

誘電混合モデルによるカラム内壁面接着型 TDR プロブのキャリブレーション Calibration of Column-attaching TDR Probe Based on Dielectric Mixing Model

宮本英揮¹ 筑紫二郎¹
Hideki Miyamoto Jiro Chikushi

1. はじめに

近年、土壌の誘電率から体積含水率 を評価する時間領域反射(TDR)法が普及し、実用性の向上を目的に様々な小型 TDR プロブが開発されている。ところが、高精度が要求される室内のカラム実験では、土壌カラムへのプロブの埋設に伴う乱れが、測定誤差の要因となる場合がある。本研究では、乱れの影響を低減した TDR プロブとして、カラム内壁面接着型プロブ(CA プロブ)を作成し、キャリブレーションを実施した。また、種々の液体の誘電率測定および電場シミュレーションにより、CA プロブの誘電特性を評価するとともに、簡便なキャリブレーション法を検討した。

2. 実験方法

内径 5 cm、高さ 3 cm のアクリルカラム内壁面の中央部に、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 プロブを作成した(Fig. 1)。1502C 型ケーブルテスター(Tektronix 社)を用いて、CA プロブにおける蒸留水、空気、エタノール(重量比:0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 kg kg⁻¹)の誘電率を測定した。比較のために、直径 0.16 cm、長さ 10 cm の平行型の 3 線式プロブにおいても、同一媒体の測定を行った。また、定常な飽和浸透流と電場の支配方程式は数学的に等価であることを踏まえ、2 次元水分移動計算ソフト HYDRUS-2D により、蒸留水中における両プロブ断面周辺の電場シミュレーションを行い、各プロブの電場特性を検証した。

砂と蒸留水をビニル袋内で混合し、体積含水率 を 0, 0.04, 0.09, 0.14, 0.18, 0.23, 0.27, 0.29, 0.33, 0.34, 0.37, 0.40 m³ m⁻³ に調整し、乾燥密度 1.5 Mg m⁻³ で CA プロブ内に充填し誘電率を測定した。蒸留水を加えながら風乾試料を充填して作成した水分飽和土($\theta = 0.43$)においても誘電率を測定した。そして、得られた各試料の誘電率に対する Topp 式の適合性を調べた。

3. 結果と考察

Table 1 は、3 線式プロブおよび CA プロブで測定した蒸留水(DW)、各濃度 C のエタノール、空気の誘電率である。3 線式プロブでは、蒸留水の誘電率が 81.0 と既往の報告に即した適性値を示し、また、エタノール濃度の増加とともに低下した。一方、CA プロブでも濃度の増加に対して同様の減少がみられるものの、各媒体の誘電率は 3 線式プロブの約半分と小さい。

プロブ断面周辺の相対電界強度の分布を Fig. 2 に

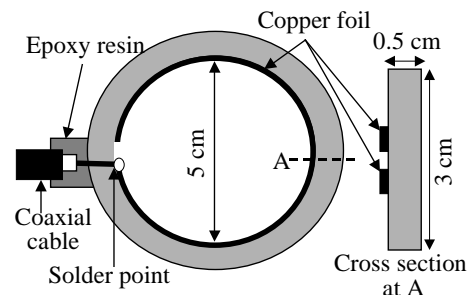


Fig. 1 CA プロブの模式図
Schematic diagram of CA probe .

Table 1 各媒体の誘電率.
Dielectric constant of mediums.

C (kg · kg ⁻¹)	Dielectric constant	
	3-wire probe	CA probe
0.0 (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

示す。なお、破線はアクリルの位置を示す。3 線式プローブの電界強度は、中心から外側へと低くなる左右対称の分布を示した。一方、CA プローブの電界強度は左方のみ高く、プローブ背面のアクリルの影響による偏った分布となった。ここで、CA プローブが示す誘電率を、測定媒体部の誘電率 ϵ_m とアクリル部の誘電率 ϵ_{ac} の合成誘電率 ϵ_T と考えると、二相の誘電混合モデルにより、 ϵ_T は次式で表される。

$$\epsilon_T = \left\{ w\epsilon_m^\alpha + (1-w)\epsilon_{ac}^\alpha \right\}^{1/\alpha} \quad (1)$$

