

TDR法による多孔質体内水溶液の電気伝導度測定に関する基礎的研究

原口, 智和
九州大学熱帯農学研究センター

廣田 修
九州大学熱帯農学研究センター

中野, 芳輔
九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座灌漑利水学研究室

舟越, 保
九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座灌漑利水学研究室

<https://doi.org/10.15017/21112>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 56 (2), pp.219-228, 2002-02. 九州大学大学院農学研
究院

バージョン：

権利関係：

TDR法による多孔質体内水溶液の電気伝導度測定 に関する基礎的研究

原口智和*・廣田 修
中野芳輔**・舟越 保**

九州大学熱帯農学研究センター
(2001年10月31日受付, 2001年11月20日受理)

Measurement of Solution Electrical Conductivity in Porous Medium using TDR method

Tomokazu HARAGUCHI*, Osamu HIROTA,
Yoshisuke NAKANO** and Tamotsu FUNAKOSHI**

Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

農地において土壌の状態や特性を知ることが、作物の栽培管理や農地保全の上で大変重要なことである。土壌の性質を示すパラメータは様々あるが、その中には土壌水分量や電気伝導度も含まれる。電気伝導度は土壌内に存在する土壌水の塩分濃度を知るための指標である。

土壌水分量や土壌塩分濃度(土壌溶液の電気伝導度)については、多くの研究者あるいは農民が関心を持っている。現場における土壌水分測定に関しては、これまで、直接含水量を測る重量法(採土法)、中性子や電磁波の減衰と含水率との関係から推定する中性子法やガンマ線法、土壌水分張力と含水率の関係から求めるテンシオメータ法などが考案され、現在も用いられている。しかしこれらの方法には、時間的に連続した測定が出来ない、測定に時間がかかる、危険を伴う、測定装置の管理に手間がかかるなどの欠点がある。一方、現場土壌溶液の電気伝導度の測定法には、抽出した土壌溶液を用いる方法や、土壌電気伝導度(bulk soil electrical conductivity)から求める方法など

がある。前者においては、現場に設置したサンプラーを用いて連続的に採水、測定する方法や、土壌を採取しそれに含まれる土壌水あるいは塩を取り出して測定する方法があるが、土壌水分が比較的低い状態では測定が出来ない、連続測定が出来ないなどの問題がある。土壌電気伝導度を測定する方法には、4電極法、電磁誘導法などがあり、これらは迅速、簡単かつ実用的である(Rhoades, 1992)。

1970年代後半、土壌水分と電気伝導度を同時に1つの装置によって測ることの可能なTDR法(Time Domain Reflectometry)が開発され、その後この測定手法に関して、理論面や応用面で多くの研究がなされた(例えば、Topp *et al.*, 1980, Dalton *et al.*, 1984, Dasberg and Dalton, 1985)。この方法では、センサープローブを地中深くに埋設して測定する場合に現状を乱すことがあるが、このことは他の測定法にも言える事であり、前に述べた各測定法の欠点を充分補えるということで、現在ではそれらに取って代わろうとしている。

本研究では、ガラスビーズを用いた実験により、土壌電気伝導度を求めるための算定モデルの特徴、およ

**九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座灌漑利水学研究室

** Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Division of Regional Environment Science, Department of Bioproduction Environment Science, Faculty of Agriculture, Kyushu University

* Corresponding author (E-mail: thara@brs.kyushu-u.ac.jp)

び目視による TDR 軌跡の解析精度について検討した。また、砂を対象に TDR 法による土壌水電気伝導度の測定を行った。

土壌電気伝導度

粉体物性理論によると、粉体の導電特性は、粒子実体および粒子表面に吸着された水分層などの表面層の通電性に依存する。粒子が絶縁体であり、かつ相対湿度が10%を超えると表面伝導が卓越し、粒子実体の寄与分は無視できるようになる(増田・石田, 1973)。一般に土壌(土粒子)は絶縁体であり、かつ土壌水分が比較的高い場合には、土壌電気伝導度は吸着水のみならず可動水(mobile water)を含んだ表面層の通電性に依ることが想像できる。実際、Rhoades *et al.* (1976) は、液相が寄与する電気伝導度 EC_b および固相-液相境界面の交換性イオンが関与する表面伝導率 EC_s を用いて、これらが並列接続されたものとして土壌電気伝導度 EC_a を表現している。

$$EC_a = EC_b + EC_s \quad (1)$$

この式においても、土粒子実体(固相部分)の寄与する項は含まれていない。また彼らは、 EC_b が土壌水の電気伝導度 EC_w に比例し、液相部分のみを電気が流れるものと仮定し、次式を導いた。

$$EC_a = EC_w \theta T + EC_s \quad (2)$$

ここで、 θ は体積含水率、 T は伝達係数(transmission coefficient)である。伝達係数 T もまた体積含水率の関数で表される。

TDR 法の測定原理

TDR 法は、土壌中に設置されたプローブに電磁波ステップパルスを送り、その伝達速度や電圧の衰退の様子を調べることで、土壌の誘電率や電気伝導度を測定するものである。図1にTDRの計測システム構成の模式図を、図2にTDR装置本体に取り込まれる電磁波の電圧の理想的な変化を示す。図1および図2に示された記号A, B, CおよびDは、互いに対応している。

