



プロファイルプローブ Drill & Drop Probe の 埋設方法と簡易補正の検討

坂井 勝¹・取出伸夫¹・坂本祐樹²

Installation and simple correction method for a profile probe “Drill & Drop Probe”

Masaru SAKAI¹, Nobuo TORIDE¹ and Yuki SAKAMOTO²

Abstract: The Drill & Drop Probe (DDP) newly developed by Sentek Pty. Ltd. is easy to install directly into a soil without using an access tube because the tapered probe matches auger well. The DDP is suited to situations where a monitoring probe may need to be moved in short term. In this study, a 120 cm length DDP was installed in a loamy field to confirm the installation procedures and propose a simple in-situ correction method for the volumetric water content, θ , measurement. Excavating a smaller diameter hole before using a tapered auger could reduce gaps between the probe and surrounding soil. The DDP overestimated θ by about $0.057 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ relative to gravimetrically determined θ at the end of measurements for θ ranging from 0.26 to $0.37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Subtracting the averaged error for stable eight data in ten measurements from the DDP measured value could improve the θ measurement. Since the observed frequency is normalized using air and water frequencies to minimize the sensor difference, this simple correction method can improve the θ measurement for a uniform textured soil. Judging from the continuous monitoring data, there were two types of erroneous measurements depending on the connection between the probe and soil: stable but constant error and fluctuating error. It would be possible to interpolate these data using adjacent data sets in case of the DDP measurement at multiple depths in a soil profile.

Key Words : Drill & Drop Probe, profile probe, soil water content, correction

1. はじめに

プロファイルプローブは同時に多深度の水分量測定が可能であり、地表面から鉛直方向に土に埋設するため土の攪乱が少なく、畑地土中の水分測定のために有用である(井本ら, 2006)。一方、アクセスチューブと土の接触は測定の正確さに影響を与え、隙間に空気があると土の水分量を過小評価することが知られている(Bell et al.,

1987; Starr and Paltineanu, 2002)。また、プロファイルプローブでの正確な水分量測定のためには、現場測定に基づいた検量や測定値の補正が必要である(Morgan et al., 1999; 井本ら, 2006; 諸泉ら, 2008)。

Drill & Drop Probe (DDP) は、Sentek 社が 2014 年から販売しているプロファイルプローブである。これまでに、Sentek 社の EnviroSCAN Probe や EasyAG Probe, Delta-T 社の PR1 や PR2 等の様々なプロファイルプローブが開発されているが、DDP の大きな特長はアクセスチューブと一体型のプローブであり、設置が比較的容易であるため、短期間で複数地点の測定が可能なことである。そこで本研究では、まず DDP の概要と設置方法について示す。そして、DDP の水分測定値とコアサンプリングによる実測水分量の比較を行い、水分量測定の現場レベルで可能な簡易的な補正を検討した。

2. Drill & Drop Probe の概要

1 対の金属リングから成る静電容量測定型センサーの開発は古くから行われている(Dean et al., 1987)。Sentek 社はこのセンサーを用い(Fig. 1)、プロファイルプローブを開発している。従来のプロファイルプローブと同様に、DDP にもこのセンサーが 10 cm 間隔で内蔵されており、体積含水率、温度が測定される。また購入時のオプションで、電気伝導度に関連した見かけの溶液濃度を示す体積イオン含量(Volumetric Ion Content, VIC)の測定が可能である。プローブ長は目的に応じて 60 cm 長(Fig. 2, 測定深さ 5, 15, 25, 35, 45, 55 cm)と 120 cm 長(測定深さ 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115 cm)の 2 種類がある。

従来のプロファイルプローブに対する DDP の最大の特長は、アクセスチューブと一体型のプローブになっており、事前のチューブ設置が不要な点である。通常、アクセスチューブの設置には、土との接触をよくするためにカオリナイト混合液等を隙間に流し込む等の工夫が必要であり、設置の手間や測定値への影響が懸念される。DDP は頭頂部が外径 30 mm、先端部が 60 cm 長は外径

¹Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-Machiya, Tsu 514-8507. Corresponding author: 坂井 勝, 三重大学大学院生物資源学研究所.

