

材料費 6 万円で製作可能な屋外向け TDR 土壌水分測定システム
TDR soil moisture sensing system for field observation made with
materials costing 60,000 yen

尾関竣哉

OZEKI Shunya

1. はじめに TDR (Time Domain Reflectometry) を利用した土壌水分センサーは土の比誘電率を測定し、比誘電率と体積含水率の校正曲線から体積含水率を推定するセンサーである。その推定精度の高さや測定範囲の広さより、連続的な土壌水分の測定によく用いられる。一方で、TDR 装置は高価なため、多地点計測に適用しづらいといった問題がある。従前研究にて、低価格なベクトルネットワークアナライザー (以下、VNA) である「NanoVNA」とシングルボードコンピューター「Raspberry Pi」を組み合わせ、材料費 2 万円以下で製作可能な屋内向け TDR 土壌水分測定システムを開発した。本研究では、LTE 通信機能や独立電源を付与した屋外連続観測向けの TDR 土壌水分測定システム (以下、本システム) を提案する。

2. 測定原理 TDR を利用した土壌水分測定では、一般に TDR 装置を使用する。これはプローブを通してステップ波という電気信号を土壌に入力し、その応答波形 (ステップ応答) を測定するものである。ステップ波はインピーダンス不整合点である土壌表面とプローブ終端で一部が反射され、**図 1** のようなステップ応答が得られる。プローブ終端での反射時刻と土壌表面での反射時刻の差である伝搬時間 t と比誘電率 ϵ_r は式 (1) の関係にある。

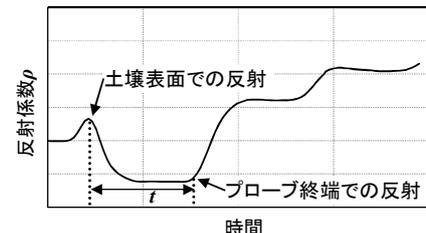


図 1 ステップ応答の例

Fig.1 Example of step response

$$\epsilon_r = \left(\frac{Ct}{2L}\right)^2 \quad (1)$$

ここに、 C は光速 (299,792,458 m/s)、 L はプローブのロッド長 (m) である。

Topp ら¹⁾は、比誘電率 ϵ_r と体積含水率 θ の関係を式 (2) で近似した。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (2)$$

3. システム構成 VNA は電子回路の反射特性を評価する測定器である。反射特性に対してフーリエ逆変換することでインパルス応答が得られる。このインパルス応答を時間について積分することでステップ応答が得られる。つまり、ステップ応答を得る TDR

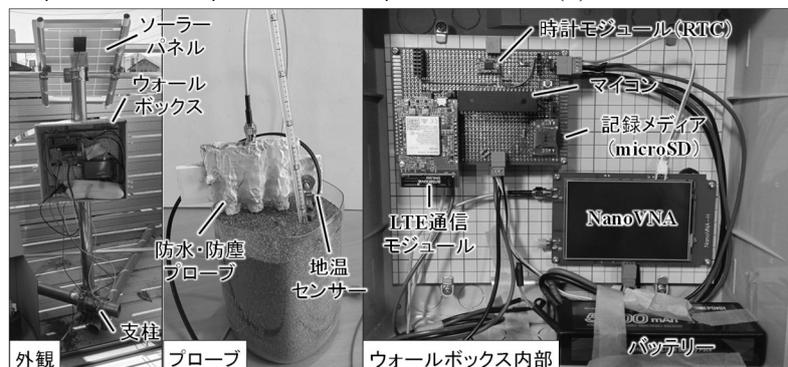


図 2 システムの現物写真

Fig.2 Picture of TDR System

装置を VNA で置き換えることができる。近年、低価格な VNA である NanoVNA が登場したことで、安価に TDR 土壌水分測定システムを構築できるようになった。**図 2** に

個人 (Individual) キーワード：水分移動、土壌の物理化学的性質

本システムを示す。単管パイプで組んだ支柱にウォールボックスとソーラーパネルを取り付けた。プローブは防水・防塵処理し、地温測定用の温度センサーを取り付けた。ウォールボックスにはデータロガー基板と NanoVNA が格納されている。本システムは1時間に1回比誘電率および地温を測定する。データは micorSD カードに記録されるとともに、LTE 回線経由でユーザーに提供される。ソーラーパネルとバッテリーのみで動作し、曇天時の発電量でも連続稼働できるよう低消費電力化されている。システムの材料費は約6万円である。

