

## 誘電率水分計の温度依存性の校正

齊藤忠臣\*・藤巻晴行\*\*・安田 裕\*\*\*

### Calibration of Temperature Dependence of a Dielectric Probe

Tadaomi SAITO\*, Haruyuki FUJIMAKI\*\* and Hiroshi YASUDA\*\*\*

\* Arid Land Research Center, Tottori University & Research Fellow of JSPS (PD),  
 1390 Hamasaka, Tottori, Tottori, 680-0001, Japan

\*\* Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba,  
 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

\*\*\* Arid Land Research Center, Tottori University,  
 1390 Hamasaka, Tottori, Tottori, 680-0001, Japan

#### Abstract

An empirical calibration method for temperature dependence of a commercially available capacitance probe (ECH<sub>2</sub>O probe : Decagon Devices) was presented in this paper. A laboratory experiment was conducted to obtain probe outputs at different water contents ( $\theta$ ) and temperatures ( $T$ ) using soil from Shaanxi Province, located in the Loess Plateau, China. The probe output showed strong positive response to  $T$ . A calibration equation describing the probe output as a function of  $\theta$  and  $T$  was developed through an empirical curve fitting approach. The  $\theta$  values were estimated by solving the calibration equation numerically. The root mean square errors between actual and estimated  $\theta$  were  $0.016 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . We also discussed the theoretical background of the temperature dependence of the probe using the results from the experiment.

The calibration equation was applied to field observation data in the Loess plateau. The equation significantly reduced the daily and seasonal fluctuations of the probe outputs to  $T$ . A linear calibration equation provided by the manufacturer, which neglects temperature dependence, caused incorrect interpretation of water movements, suggesting the importance for temperature calibration in arid environments.

**Key words** : dielectric probe, temperature dependence, calibration, water content, Loess plateau

### 1. はじめに

誘電率水分計は、近年の土壌水分の非破壊かつ経時的モニタリングに不可欠なツールである。一般的な誘電率水分計の周波数帯 (2GHz 以下) において、物質の誘電率を真空の誘電率 ( $8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ) で除した比誘電率は、空気では 1、土壌固体で 4.5~10 であるのに対し、水では 25°C において 78.5 と高い (Robinson *et al.*, 2003)。したがって、土壌全体の見かけの比誘電率  $\epsilon_b$  は、水の存

在量、すなわち土壌中の体積含水率  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) によって強く支配される。誘電率水分計は、プローブから土壌中に発振した電磁波に対する応答を用いて  $\epsilon_b$  を測定する。Topp *et al.* (1980) による TDR (Time domain reflectometry) 法の開発以降、インピーダンス法 (中島ら, 1998)、FDR (Frequency domain reflectometry) 法 (冀ら, 1996)、静電容量法 (Fares and Polyakov, 2006) といった、各種測定原理に基づいた誘電率水分計が開発されてきた。これら誘電率水分計の出力値は、測定法や製品毎

\* 鳥取大学乾燥地研究センター・日本学術振興会特別研究員 (PD) 〒680-0001 鳥取市浜坂 1390

\*\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1

\*\*\* 鳥取大学乾燥地研究センター 〒680-0001 鳥取市浜坂 1390

キーワード : 誘電率水分計, 温度依存性, 校正, 土壌水分, 黄土高原

に、直接  $\epsilon_b$  を出力するものから、 $\epsilon_b$  に関連する周波数・電圧を出力するものまで様々であり、対象となる土壌毎に校正試験を行い、出力値と  $\theta$  の関係式を作成することにより、高精度での水分測定が可能となることが知られている (井本ら, 2006 など)。さらに 1990 年代以降、誘電率水分計の出力値の温度依存性がしばしば報告されるようになり、正確な土壌水分決定のため、温度依存性のメカニズム解明と校正の研究が盛んに進められてきている。

一般的に、水の比誘電率  $\epsilon_w$  は、5–45°C の間で  $0.36^\circ\text{C}^{-1}$  低下することが知られている (Weast, 1986)。したがって、誘電率水分計によって測定される土壌の見かけの誘電率  $\epsilon_b$  は、 $\epsilon_w$  の卓越した負の温度依存性によって、温度上昇に伴い減少し、また体積含水率  $\theta$  が増加するほど、その負の勾配が卓越すると考えられてきた。しかし、1990 年代中期以降、 $\epsilon_b$  の温度依存性は、土壌毎に、そして水分量毎に複雑な応答を示すと報告が相次いだ。例えば、Verstricht *et al.* (1994) は土壌の高水分領域で  $\epsilon_b$  と温度の正の相関を、Peterson *et al.* (1995) は土壌の高水分領域で負の相関、低水分領域で正の相関を確認した。Pepin *et al.* (1995) の TDR による砂での測定結果においては、 $\epsilon_b$  と温度の負の相関が確認されたが、その全体的な変化量は、上記の  $\epsilon_w$  の温度依存と気相・液相・固相の存在比率を考慮した誘電率混合モデルにより予測される変化に比べ少なかった。このように、既存のメカニズムと土壌の液相と固相のみを考慮した誘電率混合モデルでは説明のつかない報告が相次ぎ、 $\epsilon_b$  の温度依存性を説明しうる新たな概念とモデルの登場が待たれた。

Wraith and Or (1999) は、これまでの報告事例と自身らの 3 種の土壌の測定結果に基づき、 $\epsilon_b$  の温度依存の複雑性を統合的に説明しうる新たな仮説を提示し、次報 Or and Wraith (1999) においてそのモデル化を行った。このモデルは、それまでの誘電率混合モデルにおける液相の誘電率を、結合水と自由水の誘電率 (それぞれ  $\epsilon_{w\_bond}$ ,  $\epsilon_{w\_bulk}$  とする) に分けて考えるモデルであり、土壌粒子表面状に吸着され薄膜状に存在する結合水の  $\epsilon_{w\_bond}$  が、誘電率水分計の周波数領域下において水と水の中間的な振舞いをし、 $\epsilon_{w\_bulk}$  に比べて低下することを考慮している。また、結合水とみなされる層の厚さは、温度上昇に伴う粘性の低下により減少する。すなわち、温度の上昇によって結合水が見かけ上“解放”されて誘電率の高い自由水となるため、総水分量が変化せずとも  $\epsilon_b$  が増加することになる。このように、見かけの誘電率  $\epsilon_b$  は、i)  $\epsilon_{w\_bulk}$  の温度上昇に対する負の応答、ii) 温度の変化に伴う自由水と結合水の存在比率の変化、の 2 つのメカニズムの相互作用の結果として表されることとなる。

