

実践 TDR 法活用

— 土壌中の水分・塩分量の同時測定 —

登 尾 浩 助*

Practical Application of Time Domain Reflectometry :
 Simultaneous Measurement of Water and Salt contents in Soil

Kosuke NOBORIO*

* Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

1. はじめに

土壌における水分量と塩分濃度を非破壊的にしかも経時的に測定することは、農学や工学の分野で長年切望されてきた。近年開発された時間領域反射 (Time Domain Reflectometry, TDR) 法を利用すると、電磁波の伝播速度を利用して土壌の比誘電率から土壌水分量を、また電磁波の減衰から土壌電気伝導度 (即ち塩分濃度) を同時に測定可能である。我が国ではこれまでどちらかと言えば室内実験において多用されてきた TDR 法であるが (堀野・丸山, 1993; 筑紫, 1996; 清沢, 1998; Mojid ら, 2002), 最近では圃場での適用例も報告されてきている。例えば、長谷川 (2000) は、圃場における黒ボク土壌の水分量変化を TDR 法によって 2 年間にわたって経時的に測定している。また、登尾ら (2002) は家畜ふん尿を散布している牧草地の土壌における硝酸態窒素の移動を TDR 法により測定している。

TDR 法による土壌水分量と電気伝導度の測定に関する理論的背景は、堀野・丸山 (1992) に詳しい。現在土壌水分量と電気伝導度の測定に多用されているテクトロニクス社製のケーブルテスターは、本来は電話線やケーブルテレビ番組配信用の同軸ケーブルの保守管理用に開発された TDR 測定器である。しかし、1970 年代後半から 80 年代に土壌物理学者たちが土壌に応用したのが、ケーブルテスターを使った土壌水分測定のはじめであると思われる。本報では、実際に土壌中の水分量と塩分量の同時測定を行なうことを念頭においてテクトロニクス社 1502C 型ケーブルテスターを使った TDR 法と TDR プローブの設計について解説する。したがって、土壌水分量測定に特化したセンサーであるキャンベル・サイエ

ンティック社の CS615 やデカゴン・デバイズ社の ECHO プローブを使った測定法は扱わない。

2. TDR 法の概略

TDR 法による測定の概略が図-1 に示される。ケーブルテスターに内蔵されているパルス発生器から放出された電磁波は同軸ケーブルを伝わって土壌に挿入された長さ L (m) のプローブと呼ばれる感知部に達する。プローブ始端まで達した電磁波の一部は反射されてケーブルテスターの方に戻る。残った電磁波はさらにプローブの終端まで達し、ここで残り全部の電磁波が反射されてケーブルテスターの方に戻ってくる。このように反射して戻ってきた電磁波の電圧がオシロスコープ上に表示される。

ケーブルテスターからマルチプレクサー (多点プローブ切替器) を介してプローブまでのインピーダンスの変

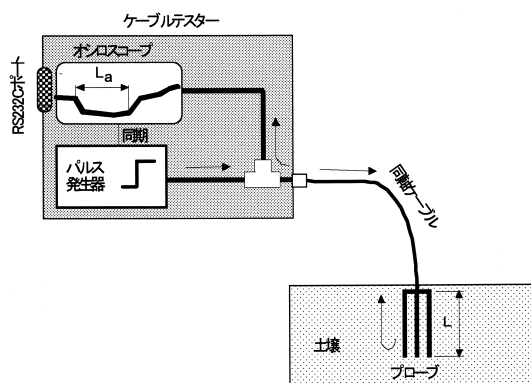


図-1 TDR 法による測定概略図 (Noborio, 2001 より)

* 岩手大学農学部 〒020-8550 盛岡市上田三丁目 18-8

キーワード: 計測, 比誘電率, 体積含水率, 電気伝導度, プローブ

化が図-2 に示される。土壌水分の測定にはD-E間の波形を、また塩分の測定にはD以遠の波形を使う。そこで図-3には水平方向(距離)の解像度を調節してD-E間の波形をオシロスコープの画面一杯に表示した例が示される。またD以遠の波形の表示例は図-5に示される。

3. 含水率 θ の測定

オシロスコープに表示されるプローブ始端(図-2のD地点)の位置は、ケーブルテスターからプローブまでをつないでいる同軸ケーブルの長さが変わらない限り、図-3に示されるようにプローブをどのような水分量の土壌に入れても変わらない。しかし、プローブ始端(図-2のD)からプローブ終端(図-2のE)までの距離(見かけのプローブ長さ) L_a (m) は、図-3に示されるように風乾砂、水分飽和砂、蒸留水とプローブを挿入した物質の水分量の増加に伴って大きくなる。

