

## NanoVNA による土壌水分量の測定 Measurement of Soil Moisture Content Using a NanoVNA

○徳山 想奈\*, 小林 大樹\*\*, 吉岡 尚寛\*\*\*, 登尾 浩助\*

TOKUYAMA Sona, KOBAYASHI Daiki, YOSHIOKA Takahiro, NOBORIO Kosuke

### 1. 背景と目的

農業、林業、水文学、土木工学などの分野において、土壌水分量の把握は重要である。土壌水分量測定には TDR (time domain reflectometry) が主に使われている。TDR は土壌の平均比誘電率  $\epsilon$  を測定し、あらかじめ定めた校正式を使うことで体積含水率  $\theta$  を精度良く求めることができる。TDR 法は対象物を非破壊的且つ連続的に測定できる一方、通常の測定機器は 100 万円程度と高価である。Fernández et al. (2022) は安価な VNA (vector network analyzer) を使った精度の高い TDR 波形を再現したが、測定限界については確認されていない。そこで本研究では、TDR 波形の再現に対する VNA の測定精度を実験により評価した。

### 2. 実験方法

ワグネルポットに高さ 8cm まで豊浦砂を充填し、ポット中央付近に 7.5 cm 長さの 3 線式 TDR プローブを垂直に挿入した。ポット底面から 2 cm 高さの位置に設けた孔にチューブを接続して下方浸潤による給水を行った。ポット内の土壌水分量は、1 分間隔でポットの質量を電子天秤で測定することで求め、NanoVNA を用いて反射係数を計測した(図 1)。この実験は条件を揃えて 3 回繰り返した。

VNA は、周波数  $f[\text{Hz}]$  に対応する角周波数  $\omega = 2\pi f[\text{rad/s}]$  の領域における反射係数  $S_{11}(\omega)$  を計測する。これは複素反射係数  $\rho(\omega)$  に相当する。VNA で測定した周波数領域の  $\rho(\omega)$  から時間領域の  $\rho(t)$  を Moret Fernández et al.(2022) が提案した式(1)を使って求めることで、TDR 波形を再現した。

$$\rho(t) = F^{-1}[\rho(\omega) \cdot X(\omega)] \quad (1)$$

式(1)では理想的なインパルス信号  $x(t)$  のフーリエ変換  $X(\omega)$  と VNA から得た  $\rho(\omega)$  を乗算し、逆フーリエ変換  $F^{-1}$  (IFFT) を適用して時間領域の反射波形  $\rho(t)$  を再構成した。

また、TDR 波形の始点・終点から見かけのプローブ長さ  $L_a$  を求めて比誘電率  $\epsilon$  を計算した(Noborio,2001)。さらに比誘電率  $\epsilon$  を Topp et al.(1980)の変換式に代入することで体積含水率  $\theta$  を求めた。

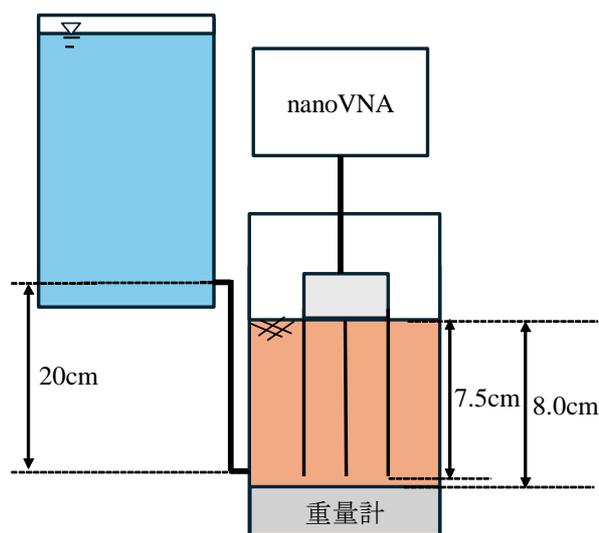


図1 VNA を使った実験の概略図

Schematic of the experimental apparatus using VNA

\*明治大学農学部, School of Agriculture, Meiji University

\*\* NTT アクセスサービスシステム研究所, NTT Access Network Service Systems Laboratories, \*\*\*香川大学大学院農学研究科, Graduate School of Agriculture, Kagawa University

