

砂とクロボクの土壌水分計測に対するTDT・TDR・静電容量法の有効性の比較 Effectiveness of TDT, TDR, and capacitance method for measuring soil moisture of sand and Andisol

○伊藤 祐二 石橋 恭平 粂井 和朗

○Yuji ITO, Kyohei ISHIBASHI, and Kazuro MOMII

1. はじめに

様々な土壌水分計測法の中で、誘電率水分計は実用的また学術的に広く普及している。誘電率水分計には、計測法の違いにより時間領域反射法（TDR）や静電容量法に代表される種々の方法が提案されている。一方、マイクロ波の透過信号特性を利用した時間領域透過法（TDT）が近年普及しつつあるが、その有効性を他の手法と比較した事例は少ない。本研究では、TDT、TDR、静電容量法の土壌水分計測に対する有効性を評価するために、各手法によって砂とクロボクの水分計測実験を行い、各々の計測精度を比較検討した。

2. 方法

実験には、Acclima社製のTDTプローブ（Digital TDT SDI-12）、Decagon Devices社製の静電容量式プローブ（ECH2O EC-5）（以降はEC-5）、Campbell Scientific（CS）社製のTDRプローブ（CS640）を用いた。TDRプローブをTDR計測器（TDR100, CS）に接続し、TDTプローブとEC-5およびTDR計測器をデータロガー（CR1000, CS）に接続した。

TDTとTDRについては、出力値である比誘電率 ϵ の計測精度を予め確認するために、異なる温度条件で水の比誘電率 ϵ_w を計測し、 ϵ_w の理論値 ϵ^* （ $= 71 \sim 85$ ）¹⁾と比較した。

土壌試料には、豊浦標準砂と鹿児島県鹿屋市申良町で採取したクロボク（強熱減量値22%）を用いた。各プローブを円筒容器内に距離をとって設置し、そこに水分を調整した試料を一定の乾燥密度で充填した。試料充填後、TDTとTDRでは ϵ 、EC-5では出力電圧 V を計測した。試料の重量を測定後、試料を炉乾燥させ、乾燥前後の重量差から求めた水の体積を充填試料の体積で除して体積含水率 θ を評価した（重量法）。ただし、クロボクの $\theta > 0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の領域では、風乾の試料を充填後、試料表面から給水し、一定時間経過後に各プローブの出力値を記録した。その際、 θ は給水量を充填試料の体積で除して求めた。 ϵ - θ と V - θ の関係を表す式には、次のTopp式²⁾、Miyamoto式³⁾、Decagon式⁴⁾が提案されている。

$$\text{Topp式} : \theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (1)$$

$$\text{Miyamoto式} : \theta = -0.0356 + 4.35 \times 10^{-2} \epsilon - 1.23 \times 10^{-3} \epsilon^2 + 1.48 \times 10^{-5} \epsilon^3 \quad (2)$$

$$\text{Decagon式} : \theta = 11.9 \times 10^{-4} V - 0.401 \quad (3)$$

実験で得た ϵ - θ と V - θ の関係を上式の ϵ - θ と V - θ の関係と比較し、上式との適合性を調べた。また、計測した ϵ または V を上式に代入して θ を求め、重量法との比較によって θ の計測精度を調べた。

3. 結果と考察

水の比誘電率の計測実験の結果、TDTで計測した ϵ_w は全温度条件で ϵ^* とよく一致した。一方、TDRで計測した ϵ_w は全温度条件で ϵ^* を過大評価した。これは取得したTDR波形から ϵ_w を決定する際に、CS社のアルゴリズムに基づく波形解析に何らかの誤差が生じたためと考えられる。この結果から、TDRについては、 ϵ_w と ϵ^* の関係に基づいて、計測した比誘電率を0.93倍して補正し、以下の実験ではこの補正を適用した。

鹿児島大学農学部 (Faculty of Agriculture, Kagoshima University)

キーワード：誘電率水分計，時間領域透過法（TDT），時間領域反射法（TDR），静電容量法，火山灰土壌

砂について風乾から水分飽和までの異なる水分条件で ε - θ および V - θ の関係 (Fig.1), ならびに TDT, TDR, EC-5 による θ の計測精度を調べた. EC-5 で計測した各水分条件の V は式(3)による V を過小評価した. 式(1) また式(3) に対する TDT, TDR, EC-5 の ε または V の平均二乗誤差の平方根 (RMSE) は, それぞれ 1.1, 2.0, 46 mV であり, TDT は TDR より式(1) に適合することがわかった (Fig.1). 砂の重量法による θ と各プローブで計測した θ を比較した結果, TDT と TDR で計測した θ (式(1) で算出) は重量法による θ と概ね一致したが, EC-5 で計測した θ (式(3) で算出) は重量法で求めた θ を全水分条件で過小評価した. TDT, TDR, EC-5 で計測した θ の RMSE は, それぞれ $0.019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.033 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.052 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった. したがって, 砂の水分計測精度は TDT, TDR, EC-5 の順で高いことがわかった.