²Taiyo Keiki Co., Ltd., 1-12-3 Nakajujo, Kita-ku, Tokyo 114-0032.
2015 年 6 月 8 日受稿 2015 年 6 月 28 日受理

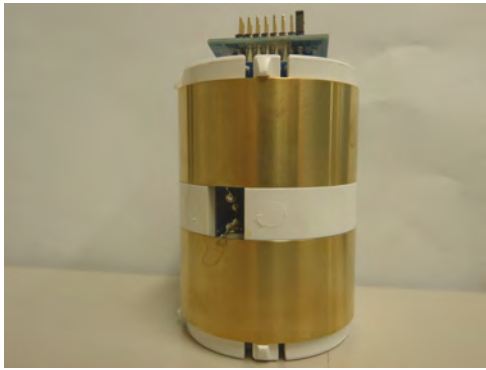


Fig. 1 Sentek 社の静電容量型水分センサー。Capacitance based soil moisture sensor used by Sentek Pty. Ltd.



Fig. 2 60cm 長の Drill & Drop Probe. 60 cm length Drill & Drop Probe.

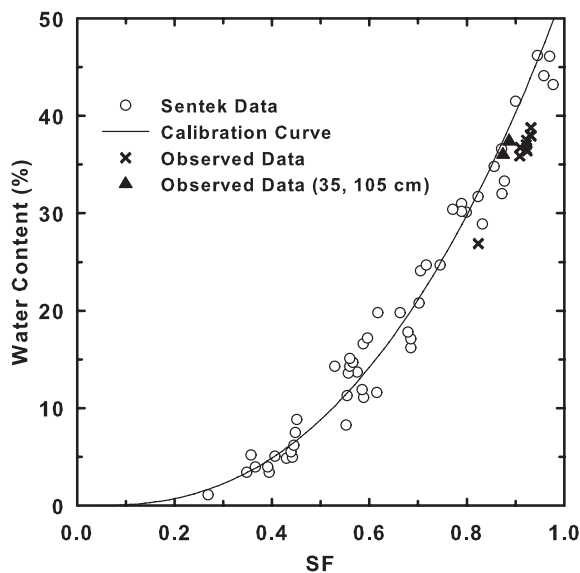


Fig. 3 SF と体積含水率の関係 (○) と DDP で用いられる検量線 (3 式), および実験終了時の実測値 (×, ▲). Volumetric water content as a function of Scaled Frequency SF (○), default calibration curve used in DDP (Eq. (3)), and a dataset observed in the end of field experiment (×, ▲).

27.5 mm, 120 cm 長は外径 24 mm という精巧なテーパ構造で作成されており, 同様な形状の専用オーガーで土に穴を開けることで, プローブと土がよく接触した状態で設置することができる. アクセスチューブ設置の手間

がないことから, 作物の栽培スケジュールに合わせて設置場所を移動する必要がある場合等に有効であると考えられる.

静電容量センサーは比誘電率に関連づけられる測定周波数から体積含水率を推定する (Starr and Paltineanu, 2002). 静電容量センサーで測定される周波数 F とセンサー周辺の土の静電容量 C_a および比誘電率 ϵ_r の関係は次式となる.

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_a}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lg\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで, L は回路のインダクタンス, g はセンサーの形状に依存する係数である. 測定される周波数 F はアクセスチューブの影響を受けるため, アクセスチューブに挿入後の空気と水の測定値を用いて, 土中での測定値を正規化する.

$$SF = \frac{F_A - F_S}{F_A - F_W} \quad (2)$$

ここで, SF は正規化された周波数, F_A , F_W , F_S はそれぞれ空気, 水, 土中での周波数である. この正規化によって, 各センサーの出力値は 0 から 1 の値となるため, センサー間の個体差を最小にすることができる (Starr and Paltineanu, 2002). 砂質土, ローム, 粘土質ロームにおける SF と体積含水率の測定値に基づき, Sentek 社では以下の式が用いられる.

$$\theta = \left(\frac{SF - C}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (3)$$

ここで, θ は体積含水率 (%), A , B , C は検量で求まる係数であり, 0.1957, 0.404, 0.02852 が提案されている. Fig. 3 は, Sentek 社の示す SF と体積含水率の測定値と (3) 式の DDP で用いられる検量線である. DDP では, 出荷時の F_A と F_W を用いて内部で (2) 式の正規化を行い, (3) 式と Sentek 社が用いているパラメータで求めた θ を出力する.

