

人類が寄って立つこの地球はいまや危機的な状況にあると考えられる。地球のサインを正しく捉え、人間の言葉に翻訳し、行政に反映させることが我々科学・技術の研究に携わるものの責任であり、その責任は今日益々大きくなっている。今回のシンポジウムは研究者の分担と協力、そして科学論の重要性をも改めて認

識させるものであった。

最後にこの学会とシンポジウムは、会員各位の積極的な協力と、つくば市を始め多くの個人・団体・企業からの多大な財政的援助を受けて盛大に行うことが出来た。当事者の一人として関係各位に衷心より感謝の意を表す。

5011 (TD 法；土壤水分量測定；比誘電率)

1. 電磁波式土壤水分計による土壤水分量変化の測定 (TDR 法)*

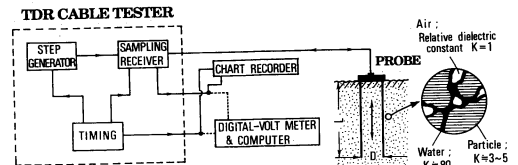
安原 正也**

1. はじめに

通気帯における土壤水分量の鉛直分布、空間分布さらにはその時間変化を精確に測定することは、蒸発散や地下水涵養プロセスを解明するうえで不可欠なものとなる。このため従来から、「重量法」、「電気抵抗法」、「 γ 線透過法」、「中性子法」など色々な水分量の測定方法が考案され現場で用いられてきた。しかし、測定上の制約を始めとする多くの問題点も同時に指摘されており、これらに代わる新しい土壤水分量測定法の開発が待たれていた。以上のような状況から、近年 time-domain reflectometry (TDR) に基づく電磁波式土壤水分計が注目を集めている。本稿ではこの新しい土壤水分量測定法の概要ならびに有効性を紹介する。

2. 原理と特長

土壤は土粒子、間隙空気ならびに土壤水から構成されている。このうち、土壤水の比誘電率 K は約 80 であり、土粒子（一般に $K = 3 \sim 5$ ）や間隙空気 ($K = 1$) の値と比べてはるかに大きい (Ledieu *et al.*, 1986)。すなわち、土壤全体の比誘電率は内部に含まれる水の量の増減に敏感に応答して変化する。したがって、土壤の比誘電率を測定できれば、土壤水分量を精確に求めることが可能になる。



第1図 電磁波式土壤水分計の概要 (安原ほか, 1989)

電磁波式土壤水分計は、ステップ入力に対する反射波を時間領域で直接観測する TDR 法 (山本・大川, 1982) に基づいており、TDR ケーブルテスタ (Tektronix 1502) と地中に埋設した平行な 2 本の金属製ロッドからなるプローブによって構成される (第 1 図)。ケーブルテスタ内のステップジェネレータから発せられたステップ電圧 (パルス) (立上り時間 200 ps, 振幅 300 mV) が、長さ L のロッドを往復するのに要する時間 (t) から土壤の比誘電率を算出する。

媒体中での電磁波の位相速度 c は

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{K}} \quad (1)$$

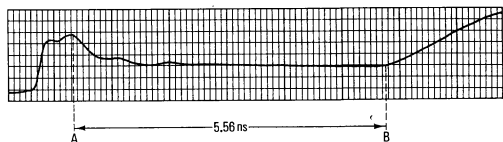
となる。ここで c_0 : 真空中での光速, K : 媒体の比誘電率である。したがって、土壤の比誘電率 K はロッド (長さ L) を電磁波が往復するのに要する時間 t によって、

$$K = t^2 \left(\frac{c_0}{2L} \right)^2 \quad (2)$$

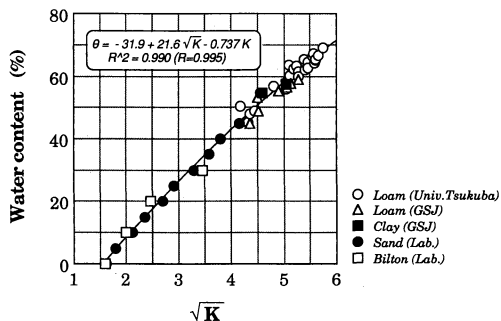
と表わされる。第 2 図はチャートレコーダからの出力の一例である。A 点はパルスが土壤中に侵入しその一部が反射したポイントに、また B 点はロッドを往復し

* Measurements of soil water content by time-domain reflectometry (TDR)

** Masaya Yasuhara, 工業技術院地質調査所水文地質課。



第2図 チャートレコーダからの出力例 (安原ほか, 1989). 体積含水率45%の豊浦標準砂に, ロッドの直径 0.3 cm, 長さ $L=20$ cm, ロッドの間隔 $D=5$ cm のプローブを使用した場合. ロッドの直径の違いが出力波形に及ぼす影響は無視し得る. 縦軸は電圧反射係数, 横軸は時間.



