

誘電混合モデルによるカラム内壁面接着型 TDRプローブのキャリブレーション

宮本英揮*・筑紫二郎*

Calibration of Column-attaching TDR Probe Based on Dielectric Mixing Model

Hideki MIYAMOTO* and Jiro CHIKUSHI*

Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

Abstract

A column-attaching TDR probe (CA probe) was designed to minimize the effect of disturbance on soil matrix during soil-water measurement, and was calibrated using sand for various water contents (θ). Relative dielectric constant for sand increased with water content, and finally reached to 12.7 at saturated condition. Compared with estimate by Topp equation (Topp *et al.*, 1980), smaller relative dielectric constants were observed at all water contents in case for the CA probe. The relative dielectric constants measured by the CA probe should be composite relative dielectric constant (ϵ_T) of 2 components in sampling volume: medium (ϵ_m) and acrylic part (ϵ_{ac}). To evaluate the effect of acrylic part on ϵ_T , contribution of both components was investigated with data sets of relative dielectric constant for ethanol having various concentrations, based on dielectric mixing model ($\epsilon_T = \{w\epsilon_m^\alpha + (1-w)\epsilon_{ac}^\alpha\}^{1/\alpha}$; where w and α are parameters). Combined Topp equation, substituting ϵ_m in the equation by the estimate from the mixing model, relatively agreed with observed ϵ_T at various θ . The determination of mixing model parameters (w and α) with ethanol could make it possible to calibrate ϵ_T vs. θ easier than that with soil.

Key words: Time domain reflectometry (TDR), Relative dielectric constant, Volumetric water content, Topp equation, Dielectric mixing model

1. はじめに

土中の水分移動を定量的に評価したり、土の水分移動特性を決定するためには、土の水分量を測定することが必要である。水分測定に用いるセンサーは高精度で小型であること、また非破壊で迅速に多点の水分計測が可能であることが望ましい。こうした事情から、近年開発された時間領域反射 (Time Domain Reflectometry, TDR) 法と呼ばれる水分測定法が広く活用され始めている。

TDR法による水分測定については、Noborio (2001) の総説に詳しい。TDR法は、土中に埋設した金属プローブに電磁パルスを与え、パルスの伝播速度から評価される土の比誘電率 ϵ_m より、体積含水率 θ を評価する技術

である。比誘電率による体積含水率の評価には、次の Topp *et al.* (1980) の実験式が用いられる。

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_m^3 - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_m^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_m - 5.3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

Topp式は、有機物を多く含む黒ボク土に対する適合性は低いが (Miyamoto *et al.*, 2001)、他の多くの土において、1.3%の以内の誤差で体積含水率を評価することができる (Topp *et al.*, 1980)。

TDR法には、一般に、ステンレス鋼棒を平行に配置した2線式または3線式の平行プローブが多く用いられる。測定精度は、用いるパルスの周波数が大きいほど、またプローブが長いほど高い。こうしたTDR法の特性を踏まえ、実用性の向上を目的として、プローブの小型

*九州大学生物環境調節センター 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

キーワード: 時間領域反射 (TDR), 比誘電率, 体積含水率, Topp式, 誘電混合モデル

化が試みられている。一般的な平行プローブでは、1 GHz のパルスで 5 cm 程度 (Malicki *et al.*, 1992), 20 GHz では 2.5 cm にまで、プローブを短くすることができる (Kelly *et al.*, 1995)。また、プローブをコイル状あるいは蛇行させることにより、小型化と高精度化を実現した特殊な形状のプローブも開発されている (Nissen *et al.*, 1998 ; Selker *et al.*, 1993)。

一方、室内のカラム実験では、TDR プローブを設置する過程で乱れが生じたり、また、あらかじめ TDR プローブをカラムに設置する場合には、土の均一充填が困難になることが多い。このような土の乱れや不均一充填は、高い精度が要求される室内のカラム実験において、測定結果に誤差を生む要因となるため、誤差の影響を低減することが可能な形状のプローブを開発する必要がある。