さらに、自由水と結合水の存在比率は、土壌の比表面

積と、その時の総水分量に影響される。例えば、粒径の細かい (比表面積の大きい) 土壌の低水分領域では、総水分量に対する結合水の存在比率が多いため、温度増加時の結合水解放作用が  $\epsilon_{w\_bulk}$  の低下より卓越し、 $\epsilon_b$  は温度と正の相関を有する。逆に粒径の粗い土壌の高水分領域では、結合水の存在比率は少ないため  $\epsilon_{w\_bulk}$  の温度依存性が卓越し、 $\epsilon_b$  は温度と負の相関を有することとなる。以上のような仮説に基づくモデル構築により、土壌や水分量によって複雑に変化する  $\epsilon_b$  の温度依存性に一定の説明が付くようになった。TDR 測定に基づく結合水周りの誘電率の特性やその温度依存性を論理的に説明する幾何学的モデルの研究は、現在も継続して進められている (e.g. Jones and Or, 2002; Jones and Or, 2003; Regalado, 2006; Schwank and Green, 2007)。しかし、厳密なモデルの構築のためには、上記のメカニズムに加え、誘電率の周波数や電気伝導度に対する依存性、さらには各要素の複雑な相互作用をも考慮する必要がある、理論モデルによる温度依存性校正は必ずしも実用的なものとはなっていないのが現状である。

理論モデルによる校正の一方で、経験的な手法による温度依存性校正の取り組みも始まっている。山中ら (2003) は、モンゴル高原での TDR による土壌水分と地温のデータセットを元に、温度依存性を校正する経験モデルを構築している。彼らは、地温変化による見かけ上の土壌水分の変動成分が土壌水分自体の変化より卓越していると推察される期間 (地温と土壌水分の変動の相関が高い日) のデータを抽出し、地点ごとの単位温度あたりの出力含水率の変化量 ( $\partial\theta/\partial T$ ) と各種土壌物性値との間で重回帰分析を行なった。その結果、 $\partial\theta/\partial T$  を日平均土壌水分と飽和透水係数の対数値の関数として表現する経験モデルを作成し、このモデルが Or and Wraith (1999) の理論モデルよりも妥当に現地データの温度依存性を補正できることを示した。このような経験的な手法により構築されたモデルは、パラメータ値の物理的な意味合いが不明瞭となる場合や、対象地域が限定的となる可能性があると考えられるが、簡便さと精度面から見れば、より実用的な校正手法であるといえる。

以上のような研究の流れを踏まえ、本研究では、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 ECH<sub>2</sub>O 土壌水分プローブ (Decagon Devices) を対象とし、室内実験を用いた高精度な経験的温度依存性補正手法を提示することを目的とした。ECH<sub>2</sub>O プローブの出力値の温度依存性に関しては、McMichael and Lascano (2003), Czarnomski *et al.* (2005) らによる研究があるものの、その影響が評価されるにとどまり、理論モデルに基づいた現象に対する考察や説明がされておらず、具

体的な校正手法の提示もされていない。また、製造元の Decagon Devices から、温度依存性に関するレポートが出されており、校正式も提示されているが、式の誘導過程は不明瞭かつ不可解であり、安定性に関しても疑問が残る (Campbell, 2001)。本研究では、供試土に中国黄土高原の黄土を用い、水分量が既知の土壤に温度変化を与え、出力値・ $\theta$ ・温度の関係を明らかにした上で、経験的な校正式を導いた。また、校正試験の結果を元に、本プローブの温度依存性の理論的背景に関する考察を行った。さらに、得られた校正式を中国黄土高原における土壤水分モニタリング結果に適用し、校正式の妥当性と乾燥地環境下における温度依存性校正の重要性について検討した。

## 2. 研究方法

### 2.1 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分プローブ

ECH<sub>2</sub>O 土壤水分プローブ (Decagon Devices, Pullman, Washington, USA) は、静電容量法を採用した誘電率水分計であり、特に安価かつ使用が容易である点から、近年世界中で最も広く普及しつつある水分計の一つである (e.g. Christensen 2005; Luedeling *et al.*, 2005; Riley *et al.*, 2006)。ECH<sub>2</sub>O プローブの測定原理については Campbell (2002) に詳しい。本研究では、センサ部の長さが約 20 cm の板状モデル EC-20 (長さ 25.4 cm, 幅 3.2 cm, 厚さ 0.1 cm) を用いて、温度依存性の校正試験を行った。また、校正試験に先立ち、プローブが土壤水分を測定する空間的な領域 (測定範囲) を知るため、プローブを挿入した一定水分の土壤の周囲を徐々に削り、出力値の変化をモニタリングした。その結果、プローブの測定範囲は、プレートの長さ・幅の範囲内の、両側約 2 cm に収まっていることが確認された。

プローブの出力値は電圧  $x$  (V) であり、製造元からは  $x$  と体積含水率  $\theta$  の関係を表す線形の校正式が提示されている。この式の精度は、塩濃度が低い中間的な土性の土壤において  $\pm 0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  程度であり、土壤固有の校正を行うことにより  $\pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  程度まで向上するとされている (Decagon Devices, Inc., 2006)。なお、いくつかの市販の誘電率水分計において、センサの電気回路自体の温度依存性が報告されているが (e.g. Seyfried and Grant, 2007)、ECH<sub>2</sub>O プローブに関しては、プローブ自体の温度依存性は無視できる程度であることが確認されている (Campbell, 2001)。

### 2.2 供試土

温度依存性校正試験の供試土として、中国黄土高原内に位置する陝西省榆林市神木県六道溝流域から採取した黄土を用いた。採取地点における黄土は、表層から深部

表-1 供試土の物理・化学性

Table 1 Physical and chemical properties of the soil tested.