第3図 電磁波式土壌水分計のキャリブレーションカーブ(一部のデータは安池ほか, 1990 による)

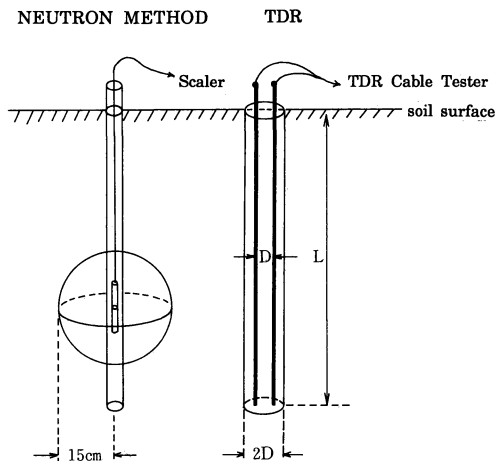
たパルスが土壤から抜け出たポイントに相当する. 第2図の場合の t は 5.56 ns と読み取れ, $L=20$ cm であるので (2) 式から K が得られる. そして, あらかじめ求めておいた水分量と比誘電率 K との関係 (たとえば第3図) から土壌水分量を決定する. なお, 第3図には, 関東ローム, 常総粘土, 豊浦標準砂ならびに建設用軽量砂ビルトンを用いて求めた比誘電率 K の平方根と体積含水率 θ (%) との関係が示してある.

従来の土壌水分計と比較して電磁波式土壌水分計が有している大きな特長としては, その測定精度の良さ (誤差数%以内) のほかに,

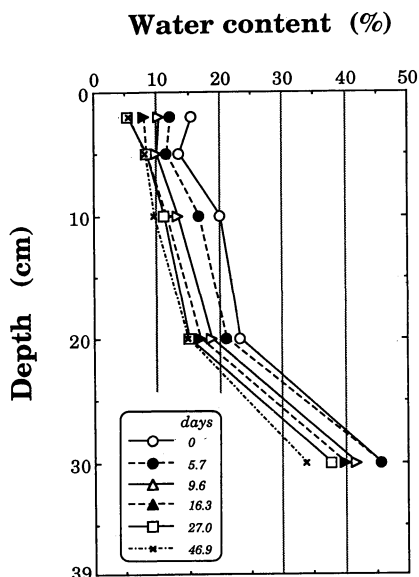
- 1) 局所的な水分量を測定できる.
 - 2) 土層に含まれる総水分貯留量の測定が短時間で容易にできる.
- ことがあげられる (安原ほか, 1990). 以下, 1), 2) について測定例をまじえながら紹介する.

3. 局所的な水分量の測定

電磁波式土壌水分計ではロッドの間隔 D は目的に応じて自由に設定できる. さらに, 測定対象領域は, 高さが土壤中のロッドの長さ L に等しく, ロッド間隔 D



第4図 中性子水分計と電磁波式土壌水分計の測定対象領域の比較 (安原ほか, 1990). 後者では, ロッドの間隔 D によって測定対象領域を自由に変えることが可能.



第5図 蒸発に伴う地表面近傍の土壌水分量鉛直プロファイルの変化の測定例. プローブ ($L=20$ cm, $D=2$ cm) を水平方向に5深度に挿入して測定.

の約2倍の直径の断面を持つ円柱であり, そのなかの水分量を代表する (第4図). したがって, ロッドの間隔を数 cm 程度にまで狭めてプローブの埋設方法を工夫すれば, 地表面近傍あるいは土壌大間隙の近傍といった局所的な土壌水分量を測ることが可能となる.

