

# 一次補正式を用いた静電容量型GS3土壌水分センサーが測定した体積含水率の補正

誌名	土壌の物理性
ISSN	03876012
著者名	三石,正一 溝口,勝
発行元	[出版者不明]
巻/号	130号
掲載ページ	p. 19-25
発行年月	2015年7月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat





# 一次補正式を用いた静電容量型 GS3 土壌水分センサーが 測定した体積含水率の補正

三石正一<sup>1</sup>・溝口 勝<sup>2</sup>

A liner offset equation of the volumetric water content that capacitance type GS3  
soil moisture sensor measured

Shoichi MITSUISHI<sup>1</sup> and Masaru MIZOGUCHI<sup>2</sup>

**Abstract:** The ECH<sub>2</sub>O GS3 soil moisture sensor (GS3, Decagon Devices, Inc.) is suitable for measuring volumetric water content ( $\theta$ ), temperature, and bulk EC for agricultural materials. Two types of calibration equations are provided for the GS3 water content measurements: a standard equation ( $\theta_{ST}$ ) and an agricultural material equation ( $\theta_{AM}$ ). In this study, these two equations were evaluated based on the dry weight method  $\theta$  ( $\theta_M$ ) for agricultural materials (Rock wool, Vermiculite, Peat moss, and Strawberry soil) and soils (Toyoura sand, Andisol and Kanto loam). The relative error of  $\theta_{ST}$  was 10 % – 14 % for agricultural materials, 3 % for the sand, and 14 % for the Andisol and Kanto loam. The  $\theta_{ST}$  prediction was reasonably accurate for Toyoura sand, but practically not applicable for agricultural materials, Andisol, and Kanto loam. The relative error of  $\theta_{AM}$  was 8 % – 10 %. The accuracy of  $\theta_{AM}$  was slightly higher than for  $\theta_{ST}$  regardless of samples. The  $\theta_{ST}$  was corrected based on the linear regression line for the  $\theta_M$  and  $\theta_{ST}$  relationship. The relative error for the corrected  $\theta_{ST}$  became 1 % – 5 % for all samples. Furthermore, the linear regression line was made according to three saturated, intermediate, and dried samples (3-point method). The relative error for the  $\theta_{ST}$  corrected with the 3-point method was 2 % – 6 %, which was much smaller than for the original  $\theta_{ST}$ . In conclusion, we recommend using the 3-point method to correct  $\theta_{ST}$  for the GS2 measurements for soils and agricultural materials.

**Key Words :** ECH<sub>2</sub>O GS3 soil moisture sensor, agricultural material, soil, liner regression equation

## 1. はじめに

近年、植物工場などで農業用培地の水分量を測定するニーズが高まっている。静電容量型土壌水分計 ECH<sub>2</sub>O GS3 (Decagon Devices, Inc., 以下 GS3) は、施設園芸で

使用する農業用培地の水分量、電気伝導度、温度測定用  
に開発された農業用培地用の土壌水分センサーである。  
GS3 とデータロガー Em50 (Decagon Devices, Inc.) を  
併用すると、体積含水率  $\theta$ 、バルク電気伝導率 EC、温  
度  $T$  を同時に測定できる。GS3 が測定した  $\theta$  は、土壌  
の水分量に対応した出力値を比誘電率  $\epsilon$  に変換し、得た  
 $\epsilon$  を Decagon 独自の土壌水分量計算式に入力して求めた  
値である。しかし、ECH<sub>2</sub>O 土壌水分センサーが求めた  
 $\theta$  は、特に我が国の土壌では炉乾法で測定した  $\theta$  と一致  
しないため、精度の高い測定のためには測定対象土壌を  
用いてキャリブレーション作業を行って、土壌水分量計  
算式を作成する必要がある (三石・溝口, 2014)。そのた  
め、GS3 についても同様に土壌水分量計算式について精  
査する必要がある。

本報告は、4 種類の農業用培地と 3 種類の土壌の実際  
の体積含水率と GS3 が計算した体積含水率を比較して、  
GS3 の土壌水分量計算式の正確度について報告する。そ  
して、GS3 が求めた水分量に対する簡便な一次補正式を  
提案した。

