

# EC-5 センサーのキャリブレーションとその適用

井本 博美<sup>1</sup>・西村 拓<sup>1</sup>・宮崎 毅<sup>1</sup>

Calibration and applicability of EC-5 sensor

Hiroimi IMOTO<sup>1</sup>, Taku NISHIMURA<sup>1</sup>, Tsuyoshi MIYAZAKI<sup>1</sup>

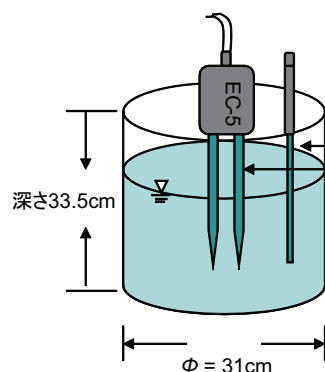
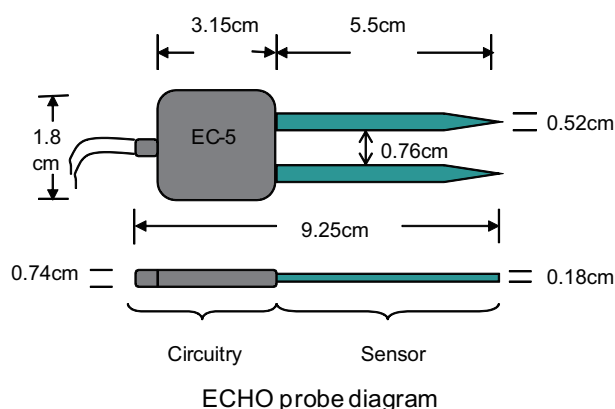
**Abstract:** Sensors detecting soil volumetric water content by measuring the dielectric constant of the media are becoming popular in environmental science. Some of them such as EC-5 (Decagon devices Inc.) is convenient due to lower price and smaller size. However, it is still not clear size of region the sensor can detect moisture. In addition, some soils do not obey to the supplier distributed calibration curve between output voltage and volumetric water content of the media. Here, we tried to determine size of active area around the sensor. As well, a new procedure to determine a calibration curve based on soil water retention curve is proposed.

**Key Words :** soil moisture sensor, calibration, water characteristic curve, the range of influence of probe

## 1. はじめに

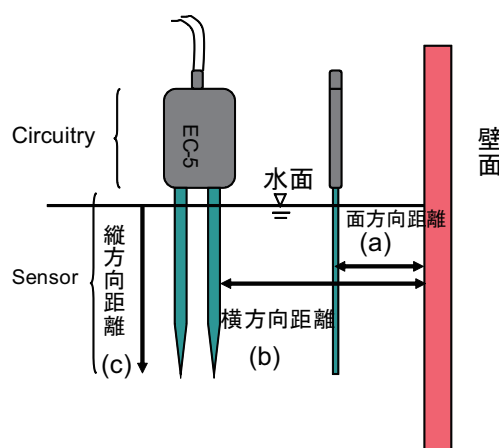
近年、ECH<sub>2</sub>O センサー（デカゴン社）を用いた水分測定がよく報告されている。ECH<sub>2</sub>O センサーは数年前に主流だった ECH<sub>2</sub>O-20（センサー部、長さ 20 cm）から EC-5 センサー（センサー部、長さ 5.5 cm）へと価格が下がると共にサイズも小さくなり、測定時に土壤中へ差し込むことも容易となり、水分量を経時的に測定できる簡便な方法として広く使用されてきている。

測定においては水分量の相対的な増減が簡単に得られ、一方でそれぞれの土壌において出力電圧に対応する土壌水分量がメーカー（デカゴン社）の提供する校正曲線と必ずしも一致しないため、定量性に問題がある（井本ら，2005；三石ら，2008）。そこで、最近よく用いられている EC-5 センサー（デカゴン社）について適用性とキャリブレーションについて考察し、キャリブレーション式作成法の提案を行う。具体的には、EC-5 センサーの影響範囲の測定を行うと共に水分飽和、不飽和領域の明確な豊浦砂を用いて吸引法による排水－吸水過程の水分特性曲線測定に EC-5 センサーを適用し、水分特性曲線に基づいたキャリブレーション式の整理を試みた。



