水分量の異なる不飽和土壌の複素誘電スペクトルの評価

上村将彰¹・中川 啓²・宮本英揮^{*3}¹ 鹿児島大学大学院連合農学研究科 890–8580 鹿児島県鹿児島市郡元 1–21–24² 長崎大学総合生産科学域 852–8521 長崎県長崎市文教町 1–14³ 佐賀大学農学部 840–8502 佐賀県佐賀市本庄町本庄 1

Estimating the Dielectric Spectrum of Unsaturated Soils with Different Moisture Contents

Masaaki UEMURA¹, Kei NAKAGAWA² and Hideki MIYAMOTO^{*3}¹ The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, 1–21–24 Korimoto, Kagoshima 890–8580, Japan.² Institute of Integrated Science and Technology, Nagasaki University, 1–14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852–8521, Japan.³ Faculty of Agriculture, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga 840–8502, Japan.

Abstract

To establish a method for evaluating the dielectric spectra of unsaturated soils, spectra of the real permittivity of Toyoura standard sands (ϵ'_{sand}) with different volumetric water contents (θ) were determined by employing a vector network analyzer. Their results were verified based on a comparison with the theoretical values calculated using a modified dielectric mixing model. The spectra of ϵ'_{sand} above $0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ could not be estimated owing to unreproducible soil packing. However, suitable spectra that approximately agreed with the theoretical spectra, were successfully estimated when θ was less than $0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Although further modifications of the foregoing approaches are required to obtain more reliable spectra of ϵ'_{sand} for Toyoura standard sands with high moisture contents, the proposed methods can aid in evaluating the spectra of unsaturated sands with low or moderate volumetric water contents.

Keywords: calibration, dielectric spectroscopy, dielectric spectrum, soil moisture

諸 言

作物の収量・品質の向上を図る手段の1つとして、根圏水分環境の制御が挙げられる。水分環境の指標となる土壌の体積含水率 (θ) は、時間領域反射法 (TDR)^{1,2)}、時間

領域透過法 (TDT)^{3,4)}、静電容量法^{5,6)}等の電気的性質に基づき間接的に測定でき、その簡易測定を支援するための多様な水分センサーが流通している。

水分センサーを利用して、 θ を正確に測定することは容易ではない⁷⁾。センサー感知部周囲の土壌の電気的性質、たとえば、電磁波の伝播時間 (または伝播速度)、電気抵抗、静電容量等を決定し、それを所定の経験式に代入して θ に変換するのが、水分センサーによる一般的な θ 測定法である。しかし、その経験式は、土壌の種類およびその乾燥密度等によって異なるため^{8,9)}、別途、キャリブレーションを行わない限り、正確な θ を得ることが難しい。キャリブレーションを適切に

2020年 2月10日受付

2020年 6月 7日受理

*Corresponding author: Hideki Miyamoto

(b1098@cc.saga-u.ac.jp)

行うには、実験に対する高い習熟度に加え反復測定の手間を要することから、それをせずに θ の相対的变化を測定するユーザーが多い。正確な θ を得ることが出来ないことから、 θ 値や水分特性曲線を介して得られる pF 等を指標とした精密な水分環境制御を実現できていないのが現状である。簡便で正確な水分センサーのキャリブレーション法を確立することは、データの価値の向上と精密な根圏水分環境制御の実現に資すると考えられる⁷⁾。

簡便なキャリブレーション法として、流体を供試材料とした簡易法が検討されている¹⁰⁾。この手法は、電気的性質の異なる複数の流体の複素誘電率の実数部 (ϵ') と、同一流体に対する水分センサーの出力値との経験的関係を実験的に定めた後、それを Topp 式¹¹⁾ に代表される既存の経験式 ($\epsilon' - \theta$) にあてはめるものである^{12, 13)}。 ϵ' を介したセンサー出力値の θ への変換の最大の利点は、センサー感知部との完全接触が期待でき、且つ均一な流体を供試材料とするため、データのばらつきが小さく、測定の実現性が高いことにある。ただし、この手法を適用できるのは、使用するセンサーの周波数 (f) において、 ϵ' と θ との経験的関係が既知である場合に限られる。換言すれば、各周波数における $\epsilon' - \theta$ の関係が既知であれば、流体を利用した簡易校正を実施できることを意味する。ところが、任意の周波数における測定事例は、液体や粘土に代表される流動性の高いペースト状の試料に限られ^{14, 15)}、間隙中に空気を含む水分不飽和土壌に対する事例は認められない。

