

誘電型土壌水分センサーによる測定値の温度依存性に関する研究

長岡技術科学大学 非会員 ○山本寅大
長岡技術科学大学 正会員 陸旻皎

1. はじめに

土壌水分は蒸発散や地下水涵養プロセス、気候システムに関わる重要なものである。そのため、現在に至るまで様々な測定方法が考案されてきた。その中でも時間領域反射法(TDR)による土壌水分測定は Topp ら¹⁾による提唱以来、広く利用されている。しかし、TDR による土壌水分測定値には温度依存性があるという結果が報告されている。当初、Topp らの研究では有意な温度依存性はないと結論付けたが、その後の研究で TDR による土壌水分測定値と土壌温度の間に不自然な関係が確認される事例が相次いだ。例えば、山本・陸(2021)²⁾の実験では体積含水率と土壌温度に正の相関が確認されている。

そこで本研究では、TDR による土壌水分測定値の温度依存性を確認するため、誘電型土壌水分センサーを用いて測定された体積含水率の土壌温度変化による影響を室内実験で検証する。

2. 実験概要

2. 1. 測定原理

TDR は土壌水分を直接測定せず、土壌の比誘電率を測定し、それを体積含水率との校正曲線に当てはめて推定する方法である。

本実験で使用するセンサー(C-CS655)を写真-1 に示す。このセンサーは 2 本のロッドと制御部が一体となった構造である。手順として、まずデータロガーに接続した TDR 土壌水分センサーを土中に挿入する。その後ロッドに電磁波を発射し、先端部で反射して戻ってくるまでの時間を測定する。電磁波の伝播速度はロッド周辺を取り囲む媒体の誘電率によって変化するため、伝播速度を測定することで土壌の誘電率を求めることができる。このとき求められる誘電率は、ロッド周辺の測定可能範囲内の平均値である。

土壌を構成する水、空気、土粒子のうち、水の誘電率は約 80 であるのに対して空気が約 1、土粒子は 3 ~ 5 程度であるため、土壌の誘電率は土壌水分量に大きく影響を受ける。この特性を利用し、Topp ら¹⁾は

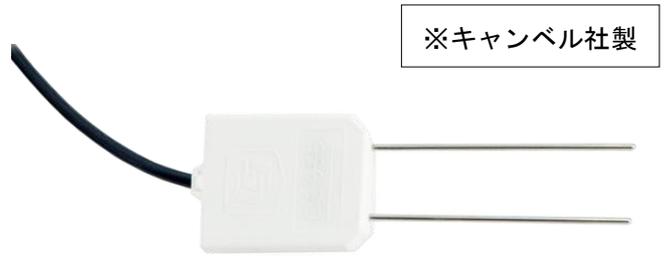


写真-1 使用した TDR センサー(C-CS655)

土壌の誘電率と体積含水率の関係を式(1)で表した。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2}K - 5.5 \times 10^{-4}K^2 + 4.3 \times 10^{-6}K^3 \quad (1)$$

ここで、 θ は体積含水率、 K は土壌の比誘電率である。この三次式により、土壌の誘電率から体積含水率を求める。

2. 2. 体積含水率の温度補正

式(1)から求めた体積含水率の温度依存性による誤差を補正するために、本研究では以下に紹介する二つの温度補正式を使用し、補正後の体積含水率の値を比較する。

一つ目に、TDR 土壌水分センサーのメーカー独自の温度補正式(2)を示す。

$$\theta_{corr} = \theta_T - 0.0044T\theta_T^3 + 0.0014T\theta_T^2 + 0.0029T\theta_T - 0.0002T + 2.4\theta_T^3 - 1.6\theta_T^2 + 0.32\theta_T - 0.0046 \quad (2)$$

ここで、 θ_{corr} は温度補正された体積含水率、 T は土壌温度(°C)、 θ_T は土壌温度 T における体積含水率である。

二つ目に、陸ら(2015)³⁾による三種類の温度補正式のうちの一つを式(3)に示す。

$$\theta_{ref} = \theta(1 - \alpha(T - T_{ref})) \quad (3)$$

ここで、 θ_{ref} は温度補正された体積含水率、 θ は土壌温度 T における体積含水率、 α は係数(°C⁻¹)、 T は土壌温度(°C)、 T_{ref} は基準温度(°C)である。基準温度は 20°C とする。 α は実測体積含水率の較差に対して、土壌温度の較差と真値の体積含水率(本実験では 3%)を乗算した値で除すると求めることができる。