TDR法による土壌水分量の測定は、水の比誘電率が80と他の土壌構成物(土粒子の比誘電率=3~10、空気の比誘電率=1)に比較して非常に大きい性質を利用する。図-3では異なった水分量の砂と蒸留水の中に挿入した長さ $L=0.10$ mのプローブから反射した電磁波による波形を示した。水分量の増加に伴ってケーブルテスターのオシロスコープに表示される見かけのプローブ長さ L_a (m) が長くなる。 L と L_a から土壌の比誘電率 ϵ は、

$$\epsilon = \left(\frac{L_a}{LV_p} \right)^2 \tag{1}$$

と計算される(Amatoら, 1993)。ここに、 V_p はケーブルテスターにセットする同軸ケーブル内における電磁波の相対伝播速度である(土壌水分量測定のためには通常 $V_p=0.99$ にセットする場合が多い)。体積含水率 θ (m^3/m^3) と土壌の比誘電率 ϵ との間には、実験的に次のよう

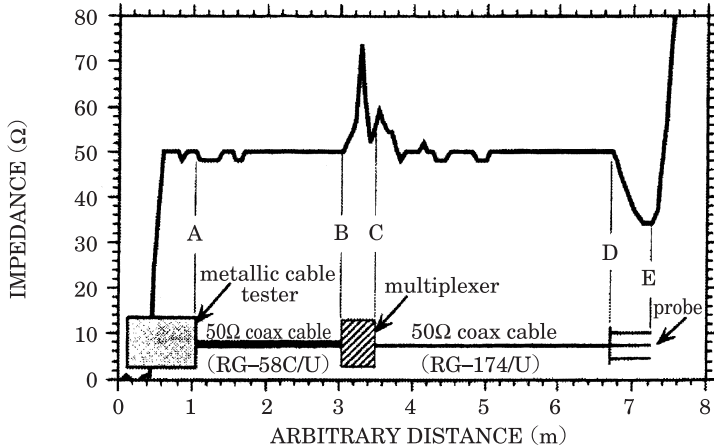


図-2 TDRケーブルテスターからプローブまでのインピーダンスの位置的な変化 (Noborioら, 1994より)

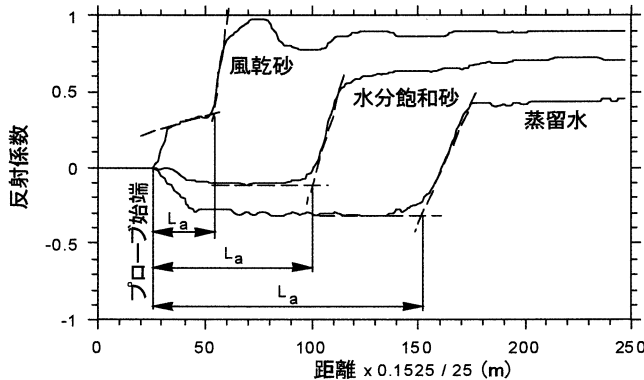


図-3 水分量の違いで変化する反射波形の形状 (Noborio, 2001より)

な関係が見いだされている (Topp ら, 1980)。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (2)$$

この関係は、土壌とプローブとの接触具合、温度、溶質の存在、仮比重、土壌構造、土性、ヒステリシスの影響をほとんど受けない。しかし、クロボク土のような有機質に富んだ土壌や粘性土では θ を小さめに推定する傾向があるので、Miyamoto ら (2001) はクロボク土に対する較正曲線を

$$\theta = -3.56 \times 10^{-2} + 4.35 \times 10^{-2} \varepsilon - 1.23 \times 10^{-3} \varepsilon^2 + 1.48 \times 10^{-5} \varepsilon^3 \quad (3)$$

のように提案した。

さらに、土壌水分量が不均一に分布する n 層からなる成層土壌に対して鉛直に挿入した TDR プローブは、(4) 式のようにプローブの長さ L (m) 内における平均体積含水率 $\bar{\theta}$ (m^3/m^3) を測定する (Topp ら, 1982)。

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (4)$$

ここに、 z_i は i 番目土層の厚さで $L = \sum_{i=1}^n z_i$ と表され、 θ_i は i 番目土層の体積含水率 (m^3/m^3) である。例えば図-4 のように長さの異なる 2 本のプローブ (長さ L_{1-5} のプローブ 1 と長さ L_{1-3} のプローブ 2) を土壌表面から鉛直に挿入し、それぞれのプローブによる体積含水率の測定値 $\bar{\theta}_{1-5}$ と $\bar{\theta}_{1-3}$ を使って 2 本のプローブ長さの差にあたる土層である z_4 における平均体積含水率 $\bar{\theta}_4$ を次のように推定できる。

$$\bar{\theta}_4 = \frac{\bar{\theta}_{1-5} L_{1-5} - \bar{\theta}_{1-3} L_{1-3}}{L_{1-5} - L_{1-3}} \quad (5)$$