w は物質の構成比、 α は配列パラメータである。3 線式プローブで測定した誘電率を各媒体の真の誘電率 (Table 1)、アクリル部の誘電率 ϵ_{ac} を 4.0 と考え、最小二乗法で(1)式の最適化を行うと、Fig. 3 の曲線が得られる。曲線の傾きは、 $\epsilon_m = \epsilon_T$ より小さく、CA プローブは誘電率の大小に対して感度が低いこと、また、媒体の真の誘電率を過小評価することが分かる。最適化曲線において、 ϵ_{ac} にかかる係数 0.628 は w の約 2 倍と大きく、 ϵ_T に与えるアクリル部の影響が大きいことが、電界強度分布の偏りと (Fig. 3)、誘電率の過小評価の原因と考えられる。

CA プローブで測定した砂の合成誘電率 ϵ_T との関係を図 4 に示す。2 あるいは 3 線式プローブ等の標準的な TDR プローブと同様、CA プローブで測定された各試料の誘電率は、 ϵ_T が高い試料ほど大きくなった。しかし、測定された ϵ_T と θ に対して、多くの土で高い適合性が確認されている Topp 式 (Topp et al., 1980) は、全く適合しなかった。

ここで(1)式を ϵ_m について整理し、Fig. 4 中に併記した Topp 式に代入すると、 θ は ϵ_T の関数として次式のように修正できる。

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

(2)式から得た $\epsilon_T - \theta$ 関係を Fig. 4 に併記した。Topp 式に比べ、修正 Topp 式は実測値に対して高い適合性を示している。従来、特殊な形状を持つプローブでは、Topp 式に基づく適切な評価は出来ないとされてきた。しかし、修正 Topp 式の高い適合性は、エタノール等の媒体を用いて CA プローブの形状特性 (w, α) を評価し、その影響を Topp 式に反映させることにより、Topp 式に基づく適切な評価が十分に可能であることを示している。今後は、他のプローブや土においてもデータを蓄積し、修正モデルの有効性と適用限界を検証する予定である。

引用文献: Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980) : *Water Resour. Res.*, 16: 574–582.

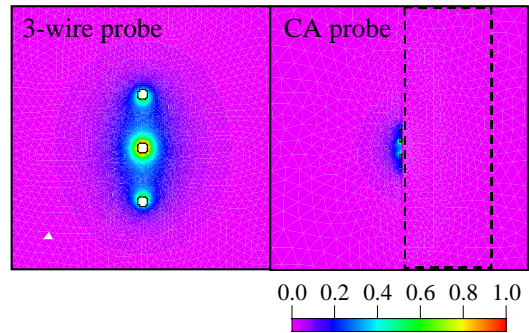


Fig.2 相対電界強度分布
Distribution of relative electric field intensity.

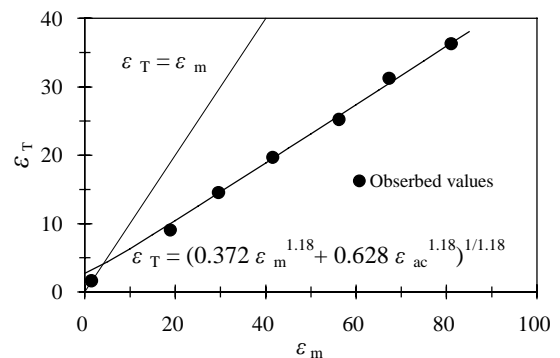


Fig. 3 媒体の誘電率 ϵ_m と複合誘電率 ϵ_T の関係
Composite dielectric constant ϵ_T vs. dielectric constant of media ϵ_m .

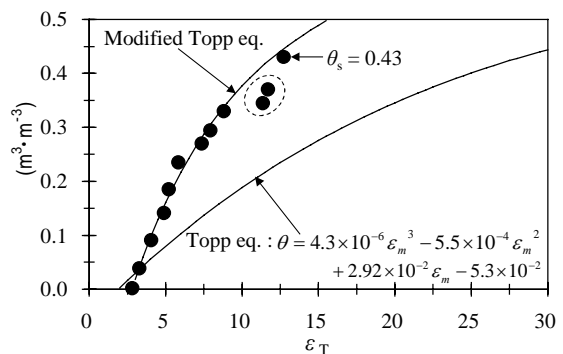


Fig. 4 複合誘電率 ϵ_T と体積含水率 θ の関係
Composite dielectric constant ϵ_T vs. water content θ .