粒径区分*		乾燥密度	比表面積†	電気伝導度‡
砂	シルト 粘土			
%		Mg m <sup>-3</sup>	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>
86.4	6.3 7.3	1.40	12.68	3.01

\*比重計法により測定。国際土壤科学会 (ISSS) の区分による。

†窒素吸着 (BET) 法により測定。

‡飽和水分量 ( $\theta = 0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) における間隙水の電気伝導度。1:5 土壤/水抽出液における電気伝導度値を元に換算。

まで有機物含量に乏しくほぼ均質であり、明確な層の形成は見られなかった。したがって、深さ方向において、温度依存性に影響を及ぼす土性の差異は無視できると考えられる。そこで本研究では、表層から深さ 60 cm までの土壤を採取し、それを均等に混合したものを供試土とした。温度依存性に関与する供試土の物理・化学性として、粒度分布、乾燥密度 (現地採取時)、比表面積、電気伝導度を表-1 に示す。

### 2.3 校正試験

実験装置の模式図を図-1 に示す。プローブによる水分の測定範囲よりも大きい、高さ 5 cm, 幅 5 cm, 長さ 28 cm のプラスチック容器を用意した。容器の鉛直方向・水平方向の中心にプローブを設置し、供試土を表-1 の密度で充填した。また、プローブ中心から 1 cm 離れた位置に温度センサを埋設した。水分量は風乾から飽和付近までの間で計 10 段階変化させた。各水分量において、容器を設置した恒温槽内の温度を 5, 15, 25, 35°C の 4 段階に変化させ、地温が恒温槽内の気温付近で十分に一定となったことを確認してから、その時の地温  $T$  と出力値  $x$  の値を 5 回読み取り、平均値を求めた。なお、いくつかの研究において、加温過程と減温過程における出力値の応答にヒステリシスがあるとの報告がされているが (e.g. McMichael and Lascano, 2003)、本研究の校正試験においては、このような現象は観察されなかった。また本研究では、校正における基準温度  $T_1$  を 25°C とした。

本研究では蒸発法により土壤水分量を変化させた。蒸発法は、土壤表面からの蒸発により水分量を調整する手法であり、水分量の異なる土壤サンプルを複数用意し、逐一容器に充填する充填法に比べ、i) 労力が少ない、ii) 充填毎の密度のムラの影響がない、iii) 用意する供試土が少量で済む、といった利点がある。本研究で用いた

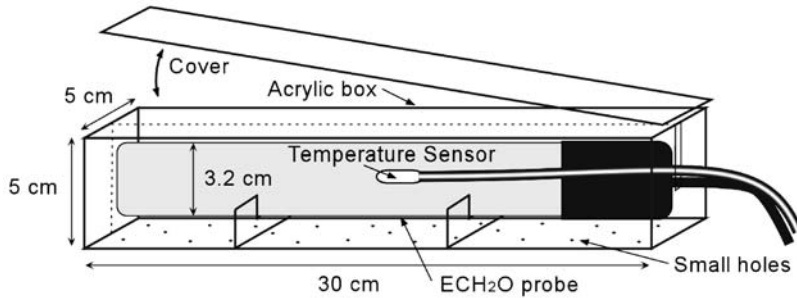


図-1 実験装置の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

土壌容器には、上面に脱着可能なカバーがあり、蒸発により水分を減少させる間はカバーを開放し、その後温度変化を与える間は閉じた状態とした。この「水分量減少-温度変化」の一連のプロセスを、飽和状態から風乾状態まで繰り返し行うことにより、異なる水分量における出力値の温度依存性データを取得した。なお、試験時間を短縮するため、蒸発時には送風機を用いて土壌面蒸発を促進させた。この際、土壌面蒸発の空間的な差異をなくすため、土壌面全体に均等に風が当たるよう留意した。また、土壌容器下面には、湛水条件を与え土壌を下方から飽和させるための小孔が開けられているが、初期に土壌を飽和させる間以外はテープによって閉じた状態とした。

校正試験においては、出力値  $x$  に対応する、プローブの主測定範囲の体積含水率の正確な値を得ることが重要である。蒸発法においては、各蒸発ステップにおける容器全体の重量変化から、水分量  $\theta$  の値を算出することとなる。しかしこの際、鉛直方向の  $\theta$  の分布を考慮し、容器全体（深さ 0 cm ~ 5 cm）における  $\theta$  の値が、プローブの主測定範囲（深さ 1 cm ~ 4 cm）における平均の  $\theta$  の値と同じと見なせるか、という点を十分に検討する必要がある。本研究で用いた黄土の場合、深さ毎のサンプリングの結果より、容器全体と主測定範囲内における平均  $\theta$  の違いは微小であったため、容器全重の変化から  $\theta$  の値を決定することが妥当であると確認された。しかし、土性がより粗い土壌に蒸発法を適用する場合には、下方への排水と蒸発による乾燥層の形成が顕著となるため、容器内の鉛直方向の水分分布の非線形性が強くなるのが懸念される。この場合には、別途充填法を用いて基準温度における正確な  $x$ - $\theta$  間の校正式を作成した上で、各蒸発ステップにおける基準温度時の  $x$  の値と校正式を用いて、主測定範囲の  $\theta$  の値を推定すること望ましいと考えられる。

## 2.4 校正式の誘導

校正試験の結果を元に、温度依存性の校正式を作成した。データ間をスムーズかつ正確に繋ぐ経験式を探索し、それらを組み合わせることにより、出力値  $x$  を水分  $\theta$  と地温  $T$  の関数として表現した。具体的な式の誘導過程については結果と考察において述べる。

## 2.5 現場データの校正

供試土の採取地点において、現地のウォーターハーベスティングの評価と改良を目的とした土壌水文観測が行われている。調査地は半乾燥地域に属し、年平均降水量は 400 mm 程度である。調査地内の実験区ならびに実験内容については、齊藤 (2006) に詳しい。本研究では、この観測データのうち、2005 年夏季から 2006 年春季における、裸地斜面の地中深さ 5 cm ならびに 60 cm に埋設されたプローブに対し校正式を適用し、校正前後のモニタリング結果を比較することにより、地温の日変化・季節変化がプローブに与える影響を検討した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 出力値・水分・温度の関係

