

誘電式水分計のキャリブレーション

Calibration of a Dielectric Soil Moisture Meter

中川 慎治*・向井 雅之**・古藤田一雄*

Shinji NAKAGAWA, Masayuki MUKAI and Kazuo KOTODA

I はじめに

土壌水分量を連続的に測定するためには、土壌の攪乱の程度が小さく、自記記録できることが必要である。電極間の電気容量が土壌水分量によって変化することを利用した誘電恒数法は、このような要求を満たす方法の1つである。誘電恒数法を利用した水分計は誘電式水分計（または、容量式水分計）と呼ばれており、商品化もされている。しかし、誘電恒数法には種々の問題点も指摘されている。すなわち、温度の影響を受けやすく、漏洩コンダクタンスを有すること（海田，1969；矢部，1980）、検定曲線が資料によって異なること（岡・角屋，1976）などである。

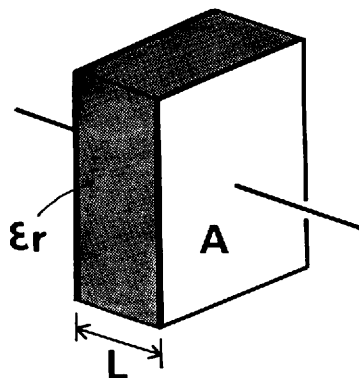
本稿では、誘電式水分計のこれらの問題点についての検討結果と、キャリブレーションの方法・結果について述べる。

II 測定原理

絶縁被覆された2つの電極間に絶縁体を入れた平行板コンデンサを考える（第1図）と、この電極間に貯えられる静電容量は、

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{L} = \epsilon \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 C は静電容量、 ϵ_0 は真空の誘電率（ $8.854 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$ ）、 ϵ_r は比誘電率、 ϵ はみかけの誘電率、 A は電極の面積、 L は電極間の距離である。(1)式において、 A と L が一定であるとすると、静電容量は比誘電率（あるいは、



第1図 平行板コンデンサの静電容量

みかけの誘電率）に比例することになる。

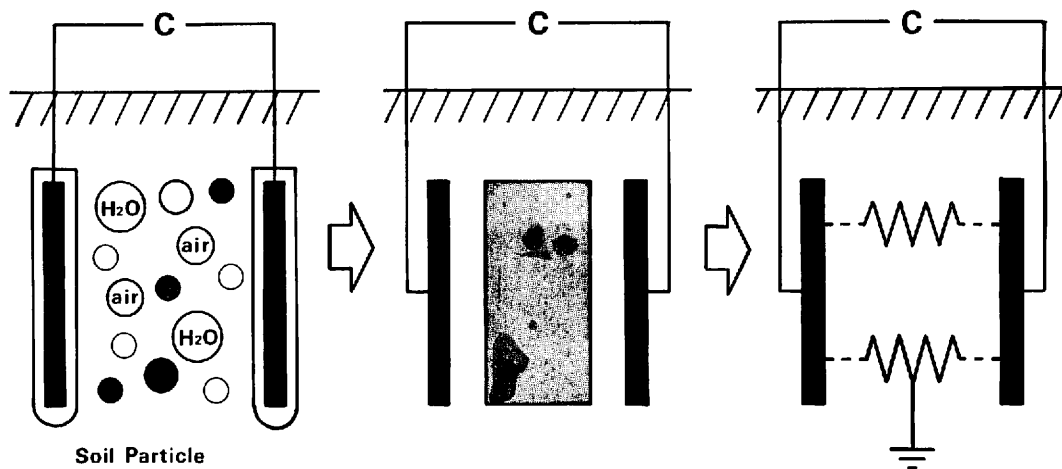
電極が土壌中にある場合には、極板間を満たす物質は電極の絶縁被覆物と土粒子と水と空気である。これらの物質のうち、水の比誘電率は約80と他の物質のものより約1桁大きな値を示す。このことから、電極間のみかけの誘電率は土壌中の水分量の変化に伴って変化し、静電容量も水分量の変化に伴って変化する。したがって、何らかの方法によって静電容量を測定できれば、土壌水分量がわかる。

