J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 126, p.63 ～ 70 (2014)

研究ノート
Notes

静電容量型 ECH_2O 土壌水分センサーのキャリブレーション

三石正一[1]・溝口　勝[2]

Calibration of the capacitance type of ECH_2O soil moisture sensors

Shoichi MITSUISHI[1] and Masaru MIZOGUCHI[1]

Abstract: Volumetric water contents, θ, measured with various type of ECH_2O soil moisture sensors (5TE, 5TM, EC-5, 10HS, ECH_2O-TE, EC-TM) were evaluated for Toyoura sand, Andisol and Kanto Loam soils in Japan. The calculated value of ECH_2O sensors reasonably estimated volumetric water contents for sand but underestimated for Andisol and Kanto Loam. It is necessary to independently calibrate the relationship between θ and ε obtained from each sensor for accurate measurements of θ for Japanese volcanic ash soils such as Andisol and Kanto Loam. The soil water content measurements could be improved by using the calibrated third regression equation with the determination coefficient more than 0.95.
Key Words：ECH_2O soil moisture sensor (EC-5, 10HS, 5TE, 5TM, EC-TE, EC-TM), Toyoura Sand, Andisol, Kanto Loam, calibration

1. はじめに

Decagon Devices, Inc.（米）は，数種類の静電容量型土壌水分センサー（ECH_2O Soil Moisture Sensor）を販売している．Decagon のデータロガー（Em50 等）と併用する場合，ECH_2O 土壌水分センサーの設定は容易で，測定データは体積含水率が記録される．ECH_2O 土壌水分センサーの土壌の比誘電率に対応する出力値を体積含水率に変換する土壌水分量計算式は，Decagon が作成した式と Topp 式（Topp et al., 1980）がある．以後，ECH_2O 土壌水分センサーの土壌水分量計算式（Topp 式, Decagon 式）を標準式，標準式で求めた体積含水率を計算値と称す．しかし，Decagon 式はアメリカの砂質土壌を用いて作られていること，Topp 式は日本の黒ボク土，関東ローム土の水分量を過小評価すること（宮本・安中, 1998; 宮本・筑紫, 2000）や有機物の多い土壌の水分量を低く見積もること（Herkelrath et al., 1991）が報告されている．そのため，ECH_2O 土壌水分センサーを使用する場合は，計算値と実際の土壌水分量の差を確認する必要がある．

[1]AINEX. Co., LTD. Minami Kamata 2-16-1, Ohta-ku, Tokyo, 144-0035, Japan. Corresponding author：三石正一，アイネクス株式会社
[2]Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan.
2013 年 7 月 1 日受稿　2014 年 3 月 27 日受理

本報告では，日本の土壌を用いて ECH_2O 土壌水分センサーの比誘電率と炉乾法による体積含水率（実測値）の関係を示して，ECH_2O 土壌水分センサーの標準式から求めた計算値の正確度について考察した．また，異なる ECH_2O 土壌水分センサーの示す比誘電率について比較検討した．

2. 実験と方法

2.1 ECH_2O 土壌水分センサーのキャリブレーション

2.1.1 供試センサーとデータロガー

実験に用いたセンサーは，Decagon Devices, Inc. の 5TE, 5TM, EC-5, 10HS, ECH_2O-TE（以後 EC-TE），EC-TM である．すべての土壌水分センサーは静電容量式である．これらのセンサーの形状は，先端が尖った複数のセンサーロッドを有するフォーク型である．各センサーの寸法と特徴を Table 1 に示す．体積含水率 θ は，静電容量法で求めた各センサーの土壌の比誘電率 ε に対応する出力値に対して，5TE, 5TM では Topp 式，EC-5, 10HS, EC-TE, EC-TM では Decagon 式により算出している．また，バルク電気伝導度 EC は 4 電極法（EC-TE）と 2 電極法（5TE），温度 T はすべてセンサーに内蔵されたサーミスタで計測している．実験に用いたデータロガーは Em50（Decagon Devices, Inc.）である．Em50 の制御およびデータの回収は，ECH_2O Utility（Ver.1.65, Decagon Devices, Inc.）を使用した．

2.1.2 供試土壌

供試土壌は豊浦砂（豊浦硅石鉱業株式会社, 以後砂と称す），我が国の典型的な火山灰として黒ボク土（群馬県嬬恋村: 採取深度 10 ～ 30 cm），関東ローム土（東京都西東京市西東京フィールド: 採取深度 40 ～ 60 cm）を用いた．供試土壌の物理性と土性を Table 2 に示す．供試土壌の粒度分布は，分散剤にヘキサメタリン酸ナトリウムを使用し，比重計法（JISA1204）で測定した．強熱減量は電気マッフル炉を用いて 800°C で 6 時間強熱した．砂は蒸留水で洗浄して風乾した．黒ボク土および関東ローム土は，風乾後に 2 mm 篩を通過させて植物根等の有機物を除去し，粒径を均一にした．

Table 1 ECH_2O 土壌水分センサーの特徴.
Characteristic of ECH_2O soil moisture sensors.

