

# 時間領域透過法による土壌水分・塩分の同時計測

Coupled Measurements of Soil Moisture and Salinity Using Time Domain Transmissiometry

宮本英揮\* 伊藤直樹\*\* 間瀬 淳\*\* 筑紫二郎\*\*\* 伊藤祐二\*\*\*

Hideki Miyamoto Naoki Ito Atsushi Mase Jiro Chikushi Yuji Ito

## 1. はじめに

土中の水分・塩分の同時計測法として、ケーブルテスターを利用した時間領域反射法(TDR)が多用されている。しかし、センサーのロッド方向に体積含水率( $\theta$ )および溶液の電気伝導度(EC)( $\sigma_w$ )の急変面、亀裂、土層境界面などが存在すると、TDR 波形に不規則な凹凸が混入するために $\theta$ の自動計測が困難になり易い。一方、近年、マイクロ波の透過特性に基づく時間領域透過法(TDT)の開発が進んでいる<sup>1), 2)</sup>。TDT は、信号の送受信経路が異なるため、その特徴を生かせば、計測の自由度の大幅向上が期待される。しかし、同法は基礎研究段階にあるため、 $\theta \cdot \sigma_w$ の同時計測の可否は確認されていない。そこで本研究では、EC 条件の異なる砂を対象に、TDT による透過信号計測実験を実施し、同法による $\theta \cdot \sigma_w$ の同時計測の有効性を検討した。

## 2. 実験方法

0.5 bar 用セラミックフィルター上に設置したアクリルカラム(内径 46 mm, 高さ 112 mm)の断面中央に、長さ 197 mm の 2 本のステンレス鋼丸棒( $\phi=1.2$  mm)を U 字型に成型した TDT プロブを固定し、同軸ケーブルの一端をインパルス発生器、他方をオシロスコープに接続した(Fig.1)。乾燥密度が  $1.48(\pm 0.02)$   $\text{Mg m}^{-3}$  となるように、風乾砂(粒径 0.15 ~ 0.6 mm)をカラムに充填した。マリオット管を利用して、フィルター底面から $\sigma_w$ の異なる  $\text{CaCl}_2$  溶液(0.00, 0.07, 0.17, 0.35, 0.60, 1.16  $\text{S m}^{-1}$ )で砂を毛管飽和させた後、底面にサクションを与えて間隙水の排水を促した。同じ手順で同一溶液の給排水を 3 反復し、3 度目の排水過程における排水総量を圧力式水位計で、またインパルス信号の TDT 波形をオシロスコープでそれぞれ連続測定した。取得した TDT 波形からピーク電圧( $V_p$ )を読み取るとともに、既往の報告<sup>1)</sup>に倣って、そのピーク時間から伝播時間( $t_m$ )を決定した後、それを次式<sup>2)</sup>に代入して $\theta$ を求めた。

$$\theta = 3.21 \times 10^{16} t_m^2 + 4.61 \times 10^7 t_m - 7.23 \times 10^{-2} \quad (1)$$

なお、本実験は計測機器を十分に余熱運転した後に、20 (±1) の室内で実施した。

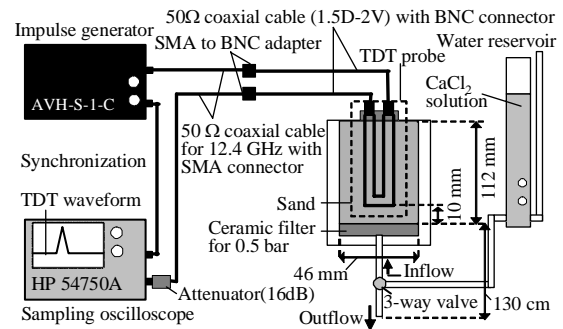


Fig. 1 実験の模式図<sup>2)</sup>。

Schematic diagram of experiment<sup>2)</sup>.