3. 実験と方法

3.1 DDP の設置

2014 年 12 月 11 日に三重大学附属農場内の圃場に, 120 cm 長の DDP を設置した. 圃場はダイズ収穫後に耕起した畑である. 畑は全層ローム質土で, 地表面付近を除いて乾燥密度が $1.50 \sim 1.55 \text{ g cm}^{-3}$ と非常に高く, 飽和透水係数は $10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ 以下と低い透水性を持つ. また, 50 cm 以深には直径 10 ~ 15 cm 程度のシルト質の土塊が点在した.

設置は, ①オーガー補助用三脚の設置, ②ハンドオーガーによる仮坑の掘削, ③ DDP 専用オーガーによる掘削, ④ DDP の挿入, の手順で行った. 作業の写真を Fig. 4 に示す. まず, 地表面を平らに成形後, オーガー補助用の三脚を水平に地表面に設置した. 次に, DDP よりも



Fig. 4 DDP 設置坑作成の手順①～③.
Pictures of drilling a DDP installation hole.

細い 22 mm のハンドオーガーを用いて、深さ 100 cm 程度の仮坑を掘削した。続いて、DDP 専用オーガーを用いて深さ 120 cm の穴を作成した。この時、約 5 cm 掘り進めて掘削した土を取り出す作業を繰り返すことで、穴の歪みが極力小さくなるよう心掛けた。最後に、摩擦を減らすために DDP を霧吹きで湿らせて挿入した。DDP 設置後にプローブと土の密着を確認するために、センサー上端から水を散水し、含水率の測定値の変化をデータロガー CR1000 (Cambell Sci.) に接続した PC でモニターした。Sentek 社のホームページ (Sentek Pty. Ltd., 2014) に公開されている設置マニュアルの動画では、細いハンドオーガーを使った仮坑の掘削 (手順②) を行わずに、DDP 専用オーガーで直接穴を開けている。そこで比較検討のため手順②を省略した方法でも DDP 設置を行い、

同様に水を散水してプローブと土の密着を確認した。

測定は 2014 年 12 月 11 日から 2015 年 4 月 27 日まで行い、CR1000 を用いて、体積含水率、地温、体積イオン含量の測定値を 15 分間隔で保存した。本報では、含水率および地温の測定に焦点を当てる。

3.2 DDP 測定値の補正

誘電率と体積含水率の関係に一般的に用いられる Topp 式が、日本の土の含水率を過小評価するように (宮本・安中, 1998; 三石・溝口, 2014; 武藤ら, 2015), DDP で用いられる (3) 式も日本の土に適用した場合には補正が必要と考えられる。そこで測定終了時の 4 月 27 日に、各測定深さから土のサンプリングを行った。まず埋設した DDP から約 20 cm 離れた場所に深さ 130 cm 程度の土壌断面を掘った。DDP の各測定深さにおいて、100 cm³ コアサンプラーを鉛直方向に打ち込み採土した。サンプリングは DDP から水平距離約 10 cm の位置から各深度 3 点ずつ行い、炉乾法で体積含水率を求めた。炉乾法で求めた実含水率と DDP 測定値の誤差を求め、DDP 測定値の補正について検討した。

4. 結果と考察

4.1 設置について

仮坑の掘削 (手順②) を行わずに DDP を設置した場合、データロガーに接続した PC 画面上で地表面からの散水後の含水率変化を確認したところ、下層の測定値が上層の測定値と同時に上昇する結果となった。これはプローブと土に隙間ができ、プローブをつたって水が瞬間的に下層に到達したためだと考えられる。一方、手順②を加えることで、歪みの少ない設置坑を作成でき、プローブと土を接触よく設置することができた。手順②を入れても全行程にかかった時間は 40 分程度と、比較的短時間で設置することができた。