本研究では、水分不飽和土壌の実数部スペクトルの態様を明らかにするために、2つの異なる手法を検討した。第1に、ベクトルネットワークアナライザー (VNA) を利用して、 θ の異なる豊浦砂の複素誘電率の実数部 (ϵ'_{sand}) スペクトルを反復測定した。第2に、誘電率に関する既往のモデルを改良することによって ϵ'_{sand} の評価モデルを構築し、それに基づき ϵ'_{sand} スペクトルを計算した。VNA による測定結果と改良モデルに基づく計算値を比較し、水分不飽和状態の豊浦砂の ϵ'_{sand} スペクトルの全体像を把握するとともに、両手法の課題を明らかにすることを試みた。

材料および方法

1. 豊浦砂の複素誘電スペクトル測定

25℃ (±0.5℃) の実験室内に、VNA (N5230A, Agilent Technologies) と誘電体プローブキット (85070E, Agilent Technologies) とを組み合わせた複素誘電スペクトル測定システムを構築した。同軸ケーブルおよび電子校正用 Ecal モジュールを介して、500 MHz ~ 50.0 GHz の周波数に対応した直径 2.2 mm、長さ 200 mm のスリムフォームプローブ

Fig. 1 Schematic diagram of experiments.

(Agilent Technologies) を VNA に接続し、それを水平に固定した状態で、誘電体プローブキット付属ソフトウェアを用いて測定システム全体のキャリブレーションを行った (Fig. 1)。我が国の標準砂として知られる豊浦砂と蒸留水とをビニル袋内で混合し、両者の混合比を調整することによって、 θ の異なる計 10 種の供試土壌を準備した。そして、プラスチック製シャーレ (内径: 34 mm、高さ: 16 mm) の側面の中間高さに設けた小孔からスリムフォームプローブを水平に挿入した後、所定の θ の供試土壌をシャーレ内に充填して転圧したうえで、供試土壌表面における水分の蒸発を防ぐために上面を密閉した (Fig. 1)。

上述の測定システムを利用して、 θ を調整した供試土壌の ϵ' スペクトルを測定した。スリムフォームプローブの測定下限周波数が 500 MHz であること、また土壌水分測定に多用される周波数が数百 MHz ~ 1 GHz 超であること等を考慮して、本研究では、それを網羅する 500 MHz ~ 4.0 GHz の周波数帯を ϵ'_{sand} スペクトルの測定対象周波数と定めた。そして、測定システムの最大分解能が発揮されるよう、その周波数帯域を最大分割数で等分した計 511 の分割点の ϵ'_{sand} 値を測定し、これらを 1 組の ϵ'_{sand} スペクトルとした。測定終了後、供試土壌をシャーレから取り出して、炉乾法 (105℃) により θ を決定した。同一手順で試料の充填、 ϵ'_{sand} スペクトル測定、 θ 測定等を計 50 反復し、 ϵ'_{sand} の平均スペクトルおよび θ の平均値を求めた。

以上の測定を、全 θ 条件において反復した。なお、全実験条件における供試土壌の間隙率 (ϕ) および乾燥密度の平均値は、それぞれ $0.42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ および 1.50 g cm^{-3} であった。また、各供試土壌の θ の平均値は、それぞれ 0.001, 0.05, 0.09, 0.14, 0.19, 0.23, 0.24, 0.27, 0.29, $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。

