

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

環境社会基盤工学専攻 水文・気象研究室 修士2年 山本寅大
指導教員 陸旻皎

1. はじめに

高精度な土壌水分計測技術として TDR 法が注目される。この手法は Topp *et al.* (1980) で報告されて以降、国内外で標準的に使われている。しかし、TDR 法による土壌水分計測値と土壌温度の間に不自然な関係が確認されるという報告が相次いだ。しかしながら、現在においても温度依存性を引き起こす要因は明らかになっていない。自然環境下では土壌水分量の変動を引き起こす要素が多く、土壌温度そのものによる影響がどの程度作用しているかは未知数である。そこで Lu *et al.* (2015) によるデータ解析の結果、蒸発や降雨による土壌水分量変動を除いた場合において、土壌温度が土壌水分量に与える影響は土壌温度そのものと TDR 土壌水分計測値にほぼ比例することを示した。本研究では、土壌温度そのものが TDR 土壌水分計測値に影響するという上記の解析結果を踏まえ、外部からの影響(蒸発や降雨)を受けない条件下においても温度依存性が再現されるか検証するため室内実験を行う。

2. 実験概要

2. 1. 測定原理

TDR 法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。

本実験使用の TDR センサーを図-1 に示す。これは2本のロッドと制御部が一体となった構造である。ロッドに電磁波を放射し、先端部からの反射応答時間を測定する。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特性を持つため、これより土壌の誘電率を求めることができる。

土壌を構成する三相のうち、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 *et al.* (1980) は土壌の誘電率と体積含水率の関係を式(1)で表した。



図-1 使用した TDR センサー (C-CS655)

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

ここで、 θ は体積含水率、 K は土壌の比誘電率である。当該式より、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三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、Lu *et al.* (2015) で提案された温度校正モデル (以下、LK モデル) を式(2)に示す。

$$\theta_{ref} = \theta [1 - \alpha(T - T_{ref})] \quad (2)$$

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 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]は温度補正係数、 T [$^{\circ}\text{C}$]は土壌温度、 T_{ref} [$^{\circ}\text{C}$]は基準温度である。基準温度は 20°C とする。本研究において α は試行錯誤的に決定するが、実測体積含水率の較差に、土壌温度の較差と真値の体積含水率を乗算した値で除すると求める方法もある。

二つ目に、Or and Wraith (1999) で提案された温度校正モデル (以下、OW モデル) を式(3)に示す。

$$\epsilon_c = \epsilon_{uc} - \frac{\partial \epsilon}{\partial T} (T - T_{ref}) \quad (3)$$

ここで、 ϵ_c は温度補正された誘電率、 ϵ_{uc} は計測された誘電率、 T [$^{\circ}\text{C}$]は ϵ_{uc} が計測された土壌温度、 T_{ref} [$^{\circ}\text{C}$]は基準温度である。

三つ目に、TDR 土壌水分センサーメーカー独自の温度校正式 (以下、メーカー校正式) を式(4)に示す。

$$\theta_{corr} = \theta_T - 0.0044T\theta_T^3 + 0.0014T\theta_T^2 + 0.0029T\theta_T - 0.0002T + 2.4\theta_T^3 - 1.6\theta_T^2 + 0.32\theta_T - 0.0046 \quad (4)$$

ここで、 θ_{corr} は温度補正された体積含水率、 $T[^\circ\text{C}]$ は土壌温度、 θ_T は土壌温度 T における体積含水率である。

2. 3. 実験装置及び実験条件

図-2 に示すような長さ約 80cm のアクリル製円筒容器に模擬土壌として細砂相当である $\phi=0.15\text{mm}\sim 0.18\text{mm}$ のガラスビーズを充填させた装置を用いる。密閉した実験装置の温度を操作し、温度変化している間、TDR センサーで断続的に体積含水率を計測する。模擬土壌の体積含水率を 3%、5%、10%、20%の 4 パターンに調整し、それぞれ実験を行う。変化させる温度幅は 5°C から 40°C とした。