しかし、水分浸潤時 (即ち、乾燥土層の上に湿潤土層がある場合) における平均含水率の測定に対しては、プローブ終端からの反射位置を特定し難いことが報告されている (Nadler ら, 1991)。Mojid ら (2002) もまた、乾燥土層の含水率が $\theta < 0.15$ (m^3/m^3) の場合には TDR 波形解析用のソフトウェア (WinTDR) を使った解析が困難であることを報告している。一方、Noborio ら (1996) は、風乾砂に浸透する水分の浸潤前線位置を (4) 式に基づいて良好に推定している。

4. 電気伝導度の測定

TDR 法では単一のプローブを使って電気伝導度の測定も同時にできる。溶液の濃度差が 10 倍程度の範囲では、溶液の電気伝導度 EC と溶液濃度 C の間には有意な線形関係 ($C = m + nEC$, m と n は定数) が存在するので、電気伝導度はしばしば溶液濃度の代わりに使われる。溶液の濃度差が 10 倍程度以上になると、 EC と C の関係は線形ではなく指数関数で表される (U.S. Salinity Lab. Staff, 1954)。溶液濃度が濃くなるにしたがってプ

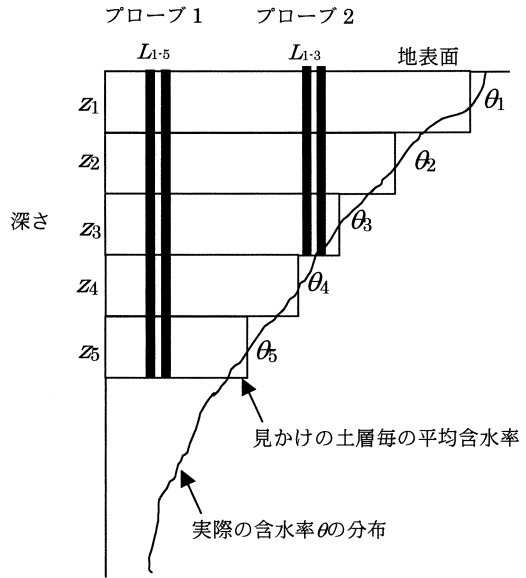


図-4 複数の鉛直 TDR プローブによる土層別水分量の測定原理

ローブ終端で反射された電磁波の強度 (電圧) V_{∞} が減衰する様子が図-5 に示される。長さ 4.5 cm の 3 線式プローブ (プローブ棒間隔は 1.0 cm) を使ったこの例では、溶液濃度が 0.1 mol/kg より大きくなるとプローブ終端での電磁波の反射が生じなくなることがわかる。ここに示した例よりもプローブ長さが長くなったり棒間隔が狭くなると、もっと低濃度で電磁波の反射が生じなくなる。

土壌水分量の測定に一般的に使用されているテクトロニクス社 1502C 型ケーブルテスターには、 V_0 と V_{∞} の値から電磁波の通り道のインピーダンス R (Ω) を以下のように計算して表示する機能が組み込まれている。

$$R = Z_u \frac{V_{\infty}}{2V_0 - V_{\infty}} \quad (6)$$

ここに Z_u は同軸ケーブルの特性インピーダンス (Ω) である。このインピーダンス R を利用すると、

$$EC = \frac{a}{R} + b \quad (7)$$

という関係を使って電気伝導度 EC (S/m) を簡単に測定できる。ここに a , b はプローブ一本一本に固有の較正係数で、さまざまな EC に調製された塩水 (NaCl や KCl などの溶液) 中に TDR プローブを浸して得られる $1/R$ と既知の EC との関係から得られる。いったん定数 a , b が決まれば、その TDR プローブを使って電気伝導度の測定が可能となる。その際マルチプレクサを使って多点測定の前定があれば、マルチプレクサを介して各プ

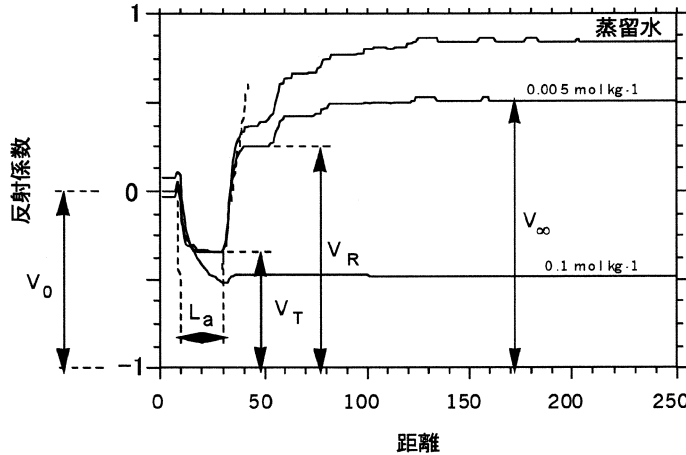


図-5 溶液濃度の違いで変化する反射係数の大きさ (Noborio, 2001 より)