しかし、この場合の最大の問題点は、土壌の種類や土壌水中の電解質濃度によって誘電率が異なること、および、水の誘電率も温度によって変化することである。特に、土壌の種類による誘電率の違い（これは、土壌を構成している土粒子の成分の違いによる）は、対象とする土壌毎にキャリブレーションを行う必要のあることを意味してい

* 筑波大学水理実験センター

** 筑波大学自然学類（現 筑波大学・院・環境科学研究科）

（1984年5月21日受理）

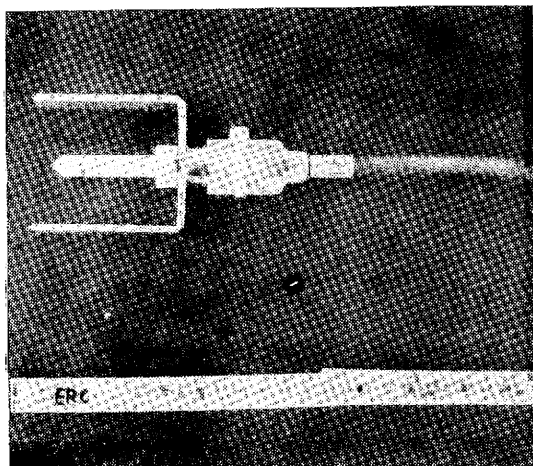


第2図 コンデンサとしての土壌の概念図

佐藤 (1981) を修正

る。

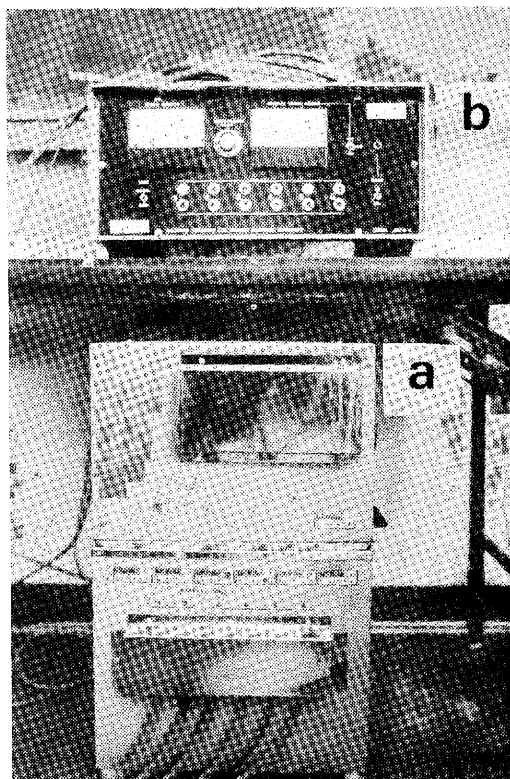
また、土壌は電極の周囲に半無限に連続する導電物質であるとともに、“アース”として電位ゼロの基準にも用いられている。これは、第2図に示すように、土壌と土壤水は誘電物質であるとともに、ある抵抗値を持つ導電物質でもあり、しかも、一端をアースされた電極でもあることを示している。このような土壌の特性は、電極間の静電容量を増加させる。この静電容量の増加分が漏洩コンダクタンスと呼ばれるもので、低水分領域で特に顕著に現れる。



第3図 誘電式水分計の感体部

III 装置の概要

今回使用した誘電式水分計は、大起理化工業株式会社



第4図 誘電式水分計の変換部(a)と測定部(b)

製の誘電式土壌水分測定器（DIK-E-6型）である。誘電式水分測定器は、感体部・変換部・測定部から成っており（第3図、第4図参照）、1台の測定器に6個の感体が接続されている。