しかし、特殊な形状を持つプローブは、小型であるために利便性が高いものの、測定される比誘電率・体積含水率に対して Topp 式の適合性が低いことが知られている (Selker *et al.*, 1993)。そのため、測定対象となる土の種類やプローブに応じて、別途、キャリブレーションを実施する必要が生じ、実用性に欠ける側面を持つ。こうした背景から、プローブ形状の改良に加え、特殊形状プローブを用いる場合の簡便なキャリブレーション法の確立も重要な課題である。

そこで、本研究では、乱れの影響を低減した土壌カラムの水分計測のために、アクリル板にウェーブガイドを接着した Selker *et al.* (1993) の改良型プローブとして、アクリル製円筒カラム内壁面に銅箔を接着したプローブ (以後、CA プローブと略す) を作成した。そして、体積含水率が異なる砂を対象に、CA プローブが示す比誘電率を計測するとともに、エタノール溶液の比誘電率測定およびプローブ断面の電場シミュレーションにより、プローブの誘電特性を検証した。また 3 線式プローブについても同様の検証を行い、誘電特性の違いから CA プローブの特性を調べるとともに、簡便なキャリブレーション法について検討した。

2. 実 験

2.1 CA プローブのキャリブレーション

本研究に用いた 2 種類の TDR プローブの模式図を図-1 に示す。内径 5 cm, 外径 6 cm, 高さ 3 cm のアクリル製円筒カラム ((株) さくら樹脂) の内壁面中央部に、長さ 15 cm, 幅 0.2 cm, 厚さ 0.008 cm の銅箔テープを、0.2 cm 間隔で平行に接着し、CA プローブを作成した。ステンレス鋼棒を介して銅箔テープ端面と同軸ケーブルを接続し、ステンレス鋼棒と同軸ケーブルの接続部を接着剤

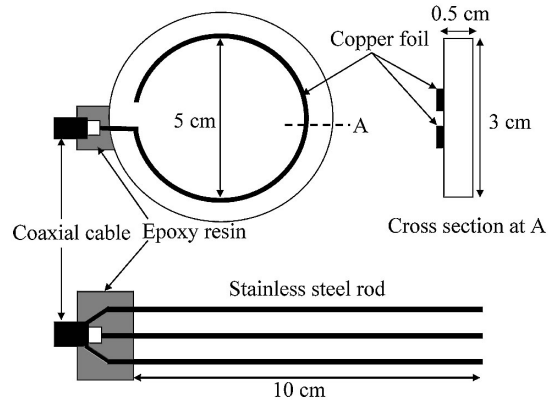


図-1 CA プローブと 3 線式プローブの模式図

Fig. 1 Schematic diagram of CA probe and 3-wire probe.

で固定した。また、比較対象となる標準型のプローブとして、直径 0.16 cm, 長さ 10 cm の 3 本のステンレス鋼棒を 0.6 cm 間隔で平行に配置した 3 線式プローブも作成した。

キャリブレーションに用いた供試土は、福岡市東区箱崎一帯に広がる砂層から採取した箱崎砂 (以後、砂と略す) である。風乾の含水比は $0.0014 \text{ kg}^3 \text{ kg}^{-3}$, 土粒子密度は 2.62 Mg m^{-3} である。砂と蒸留水をビニル袋内で混合し、両者の混合比を変えることにより、水分量の異なる試料を用意した。水分量を調整した各試料は、CA プローブ内に乾燥密度 1.5 Mg m^{-3} となるように充填した。充填した試料の体積含水率 θ は 0 (風乾), 0.002, 0.04, 0.09, 0.14, 0.18, 0.23, 0.27, 0.29, 0.33, 0.34, 0.37, 0.39, 0.40, $0.43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ である。

1502C 型ケーブルテスター (Tektronix 社) を用いて、各試料を充填した CA プローブに電磁パルスを与え、その反射波の波形を取得した。波形解析ソフト・WinTDR (Or *et al.*, 1998) で、取得した波形から見かけのプローブ長 (L_a) を評価し、 L_a と実際のプローブ長 (L) の比の二乗 ($\epsilon = (L_a/L)^2$) から比誘電率を評価した。