水を用いたセンサーの面、横、上下方向の影響範囲測定

**Fig. 1** EC-5 プロ - プと影響範囲測定用具 .  
EC-5 soil moisture sensor and material measurement of range of influence.



**Fig. 2** ECH<sub>2</sub>O probe の壁面からの測定方向 .  
Direction of measurement from wall of EC-5 probe.

<sup>1</sup>Graduate school of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author: 井本 博美, 東京大学大学院農学生命科学研究科  
2009年10月5日受稿 2010年1月25日受理  
土壌の物理性 114号, 27-31 (2010)

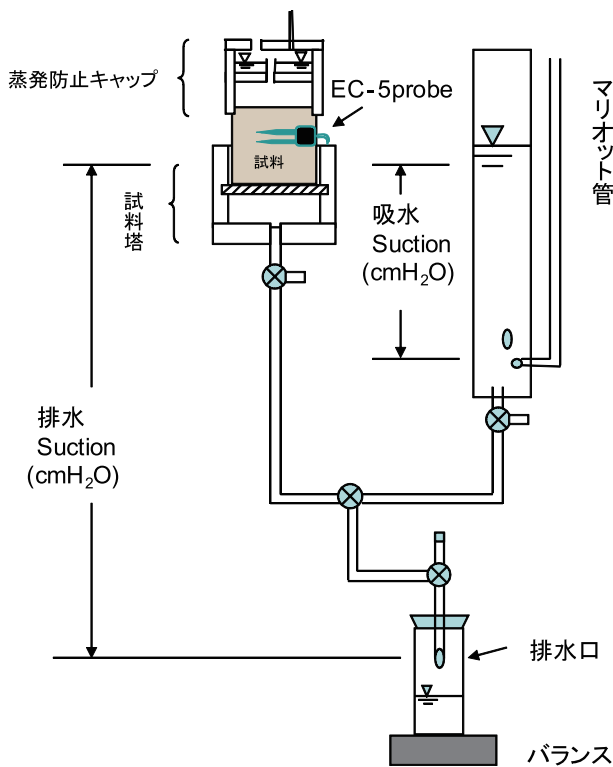


Fig. 3 吸引法装置.  
Hanging water method system.

## 2. 実験

### 2.1 EC-5 センサーの周囲の影響範囲

センサーの概要及びセンサーの影響範囲測定について Fig. 1 に示す。

ECH<sub>2</sub>O センサーの影響範囲測定は、井本ら (2005; 2007) の ECH<sub>2</sub>O-10, 20 センサーを対象に水を媒体にした影響範囲測定の方法に準じて行い、プローブ面方向 (a)、横方向 (b)、縦方向 (c) の影響範囲を測定した。(Fig. 2)

### 2.2 EC-5 センサーを用いた水分特性曲線測定

試料は豊浦砂 (土性 Sand, 乾燥密度 1.55 gcm<sup>-3</sup>) を用い、吸引法 (中野ら, 1995) で豊浦砂の排水過程と吸水過程の水分特性曲線を測定した。

吸引法の試料塔容器は直径約 12 cm のアクリル製容器とガラスフィルターから構成される (Fig. 3)。影響範囲 (後述) を考慮してフィルター上面より 3.0 cm 上に EC-5 センサーを回路部 (Circuitry) も含め埋設した。試料容器内に水を湛し、試料を水中充填しつつ水分センサーも同時に埋設した。その後、1 晩放置し、翌日吸引法の排水過程を開始した。

排水過程の測定では、排水口から試料中央までの距離を 6 cm から 10 cm ずつ増すことで段階的に圧力 (サクシオン) を設定した。各段階で排水量が出なくなったときを平衡とみなし、次の圧力段階へと進んだ。サクシオン約 100 cmH<sub>2</sub>O まで負荷し、その後、吸水過程に移った。吸水過程も同様に給水マリ奥特管の基準位置 (マリ奥特管で水圧 = 大気圧の位置) と試料中央部の距離を約 10 cm ずつ段階的に縮めることでサクシオンを変

え、サクシオン 20 cmH<sub>2</sub>O まで測定した。各段階では、マリ奥特管から試料内への給水がなくなったときに平衡に達したものとして次の圧力段階へ移った。