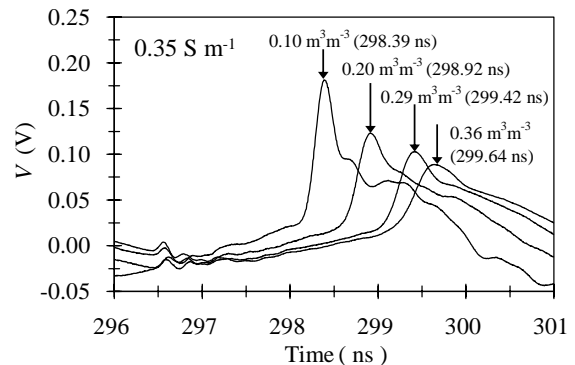


Fig. 2 測定された TDT 波形の一例。  
An example of TDT waveforms obtained.

\* 明治大学 研究・知財戦略機構 Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Property, Meiji university, \*\* 九州大学 産学連携センター Art, Science and Technology Center for Cooperative Research, Kyushu university, \*\*\* 九州大学生物環境調節センター Biotron Institute, Kyushu University.

キーワード: 時間領域透過法, インパルス信号, 電気伝導度計測

### 3. 結果と考察

#### 3.1 $V_p$ , $\theta$ , $\sigma_w$ の相互関係

砂の TDT 波形には先鋭な凸状のピークが存在し、ピーク時間は高 $\theta$ ほど大きくなる<sup>2)</sup>が、逆に  $V_p$  は高 $\theta$ ほど小さくなった(Fig.2)。類似した  $V_p$  変化は全 $\sigma_w$  条件に共通し、 $V_p$  は $\theta$ の増加とともに曲線的に低下した(Fig.3)。 $\theta$ - $V_p$  関係を 3 次多項式で近似し(Fig.3 の(2)式)、同一 $\theta$ における $\sigma_w$ - $V_p$  関係を調べた結果、 $V_p$  は $\sigma_w$  に対して負の応答を示すことが判明した(Fig.4)。

#### 3.2 $\sigma_w$ の評価式の導出

TDT による $\sigma_w$  の決定方法を確立するために、計測結果をもとに、 $V_p$  を $\theta$ と $\sigma_w$  の関数として表現することを試みる。Fig.4 より、各 $\theta$ における  $V_p$  が $\sigma_w$  の 1 次関数で表され、またその勾配( $\partial V_p / \partial \sigma_w$ )が $\theta$ の 3 次関数で近似することができる(Fig.5 の(3)式)と考え、 $V_p$ ,  $\theta$ ,  $\sigma_w$  の関係は次式で表される。

$$\partial V_p / \partial \sigma_w = f(\theta) \quad (4)$$

$\sigma_w = 0.00 \text{ S m}^{-1}$  におけるピーク電圧を  $V_{p,0}$  とし、これを境界条件として(4)式を解くと、

$$V_p = f(\theta)\sigma_w + V_{p,0} \quad (5)$$

が得られる。(3)式(Fig.5 参照)を  $f(\theta)$ 、また(2)式(Fig.3 参照)を  $V_{p,0}$  に代入すると、次式が得られる。

$$\sigma_w = \frac{-6.82\theta^3 + 6.27\theta^2 - 1.97\theta + 0.361 - V_p}{1.85\theta^3 - 0.713\theta^2 - 0.0766\theta + 0.126} \quad (6)$$

TDT では、ピーク時間を(1)式に代入することで、別途、 $\theta$ を決定できる。よって、 $V_p$  値と(1)式から得た $\theta$ とを(6)式に代入すれば、 $\sigma_w$  を評価可能である。

#### 3.3 $\sigma_w$ の計測精度

砂と混合した  $\text{CaCl}_2$  溶液の EC が $\sigma_w$ と等しいとみなし、それと(6)式に基づいて TDT で測定した溶液 EC( $\sigma_{w,\text{TDT}}$ )とを比較したところ、 $\sigma_{w,\text{TDT}}$  値は概ね 1:1 線上に分布した(RMSE =  $0.16 \text{ S m}^{-1}$ ) (Fig.6)ことから、TDT 波形から $\theta$ と $\sigma_w$  とを同時に決定することが可能であることが判明した。ただし、高 $\sigma_w$  領域に比べ、低 $\sigma_w$  領域における測定誤差が大きいこと、また(6)式が本実験系固有の経験式であり、他の計測器を用いた場合に同一式を適用できないことから、今後は $\sigma_w$  の計測精度の向上に加え、 $\theta$ と $\sigma_w$  の同時計測モデルを確立することが必要である。

引用文献: 1)宮本ら(2008):土壌の物理性, 110: 3-12. 2)宮本ら(2009):土壌物理学大会講演要旨集, 12-13.