図-2 に、校正試験より得られた、基準温度 25°C における出力値  $x$  と体積含水率  $\theta$  の関係を示す。本供試土の  $x$  と  $\theta$  の間には非線形性が見られ、Decagon 社より提供された線形の校正式を用いた場合、風乾  $\sim 0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  では  $\theta$  を過大評価、飽和付近では  $\theta$  を過小評価することがわかる。特に、 $x$  が 0.65 V 付近では、真の含水率に対し  $\theta$  が  $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  以上も過大評価されることになり、高精度での水分量測定のためには、まず土壌固有の  $x$  ( $\theta$ ) 校正式の作成が重要であることがわかる。

図-3 に、各水分量における出力値の温度に対する応答を示す。全水分領域において、出力値は温度に対し一貫して正の線形の応答をしているものの、その傾き  $\partial x / \partial T$  は水分量毎に異なっている。図-4 には、 $\partial x / \partial T$  と水

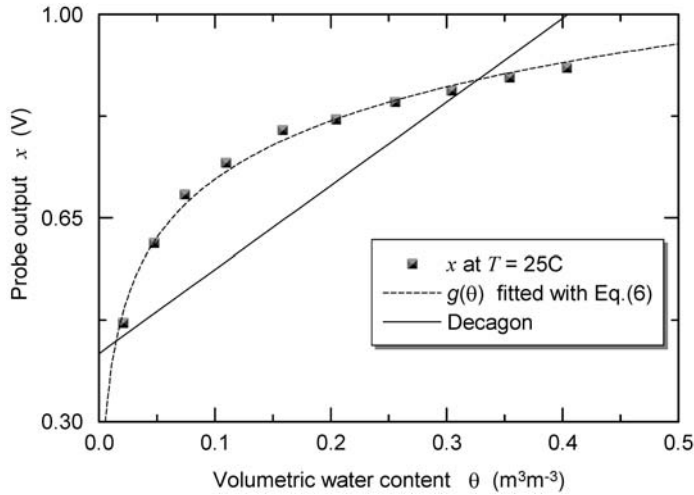


図-2 基準温度 25°C における ECH<sub>2</sub>O プローブの出力値と体積含水率の関係

Fig. 2 Relationship between the output of ECH<sub>2</sub>O probe and water content at regular temperature (25°C).

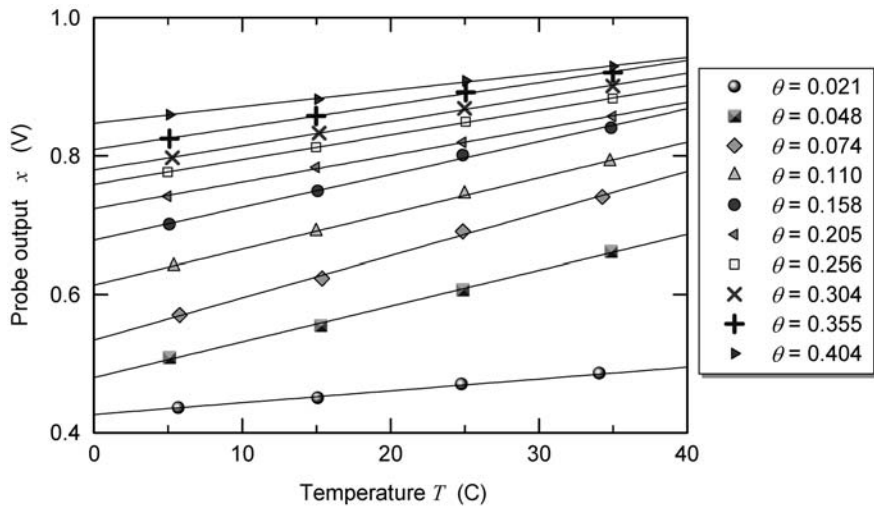


図-3 各水分量における ECH<sub>2</sub>O プローブ出力値の温度に対する応答

Fig. 3 Response of the output of ECH<sub>2</sub>O probe to temperature at each water content.

分の関係を示す。 $\partial x / \partial T$  は、風乾 ( $\theta=0.021$ ) で小さな値を示したが、水分の増加に伴い  $\theta=0.1$  付近で最大のピークを示した。これは、プローブの出力値が  $\theta=0.1$  付近において温度に対し最も強く正に応答することを意味する。 $\theta=0.1$  以上においては、 $\partial x / \partial T$  は水分の増加に伴い基本的に減少した。

### 3.2 校正式の誘導と解

校正試験の結果を元に、出力値  $x$  を水分  $\theta$  と地温  $T$

の関数として表現する校正式を導く。図-3 より、各水分量における出力が温度  $T$  の一次関数で表せ、また、その勾配は  $\theta$  に依存していることがわかる。すなわち、

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

と表せる。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。

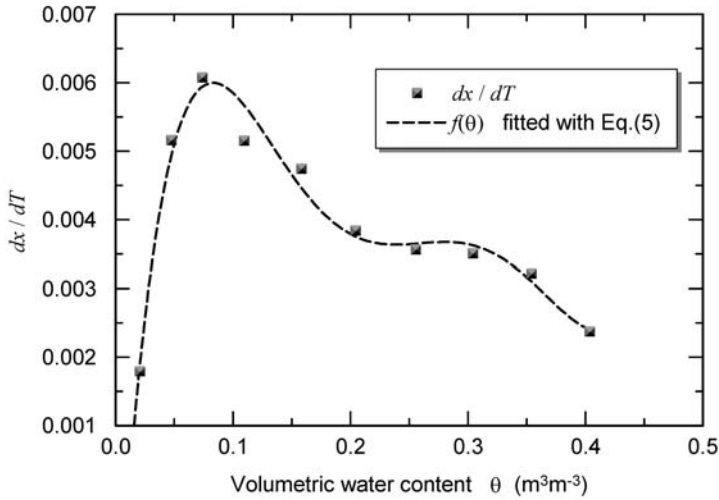


図-4  $\partial x / \partial T$  と水分の関係

Fig. 4 Dependence of  $\partial x / \partial T$  on water content.

表-2 式(5), (6)の実験定数値

Table 2 Parameter values of Eqs. (5) and (6).