感体部は、周辺の負電極（長さ7.3cm+6.4cm+7.3cm、幅2.0cm）と中央のセラミック被覆中の正電極（長さ6.0cm、直径1.0cm）から成り立っており、負電極と正電極の間の上壤（容積250ml）の静電容量を測定する。測定の際には、この感体部を所定の深度に埋設する。感体は電極から高周波を発振し、検波出力が変換部で電圧に変換された後、測定部で記録計に出力される。

IV キャリブレーション

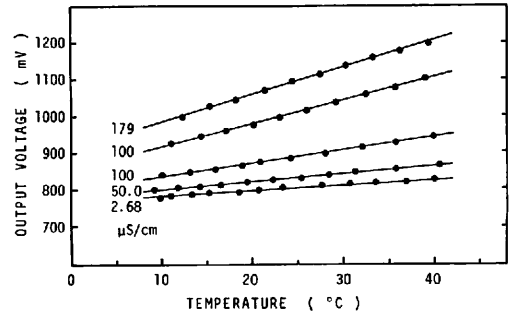
前述のように、誘電式水分計の出力電圧は、種々のものの影響を受ける。これらの影響のうち、特に重要なものは、温度と土壌水の電解質濃度であり、ここでは、これら2つのものの影響をまず検討した。

測定に先立って、誘電式水分計の出力電圧の0点とフルスケールをある基準のものを用いて調整する必要がある。まず、感体を空気中に置き、バランスボリュームを調節して指示電圧が0Vになるようにする（ゼロ点調整）。次に、感体を水中に入れ、ゲインボリュームを調節して指示電圧が1Vになるようにする（フルスケール調整）。このような調整を行った後、キャリブレーションを行った。

1) 温度と出力電圧

誘電式水分計の6本の感体から1本の感体を代表として選び、電気伝導度の異なる水とともにマグネティックスターラ付の恒温槽に入れ、水温と水分計の出力電圧の変化を測定した（第5図）。第5図中の電気伝導度の値は、測定を開始した時の値（左端の黒丸）である。なお、電気伝導度が100 μ S/cmの時の関係が2種類存在しているのは、電気伝導度の測定に使用した電気伝導度計（東亜電波工業製、CM-1F）の測定レンジが100 μ S/cmを境にして分かれるためである。

温度と出力電圧の間には比例関係が認められ、

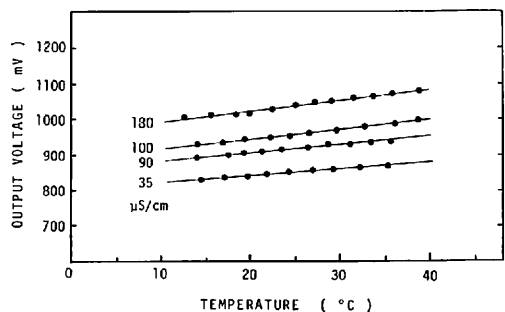


第5図 誘電式水分計の出力電圧と温度の関係図中の数字は測定開始時（各値の左端の・印の電気伝導度を示す。

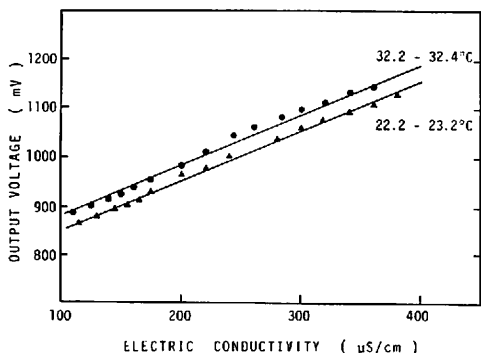
単位温度変化あたりの出力電圧の変化量（以下、温度係数と呼ぶ）は、測定開始時の電気伝導度が高い水ほど大きくなっていった。この原因は、水の電気伝導度が温度によって変化するためと考えられる。水温と電気伝導度の間には、次式の関係がある（半谷、1960）。

$$\lambda_t = \frac{\lambda_T}{1 + \alpha(T-t)} \quad (2)$$

ここで、 t は任意の水温、 T は測定開始時の水温、 λ_t と λ_T は、それぞれ、 $t^\circ\text{C}$ と $T^\circ\text{C}$ における電気伝導度、 α は係数（ふつうの水では 0.020～0.025 と考えてよい）である。(2)式から、電気伝導度は水温の増加とともに増加し、しかも、その変化の割合は、初期の電気伝導度が大きいほど大きくなることわかる。このことは、第5図に