Sensor	寸法（全長 × 幅 × 厚さ ; cm）	ロッド数	測定項目	土壌水分量計算式
5TE EC-TE	10.0 × 3.2 × 0.7	3	体積含水率（θ），温度（°C） バルク EC 値（dS m^{-1}），	Topp 式 Decagon 式 (Mineral)
5TM EC-TM	10.0 × 3.2 × 0.7	3	体積含水率（θ），温度（°C）	Topp 式 Decagon 式 (Mineral)
EC-5 10HS	8.9 × 1.9 × 0.7 14.5 × 3.3 × 0.7	2	体積含水率（θ）	Decagon 式 (Mineral) Decagon 式 (Mineral)

Table 2 供試土壌の物性値.
Physical properties of sample soils.

Soil	採取場所	Sand（%）	Silt（%）	Clay（%）	土性	強熱減量（%）
砂（豊浦砂）	—	99.4	0.6	0	Sand	—
黒ボク土	群馬県嬬恋村	57.5	27.5	15	Loam	18.5
関東ローム土	東京都西東京市	48	34	18	Clay Loam	12.5

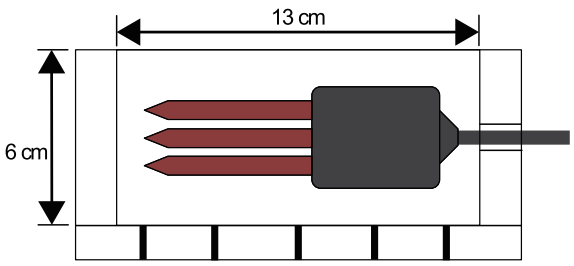


Fig. 1 実験装置図.
Experimental apparatus.

2.1.3 キャリブレーション方法

アクリル容器に ECH_2O 土壌水分センサーと水分量を調節した土壌を充填して，水分量と得られる ε の関係を調べた．ECH_2O 土壌水分センサーの大きさが種類で異なるので，それぞれのセンサーの測定範囲（Cobos, 2008a ; Cobos, 2008b）を参考にして直方体のアクリル容器を 3 種類作成した．内寸で幅 × 全長 × 高さのとき，EC-5 には 5 × 11 × 5 cm，5TE, 5TM, EC-TE, EC-TM には 5 × 13 × 6 cm，10HS には 5 × 18 × 7 cm の容器を用いた（Fig. 1）．底面から試料を毛管飽和させるため，容器の底面に直径 1 mm の穴をサイズに合わせて 8 ～ 12 個ほぼ均等な間隔で開けた．ECH_2O センサーは容器に横方向に挿入し，以下に示す方法で水分量を調整した土壌の測定を行った．

砂の水分量の調整には水分添加法を用いた．所定の含水比となるようにポリ袋に蒸留水と炉乾（105°C，24 時間）した砂を入れて混合して 3 時間静置した．この作業を繰り返し，含水比が異なる試料を数点作成し，それぞれを容器に均一に充填した．

黒ボク土と関東ローム土は，炉乾法（105°C，24 時間）で含水比を測定した後に，初期含水比より低い含水比試料は風乾法で作成した．風乾法では，土壌をバットに広げて適宜質量を計測しながら蒸発させ，所定の含水比に調節した試料を容器に充填した．一方，初期含水比より高い含水比試料は浸潤法で作成した．まず初期含水比の土壌を充填し，所定の含水比となる量の水を試料表層に注いで浸潤させた．浸潤後，3 時間静置した後，測定を行った．浸潤法の利点は，土壌の水分調節と充填作業が省略できること，土壌を再充填しないのでカラム中の土壌構造が変化しないこと，そのためセンサーと土壌の接触面積を維持できることが挙げられる．

また，すべての供試土壌の飽和試料 θ_s は，容器を深型バットに入れて試料高まで蒸留水を注ぎ，下方から毛管飽和させて作成した．測定は，容器の表面をパラフィルムで密閉して蒸発を防ぎ，1 分間隔で 20 分間連続測定した平均値を代表値とした．

2.2 供試土壌の充填乾燥密度

乾燥密度の影響を評価するため，供試土壌は全水分領域で様々な乾燥密度充填して測定した．砂は 1.40 ～ 1.64 Mg m^{-3}，黒ボク土は 0.50 ～ 0.81 Mg m^{-3}，関東ローム土は 0.42 ～ 0.82 Mg m^{-3} である．黒ボク土と関東ローム土は乾燥すると収縮するので，風乾法で作成した試料の充填質量は水分量が低いほど増加した．その結果，風乾法と浸潤法の乾燥密度を比較すると風乾法の水分領域の乾燥密度が高くなった．

試料土の含水比と乾燥密度から，以下の関係より体積含水率 θ（実測値）を求めた（Topp and Ferré, 2002）．

$$\theta = \omega \times \frac{\rho_d}{\rho_w} \tag{1}$$

ここで，θ : 体積含水率 ($m^3\ m^{-3}$)，ω : 含水比 (kg kg^{-1})，ρ_d : 乾燥密度（Mg m^{-3}），ρ_w : 水の密度（Mg m^{-3}）である．