## 2. 実験と方法

### 2.1 GS3 土壌水分センサーと試料

#### 2.1.1 データロガーと供試センサー

使用したデータロガーは Em50 である。Em50 の設  
定および記録された GS3 の測定値のダウンロードは、  
Decagon 社が開発した Em50 専用制御ソフトウェア  
ECH<sub>2</sub>O Utility (Ver. 1.65) で行った。使用した GS3 土  
壌水分センサーの形状は、3 本の金属ロッドを有する櫛  
形であり (Fig. 1), 体積含水率  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), バルク電気  
伝導率 EC ( $\text{dS m}^{-1}$ ), 温度  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) を同時に測定する。  
Em50 から得られるデータファイルには、土壌水分量計  
算式で求めた  $\theta$  と GS3 が静電容量法で測定した Raw 値  
が出力される。マニュアルによると Raw 値と  $\epsilon$  の関係  
は以下の式で表される。

$$\epsilon = \text{Raw}/50 \quad (1)$$

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan.  
2013 年 10 月 30 日受稿 2015 年 6 月 16 日受理

**Table 1** 供試試料の強熱減量と乾燥密度.

Ignition loss and dry bulk density of agricultural materials and soil samples.

Sample	Ignition loss (%)	Dry bulk density (Mg m <sup>-3</sup> )
Rock wool	0.7	0.13
Vermiculite	0.6	0.40
Peat moss	38.0	0.13
Strawberry soil	39.0	0.21
Sand	—	1.50
Andisol	18.5	0.55 ~ 0.79
Kanto loam	12.5	0.40 ~ 0.81

GS3 の  $\theta$  は, 上式により Raw 値を変換した  $\varepsilon$  を土壤水分量計算式に代入して  $\theta$  を算出している.

GS3 のマニュアルには, 2 種類の土壤水分量計算式が記載されている. 第 1 の計算式は, Em50 から出力される  $\theta$  に用いられている鉍質土壌用の土壤水分量計算式 (以下, 標準式) である.

$$\theta_{ST} = 5.89 \times 10^{-6} \times \varepsilon^3 - 7.62 \times 10^{-4} \times \varepsilon^2 + 3.67 \times 10^{-2} \times \varepsilon - 7.53 \times 10^{-2} \quad (2)$$

ここで,  $\theta_{ST}$ : 標準式で求めた体積含水率 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) である. Topp 式 (Topp et al., 1980) と同様に  $\varepsilon$  の 3 次式であるが係数は異なる式である.

第 2 の式は, 鉢植え土壌やピートモスなどの農業用培地水分量計算式 (以下, 培地式) である.

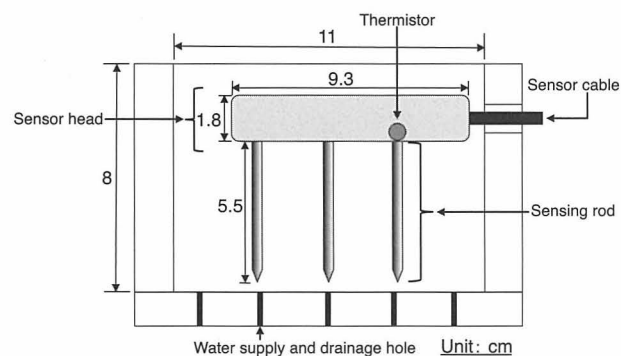
$$\theta_{AM} = 0.118\sqrt{\varepsilon} - 0.117 \quad (3)$$

ここで,  $\theta_{AM}$ : 培地式で求めた体積含水率 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) である.  $\theta_{AM}$  は, 出力される Raw 値から (1) 式より求めた  $\varepsilon$  を (3) 式に代入して得られる. 本報告では, GS3 の標準式と培地式の正確度を評価した.

バルク EC は 2 電極法で測定される. 2 電極法とは, 2 本の電極に流れた電流の抵抗を計測し, この抵抗の逆数にセル定数 (領域間にある電極の距離の比) をかけて導出する方法である. 温度  $T$  はセンサーヘッドに内蔵されたサーミスタで測定される.

### 2.1.2 供試試料

農業用培地試料として, ロックウール (商品名: ロックウールブロック, 有限会社所沢植木鉢センター, 寸法 10 × 10 × 10 cm), バーミキュライト (商品名: バーミキュライト, 株式会社井手商会), ピートモス (商品名: ピートモス, 株式会社井手商会), イチゴ栽培用の土 (商品名: イチゴの土, 株式会社プロトリーフ) を使用した. 土壌試料は, 三石・溝口 (2014) が用いた豊浦砂 (以後砂, 豊浦砂石鉍業株式会社), 黒ボク土 (採取地: 群馬県嬬恋村), 関東ローム土 (採取地: 東京都西東京市) である. 供試試料の強熱減量と乾燥密度を Table 1 に示す. 強熱減量は, 電気マッフル炉を用いて 800 度で 6 時間



**Fig. 1** 実験装置図.  
Experimental apparatus.

加熱して求めた. 黒ボク土とローム土の乾燥密度に幅があるのは, 水分条件によって土壌が収縮し, その体積が変化したためである. 乾燥密度は風乾法と湿潤法で作成した試料で異なり, 風乾法の乾燥密度は湿潤法より高くなった (三石・溝口, 2014).