2. 自由水の誘電分散を考慮した改良型誘電率混合モデル
土壌の誘電率を表す代表的なモデルの 1 つに、

Maxwell-DeLoor モデル¹⁶⁾がある。土壌は、土粒子、自由水、吸着水、空気の計4成分から構成され、且つ各構成成分の存在比を重みとして与えた先行研究¹⁶⁾によれば、このモデルに基づき $\varepsilon'_{\text{sand}}$ を次式で表すことができる。

$$\varepsilon'_{\text{sand}} =$$

$$\frac{3\varepsilon'_s + 2(\theta - \theta_{\text{bw}})(\varepsilon'_{\text{fw}} - \varepsilon'_s) + 2\theta_{\text{bw}}(\varepsilon'_{\text{bw}} - \varepsilon'_s) + 2(\phi - \theta)(\varepsilon'_a - \varepsilon'_s)}{3 + (\theta - \theta_{\text{bw}})\left(\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon'_{\text{fw}}} - 1\right) + \theta_{\text{bw}}\left(\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon'_{\text{bw}}} - 1\right) + (\phi - \theta)\left(\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon'_a} - 1\right)} \quad (1)$$

θ_{bw} は吸着水の体積分率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 ϕ は間隙率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) を表す。また、 ε'_s 、 ε'_{fw} 、 ε'_{bw} 、 ε'_a は、それぞれ所定の f における土粒子、自由水、吸着水、空気の実数部を表す。ただし、土粒子表面の吸着水の誘電率は強い周波数依存性を示すことが知られているものの、その挙動や周波数特性については未解明な点が多い¹⁷⁾。吸着水は、土粒子表面に強く吸着されて存在するため、一般に、比表面積が大きい土壌ほど、全水分に占める吸着水の割合は大きい。しかし、粒径が比較的大きい土粒子を主成分とする砂の場合、粘土分を多量に含む土壌に比べ比表面積は非常に小さいことから、本研究では、豊浦砂の θ に占める吸着水の割合は無視できるほど小さい、

すなわち、 $\theta_{\text{bw}} = 0$ とみなすことにより、(1) 式を次式のように簡略化することとした。

$$\varepsilon'_{\text{sand}} = \frac{3\varepsilon'_s + 2\theta(\varepsilon'_{\text{fw}} - \varepsilon'_s) + 2(\phi - \theta)(\varepsilon'_a - \varepsilon'_s)}{3 + \theta\left(\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon'_{\text{fw}}} - 1\right) + (\phi - \theta)\left(\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon'_a} - 1\right)} \quad (2)$$

なお、マイクロ波周波数帯における ε'_a および ε'_s は、 f によらず概ね一定値を示す¹⁸⁾ ため、 ε'_a は 1.0、 ε'_s は 2.6 であるとする、(2) 式は

$$\varepsilon'_{\text{sand}} = \frac{7.8 + 2\theta(\varepsilon'_{\text{fw}} - 2.6) - 3.2(\phi - \theta)}{3 + \theta\left(\frac{2.6}{\varepsilon'_{\text{fw}}} - 1\right) + 1.6(\phi - \theta)} \quad (3)$$

となる。

一方、 ε' が f によって異なる、すなわち、誘電分散を示す流体¹⁵⁾ の ε' は、次の Debye モデルにより表される¹⁹⁾。

$$\varepsilon' = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_0 - \varepsilon'_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4)$$

ω は角周波数 ($= 2\pi f$)、 ε'_∞ は極限の周波数における実数部、 ε'_0 は最低周波数における実数部、 τ は緩和時間をそれぞれ表す。 ε'_∞ 、 ε'_0 、 τ の三者は温度の関数として表され、25℃の水の場合、それぞれ 5.3、78.3、 8.7×10^{-12} s であ

Fig. 2 (a) Spectra of real permittivity ($\varepsilon'_{\text{sand}}$) of Toyoura sand for $\theta = 0.001 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ and (b) their histogram plot for 0.5, 1.27, and 4.0 GHz.