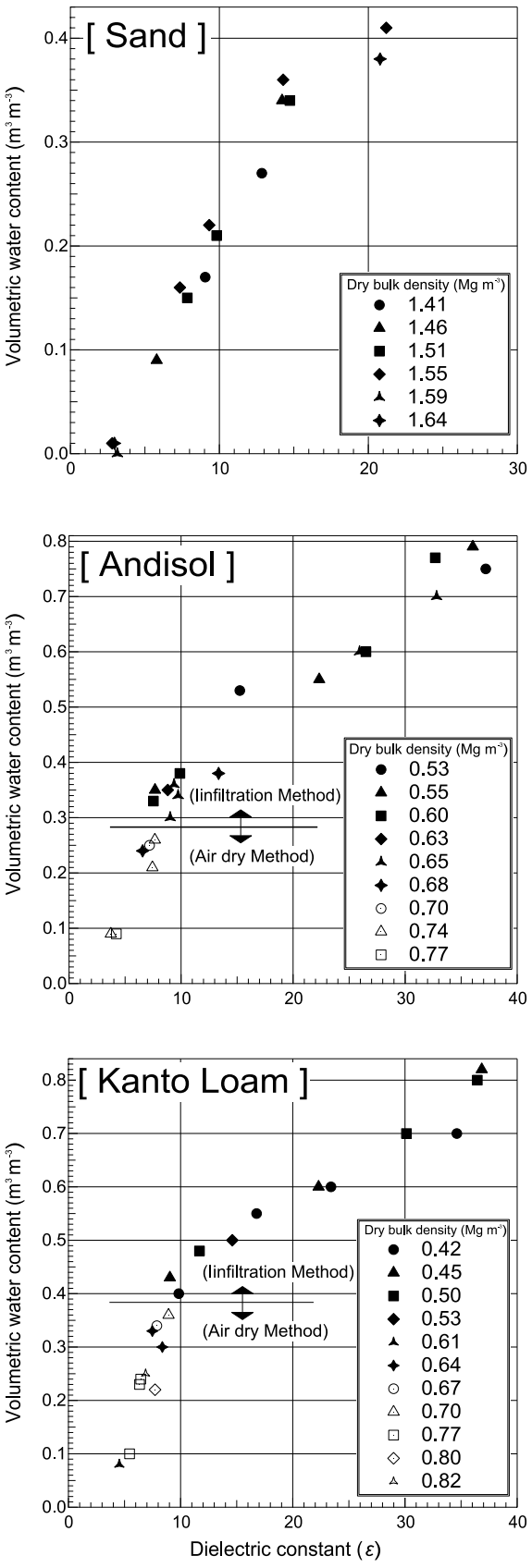


Fig. 2　5TE センサーの乾燥密度別の比誘電率と体積含水率の関係.
Relationship between the dielectric constant of 5TE and the volumetric water content of soil samples. Numbers in the figure mean the dry bulk density (Mg m^{-3}) of the soil sample.

2.3 ECH_2O 土壌水分センサーの出力値と誘電率の関係

Em50 内のデータを ECH_2O Utility でダウンロードすると，計算された θ と計算に用いた出力値が得られる．この出力値を ECH_2O 土壌水分センサーのマニュアルに記載されている変換式で比誘電率 ε に変換した（各 ECH_2O 土壌水分センサーのマニュアルを参照）．

2.4 各センサーの計算値の正確度の評価

含水比と乾燥密度から求めた θ に対する各 ECH_2O 土壌水分センサーの標準式から求めた計算値の正確度を平均二乗誤差（RMSE）で評価した（Lu et al., 2004）．

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} (\theta_M - \theta_{ECH_2O})^2}{n}} \qquad (2)$$

ここで，θ_M：含水比と乾燥密度から求めた θ（$m^3\ m^{-3}$），θ_{ECH_2O}：各センサーの計算値（$m^3\ m^{-3}$），n：データ数である．

3. 結果と考察

3.1 乾燥密度の影響

本研究では，試料の水分調整方法により乾燥密度は異なった．そこで，まず乾燥密度の ECH_2O 土壌水分センサーによる比誘電率測定への影響を調べた．一例として Fig. 2 に 5TE による ε と θ の実測値の関係を乾燥密度ごとでプロットした結果を示す．砂の乾燥密度は全水分領域で異なるが，θ に対する ε のばらつきは小さかった．黒ボク土と関東ローム土は，$\theta > 0.7\ m^3\ m^{-3}$ の高水分領域でややばらつきが見られたが，同じ θ に対する ε のばらつきは小さかった．乾燥密度の影響は，他のセンサーでも 5TE の結果とほぼ同じだった．ECH_2O 土壌水分センサーによる ε 測定は，通常の TDR センサーと同様に主に水分量の増減に精度良く反応し，乾燥密度の影響は小さい．これは，本研究で用いた水分量の調整法の妥当性を示している．これらの結果を踏まえて，以後の測定結果では，乾燥密度が異なっても，それぞれのセンサーの一連の測定として結果を示す．

3.2 実測値と標準式から求めた計算値の比較

ECH_2O 土壌水分センサーの ε と θ の実測値の関係を Fig. 3，Fig. 4 に示す．なお，後述するように ε の測定値は厳密にはセンサー毎に異なるため，飽和試料に対応する ε の最大値もセンサーにより異なった．そこで，グラフの軸の ε の最大値は，砂では 30，黒ボク土では 40，関東ロームでは 60 に統一した．不飽和試料は黒丸，飽和試料は白丸である．各センサーの標準式から求めた計算値を図中に破線で示す．砂は，5TE, 5TM の計算値は $\theta < 0.15\ m^3\ m^{-3}$ では実測値とほぼ一致したが，$\theta > 0.15\ m^3\ m^{-3}$ では計算値は実測値より小さかった．10HS の計算値は，全水分量領域で実測値と良く一致した．EC-5, EC-TE, EC-TM の計算値は，$\theta < 0.40\ m^3\ m^{-3}$ では実測