排水量の測定は電子天秤 (最小読み取り値 0.01 g) で読み取り、EC-5 センサーはデータロガー CR10 (Cambell 社) で連続測定した。印加電圧は 2.5 V である。給水量についてはマリ奥特管の水位変化を目視で測定した。

## 3. 結果

### 3.1 EC-5 センサーの影響範囲

Fig. 4 に EC-5 センサープローブの面 (a)、横 (b)、縦方向 (c) の出力電圧変化を示す。

面方向 (a)、横方向 (b) とも水中では壁面から 2 cm の距離で水中での最大出力電圧を示し、このことから影響範囲として面、横方向とも 2 cm 以上の測定対象物質があれば問題ないと考えられる。一方、プローブ縦方向 (c) については、センサー部分 (長さ 5.5 cm) が水面に達しても水中での最大出力値を示さず、回路部分 (Circuitry) すべてを水面下に入れることによって最大出力値となった。これは、回路部分も比誘電率測定に影響していることを示すものである。

### 3.2 豊浦砂の水分特性曲線

吸 - 排水過程の水分特性曲線を Fig. 5 に示す。

排水曲線と吸水曲線の間で同じサクシオンでも水分量が異なるヒステリシス曲線となった。排水曲線で水分量の多い領域 (飽和領域)、及び水分量の少ない領域 (不動水領域) では、サクシオン ( $h$ ) と体積含水率 ( $\theta$ ) の勾配 ( $d\theta/dh$ ) が小さく水分量は、サクシオン変化に対し微小な変化となる。空気侵入値 (豊浦砂ではサクシオン 30 ~ 40 cm) 付近から不動水領域に至るまでの不飽和領域では、サクシオンの変化に対してほぼ直線的に水分が減少してサクシオンと体積含水率の勾配 ( $d\theta/dh$ ) が大きく変化する。吸水曲線においても不動水領域では、サクシオンの変化に対する水分量の変化は微小である。飽和領域についてはサクシオン 20 cm 以下については吸水過程の測定ができなかったのわからない。

水分特性曲線の体積含水率と EC-5 出力電圧値の関係を Fig. 6 に示す。排水曲線では体積含水率 0.35 付近 (飽和領域と不飽和領域との境) で、吸水曲線では体積含水率 0.2 付近で屈曲した。不動水領域では排水曲線、給水曲線とも飽和領域と比べても体積含水率や出力電圧値の変化が小さかった。

## 4. 考察

### 4.1 EC-5 センサーの影響範囲と埋設方法

EC-5 センサーの影響範囲はセンサーの面側と横側ではセンサーからの距離にして、2 cm 以上は測定対象物質があれば影響範囲内と見なせ、現位置における測定には問題はない。フィールドにおける深さ方向の測定では、センサー間が 2 ~ 3 cm あれば深さ方向の水分分布を測定できると考えられる。