TDR装置内のステップ発生装置から射出された電磁波は、媒体(例えば土壌)に挿入されたプローブに向かって同軸ケーブルを伝播する。プローブロッドの根元(C地点)では、電磁波が伝播する媒体の不連続性(媒体が同軸ケーブルの材料から土壌に変化する)のため、その一部が反射される。その部分では電圧

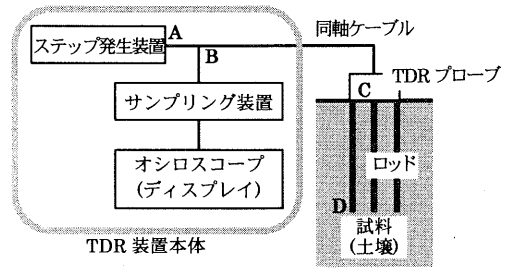


図1 TDR計測システムの構成。

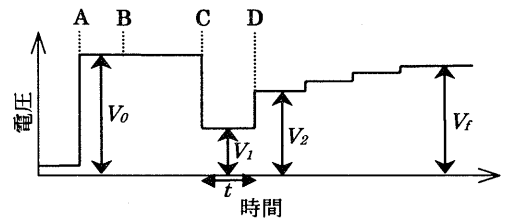


図2 電磁波パルスの電圧変化の理想図。

が低下する(図2のC点)。反射されずに土壌中に進入した電磁波は、ロッドに沿ってその先端まで伝わる。ロッドの先端(D地点)に到達した電磁波は、(ここで放射による損失がなければ)同じ位相で完全反射する(堀野・丸山, 1992)。その電磁波がTDR装置に向かって進行しC地点に到達すると、そこで再び、一部が反射し残りが同軸ケーブルの方へ透過する。その透過した電磁波が取り込まれると図2のD点のように電圧が増加する。ロッドの根元と先端の間を往復する電磁波の一部がTDR装置本体に向かって透過することによって、図2のような階段状の電圧の変化が見られる。

電磁波がプローブロッドの根元と先端の間を往復するのにかかる時間(図2のC-D点間の時間) t は、プローブの周囲の媒体(試料)の誘電率 ϵ によって変化する。

$$t = \frac{2L\sqrt{\epsilon}}{c} \quad (3)$$

ここで、 L はロッドの長さ(m)、 c は真空中での電磁波の速さ($m s^{-1}$)である。土壌のみかけの誘電率と構成要素(気相、固相、液相)の関係を表すモデルの一つである、べき乗モデルを用いた場合、土壌のみかけの誘電率 ϵ_a は次式で表現できる(Ansoult *et*

al., 1985).

$$\epsilon_a^k = \epsilon_g^k f_g + \epsilon_s^k f_s + \epsilon_l^k f_l \quad (4)$$

ここで、 f_g , f_s および f_l はそれぞれ気相、固相、液相の体積割合であり、 ϵ_g , ϵ_s および ϵ_l は各相の誘電率である。水の誘電率 (≈ 80) は空気 (≈ 1) と土粒子 (≈ 4) に比べ非常に大きいため、土壌全体の誘電率は土壌水の含有率によって大きく変化する。TDR 法では、この土壌誘電率の含水量依存性に基づき、測定されるみかけの誘電率 ϵ_a から体積含水率 θ を求める。

(3) 式から分かるように、ロッドを往復する電磁波の伝播時間 t が求まれば試料のみかけの誘電率 ϵ_a を算定できる。TDR 法では電磁波の電圧変化の軌跡を解析することによって伝播時間 t を求める。図 2 に示される電圧変化は理想図であり、実際オシロスコープなどに表示される軌跡は、図 3 のような滑らかな曲線である。この図において、ロッドの根元に当たる点 L_0 (立下り点) および 2 本の接線の交点 L_1 (立上り点) 間の時間が、図 2 に示される時間 t に相当する。

TDR 装置から射出される電磁波パルスの電圧を V_0 、試料境界面 (C 地点) を透過する電磁波の電圧を V_1 とすると、それらの関係は次式で表すことが出来る (堀野・丸山, 1992)。

$$V_1 = V_0(1 + \zeta) \quad (5)$$

ここで、 ζ は同軸ケーブルから試料に向かう電磁波の、試料境界面 (ロッドの根元) における反射係数であり、進行方向に向かって手前側と透過先側の誘電率をそれぞれ ϵ_1 と ϵ_2 で表した場合、次の関係式が成り立つ (堤井, 1974)。

$$\zeta = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (6)$$

試料の誘電率が同軸ケーブルの絶縁体やプローブヘッドの材料の誘電率に比べ大きい ($\epsilon_1 < \epsilon_2$) 場合、反射係数 ζ は負値を示す。

試料に進入した電磁波は電圧が減衰しながら伝播し、その減衰特性は次式で示される (Dalton et al., 1984)。

$$V_2 - V_1 = V_1 \exp(-2\alpha L) \quad (7)$$

ここで、 V_2 は距離 $2L$ を伝播しロッド根元に戻った電磁波の電圧である。また、土壌の場合の透減係数 α は、次式で与えられる (Yanuka et al., 1988)。