ロックウール以外の試料の  $\theta$  の測定値  $\theta_M$  は, 試料の含水比と乾燥密度から以下の式で求めた (Topp and Ferre, 2002).

$$\theta_M = \omega \times \rho_d / \rho_w \quad (4)$$

ここで,  $\theta_M$ : 重量測定に基づく体積含水率 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>),  $\omega$ : 含水比 (kg kg<sup>-1</sup>),  $\rho_d$ : 乾燥密度 (Mg m<sup>-3</sup>),  $\rho_w$ : 水の密度 (Mg m<sup>-3</sup>) である.

ロックウールの  $\theta_M$  は, 加えた水分量をロックウールの体積で除して求めた.

## 2.2 農業用培地および土壌の水分量測定

### 2.2.1 供試試料の水分調節方法

ロックウール, バーミキュライト, ピートモス, イチゴの土, 砂は 105 °C で炉乾して試料中の水分を除去した. ロックウールの水分量は, チャック付ポリ袋中に入れたブロック形状ロックウールに所定量の蒸留水を吸水させて調節した. 吸水後, 2 時間静置した. バーミキュライト, ピートモス, イチゴの土, 砂の水分量は, 水分添加法で調節した. 黒ボク土と関東ローム土の水分量の調整には, 初期含水比を炉乾法 (105 °C, 24 時間) で測定した後, 試料を蒸発させながら水分調整する風乾法と所定の水分を浸潤させて水分量を調整する浸潤法を用いた. 水分添加法, 風乾法, 浸潤法については三石・溝口 (2014) を参照されたい. ロックウールの飽和体積含水率  $\theta_S$  試料は, ポリ袋中のロックウールに蒸留水を吸水させ, 吸水が停止した時の水分量を  $\theta_S$  とした. その他の試料の  $\theta_S$  は, 試料を充填したアクリルケースを深型角バットに入れて周りに蒸留水を注ぎ, 下方から毛管飽和させて作成した.

### 2.2.2 GS3 による水分量測定方法

ロックウールでは, ポリ袋中のロックウールの側面に対角線上にロッドを挿入して測定した. その他の試料では, 給排水用に底に 1 mm の穴を 10 個平行に開けた長