ブの a, b を決定する必要がある。Heimovaara ら(1995) は、 0.3 S/m 以上の電気伝導度の測定を行なう際には線形性維持のために(7)式の代わりに

$$EC = \frac{a}{R - R_{cable}} + b \tag{8}$$

を使うことを勧めている。 R_{cable} は、同軸ケーブル自身のインピーダンス (Ω) で、プローブ始端 (図-2 の D 位置) を短絡させて測定した時の R 値である。電気伝導度が大きくなるとケーブルテスターで測定する R 値が小さくなる。 R_{cable} 値が R 値に対して無視できないほど大きくなると、結果として EC の推定値が過小評価される。特に長さ 10 m 以上の同軸ケーブルを使う際には、 EC の推定値に対する R_{cable} の影響が顕著であるので式(9)を使う必要がある (Reece, 1998)。

土粒子と土壤空気の電気伝導度および土壤溶液の電気伝導度 EC_w を合わせた複合的な電気伝導度を見かけの電気伝導度またはバルク電気伝導度 EC_b と呼ぶ。飽和・不飽和土壤に挿入した TDR プローブは、この EC_b を測定する。土壤溶液の電気伝導度 EC_w はバルク電気伝導度 EC_b と体積含水率 θ の両方の関数として次のように表される (Kachanoski ら, 1992)。

$$EC_w = f_1(\theta)EC_b + f_2(\theta) \tag{9}$$

ここに、 $f_1(\theta)$ と $f_2(\theta)$ は対象とする土壤に固有の係数で、 θ の関数として表される。即ち、 EC_w と θ のいずれが変化しても TDR 法で測定しているバルク電気伝導度 EC_b の値が変化することを意味する。 $f_1(\theta)$ と $f_2(\theta)$ を決定するのは手間と時間が掛かる作業である。

近年、Hilhorst (2000) は $\theta > 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の土壤に対して EC_w (S/m) と EC_b (S/m) の間に次のような関係があることを理論的に導出した。

$$EC_w = \frac{\epsilon_w EC_b}{\epsilon_b - \epsilon_{EC_b=0}} \tag{10}$$

ここに、 ϵ_w は土壤液相の比誘電率、 EC_b は TDR 法で測定する土壤のバルク電気伝導度 (S/m) ((7) または (8) 式)、 ϵ_b は TDR 法で測定する土壤の比誘電率 ((1) 式)、 $\epsilon_{EC_b=0}$ は $EC_b=0$ となるときに土壤の比誘電率で実験的に求める必要がある。Persson (2002) は、 $0.05 \sim 0.5 \text{ S/m}$ の塩水を $0.13 \sim 0.37 \text{ m}^3/\text{m}^3$ に水分調整した 3 種類の砂質土壤に対して $\epsilon_w=80$ (水の比誘電率) と仮定して(10)式が有効であることを確認した。表-1 に Hilhorst (2000) が示した幾つかの土壤に対する $\epsilon_{EC_b=0}$ の値を再掲する。

不飽和土壤中での肥料分や塩分の移動を把握する際には、土壤溶液の電気伝導度 EC_w の変化を知る必要がある。 (9) 式や (10) 式から土壤のバルク電気伝導度 EC_b の変化のみを測定しても土壤中の肥料分量や塩分量を知る上では無意味であることがわかる。(9) 式や (10) 式で示されるように EC_w を推定するためには、土壤の EC_b と θ あるいは ϵ_b を同時に知る必要がある。ケーブルテスター

表-1 さまざまな土壤に対する $\epsilon_{EC_b=0}$ の値 (Hilhorst, 2000)

土 壤	粘土	シルト	砂	有機質	$\epsilon_{EC_b=0}$
	%				
ガラスビーズ	—	—	—	—	7.6
ロックウール	—	—	—	—	4.1
Groesbeek	10	70	20	0.95	2.7
Wichmond	14	31	55	4.3	1.9
Ferralsol-A	63	26	11	0	4.4
Munnikenland	40	56	3	5	5.8
Attapulgitte	100	0	0	0	3.1

を使った TDR 法はこれらの値を単一のプローブを使ってしかも同時に測定可能なことから、これまでは測定が非常に困難とされてきた不飽和土壌中における EC_w の経時的な変化を容易に把握することができるようになった。

最後に、溶液の電気伝導度 EC_w (S/m) は溶液温度の影響を受けるので、温度補正を行なう必要がある。 EC_w (S/m) は通常 25°C の溶液温度における値 EC_{w25} (S/m) として報告される。したがって、次式のような温度補正を行なう必要がある (U.S. Salinity Lab. Staff, 1954)。