第6図 電気伝導度を一定とした時の誘電式水分計の出力電圧と温度の関係図中の数字は電気伝導度を示す。



第7図 誘電式水分計の出力電圧と電気伝導度の関係
図中の数字は実験を行った温度範囲を示す。

示される傾向と一致している。

次に、恒温槽の温度を増加させるとともに、蒸留水を加えることにより水の電気伝導度を一定に保って、温度と出力電圧の関係を調べた。結果を第6図に示す。第6図に見られるように、温度係数は電気伝導度によらずほぼ等しくなり、しかもその値は蒸留水（第5図の電気伝導度 $2.68\mu\text{S/cm}$ の水）のものに近くなっていた。

以上のことから、温度のみによる水分計の出力電圧の変化特性として、出力電圧が温度に比例することが明らかとなった。また、温度係数は $2\sim 3\text{mV}/^\circ\text{C}$ であり、温度の変動幅が小さい場合には無視できる程度であった。

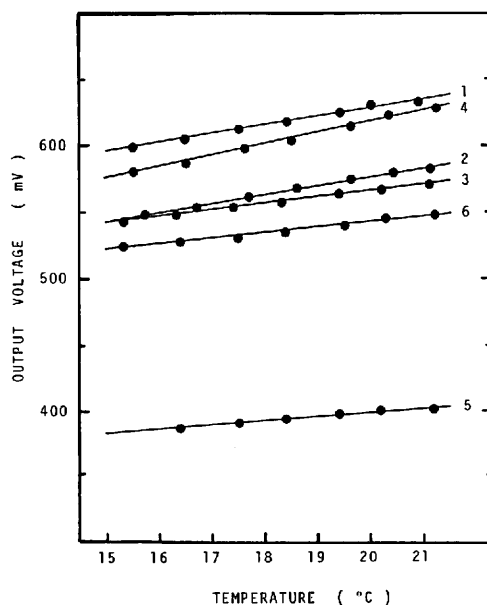
2) 電気伝導度と出力電圧

第5図において、温度によって水の電気伝導度の増加する割合と、水分計の出力電圧の増加する割合とがほぼ等しいことが指摘された。このことは、水の電気伝導度と出力電圧の間にも比例関係のあることを示唆している。そこで、温度をほぼ一定に保った状態で、食塩によって水の電気伝導度を変化させることにより、この点を検討した。第7図に電気伝導度と出力電圧の関係を示す。その結果、温度一定の下では、水分計の出力電圧は水の電気伝導度に比例し、その比例定数は温度に依存しないことがわかった。また、単位電気伝導度あたりの出力電圧の変化量は、 $1\text{mV}/\mu\text{S/cm}$ であった。

3) 体積含水率と出力電圧

体積含水率と出力電圧の関係を調べる前に、不飽和土（豊浦標準砂）を用いて温度と出力電圧の関係を調べた。まず、ビーカー中に供試土・水分計の感体・熱電対温度センサを入れ、表面に蒸発防止の覆いをかけた。これを水を満たしたバケツに入れ、バケツの水温を変化させて出力電圧の変化を調べた。バケツの水温を熱電対温度センサで測定し、ビーカー中の温度と同一温度になった後、出力電圧を読み取った。結果を第8図に示す。図中の数字は各感体の番号を表している。水中に感体を入れた場合（第6図参照）と同様に、温度の増加に伴う出力電圧の増加が認められるが、この場合の温度係数は、第6図で得られた温度係数の2倍程度になっていた。この原因としては、温度による土壌水の電気伝導度の変化と砂から土壌水への電解質の溶出などが考えられる。