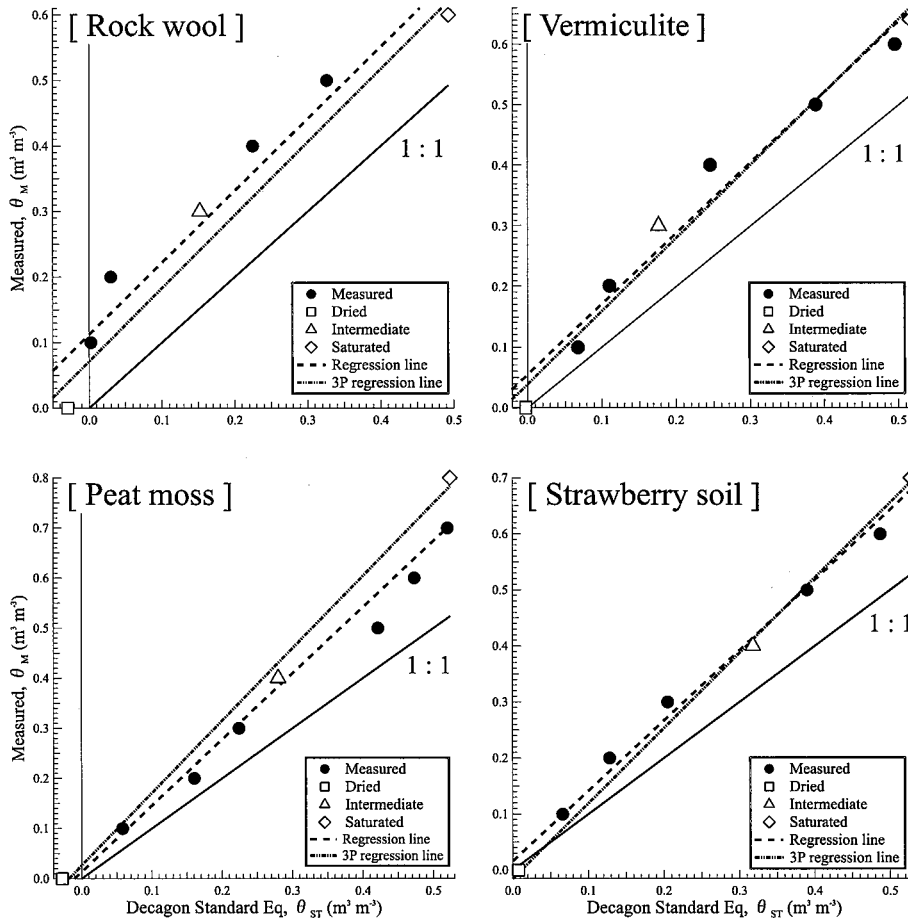


Fig. 2 4種類の農業用培地のGS3の標準式で求めた $\theta_{ST}$ と重量測定に基づく $\theta_M$ の関係(●). 実線は $\theta_{ST}$ の1:1直線. 破線は $\theta_{ST}$ と $\theta_M$ の一次回帰直線. 二点鎖線は3点(乾燥:□, 中間:△, 飽和:◇)の $\theta_{ST}$ と $\theta_M$ から求めた一次回帰直線.

The relationship between volumetric water content  $\theta_{ST}$  based on the standard equation and gravimetrically measured  $\theta_M$  for four type of agricultural materials. The solid line shows 1:1 relationship and the broken line is a regression line between  $\theta_{ST}$  and  $\theta_M$ . The two-dot chain line is a regression line for three water content samples (dried, intermediate, and saturated).

方形のアクリルケース (11 (L) × 5 (W) × 8 (H), cm) に GS3 を縦に設置し (Fig. 1), 水分量を調節した供試試料を均一に充填して, 1 分間隔で 20 分間連続測定した. 測定値の平均値を代表値とした.

### 3. GS3 による水分量測定の正確度の評価

試料の  $\theta_M$  に対する GS3 の標準式と培地式の正確度を次式の平均二乗誤差の平方根 (RMSE) で評価した (Lu et al., 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_M - \theta_{GS3})^2}{n}} \quad (5)$$

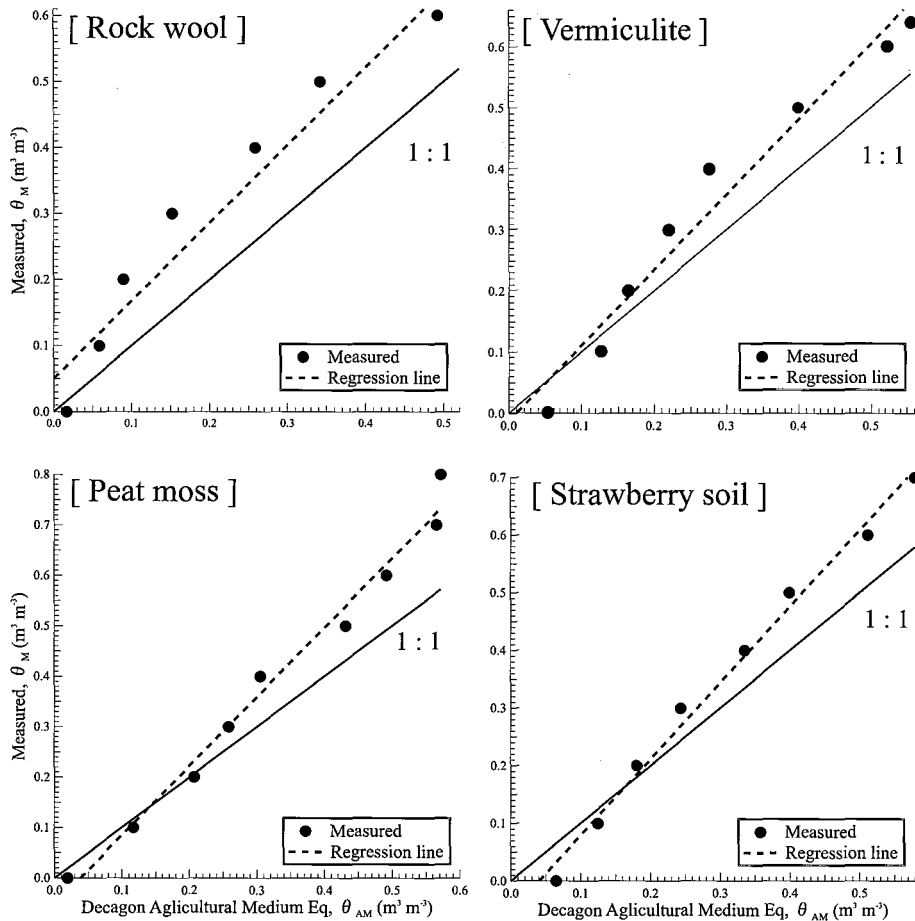
ここで,  $\theta_{GS3}$ : GS3 の標準式または培地式から求めた  $\theta$  ( $\theta_{ST}$ ,  $\theta_{AM}$ ) ( $m^3 m^{-3}$ ),  $n$ : データ数である. また, それぞれの測定における  $\theta_M$  に対する  $\theta_{ST}$  と  $\theta_{AM}$  の正確度を相対誤差で評価した.