4.2 測定値の補正

Fig. 5 に DDP と炉乾法で測定した体積含水率の比較を示す。35 cm と 105 cm の測定値を除いて、0.26 から 0.37 m³ m⁻³ を示した炉乾法の含水率を DDP はほぼ均一に過大評価した。一方で、2 点の以外の測定値は、地表面の乾燥と 15 cm 以深の均一な水分分布の形状を適正に測定していることがわかる。Fig. 3 には、今回の DDP の含水率から (3) 式を用いて求めた SF 値と炉乾法の含水率の関係も併記した。なお、35 cm と 105 cm の測定値は区別してプロットした。今回の実測値は検量線を求める際に使われたデータのばらつきの範囲内に収まるものの、検量線は 35 cm と 105 cm の 2 点を除く実測の含水率をほぼ同程度に過大評価した。日本の土は有機物含有量の少ない土に比べ、同じ含水率で小さい比誘電率を示すことが報告されている (宮本・安中, 1998; 三石・溝口, 2014)。SF は比誘電率の逆数の関数であることから、Fig. 3 の誤差は他の誘電率型水分センサーと同様な傾向を示していると考えられる。

DDP の静電容量センサーは、各深さでおよそ一定の誤

差を示したため、35 cm と 105 cm を除く 8 点の誤差の平均値を差し引くことで、簡易的な補正を行った。

$$\theta_{\text{Calib}} = \theta_{\text{DDP}} - \bar{\theta}_{\text{Err}} \quad (4)$$

ここで、 θ_{Calib} は補正後の体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 θ_{DDP} は DDP の測定値 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 $\bar{\theta}_{\text{Err}}$ は各深さの θ_{DDP} と炉乾法の測定値 (θ_{Oven}) の差の平均値である。35 cm と 105 cm を除いた $\bar{\theta}_{\text{Err}}$ は $0.057 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ であった。 θ_{Calib} は 35 cm と 105 cm を除く全層で θ_{Oven} とよく一致した (Fig. 5)。各深さの測定値は、(2) 式によって個体差が小さくなるよう正規化されており、また圃場は全層がおよそ一様な土性であったため、全層で一定の誤差を示したと考えられる。今回の方法で、実測の含水率の範囲 ($0.26 - 0.37 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) で簡易的な補正ができたと言える。以降の測定値には、(4) 式で補正した値を示す。

4.3 誤差の大きい測定値

今回の測定では、35 cm と 105 cm の測定誤差が、他の深さと比べて大きく異なった (Fig. 5)。Fig. 6a に 35 cm の、Fig. 6b に 105 cm の含水率の経時変化を、それぞれ隣接する 25 cm と 95 cm の経時変化とともに示す。この測定期間は、降雨が断続的に生じた期間であり (Fig. 6a)、上層部では小刻みな増減を繰り返しながら $0.06 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ 程度含水率が増加し、下層部では $0.02 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ 程度の滑らかな増加を示した。105 cm の測定値は 95 cm と同様の増加傾向を示したが、常に $0.07 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ 程度低い値を示した。一方、35 cm は 25 cm とほぼ同じタイミングで水分の増減を示すが、25 cm より含水率が高い期間と低い期間が生じた。2 つの深さの測定値の誤差は、異なるパターンの誤差の変動を示した。どちらもセンサー

と土の接触が一部悪いこと、105 cm についてはシルト質の土塊の影響が原因として挙げられる。細心の注意を払って DDP を設置した場合でも、測定誤差の大きな点が生じる可能性は常にあると考えられる。各深さの測定値の正確さは、Fig. 5 に示す実測含水率分布との比較に加えて、中・長期的な測定値の変動を近隣の測定値の変動と比較し、その妥当性から判断する必要がある。