また、蒸留水 (DW), 空気, エタノール, 希釈したエタノール (重量分率: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 kg kg^{-1}) に対しても、CA プローブが示す比誘電率を測定した。CA プローブの特性を把握するために、3 線式プローブにおいても同一媒体の比誘電率を測定し、両者の違いを比較した。

2.2 プローブ周辺の電場シミュレーション

TDR プローブは、プローブの直径や間隔などの形状に加え、プローブの周辺媒体の状況に影響される。こう

した周辺媒体の影響は、数値解析を利用して調べられている (Knight *et al.*, 1997)。

電気ポテンシャル ϕ と電荷密度 ρ との間には、次の Poisson の方程式が成立する (Knight *et al.*, 1997)。

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2)$$

ϵ は、誘電率を示す。 $x-y$ 断面において、電荷の湧き出しのない定常な電場では、(2)式は Laplace の方程式に変形できる。

$$\epsilon \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

一方、土中の不飽和水分移動は Richards の式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K(h) \cdot \nabla^2 H \quad (4)$$

t は時間、 K は透水係数、 h は圧力水頭、 H は全水頭を示す。ここで、水平な $x-y$ 断面の飽和定常流れでは、水分量の変化がないことから(4)式の左辺はゼロ、水平方向の流れでは重力の影響は無視できることから H は h に置き換えられ、また、水分飽和状態では透水係数 K は飽和透水係数 K_s と置き換えることができ、次式のように変形できる。

$$K_s \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (5)$$

(5)式は、(3)式と同型の Laplace の方程式であり、水平な二次元断面における飽和定常流と電場の支配方程式は、数学的に等価とみなすことができる。この共通点を活用し、圧力水頭を電気ポテンシャル、飽和透水係数を比誘電率に置き換えて考えることにより、近年、土中の水分・溶質移動計算に広く用いられている HYDRUS-2D (Šimůnek *et al.*, 1996) を用いて、TDR プロープ周辺の電場シミュレーションを行った。

図-2 は、3線式プロープおよび CA プロープ断面における電場シミュレーションの模式図である。なお、黒色のプロープはウェーブガイド、白色はシールド線と接続したプロープを示す。縦 10 cm、横 10 cm の二次元空間の中央に 3線式および CA プロープが存在し、3線式プロープの周囲には水、CA プロープの周囲には水とアクリルの両者が存在すると考え、有限要素メッシュを作成した。

ここで、HYDRUS-2D を用いて電場シミュレーションを行う場合、計算で与える物質の水分移動特性を、次

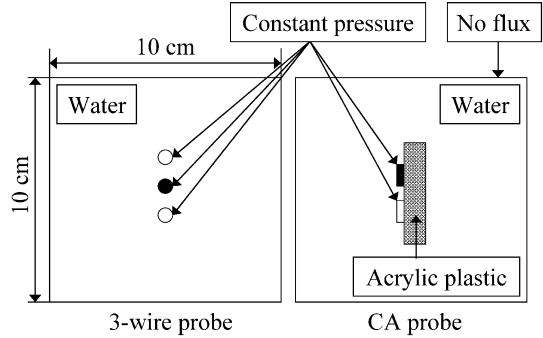


図-2 TDR プロープ周辺の電場シミュレーションの模式図

Fig. 2 Schematic diagram of electric simulation around TDR probes.

の van Genuchten (1980) の水分移動モデルで記述しなければならない。

$$K(\theta) = K_s \theta_E^{1/2} [1 - (1 - \theta_E^{1/2})^m]^2, \quad \theta_E(h) = \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (6)$$