次に、ビーカー中に不飽和土と水分計の感体を入れ、温度一定条件下で体積含水率と出力電圧の関係を求めた。この場合も、ビーカー表面には蒸



第8図 不飽和土（体積含水率14.2%）を用いた場合の誘電式水分計の出力電圧と温度との関係
図中の数字は誘電式水分計の感体の番号を示す

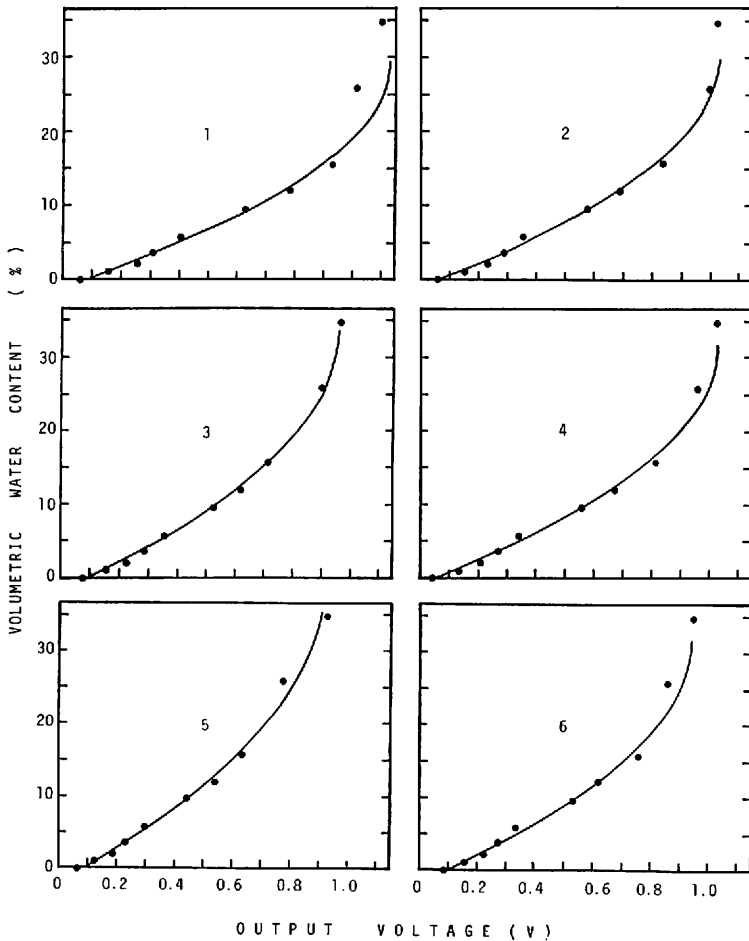
発防止用の覆いをかけた。体積含水率は、不飽和土を炉乾燥させて求めた。以上の方法で得られた体積含水率と出力電圧の関係を第9図に示す。感体ごとに出力電圧と体積含水率の関係が異っているが、一般的傾向として、次のことが認められる。体積含水率で15%程度までは、体積含水率と出力電圧の間に直線関係が存在しているが、体積含水率が15%以上では、水分量の増加に伴う出力電圧の増加率は小さくなる。全水分量域にわたる体積含水率と出力電圧の関係式としては、

$$V = a\theta^2 + b\theta + c \quad (3)$$

を θ について解いた

$$\theta = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a(V-c)}}{2a} \quad (4)$$

を採用した。ここで、 θ は体積含水率 (%), V は出力電圧 (V), a, b, c は定数である。第9図の実線は(4)式による回帰式を表している。各感体の回帰定数の値は第1表に示されている。 θ と V の回帰式として(4)式の無理関数を採用したのは、全水分量域にわたる適合性が一番良かったためである。第9図に示されるように、体積含水率が0%でも出力電圧が0Vにならず、ある正の値を示すのは、漏洩コンダクタンスの影響である。