$$\text{Relative Error}(\%) = \frac{|\theta_{GS3} - \theta_M|}{\theta_M} \times 100 \quad (6)$$

## 4. 結果と考察

### 4.1 農業用培地の $\theta_M$ と $\theta_{ST}$ の関係

標準式で求めた  $\theta_{ST}$  に対する農業用培地の  $\theta_M$  の関係を Fig. 2 に示す. 横軸は  $\theta_{ST}$ , 縦軸は  $\theta_M$ , 実線は 1:1 直線, 黒丸プロットは測定値である. 農業用培地の全ての水分量で  $\theta_{ST}$  は  $\theta_M$  より小さかった. また,  $\theta_M$  が増加すると  $\theta_M$  と  $\theta_{ST}$  の差は広がった. ロックウールは  $\theta_M < 0.10 m^3 m^{-3}$  のとき, パーミキュライトとピートモスは  $\theta_M = 0 m^3 m^{-3}$  のとき  $\theta_{ST}$  がマイナス値となった. これらの結果から, GS3 の標準式は農業用培地の  $\theta_M$  を過小評価することがわかった. 農業用培地の  $\theta_M$  に対する標準式の RMSE を Table 2 に示す. ロックウールは  $0.138 m^3 m^{-3}$ , パーミキュライトは  $0.105 m^3 m^{-3}$ , ピートモスは  $0.131 m^3 m^{-3}$ , イチゴの土は  $0.098 m^3 m^{-3}$  で, 農業用培地の  $\theta_M$  に対する標準式の相対誤差は 10 ~ 14 % の範囲だった.



**Fig. 3** 4種類の農業用培地のGS3の培地式で求めた $\theta_{AM}$ と重量測定に基づく $\theta_M$ の関係。実線は $\theta_{AM}$ の1:1直線。破線は $\theta_{AM}$ と $\theta_M$ の一次回帰直線。  
 The relationship between volumetric water content  $\theta_{AM}$  based on the agricultural material equation and gravimetrically measured  $\theta_M$  for four type of agricultural materials. The solid line shows 1:1 relationship and the broken line is a regression line between  $\theta_{AM}$  and  $\theta_M$ .

**4.2 農業用培地の $\theta_M$ と $\theta_{AM}$ の関係**

培地式で求めた $\theta_{AM}$ に対する農業用培地の $\theta_M$ の関係をFig. 3に示す。図中のグラフ軸やプロット、実線はFig. 2と同様である。 $\theta_{AM}$ は、ロックウールの $\theta_M$ より小さかった。その他の試料は、 $\theta_M > 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では $\theta_{AM}$ が小さく、 $\theta_M < 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では $\theta_{AM}$ が大きかった。農業用培地の $\theta_M$ に対する培地式のRMSE (Table 2)は、ロックウールは $0.104 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、バーミキュライトは $0.079 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、ピートモスは $0.104 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、イチゴの土は $0.075 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ で、農業用培地の $\theta_M$ に対する培地式の相対誤差は8~10%の範囲だった。農業用培地におけるGS3の土壌水分量計算式の正確度は、標準式より培地式が高かった。

**4.3 土壌の $\theta_M$ と $\theta_{ST}$ の関係**

$\theta_{ST}$ に対する3種類の土壌の $\theta_M$ の関係をFig. 2, 3と同様にFig. 4に示す。砂の $\theta_{ST}$ は $\theta_M$ より大きかった。黒ボク土と関東ローム土の場合、 $\theta_M < 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では $\theta_{ST}$ とほぼ一致したが、 $\theta_M$ が高くなるにつれて $\theta_{ST}$ より小さくなり、その差は拡大した。標準式が火山灰土壌の水分量を過小評価したのは、黒ボク土を測定したMiyamoto et al. (2003)の結果と同じで、その原因は団粒内間隙に保持された水の比誘電率が自由水より

低いことや乾燥密度が小さいことが原因と考えられている (Miyamoto et al., 2003)。各土壌に対する標準式のRMSE (Table 2)は、砂は $0.033 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、黒ボク土は $0.143 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、関東ローム土は $0.130 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ だった。土壌の $\theta_M$ に対する標準式の相対誤差は、砂は3%と小さかったが、黒ボク土と関東ローム土は約14%で大きかった。

**Table 2** 全試料の $\theta_M$ に対する標準式と培地式、一次式と3点式の正確度 (RMSE)。Accuracy (RMSE) of volumetric water content  $\theta_M$  for all samples calculated by the standard, agricultural material, linear regression, and 3P regression equations.