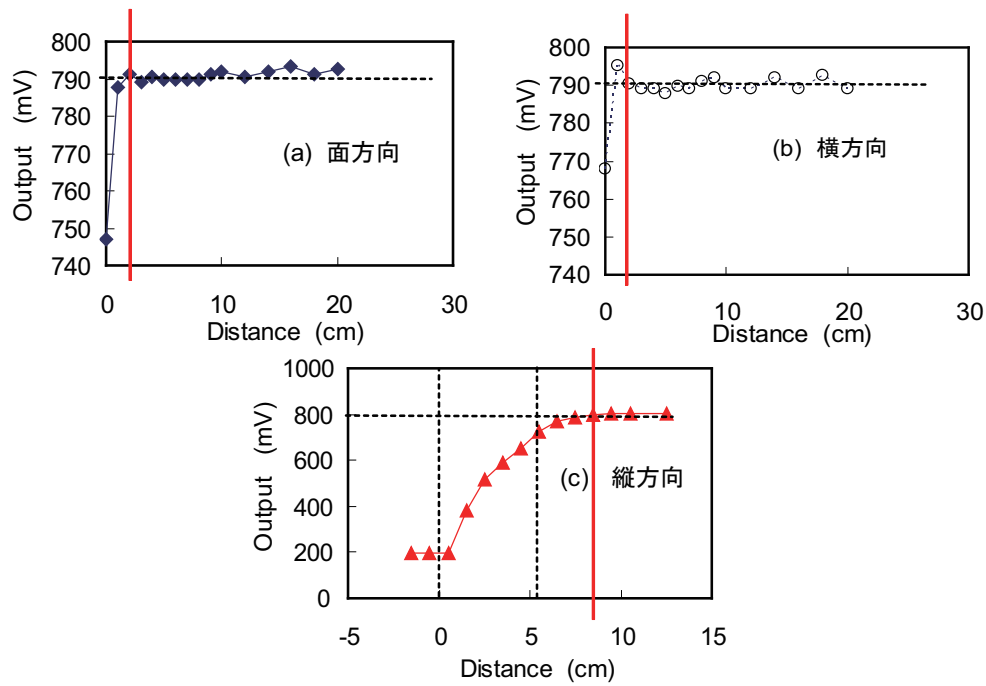


Fig. 4 EC-5 センサーの影響範囲 .  
The range of influence of EC-5 probe.

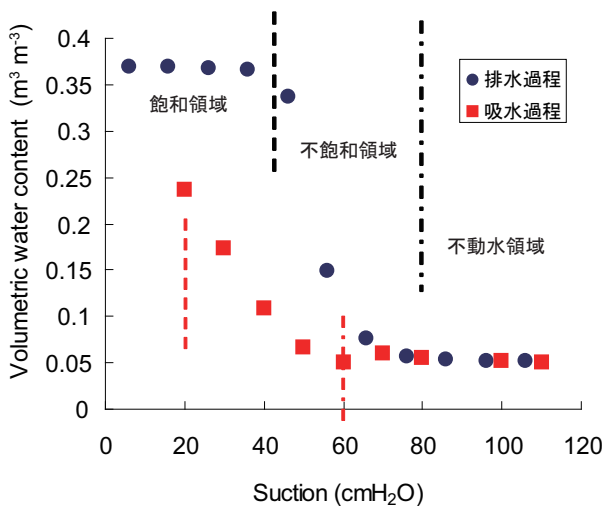


Fig. 5 豊浦砂の水分特性曲線 ( $\rho_d = 1.55 \text{ g cm}^{-3}$ ).  
Water characteristic curve of Toyoura sand ( $\rho_d = 1.55 \text{ g cm}^{-3}$ ).

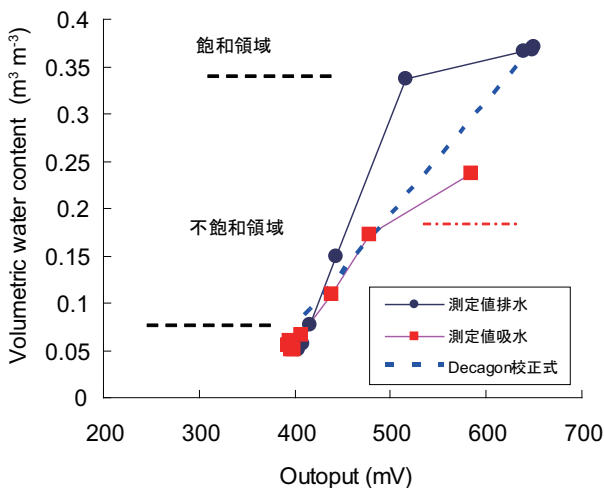


Fig. 6 吸 - 排水曲線の体積含水率と出力電圧値 .  
Output and volumetric water content of wet - dry water retention curve.

しかし、センサーの埋設について、回路部分まで土壌に挿入しないと出力電圧値は正確ではないことがわかった。すなわち、センサー部だけの挿入では出力電圧値が小さく見積もられ、水分量を過小評価する点に注意しなければならない。フィールドの使用では、ほぼ回路部分まで埋設をするから問題はないが、実験室スケールのカラム実験等においては回路部まで含めて挿入することが必要で、カラム直径も 10 cm 以上必要となる。