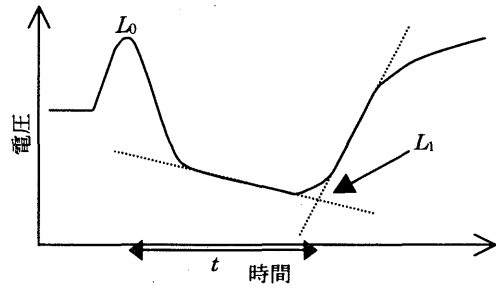


図 3 TDR 装置に現れる電磁波の軌跡。

$$\alpha = 60\pi (\omega\epsilon_0\epsilon'' + \sigma_{dc}) / \epsilon'^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 ϵ' , ϵ'' は試料の複素誘電率の実数部および虚数部、 ω は角周波数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 σ_{dc} は dc 導電率である。また、 ϵ' がみかけの誘電率 ϵ_a に等しい場合 (Topp et al., 1980), $\omega\epsilon_0\epsilon'' + \sigma_{dc}$ は TDR 法で測定される試料の有効電気伝導度 (Topp et al., 1988) であり σ で表すと、(7), (8) 式から次式が得られる。

$$\sigma = \frac{\epsilon_a^{1/2}}{120\pi L} \ln \frac{V_1}{V_2 - V_1} \quad (9)$$

この式は、Dalton et al. (1984) の (7) 式に等しく、これによって算定される試料の電気伝導度を σ_D で表すこととする。

TDR 法による電気伝導度算定式に関しては、(9) 式 (Dalton モデル) の他、Zegelin et al. (1989) が示した次の 3 式などが提案されている。

・Topp et al. (1988) によって示された理論を数式化したもの (Topp モデル)

$$\sigma_T = \frac{\epsilon_a^{1/2}}{120\pi L} \ln \frac{V_1(2V_0 - V_1)}{V_0(V_2 - V_1)} \quad (10)$$

・多重反射モデルを導入し、試料内での反射がすべて完了した後の電磁波の電圧 V_f を用いた Yanuka et al. (1988) によって示された式から導出したもの (Yanuka モデル)

$$\sigma_Y = \frac{\epsilon_a^{1/2}}{120\pi L} \ln \frac{V_1 V_f - V_0(V_1 + V_f)}{V_0(V_1 - V_f)} \quad (11)$$

・Giese and Tiemann (1975) による薄いサンプルの解析理論に基づいて導き出したもの (Zegelin モデル)

$$\sigma = \frac{\epsilon_a^{1/2}}{120\pi L} \frac{V_1}{V_f} \frac{2V_0 - V_f}{2V_0 - V_1} \quad (12)$$

V_f の測定点については、Nadler *et al.* (1991) が $t_f \gg t_\infty \approx 10t$ と示している。

なお、TDR法で測定した土壌電気伝導度 σ は、次式 (Dirksen, 1999) を用いて基準温度の値に換算できる。

$$\sigma(T_{ref}) = \frac{\sigma(T_m)}{1 + 0.0191(T_m - T_{ref})} \quad (13)$$

ここで、 T_{ref} 、 T_m は基準温度および測定試料の温度 (°C) である。本論文では25°Cを基準温度とし、後に述べる溶液および供試体の電気伝導度はこの基準温度での値である。

実験の方法

試料 (ガラスビーズ, 砂) に水溶液を加えて含水率および土壌溶液濃度を調整した供試体を使って、重量法による体積含水率の測定およびTDR法を用いた誘電率と土壌電気伝導度の測定を行った。使用したTDR測定システムは、TDR装置 (Tektronix社製, 1502Bケーブルテスター) と1つのプローブ (3線式, 直径5mmのステンレスロッド, ロッドの長さは0.11m, 両外側のロッドの間隔は0.05m) から構成される。ガラスビーズについては粒径範囲が0.15~0.21mmのものを、砂 (福岡市東区の奈多海岸の砂) については元々含まれている塩を蒸留水で十分に洗い流したものをを用いた。なお、供試体中の塩の分布を出来るだけ均一にするために、試料に加える塩の状態は水溶液とし、その塩には溶解度特性が温度変化に対して敏感でないNaClを選んだ。TDR装置の操作とTDR軌跡の解析は、手動および目視により行った。

測定ではまず、重量を測った試料をステンレスバットにひろげ、設定した体積含水率になるように蒸留水または既知の濃度のNaCl水溶液 (電気伝導度: 1.06, 2.10, 3.11, 4.18, 5.14, 6.24, 7.32 dS m⁻¹) を加えた。それをゴムべらで良くかき混ぜた後ポリエチレンビーカーに均等に充填した。全重量を測定し、重量法により体積含水率を求めた。その供試体にプローブを挿入し、TDR装置によって電磁波の軌跡をプリントアウトした。そのTDR軌跡から立下り点と立上り点の位置を読み取り、それをもとに V_2 および V_f の測定位置を決定し、TDRによる電気伝導度の算定に必要な各点のインピーダンスを測定した。TDR測定