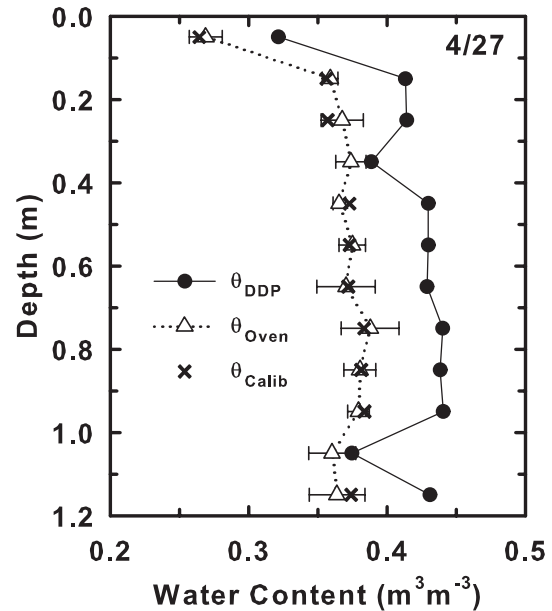


Fig. 5 炉乾法 (Δ) と DDP (検量前: \bullet , 検量後: \times) で測定した水分分布。

Water content profiles measured with the gravimetric method (Δ) and a 120 cm length DDP without (\bullet) and with calibration (\times).

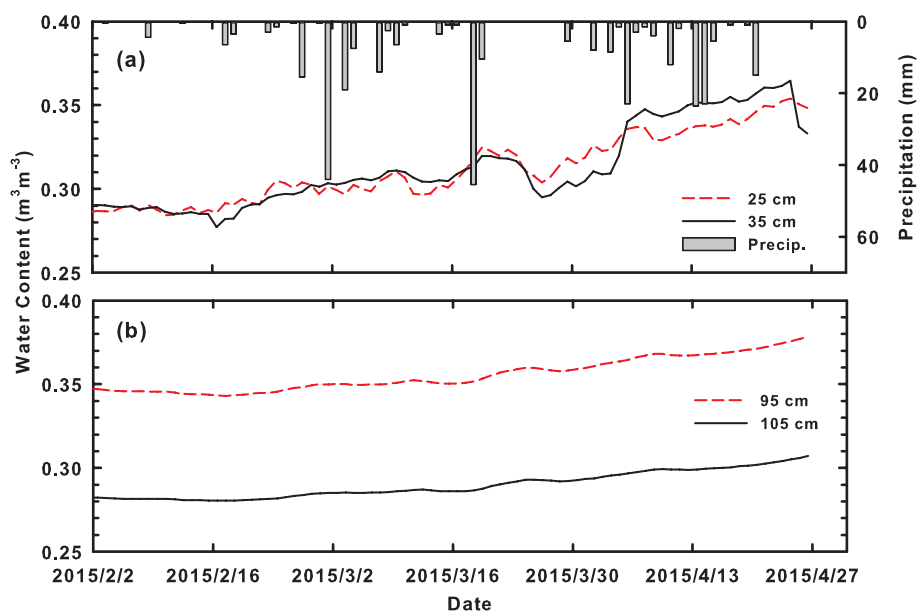


Fig. 6 誤差の大きい測定点の体積含水率の経時変化と日降水量. (a) 25 cm と 35 cm の比較, (b) 95 cm と 105 cm の比較.

Soil water content changes at depths showing larger errors with daily precipitation.

(a) Comparison between 25 and 35 cm, and (b) 95 and 105 cm.

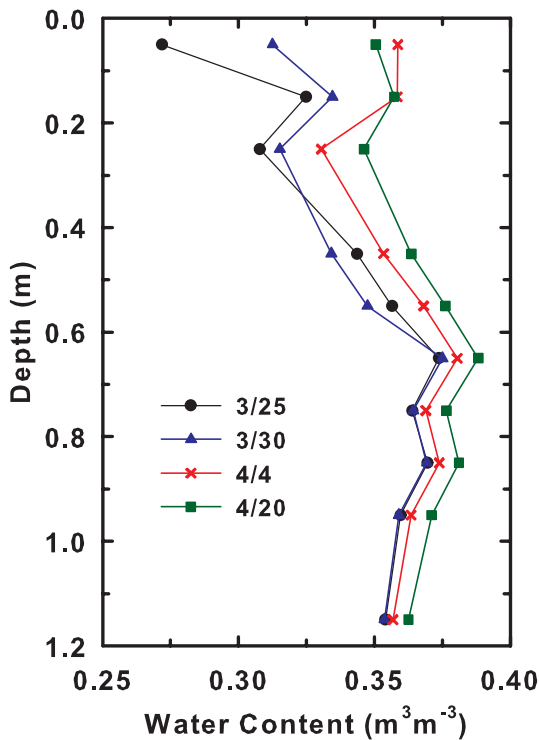


Fig. 7 浸潤にもなう水分分布の変化.
Soil water content profiles in an infiltration process.