Sample	RMSE ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )			
	Standard Eq.	Agricultural medium Eq.	Linear regression Eq.	3P regression Eq.
Rock wool	0.138	0.104	0.031	0.060
Vermiculite	0.105	0.079	0.025	0.037
Peat moss	0.131	0.104	0.034	0.068
Strawberry soil	0.098	0.075	0.021	0.027
Sand	0.033	-	0.012	0.020
Andisol	0.143	-	0.035	0.050
Loam	0.130	-	0.045	0.063

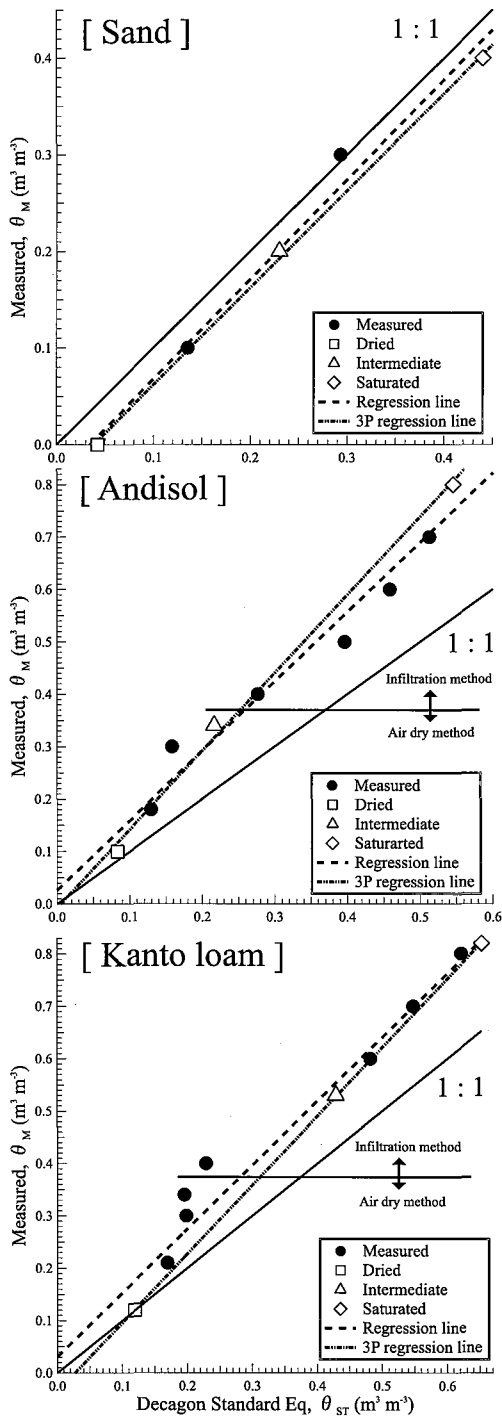


Fig. 4 3種類の土壌のGS3の標準式で求めた $\theta_{ST}$ と重量測定に基づく $\theta_M$ の関係(●)。実線は $\theta_{ST}$ の1:1直線。破線は $\theta_{ST}$ と $\theta_M$ の一次回帰直線。二点鎖線は3点(乾燥:□, 中間:△, 飽和:◇)の $\theta_{ST}$ と $\theta_M$ から求めた一次回帰直線。黒ボク土とローム土の図中の印は、上下で土壌の水分調節方法(上:浸潤法, 下:風乾法)の水分領域を示す。

The relationship between volumetric water content  $\theta_{ST}$  based on the standard equation and gravimetrically measured  $\theta_M$  for three type of soils. The solid line shows 1:1 relationship and the broken line is a regression line between  $\theta_{ST}$  and  $\theta_M$ . The two-dot chain line is a regression line for three water content samples (dried, intermediate, and saturated). The arrow for Loam and Andisol indicates the infiltration method for higher water contents and the air dry method for lower water contents to adjust water contents.