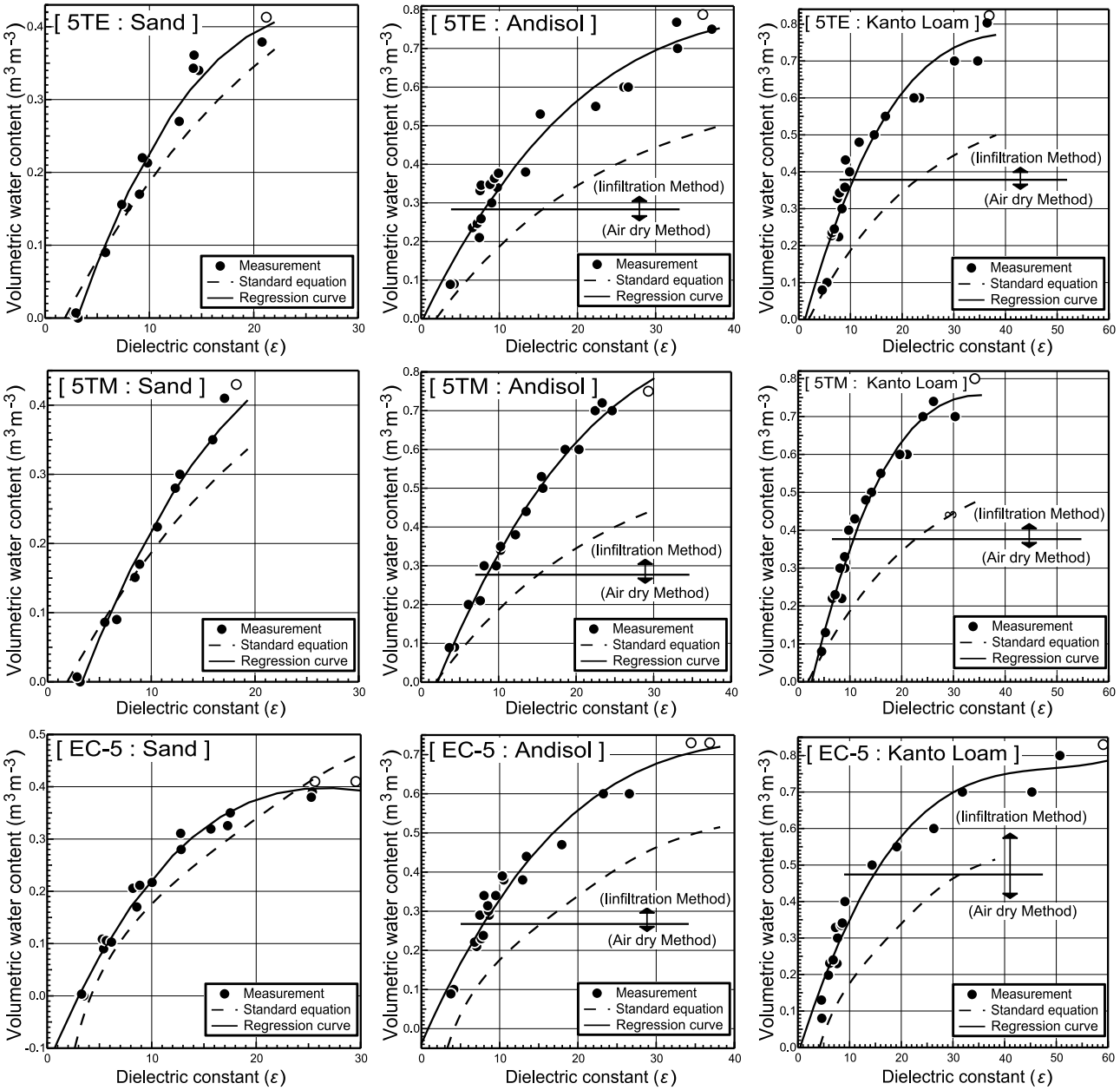


Fig. 3 ECH_2O 土壌水分センサー（5TE，5TM，EC-5）のキャリブレーション結果．図中の白丸マーカーは飽和試料の実測値を示す．黒ボク土とローム土の図中の矢印は，上下で土壌の水分調節方法（上：浸潤法（Infiltration Method），下：風乾法（Air dry Method））が異なることを示す．
Dielectric constant of 5TE, 5TM and EC-5 as a function of volumetric water content for all investigated soils. The open circle in the figure shows the measurement value of the saturated water content sample. The arrow in the figure of Loam and Andisol indicates that the moisture content adjustment method was different (Upper: Infiltration Method, Under: Air dry Method).