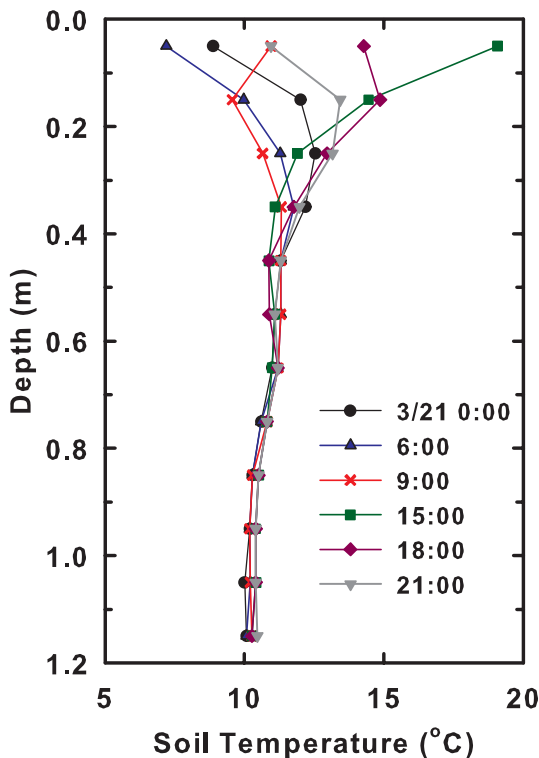


Fig. 8 地温分布の日変化.
Daily soil temperature profiles.

Fig. 7 に 3/29 以降の断続的な降雨に対する水分分布の変化を示す。ここでは、35 cm と 105 cm の測定値は除外した。2 点の測定不備があったとしても、残りの 10 点で浸潤過程の水分分布の特徴を捉えることができた。12 点で同時に測定することで、安定した計測が不能な点

が生じた場合でも、計測範囲の土層の水分分布の形状を得ることができることは、プロファイルプローブの利点であると言える。また 35 cm と 105 cm は異なる誤差のパターンを示したが、土性が均一な本実験圃場については、いずれの場合も上下の深さの測定値から含水率をおおよそ補間することが可能であると考えられる。

Fig. 8 は、水分分布と同時に得られる地温分布の日変化の測定例である。接触不良で含水率測定で誤差を示した 35 cm と 105 cm についても、温度の測定に問題は生じていない。センサーと土の間に隙間が存在した場合、含水率の測定は空気の影響を大きく受けるが、隙間の温度は周辺とおおよそ平衡した温度を示すためである。地表面で最も変動が大きく下層はほとんど変化しない地温の日変動を全層で精度よく測定することができた。

5. おわりに

Sentek 社のプロファイルプローブ DDP について、設置法と体積含水率測定の補正法について検討した。アクセスチューブを必要としない一体型のプロファイルプローブであるため、従来のプローブに比べ比較的短時間で容易に設置が可能であった。DDP と同形状の専用オーガーを使う前に、細めのオーガーで仮坑を掘削しておくことで、歪みの小さい設置坑を作成でき、プローブと土の接触が向上した。

DDP 測定含水率は、コアサンプリングと炉乾法で測定した実含水率を各深さでほぼ均一に過大評価した。検量式の SF - 含水率関係と実測値の SF - 含水率関係は一定の差を示すことから、各深さの DDP 測定含水率と実含水率の差の平均値を差し引く補正法を提案した。各深さのセンサー出力値は事前の正規化で個体差が小さいため、対象圃場がおおよそ均一な土性の場合には、この簡易的な補正法で測定の正確さを向上できると考えられる。今後、黒ボク土など様々な他の土性の畑土に対しても DDP を適用して測定誤差の情報を蓄積することにより、さらに簡便な補正法が確立できると考える。