20 ≤ T ≤ 47°C の場合

$$EC_{w25} = EC_w \left(1.00 + \frac{(25-T)}{49.7} + \frac{(25-T)^2}{3728} \right) \quad (11)$$

3 ≤ T ≤ 28°C の場合

$$EC_{w25} = EC_w \left(1.00 + \frac{(25-T)}{53.3} + \frac{(25-T)^2}{1667} \right) \quad (12)$$

ここに、T は溶液温度 (°C) である。

5. 相対溶液濃度 C_r の測定

土壌における溶質の分散係数の計算に必要な測定点における相対濃度 C_r は、式 (13) のように初期状態の土壌溶液濃度 C_i 、置換溶液濃度 C_o 、測定濃度 C から計算される。相対濃度 C_r は、

$$C_r = \frac{C - C_i}{C_o - C_i} \quad (13)$$

と定義される。 $C = m + nEC$ という関係が成立する濃度範囲では、 C_r はそれぞれの溶液の EC で表される。(13) 式に $C = m + nEC_w$ の関係を代入すると

$$C_r = \frac{(m + nEC_w) - (m + nEC_{wi})}{(m + nEC_{wo}) - (m + nEC_{wi})} \quad (14)$$

となる。 m と n は定数なので消去されて、

$$C_r = \frac{EC_w - EC_{wi}}{EC_{wo} - EC_{wi}} \quad (15)$$

のように C_r は土壌溶液の電気伝導度 EC_w の関数として表される。さらに土壌水分量 θ が一定の条件下では (9) 式中の $f_1(\theta)$ と $f_2(\theta)$ あるいは (10) 式中の ϵ_b は一定値となるので、TDR 法で土壌の EC_b を測定することによって EC_w を一義的に決定することができる。したがって、(15) 式に (7)・(9) 式を代入すると

$$C_r = \frac{\left(f_3(\theta) \frac{1}{R} + f_4(\theta) \right) - \left(f_3(\theta) \frac{1}{R_i} + f_4(\theta) \right)}{\left(f_3(\theta) \frac{1}{R_o} + f_4(\theta) \right) - \left(f_3(\theta) \frac{1}{R_i} + f_4(\theta) \right)} \quad (16)$$

となる。ここで $f_3(\theta)$ と $f_4(\theta)$ は θ が一定の場合は定数なので消去されて、最終的には

$$C_r = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_i} \right) \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_i} \right)^{-1} \quad (17)$$

のようにインピーダンスの測定値だけから相対濃度 C_r を計算することができる (Kachanoski ら, 1992)。ここに、 R は測定点において経時的に変化する土壌のインピーダンス (Ω)、 R_i は初期状態における土壌のインピーダンス (Ω)、そして R_o は土壌溶液が置換溶液によって完全に置き換わった時の土壌のインピーダンス (Ω) を表す。 R_o の値は、初期溶液を置換溶液に切り換え後十分な時間が経過して R の値がほとんど変化しなくなった時の値としても差し支えない。

図-6 には、直径 10 cm のカラムに充填した土壌を水道水で飽和した後、塩水を流下して測定した破過曲線の例を示す。長さ 8.9 cm の 2 線式 TDR プローブを土壌表面下 5 cm の位置に水平に挿入して測定した。TDR 法で測定した EC_b によって表される破過曲線 (図-6 (A)) と (15) 式あるいは (17) 式によって計算した C_r による破過曲線 (図-6 (B)) である。

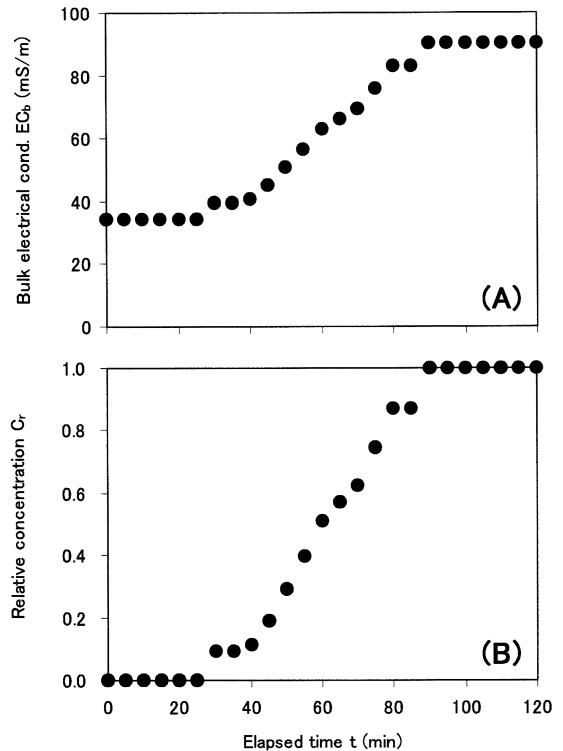


図-6 地表面下 5 cm に水平方向に埋設した TDR プローブにより測定した飽和土壌における塩分の破過曲線。(A) バルク電気伝導度 EC_b による破過曲線と (B) インピーダンス R による相対濃度の破過曲線。