後、供試体の温度を測定した。また、供試体を用いた実験に先立ち、測定システムの特徴を調べるため、水溶液を用いて電気伝導度計 (ES-12, 堀場製作所) とTDR法による電気伝導度の関係を求めた。

結果および考察

ガラスビーズの θ と ϵ_a の関係

ガラスビーズに蒸留水を加えて得られた体積含水率 θ とみかけの誘電率 ϵ_a の関係を図4に示す。この関係を、Topp *et al.* (1980) にならって多項式で表すと次のようになる。

$$\epsilon_a = -52.91\theta^3 + 141.29\theta^2 + 20.64\theta + 3.54 \quad (r^2 = 0.997) \quad (14)$$

$$\theta = -4.87 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2.81 \times 10^{-2} \epsilon_a - 0.079 \quad (r^2 = 0.994) \quad (15)$$

ここで r^2 は決定係数である。この2つの式の決定には最小二乗法を用いた。図中の実線はこれらの関係式を表している。この関係は、Topp *et al.* (1980) によるガラスビーズ (実験18, 平均粒径: 0.03mm) の関係 (図4中の点線) に良く似ているが、僅かな開きが見られる。この差はガラスビーズの粒径の違いによるものと考えられる。

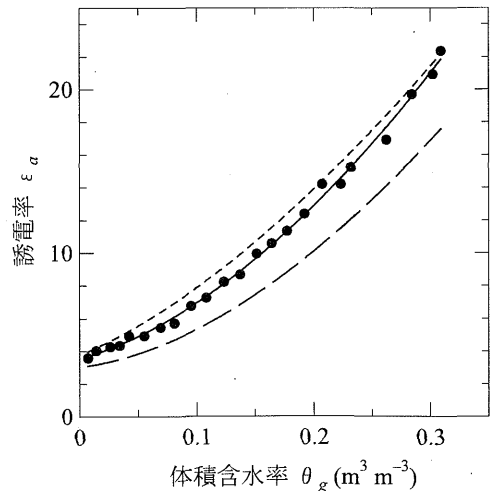


図4 ガラスビーズの体積含水率 θ_g と誘電率の関係 (蒸留水)。●印: 実測値, 実線: 回帰曲線, 点線: Topp *et al.* (1980) によるガラスビーズ (実験18) の関係式, 破線: Topp *et al.* (1980) による無機土壌の関係式。

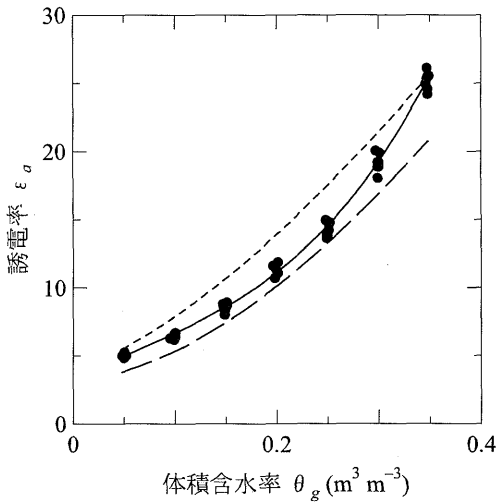


図5 ガラスビーズの体積含水率 θ_g と誘電率の関係 (NaCl 溶液: $EC=1.06\sim 7.32\text{dS m}^{-1}$). ●印: 実測値, 実線: 回帰曲線, 点線: Topp *et al.* (1980) によるガラスビーズ (実験18) の関係式, 破線: Topp *et al.* (1980) による無機土壌の関係式.

ガラスビーズに NaCl 水溶液 ($EC: 1.06\sim 7.32\text{dS m}^{-1}$) を加えた実験の結果を図5に示す。ガラスビーズに蒸留水を加えた場合と同様に, θ と ϵ_a の関係を多項式で表すと次のようになる。

$$\epsilon_a = 447.28\theta^3 - 85.36\theta^2 + 38.84\theta + 3.20 \quad (r^2=0.995) \quad (16)$$

$$\theta = -5.77 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 3.16 \times 10^{-2} \epsilon_a - 0.086 \quad (r^2=0.994) \quad (17)$$

NaCl 水溶液を用いた実験では, 蒸留水のときに比べ誘電率が小さくなっている。この原因を調べるため, NaCl 水溶液を用いた実験での伝播時間 t を, その時の重量法による体積含水率 θ_g に相当する伝播時間 $t(\theta_g)$ と比較した。 $t(\theta_g)$ は, 蒸留水を用いた場合の関係式 ((14) 式) に θ_g を代入して $\epsilon_a(\theta_g)$ を求め, それを (3) 式に用いて算定した。図6は各水溶液濃度における, これら2つの伝播時間の差 $t-t(\theta_g)$ の体積含水率 θ_g による変化を表している。これによると, $t-t(\theta_g)$ が θ_g によって変化していることが分かるが, 水溶液濃度の違いによる影響については明らかではない。