2. 3. 実験装置及び実験条件

図-1 に示すような長さ約 80cm のアクリル製円筒形容器に模擬土壌としてガラスビーズを充填させた装置を作成した。図-1 左側は装置を床に対して垂直設置しており、図-1 右側のように装置を床に対して水平設置することも可能である。山本・陸(2021)²⁾ の実験装置は垂直設置しかできなかったが、TDR センサーを水平に設置することで図-2 に示すように重力ポテンシャルによるロッド周辺の土壌水分の分布の偏りを抑制できる。ガラスビーズは細砂相当である $\phi=0.15\text{mm}\sim 0.18\text{mm}$ のものを使用する。このガラスビーズとメスシリンダーで測定した水を攪拌用の容器内で攪拌することで体積含水率 3% に調整し、円筒形容器に充填する。実験は恒温室で行い、空調設備で室内温度を下げることで土壌温度を低下させる。土壌温度を上昇させるときは、円筒形容器に電気マットを巻き付けて調整する。土壌温度は $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ まで変化させ、その間断続的に体積含水率を測定する。

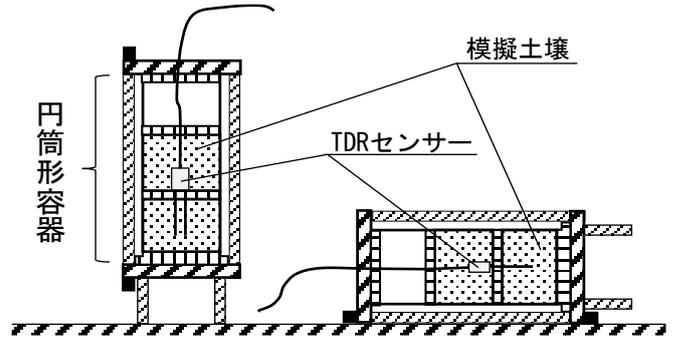


図-1 実験装置

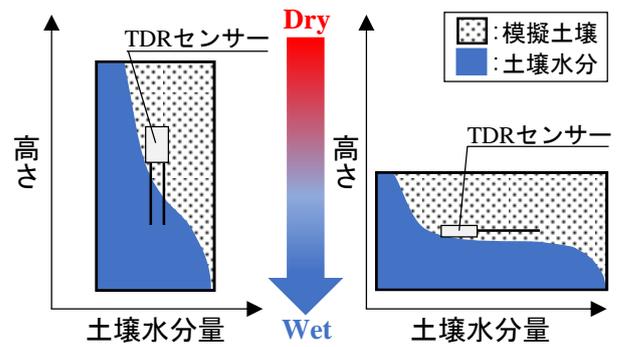


図-2 土壌水分の分布

3. 実験結果及び考察

実験結果を図-3 に示す。まず、垂直設置と水平設置で体積含水率の測定値に差がみられる。これは、水平設置の実験を模擬土壌作成直後に行ったため土壌水分の再分布が完了していない可能性が考えられる。また、重力ポテンシャルの影響は判断できなかった。垂直設置、水平設置ともに土壌温度と体積含水率の測定値に正の相関が確認できる。

二種類の補正式の結果を比較すると、メーカーの補正式は測定値に似た線を描いており、正しく補正されている可能性は低い。それに対し、垂直設置の陸ら(2015)の補正式を用いた値は、土壌温度が $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 付近で真値の 3% に近づくように補正されている。水平設置の陸ら(2015)の補正式を用いた値は、測定結果と比べて体積含水率が一定になっている。これらから、陸ら(2015)の温度補正式は前者のものより比較的機能していると考えられる。

4. 今後の展望

今後の実験では体積含水率を上げてゆき、温度依存性の影響が変化するか検証する。また、異なる粒径のガラスビーズを用いることで粒径による温度依存性の影響の検証も行う予定である。実験装置につい

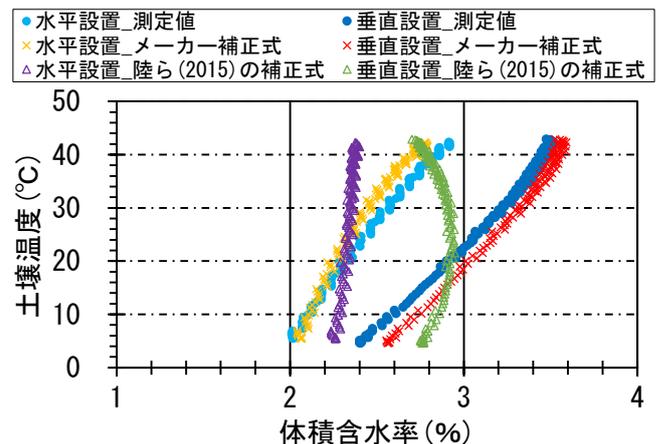


図-3 実験結果

ては、実験を通して問題点を洗い出しつつ、新たな検証実験に適する形式を検討する。

5. 参考文献

- 1) Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P.: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, Vol 16, pp574-582, 1980.
- 2) 山本寅大, 陸旻皎: TDR 法による土壌水分計測値の温度依存性に関する実験研究, 第 39 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, 2021
- 3) Lu, M., Kapilaratne, J., Kaihotsu, I.: A data-driven method to remove temperature effects in TDR-measured soil water content at a Mongolian site, *Hydro. Res. Lett.*, Vol.9, pp.8-13, 2015