6. プローブの設計

1. プローブの材質と接続ケーブルの種類

TDR法による土壌水分量と電気伝導度の測定には、2線式または3線式のプローブがよく使用される(図-7)。TDR法が土壌水分量の測定に利用され始めた1980年初頭には、プローブの線材として真鍮しんちゆうが使われていたが、近年では溶接用ステンレス鋼棒が多用されている。また1980年初頭には2線式プローブに200Ω平行TV用ケーブルを接続し、200Ωケーブルとケーブルテスター(ケーブルテスターの出力は50Ω)との間にインピーダンス整合用トランス(バラン)を挿入する方法が取られた。その後200Ωケーブルは50Ω同軸ケーブルに取って代わられたが、2線式プローブにはバランが必要だという理論派と実用的には必要ないという実践派が出現した。そうした中Zegelinら(1989)が、50Ω同軸ケーブルに直接接続する3線式プローブを発表した。3線式プローブは理論派と実践派のどちらも納得させることができ、その後TDRプローブの代表的な形状となった。しかし近年2線式プローブに50Ω同軸ケーブルを直接接続しても問題なく測定できることが実証されてきたので(Petersenら, 1995; Ferréら, 1998), 50Ω同軸ケーブルを直接接続した2線式プローブも広く使われるようになっていく。さらに、HookとLivingston(1995)は、50Ω同軸ケーブルの代わりにTVアンテナ用の75Ω同軸ケーブルを使っても測定に支障が無いことを報告した。Noborioら(1999)は、含水率とマトリックポテン

シャルを単一のプローブで測定するための新型TDRプローブに75Ω同軸ケーブルを接続した。彼らが使ったプローブ形状に対しては、75Ω同軸ケーブルを使うことによってプローブ始端位置の決定が容易になった。

2線式プローブのインピーダンス Z (Ω)は、

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (18)$$

のように表される(Kraus, 1984)。ここに、 ϵ はプローブを取り囲む物質の比誘電率、 s はプローブの棒と棒の中心間距離(m)、 d は棒の直径(m)である。先に述べた50Ωと75Ωの同軸ケーブルのどちらを選択したら良いのかは、(18)式で求められるプローブのインピーダンス次第である。例えば、図-2に示されるDからEにかけての凹部が現れるためには、プローブのインピーダンスが同軸ケーブルのインピーダンス(図-2の場合は50Ω)より小さい必要がある。即ち、(18)式の Z は、想定される ϵ の変化範囲においてプローブに接続する同軸ケーブルのインピーダンス(50あるいは75Ω)を含まないことが望ましい。

2. プローブ棒の間隔

Zegelinら(1989)は、さまざまな棒間隔 s のもとで水の ϵ を測定したところ、 s に関わらず一定の ϵ 値を得ている。また、SteinとKane(1983)は、棒と棒の間隔が正確に平行でなくても ϵ の測定値への影響はほとんど無いと報告している。しかし、「表皮効果」と呼ばれる電磁波の不均一分布を避けるために、棒の直径 d は棒間隔 s に比べて適度に大きい($d/s > 0.1$)必要がある(Knight,

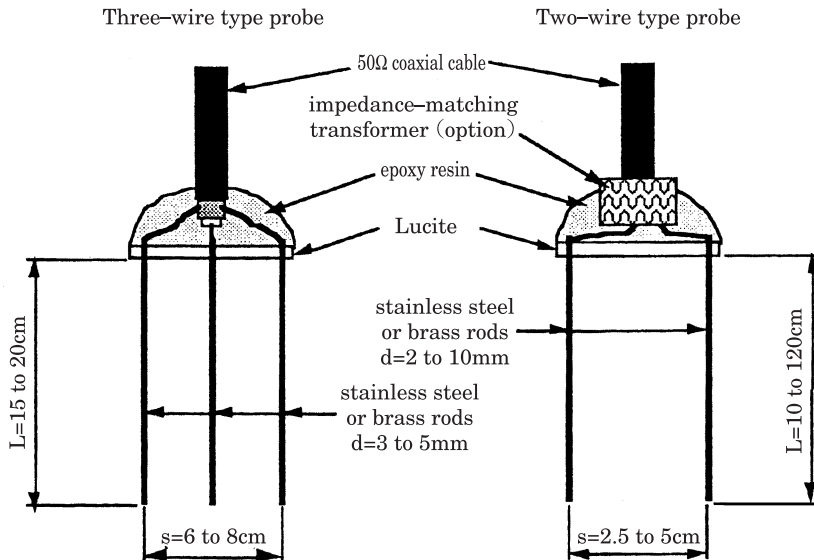


図-7 2線式と3線式プローブの構成図 (Noborio, 2001より)