値とほぼ一致したが，$\theta s \approx 0.40$ m^3 m^{-3} では，計算値が実測値より大きかった．

黒ボク土と関東ローム土は，全 ECH_2O 土壌水分センサーの計算値は，$\theta < 0.10$ m^3 m^{-3} では実測値と計算値の差は小さいが，$\theta > 0.10$ m^3 m^{-3} では計算値は実測値より小さく，水分量が増えるとその差は広がった．標準式は，黒ボク土と関東ローム土の 0.20 m^3 m^{-3} $< \theta < \theta s$ の水分量を過小評価（5TE と 5TM は実測値の約 0.60 倍，EC-5 は約 0.65 倍，10HS は約 0.55 倍，EC-TE と EC-TM は約 0.75 倍）した．標準式の RMSE は，砂は 0.037 ～ 0.056 m^3 m^{-3}（Table 6），黒ボク土は 0.141 ～ 0.212 m^3 m^{-3}（Table 7），関東ローム土は 0.153 ～ 0.217 m^3 m^{-3}（Table 8）となり，砂の正確度は高いが，黒ボク土と関東ローム土の正確度は低かった．

標準式に Topp 式を採用している 5TE と 5TM の計算値が火山灰土壌の θ を低く見積もったのは，団粒内間隙に保水された水の比誘電率が自由水より低いのが原因と考えられる（Miyamoto et al., 2003）．また，EC-5, 10HS, EC-TM は砂の $\theta = 0$ のとき，EC-5,10HS は黒ボク土の $\theta < 0.10$ m^3 m^{-3}，EC-TM は関東ローム土の $\theta < 0.10$ m^3 m^{-3} の計算値は負の値を示した．これらのセンサーが用いている Decagon 式は原点を通らないこと，計算値

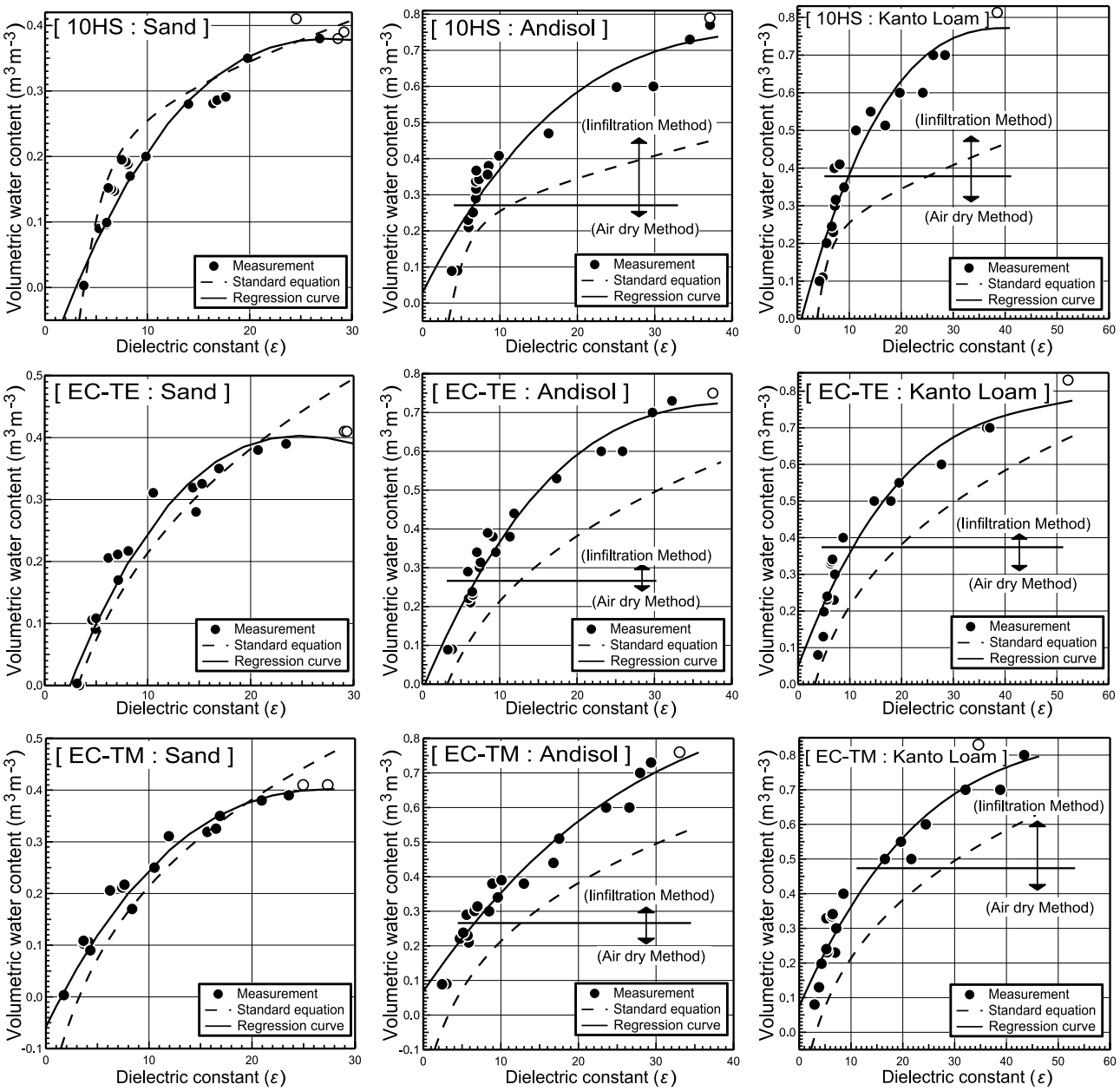


Fig. 4　ECH_2O 土壌水分センサー（10HS，EC-TE，EC-TM）のキャリブレーション結果．図中の白丸マーカーは飽和試料の実測値を示す．黒ボク土とローム土の図中の矢印は，上下で土壌の水分調節方法（上：浸潤法（Infiltration Method），下：風乾法（Air dry Method））が異なることを示す．
Dielectric constant of 10HS, EC-TE and EC-TM as a function of volumetric water content for all investigated soils. The open circle in the figure shows the measurement value of the saturated water content sample. The arrow in the figure of Loam and Andisol indicates that the moisture content adjustment method was different (Upper: Infiltration Method, Under: Air dry Method).

