

周波数可変機能を実装した土壤水分センサの性能評価

Performance evaluation of soil moisture sensor with variable frequency mode

升田直希¹・平嶋雄太²・Mohammad Abdul Mojid³・宮本英揮²

¹佐賀大学大学院農学研究科・²佐賀大学農学部・³Bangladesh Agricultural University

要旨(Abstract) :

周波数可変機能を実装した土壤水分センサを用いて、体積含水率(θ)の異なる豊浦砂の複素誘電率の実数部(ϵ')を測定した。その結果、周波数によらず、Topp 式に沿った ϵ' - θ データセットが得られること、測定精度は周波数によって異なり、190 MHz における精度が最良であること等が判明した。

キーワード：土壤水分、複素誘電率、周波数

Key words: Soil moisture, Complex permittivity, Frequency

1.はじめに

土壤環境データに対するニーズが高まり、土壤水分センサ市場が急成長するなか、様々な機能を実装した高性能センサが市場に投入されている。センサの測定対象は土壤に限らず、多岐にわたる。我が国では、標準式・Topp 式¹⁾が通用しない土壤が広く堆積するため、センサ出力値を体積含水率(θ)に変換するために、被測定対象を供試材料として校正式を土壤ごとに定める場合が多い。水分の増減に対する出力値の応答は、周波数によって異なるものの、商用流通する静電容量式センサの場合はセンサごとに周波数が固定され、デジタル TDR/TDT センサでは供試材料によって異なる。つまり、現行の技術では、周波数によって異なる応答を示す情報のごく一部しか利用していないため、任意の周波数を選択したり、複数の周波数の情報を同時出力したりすれば、センサの性能や複数項目の同時測定等に繋がると期待される。本研究では、複素誘電率の周波数スペクトルを測定できる周波数可変式土壤水分センサを用いて、 θ の異なる豊浦砂の水分測定実験を行い、その有効性を実験的に評価した。

2.方法

セラミックフィルタを敷いた内径 80 mm のアクリル製円筒チャンバーに、直径 3.5 mm、長さ 15mm の金属ロッドと、その周囲に配した長さ 20 mm の 4 本の同径のロッドから構成される、同軸プローブを模擬したセンサ(Fig.1)を固定した。SMA コネクタ

を介してセンサを高機能誘電率測定回路(試作品)に接続した。空気、蒸留水、エタノール、NaCl 溶液の 4 種を標準試料として、BAO ら(1994)²⁾の計算法に倣って、複素反射係数(S_{11} パラメータ)を複素誘電率の実数部(ϵ')および虚数部(ϵ'')に変換することにより、センサの校正を行った。脱気した純水で満たしたカラム内に豊浦砂を沈降充填し、水分飽和カラムとした(Fig.2)。約 30 cm のサクシオンをカラム下端に与えて湛水した余剰水を除去した後、フィルタ下端に与えるサクシオンを増大させ、排水が停止した平衡状態で排出水量を求めるとともに、先述のセンサを用いて、10 から 500 MHz までの ϵ' および ϵ'' の周波数スペクトルを 10 MHz 間隔で計 50 点測定した。その後、サクシオンを段階的に増大させ、各段階において先述の測定を反復した後に、カラムから砂を取り出して炉乾法で最終 θ を定めるとともに、排出水量に基づいて各段階における θ を逆算した。一連の排水実験を 3 反復し、Topp 式を介して ϵ' を θ に変換したうえで、炉乾法による θ に対する RMSE に基づき、測定精度を評価した。ただし、回路内部の電波干渉が顕



Fig.1 センサの外観

著であった 170 MHz および 340~370 MHz の測定値については除外した。

3. 結果と考察

測定された ϵ' は、周波数によらず、 θ とともに増大する一般的特徴が認められた。全測定周波数の結果の一例として Fig.3 に示した 190 MHz の ϵ' は、 θ とともに Topp 式に沿って増大した(Fig.3)。併記した 50 MHz の ϵ' は、190 MHz のそれと比して Topp 式に対するばらつきが大きかったものの、この周波数を含む全測定周波数において、見かけの誘電率測定に基づく TDR/TDT 等の商用センサの結果³⁾と共通する結果が得られた。

