利点をもっているため一般に広く用いられている。このテンシオメータは土壤中の水分保持あるいは水分移動の研究を実験室や圃場で行なうのに有用である。

テンシオメータは W. Gardner ら (1922) によって始めて紹介され、L. A. Richards らの多くの研究者によって改良されてきた。このテンシオメータは土壤水が受けている負圧を多孔質磁器をセンサーとして用い測定する装置で、多孔質磁器を測定しようとする土壤中に埋設し、これにビニール製などの導通管をつけてマノメータに接続し、内部を脱気水で満して気密にする。

最近では、この圧力部に圧力変換装置としてブルドン管を用いるもの、あるいはベローズやダイヤフラムを用いるもの等がある。これらはいずれもその圧力による変位とポテンシオメータの刷子とを何らかの方法によって連動せしめた構造となっている。ここではテンシオメータの圧力変換装置の性能を中心に、圃場における土壤水分の測定技術の面についても述べる。

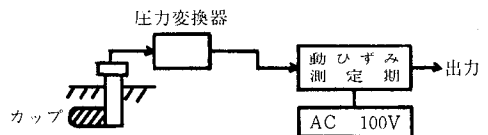
2. 各種の圧力変換型テンシオメータの測定装置

テンシオメータの圧力部に使用される電気変換装置は、図-1に示すようにひずみゲージ、ベローズ、ブルドン管などが考えられる。

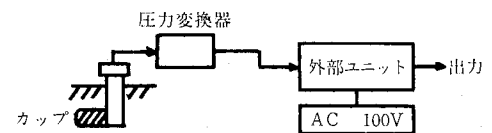
1) ひずみゲージ型

圧力変換器はひずみゲージをブリッジに組み込んだ形になっている。一般にはこれを増幅するための動ひずみ測定器に連結して使用される。原理はテンシオメータ内にかかる水圧によって圧力変換器のダイヤフラムが変形し、ひずみゲージの抵抗変化を引き起して出力電圧の変化となって現われる。この圧力変換器には僅かであるが個体差がみられるので、ひずみ量と負圧との関係(線形関数)についてキャリブレーションが必要である。

1) ひずみゲージ型



2) ベローズ型



3) ブルドン管型

(a) 電気圧力変換器



(b) 自記計

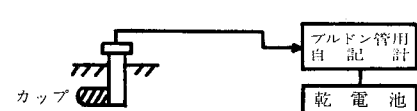


図-1 電気変換型テンシオメータのダイヤグラム

*岐阜大学農学部

2) ベローズ型

ベローズ型圧力変換器はベローズ内に圧力が加わると、ベローズは圧力とスプリングの弾性がつり合う位置まで短縮する。このベローズの短縮に応じて摺動子は抵抗体を移動し、圧力変化が抵抗変化に変換される。抵抗変化は普通のものでは最大で1 KΩである。ベローズ型圧力変換器と連結する外部ユニットは圧力変換器における抵抗値変化を電圧変化に変えるためのもので、定電圧電源とOPアンプを用いた直流アンプから成り立っている。変換器に供給される電圧および最大出力電圧は5Vである。圧力変換器内のベローズに加わる圧力と抵抗値との関係はほぼ一次関数で示されるが、個々の圧力変換器には個体差がみられるので、それぞれについて校正曲線を作成することが必要である。

3) ブルドン管型

ブルドン管の先端の動きを直接フェライトコアの変位とし、固定ピックアップコイルの中空を上下させる方式である。この変位を直流信号に変換する場合に、変換素子のピックアップコイルには高周波電圧が印加されていて、フェライトコアの変位により2つのコイルの高周波電圧比が変化する。この変化を圧力変化に比例した出力電流として取り出すようになっている。このブルドン管型の圧力変換器は指示計付と指示計なしのタイプがあるが、いずれも個体差がほとんどみられない。また、テンシオメーター内の水圧（負圧）を直接に受圧し、直接記録する機構のタイプもあり、電源は乾電池を使用する。

3. 圧力変換器の特性

1) トランスデューサ感度

テンシオメーターはトランスデューサ感度をできるだけ高める必要があるため、ポラスカップ壁を通して移動しなければならない水の体積を最小限まで減らす工夫が必要である。トランスデューサ感度とはテンシオメーター内を移動する水の単位体積当りの圧力変化として示

