

ECH₂O水分プローブの温度依存性の理論的背景と校正

Calibration and theoretical background of temperature dependences of ECH₂O probes

○齊藤忠臣* 藤巻晴行** 安田 裕* 井上光弘*

○SAITO Tadaomi*, FUJIMAKI Haruyuki**, YASUDA Hiroshi* and INOUE Mitsuhiro*

1. はじめに

誘電率水分計は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が、その出力値は、土壌の見かけの誘電率の温度依存性等に起因する、複雑な温度応答性を示すことが知られている。この温度影響の校正のため、齊藤ら（2008）は、静電容量法を採用した安価な誘電率水分計として知られるECH₂O水分プローブ (Decagon Devices)の EC20 モデルを対象とし、室内実験に基づく経験的な校正手法を提示している。本研究では、この手法を異なる土壌・プローブモデルへと適用し、手法の妥当性を評価すると同時に、得られた実験結果を元に、ECH₂Oプローブの温度依存性の理論的背景について検討する。

2. 実験方法ならびに校正式の誘導

4種の供試土壌と4種のECH₂Oプローブモデルを対象とし、校正実験を行った（表1）。異なる水分量毎に、プローブを挿入した容器の地温を5-35℃に変化させ、その時の出力値を得た。実験手法ならびに校正式の誘導法については、齊藤ら（2008）に詳しい。図1に、基準温度（25℃）におけるプローブ出力水分量 θ_{or} と実際の水分量 θ_a の関係を示す。両者の関係は、土壌・プローブモデル毎に、上に凸、下に凸、S字と異なっており、正確な水分決定のためには、温度依存性の校正以前に、土壌・プローブモデル毎の出力- θ 校正式を作成することが重要であることがわかる。これらの関係は以下の経験式で良好に当てはめられた(a:黄土&EC20, b:黄土&EC5/TE および砂丘砂&EC10, c:レオノラ/関東ローム&EC20)。

$$\theta_{or} = b_0 \log \theta + b_1 \quad (1a)$$

$$\theta_{or} = b_0 + b_1 \theta + b_2 \theta^2 \quad (1b)$$

$$\theta_{or} = b_0 / [1 + b_1 \exp(-b_2 \theta)] + b_3 \theta + b_4 \quad (1c)$$

ここで、 b_0 - b_4 は実験定数である。

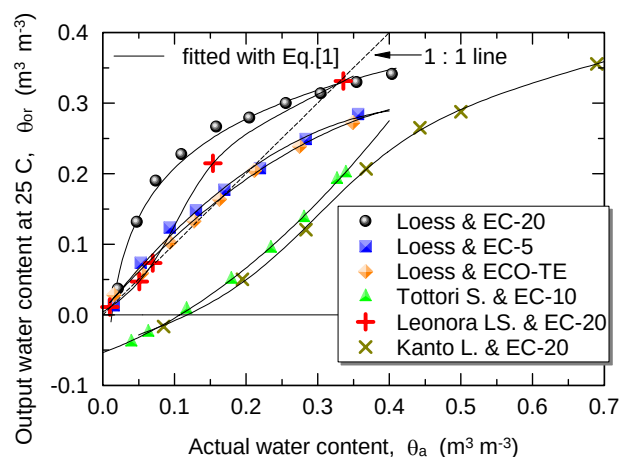


図1. 基準温度 25℃における実際の水分量と出力水分量の関係。 Relationships between θ_a and θ_{or} at 25℃

表1. 供試土の特性とプローブモデル。 Properties of soils tested and probe models.

Soil	Probe models	Dry bulk density Mg m ⁻³	Specific surface area (S_a)* m ² g ⁻¹	Electrical Conductivity (σ_w)† dS m ⁻¹
Tottori sand	EC-10	1.50	1.88	0.52
Kanto loam	EC-20	0.67	48.33	1.07
Leonora loamy sand	EC-20	1.70	11.93	2.29
Loess	EC-5, 20, TE	1.40	12.68	3.01

*Measured by Nitrogen-BET method. †The electrical conductivity of the pore water at saturated water content. The values were estimated using the electrical conductivity of 1:5 soil/water extraction.

