

被覆型プローブを用いた時間領域反射法による重粘土の水分計測

Water Content Measurement of Heavy-Clay Using a Coated Time Domain Reflectometry Probe

宮本英揮¹ 筑紫二郎¹ 金山素平²
Hideki Miyamoto Jiro Chikushi Motohei Kanayama

1. はじめに

近年、土中の水分量を非破壊で計測可能な時間領域反射法(TDR)が広く普及している。TDRは、土中に埋設した金属プローブを伝播する高周波パルスの反射特性から比誘電率を求め、それを水分量に変換する方法である。これまで多くの土で TDR による水分計測の有効性が確認されたが、粘土分を多く含む一部の粘質土では、高い導電性が原因で TDR が適用できないことが知られている。この問題は、国内外の粘質土壌で TDR の使用が制限される要因となっている。そこで本研究では、粘質土における導電性物質の影響を低減するために、テフロンで被覆したプローブ(以後、TC プローブ)を作製し、水分量の異なるカオリナイトを対象にキャリブレーション実験を行い、TC プローブを用いた TDR による水分計測の有効性について検討した。

2. 実験方法

TC プローブは、3 本のステンレス鋼棒(長さ 100 mm、直径 1.2 mm)を平行に 7 mm 間隔で固定したものである(Fig. 1)。外側の 2 本のロッドは同軸ケーブルのシールド部に接続し、厚さ 0.05 mm のテフロンで被覆した中央のロッドはケーブル芯部に接続している。TC プローブは、同軸ケーブルで 1502C 型ケーブルテスター(Tektronix 社)に接続している。TC プローブの特性を調べるために、空気、エタノール溶液、蒸留水の比誘電率を TDR で求めた。比較のために、被覆を行っていない標準プローブでも、同様の測定を行った。

実験の供試材としてカオリナイトを用いた。蒸留水を加えて水分量(w)を 0.47 kg kg^{-1} に調節したカオリナイトを直方体状に整形し、その中央に TC プローブを挿入した(Fig. 2(a))。2 時間間隔で 2 日間、比誘電率を連続測定した後、少量のサンプルを採取して炉乾法で w を測定した。残った試料に蒸留水を加えて再攪拌し、一連の手順を繰り返すことで、比誘電率 w 関係を調べた。なお、 $w > 1.06 \text{ kg kg}^{-1}$ の試料については、高い流動性が原因で直方体状に整形できなかったため、カオリナイト懸濁液を円筒容器内に注ぎ、その比誘電率を計測した(Fig. 2(b))。

3. 結果と考察

標準プローブで測定した各流体の比誘電率は、既往の報告に即した値を示した。Fig. 3 は、これらの値を各流体の

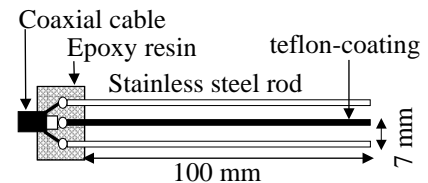


Fig. 1 TC プローブの模式図
Schematic diagram of a TC probe.

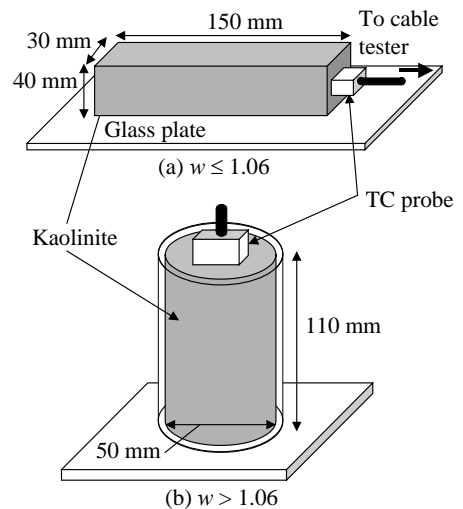


Fig. 2 実験の模式図
Schematic diagram of experiment.

¹ 九州大学 生物環境調節センター Biotron Institute, Kyushu University

² 九州大学大学院 農学研究院 Faculty of Agriculture, Kyushu University

キーワード：時間領域反射法，水分量，比誘電率

比誘電率 (ϵ_m) と考え、TC プロブで測定された同一流体の有効誘電率 (ϵ_{eff}) と関連付けた図である。実測値と 1:1 線との差から明らかなように、TC プロブによる測定値は、比誘電率が高くなるにつれて過小評価される傾向がある。TC プロブで得られた ϵ_{eff} は、測定体積内に存在する物質、すなわちテフロンとその周囲の媒体の持つ比誘電率の合成値と考え、宮本・筑紫(2006)と同様の方法によって、 ϵ_m - ϵ_{eff} 関係が次式で与えられる。

$$\epsilon_{\text{eff}} = (0.978\epsilon_m^{-0.921} + 0.0111)^{-1.086} \quad (1)$$