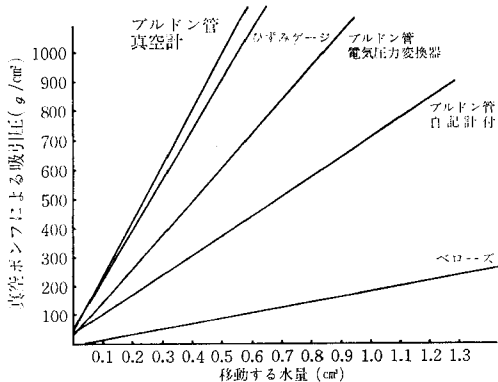


図-2 各圧力変換器のトランスデューサ感度

される。各圧力変換器を用いたときのトランスデューサ感度については図-2に示す。

従来は圧力検出として一般に水銀マンノメーターを用いていたが、テンシオメーターの作動のためにある体積の水分移動が必要であるから、水銀マンノメーターに使うガラス管の径が1mm程度の小さいものを用いなければならない。

ベローズ型圧力変換器はそのベローズに加わる負圧 Ψ と抵抗値 R との関係を $\Psi = aR + b$ なる一次関数で示すことができる。しかし、圧力変換器に使用されるスプリングにおいて、フックの法則を適用しうる範囲であると限られていることから、使用限界を決めておく必要がある。このベローズ内に入り出す水量と抵抗の変化については図-3に示す装置によって求められる。すなわち、圧力変換器と垂直に立てたガラス管を接続し、その中に基準線まで水を入れ、ガラス管の一端から真空ポンプにより吸引する。この時の基準線からの水面上昇高 dh (cm)及び抵抗値 R (Ω)を読み取る。このようにして求めた抵抗値 R (Ω)と移動する水量 Q (cm³)や圧力変換器の測定された負圧 Ψ (cm水柱)と抵抗値 R (Ω)についてはそれぞれ一価関係が成り立つ。ベローズ型ではメーカーによって圧力変換器の特性が異なり、ここでは $\Psi = 195Q - 9$ の関係がある。従ってベローズ型のトランスデューサ感度は 1.95×10^3 cm水柱/cm³の値である。

ブルドン管型では図中に電気圧力発信器と目盛付ブルドン管真空計の結果が示されている。電気圧力発信器の場合はベローズ型に比べて吸引力に対する変換器内の水の体積変化が小さい。また、目盛付ブルドン管真空計では吸引圧変化に対して水の体積変化が一層少ない。このブルドン管（電気変換器）型、目盛付ブルドン管真空計の Ψ と Q の関係は、 $\Psi = 1156.7Q + 22.6$ および $\Psi = 1888.1$

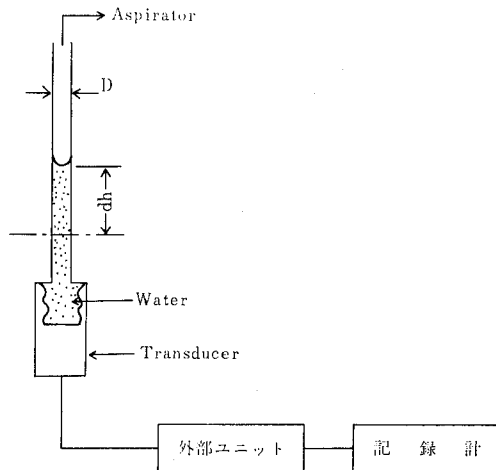


図-3 圧力変換器の測定装置（ベローズ型）

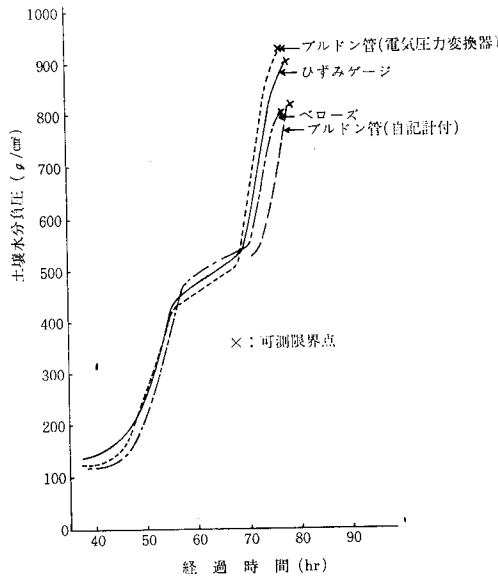


図-4 各種の圧力変換器の可測範囲(植壤土)

Q+42.3であり、トランスデューサ感度についてはそれぞれ $1.16 \times 10^3 \text{cm 水柱/cm}^3$ および $1.89 \times 10^3 \text{cm 水柱/cm}^3$ の値である。

ここで使用したひずみゲージ型圧力変換器は実際の吸引圧 Ψ と移動する水量Qとの関係から、吸引圧1,000g/cm²に達したときの水量Qは0.575ccに相当している。従って動ひずみ型圧力変換器の Ψ, Q の関係は $\Psi = 1,739.1 Q + 49.7$ であり、トランスデューサ感度は $1.74 \times 10^3 \text{cm 水柱/cm}^3$ の値である。