クロボクでは, TDT による ε - θ 関係は式(2)とよく適合した (Fig.2). 一方, TDR の ε - θ 関係と EC-5 の V - θ 関係はそれぞれ式(2)と式(3)に対して乖離した (Fig.2). 式(2) に対する TDT と TDR の ε の RMSE は, それぞれ 1.7 と 4.9 であった. これらの結果から, TDT による θ (式(2) で算出) は重量法で求めた θ とよく一致したが, TDR による θ (式(2) で算出) と EC-5 による θ は重量法による θ をそれぞれ過大評価および大きく過小評価した (Fig.3). また, TDT, TDR, EC-5 で計測した θ の RMSE は, それぞれ $0.023 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.117 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった. したがって, クロボクに対する水分計測では, TDT が TDR に比べて計測精度が高く, EC-5 は TDT と TDR より計測誤差が特に大きいことがわかった.

4. おわりに

本実験結果から, 砂に対する計測精度は, TDT, TDR, EC-5 の順で高いことを確認した. TDT は, Miyamoto 式を適用してクロボクの θ を計測することが可能であったが, TDR と EC-5 は, ε - θ と V - θ の関係を補正する必要があると考えられる.

参考文献 1) 国立天文台 (2008): 理科年表, p.412. 2) Topp et al. (1980): *Water Resources Research*, **16**, 574-582. 3) Miyamoto et al. (2001): *Soil & Tillage Research*, **60**, 91-99. 4) Decagon Devices, Inc. (2008): *EC-20, EC-10 and EC-5 user's manual*.

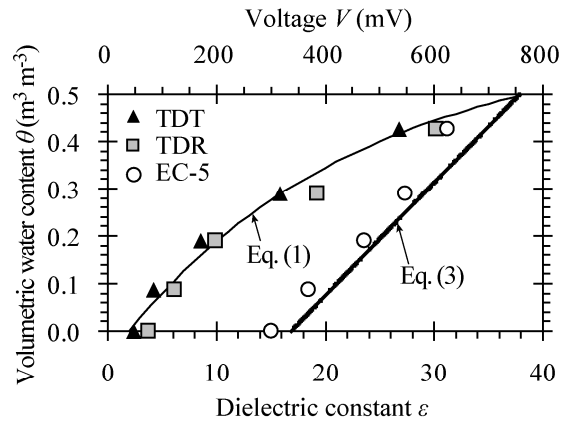


Fig.1 各プローブで計測した砂の ε - θ と V - θ の関係 Relationships between ε and θ or V and θ for sand measured by three probes

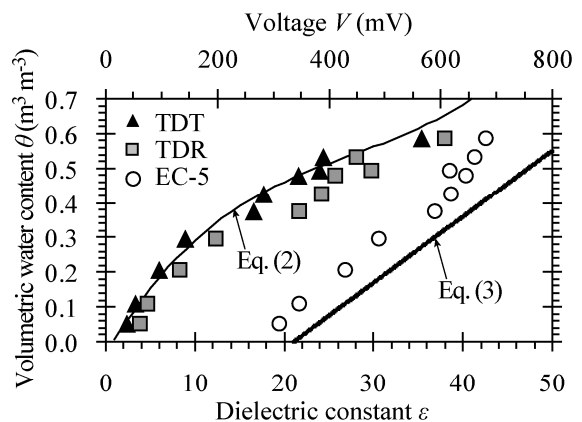


Fig.2 各プローブで計測したクロボクの ε - θ と V - θ の関係 Relationships between ε and θ or V and θ for Andisol measured by three probes

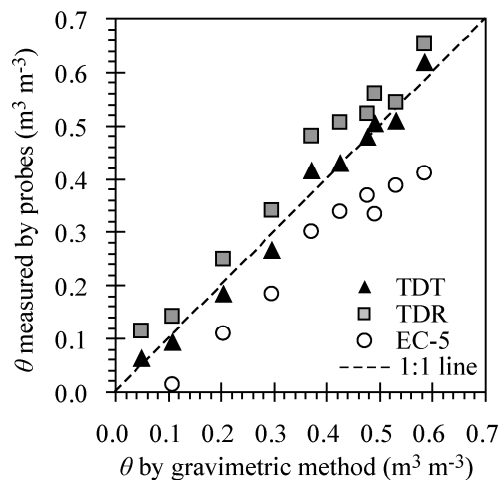


Fig.3 各プローブと重量法によるクロボクの水分計測値の比較 Comparisons of Andisol moisture measurements by three probes and gravimetric method