		Eq. (5)					Eq. (6)	
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_g$	$b_g$	
$2.0 \times 10^{-3}$	0.28	-3.07	14.41	-30.62	24.17	0.15	1.05	

$$x = x_r + f(\theta)(T - T_r) \tag{2}$$

$$g(\theta) = a_g \log \theta + b_g \tag{6}$$

基準温度における出力値  $x_r$  は、図-2 に示されたように  $\theta$  の関数で表される。

$$x_r = g(\theta) \tag{3}$$

式(3)を式(2)に代入すると、次式を得る。

$$x = g(\theta) + f(\theta)(T - T_r) \tag{4}$$

$f(\theta)$  は  $\partial x / \partial T$  の水分依存性 (図-4)、 $g(\theta)$  は基準温度における  $x$  の水分依存性 (図-2) を表現する関数である。それぞれの図において、データをスムーズかつ精度良く当てはめる経験式を探索した。その結果、 $f(\theta)$  は次の5次式で当てはめられた。

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

ここで  $a_{0-5}$  は土壌固有の実験定数である。 $g(\theta)$  は次の経験式で当てはめられた。

ここで、 $a_g$ 、 $b_g$  は土壌固有の実験定数である。表-2 に、 $a_{0-5}$ 、 $a_g$ 、 $b_g$  のそれぞれの値を示す。図-2、図-4 に示されたように、式(5)、(6)はデータと良好に一致している。当てはめに対する RMSE (二乗平均平方誤差) はそれぞれ  $7.1 \times 10^{-3}$  (V/K)、0.012 (V) であった。

式(5)、(6)を式(4)に代入することにより、 $x$  を  $\theta$  と  $T$  の関数として表現する校正式が導かれる。この式(4)に、プローブより得られた  $x$ 、温度センサから得られた  $T$ 、基準温度値  $T_r = 25$  を代入し、 $\theta$  について解くことにより、校正後の水分量を得ることができる。しかし、本供試土においては、 $f(\theta)$ 、 $g(\theta)$  とともに非線形であり、式(4)を  $\theta$  について代数的に解くことができない。したがって、何らかの数値解法により解を求める必要がある。本研究では二分法を用いて式(4)を満たすプログラムを作成し、 $\theta$  についての数値解を得た (篠崎・松下, 1976)。

式(4)の精度を検証するため、校正試験より得られた  $x$

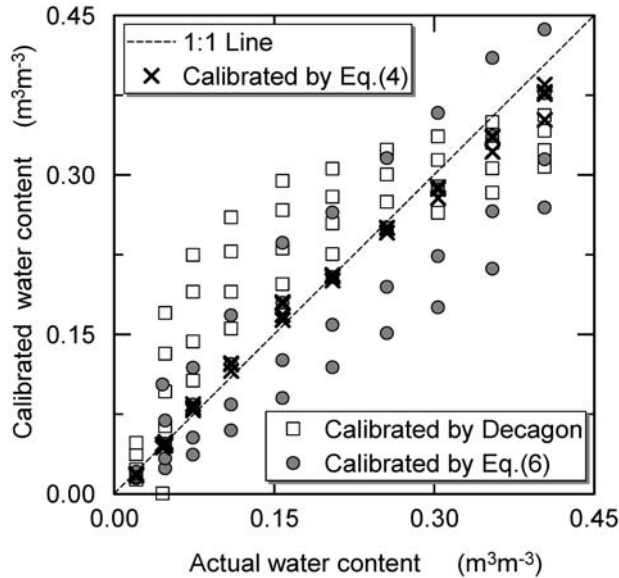


図-5 校正された水分量と実際の水分量の比較

Fig. 5 Comparison of the actual and calibrated water content.

と  $T$  のデータセットを用いて温度校正後の水分量を求め、それぞれのデータと対応する実際の水分量と比較した(図-5)。図-5には、Decagon社提供の校正式、ならびに式(6)(温度依存性を考慮しない土壌固有の校正式)による校正結果も同時に示した。図-5より、式(4)が低水分から高水分領域まで、高い精度で水分量を校正できていることがわかる。式(6)による校正の精度は、低水分領域においてDecagon社の線形校正式より良いものの、中・高水分領域においては、線形校正式よりも低下した。これは、図-2に示されたように、低水分領域では式(6)の  $x$  に対する  $\theta$  の変化が緩やかであるため、温度変化による  $x$  の変動が  $\theta$  の決定にあまり影響をしない一方、中・高水分領域では  $x$  に対する  $\theta$  の変化が急激であるために、温度変化によるわずかな  $x$  の変動が  $\theta$  の決定時に大きな誤差をもたらすためであると考えられる。このように、たとえ式(6)のような一定温度における正確な土壌固有の  $x-\theta$  校正式を作成したとしても、地温が変化する環境下においては、水分推定精度が線形校正式よりも悪化してしまう可能性があることが明らかとなった。式(4)、式(6)、Decagon社の式における、実際の水分量と校正後の水分量のRMSEは、それぞれ、0.016、0.072、 $0.060 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。

### 3.3 温度依存性の理論的背景に関する考察と校正法適用の留意点

図-4に示された  $\theta=0.1$  付近での出力値の強い正の応

答の一因には、Wraith and Or (1999) の仮説による見かけの誘電率  $\epsilon_b$  の温度依存性メカニズムのうちの、ii) 温度の変化に伴う自由水と結合水の存在比率の変化、が関与している可能性があると考えられる。また、中・高水分領域における水分増加に伴う  $\partial x / \partial T$  の減少については、自由水の存在比率の増加により、温度上昇に伴う  $\epsilon_{w\_bulk}$  の低下のメカニズムが強くなったことが一因に挙げられる。

しかしながら、自由水の存在比率が多い飽和付近においても、 $\partial x / \partial T$  がなお正の値を示すことは、本プローブの温度依存性のメカニズムがWraith and Or (1999) の仮説だけでは説明できないことを示唆している。粒径が細かく比表面積の極めて大きい(結合水の存在比率の多い)土壌であれば、飽和付近においても  $\partial x / \partial T$  が正の値を示す可能性があるが、本供試土は砂が多く比表面積も大きくないため、本来であれば  $\partial x / \partial T$  は負の値を示すものと考えられる。したがって、このプローブの温度に対する正の応答には、 $\epsilon_b$  の温度依存性だけでなく、 $\epsilon_b$  の塩依存性のメカニズムが関与していると考えられる。