2) 測定範囲

各種の圧力変換器を使用して、土壤水分の減少に伴うポーラスカップ内の負圧の上昇過程を図-4に示す。

これには土壤バスケット(ポーラスカップをほぼ中央に土壤面に対して鉛直に埋設)全体を水で飽和させた後、台ばかりの上のせ赤外線ランプとファンによって徐々に乾燥させ、各種の圧力変換器における土壤水分負圧と含水比を連続的に測定した。図中のX印はその位置でパイプ内に気泡が混入して測定不能になったことを示している。この図から明らかなように、土壤水分の減少に伴って圧力変換器内の負圧は徐々に上昇し、ペローズ型では816g/cm²、ブルドン管(自記計付)型は844g/cm²、ひずみゲージ型939g/cm²、ブルドン管(電気変換器)型では949g/cm²の値に達したときに測定限界点を示している。

各種の圧力変換器を用いて植壤土の水分負圧と含水比との関係を求めると図-5のとおりである。

図中の吸引法は同じ土性で求めたpFと含水比との関係を図上にプロットしたものである。これらの圧力変換器を用いて求めた土壤の負圧~含水比曲線はいずれも吸

引法に比べて、同一の負圧に対して含水比の値が僅かながら多いことがわかる。いま、同じ負圧に対する含水比の最大のずれは、ペローズ型ではほぼ1%、ひずみゲージ型、ブルドン管(電気変換器)型では2.5%程度の値である。しかし、各圧力変換器は吸引法の曲線とよく類似した曲線の形を示している。従って圧力変換型テンシオメーターは測定値の信頼性の点では比較的高い測定法であると言えよう。

3) 応答時間

各々の圧力変換器を用いて零点調整したカップを供試

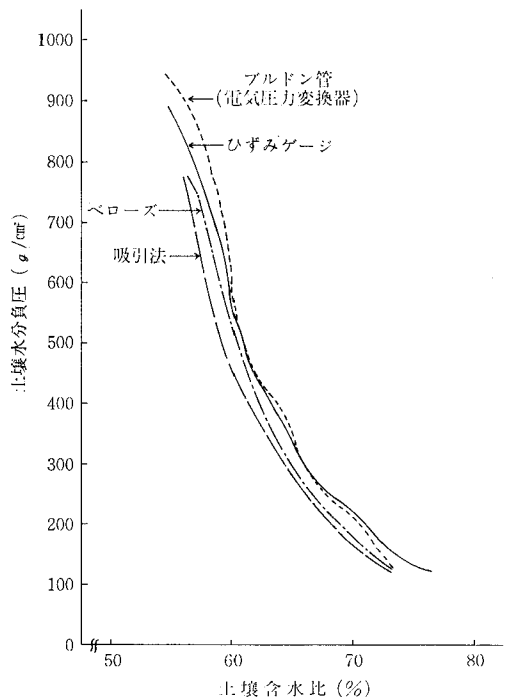


図-5 各種の圧力変換器による校正曲線(植壤土)

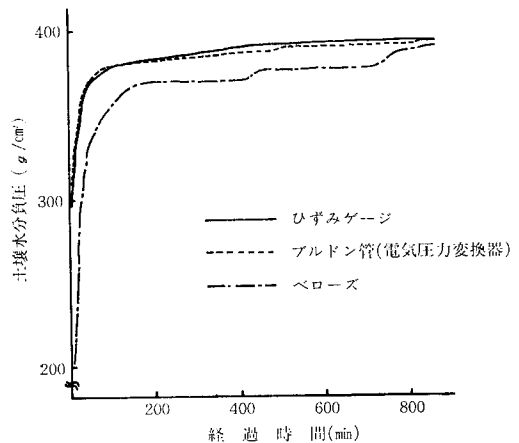


図-6 各種の圧力変換器による土壤中の応答時間(植壤土)