#### 4.4 $\theta_M$ に基づく一次補正式

それぞれの試料のGS3の $\theta_{ST}$ と $\theta_{AM}$ に対する $\theta_M$ の関係に対して一次回帰式(以下, 一次補正式)を求め, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4中に破線で示した。一次補正式の係数と決定係数( $R^2$ )はTable 3に示す。いずれの一次補正式の決定係数は0.94以上と高く, $\theta_{ST}$ と $\theta_{AM}$ は $\theta_M$ に対して強い線形関係があることがわかる。すなわち, GS3の $\theta_{ST}$ と $\theta_{AM}$ の計算値に一次補正式を用いると計算値の補正が可能である。

一次補正式を用いた $\theta_{ST}$ の補正值をGS3の測定値としたときのRMSE(Table 2)は, ロックウールは $0.031 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , パーミキュライトは $0.025 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , ピートモスは $0.034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , イチゴの土は $0.021 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 砂は $0.012 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 黒ボク土は $0.035 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 関東ローム土は $0.045 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となった。これらの値は, いずれの標準式のRMSEの20~40%程度である。また, それぞれの $\theta_M$ に対する補正值の相対誤差は1~5%まで低下し, 一次補正式を用いることでGS3による水分量の測定精度は格段に向上することが明らかになった。

#### 4.5 3点水分量から求めた一次補正式

一次補正式を用いた補正は有効であるが, 一次補正式を得るために, 複数の水分量を調節した試料を作成するのは手間と時間がかかる作業である。しかし, GS3の $\theta_{ST}$ と $\theta_M$ の強い正の線形関係に注目すれば, この作業の大幅な省力化が可能であると考えられる。そこで3点の水分量試料(乾燥, 中間, 飽和)の $\theta_{ST}$ と $\theta_M$ の関係(以下, 3点法)から一次補正式(以下, 3点式)を求めた。3点式をFig. 2, Fig. 3, Fig. 4中に二点鎖線で示し, 3点式の係数と決定係数( $R^2$ )をTable 3に示す。3点式のRMSE(Table 2)は, ロックウールは $0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , パーミキュライトは $0.037 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , ピートモスは $0.068 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , イチゴの土は $0.027 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 砂は $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 黒ボク土は $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 関東ローム土は $0.063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となった。 $\theta_M$ に対する3点式の相対誤差は2~6%で一次補正式よりやや大きかったが, 標準式に比べて相対誤差を大きく減少させることができた。

### 5. おわりに

農業用培地(ロックウール, パーミキュライト, ピートモス, イチゴ栽培用の土)と土壌(砂, 黒ボク土, 関東ローム土)の水分量( $\theta_M$ )に対するGS3土壌水分センサーの土壌水分量計算式(標準式, 培地式)の正確度を評価した。

Decagon社の標準式, 培地式の正確度は低く, 土壌水分量測定にこれらの式をそのまま使用できなかった。特に標準式の正確度は, 農業用培地では低かった。土壌の場合, 標準式の正確度は, 砂は全水分量域で高かった。黒ボク土, 関東ローム土は $\theta_M < 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以下では高かったが, 水分量が増加すると標準式は水分量を過小評価した。標準式の相対誤差は, 農業用培地では10~

**Table 3** 農業用培地と土壌の3種類の1次回帰直線の係数. (1) 全試料の  $\theta_{ST}$  と  $\theta_M$ , (2) 全試料の  $\theta_{AM}$  と  $\theta_M$ , (3) 3点 (乾燥, 中間, 飽和) の  $\theta_{ST}$  と  $\theta_M$ .

Coefficients of three linear regression lines for agricultural materials and soil samples: (1)  $\theta_{ST}$  vs.  $\theta_M$ , (2)  $\theta_{AM}$  vs.  $\theta_M$  for all samples, and (3)  $\theta_{ST}$  vs.  $\theta_M$  for three water content samples (dried, intermediate, and saturated).

Sample	Liner regression ( $\theta_{ST}$ )			Liner regression ( $\theta_{AM}$ )			3 points regression		
	$\theta = a \times \theta_{ST} + b$			$\theta = a \times \theta_{AM} + b$			$\theta = a \times \theta_{ST} + b$		
	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
Rock wool	1.099	0.112	0.945	1.178	0.05	0.945	1.115	0.072	0.970
Vermiculite	1.170	0.051	0.973	1.237	0.015	0.963	1.207	0.037	0.981
Peat moss	1.321	0.014	0.972	1.373	0.053	0.983	1.445	0.027	0.996
Strawberry soil	1.254	0.016	0.992	1.324	0.054	0.991	1.342	0.015	0.999
Sand	1.033	0.036	0.985	-	-	-	1.004	0.038	0.999
Andisol	1.327	0.026	0.971	-	-	-	1.493	0.007	0.996
Loam	1.219	0.031	0.973	-	-	-	1.313	0.035	0.999