α, n, m は水分移動パラメータを表し、 θ_E と m は、

$$\theta_E = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (7)$$

で表される。 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率である。飽和浸透流の状態を実現するためには、(6)式において $\theta_E \equiv 1$ 、すなわち $K(\theta) \equiv K_s$ の成立が必要である。そこで、蒸留水およびアクリルを表す物質のパラメータとして、 $\theta_s = 1, \theta_r = 0, \alpha = 1.0 \times 10^{-13}, n = 1.0001$ を便宜的に入力した。ここで、20°C の水の比誘電率は 80 (Noborio, 2001)、本研究に用いたアクリルの比誘電率 2.2~3.2 である。比誘電率の代替値として与える K_s は、水を基準とした相対値で入力し、水には 1、アクリルには比誘電率 (2.2~3.2) の中間値 2.7 に対する 0.034 をそれぞれ与えた。

プロープ表面に与える境界条件として、HYDRUS-2D で与えられる種々の条件の中から Constant pressure を与えた。パルスが進行する黒色のウェーブガイド表面の圧力を 1、白色で示したシールド部を 0 とし、個々のプロープ表面の電気ポテンシャルを相対値で表した。一方、外周に与える境界条件には、Knight *et al.* (1997) の方法と同様に、プロープから外周が十分に離れており、外周を直行する電気力線数がゼロ、すなわち外周におけるポテンシャル勾配がゼロと考え、それを実現する No

flux を境界条件として与えた。以上の手順でプローブ断面周辺の電場シミュレーションを実施し、プローブによる電場環境の違いを比較した。

3. 結果と考察

3.1 キャリブレーション

CA プローブで測定した各試料の TDR 波形の中から、蒸留水および $\theta=0.002, 0.09, 0.23, 0.33, 0.43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の試料における波形を図-3 に示す。平行なウェーブガイドを持つ標準的な TDR プローブでは、第一ピークから第二反射地点までの距離が示す見かけのプローブ長 L_a は、 θ の増加とともに大きくなることが知られており、本研究の3線式プローブも同様の傾向を示した (図は示していない)。一方、CA プローブも3線式プローブと同様に、 θ が高い試料ほど L_a は大きくなる傾向がみられた (図-3)。 θ が低くなると、第一ピークと第二反射地点の間で反射係数の不規則変動がみられたが、この変動は、第二反射地点の検出や L_a の評価には影響しなかった。

図-4 は、3線式プローブとCAプローブのTDR波形から評価した各試料の比誘電率と体積含水率 θ の関係である。なお、図-4には、(1)式を実線で併記した。標準的なプローブである3線式プローブの実測値は(1)式上に分布し、また実測値に対するTopp式の R^2 は0.988と非常に高く、3線式プローブではTopp式に即した結果が得られた。CAプローブにおいても、高水分領域で多少のばらつきはみられるものの、 θ が高い試料ほど評価される比誘電率が大きくなり、水分飽和状態 ($\theta=0.43$) では12.7に到達した。ところが、各試料が示した比誘電率は、3線式プローブで測定された値より小さく、また、 θ の増加量に対する比誘電率の増加量も小さい。

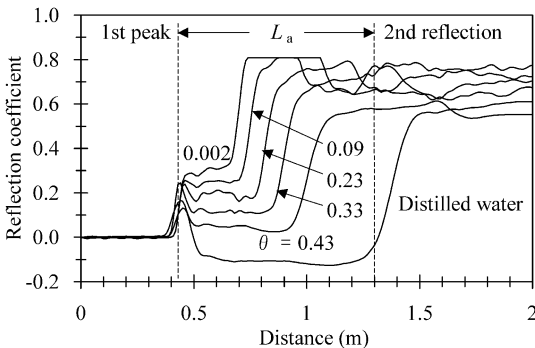


図-3 CA プローブで測定した水および水分量の異なる箱崎砂の TDR 波形

Fig. 3 TDR waveforms for water and sands having various water contents using CA probe.