齊藤ら(2005)によると、ECH<sub>2</sub>O EC-20 プローブの出力値は、本供試土の土壌間隙水中の電気伝導度程度の塩濃度に対し(表-1)、強く正に応答すると報告されている。この塩依存性は、本プローブが5MHzと低い周波数領域で計測を行っているため、これにより導電性の電荷

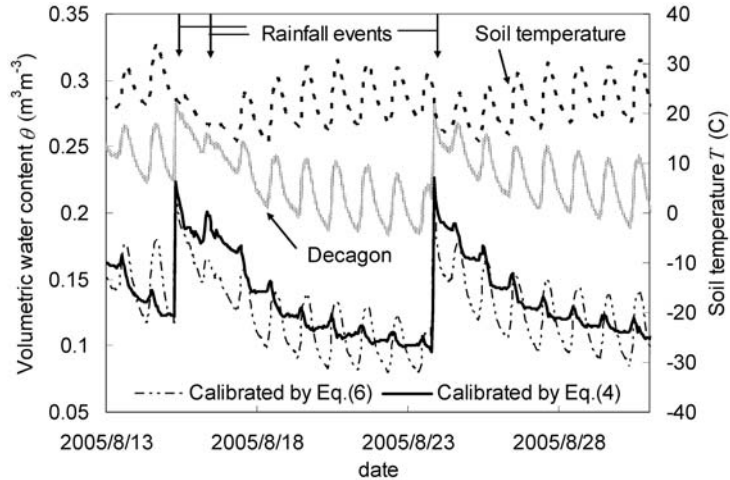


図-6 2005年夏季における黄土高原の地中5cmに埋設されたプローブの校正後の水分量と地温

Fig. 6 The calibrated water contents and soil temperature at a depth of 5 cm in the Loess Plateau (summer in 2005).

を含む土壌内で複素誘電率の虚数部（電気的エネルギーの損失）が増大することによって引き起こされる。電気伝導度は温度の関数であり、温度の上昇と共に増大する。つまり、温度が上昇すると、電気伝導度が増加し、これが出力値を増加させることになる。鈴木ら（2007）も、印加周波数の異なる誘電率水分計と電気伝導度の異なる土壌を用いた実験の結果より、ECH<sub>2</sub>O EC-20の正の温度依存性は、低印加周波数による塩依存性の影響によりもたらされると報告している。

以上をまとめると、本プローブにおいては、図-4に示された  $\partial x / \partial T$  と水分の関係（式(5)）が、土性の違いによって変化するだけでなく、塩濃度の変化に伴って変化することとなる。したがって、印加周波数が低い、すなわち塩依存性の大きいプローブを用いる場合、モニタリング期間中に塩濃度が変化する環境下においては、本研究で提示された温度依存性の補正手法の適用が困難であり、手法の適用時にはこの点に十分に留意する必要があるといえる。本プローブを塩・温度の変化する環境下で用いる際には、塩・温度依存性の相互作用を考慮した校正手法を提示した上で、塩・温度・水分の同時モニタリングを行う必要がある。

本校正手法の適用に際し、もう一点留意すべき点として、校正式の複数解の問題が挙げられる。本校正試験で得られた全データに対して、式(4)は現実的な水分の範囲内（例えば  $0 < \theta < 0.45$ ）に解を一つのみを有していた。しかし、図-3を見ると、飽和付近の温度  $50^{\circ}\text{C}$  以上において、回帰直線同士が交差することが予想される。これ

は、この水分・温度域において、出力値が水分の増加に対し単調増加せず、不規則に変化し、校正式が一つの  $x$  に対し複数の  $\theta$  を取り得る可能性があることを意味している。回帰直線の交差は、水分増加に伴う自由水の誘電率低下メカニズムが一因となって引き起こされるものであると考えられ、本供試土に限らず、他の土壌においても発生する可能性がある。したがって、本校正手法を高温・高水分条件下に適用する際には、複数解が生じるか否かに留意し、もし発生すると判断された場合には、現実的な水分域における全ての解を求めた上で、それぞれの妥当性を吟味し、最適解を選択する必要がある。

### 3.4 現場データの校正

図-6に、2005年夏季における、黄土高原調査地内の地中5cmに埋設されたプローブの校正後の水分量と地温の変化を示す。なお、同地点においては、顕著な塩濃度の変化は見られず、また複数解を生じる可能性のある高温・高水分条件となっていないため、校正式が問題なく適用可能であると考えられる。Decagon社の式によって校正された  $\theta$  には、地温の日変動（約  $10^{\circ}\text{C}$ ）に対応する日変化（約  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ）が明確に見られる。温度依存性を考慮しない式(6)では、式(4)に近い校正後の  $\theta$  が得られているものの、Decagon社の式と同程度の地温に対する正の応答が見られる。一方、式(4)は、他の式と比べて振幅を大きく軽減できていることがわかる。また、地温は降雨時に低く晴天時に高くなる傾向にあるため、プローブの温度に対する正の応答は、本来水分の増加する降雨時に  $\theta$  を過小評価し、水分の減少する高温時に  $\theta$