Fig. 3 (a) Spectra of real permittivity ($\varepsilon'_{\text{sand}}$) of Toyoura sand for $\theta = 0.19 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ and (b) their histogram plot for 0.5, 1.27, and 4.0 GHz.

る¹⁹⁾。上述のように、 θ_{bw} を無視することは、間隙内が自由水で満たされることと同義である。よって、自由水の ε' を ε'_{fw} と置き換えたうえで、3つの定数を(4)式に代入すると、

$$\varepsilon' = \varepsilon'_{fw} = 5.3 + \frac{73}{1 + (2\pi f)^2 (8.7 \times 10^{-12})^2} \quad (5)$$

となり、所定の f における自由水の ε'_{fw} を算出可能である。(5)式に基づいて算出した ε'_{fw} を(3)式に代入することにより、 ϕ が既知の土壌における $\varepsilon'_{sand}-\theta$ 関係を表すことができる。さらに、(3)式に(5)式を代入して ε'_{fw} を消去すれば、 f 、 θ 、 ε'_{sand} の三者の関係を定式化できる。

結果と考察

1. 豊浦砂の複素誘電スペクトル

最も θ が小さい $0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、乾燥した豊浦砂の特徴を反映した ε'_{sand} スペクトルが得られた(Fig. 2(a))。計50回の測定によって得られた ε'_{sand} スペクトルは $1.8 \sim 2.7$ の範囲に分布し、 f による ε'_{sand} の差異は小さかった(Fig. 2(a))。本測定システムの測定周波数の下限(0.5 GHz)および上限(4.0 GHz)に加え、マイクロ波リモートセンシングに適用される土壌水分感応帯(1.27 GHz)²⁰⁾に着目した。これら3つの

周波数における $\varepsilon'_{sand}(0 \sim 30)$ を15分割し、各bin幅を2としたヒストグラムを明示した結果、計50回の平均値(2.2)の近傍において、各周波数の頻度が突出した(Fig. 2(b))。土壌構成成分のうち、最も高い ε' を示す水の割合が最も小さく、逆に低 ε' 値を示す土粒子($\varepsilon'_s = 2.6$)および空気($\varepsilon'_a = 1.0$)の割合が高いこと、そして両者が誘電分散を示さない誘電体であること等が、 ε'_{sand} 値の低さおよびその低周波数依存性の原因であると考ええる。

高 θ の条件ほど、反復測定した ε'_{sand} スペクトルの値とそのばらつきが大きくなった。 $\theta = 0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の場合(Fig. 2(a)および(b))と比較すると、 $\theta = 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の ε'_{sand} はより大きな $9.3 \sim 13.2$ の範囲に分布し(Fig. 3(a))、平均値(11.0)に対するヒストグラムの水平への広がりが顕著となった(Fig. 3(b))。さらに θ が高い 0.23 および $0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、 θ が高いほど ε'_{sand} 値は大きくなったのに対して、ヒストグラムはさらに水平に広がる分布を示した(Fig. 4(b), Fig. 5(b))。 θ の増加に対する ε'_{sand} スペクトルおよびヒストグラムの変化傾向は、全 θ 条件に共通する現象であった(図は割愛)。

本測定システムによる測定の再現性が急変する θ 条件が認められた。 $0.5, 1.27, 4.0 \text{ GHz}$ におけるヒストグラムが、高 θ の条件ほど水平方向へ広がったように(Fig. 2～5)、これら

Fig. 4 (a) Spectra of real permittivity (ε'_{sand}) of Toyoura sand for $\theta = 0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and (b) their histogram plot for 0.5, 1.27, and 4.0 GHz.

Fig. 5 (a) Spectra of real permittivity (ε'_{sand}) of Toyoura sand for $\theta = 0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and (b) their histogram plot for 0.5, 1.27, and 4.0 GHz.