なお, NaCl 水溶液を含む試料で求められた誘電率を蒸留水の場合の関係式 ((15) 式) に代入すると,

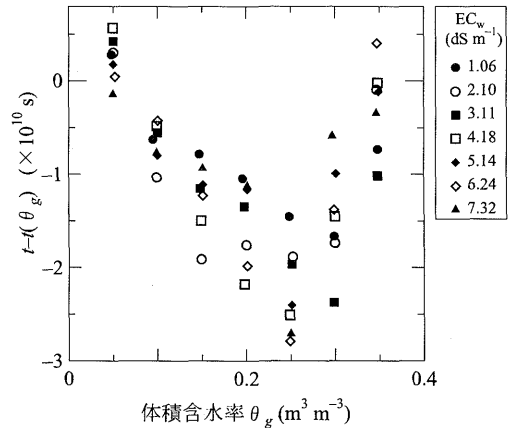


図6 体積含水率 θ_g および水溶液濃度の異なる供試体における伝播時間 t と体積含水率 θ_g に相当する伝播時間 $t(\theta_g)$ の差 $t-t(\theta_g)$ 。

体積含水率を過小評価することにつながる。これは, Dalton (1992) が述べた「間隙水の電気伝導度が 8dS m^{-1} より小さい場合は体積含水率の推定への影響がないが, それを超えると過大評価してしまう」ことと逆の現象である。本実験の結果では 8dS m^{-1} より小さい電気伝導度で $\theta-\epsilon_a$ の関係に明白な変化が現れたことを考えると, その変化の原因は TDR 軌跡の解析の手法または技術的な問題かもしれない。

NaCl 水溶液における EC_w と σ の関係

図7は, NaCl 水溶液における電気伝導度計による電気伝導度 EC_w と TDR 法による電気伝導度 σ の関係を表したものである。TDR 法による電気伝導度の算定には Dalton モデルと Topp モデルを用いた。また, これらの算定式に代入する V_2 には, 図3の立上り点 (点 L_1) から t だけ進んだ地点, およびその地点より時間的に前にある電圧の変化が無い地点の電圧を用いた。図7中のキャプションに記された (2t) および (平坦) はそれぞれ, 前述の V_2 の読み取り位置の違いを表す。この図から, 算定モデルや V_2 の読み取り位置の違いによって, EC_w と σ の関係に違いが生じることが分かる。いずれの場合も両者の間に直線関係が成り立っているが, それらの関係式は原点を通過しない。後に述べるガラスビーズや砂を媒体とする実験では, 土壌水の電気伝導度がゼロに近づくことと TDR 法による σ もゼロに近づくこと, また, Topp *et al.* (1998) が KCl 水溶液で行った実験では, TDR 法による電気伝導度と導電率ブリッジによる測定値との関係が原点を通る直線で表されたことを考え

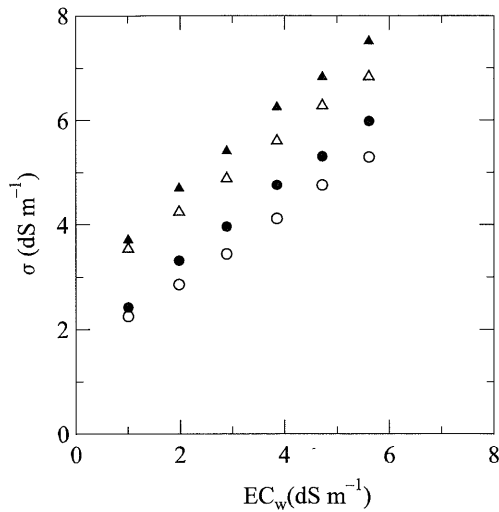


図7 NaCl 水溶液における電気伝導度計と TDR 法による電気伝導度の関係。●印： $\sigma_D(2t)$ ，○印： $\sigma_D(\text{平坦})$ ，◆印： $\sigma_T(2t)$ ，△印： $\sigma_T(\text{平坦})$ 。