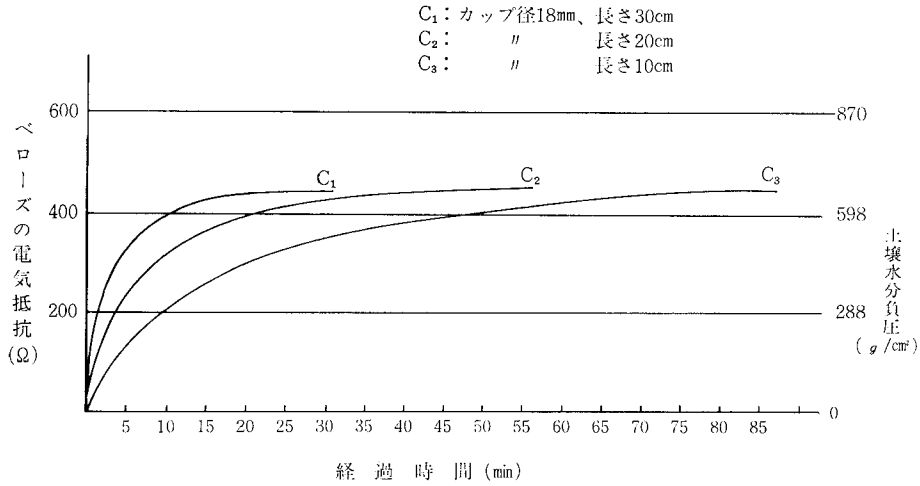


図-7 表面積が異なるカップの土壌中の負圧平衡 (ベローズ)

土壌内に埋めて、土壤水分負圧が平衡するまでの時間について検討した。その実験結果は図-6に示すとおりである。

この図から明らかなように、ポーラスカップ内の負圧ポテンシャルとの間の平衡に要する時間は、ベローズ型、ブルドン管 (電気変換器) 型、ひずみゲージ型の順に短くなっている。とくにベローズ型のテンシオメーターでは平衡時間が長くかかることがわかる。この応答性についての実験では同じ透水性をもつカップを用いると、前述のトランスデューサ感度に左右されること、すなわち圧力変換器内の流入または流出する水量が微量であると、水分負圧平衡に要する時間が短縮できるのであるろう。

4. 検出カップの性能

1) カップ表面積と応答時間

今まではテンシオメーターの圧力変換部の性能について述べたが、またポーラスカップの形状、透水性などの因子は検出部の応答性に影響を与えることが考えられる。たとえば、カップの表面積の大小によって応答時間が変わるのである。

長さが異なるポーラスカップを含水比60.1%の植壤土内に埋設し、負圧が平衡するまでの時間を調べた。その実験結果は図-7に示すとおりである。

この図から明らかなように、土壤水分負圧との間の平衡に要する時間は、カップ長さが10cm、20cm、30cmの順に短くなっている。すなわち、そのカップの表面積が小さいほど、平衡時間が長くかかることがわかる。カップの長さが30cmの場合は、表面積がほぼ160cm²に相当し、その平衡時間が20分程度であるが、カップの長さ10cmものではその表面積がほぼ53cm²程度の値で、約75分の平衡時間を要する。このことから、カップの表面積が

大きくなると、土壤の水分負圧の読みに対する時間的な遅れが小さくなることが明らかである。

2) 土性と応答時間

検出部に当るポーラスカップの時間的応答性は土壤状態、たとえば土壤水分の多少、土壤の密度の大小、土壤の種類などの条件によって大きく影響を受ける。

土壤水分が少ない状態になるほど、平衡時間に達する時間が長くかかる傾向があり、またよくしまった土壤になるにしたがって応答速度が速い。

土性が異なった場合、土壤水分負圧の時間的応答性については図-8に示すとおりである。この図からわかるように、負圧ポテンシャルは土性によって平衡に達する時間が異なっている。とくに標準砂や木曾川砂のように粗粒な土壤ほど平衡時間が長くかかっている。この平衡に達するまでの時間は土壤水分が少ない状態になるほど長くかかっている。一方、植壤土の水分負圧は急激に上

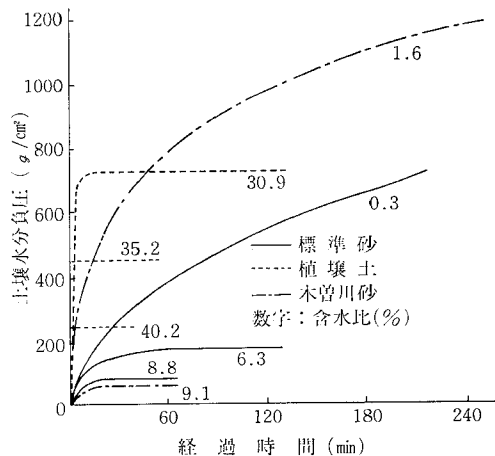


図-8 土性と応答時間

昇し、負圧平衡に達する時間が短いことがわかる。このように微粒を多く含む植壤土ほど平衡に達するまでの時間が短くなっているのはカップ壁と接している土壌粒子との接触面積によるものであろう。