の周波数における ϵ'_{sand} の標準偏差も、 θ とともに大きくなった (Fig. 6). ただし、 $\theta \leq 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、各周波数における標準偏差が、 θ に対してほぼ直線的に変化したのに対して、 $\theta \geq 0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では急増する3つの条件 ($\theta = 0.23, 0.29, 0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) が認められた (Fig. 6). 土壌の誘電率を測定する際、センサー感知部と豊浦砂との接触、換言すれば、プローブの影響領域内の土粒子-水-空気の配列が、 ϵ'_{sand} に大きく影響し得る^{21, 22)}. 土の締め固めに関する既往の土質工学研究²³⁾によれば、豊浦砂が最も密に充填される θ は $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ である。この θ は、標準偏差が急増する領域に存在したことが興味深い。 θ がそれを超えると、間隙内部の自由水が、土粒子の密な充填を阻む要因となるため、転圧による外力の作用によって土粒子-水-空気の配列は変わりやすかったことが、標準偏差の急増の原因であろう。高 θ 条件の土壌の充填・締め固めの難しさは、粗大粒子を多く含む土壌ほど難しいことは広く知られる事実であるものの、このような性質を示す土壌の ϵ'_{sand} スペクトルの測定精度を向上させるためには、加圧・減圧用チャンバーに豊浦砂を充填し、加圧または吸引圧を与えて θ を制御する水分調整法⁴⁾を採用することが望ましいと考える。ただし、本測定システムは極めて繊細な電子機器から構成されるため、使用条件においてキャリブレーションを定期的に行う必要がある。チャンバー内にプローブを固定するとそれを行うことが困難となる。 ϵ'_{sand} の精度向上を図るためには、不飽和土壌に適したチャンバー一体型センサーおよびそのキャリブレーション法を一体的に開発することが必要となる。

豊浦砂の ϵ'_{sand} スペクトルは、 θ に応じた f への依存性を示した (Fig. 7). 先述のように、各 θ の ϵ'_{sand} スペクトルのばらつきが認められたため、各供試土壌の計 50 回の ϵ'_{sand} スペクトルの平均値 (以後、平均スペクトルと称す) を同一図中に図示した結果、土壌水分感能帯である 1.27 GHz 以下の周波数依存性が強くなること等が判明した。Fig. 7 に併記した水 ($\theta = 1.00 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) のスペクトルが周波数依存性を示すことから、水の存在比が大きい高 θ の条件ほど、 f への依存性が大きかったと考える。高 θ の条件においては、今後のスペクトル測定手法の改良を要すものの、 $\theta \leq 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の ϵ'_{sand} の平均スペクトル (Fig. 7) が高水分条件ほど急峻な勾配を示した事実は、後述する改良型誘電率混合モデルに関する本研究の考察を支持する根拠となる実測データである。

2. 改良型誘電率混合モデルによるスペクトルの推定

改良型誘電率混合モデルに基づく ϵ'_{sand} スペクトルは、先述の本測定システム (Fig. 1) による測定結果 (Fig. 7) と同様に、 θ および f への依存性を示した (Fig. 8). TDR に関する Topp ら¹¹⁾の研究や、誘電率混合モデルを適用した過去の研究^{12, 24)}の多くは、 ϵ'_{fw} を定数として与えたため、 f による

Fig. 6 Standard deviation of real permittivity at 0.5, 1.27, and 4.0 GHz for volumetric water content (θ).

Fig. 7 Spectra of real permittivity (ϵ'_{sand}) for Toyoura sand with different volumetric water contents.