第9図 誘電式水分計の出力電圧と体積含水率の関係
図中の数字は誘電式水分計の感体の番号を示す。

第1表 誘電式水分計の出力電圧と体積含水率の関係を表わす実験式((4)式)の係数

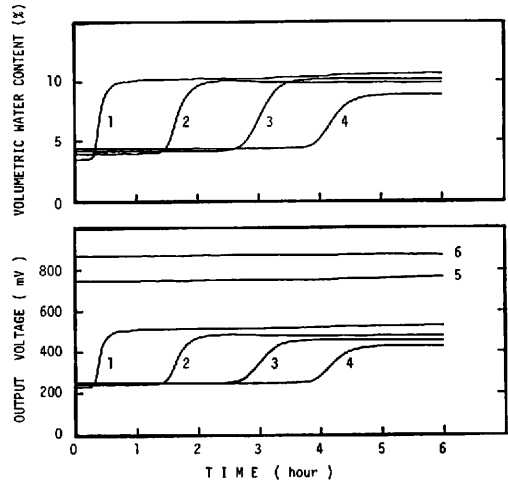
係 数	誘 電 式 水 分 計 の 感 体 番 号					
	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	-1.217	-1.026	-0.766	-0.976	-0.542	-0.817
<i>b</i>	71.895	62.931	51.352	61.349	42.419	52.374
<i>c</i>	69.814	69.833	97.833	59.394	81.415	99.357

V 測 定 例

上述のキャリブレーションを行った後、浸透実験用カラムに誘電式水分計の6本の感体を設置して実験を行った。カラムの大きさは15cm×15cm×150cmで、厚さ5mmの透明塩化ビニール板により作られている。カラム中の土壌表面から7, 30, 55, 80, 105, 130cmの各深度に誘電式水分計の感体とポーラスカップを、26, 76, 126cmの各深度に温度測定用の熱電対温度センサを、それぞれ設置した。キャリブレーションに用いたものと同じの豊浦標準砂を供試土として用い、水締め法でカラム内に充填した。実験は、室温が20±1℃の範囲内に制御された実験室において行った。

地下水面を土壌表面から128cmの深さに固定し、降雨強度26.2mm/hの人工降雨を与えた実験の結果を第10図に示す。なお、実験装置の詳細については向井(1984)に記されている。第10図(下)の出力電圧の変化からだけでも、降下浸透水によるぬれ前線の進行状況や水分量の増加傾向はわかる。しかし、前述のように、出力電圧と水分量の関係がセンサーごとに異なっているため、このままでは水分量変化を量的に吟味することはできない。そこで、(4)式の検定曲線によって出力電圧を体積含水率に変換した。結果を第10図(上)に示す。

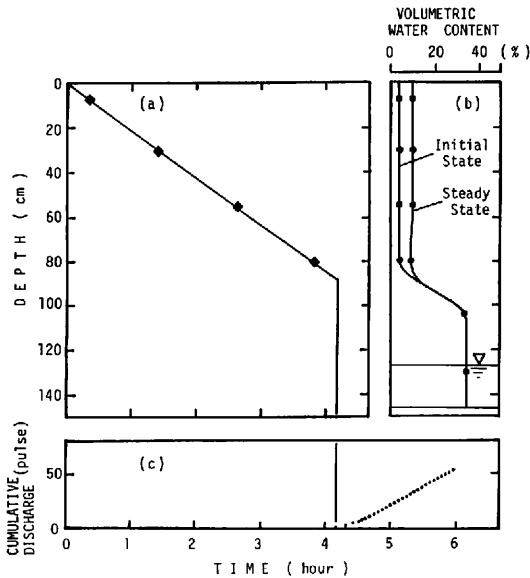
誘電式水分計の測定原理から、誘電式水分計の応答特性は非常に良いと考えられるので、各深度の誘電式水分計の出力電圧の増加開始時刻をぬれ前線の到達時刻と考え、ぬれ前線の進行の様子を調べた(第11図)。第11図-aに示した実線は、各深度における水分量の増加開始時刻を順次結ん