Topp 式は、標準的な TDR プローブに対しては適合性が高いことが知られており、本研究に用いた3線式プローブも同様の性質を示している。しかし、Selker *et al.* (1993) が作成した蛇行型プローブでは、測定された比誘電率が Topp 式で評価したものよりも小さくなることが報告されている。本研究のCAプローブも、Selker *et al.* と同様の結果を示していることから、実測値と Topp 式のずれは、特殊な形状を持つ TDR プローブの共通点と考えられる。

3.2 CA プローブの特性

表-1 は、3線式プローブおよびCAプローブで評価した蒸留水、濃度 (C) の異なるエタノール、空気の比誘電率の一覧である。CA プローブで評価された各媒体の比誘電率は、空気を除き、3線式プローブの半分程度と小

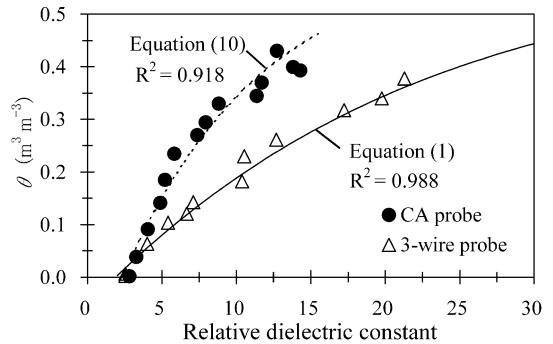


図-4 比誘電率と体積含水率 θ の関係

Fig. 4 Volumetric water content θ for relative dielectric constant.

表-1 3線式およびCAプローブで測定した蒸留水(DW)、空気、濃度の異なるエタノールの比誘電率

Table 1 Relative dielectric constant of distilled water (DW), air, and ethanol having different concentration measured by 3-wire probe and CA probe.

C (kg kg ⁻¹)	Relative dielectric constant	
	3-wire probe	CA probe
DW	81.0	36.4
0.2	67.3	30.5
0.4	56.3	25.8
0.6	41.6	19.6
0.8	29.6	14.5
1.0	19.0	10.0
Air	1.5	3.1

さい。3線式プローブでは、蒸留水の比誘電率が81.0と既往の報告(Noborio, 2001)とほぼ等しい結果であり、全体的に良好な測定結果であると考えられる。そのため、CAプローブが示した比誘電率は、媒体の持つ比誘電率が過小評価されたものと推察される。

HYDRUS-2Dで評価した3線式およびCAプローブ断面における相対電気ポテンシャルおよび相対電界強度の分布を図-5に示す。なお、分布図の一边は3cmの正方形で、破線はアクリルが存在する位置を示す。3線式プローブの相対電気ポテンシャルは、ウェーブガイドを中心とした左右対称の分布を示し、また、電界強度は特にウェーブガイド近傍において高くなった。電界強度が高い領域は、ウェーブガイドを中心とした左右0.6cm程度の幅で、この範囲が3線式プローブのサンプリング体積と考えられる。

一方、CAプローブの相対電気ポテンシャル分布はや

や左方に偏り、電界強度もウェーブガイドの左方においてのみ高くなる分布となった。この電界強度の偏りは、プローブ背面にアクリルが存在するためであり、このことが測定媒体の持つ比誘電率の過小評価(表-1)、およびTopp式の不適合(図-4)の原因と考えられる。

また、CAプローブのサンプリング体積は、左方への約0.1cmの電界強度の偏りから判断して、ウェーブガイドを中心とした幅0.2~0.3cmの範囲と考えられる。本研究では、水分を調整した試料をCAプローブ内に充填し、即座に比誘電率を計測したため、測定された比誘電率は、試料全体の平均的な水分量を反映したと考えられる。しかし、カラム断面に対して不均一な水分分布を持つような場合には、誤差を生む可能性が高いため、CAプローブは均一な水分分布を持つ条件下での使用が望ましいと考えられる。