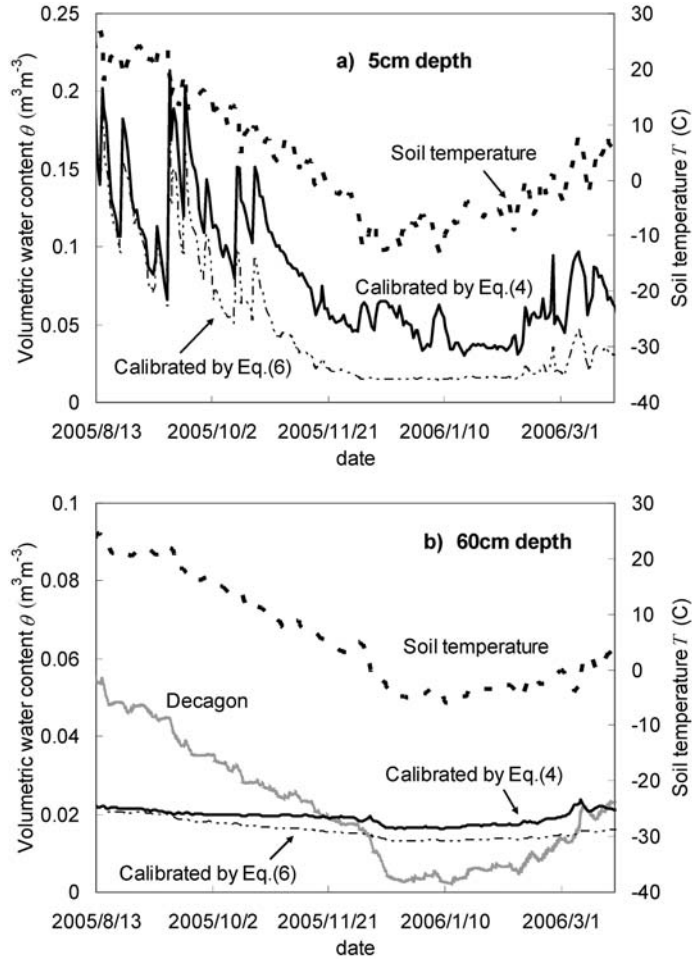


図-7 2005年夏季から2006年春季における黄土高原の地中に埋設されたプローブの校正後の日平均水分量と日平均地温：a) 深さ5cm, b) 深さ60cm

Fig. 7 The calibrated daily mean water contents and daily mean soil temperature in the Loess Plateau (summer in 2005 — spring in 2006) : a) at a depth of 5 cm, b) at a depth of 60 cm.

を過大評価することにつながる。したがって、式(4)による校正は、地温変化による日変動を軽減するだけでなく、降雨イベントに対応する水分の増減を明確化する上でも重要であることがわかる。

図-7aには、2005年夏季から2006年春季までの、同調査地点地中5cmに埋設されたプローブの校正後の日平均水分量・地温を示す。同地点では、夏季に大部分の降雨が集中し、冬季には土壤が凍結するため、 $\theta$ は夏季に高い値を示し、秋季に減少、冬季に一定、春季に増加、という大まかな変化傾向を示す。図-7aより、式(6)は夏季において式(4)の結果と良く一致するものの、秋季以降の地温の低下に伴い、 $\theta$ を過小評価していくことがわ

かる。これは、式(6)が25°Cを基準温度として作成されたためである。なお、式(4)による校正は、冬季の凍結期間において、地温に対して負の応答を示している。これは、凍結による相の変化に伴い $\epsilon_b$ の温度依存特性が変化し、プローブの温度に対する正の応答が鈍化したにもかかわらず、式(4)がこれを過剰に校正したためであると考えられる。この期間のうち、地温が十分に0°Cを下回っている期間においては、不凍水の微細な水分移動を除いて本来 $\theta$ が変化し得ないため、上述のような見かけ上の水分変化の影響は容易に判定・補正可能であると考えられる。しかし、不凍水の詳細な挙動や0°C近傍における地温と不凍水量の関係を十分に議論するためには、

氷と不凍水の誘電率の温度依存性を考慮した新たな校正式の作成が必要となると考えられる。ただし、相変化に伴い、例えば図-3の線形関係の傾きが0°Cを境界として変化する、もしくは不連続となることが予想される。したがって、全温度範囲を統一した式で校正するのではなく、0°C以下のための式と式(4)を、地温に応じ式を切り替える形で校正することが望ましいと考えられる。

図-7bには、同地点同期間中の深さ60cmに埋設されたプローブの校正結果を示す。式(4)による校正結果を見ると、期間中の $\theta$ はほぼ風乾水分量から変化せず一定であり、降雨による水分は深さ60cmまで到達していなかったことがわかる。しかし、Decagon社の式によって校正された $\theta$ は、地温の変化とほぼ一致する形で増減している。したがって、温度依存性が校正されない場合、現地の夏雨型の気候と照らし合わせると、「降雨の多い夏季には深さ60cmにおいても水分が増加し、その後、秋から冬にかけて減少する」といった、誤った考察が導かれる可能性があることがわかる。式(6)による校正は、冬季において $\theta$ を若干過小評価したものの、Decagon社の式ほど地温変化の影響を受けなかった。これは3.3で述べたように、式(6)による水分決定が、低水分領域において温度の影響を受けにくいことに起因している。しかし、式(6)の形状は土壌毎に異なり、たとえ同一土壌においてさえ、塩濃度の違いにより下に凸から上に凸まで変化する可能性がある(齊藤ら, 2005)。したがって、式(6)による校正が、必ずしも低水分領域において温度の影響を受けないわけではなく、留意が必要である。

#### 4. おわりに

本研究では、室内校正試験に基づくECH<sub>2</sub>O土壌水分プローブの経験的な温度依存性の補正手法を提示した。出力値を水分と地温の関数として表現する校正式を導くと同時に、温度依存性の理論的背景に関する考察を行った。温度依存性を考慮した校正式は、校正試験より得られたデータに対し、低温から高温、低水分から高水分領域まで、高い精度で水分量を推定できた。また、現場データへの適用結果より、校正式が地温の変化に伴う見かけ上の水分変動を十分に校正できることがわかった。

本プローブの温度に対する強い正の応答は、晴天時・日中・夏季の水分を過大評価し、雨天時・夜間・冬季の水分を過小評価することにより、降雨イベントに対する水分変化の不明瞭化や、データに対する誤った解釈を招く可能性があることがわかった。誘電率水分計の温度依存特性は、水分計や対象土壌毎に複雑に異なるものではあるが、特に地温の日変化・年変化の大きい乾燥地域や、地表付近での水分モニタリングに水分計を使用する

場合、使用者はその温度依存性の特性を把握・校正した上で、これをデータの解釈に反映させる必要があるといえる。

本手法の適用に際し留意すべき環境条件として、i) 塩濃度の変化する環境下(印加周波数の低いプローブの場合)、ii) 校正式の複数解が発生する可能性がある高温・高水分条件下、iii) 0°C以下の水の相変化を伴う環境下、の三つが挙げられた。i)に関しては、塩・温度依存性の相互作用を考慮した校正、iii)に関しては、氷と不凍水の誘電率の温度依存性を考慮した校正が必要であり、更なる研究が期待される。また、他の誘電率水分計、異なる土性・塩濃度の土壌へと本手法を適用し、条件毎の温度依存性の評価や手法の妥当性の検討を行っていく必要があると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会による拠点大学交流事業ならびに特別研究員制度の助成を得た。ここに感謝の意を表す。