#### 4.2 豊浦砂での EC-5 センサーのキャリブレーション

Fig. 6 の体積含水率（実測値）と出力電圧値にデカゴン社の校正式（1 次式）を用い校正曲線を挿入した。デカゴン社校正式

$$\theta = 11.9 \times 10^{-4} \times V(\text{mV}) - 0.401 \quad (1)$$

$\theta$  = 体積含水率,  $V$  = 出力電圧

は排水過程、吸水過程共に同じ直線上になり、排水過程では高含水量部分と低含水量部分との間では測定値とよく合致したが、不飽和領域部分では水分量を過小評価した。また、吸水過程では不飽和水分領域より少ない水分量の部分では比較的適合しているが、高含水量部分では排水曲線とは異なる過大評価をした。このことは水分特性曲線を考慮すると空気侵入値より高含水量部分の飽和領域と水侵入値より低含水量の不動水分領域とは異なる校正式を考えていく必要性を示している

そこで、豊浦砂の水分特性曲線の吸 - 排水曲線について水分量と出力電圧値を基にキャリブレーションを試みた。(Fig. 7)

吸 - 排水曲線とも 1 次式と 2 次式を用いたキャリブレーションを試みた。いずれの式も  $R^2$  が 0.9 以上と良い適合を示した。しかし、1 次式のときは、体積含水率 0.35 ~ 0.1 の範囲で出力電圧から推定される体積含水率

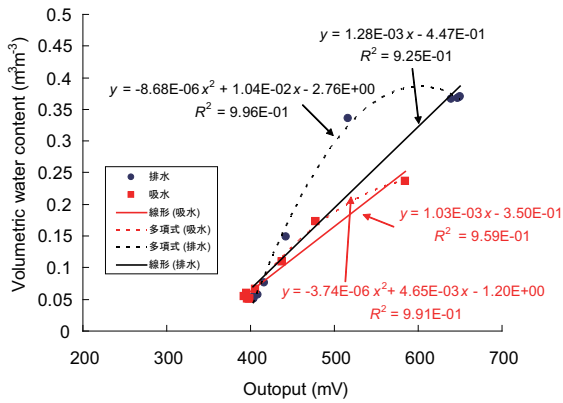


Fig. 7 豊浦砂のキャリブレーション式。  
Calibration equation of Toyoura sand.

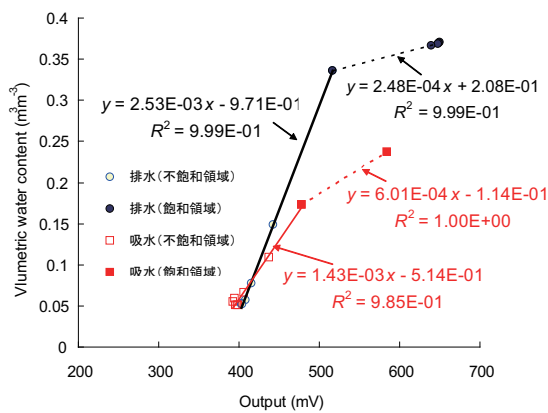


Fig. 8 飽和領域、不飽和領域におけるキャリブレーション式。  
Calibration equation at saturated, unsaturated area.

が実測の水分量よりも過少な結果となった。また、2次式を用いた場合は、飽和領域において非現実的な極大値が現われた。

吸水曲線でも、1次式、2次式による回帰式はいずれも高い $R^2$ 値をしめしたが、1次式のときは、排水曲線同様に不飽和領域で水分量を過少評価した。

これらの結果は、飽和領域と不飽和領域を含んで1つの校正式で出力電圧から体積含水率を推定することが困難であることを示唆している。すなわち、校正曲線は、何らかの指標を用いて水分域をいくつかの領域に分割し、それぞれに対してキャリブレーション式を作成することが良いと考えられる。

今回は、変化が非常に小さい低水分の不動水領域の体積含水率、出力電圧については考慮せず、飽和領域と不飽和領域の2領域に対して別々にキャリブレーション式を作成することを試みた。排水曲線については、空気侵入値の体積含水率0.35を境に飽和領域 - 不飽和領域を分けた。吸水曲線に関しては、飽和近傍のデータが取れなかったことはあるが、水侵入値付近の0.18を閾値として2領域に分け、二つの水分領域それぞれに1次式を当てはめた (Fig. 8)。いずれの式も適合が良く、高い $R^2$ 値を示すと同時に、1つの式でキャリブレーション式と