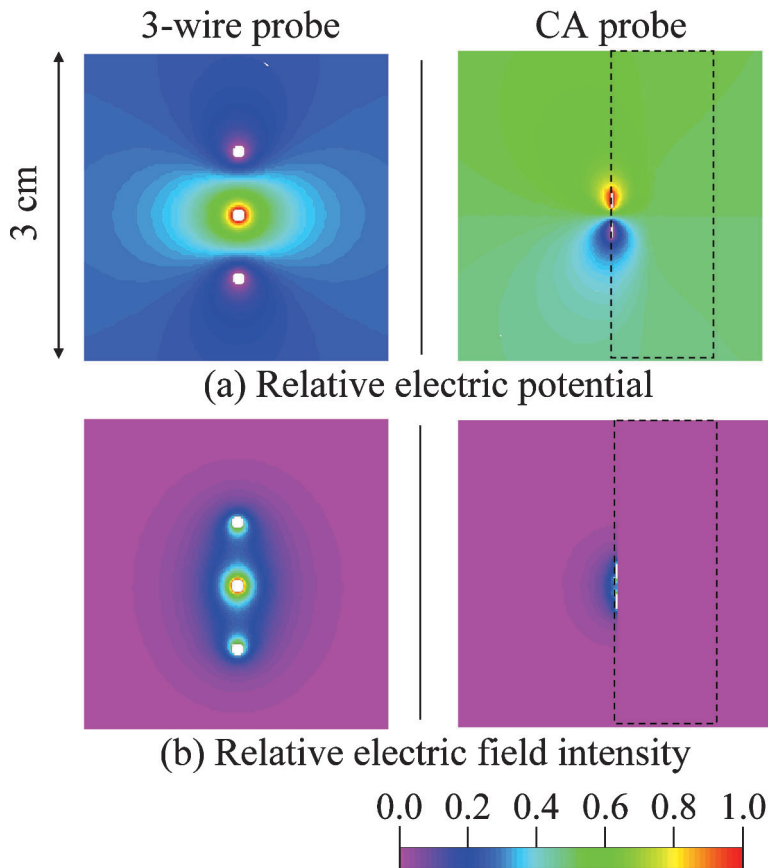


図-5 3線式およびCAプローブ周辺の (a) 相対電気ポテンシャルおよび (b) 相対電界強度
 Fig. 5 (a) Relative electric potential and (b) relative electric field intensity around 3-wire probe and CA probe.

3.3 誘電混合モデルによるプローブ特性の評価

複数の物質から構成される混合物の比誘電率は、誘電混合モデルにより、各構成物質の比誘電率の合成値として表される。比誘電率が ϵ_1 および ϵ_2 と異なる物質からなる混合物の場合、混合物の比誘電率は両者の合成値、すなわち複合比誘電率 ϵ_T として次式で表される (Roth *et al.*, 1990)。

$$\epsilon_T = \{w\epsilon_1^\alpha + (1-w)\epsilon_2^\alpha\}^{1/\alpha} \tag{8}$$

w は物質の構成比、 α は構成物質の配列を表すパラメータである。Nissen *et al.* (1998) は、誘電混合モデルにより、自作したコイル型プローブで測定された比誘電率を、媒体とそれ以外の物質との複合比誘電率と考えた。本研究においても、CAプローブが示す比誘電率を、測定対象である内部の媒体とアクリル部の複合比誘電率と考え、(8)式の ϵ_1 を測定媒体の比誘電率 ϵ_m 、 ϵ_2 をアクリル部の比誘電率 ϵ_{ac} に置き換えると、次式が得られる。

$$\epsilon_T = \{w\epsilon_m^\alpha + (1-w)\epsilon_{ac}^\alpha\}^{1/\alpha} \tag{9}$$

そして、表-1の測定値より、3線式プローブが示す比誘電率を各媒体自身の比誘電率 ϵ_m 、アクリル部の比誘電率 ϵ_{ac} を2.7と考え、非線形最小二乗法によりパラメータ w および α の最適化を行った。図-6は、同一媒体における ϵ_T と ϵ_m の関係で、図中には $\epsilon_T = \epsilon_m$ の直線および非線形最小二乗法で得た近似曲線も併記している。

最適化した w は0.412、 α は1.07となり、近似曲線 $\epsilon_T = (0.412\epsilon_m^{1.07} + 0.588\epsilon_{ac}^{1.07})^{1/1.07}$ は $\epsilon_T = \epsilon_m$ の直線の下部に位置し、媒体の真の比誘電率が過小評価されていることが分かる。また、アクリル部が存在しない場合は、 w は