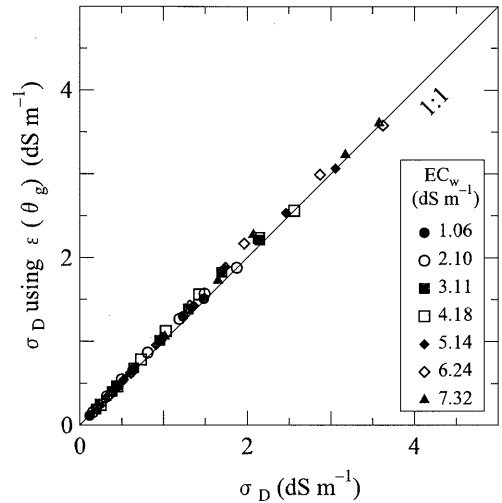


図8 TDR 軌跡から決定した誘電率および体積含水率 θ_g に相当する誘電率を用いた場合の土壤電気伝導度の関係 (横軸が前者，縦軸が後者)。

ると，これらの関係式が原点を通過しないことの原因がどこにあるかを推測することは出来ない。

土壤電気伝導度算定モデルについての検討

4つのモデル ((9), (10), (11) および (12) 式) を用いた電気伝導度 σ の算定では，供試体のみかけの誘電率 ϵ_a を与えなければならないが，先に述べたように，NaCl 水溶液を用いた場合の ϵ_a は蒸留水を用いた場合よりも小さな値を示した。この原因が明らかになっていないので，算定式の ϵ_a に，TDR 軌跡の解析によって得られた値，および体積含水率 θ_g に相当する誘電率の2通りの値を用いて，それらの違いによる σ の算定値への影響を調べた。図8は Dalton モデルによる算定結果である。この図から分かるように，みかけの誘電率の違いによる σ への影響は，溶液の電気伝導度 EC_w の大小にかかわらず小さく，このことは他の算定モデルについても同様であった。そこで今後， σ の算定では TDR 軌跡の解析によって得られた ϵ_a を用いることとする。

図9は，Dalton モデルおよび Topp モデルによる土壤電気伝導度の関係を示している。Dalton モデル (σ_D) より Topp モデル (σ_T) の方が全体的に大きく，またこれらの間の関係は水溶液の電気伝導度に左右されないことが分かる。

土壤電気伝導度の算定において，Yanuka モデル

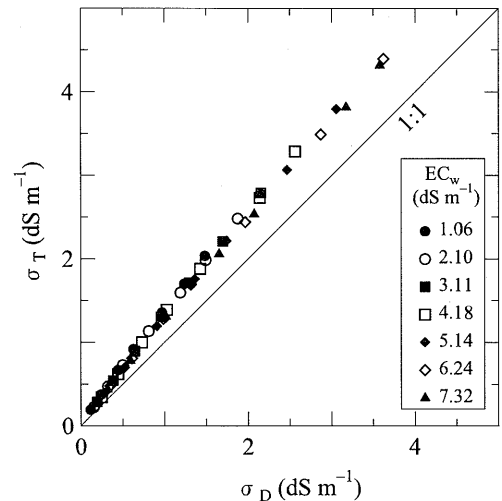


図9 Dalton モデル (σ_D) および Topp モデル (σ_T) による土壤電気伝導度の関係。

および Zegelin モデルでは，試料内での反射がすべて完了した後の電磁波の電圧 V_f が必要とされるが， V_f の測定点について明確には指示されていない。そこで， V_f の測定点の違いにより， σ_Y および σ_Z の算定値がどの程度影響されるか調べた。図10は， EC_w

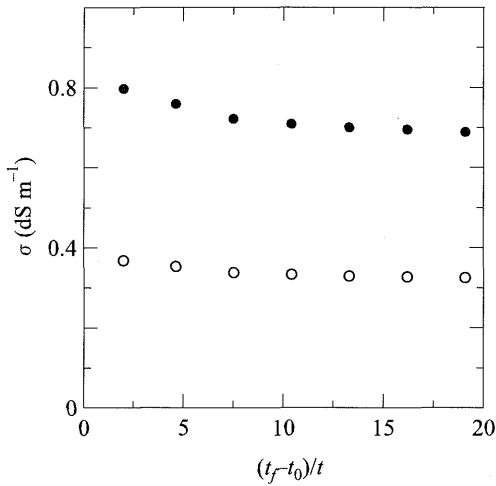


図10 Yanuka モデル (●印) および Zegelin モデル (○印) による電気伝導度の V_f の測定点による変化 ($\theta_g: 0.20\text{m}^3\text{ m}^{-3}$, $\text{EC}_w: 2.13\text{dS m}^{-1}$).

が 2.13dS m^{-1} のときの、 V_f の測定点と σ の算定値との関係を表している。この図の横軸には、TDR 軌跡の立下り点から V_f の測定点までの時間 ($t_f - t_0$) を伝播時間 t で割った値 $(t_f - t_0)/t$ を示している。この図によれば、Yanuka モデル (●印) と Zegelin モデル (○印) の両方とも、 $(t_f - t_0)/t$ が 10 を超えても σ は僅かながら減少し続けていることが分かる。

Yanuka モデルと Zegelin モデルのように V_f の測定点によって土壌電気伝導度³が変化することは、装置の操作および解析を手動で行う場合には、測定誤差の原因となる可能性がある。そこで、Topp モデルが Dalton モデルより改良されたモデルであることを考慮し、以下では Topp モデルを用いた場合について述べる。

ガラスビーズの θ , EC_w と σ の関係

図11は、水溶液電気伝導度 EC_w の異なるガラスビーズにおける体積含水率 θ と土壌電気伝導度 σ の関係を表したものである。これらの関係を Vogeler *et al.* (1996) が示した関数の形で表現すると、次式が得られる。

$$\sigma_T = (1.247\theta - 0.058)\text{EC}_w + (4.899\theta - 0.141) \quad (r^2 = 0.975) \quad (18)$$