5. 圃場における土壌水分測定

1) 土壌水分の経日変化

図-9(a)はハウス内のレタス畑のかん水自動制御を行ったときの土壌水分変化を、また図-9(b)は傾斜してい

る茶園の土壌水分の経日変化を示したものである。

図-9(a)はひずみゲージ型を使用し、深さ0~30cmまでの土層全体における負圧が405g/cm²に達したときにかん水を開始し、274g/cm²の負圧に低下したときに停止した試験区と同様に200g/cm²でかん水を開始、195g/cm²でかん水停止した試験区を示したものである。この図から明らかなように、検出部は全生育期間を通して設定された負圧範囲を常に安定した作動を示し、かつ精度が高く、検出部に経日変化がみられない。

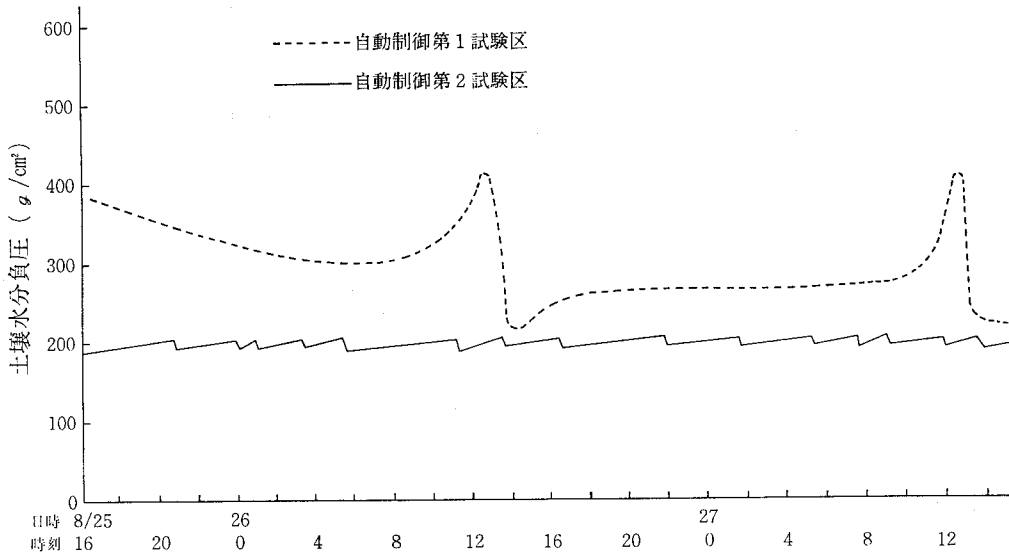


図-9 (a) ひずみゲージ使用による土壌水分の負圧変化(ハウス内のレタス畑)

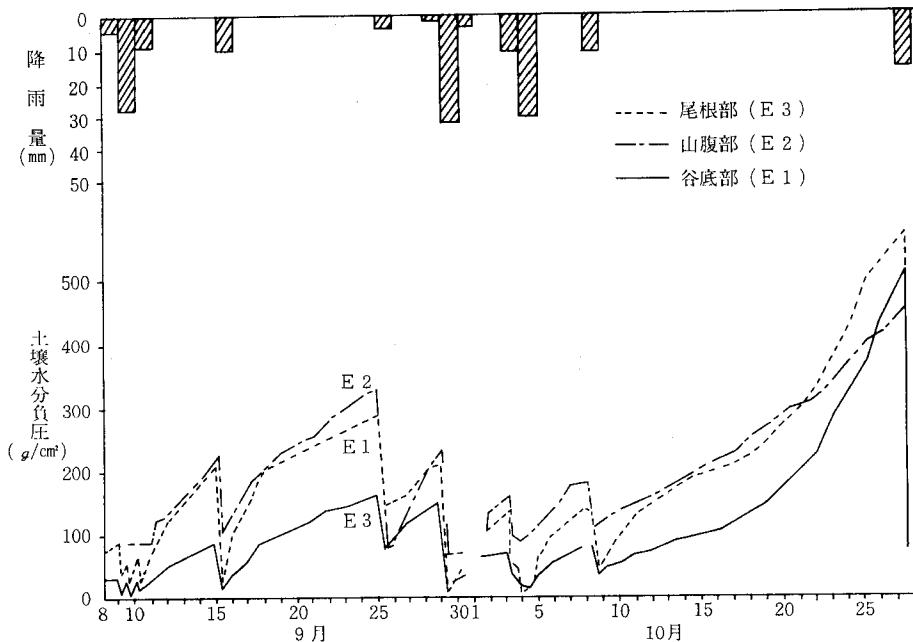


図-9 (b) 傾斜している茶園における負圧変化(ブルドン管電気圧力変換器使用, 三重県青蓮寺地区)