ϵ' の変化を表現することができなかった。しかし、本研究の改良型誘電率混合モデルでは、(5) 式によって水の ϵ'_{fw} の f 依存性を考慮したため、計算された ϵ'_{sand} スペクトル (Fig. 8 の破線) は f の増大とともに低下し、その低下の度合いは高 θ の条件ほど大きくなった。

$\theta \leq 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、改良型誘電率混合モデルに基づく ϵ'_{sand} スペクトル (Fig. 8 の破線) は、測定されたそれ (Fig. 8 の実線) を一定程度再現できた。ばらつきが大きかった $\theta \geq 0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の ϵ'_{sand} スペクトル (Fig. 7) の測定法については、今後の改善が必要であるものの、 $\theta \leq 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の条件に限定すれば、モデルによる計算結果 (Fig. 8 の破線) と各水分条件における実測値 (Fig. 8 の実線) のスペクトルは同一水準の領域に分布し、両者は比較的よく一致したと考える。ただし、計算された ϵ'_{sand} スペクトルの f に対する勾配は、実測値のそれに比べ小さい。本研究の改良型誘電率混合モデルでは、 f に対する水の誘電分散の効果を考慮したものの、実測値と計算値とのずれが認められた事実は、本モデル

Fig. 8 Measured spectra of real permittivity of Toyoura sand (solid line) and estimated spectra by modified model (broken line).

では完全に ϵ'_{sand} スペクトルを表現できないことを示唆している。

コロイド化学の分野では、比表面積が大きい粘土に発現する特異な誘電分散^{14,15)}、特に、Maxwell-Wagner 効果や表面分極効果等に関する報告^{17,25)}が認められる。粘土に比べ豊浦砂の比表面積が小さいことから、本研究では吸着水の量や上述の効果を無視できると仮定して改良型誘電率混合モデルを、誘導したものである。ゆえに、それらの効果を考慮すれば ϵ'_{sand} スペクトルの再現性向上に繋がる可能性はあるものの、土粒子－水の界面における吸着水の挙動については十分に解明されていないため、誘電分散現象に関する更なる研究の進展が待たれるところである。

摘 要

本研究では、体積含水率 (θ) の異なる豊浦砂の ϵ'_{sand} スペクトルの態様を明らかにするために、2つの異なる手法、すなわち、ベクトルネットワークアナライザー (VNA) を利用した反復測定と、既往のモデルの改良・統合によって誘導した改良型誘電率混合モデルに基づく計算によって、 θ の異なる豊浦砂の ϵ'_{sand} スペクトルを評価するとともに、両法による評価結果を比較した。

測定した ϵ'_{sand} スペクトルは、高 θ 条件ほど大きくなったものの、そのばらつきも大きくなった。特に、最密充填条件 ($0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) を越える $\theta \geq 0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、供試土壌の転圧に伴う土粒子－水－空気の配列の変化に起因する測定の再現性低下により、スペクトルのばらつきが拡大した (Fig. 6)。 ϵ'_{sand} スペクトルのばらつきが比較的小さかった $\theta \leq 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、高 θ の条件ほど ϵ'_{sand} スペクトルは大きく、周波数 (f) への依存性も強くなることが明らかになった。

一方、改良型誘電率混合モデルに基づく ϵ'_{sand} スペクトルの計算値は、 $\theta \leq 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に限り、測定した ϵ'_{sand} の平均スペクトルと同一水準の分布となった (Fig. 8)。この測定値と計算値の共通性は、両法によって得られたスペクトルの信頼性を相互に担保するものと考ええる。しかし、モデルに基づくスペクトルは、 f に対する平均スペクトルの勾配を再現することができなかったことから、モデル誘導時に無視した吸着水の存在を考慮する必要性が示唆された。土粒子表面の吸着水の挙動については不明な点が多いため、コロイド化学分野の研究の進展を待った後、改めて改良型誘電率混合モデルの改良に組み込むことが必要となろう。

以上のように、高 θ 条件における ϵ'_{sand} スペクトル測定手法や、吸着水の存在を考慮したモデルの構築等の課題が残るものの、本研究を通して、これまでに測定事例のない不飽和水分土壌の ϵ'_{sand} スペクトルの態様の一端を明らかにした意義は大きい。今後は、 ϵ'_{sand} スペクトルの測定手法およびモデルの改良に取り組み、より精度の高い水分不飽和土壌の ϵ'_{sand} スペクトルの評価手法の確立を目指す予定である。