全周波数の ϵ' に基づいて θ の測定精度を比較したところ、先述の 190 MHz の精度が最良であった。豊浦砂のような粗大な粒子からなる土壤の場合、粘土質土壤と違い、各 θ における ϵ' の周波数依存性は小さいと考えられ、先述の ϵ' - θ のデータセットが Topp 式近傍に分布した事実がその証拠である。ただし、 ϵ' から算出した θ の RMSE は、周波数によって大きく異なり、190 MHz において最良(0.026 m³m⁻³)であり、デジタル TDR/TDT センサによる θ の測定精度³⁾と概ね同程度の水準である。一方、他の周波数における RMSE は、190 MHz のそれよりも大きく、周波数による測定精度の差異が顕著となった。S₁₁ パラメータ測定に基づく本法では、測定精度は、周波数に加え、センサの物理形状や校正法に依存する。低周波帯の精度向上には、出力信号の増幅や長いプローブに変更するなどしてダイナミックレンジを上げることにより、また、高周波帯でも同様に S/N 比を上げたりプローブを小型化または同軸型に変更したりすること等の改良が有効であると考えられる。

4. おわりに

周波数可変機能を実装した土壤水分センサを用いて、 θ の異なる豊浦砂の水分測定実験を行った。その結果、どの周波数においても、Topp 式に概ね沿った ϵ' - θ 関係が得られたものの、その精度は周波数によって異なり、190 MHz において最良となった。今後は、広範な周波数帯で高精度測定が可能となるよう、校正法の再検討とセンサ形状の改良を行う予定である。

謝辞: 大起理化学工業株式会社および東京都立産業技術研究センターの共同開発成果物である高機能誘電率測定システムを利用して、本研究を実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献: 1) Topp et al. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16, 574-582., 2) Bao et al.(1994): Microwave dielectric measurements of erythrocyte suspensions, Biophysical Journal, 66(6), 2173-2180., 3) 伊藤ら(2022): 時間領域測定を活用したデジタル土壤水分・電気伝導度センサーの性能評価, 水文・水資源学会誌, 35(4), 279-287.

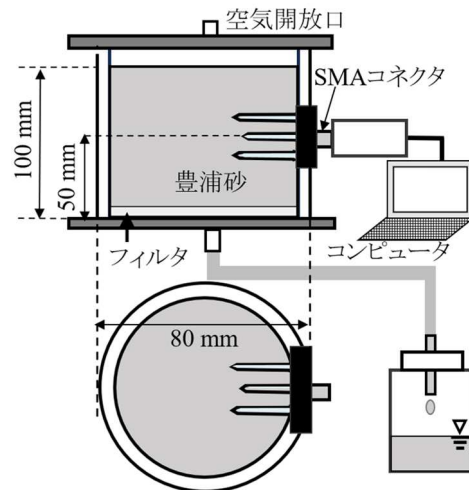


Fig.2 実験装置の模式図

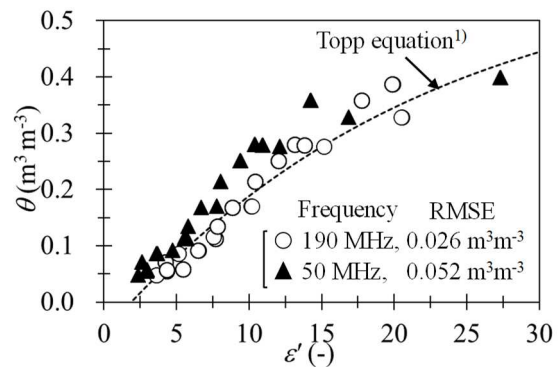


Fig.3 複素誘電率の実数部(ϵ')と体積含水率(θ)の関係

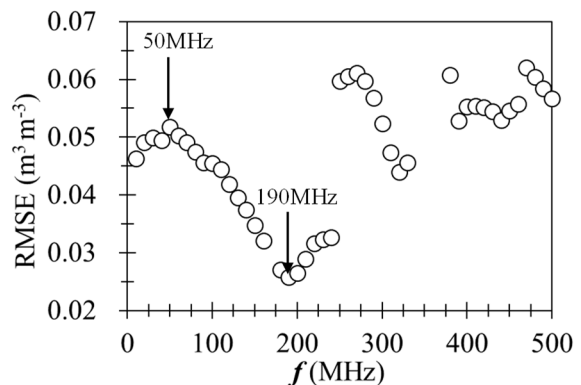


Fig.4 異なる周波数における RMSE