は θ を過小評価することが，低水分量領域の負の θ の原因である．

3.3 実測値と回帰式から求めた計算値の比較

それぞれのセンサーの ε と θ の関係から最小二乗法を用いて，Topp 式と同様に 3 次回帰式を求めた．得られた回帰式を実線で Fig. 3，Fig. 4 に示し，その係数と決定係数 R^2 を Table 3, Table 4, Table 5 に示す．なお，図中の回帰式の表示範囲は飽和 θ_s までとした．すべての回帰式の決定係数は 0.95 以上となり，回帰式の実測値に対する適合は良い．回帰式と標準式の計算値の RMSE を比較すると，砂は 0.037 ～ 0.056 $m^3\ m^{-3}$ から 0.019 ～ 0.030 $m^3\ m^{-3}$（Table 6），黒ボク土は 0.141 ～ 0.212 $m^3\ m^{-3}$ から 0.022 ～ 0.056 $m^3\ m^{-3}$（Table 7），関東ローム土は 0.153 ～ 0.217 $m^3\ m^{-3}$ から 0.033 ～ 0.058 $m^3\ m^{-3}$（Table 8）となり，正確度は標準式より高くなった．

3.4 ECH_2O 土壌水分センサー間の比誘電率の比較

Fig. 5 は，それぞれの ECH_2O 土壌水分センサーの 3 次回帰曲線の比較である．仮に各センサーの ε の測定が正しく，同じ値を示せば，それぞれの回帰曲線は等しくなる．砂の場合，EC-TE，EC-TM の回帰曲線は，ほぼ全水分領域で他のセンサーと異なった．また，その他のセンサーの回帰曲線も，$\theta > 0.2\ m^3\ m^{-3}$ では回帰曲線のばらつきが大きくなった．同様に，黒ボク土は $\theta < 0.3\ m^3\ m^{-3}$ と $\theta > 0.5\ m^3\ m^{-3}$，関東ローム土は $\theta < 0.3$

Table 3 砂の回帰式の係数.
Regression coefficient of Sand.

$\theta = a \times \varepsilon^3 + b \times \varepsilon^2 + c \times \varepsilon + d$					
Sensor	a	b	c	d	R^2
5TE	1.145×10^{-5}	-1.366×10^{-3}	4.930×10^{-2}	-1.390×10^{-1}	0.993
5TM	8.231×10^{-6}	-1.060×10^{-3}	4.576×10^{-2}	-1.401×10^{-1}	0.991
EC-5	1.173×10^{-5}	-1.378×10^{-3}	4.824×10^{-2}	-1.339×10^{-1}	0.995
10HS	1.071×10^{-5}	-1.250×10^{-3}	4.456×10^{-2}	-1.234×10^{-1}	0.985
EC-TE	1.257×10^{-5}	-1.460×10^{-3}	4.921×10^{-2}	-1.133×10^{-1}	0.982
EC-TM	9.958×10^{-6}	-1.154×10^{-3}	4.092×10^{-2}	-5.811×10^{-2}	0.982

Table 4 黒ボク土の回帰式の係数.
Regression coefficient of Andisol.

$\theta = a \times \varepsilon^3 + b \times \varepsilon^2 + c \times \varepsilon + d$					
Sensor	a	b	c	d	R^2
5TE	5.036×10^{-6}	-7.770×10^{-4}	4.230×10^{-2}	-1.025×10^{-2}	0.957
5TM	5.271×10^{-6}	-9.503×10^{-4}	5.304×10^{-2}	-1.080×10^{-1}	0.992
EC-5	6.245×10^{-6}	-9.115×10^{-4}	4.558×10^{-2}	-3.863×10^{-2}	0.961
10HS	5.768×10^{-6}	-8.428×10^{-4}	4.233×10^{-2}	2.917×10^{-2}	0.946
EC-TE	7.262×10^{-6}	-1.028×10^{-3}	4.800×10^{-2}	-1.568×10^{-2}	0.972
EC-TM	2.574×10^{-6}	-4.756×10^{-4}	4.756×10^{-2}	6.892×10^{-2}	0.967

Table 5 関東ローム土の回帰式の係数.
Regression coefficient of Kanto Loam.

$\theta = a \times \varepsilon^3 + b \times \varepsilon^2 + c \times \varepsilon + d$					
Sensor	a	b	c	d	R^2
5TE	7.448×10^{-6}	-1.093×10^{-3}	5.266×10^{-2}	-6.160×10^{-2}	0.964
5TM	1.046×10^{-5}	-1.475×10^{-3}	6.498×10^{-2}	-1.597×10^{-1}	0.982
EC-5	6.133×10^{-6}	-9.027×10^{-4}	4.552×10^{-2}	-1.969×10^{-2}	0.969
10HS	7.890×10^{-6}	-1.140×10^{-3}	5.328×10^{-2}	-4.078×10^{-2}	0.946
EC-TE	4.723×10^{-6}	-7.036×10^{-4}	3.772×10^{-2}	-4.823×10^{-3}	0.959
EC-TM	3.475×10^{-6}	-5.610×10^{-4}	3.427×10^{-2}	7.398×10^{-2}	0.951