引用文献

- 1) Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31: 213–237. 2001.
- 2) Robinson DA, Jones SB, Wraith JM, Or D, Friedman SP. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*. 2: 444–475. 2003.
- 3) Harlow RC, Burke EJ, Ferré TPA. Measuring water content in saline sands using impulse time domain transmission techniques. *Vadose Zone Journal*. 2: 433–439. 2003.
- 4) 宮本英揮, 伊藤直樹, 間瀬 淳, 徳本家康, 筑紫二郎. 土壌水分・電気伝導度の同時計測への時間領域透過法の適用. *農業農村工学会論文集*. 81(6): 513–519. 2013.
- 5) Robinson DA, Gardner CMK, Cooper JD. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*. 223: 198–211. 1999.
- 6) Dean TJ, Bell JP, Baty AJB. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*. 93: 67–78. 1987.
- 7) 宮本英揮. 第 57 回土壌物理学シンポジウム総合討論 土壌水分センサー技術情報の共有へ向けて. 土壌

- の物理性. 132: 41–44. 2016.
- 8) 井本博美, 西村 拓, 宮崎 毅. EC-5 センサーのキャリブレーションとその適用. 土壌の物理性. 114: 27–31. 2010.
 - 9) 三石正一, 溝口 勝. 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. 2014.
 - 10) Blonquist Jr JM, Jones SB, Robinson DA. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*. 314: 235–245. 2005.
 - 11) Topp GC, Davis JL, Annan AP. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*. 16: 574–582. 1980.
 - 12) 宮本英揮, 筑紫二郎. 誘電混合モデルによるカラム内壁面接着型 TDR プローブのキャリブレーション. 土壌の物理性. 104: 5–12. 2006.
 - 13) 伊藤祐二, 筑紫二郎, 宮本英揮. TDR による表層土壌水分計の開発とその有効性の評価. 土壌の物理性. 111: 35–41. 2009.
 - 14) Ishida T, Makino T, Changjun W. Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions. *Clays and Clay Minerals*. 48(1): 75–84. 2000.
 - 15) 宮本英揮, 下町多佳志, 筑紫二郎, 安永円理子. マイクロ波信号領域における粘土の誘電特性. 土壌の物理性. 110: 13–23. 2008.
 - 16) Dobson MC, Ulaby FT, Hallikainen MT, Elrayes MA. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. GE-23(1): 35–46. 1985.
 - 17) 石田智之. 誘電率による粒子表面の同定. 足立泰久・岩田進午編著, 土のコロイド現象. 学会出版センター, 東京. 129–142. 2003.
 - 18) Mätzler C. Microwave permittivity of dry sand. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 36(1): 317–319. 1998.
 - 19) 天羽優子. 誘電緩和測定ガイド. 1999. (<http://www.cml-office.org/atom11archive/ftp/pub/tdr/TDR-guide.pdf>. 2020 年 1 月 31 日参照).
 - 20) 会田健太郎, 小池俊雄, 開発一郎. ALOS/PALSAR を用いた土壌水分推定アルゴリズムの高頻度適用研究. 土木学会論文集 B1(水工学). 70(4): I 589–I 594. 2014.
 - 21) Friedman SP. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 34(11): 2949–2961. 1998.
 - 22) Miyamoto T, Annaka, T, Chikushi J. Extended dual composite sphere model for determining dielectric permittivity of Andisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 23–29. 2005.
 - 23) 河原莊一郎, 室 達朗, 市原一也. 重錘落下による砂質土の一次元締め密度と衝撃応答に及ぼす重錘質量・落下高の影響. 土木学会論文集. 652 III-51: 21–33. 2000.
 - 24) 宮本輝仁, 筑紫二郎. 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: 57–62. 2000.
 - 25) Chen Y, Or D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity. *Water Resour. Res.* 42 W06424 DOI: 10.1029/2005WR004590. 2006.