第10図 降雨開始後の誘電式水分計の出力電圧の変化(下)と水分量の変化(上)
図中の数字は誘電式水分計の感体の番号で、土壌表面からの深さが浅い方から順に番号がつけられている。

だものである。図中の菱形は、各深度のマトリックポテンシャルの値が上昇を開始した時刻を示している。図に示されるように、ぬれ前線は、降雨開始直後から、時間に比例して懸垂水帯を降下している。各深度において、マトリックポテンシャルの値が上昇し始める時刻と水分量の増加し始める時刻との間には、ほとんど時間のずれが認められなかった。

第11図-cは、転倒マス式雨量計で測定したカラムからの排水量の積算値を示したものである。転倒マス式雨量計の1パルス当りの排水量が約17ccと多いため、排水開始時刻には多少の遅れがあることを考慮する必要もあるが、ぬれ前線が不飽和毛管水帯の上端(第11図-bの水分プロファイルを参照)に達した時に排水が始まっていること



第11図 降雨に伴うぬれ前線の移動状況(a)と水分量(b)・排水量(c)の変化

がわかる。

このように、水分量の変化の様子から土壌水の動きを追跡した場合にも、Tominaga (1980) や佐倉・谷口 (1983) が指摘している現象が認められた。

VI おわりに

誘電式水分計の出力電圧に影響を与える因子として、温度と土壌水の電解質濃度をとり上げ、これらの因子と出力電圧の関係を調べた。その結果は、次のようであった。

- (1) 出力電圧は温度に比例し、その割合は $2 \sim 3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ であった。
 - (2) 出力電圧は水の電気伝導度に比例し、その割合は $1 \text{ mV}/\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度であった。
 - (3) 上記の温度依存性と電気伝導依存性は、誘電式水分計の感体ごとに異っていた。
- 誘電式水分計の持つこれら温度依存性と電解質濃

度依存性は、実験室内で環境条件が制御可能な場合には無視できる程度のものである。しかし、一般的な屋外の自然条件下では、これらの依存性を無視することはできず、これら因子についての補正を行う必要がある。

実験室内で行った降雨浸透実験から、誘電式水分計の水分量変化に対する応答性は非常に良く、ぬれ前線の伝播の様子や水分量の変化を連続的に捉えられることがわかった。

今回は、供試土として豊浦標準砂のみを用いたため、土性の違いによる誘電式水分計の応答特性の違いや検定曲線の違いについては検討しなかった。これらの点については、今後の実験で検討していく予定である。

文 献

- 岡 太郎・角屋 陸 (1976)：容量式土壌水分計とそれによる斜面表層部の土壌水分測定。第13回自然災害総合シンポジウム講演論文集，267-268。
- 海田能宏 (1969)：ホ場水分計の発展，現状とその問題点について。農土誌，37，549-552。
- 佐倉保夫・谷口真人 (1983)：土壌水の移動特性に関するカラムを用いた降雨浸透実験。地理評，56，81-93。
- 佐藤 朗 (1981)：容量式自記テンシオメーターおよび容量式水分計の試作とそれらの野外への適用。筑波大学自然科学類卒業論文，45 p. (未公表)
- 半谷高久 (1960)：『水質調査法』丸善，399 p.
- 向井雅之 (1984)：NaCl をトレーサーに用いた地中水移動に関する実験的研究。筑波大学自然科学類卒業論文，80 p. (未公表)
- 矢部勝彦 (1980)：土壌水分の測定法。土壌の物理性，41号，90-94。
- Tominaga, M. (1980)：Experiments on rain infiltration in soil (3). Report of National Center for Disaster Prevention, No. 23, 141-184.