このような局所的な水分量は、従来の水分計、たとえば中性子水分計（測定対象領域はアクセスチューブ中に降ろされた放射線源のまわりの半径約 15 cm の球体）では測定することが不可能であった（第 4 図）。

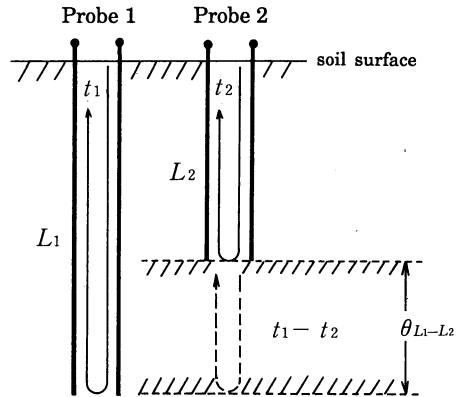
第 5 図に、地表面近傍における蒸発に伴う土壌水分量の変化を電磁波式土壌水分計を使用して測定した結果を示す。幅 20 cm、奥行 15 cm、高さ 39 cm（いずれも内径）の上面開放の砂箱に体積含水率 33% に調整した豊浦標準砂を充填し、一定温度に保たれた室内で人工風をあてながら砂箱上面から約 47 日間蒸発を継続させた。その間、地表面下 2 cm、5 cm、10 cm、20 cm ならびに 30 cm の深度に水平方向に埋設したプローブを用いて水分量の変化を測定した。プローブのロッドの長さ $L=20$ cm、間隔 $D=2$ cm である。深度 30 cm を除いた浅層部の水分量が大きく減少する初期の段階（0～5.7日）、全層の水分量がほぼ等しい速度で減少する中期の段階（5.7～16.3日）、そして深度 30 cm の水分量の減少だけが顕著となる末期の段階（27.0日以降）と、電磁波式土壌水分計による測定結果は蒸発に伴う地表面近傍の局所的な土壌水分量の微妙な変化を明確に表わしている。

なお、本水分計の一回の測定に要する時間はわずか数十秒程度であるため、土壌水分量の変化を分単位で連続的に測定することが可能である。したがって、野外において地表面近傍の土壌水分量の日変化を時間的に詳細に追跡する目的にも使用できよう。

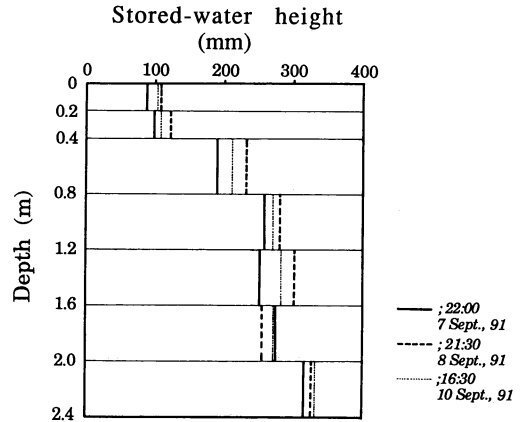
4. 総水分貯留量の測定

地表から深さ L_1 までの土層に含まれる土壌水の総量（総水分貯留量）を知りたい場合には、鉛直方向に埋設した長さ L_1 のプローブを用いてパルスの往復時間 t_1 を求める（第 6 図）。そして、(2) 式から比誘電率を算出し、キャリブレーションカーブを介して体積含水率 θ_{L_1} を求める。これに土壌の厚さ L_1 を掛け合わせれば、厚さ数 m の土層に含まれる総水分貯留量が一回の測定で決定できることになる。また、特定の土壌深度区間 (L_1-L_2) に含まれる土壌水の総量を求める場合には、プローブ 1（長さ L_1 ）とプローブ 2（長さ L_2 ）を埋設する（第 6 図）。そして、ロッドをパルスが往復するのに要した時間の差 (t_1-t_2) から区間 (L_1-L_2) における水分量 $\theta_{L_1-L_2}$ を求め、これに区間長 (L_1-L_2) を掛け合わせて総水分貯留量を算出する。

このようにして求めた、つくば市の工業技術院構内の関東ロームの各土壌深度区間に含まれる総水分貯留



第 6 図 総水分貯留量の測定法（安原ほか、1990）。



第 7 図 総降雨量 130 mm の降雨に伴う関東ロームの各土壌深度区間の総水分貯留量の変化。長さが異なる 7 本のプローブ ($D=10$ cm) を用いて測定。

量（水柱高；mm）の降雨に対する変化を第 7 図に示した。現場には長さの異なる 7 本のプローブ（直径 1.2 cm の真鍮製ロッド、間隔 $D=10$ cm）が鉛直方向に埋設してある。このうち関東ロームの下端まで達するプローブは長さ $L=2.4$ m である。第 7 図には、降雨前（9月7日22:00）、130 mm の降雨終了数時間後（9月8日21:30）、さらには降雨終了2日後（9月10日16:30）にかけての各土壌深度区間の総水分貯留量の増加・減少が明瞭に示されている。