1992)。その後、Petersen ら (1995) は、 $d/s=0.02$ まで小さくできることを実験的に確かめている。 d/s 比は、例えば地表面からどれくらいの深さまで含水率を正確に測定できるかという問題に関わっている。Petersen ら (1995) は測定に必要なプローブの最小土被り厚さ hc (mm) を

$$hc = \frac{\frac{1}{4}(s^2 - d^2)}{\left[\frac{s}{d} + \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} \right]^{4(1-Pc)} - 1} \quad (19)$$

と推定した。ここに、 P_c はプローブの棒と棒の間に含まれるエネルギー分率 ($0 < P_c < 1$) である。例えば、 $s=25$ mm, $d=1.6$ mm, $P_c=0.95$ の場合は、 $hc=12.5$ mm となる。即ち、この形状のプローブを使って地表面付近の含水率の 95% を測定するためには、プローブを水平に設置した状態で土被り厚さは 12.5 mm 以上必要であるということになる。

3. プローブの長さ

プローブの長さについては、Ren ら (1999) が

$$L_{max} = \frac{\ln[V_T/(V_R - V_T)]\sqrt{\epsilon}}{120\pi EC_b} \quad (20)$$

$$L_{min} = \frac{tc}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (21)$$

と整理している。ここに L_{max} は最大プローブ長さ (m), L_{min} は最小プローブ長さ (m), V_T と V_R はそれぞれ図-5 に示される送信電圧 (V) と反射電圧 (V) で、TDR 測定器 (モデル 1502C) 上ではそれぞれ反射係数 $\rho_T = V_T/V_o - 1$ および $\rho_R = V_R/V_o - 1$ として表される。さらに、 ϵ は土壌の比誘電率、 EC_b は土壌のバルク電気伝導度 (S/m), t は電磁波がプローブ棒長の往復に要する時間 (s), c は真空中における光速 ($\approx 3 \times 10^8$ m/s) である。②0 式において $V_T/(V_R - V_T) = (1 + \rho_T)/(\rho_R - \rho_T) \geq 10$ の時に十分に反射波を読み取ることができると仮定すると、 $\epsilon = 25$ で $EC_b = 0.05$ S/m の土壌に対しては $L_{max} \leq 0.61$ m となる。②0 式ではプローブの棒間隔 s が考慮されていないが、実際の現場土壌に適用する際にはプローブ長さ L ばかりではなく棒間隔 s も反射波の減衰に関与することに留意する必要がある。②1 式中の $tc/2$ は (1) 式の L_a に等しいので、 L_{min} は使用する TDR 測定器の分解能とプローブの長さ L に依存する。Ren ら (1999) は、テクトロニクス社 1502 型ケーブルテスターを使った場合、 $L_{min} = 0.023$ m と計算している。即ち、土壌長さ 23 mm 以下の範囲における含水率の測定は、1502 型ケーブルテスターを使っては極めて困難であるとの結論である。

これに対して Nissen ら (1998) は、プローブの電極と

して直線の金属棒を使うのではなく、コイル状にした電線を使った。電線をコイル状にすることによってケーブルテスターから見た電極の長さを大きく取ることができ、同時に物理的なプローブの全長を 15 mm にすることに成功した。さらに彼らは、この直径 3.6 mm のコイル状プローブを使うと 4 mm の土被り厚さがあれば十分な精度で含水率を測定することが可能であったと報告している。

7. おわりに

本報で説明に使ったテクトロニクス社製 1502 シリーズの TDR 測定装置は、現在製造中止になっている。しかし、キャンベル・サイエンティフィック社から販売されている TDR100 は、性能的にも機能的にも 1502 シリーズに代替できる機種であると思われる。ソイルモイスチャー・イクイPMENT社の Trase も 1502 シリーズや TDR100 と同等の性能を有しているが、ソイルモイスチャー社からの特殊なプローブを接続しないと自動計測できない点が普及を妨げている。

本来の電話線・ケーブルテレビ用同軸ケーブルの保守管理用として TDR 式ケーブルテスターが英国の Bicotest 社や米国の Granite Island Group 社などから市販されている。しかし、これらの TDR 式ケーブルテスターが土壌含水率・電気伝導度の測定に供された例を知らないで、我こそはと思われん方は新たな測定器の発掘に乗り出していただきたい。圃場での使用を考えなければ、ここにあげた機種以外の高性能な TDR 測定装置 (アジレント・テクノロジー社 86100B やテクトロニクス社 11801+SD-24 など) が市販されており、通常の 25 mm 長 TDR プローブを使っても十分に高精度な含水率の測定が可能である (Kelly ら, 1995)。

