

ECH₂O水分プローブの温度依存性校正 Calibration for temperature dependence of ECH₂O probe

齊藤 忠臣¹⁾²⁾ 藤巻 晴行³⁾ 安田 裕¹⁾

SAITO Tadaomi¹⁾²⁾, FUJIMAKI Haruyuki³⁾ and YASUDA Hiroshi¹⁾

1. はじめに

誘電率水分計は、近年の土壌水分の非破壊経時モニタリングに不可欠なツールである。しかし、水分計の出力値が温度依存性を示すことが知られており、正確な水分量決定には温度依存校正が必要である。土壌・水分量毎に複雑に変化を見せる温度依存性は、長年多くの研究者を悩ませてきたが、Wraith and Or (1999)による比表面積の概念を盛り込んだ理論モデルの登場により、多くの現象の説明が可能となった。しかし、理論モデルのみならず、経験主義的校正法においても、手法が十分に確立されたとは言い難く、温度依存性校正にはいくつかの課題が残されている。本研究では、静電容量法を用いた安価な誘電率水分計として知られるECH₂O土壌水分プローブ（Decagon社）を例にとり、室内実験によるプローブ出力値の温度依存性校正手法を提案する。また、作成した校正式を用い、中国黄土高原における時系列土壌水分データの温度校正を試みる。

2. 実験方法

供試土壌として中国黄土と鳥取砂丘砂を用いた。高さ 5cm、幅 5cm、長さ 28cmのプラスチック容器の中心に、黄土に対してはECH₂OプローブモデルEC-20 を、砂丘砂に対してはEC-10 を設置し、土壌を所定の密度で充填した。また、プローブ中心から 1cm離れた位置に温度センサーを埋設した。容器を恒温槽内に設置し、水分量と温度を変化させながら、プローブ出力値を測定した。水分量は蒸発法を用いて、風乾から飽和まで 7~10 段階変化させた。地温は 5, 15, 25, 35, 45 と変化させた。

3. 結果と考察

Fig.1 に、各水分量におけるプローブ出力値の温度に対する応答を示す。Fig.1 より、黄土・砂丘砂両土壌において、各水分量 θ の出力値 x (V) が温度 T の一次関数で表せ、また、その勾配は θ に依存していることがわかる。すなわち、

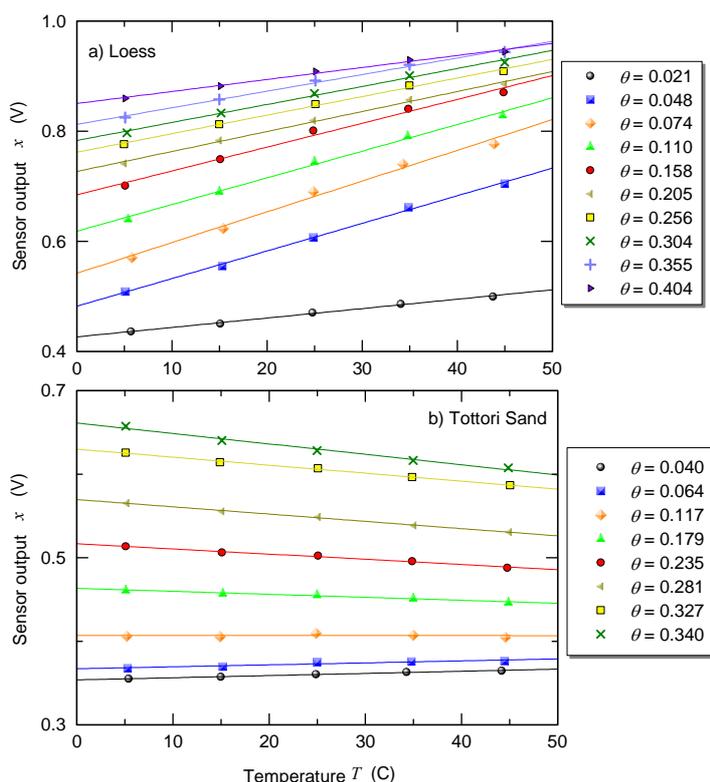


Fig.1. 各水分量におけるECH₂Oプローブ出力値の温度に対する応答: a)黄土 b)鳥取砂丘砂
Response of output of ECH₂O soil moisture probe to temperature change at each water content; a) Loess b) Tottori sand.