なお、この式の係数は重回帰分析によって決定した。

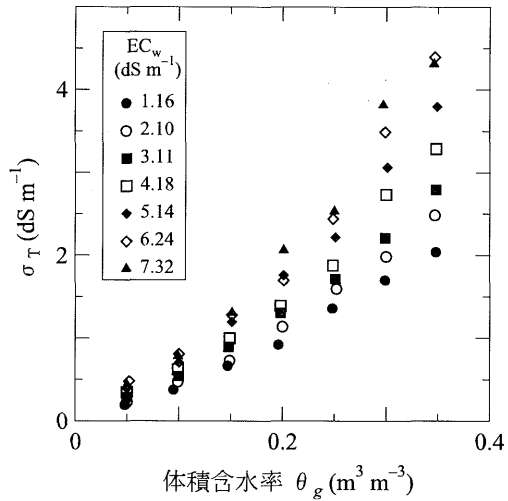


図11 水溶液電気伝導度の異なるガラスビーズにおける体積含水率 θ_g と土壌電気伝導度の関係。

砂を用いた土壌水電気伝導度 EC_w の測定

砂を用いた土壌水電気伝導度の測定に先立ち、体積含水率 θ とみかけの誘電率 ϵ_a の関係、および体積含水率 θ 、土壌水電気伝導度 EC_w と土壌電気伝導度 σ の関係についてキャリブレーション実験を行った。NaCl 水溶液 ($\text{EC}_w: 1.05, 3.28, 5.25, 6.44\text{dS m}^{-1}$) を用いた場合の $\theta - \epsilon_a$ の関係は、次の2式で表された。

$$\epsilon_a = -254.46\theta^3 + 206.44\theta^2 + 3.4991\theta + 3.06 \quad (r^2 = 0.982) \quad (19)$$

$$\theta = -12.85 \times 10^{-4}\epsilon_a^2 + 4.29 \times 10^{-2}\epsilon_a - 0.091 \quad (r^2 = 0.992) \quad (20)$$

また、 θ と EC_w および σ の関係については、図12のような結果が得られた。ガラスビーズの場合と同様にしてこの関係を数式で表すと、次のようになる。

$$\sigma_T = (0.686\theta - 0.016)\text{EC}_w + (3.035\theta - 0.179) \quad (r^2 = 0.987) \quad (21)$$

体積含水率を $\theta = 0.174$ 、土壌水電気伝導度を $\text{EC}_w = 4.00\text{dS m}^{-1}$ に調整した供試体 (砂) について、TDR 法によってみかけの誘電率 ϵ_a および土壌電気伝導度 σ を測定した。 ϵ_a の測定値 (8.69) を (20) 式に代入して得られる体積含水率は 0.185 であり、また、この値と TDR 法による土壌電気伝導度 ($\sigma_T = 0.751$)

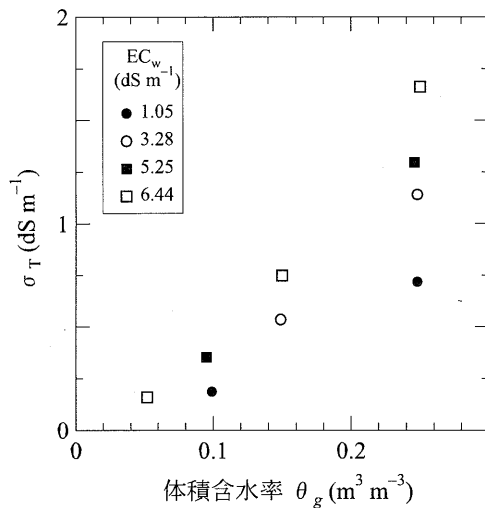


図12 水溶液電気伝導度の異なる砂における体積含水率 θ_g と土壤電気伝導度の関係。

を(21)式に代入した結果、 $EC_w = 3.68 dS m^{-1}$ となった。一方、体積含水率および土壤水電気伝導度の真の値 ($\theta_g = 0.174$, $EC_w = 4.00 dS m^{-1}$) を(21)式に代入して得られる土壤電気伝導度は $0.763 dS m^{-1}$ であり、TDR法による値はこれとほぼ等しいことから、TDR法による土壤水電気伝導度 ($3.68 dS m^{-1}$) と真の値 ($4.00 dS m^{-1}$) との差は誤差の範囲であると思われる。これらのキャリブレーション実験および土壤水電気伝導度測定実験の結果、TDR軌跡の目視による解析によって比較的高い精度で土壤水の電気伝導度を測定できることが示された。

摘 要

土壤水の電気伝導度あるいはその塩分濃度をTDR法で測定するための基礎研究として、ガラスビーズにおける、土壤水の電気伝導度、体積含水率および土壤電気伝導度の関係のキャリブレーション実験を行った。そのキャリブレーション実験を通して、これまでに提案されている4つの土壤電気伝導度算定モデルについて、それらの特徴を把握し、さらにTDR軌跡の目視解析によって測定されるみかけの誘電率と土壤電気伝導度の精度について検討した。また、測定手法の精度を調べるため砂を用いた実験を行った。