キーワード: VNA, TDR, 土壌水分量, 比誘電率

### 3. 結果と考察

図2は、NanoVNAによる推定含水率と実測値の対応関係を示した1対1プロットである。図3(a)および(b)は、それぞれ飽和状態および乾燥状態におけるTDR波形を示す。図2から、VNAを用いた含水率推定は高含水状態において精度が高く、乾燥状態では $\theta_{VNA}$ が $\theta_{scale}$ を下回る傾向が見られた。さらに、図3(a)では始点から終点まで9点のプロットが確認できるのに対し、図3(b)では4点にとどまり、かつ始点の位置も曖昧である。これは、時間分解能がTDRに比べて低いVNAでは乾燥時の急激な波形変化を捉えきれないために正確な $D_a$ を計測できなかったことが原因と考えられる。一方、飽和時には $D_a$ が長くなるので、時間分解能の影響が相対的に抑制されていると考えられる。これらの結果は、乾燥状態における推定誤差に時間分解能の限界が関与している可能性を示唆している。今後は、広帯域VNAの導入や掃引点数の増加により、TDR波形の高精度化が期待される。

#### 参考文献

- David Moret-Fernández, Francisco Lerab, Borja Latorrea, Jaume Tormoc and Jesús Revillad (2022): Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and electrical conductivity. *Catena*, 218, 106540
- G. C. Topp, J. L. Davis and A. P. Annan (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582.
- Noborio, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3) : 213- 237

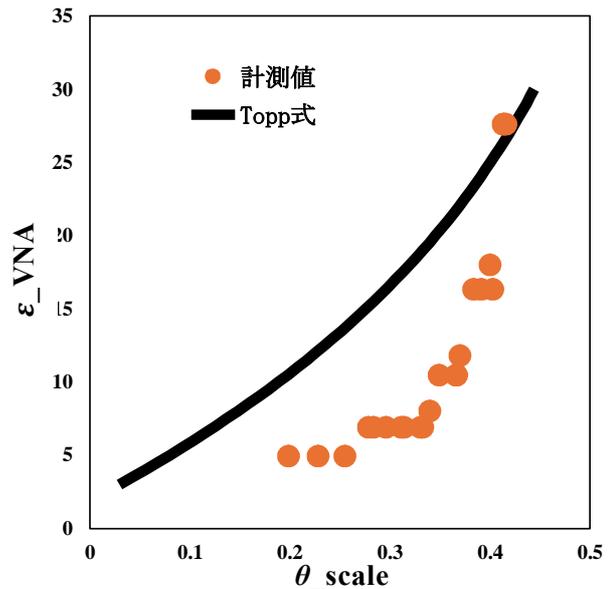


図2 Topp式と比較した実測値による体積含水率と比誘電率のグラフ

Comparison of Measured and Topp Equation  
Data: VWC vs. Dielectric Constant

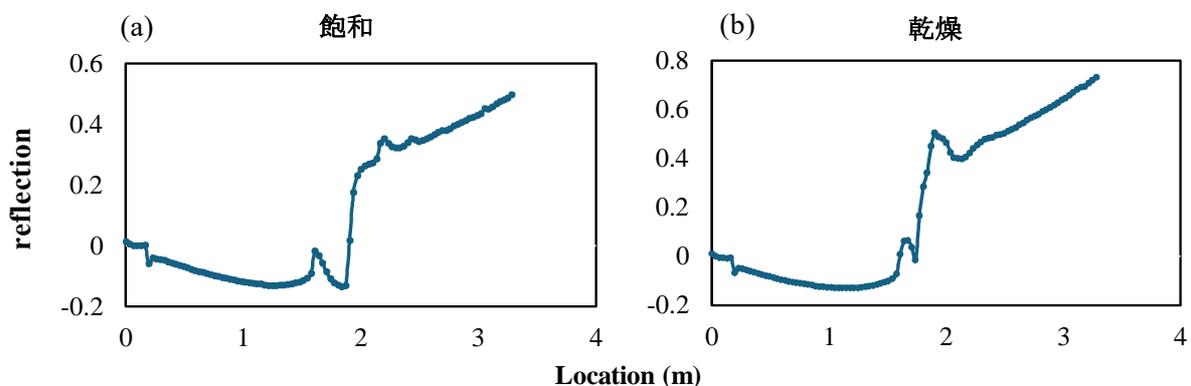


図3 (a) 飽和状態と(b) 乾燥状態のTDR波形  
TDR waveforms in (a) the saturated and (b) the air-dried conditions