14%, 砂は3%, 黒ボク土, 関東ローム土は14%だった. 培地式の正確度は, ロックウールとバーミキュライト, イチゴの土では低かった. ピートモスは  $\theta_M < 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  以下では高かったが, 水分量が増加すると培地式は水分量を過小評価した. 培地式の相対誤差は8~10%であり, 培地式の正確度は標準式に比べて高かった. 得られた  $\theta_M$  と  $\theta_{ST}$  および  $\theta_M$  と  $\theta_{AM}$  の関係は直線性が高く, 決定係数が0.94以上の一次回帰式が得られた. この関係を一次補正式として  $\theta_{ST}$  を補正すると, 相対誤差は1~5%まで低下した. さらに,  $\theta_{ST}$  と  $\theta_M$  の強い線形関係に注目して, 省力化を目的として乾燥, 中間, 飽和の3点水分量試料で一次補正式 (3点式) を求めた. 3点式の相対誤差は2~6%で, 3点式による補正で標準式より正確度を大きく向上することができた. この結果は, GS3で農業用培地や土壌の水分量を測定場合, 3点の測定値による  $\theta_{ST}$  の一次補正を行うだけで, 実用的で十分に正確度の高い土壌水分量測定が可能であることを意味する. GS3を使用する場合は, 3点法による補正が強く推奨される.

## 引用文献

- Lu, D., Shao, M., Horton, R. and Liu, C. (2004): Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties. *Soil Science*, 169: 319-329.
- 三石正一, 溝口 勝 (2014): 静電容量型 ECH<sub>2</sub>O 土壌水分センサーのキャリブレーション. *土壌の物理性*, 126: 63-70.
- Miyamoto T., Annaka T. and Chikushi J. (2003): Soil Aggregate structure effects on dielectric permittivity of an Andisol measured by time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2: 90-97.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582
- Topp, G.C. and Ferre, P.A. (TY) (2002): 3.1 Water content: General information. *Method of Soil Analysis. Part4. Physical Methods*. p.417, Soil Science Society of America, Madison, WI.

## 要 旨

Decagon 社が販売している ECH<sub>2</sub>O GS3 土壌水分センサー (GS3) は、農業用培地の土壌水分量、温度と電気伝導度を同時に測定する。農業用培地 (ロックウール, パーミキュライト, ピートモス, イチゴ栽培用の土) と土壌 (豊浦砂, 黒ボク土, 関東ローム土) の  $\theta_M$  に対する GS3 の土壌水分量計算式 (標準式, 培地式) の正確度を評価した。

Decagon 社の標準式, 培地式の正確度は低く, 土壌水分量測定にこれらの式をそのまま使用できなかった。標準式の正確度は, 農業用培地では低かった。土壌では砂は全水分量域で高かった。黒ボク土, 関東ローム土は  $\theta_M < 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  以下では高かったが, 水分量が増加すると標準式は  $\theta_M$  を過小評価して正確度は低かった。標準式の相対誤差は, 農業用培地では 10 ~ 14 %, 砂は 3 %, 黒ボク土, 関東ローム土は 14 % だった。培地式の正確度は, ロックウールとパーミキュライト, イチゴの土では低かった。ピートモスは  $\theta_M < 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  以下では高かったが, 水分量が増加すると培地式は  $\theta_M$  を過小評価して正確度は低くなった。培地式の相対誤差は 8 ~ 10 % だった。標準式と培地式の正確度は, 培地式が高かった。全試料の  $\theta_M$  と標準式から求めた  $\theta_{ST}$ , 培地式から求めた  $\theta_{AM}$  を回帰すると, 決定係数が 0.94 以上の精度の高い一次補正式が得られた。この一次補正式を使用すると相対誤差は 1 ~ 5 % まで低下した。また,  $\theta_{ST}$  と  $\theta_M$  には強い線形関係があった。そこで, 省力化を目的として乾燥, 中間, 飽和の 3 点水分量試料で一次補正式 (3 点式) を求めた。3 点式の相対誤差は 2 ~ 6 % で, 水分量が異なる試料が少なくとも 3 点式の正確度は標準式より高かった。この結果は, GS3 で農業用培地や土壌の水分量を測定する前に, 3 点法で  $\theta_M$  と  $\theta_{ST}$  の関係を確認するだけで実用的で十分に正確度の高い土壌水分量計算式が得られることを意味する。GS3 を使用する場合は, 3 点法を行うことを推奨する。

キーワード: ECH<sub>2</sub>O GS3 土壌水分センサー, 農業用培地, 土壌, 一次補正式