m^3m^{-3} と $\theta > 0.5\ m^3\ m^{-3}$ において回帰曲線のばらつきが広がった．低水分量域でセンサー間の ε のばらつきが広がったのは，低水分領域のデータ数が少なく，回帰曲線の精度が低いためと考えられる．高水分領域でセンサー間の ε のばらつきが大きいのは，測定時のアクリル容器内で下方に水分が溜まりやすく，容器全体の平均水分量とセンサーが測定する範囲の水分量が一致しなくなるためと考えられる．以上より，ECH_2O 土壌水分センサーで得られる ε は，厳密にはセンサー間で異なることがわかる．そのため，土壌およびセンサーごとの固有のキャリブレーションを行うことにより，精度の高い測定が可能になる．

4. おわりに

砂，黒ボク土，関東ローム土を用いて Decagon 社の 6 種類の ECH_2O 土壌水分センサー（5TE, 5TM, EC-5, 10HS, EC-TE, EC-TM）の標準式から求めた計算値の正確度を検証した．各センサーとも，比誘電率 ε 測定に対する土壌の乾燥密度の影響は小さいことは確認された．体積含水率 θ の実測値に対する各 ECH_2O 土壌水分センサーの標準式から求めた計算値の正確度は，砂は高かったが，黒ボク土と関東ローム土は低かった．特に黒ボク土と関東ローム土の標準式から求めた計算値は，θ を大きく過小評価した．本研究で得られた θ と ε の関係を 3 次式で回帰したところ，それぞれ決定係数が 0.95 以上となり，θ の測定精度が向上した．

しかし，ECH_2O 土壌水分センサーで得られる ε は，厳密にはセンサー間で異なる．そのため，ECH_2O 土壌水分センサーを用いて，特に黒ボク土や関東ローム土など我が国固有の火山灰土壌の水分量を測定する場合，それぞれの土壌に対して，各センサーごとの ε と θ の関係を求めることにより，より精度の高い測定が可能となることが明らかになった．

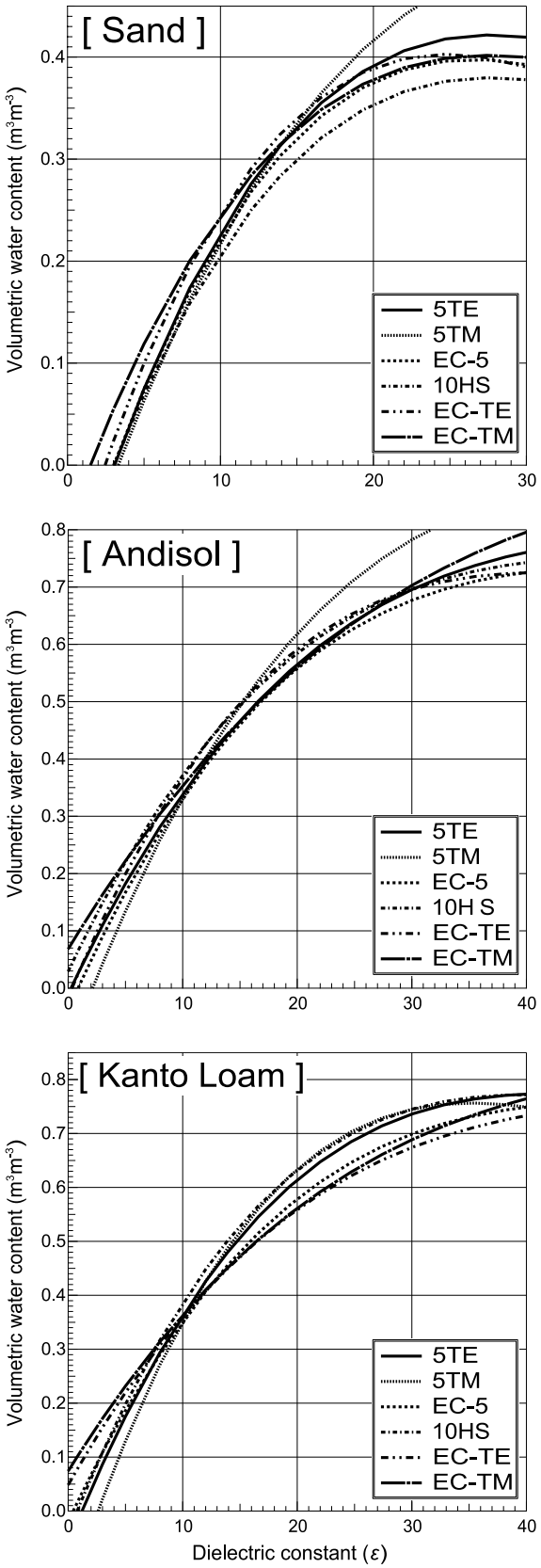


Fig. 5　土壌別 ECH_2O 土壌水分センサー（5TE, 5TM, EC-5, 10HS, EC-TE, EC-TM）の回帰曲線.
Regression curve of ECH_2O soil moisture sensors (5TE, 5TM, EC-5, 10HS，EC-TE, EC-TM) by soil sample.

Table 6　砂の体積含水率 (θ) に対する標準式と回帰式の計算値の正確度 (RMSE).
Accuracy (RMSE) of the calculated value of the Standard and Regression equation in comparison with volumetric water content of Sand.