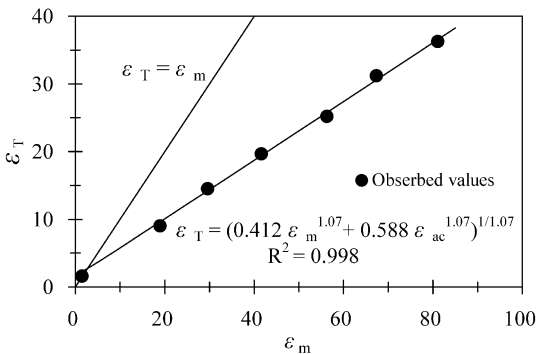


図-6 媒体の比誘電率 ϵ_m に対する CA プローブで測定した複合比誘電率 ϵ_T

Fig. 6 Composite relative dielectric constant ϵ_T measured by CA probe for relative dielectric constant of media ϵ_m .

1になると考えられるが、CAプローブにおける w は0.412と小さく、複合比誘電率に与えるアクリル部の影響が無視できないことが分かる。このことは、逆に、 w が1に近いプローブほど精度が高く、Topp式や混合モデルなどの適合性も高くなることも示す。エタノール等の比誘電率が既知の媒体を用いて、(9)式中のパラメータを決定する手法は、プローブの形状や個性を定量的に評価するうえで、有効であると考えられる。

3.4 誘電混合モデルを介した Topp 式の適用

前節では、CAプローブと3線式プローブを併用した媒体の比誘電率測定と、誘電混合モデルの導入により、CAプローブで測定される比誘電率におよぼす媒体部とアクリル部の効果を評価することができた。そこで、(9)式を ϵ_m について整理して、それを(1)式に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \theta = & 4.3 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{w} \epsilon_T^\alpha - \frac{1-w}{w} \epsilon_{ac}^\alpha \right)^{3/\alpha} \\ & - 5.5 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{w} \epsilon_T^\alpha - \frac{1-w}{w} \epsilon_{ac}^\alpha \right)^{2/\alpha} \\ & + 2.92 \times 10^{-2} \left(\frac{1}{w} \epsilon_T^\alpha - \frac{1-w}{w} \epsilon_{ac}^\alpha \right)^{1/\alpha} - 5.3 \times 10^{-2} \end{aligned} \tag{10}$$

(10)式は、誘電混合モデルとTopp式の組み合わせることにより、CAプローブで測定される比誘電率からアクリル部の影響を除外した組み合わせモデルである。このモデルで評価した複合比誘電率と体積含水率の校正式を、前述の図-4に破線で追記した。

CAプローブを用いて計測した各試料の比誘電率にTopp式は合致しなかったが(図-4)、誘電混合モデルを介した場合は、実測値に対するTopp式の適合性は飛躍的に向上した ($R^2 = 0.918$)。このことは、誘電混合モデルを導入してプローブの w および α を決定することにより、CAプローブのような特殊な形状を持つTDRプローブにおいても、Topp式の適用が可能であることを示している。

ただし、(10)式の組み合わせモデルは、Topp式の適用限界を受け継いでいると考えられるため、粘土分や有機物を多く含む土に対しては適用できない可能性が高い。しかし、そうした土においても、標準型のプローブで測定された既存の校正式と(9)式を組み合わせることにより、(10)式と同様の、特殊形状プローブに適合した校正式を得ることができると考えられる。こうした利点を考慮すると、様々な土に対して測定された既存の校正式を無駄なく活用できる可能性がある誘電混合モデルを介したキャリブレーション法の提案意義は大きいと考えられる。

本研究では測定条件が限られているため、今後は、他の土の種類や他の形状のプローブにおいてもデータを蓄積し、誘電混合モデルを介したキャリブレーション法の有効性を詳しく検証する必要がある。

4. ま と め

土壌カラムの水分測定の精度および実用性の向上を目的として、カラム接着型 TDR プローブを（CA プローブ）を作成し、砂を対象にキャリブレーションを行うとともに、得られた水分校正式に対する Topp 式の適合性を調べた。また、プローブ断面の電場シミュレーションと、濃度の異なるエタノールや空気を対象とした比誘電率測定により、CA プローブの誘電特性を検証した。