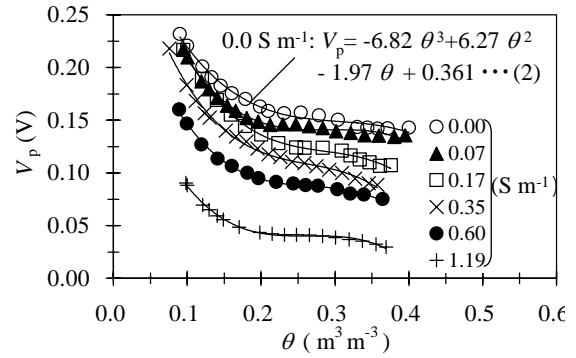


Fig. 3 体積含水率( $\theta$ )とピーク電圧( $V_p$ )の関係. Volumetric water content( $\theta$ ) vs. peak voltage( $V_p$ ).

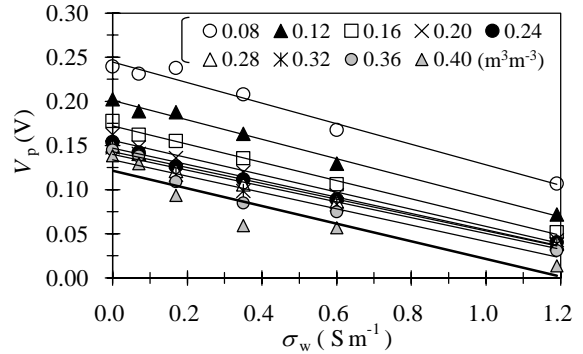


Fig. 4 溶液 EC( $\sigma_w$ )とピーク電圧( $V_p$ )の関係. EC of soil solution( $\sigma_w$ ) vs. peak voltage( $V_p$ ).

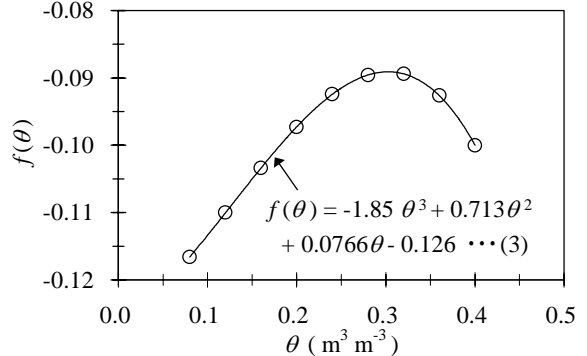


Fig. 5 体積含水率( $\theta$ )と  $f(\theta)$  の関係. Volumetric water content( $\theta$ ) vs.  $f(\theta)$ .

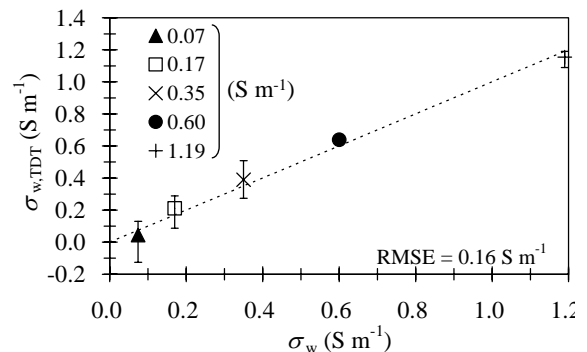


Fig. 6 TDT で測定した EC 値( $\sigma_{w,\text{TDT}}$ )の精度. Accuracy of EC values obtained by TDT.