3. 実験結果及び考察

実験結果を図-3 に示す。体積含水率 3%調整での実験結果は(a)、5%は(b)、10%は(c)、20%は(d)である。

全ての体積含水率パターンにおいて室内実験でも TDR 土壌水分量計測値の温度依存性が確認され、土壌温度そのものが TDR 土壌水分量計測値に影響を与えることが示された。温度依存性の傾向として、同等の温度幅であっても土壌水分量が多くなるほど TDR 土壌水分量計測値の較差が拡大することが判明した。さらに、体積含水率 10%の実験では土壌水分量計測値と土壌温度の間に負の相関関係、それ以外の実験では正の相関関係を示した。当該結果より、土壌温度が土壌水分量に与える影響は Lu *et al.* (2015) で報告された比例関係よりも複雑である可能性が示された。また、3 種類の温度校正手法を用いた補正結果を比較した結果、Lu *et al.* (2015) で提案された温度補正係数 α を簡便に調整可能なモデルが最も校正性能に優れており、温度補正係数 α は土壌水分量に依存することが明らかとなった。

5. 参考文献

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.

Lu, M., Kapilaratne, J., Kaihotsu, I.: A data-driven

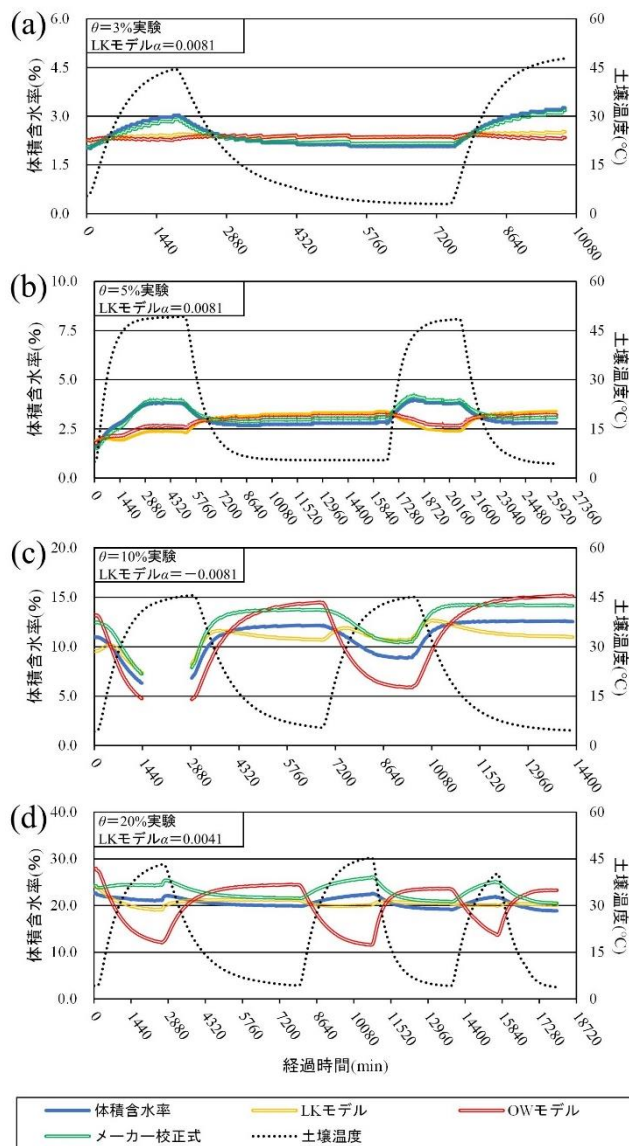
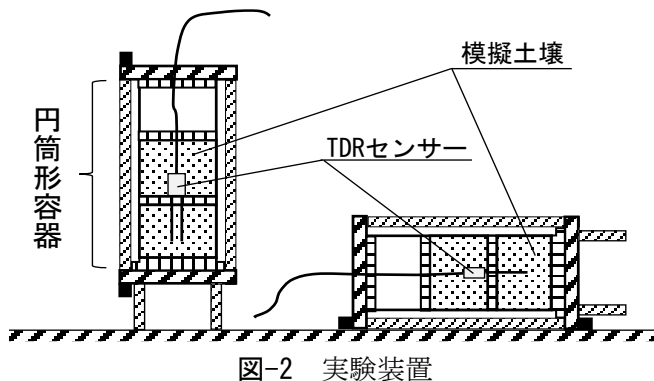


図-3 実験結果および温度校正手法の補正結果

method to remove temperature effects in TDR-measured soil water content at a Mongolian site, *Hydrol. Res. Lett.*, Vol.9, pp.8-13, 2015

Dani Or, Jon M. Wraith : Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model, *Water Resour. Res.*, Vol 35, No.2, pp.371-383, 1999