ケーブルテスターを使った TDR 法から得られる反射波形の中には本報で解説した比誘電率と電気伝導度を求めるための情報以外にも Heimovaara (1994) が示したように沢山の情報を含んでいる。したがって、この波形情報を有効に利用することが次の TDR 法を使った研究と TDR 法の応用につながっていくと思われる。

引用文献

- Amato, M., De Lorenzi, F. and Oliviere, B. (1993): Riflettometria nel dominio del tempo (TDR) per la misura dell'umidità volumetrica del terreno. I: Principi generali ed applicazioni. Riv. di Agronomia, 27: 1-8.
- 筑紫二郎 (1996): TDR 法による浸潤前線の検出. 農土論集, 182: 163-164.

- Ferré, P.A., Redman, J.D., Rudolph, D.L. and Kachanoski, R.G. (1998) : The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand. *Water Resour. Res.*, **34** : 1207-1213.
- 長谷川周一 (2000) : 黒ボク土畑の圃場容水量の実態. *土壌の物理性*, **83** : 41-46.
- Heimovaara, T.J. (1994) : Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms : 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. *Water Resour. Res.*, **30** : 189-199.
- Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1995) : Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 689-698.
- Hilhorst, M.A. (2000) : A pore water conductivity sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 1922-1925.
- Hook, W.R. and Livingston, N.J. (1995) : Propagation velocity errors in time domain reflectometry measurements of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 92-96.
- 堀野治彦・丸山利輔 (1992) : TDR による土壌の体積含水率および電気伝導度の測定について. *土壌の物理性*, **65** : 55-61.
- 堀野治彦・丸山利輔 (1993) : 3線式プローブによる土壌水分の TDR 計測. *農土論集*, **168** : 119-120.
- Kachanoski, R.G., Pingle, E. and Ward, A. (1992) : Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56** : 47-52.
- Kelly, S.F., Selker, J.S. and Green, J.L. (1995) : Using short soil moisture probes with high-bandwidth time domain reflectometry instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 97-102.
- 清沢秀樹 (1998) : TDR による層状土壌の水分と塩類濃度の測定. *日本農業気象学会東海支部会誌*, **56** : 33-38.
- Knight, J.H. (1992) : Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resour. Res.*, **28** : 2345-2352.
- Kraus, J.D. (1984) : *Electromagnetics*. 3rd ed. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Miyamoto, T., Kobayashi, R., Annaka, T. and Chikushi, J. (2001) : Applicability of multiple length TDR probes measure water distributions in an Andisol under different tillage systems in Japan. *Soil & Tillage Res.*, **60** : 91-99.
- Mojid, M.A., Toride, N. and Cho, H. (2002) : The effect of heterogeneous soil-water distribution on the TDR measurement of soil-water content. *土壌の物理性*, **90** : 11-19.
- Nadler, A., Dasberg, S. and Lapid, I. (1991) : Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55** : 938-943.
- Nissen, H.H., Moldrup, P. and Henriksen, K. (1998) : High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** : 1203-1211.
- 登尾浩助・颯田尚哉・古賀 潔・馬場秀和・向井田善朗 (2002) : ふん尿還元草地における土壌のフィルター効果. *農土誌*, **70** : 631-634.
- Noborio, K. (2001) : Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry : a review. *Comput. Electron. Agric.*, **31** : 213-237.
- Noborio, K., Horton, R. and Tan, C.S. (1999) : Time domain reflectometry probe for simultaneous measurement of soil matric potential and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63** : 1500-1505.
- Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1996) : Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry. *Soil Sci.*, **161** : 480-483.
- Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1994) : Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. *Comput. Electron. Agric.*, **11** : 131-142.
- Petersen, L.W., Thomsen, A., Moldrup, P., Jacobsen, O.H. and Rolston, D.E. (1995) : High-resolution time domain reflectometry : Sensitivity dependency on probe-design. *Soil Sci.*, **159** : 149-154.
- Persson, M. (2002) : Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time-domain reflectometry. *Hydrol. Sci. J.* **47** : 269-277.
- Reece, C.F. (1998) : Simple method for determining cable length resistance in time domain reflectometry systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** :

- 314-317.
- Ren, T., Noborio, K. and Horton, R. (1999) : Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63** : 450-457.
- Stein, J. and Kane, D.L. (1983) : Monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, **19** : 1573-1584.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, **16** : 574-582.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1982) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 672-678.
- U.S. Salinity Laboratory Staff (1954) : Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. *Agriculture Handbook*. no. 60. U.S.D.A., U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Zegelin, S.J., White, I. and Kenkins, D.J. (1989) : Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, **25** : 2367-2376.

受稿年月日 : 2002年10月1日
受理年月日 : 2003年1月30日