細心の注意のもとで DDP を設置したとしても、プローブと土の接触不良による測定不備が生じる可能性は常にある。測定含水率の経時変化を検討した結果、時間変動を示す誤差と一定な誤差の 2 パターンが見られた。利用可能な測定値かどうかは、コアサンプリングとの比較のみではなく、測定含水率の経時変化も含めて不安定な測定値の要因を検討する必要があると言える。一方、プロファイルプローブは多深度を同時に測定できるため、多少の測定不能点が生じたとしても、土層内の水分分布の形状を捉えることができる。また、隣接する測定値から含水率を補間することも可能であると考えられる。

DDP は、ほぼ不攪乱で多深度の含水率・地温を測定できるため、降雨時の浸潤、植物根の吸水を含む蒸発散等の水循環の定量的評価や、水分・熱同時移動の測定と解析(斎藤ら, 2007)への適用が期待される。

謝辞

三重大学附帯施設農場の長菅輝義准教授と宮崎洋介技術職員には測定と土壌サンプリングに際し、大変お世話になりました。ここに感謝の意を記します。

引用文献

- Bell, J.P., Dean, T.J. and Hodnett, M.G. (1987): Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II. Field techniques, evaluation and calibration. *J. Hydrol.*, 93: 79–90.
- Dean, T.J., Bell, J.P. and Baty, A.J.B. (1987): Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part I. sensor design and performance. *J. Hydrol.*, 93: 67–78.
- 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壌水分測定—室内キャリブレーションと現場測定—. *土壌の物理性*, 104: 51–60.
- 三石正一, 溝口 勝 (2014): 静電容量型 ECH₂O 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.
- 宮本輝仁, 安中武幸 (1998): 関東ローム表土の体積含水率—比誘電率関係の特徴. *農業土木学会論文集*, 194: 165–166.
- Morgan, K.T., Parsons, L.R., Wheaton, T.A., Pitts, D.J. and Obreza, T.A. (1999): Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 987–989.
- 諸泉利嗣, 池本賢弘, 濱田浩正, Sukchan, S. (2008): Profile Probe による原位置キャリブレーションと土壌水分測定 — 東北タイ天水圃場における事例 —. *水文・水資源学会誌*, 21 (5): 361–367.
- 武藤由子, 渡辺晋生, 山本清仁, 倉島栄一 (2015): 5TE センサーで測定した土壌水分量の簡易補正と電気伝導率の検証. *農業農村工学会論文集*, 296: I9–I17.
- 斎藤広隆, Šimůnek, J., 取出伸夫 (2007): 裸地土中の水分・温度長期変動予測 — 近似した気象データによる表面境界条件の設定 —. *土壌の物理性*, 107: 79–96.
- Sentek Pty. Ltd. (2014): Install tapered probe. <http://www.sentek.com.au/products/enviro-scan-probe.asp#drilldrop>. (2015年5月27日)
- Starr, J.L. and Paltineanu, I.C. (2002): Capacitance devices. In Dane, J.H. and Topp, G.C., (ed.) *Methods of soil analysis. part 4*. pp. 463–474, SSSA Book Ser. 5, Madison.

要 旨

Sentek 社のアクセスチューブ一体型プロファイルプローブ Drill & Drop Probe (DDP) について、設置法と現場レベルの補正法について検討した。DDP と同形状の専用オーガーを使う前に、細めのオーガーで仮坑を掘削することで、歪みの小さい設置坑を作成でき、プローブと土の接触が向上した。DDP 測定含水率を炉乾法の実含水率と比較した結果、各深さで約 $0.057 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 均一に過大評価した。そこで、各深さの DDP 測定含水率と実含水率の差の平均値を差し引く補正法を提案した。各深さの出力値は正規化され個体差が小さいため、均一な土層の場合は、この簡易的な補正法で測定の正確さを向上できると考えられる。また測定値の経時変化から、一定と変動の 2 パターンの測定誤差が見られた。プロファイルプローブは多深度を同時に測定するため、隣接する測定値から補間が可能な場合も多いと考えられる。

キーワード : Drill & Drop Probe, プロファイルプローブ, 含水率, 補正