図-9(b)はブルドン管(電気変換器)型を使用した測定結果である。この場合も、深さ0~30cmまでの土層全体の水分負圧の変化を示すが、降雨があると土壌水分負圧が降下し、晴天の状態が続くと逆にその負圧が徐々に上昇している。このブルドン管(電気変換器)型テンシオメーターではそれぞれの圧力変換器について校正曲線を作成する必要がなく、記録された値をそのまま負圧値に読み取ることができるので便利である。

2) 多地点の土壌水分の一括測定

施設園芸で行われている点滴かんがよいでは場所によって水のかかり具合が異なり、圃場全体を均一な土壌水分状態にすることは不可能に近い。従って圃場全体の土壌水分状態を知るためには、圃場内の数カ所に水分計を設置しなければならない。もし圃場内の数カ所に埋設した検出用カップを1台の圧力変換器に接続して、多地点の水分負圧を一括測定して得られた値が、多地点の土壌水分状態に代表する値、たとえば各地点の土壌水分負圧の合計の平均値を示すならば、圃場全体の土壌水分状態を知る上で極めて便利である。

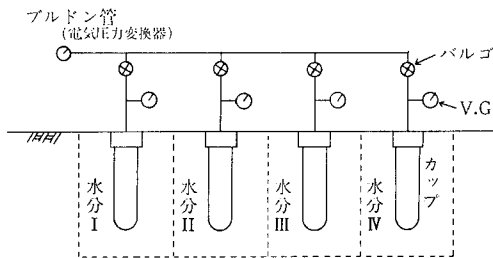


図-10 4地点の土壌水分負圧を一括測定する場合の実験装置

図-10は一台の圧力変換器に4コの検出用カップを接続し、土壌水分状態の異なる4コの土壌容器にそれぞれカップを埋設して、土壌水分負圧を測定する装置である。この場合は個々の検出用のカップにはブルドン管真空ゲージとバルブが取り付けられ、容器内の土壌の水分負圧をそれぞれ測定することもできるようになっている。その実験結果は表-1に示すとおりである。

この実験では土壌容器の数、すなわち測定数は2地点、4地点、6地点、8地点の場合について検討した。表-1に示す平均値とは測定された各土壌の水分負圧値の和をその測定数で割った値、すなわち相加平均値である。また実測値とは1台の圧力変換器(ここではブルドン管電気変換器)を使用して各土壌容器内の土壌水分を一括測定して得られた値である。

この表-1からすると、2地点、4地点、6地点、8地点について、実測値と平均値との間の誤差が0~10.6%の範囲内の値である。このことからすると、多地点の土壌の水分負圧を一括測定した値がその多地点の土壌の

表-1 多地点の土壌水分負圧の平均値と一括測定による実測値

	8地点	6地点	4地点	2地点
土壌水分負圧 (g/cm ²)	211 747 333 354 211 306 578 653	422 721 428 585 374 442	517 510 449 374	388 836
平均値 (g/cm ²)	429	492	462	612
実測値 (g/cm ²)	408	544	462	605
誤差 (%)	-4.9	10.6	0	-1.1

$$\text{誤差(\%)} = \frac{\text{実測値} - \text{平均値}}{\text{平均値}} \times 100$$

水分負圧の平均値にほぼ等しいことを示している。すなわち、次式の関係が成立する。

$$\Psi_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Psi_{sdi}}{n} \quad (1)$$

Ψ_c : 圧力変換器内の負圧 (cmH₂O)

Ψ_{sd} : カップを埋設した各地点の負圧 (cmH₂O)

n : カップの数

ただし、検出カップは表面積、その厚さなどの形状が同じで、透水係数の揃ったものを使用し、カップの埋設地点の土壌の詰り方が同じ状態で実験を行なった。

3) 根群域の土層全体の水分一括測定

施設園芸などにおいては、かんがい対象土層への水の浸潤~乾燥のサイクル中における状態量、すなわち、浸潤速度、積算浸水量、消費された土層内水分など一連の諸量を測定することが必要となっている。それには各深さの地点に検出カップを埋設してそれぞれ測定するのではなく、根群域全体を一括して測定する方式が考えられる。

そこで、根群域深とほぼ同じ長さをもつ検出カップ(内径18mm、長さ300mmを使用)を土壌面に対して鉛直方向に埋設し、カップ内の水圧をひずみゲージ圧力変換器に接続した直流増幅器で測定した。

各土壌深さの地点と0~30cm土層全体の水分一括測定による実験結果は図-11に示すとおりである。

この実験では、各土壌深さの地点の水分測定にはブルドン管真空ゲージを、また深さ0~30cm土層全体の一括測定にはひずみゲージ圧力変換器を使用した。この図-11(I)に示すように、ひずみゲージで計測したポテンシ