	RMSE ($m^3\ m^{-3}$)	
Sensor	Standard Eq.	Regression Eq.
5TE	0.043	0.019
5TM	0.053	0.024
EC-5	0.049	0.015
10HS	0.037	0.024
EC-TE	0.046	0.029
EC-TM	0.056	0.030

Table 7　黒ボク土の体積含水率 (θ) に対する標準式と回帰式の計算値の正確度 (RMSE).
Accuracy (RMSE) of the calculated value of the Standard and Regression equation in comparison with volumetric water content of Andisol.

	RMSE ($m^3\ m^{-3}$)	
Sensor	Standard Eq.	Regression Eq.
5TE	0.186	0.045
5TM	0.212	0.022
EC-5	0.170	0.033
10HS	0.141	0.056
EC-TE	0.159	0.038
EC-TM	0.165	0.041

Table 8　関東ローム土の体積含水率 (θ) に対する標準式と回帰式の計算値の正確度 (RMSE).
Accuracy (RMSE) of the calculated value of the Standard and Regression equation in comparison with volumetric water content of Kanto Loam.

	RMSE ($m^3\ m^{-3}$)	
Sensor	Standard Eq.	Regression Eq.
5TE	0.211	0.058
5TM	0.214	0.033
EC-5	0.187	0.045
10HS	0.217	0.056
EC-TE	0.153	0.052
EC-TM	0.175	0.057

引用文献

Cobos, D. (2008a): EC-5 Volume of Sensitivity. http://www.decagon.com/education/ec-5-volume-of-sensitivity-13931-00-an/ (accessed: 20/08/2013).

Cobos, D. (2008b): 10HS Volume of Sensitivity. http://www.decagon.com/education/10hs-volume-of-sensitivity-13931-01-an/ (accessed: 20/08/2013).

Decagon Devices, Inc. (2012): 5TE Water content, EC and Temperature Sensors Operator's Manual Version 8. http://decagon.com/education/5te-manual/ (accessed: 20/08/2013).

Decagon Devices, Inc. (2010): 5TM Water content and Temperature Sensors Operator's Manual Version 0. http://decagon.com/education/5tm-manual/ (accessed: 20/08/2013).

Decagon Devices, Inc. (2012): EC-5 Soil Moisture Sensor Operator's Manual Version 2. http://decagon.com/education/ec-5-manual/ (accessed: 20/08/2013).

Decagon Devices, Inc. (2010): 10HS Soil Moisture Sensor Operator's Manual Version 3. http://decagon.com/education/10hs-manual/ (accessed: 20/08/2013).

Decagon Devices, Inc. (2008): ECH$_2$O-TE/EC-TM Water content, EC and Temperature Sensors Operator's Manual Version 7. http://www.decagon.com/education/ECH$_2$O-te-and-ec-tm-manual/ (accessed: 20/08/2013).

Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P. and Murphy, F. (1991): Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. Water Resour. Res., 27: 857–864.

Topp, G.C., David, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16(3), 574-582.

Topp, G.C. and Ferré, P.A. (TY) (2002): 3.1 Water content: General information. Method of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. p.417. Soil Science Society of America, Madison, WI.

宮本輝仁, 安中武幸 (1998) : 関東ロームの体積含水率–比誘電率の特徴. 農業土木学会論文集, 194: 361–362.

宮本輝仁, 筑紫二郎 (2000) : 土壌の体積含水率–比誘電率関係への混合誘電特性モデルの適用. 農業土木学会論文集, 206: 193–198.

Miyamoto, T., Annnaka, T. and Chikushi, J. (2003): Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of an Andisol measured by time domain reflectmetry. Vadose Zone J., 2: 90–97.

Lu, D., Shao, M., Horton, R. and Liu, C. (2004): Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties. Soil Sci., 169: 319–329.

要　　旨

豊浦砂，黒ボク土，関東ローム土を用いて Decagon Devices, Inc. の 6 種類の ECH$_2$O 土壌水分センサー（5TE，5TM，EC-5，10HS，ECH$_2$O-TE，EC-TM）の体積含水率 θ の測定精度を評価した．その結果，全 ECH$_2$O 土壌水分センサーの θ は豊浦砂の実測値とよく一致したが，黒ボク土と関東ローム土の θ は過小評価し，水分量が増加するに従いその誤差は拡大した．そこで，θ の実測値と各センサーの比誘電率 ε に対して 3 次の回帰式を求めた．回帰式の測定誤差は，豊浦砂は 0.04 ～ 0.06 m^3 m^{-3} から 0.02 ～ 0.03 m^3 m^{-3}，黒ボク土は 0.14 ～ 0.21 m^3 m^{-3} から 0.03 ～ 0.06 m^3 m^{-3}，関東ローム土は 0.15 ～ 0.22 m^3 m^{-3} から 0.03 ～ 0.06 m^3 m^{-3} に低下した．ECH$_2$O 土壌水分センサーを用いて火山灰土の黒ボク土，関東ローム土の θ を測定する場合，それぞれの土壌の θ に対する各センサーの ε の関係を得ることにより，θ の測定精度が向上することが明らかになった．

キーワード：ECH$_2$O 土壌水分センサー（5TE, 5TM, EC-5, 10HS, ECH$_2$O-TE, EC-TM），豊浦砂，黒ボク土，ローム土，キャリブレーション