CA プローブで測定された砂の比誘電率は、標準的な TDR プローブである 3 線式プローブと同様、体積含水率が高いほど大きくなる傾向がみられた。しかし、各試料が示す比誘電率は Topp 式から求まる推定値より小さく、Topp 式の適合性も低かった（図-4）。蒸留水、エタノール、空気などの種々の媒体に対しても、CA プローブが示す比誘電率は、3 線式プローブの半分程度と小さかった（表-1）。このことは、プローブ背面の非誘電性のアクリルにより、サンプリング体積内の電場に強い偏りが生じるためと考えられる（図-5）。

CA プローブで測定される比誘電率を、測定媒体およびアクリル部の複合比誘電率と考える誘電混合モデルを導入し、3 線式プローブが示す比誘電率を測定媒体の真の比誘電率とみなし、媒体部とアクリル部の影響をパラメータとして定量的に評価した（図-6）。その結果、CA プローブが示す複合比誘電率に対して、アクリル部の影響が無視できないことが明らかになった。

アクリル部の効果を測定された比誘電率から除外、すなわち誘電混合モデルと Topp 式を組み合わせるモデルにより、複合比誘電率 - 体積含水率を再評価したところ、実測値に対する Topp 式の適合性が飛躍的に向上した。本研究では、測定条件が限られているものの、エタノール等の媒体を用いて形状特性を評価することにより、CA プローブをはじめとした特殊形状プローブにおいても、Topp 式による適切な体積含水率の評価が可能と考えられた。

謝 辞

本研究の実施にあたり、バングラディッシュ農科大学の M.A. Mojid 博士には貴重なご意見を多数いただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Kelly, S.F., Selker, J.S. and Green, J.L. (1995) : Using short soil moisture probe with high-bandwidth time domain reflectometry measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 97-102.
- Knight, J.H., Ferré, P.A., Rudolph, D.L. and Kachanoski, R.G. (1997) : A numerical analysis of the effects of coatings and gaps upon relative dielectric permittivity measurement with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, **33** : 1455-1460.
- Malicki, M.A., Plagge, R., Renger, M. and Walczak, R. T. (1992) : Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores, *Irri. Sci.*, **13** : 65-72.
- Miyamoto, T., Kobayashi, R., Annaka, T. and Chikushi (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.
- 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.
- Noborio, K. (2001) : Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry : a review. *Computers and electronics in agriculture*, **31** : 213-237.
- Or, D., Fisher, B., Hubscher, R. A. and Wraith, J. (1998) : WinTDR 98 V.4.0, Users guide. Utah States University.
- Roth, K., Schulin, R., Flüher, H. and Attinger, W. (1990) : Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.*, **26** : 2267-2273.
- Selker, J.S., Graff, L. and Steenhuis, T. (1993) : Non-invasive time domain reflectometry soil moisture measurement probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 934-936.
- Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, M. Th. (1996) : The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. U.S.

Salinity Laboratory.

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.

van Genuchten, M. Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44** : 892-898.

要 旨

土壌カラムの水分計測精度の向上を目的として、カラム接着型 TDR プローブ (CA プローブ) を作成し、キャリブレーション、プローブ断面の電場シミュレーション、様々な媒体による検定を実施し、CA プローブの特性を検証した。CA プローブは、背面のアクリルの存在により電場環境に偏りが生じるため、標準的な並行プローブに比べ測定媒体の比誘電率を過小評価する特徴を持ち、また、測定された比誘電率-体積含水率の関係に対する Topp 式の適合性は低かった。しかし、誘電混合モデルと Topp 式を組み合わせ、測定された比誘電率からアクリル部の効果を除外したところ、実測値に対する Topp 式の適合性が大きく向上することが明らかになった。

受稿年月日 : 2006 年 2 月 27 日

受理年月日 : 2006 年 6 月 30 日