1)鳥大乾地研 2)学振 3)筑波大農工: 1)ALRC 2)JSPS 3)Tsukuba Univ.: ECH₂O, 校正, 温度依存, 土壌水分

$$\frac{\partial x}{\partial T} = f(\theta) \quad (1)$$

と表せる．黄土において，勾配 $\partial x/\partial T$ はどの水分域でも一貫して正の値であった．砂丘砂では，高水分域で負であるが，水分の低下に伴い勾配が緩やかとなり，風乾では正の勾配となった．両土壤の粒度分布を考慮すると，上記の傾向は Wraith and Or (1999)の理論モデルで説明される範疇にあると考えられ，将来的な理論モデルによる校正が期待される．

式(1)を $T=T_r$ （基準温度）のとき $x=x_r$ という境界条件の下で解くと次式を得る．

$$x = x_r + f(\theta)(T - T_r) \quad (2)$$

基準温度における x_r は θ の関数で表される．

$$x_r = g(\theta) \quad (3)$$

すなわち， $g(\theta)$ とは出力値と水分の関係を表す土壤固有の校正曲線である．式(3)を式(2)に代入すると，次式を得る．

$$x = g(\theta) + f(\theta)(T - T_r) \quad (4)$$

Fig.2 に，黄土における $f(\theta)$ ， $g(\theta)$ を示す． $f(\theta)$ は次の5次式で当てはめた．

$$f(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\theta^5 \quad (5)$$

ここで a_{0-5} は土壤固有の実験定数である． $g(\theta)$ は次の経験式で当てはめた．

$$g(\theta) = a_g + b_g/(\theta + c_g) \quad (6)$$

ここで， a_g ， b_g ， c_g は土壤固有の実験定数である．式(5)，(6)による当てはめのRMSE（二乗平均平方誤差）はそれぞれで 7.1×10^{-3} (V/K)， 1.9×10^{-4} (V)であり，良好な当てはめがなされたといえる．式(4)に式(5)，(6)ならびに x ， T を代入し， θ について解くことにより，温度校正後の水分量 θ_c を得ることが出来る．しかし，黄土の場合， $f(\theta)$ ， $g(\theta)$ ともに非線形であり，式(4)を代数的に解くことが出来ない．そこで本研究では二分法を用いて式(4)を満たす数値解を得た．

Fig.3 に，2005年夏季における，黄土高原北部六道溝流域内の地中5cmに埋設されたプローブの温度校正前後の水分量変化を示す．Decagon社提供の校正式によって出力値から変換された θ には，地温の日変動に伴う日振幅が明確に見られる．また，Decagon社校正式の θ は，式(6)（土壤固有の x - θ 曲線）により校正された θ とも大きく乖離している．一方，式(4)により温度校正を受けた θ_c は，式(6)の θ と比べ振幅が解消されていることが分かる．また，現地は乾燥地に属し，地表面温度には最大40～-20までの年較差が観測されたが，式(4)による校正により，長期変動においても明確な改善が見られた．

参考文献：Wraith, J.M., and D. Or. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. Water Resour. Res. 35:361-369.

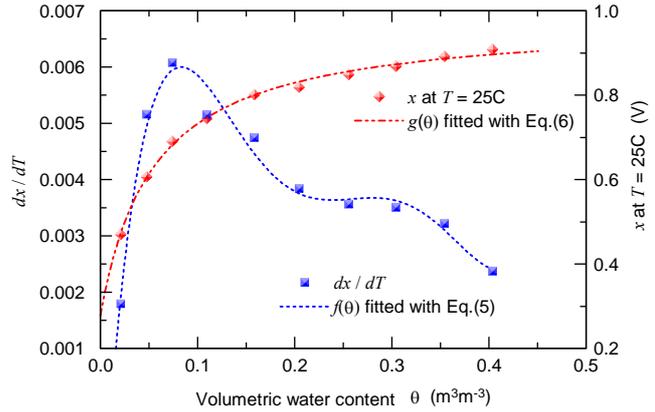


Fig.2. 黄土における勾配 (dx/dT) ならびに25℃での出力値の水分依存性
Dependence of slope (dx/dT) and x at $T=25C$ on water content for loess

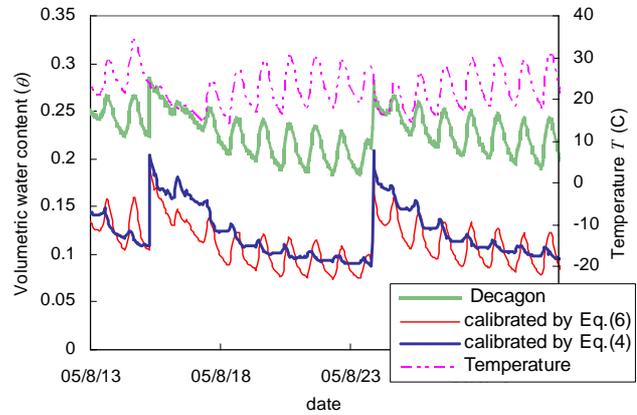


Fig.3. 中国黄土高原地中5cmにおける校正前後の水分変化
Variation of non-calibrated/calibrated θ at 5 cm depth in the Loess Plateau, China