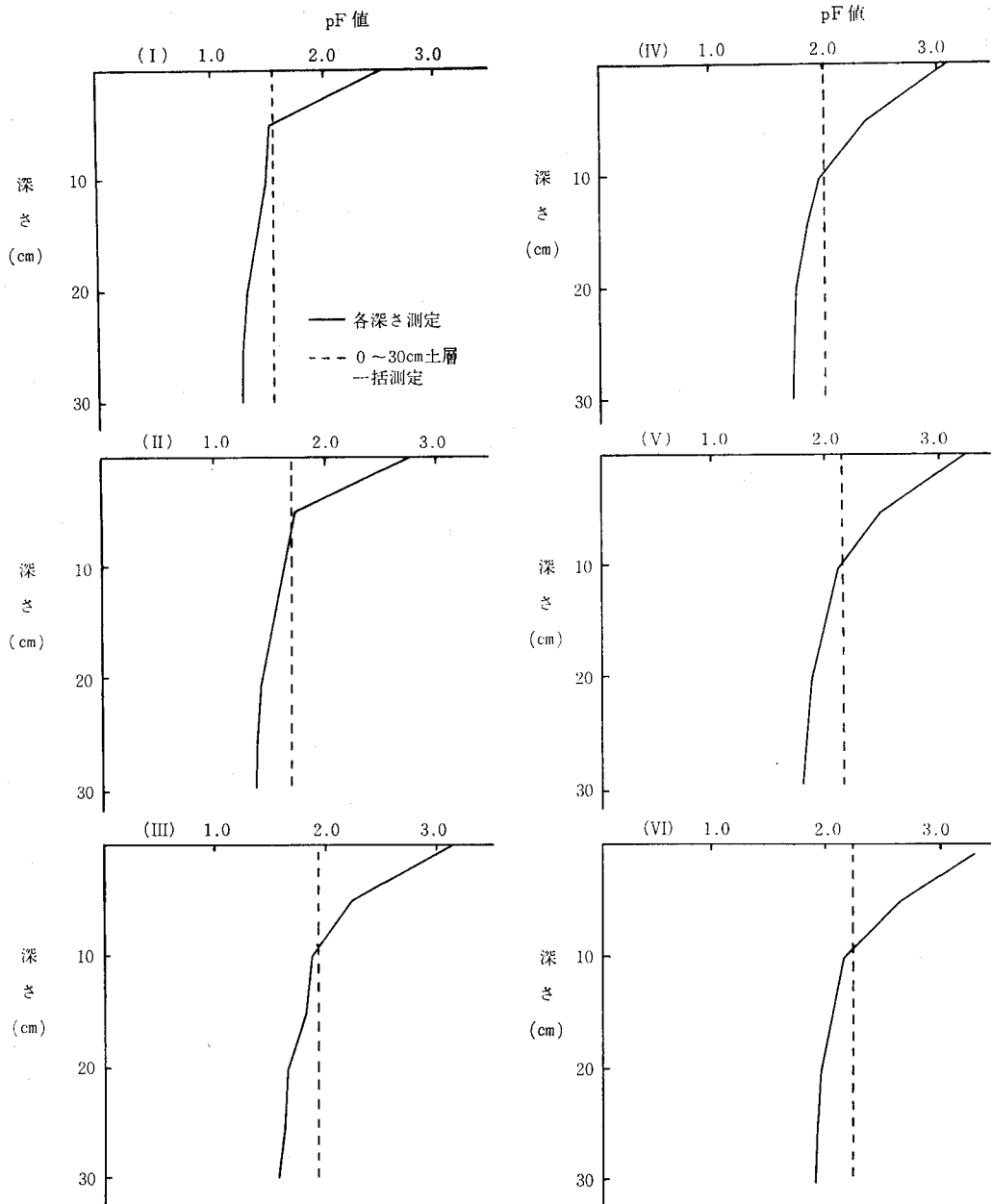


図-11 対象土層の水分の一括測定結果

ャルはACA'線上の値であり、ブルドン管真空ゲージの
 それでは曲線BCB'のポテンシャル分布である。このひ
 ずみゲージの測定によるポテンシャルはC点を境にし
 て、その上部の図形ABCと下部の図形A'B'Cとの面積
 がほぼ等しいことがわかる。

また一般に土層内の水分分布曲線を考えると、その深
 さの方向に対して連続関数関係にあることから、図-12
 に示すように、長さLをもつカップが指示するポテンシ
 ルと土壌水のもつポテンシャルとの間には次式の関係が