ガラスビーズを用いたキャリブレーション実験の結果、同じ体積含水率(重量法)であっても、NaCl水溶液を加えた場合の方が蒸留水の場合よりもみかけの

誘電率が小さく見積もられたが、その原因を明らかにすることは出来なかった。しかし、土壤電気伝導度の算定において、みかけの誘電率にTDR軌跡の解析から得られる値、および体積含水率(重量法)に対応する蒸留水の場合の値を用いたところ、それらの誘電率の違いによる土壤電気伝導度算定値への影響は非常に小さいことが分かった。また、様々な体積含水率と土壤水電気伝導度の条件下において、4つの算定式を用いて土壤電気伝導度を測定し、それら算定式について比較検討を行った。その結果、TDR装置の操作を手動で行うことなどを考慮して、今回の測定システムではToppモデルを使うことに決定した。

砂を用いた土壤水の電気伝導度測定実験において、まずキャリブレーション実験を行った。ここでは4段階の濃度のNaCl水溶液を準備し、各水溶液について体積含水率の異なる2, 3個の供試体を設けた。合計9つの供試体について土壤電気伝導度を測定し、キャリブレーション関数を決定した。次に、土壤水電気伝導度および体積含水率を適当な値に設定した供試体について、TDR法を用いて土壤電気伝導度を測定し、先に求めたキャリブレーション関数に代入して土壤水電気伝導度を推定した。TDR法による体積含水率および土壤水電気伝導度の実際の値との比較の結果、ここで示した測定システムおよび解析手法によって、土壤水の電気伝導度を比較的高い精度で測定可能なことが示された。

文 献

- Ansoult, M., L. W. De Backer and M. Declercq 1985 Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**: 47-50
- Dalton, F. N. 1992 Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. In "Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice", ed. by G. C. Topp, and W. D. Reynolds, SSSA Special Publication Number 30, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin (USA), pp.143-167
- Dalton, F. N., W. N. Herkelrath, D. S. Rawlins and J. D. Rhoades 1984 Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, **224**: 989-990

- Dasberg, S. and F. N. Dalton 1985 Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**: 293-297
- Dirksen, C. 1999 *Soil Physics Measurements*. Catena verl., Reiskirchen (Germany), p.37
- Giese, K. and R. Tiemann 1975 Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry, Improved analysis of the step response waveform. *Advances in Molecular Relaxation Processes*, **7**: 45-59
- 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
- 増田閃一, 石田謙吾 1973 電気特性. 早川宗八郎編: 粉体物性測定法. 朝倉書店, 東京, 147-178
- Nadler, A., S. Dasberg and I. Lapid 1991 Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**: 938-943
- Rhoades, J. D. 1992 Instrumental field methods of salinity appraisal. *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin (USA), 231-248
- Rhoades, J. D., P. A. C. Raats and R. J. Prather 1976 Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**: 651-655
- 堤井信力 1974 電磁波の基礎. 内田老鶴圃, 東京, 45-77
- Topp, G. C., J. L. Davis and A. P. Annan 1980 Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, **16**(3): 574-582
- Topp, G. C., M. Yanuka, W. D. Zebchuk and S. Zegelin 1988 Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resources Research*, **24**(7): 945-952
- Vogeler, I., B. E. Clothier, S. R. Green, D. R. Scotter and R. W. Tillman 1996 Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**: 5-12
- Yanuka, M., G. C. Topp, S. Zegelin and W. D. Zebchuk 1988 Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulse: Theoretical considerations for applications to soil and water. *Water Resources Research*, **24**(7): 939-944
- Zegelin, S. J., I. White and D. R. Jenkins 1989 Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Research*, **25**(11): 2367-2376

Summary

As the fundamental study for the measurement of electrical conductivity, EC, or solute concentration of soil water using TDR method, the calibration experiment of the relationship between EC of soil water, EC_w , volumetric water content, θ , and bulk soil EC, σ , was conducted on glass beads. The characteristics of the four functions for calculating σ were evaluated and the accuracy of the eye analysis of TDR waveform was examined through the calibration experiment. Furthermore the measurement of EC_w using TDR method was done on sand to check the precision of the measuring procedure.

The results of the calibration experiment on glass beads showed that the apparent dielectric constant, ϵ_a , of samples, to which NaCl solution applied, were smaller than that of samples, to which distilled water applied, on the same condition of volumetric water content. The underestimation of ϵ_a on the solution-applied samples might occur because of the unbecoming analysis technique, and the cause of this has not been solved yet. While the comparisons of the σ using ϵ_a of solution-applied sample and that using ϵ_a of distilled water applied sample showed that the influence of the differences of ϵ_a on estimating σ was negligible.

The bulk soil EC was calculated by using four functions in various conditions of θ and EC_w . The values of σ evaluated by these models were compared each other, and the models were examined whether they were suitable for this measuring system. Then the Topp model was selected for the measuring system in consideration of the facts such that the TDR instrument would be operated manually.

For the measurement of EC_w on sand, the calibration experiment of the relation between EC_w , θ and σ was conducted in advance. In the calibration experiment NaCl solution were prepared in four levels of concentration, and the volumetric water content was set two or three levels for each solution level. The data of EC_w , θ and σ were obtained from nine samples and used to determine the calibration function. The sample was prepared in the condition of known values of EC_w and θ . Then the measurement of σ was done for the sample, and the measured σ was used to estimate EC_w by using the calibration function. The fact that the estimated EC_w was close to the actual value indicates that electrical conductivity of soil water would be measured accurately by this measuring procedure.