*鳥大・乾地研 **筑波大・生命環境: *ALRC **Tsukuba Univ.: ECH₂O, 校正, 温度依存, 土壌水分

一方、各水分 θ_a における、出力水分量 θ_o の温度 T に対する応答は、全土壌・プローブを通じ一貫して線形であり、 θ_o は T の1次関数で表された。しかし、この1次関数の傾き($\partial x/\partial T$)は、土壌・プローブ、そして水分量毎に複雑に異なった。図2は、 $\partial x/\partial T$ の水分依存性を示す。これらは以下の経験式で良好に当てはめられた(a:黄土&EC20, b:黄土&EC20以外)。

$$\partial x/\partial T = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\theta^5 \quad (2a)$$

$$\partial x/\partial T = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 \quad (2b)$$

ここで、 a_0 – a_5 は実験定数である。式(1)と式(2)を組み合わせ θ について解くことにより、温度校正後の水分量 θ_T を得ることが出来る。

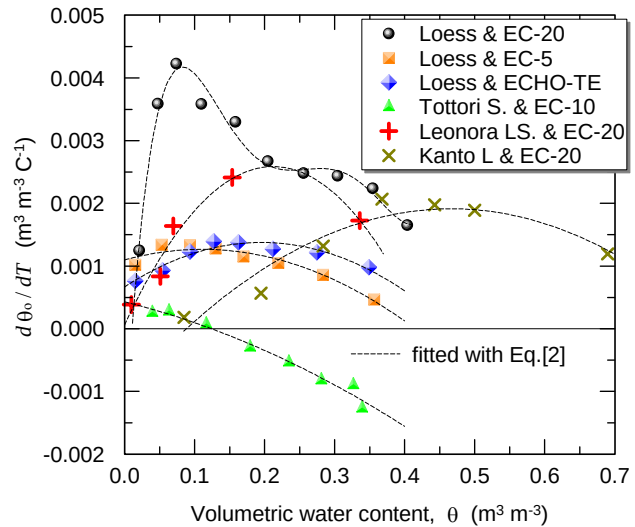


図2. $\partial x/\partial T$ の水分依存性. Dependence of $\partial x/\partial T$ on θ .

3. 結果と考察

表2に、実際の水分量と校正前後の水分量のRMSE(二乗平均平方誤差)を示す。全土壌・プローブにおいて、校正後の水分量 θ_T のRMSEは、 θ_o のRMSEに比べ大きく減少した。これにより、本手法が様々な土壌・プローブに対し、妥当に温度依存性を校正出来ることが確認された。以下では、図2の結果と表1の土壌特性を元に、ECH₂Oプローブの温度依存性の理論的背景を検討する。誘電率水分計の出力値の温度依存性に影響を与える主な要因としては、(i)自由水の誘電率の温度依存性、(ii)温度上昇に伴う結合水の解放、(iii)プローブ出力値の塩依存性に由来する温度依存性、(iv)電気回路の温度依存性、といった要因が挙げられる。ECH₂Oに関しては(iv)は無視できる。各要因は、温度増加に対しプローブ出力値を、(i)は負、(ii)と(iii)は正に変化させる。また、各要因の強さは、(i)の場合は θ 、(ii)は θ と比表面積 S_a 、(iii)は電気伝導度 σ_w とプローブ周波数、によって主に決定される。図2の鳥取砂&EC10を見ると、 $\partial x/\partial T$ は θ の増加に伴い減少し、高水分域では負の値となっている。これは、鳥取砂のような低 S_a ・低 σ_w の土壌(表1)においては、(i)のメカニズム(自由水の誘電率の温度依存性)が(ii)(iii)より卓越し、出力値が温度に対し負の応答を示唆している。同じEC20モデルを用いた関東ロームと黄土を比較すると、中 S_a ・高 σ_w の黄土が、高 S_a ・中 σ_w の関東ロームより、高い $\partial x/\partial T$ 値を示していることが分かる。これは、EC20モデルの周波数帯(5MHz)においては、(ii)の結合水解放作用よりも、(iii)の出力値の塩依存性に由来する温度依存性のメカニズムが卓越していることを示している。同じ黄土を用いたEC5/20/TEを比較すると、プローブ周波数が70MHzと高いEC5/TEが、EC20よりも低い $\partial x/\partial T$ を示している。これは、EC5/TEの高周波数により、導電体による誘電損失が軽減され、(iii)のメカニズムの影響が低下したためと考えられる。

表2. 実際の水分量と校正前後の水分量のRMSE. RMSE between actual and calibrated θ .

Soil & probe	RMSE (m ³ m ⁻³)	
	θ_a vs. θ_o	θ_a vs. θ_T
Loess & EC20	0.072	0.016
Loess & EC5	0.034	0.010
Loess & ECHO-TE	0.035	0.005
Tottori S. & EC10	0.120	0.004
Leonora LS. & EC20*	0.029	0.003
Kanto L. & EC20*	0.205	0.008

参考文献：齊藤忠臣・藤巻晴行・安田 裕 (2008)：誘電率水分計の温度依存性の校正，土壌の物理性，(印刷中)。