異なる w に対して、標準プロブおよび TC プロブで測定した TDR 波形の一例を Fig. 4 に示す。標準プロブでは、 w が低いほどプロブ終端付近の波形の傾斜が急減し(Fig. 4(a))、特に $w < 1.12 \text{ kg kg}^{-1}$ では、第二反射地点の特定とそれに基づく比誘電率の評価が困難だった。一方、TC プロブでは、 $w = 0.47$ や 1.02 kg kg^{-1} といった低水分試料においても、第二反射地点付近の波形の凹凸が鮮明で、比誘電率の決定が可能だった。このことは、プロブを被覆することで、カオリナイトの水分計測可能域が低水分側に飛躍的に広がることを意味する。

TDR 波形(Fig. 4)から求めた ϵ_{eff} と w との関係を図 5 に示す。 ϵ_{eff} の増加とともに w は直線的に増加したことが確認された。ただし、測定された ϵ_{eff} は個々のプロブ特性に依存するため、得られた実験式は他の TC プロブに適用できない。

(1)式に基づき測定された ϵ_{eff} を ϵ_m に変換して得られた ϵ_m と w との関係を図 5 に示す。なお、測定範囲が限定された標準プロブの実測値も併せて示している。推定された ϵ_m は、標準プロブの実測値とよく適合し、(1)式に基づく ϵ_m の推定の妥当性が確認された。2つのプロブで得た ϵ_m の全データから、カオリナイトの ϵ_m - w 関係を表す次式を得た。

$$w = 0.073\epsilon_m - 2.28 \quad (R^2 = 0.97) \quad (2)$$

流体を用いて(1)式と同型の ϵ_m - ϵ_{eff} 関係式を決定し、得られた式と(2)式を連立して ϵ_m を消去することにより、粘土をずに他の TC プロブのキャリブレーション式を得ることが可能である。今後は、他の粘土においても TC プロブを用いた TDR の有効性を詳しく検討する予定である。

引用文献: 宮本・筑紫 (2006): 土壌の物理性, 104: 5-12.

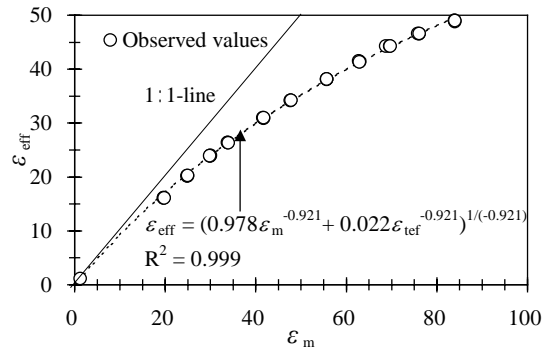


Fig. 3. 比誘電率 (ϵ_m) と有効誘電率 (ϵ_{eff}) の関係
Effective dielectric constant (ϵ_{eff}) vs. relative dielectric constant (ϵ_m) of fluid media.

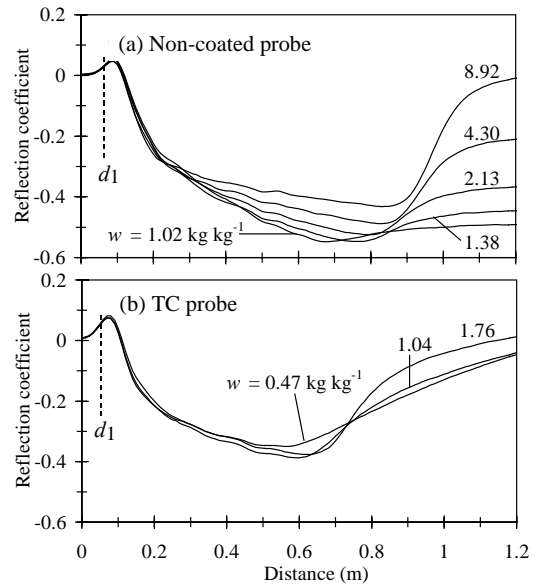


Fig. 4. カオリナイトの TDR 波形
TDR waveform for kaolinite.

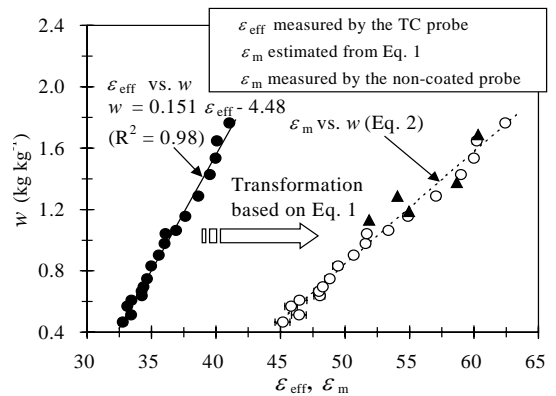


Fig. 5. 有効誘電率 ϵ_{eff} または比誘電率 ϵ_m と水分量 w の関係
Effective dielectric constant (ϵ_{eff}) or relative dielectric constant (ϵ_m) vs. water content (w).