#### 引用文献

- Campbell, C.S. (2001): Response of ECHO soil moisture sensor to temperature variation. Decagon Devices Inc. Application Note. AN70TP-10. Decagon Devices Inc., Pullman, Wash.
- Campbell, C.S. (2002): ECH<sub>2</sub>O Dielectric Probes vs Time Domain Reflectometers (TDR). Decagon Devices Inc. Application Note. Decagon Devices Inc., Pullman, Wash.
- Christensen, N.B. (2005): Irrigation management using soil moisture monitors. Western Nutrient Management Conf. 6: 46-53. Salt Lake City, UT.
- Czarnomski, M.N., G.W. Moore, T.G. Pypker, J. Licata and B.J. Bond (2005): Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. Can. J. For. Res., **35**: 1867-1876.
- Decagon Devices, Inc. (2006): ECH<sub>2</sub>O Soil Moisture Sensor Operator's Manual For Models EC-20, EC-10, and EC-5 Version 2.2, Decagon Devices Inc., Pullman, WA.
- Fares, A. and V. Polyakov (2006): Advances in crop water management using capacitive water sensors. Adv. Agron., **90**: 43-77.
- 井本博美・鴨下顕彦・加藤洋一郎・常田岳志・宮崎 毅 (2006): Profile Probeによる黒ボク土と立川ロー

- ムの土壤水分測定—室内キャリブレーションと現場測定—。土壤の物理性, **104**: 51-60.
- 冀 北平・三野 徹・赤江剛夫・長堀金造 (1996): FDR 法による土壤誘電率測定と特定深さの土層の土壤水分測定, 農業土木学会論文集, **182**: 25-30.
- Jones, S.B. and D. Or (2002): Surface area, geometrical and configurational effects on permittivity of porous media. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **305**: 247-254.
- Jones, S.B. and D. Or (2003): Modeled effects on permittivity measurements of water content in high surface area porous media. *Physica B*, **338**: 284-290.
- Luedeling, E., M. Nagieb, F. Wichern, M. Brandt, M. Deurer and A. Buerkert (2005) Drainage, salt leaching and physico-chemical properties of irrigated man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman. *Geoderma*, **125**: 273-285.
- McMichael, B. and R. J. Lascano (2003): Laboratory evaluation of a commercial dielectric soil water sensor. *Vadose Zone J.*, **2**: 650-654.
- 中島 誠・井上光弘・澤田和男・クリスニコル (1998): ADR 法による土壤水分量の測定とキャリブレーション. 地下水学会誌, **40**: 509-519.
- Or, D. and J.M. Wraith (1999) Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model. *Water Resour. Res.*, **35**: 371-383.
- Pepin, S., N.J. Livingston and W.R. Hook (1995): Temperature dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59**: 38-43.
- Petersen, L.W., O.H. Jacobsen, F., Plauborg, M. Andersen and D.E. Rolston (1995): The effects of temperature on the determination of soil water content by time-domain reflectometry, paper presented at Soil Sci. Soc. Am. Annual Meeting, St. Louis, Mo., Oct.29 to Nov. 3.
- Regalado, C.M. (2006): A geometrical model of bound water permittivity based on weighted averages: the allophane analogue. *Journal of Hydrology*, **316**: 98-107.
- Riley, T.C., T.A. Endreny and J.D. Halfman (2006): Monitoring soil moisture and water table height with a low-cost data logger. *Computers & Geosciences*, **32**: 135-140.
- Robinson, D.A., S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or and S.P. Friedman (2003): A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* **2**: 444-475.
- 齊藤忠臣 (2006): 乾燥地における表面流出とウォーターハーベスティングに関する研究. 第45回農業土木学会土壤物理研究部会研究集会, 23-28.
- 齊藤忠臣・藤巻晴行・井上光弘 (2005): ECH<sub>2</sub>O 水分プローブと4極センサーを用いた土壤水分・塩分の同時測定法. 平成17年度農業土木学会講演要旨集, 808-809.
- Schwank, M. and T.R. Green (2007): Simulated effects of soil temperature and salinity on capacitance sensor measurements. *Sensors*, **7**: 548-577.
- Seyfried, M.S. and L.E. Grant (2007): Temperature effects on soil dielectric properties measured at 50 MHz. *Vadose Zone J.* **6**: 759-765.
- 篠崎寿夫・松下祐輔 編 (1976): 工学のための応用数値計算法入門 (上). pp. 126. -127, コロナ社, 東京.
- 鈴木伸治・廣田知良・岩崎秀威・桑尾和伸・岩田幸良 (2007): なぜ誘電率土壤水分センサは正の温度依存性を示すのか? 第49回土壤物理学会講演要旨集, 32-33.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, **16**: 574-582.
- Verstricht, J., B. Neerdael, P. Meynendonckx and G. Volckaert (1994): Clay moisture measurements in radioactive waste disposal research. Proceedings of the symposium on time domain reflectometry in environmental, infrastructure, and mining applications, Evanston, Illinois, Sept 7-9, U.S. Bureau of Mines, special publication SP 19-94, NTIS PB95-105789, 337-348.
- Weast, R.C. (Ed.) (1986): *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- 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.
- 山中 勤・開発一郎・ウインバータルダムバラヴィア (2003): TDR による土壤水分測定値の温度依存性とその原位置測定データに基づく補正. 水文・水資源学会誌, **16**: 246-254.

## 要 旨

誘電率水分計は、その出力値が温度に依存することが知られており、正確な土壌水分決定のためには校正が必要である。本研究では、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 ECH<sub>2</sub>O 土壌水分プローブ (Decagon Devices) を対象とし、室内実験を用いた温度依存性の補正手法を提示した。供試土に中国黄土高原の黄土を用い、水分量が既知の土壌に温度変化を与え、出力値・水分・温度の関係を明らかにした上で、経験的な校正式を導いた。また、校正試験の結果を元に、本プローブの温度依存性の理論的背景に関する考察を行った。さらに、得られた校正式を中国黄土高原における土壌水分モニタリング結果に対し適用し、校正式の妥当性と乾燥地環境下における温度依存性校正の重要性について検討した。

受稿年月日：2007年12月2日

受理年月日：2008年4月3日