動作安定性を検証するために長野県上田市にて2025/2/24~3/18にヒートラン試験を実施した。試験では、千曲川河川敷にて採取した土壌を水で飽和させたものを土壌試料とした。土壌試料に雨水が入らない状態で屋外に静置し、脱水(蒸発)過程における比誘電率と地温を測定した。体積含水率は試料の体積および質量から計算した。

4. 結果および考察

図3に測定された比誘電率および地温を示す。乾燥が進むにつれて、比誘電率が低下していく様子を観測できた。地温センサーのオフセット補正をしていないため実際の地温よりも1℃程度高い値を示したものの、偶然にも凍結による比誘電率の低下も観測することができた。図4に比誘電率と体積含水率の関係を示す。凍結状態を除き、比誘電率と体積含水率の関係は地温に依らず、概ね Topp らの近似曲線と同様の傾向のため、測定結果は妥当であると考えられる。ヒートラン試験中には曇天や降雪があったものの、本システムは停止することなく稼働しており、屋外における連続的な TDR 土壌水分測定手法としての有用性を示すことができた。

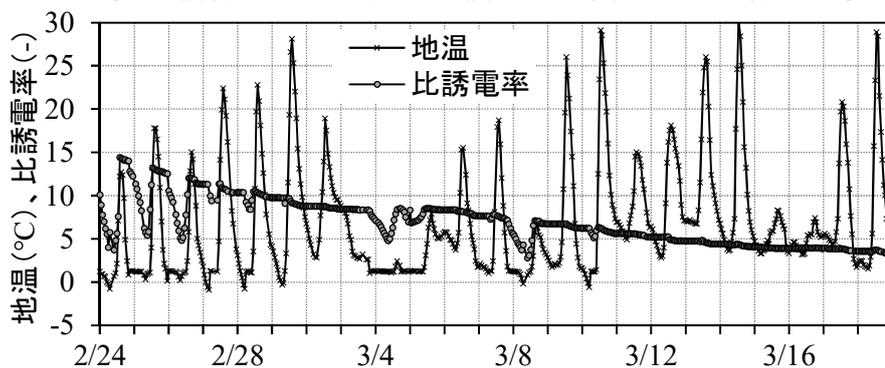


図3 比誘電率および地温の経時変化
Fig.3 Temporal variation of relative dielectric constant and soil temperature

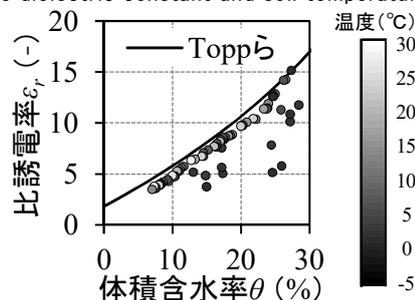


図4 地温、比誘電率、体積含水率の関係
Fig.4 Relationship between soil temperature, relative dielectric constant and volumetric water content

本システムの実用化に向けては、いくつか課題が残されている。積雪時にも発電ができるようにするための融雪用ヒーターの実装、NanoVNA のバグを回避するためのデータロガー基板へのフーリエ逆変換の実装、製造時間の短縮などである。製造時間の短縮に向けては、図5に示すプリント基板の開発を進めており、3時間以内に本システムを製造できるようになる見込みである。他の課題についても同様に解決に向けて開発を継続中である。

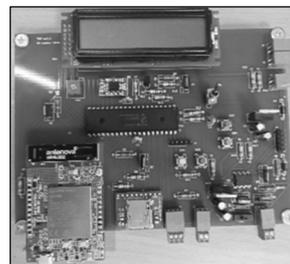


図5 開発中のプリント基板
Fig.5 PCB in development

5. おわりに 本システムが提供する高い時空間分解能を持ったリアルタイムな土壌水分データが流出解析や作物栽培管理といった領域で役に立つことを期待する。

参考文献 1) G.C.Topp, J.L. Davis, A.P. Annan, 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Lines. WATER RESOURCES RESERCH. 16-3, 574-582.