成立すると考えられる。

$$\psi_c = \frac{\int_0^L \psi_s(l) dl}{L}$$

ψ_c : 検出カップ内のポテンシャル

L : 検出カップの長さ

$\psi_s(l)$: 土壌面からlの深さの土壌のもつポテンシ
 ャル

ただし、(2)式は土壌の乾燥過程の場合である。ここで
 の検出カップのポテンシャルはかんがい土層全体の平均

表-2 各種の圧力変換器を使用したテンシオメーターの性能とその特徴

型	項目	トランスデューサー 感度*	可測範囲	pF曲線の作成	個体差(圧力変換器)	測定精度(指示)	取扱い	圧力変換器の価格	その他の特徴
ひずみゲージ		10.5 倍	900 cmH ₂ O	良好	有	±1.0%	熟練要	圧力変換器 100千円 動ひずみ測定器 100千円	土壌水の動きを追跡できる
ベローズ		1.0 倍	800 cmH ₂ O	〃	有	±2.0~3.0%	容易	圧力変換器 80千円 外部ユニット 80千円	—
ブルドン管	電気変換器	6.4 倍	900 cmH ₂ O	〃	無	±1.5%	容易	圧力変換器 90千円	自記計のペンの位置で土壌水の負圧が直読できる。
	自記計(電池式)	4.6 倍	800 cmH ₂ O	使用しない方がよい	無	±3.0%	容易	自記用圧力変換器 90千円	電池があれば現場で自記記録ができる。

※トランスデューサー感度とは圧力変換器内を移動する水の単位体積当りの圧力変化 (cm水柱/cm³), ベローズに対する倍率。

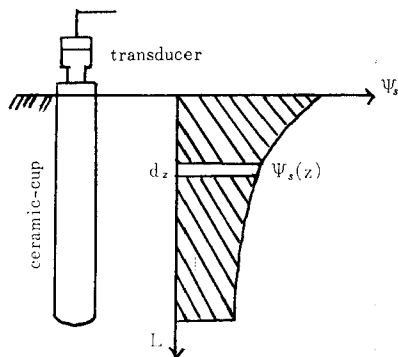


図-12 土層深さに対して水分分布がある場合の土壌負圧の模式図

のポテンシャルを測定しているものと考えられる。

6. あとがき

テンシオメーターの圧力変換装置として、ひずみゲージ、ベローズ、ブルドン管を用いるものなどがあり、いずれも土壌水分の負圧を電気信号で受信して記録計等外部装置に入力する機能をもっている。これらの圧力変換器を使用したテンシオメーターの性能、その特徴については表-2に示したが、土壌水分を自記記録する場合に負圧の値が直読できること、装置が簡単で、取扱いが容易であること、故障が少ないことなどの条件を満たしていなければならない。

最後に本研究の遂行に当り、長野計器製作所名古屋支店の一之瀬俊二氏にご協力をいただいたことに深謝します。

引用文献

- 1) Gardner A., Israelsen O. W., Edlefsen N. E. and Clyde D. : The capillary potential function and its relation to irrigation practice. Phys. Review 20; (1922).

- 2) Richards L. A. : Methods of measuring soil moisture tension. Soil Sci. 68; (1949)
- 3) Korneff B. J. : La capacited absorption du sol. Appareils pour la mesurer" Ann Sci Agron. No.5. (1926).
- 4) A Klute : Tensiometer response time. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26 (1962).
- 5) 原 道宏 : 水分ポテンシャルとその計測, 農水産分野における環境工学, (1975).
- 6) 西出 勤・瀬戸隆一・高橋輝雄 : 土壌水分検出による畑地カンガイの自動化に関する研究 (I), 農土論集 (50), (1974).
- 7) 西出 勤 : 土壌水分検出による畑地カンガイの自動化に関する研究 (II), 農土論集 (54), (1974).
- 8) 西出 勤 : 土壌水分検出による畑地カンガイの自動化に関する研究 (III), 農土論集 (55), (1975).

質疑応答

福田(野菜試) うちでは6cmのポーラスカップにU字管マノメーターをつないで測定し、 $P F = \log(13a - ho)$ を使っています。おききたいのは、(1)この30cmのポーラスカップをU字管マノメーターにつないでよいか、(2)そのときの計算式は上式でよいか、(3)hoはやはりポーラスカップの中心からの距離でよいかの3点です。

西出 (1)の点ではカップの長さに関係なく、U字管マノメーターにつないでも差支えない。(2)計算式は従来の使用されている式でよい。(3)hoはポーラスカップの中心までの距離でよいと考えられる。

中野(東大) 各点測定(2~8点)の場合に、平衡するまでの変化の様子はどうでしょうか。

西出 たしかにその点が問題です。動ひずみ計などを使えば平衡時間が案外早くなります。たとえば8点ぐらいですと、土壌水分によっても違いますが、ほぼ1時間ほどでその平均的な値がキャッチできます。点数が少なければなお早くなるでしょう。