した場合に見られる、飽和領域・不飽和領域いずれかで見られた過大な推定値が現われなくなった。

従来、蒸発法 (井本ら, 2006; 三石ら, 2008) や水分調整法 (井本ら, 2007) で得たセンサーの校正結果を飽和から不飽和までひとつの式で表現することが行われてきた。多くの場合、その結果はシグモイド状の曲線か、飽和領域で大きな曲率を持つような2次関数となっていた。これら従前の校正式では、水分量の多い飽和領域もしくは水分量の少ない不動水領域のいずれかにおいて、実測値との適合が悪くなってしまいう問題がしばしば見られた。今回の結果から、水分特性曲線 (特に空気侵入値と水侵入値) を得、それに基づいて高水分領域 (飽和領域) と低水分領域 (不飽和領域) に分けてキャリブレーション式を作ることが精度の高い測定に適していると考えられる。

以下に飽和領域及び不飽和領域の校正式を示す。

排水曲線における飽和領域の式

$$y = 2.48 \times 10^{-4}x + 0.208 \quad R^2 = 0.999 \quad (2)$$

不飽和領域の式

$$y = 2.53 \times 10^{-3}x - 0.971 \quad R^2 = 0.999 \quad (3)$$

吸水曲線における飽和領域の式

$$y = 6.01 \times 10^{-4}x - 0.114 \quad R^2 = 1.0 \quad (4)$$

不飽和領域の式

$$y = 1.43 \times 10^{-3}x - 0.514 \quad R^2 = 0.985 \quad (5)$$

ここで、 $y$ : 体積含水率 ( $\theta$ ),  $x$ : 出力電圧 (V)

非常に水分量の低い、いわゆる不動水に近い領域については、今回使用した砂質試料では、水分の変化が非常に小さいためにはっきりした結果が得られなかった。これについては、今後試料を変えて検討する必要がある。

## 5. まとめ

・ EC-5 センサーの影響範囲は面方向、横方向ともにセンサーから 2 cm 以上の測定物質があればよい。縦方向は、回路部まで測定物質に挿入することが必要である。

・ センサー使用時は回路部も含めて測定物質中へ埋設する必要がある。よって現場で土壌水分を測定するような場合には、回路部とセンサー部で温度差が出ないように注意が必要である。

・ 従来のキャリブレーション式は飽和から不動水領域までを一つのキャリブレーション式に当てはめていたが、水分特性曲線を十分考慮し飽和領域、不飽和領域、不動水領域に分けて行うことが望ましいと考えられる。

## 引用文献

- 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓 (1995): 土壤物理環境測定法. pp. 74-76, 東京大学出版会, 東京.
- 井本博美, 溝口勝, 宮崎毅 (2005): 豊浦砂・黒ボク土・立川ロームに対する ECH<sub>2</sub>O プローブの特性. 第 47 回土壤物理学会シンポジウム要旨, 62-63.
- 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. 土壤の物理性, 104: 51-60.
- 井本博美, 西村拓, 宮崎毅 (2007): キャリブレーション法と温度変化が ECH<sub>2</sub>O プローブの応答特性に与える影響. 土壤物理学会第 49 回シンポジウム要旨, 20-21.
- 三石正一, 飯山一平, 溝口勝 (2008): デカゴン土壤水分センサーの簡易キャリブレーション方法. 2008 土壤水分ワークショップ要旨, 115-120.

## 要 旨

誘電率型水分センサーによる土壤水分測定が近年, 多く行われるようになってきている. しかし, その測定においては, センサーが水分を感知する測定範囲や出力電圧と実際の体積含水率の関係を示す校正曲線式に問題がある. 比較的安価で小型な点で便利な EC-5 センサーを用い, センサーの影響範囲と水分特性曲線を用いたキャリブレーションを行った. 影響範囲はおしなべてセンサー周囲 2 cm 程度であるが, センサー根元の基盤部も埋設することが重要である. 校正曲線は, 水分特性曲線上で空気侵入値および水侵入値を閾値として二領域に分けそれぞれについて 1 次式を当てはめることで測定精度が上がると考えられた.

キーワード: 土壤水分センサー, キャリブレーション, 水分特性曲線, プローブの影響範囲