ここで、7本のプローブを対象とした現場測定にはわずか3～4分を要するにすぎない。中性子水分計を用いて同じデータを得る場合に必要な20～30分に比べ、電磁波式土壌水分計でははるかに短い時間で水収

支さらには地下水涵養プロセスの解明に不可欠なデータが得られることがわかる。

5. おわりに

電磁波式土壌水分計では、ロッドの間隔や埋設深度を工夫することによって、これまでの方法では精度良く短時間でこなうことが難しかった種類の土壌水分量の測定が可能となるなど、従来の方法にとって代わり得るフレキシブルな水分計である。また、プローブは安価で、さらに TDR ケーブルテスト本体は軽量で機動性に富み、測定に要する時間も極めて短い。このため、森地や乾燥地など広い地域における土壌水分量の空間的な分布およびその時間変化を実測することも、従来の方法に比べればはるかに容易にできるものと考えられる。今後、この様な方面への電磁波式土壌水分計の適用が期待される。

しかし一方で、鉛直方向に長いプローブを設置する場合の正確な埋設方法、測定値の温度依存性、土壌(水)中の塩濃度の増大が測定可能深度(反射パルスの減衰による)の低下や測定精度の悪化を引き起こすことなど、今後すみやかに検討・改良されなければならない問題も残されている。

参考文献

Ledieu, J., P. De Ridder, P. De Clerck and S. Dautrebande, 1986: A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *J. Hydrol.*, 88, 319-328.

安池慎治, 安原正也, 丸井敦尚, 鈴木裕一, 高山茂美, 1990: TDR 法に基づく電磁波式土壌水分計の関東ロームへの適用. *ハイドロロジー*, 20, 133-139.

安原正也, 安池慎治, 丸井敦尚, 鈴木裕一, 高山茂美, 1989: TDR 法に基づく電磁波式土壌水分計の試作とキャリブレーション. *ハイドロロジー*, 19, 96-102.

—————, —————, —————, 1990: 電磁波式土壌水分計—中性子水分計に代わる新しい水分計—. *地質ニュース*, 430号, 17-27.

山本 博, 大川澄雄, 1982: 改版高周波測定. コロナ社, 132-133.

コメント

中 川 慎 治 (気象研)

土壌水分量の最も基本的な測定法は、一定容積の土壌サンプルを採取し、同サンプルの炉乾燥前後の重量

差から土壌水分量を求めるもの(炉乾燥法あるいは重量法)であるが、この方法は自然条件を乱すことになり、土壌水分量を同一地点で、連続的に測定する目的に適用することはできない。このため、測定対象地域の土壌構造をなるべく乱さない測器によって土壌水分量の変化による土壌の物理的性質の変化を測定することにより、間接的に土壌水分量を求める方法が多数考案されてきた(海田, 1969; 矢部, 1980)。しかし、これらの間接的な土壌水分量の測定法には、測定可能な土壌水分量の範囲、測定精度(キャリブレーションを含む)、測定対象領域の空間的範囲、測器の応答特性、経費、安全性(放射線)等の問題があり、万能な測定法はないのが現状である(白井, 1982)。

なかでも、降雨—浸透過程、蒸発過程を通じて極めてダイナミックな挙動を示す地表面付近の土壌水分量の測定においては、細かい深度間隔で、しかも迅速かつ連続的に土壌水分量を測定できる測器が不可欠である。

TDR 法に基づく電磁波式土壌水分計は、低水分域から高水分域までの局所的な土壌水分量変化が迅速かつ連続的に精度よく測定できるものであることから、これらの要件を満足する測器として注目されるものである。同水分計では、平板電極を使用した市販の誘電式水分計(中川ほか, 1984)で認められたほど顕著な温度依存性は示さず、移動観測や長期間にわたる現場測定も可能とのことであるが、その一方で、土性に応じて求めた比誘電率と土壌水分量とのキャリブレーションカーブを使用すべきことや、深い深度の土壌水分量の測定が難しいこと等もあり、地表面から地下水面に至る通気帯の土壌水分の測定においては、これらの点を踏まえた上で、他の測定法を併用することが必要である。

なお、本稿はシンポジウム席上のコメントではなく、席上行った質問事項をもとに記したものであることをご了解頂きたい。

参考文献

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.

中川慎治, 向井雅之, 古藤田一雄, 1984: 誘電式水分計のキャリブレーション, *筑波大学水理実験センター報告*, 8, 75-81.

白井清恒, 1982: 土壌水分量の測定法, *農業気象*, 37, 333-335.

矢部勝彦, 1980: 土壌水分の測定法, *土壌の物理性*, 41, 90-94.