

開放端反射法 (OER) を利用した周波数可変式土壌水分センサ Open-ended reflectometry (OER) sensor with variable frequency mode for measuring soil moisture

升田直希¹・Mohammad Abdul Mojid²・宮本英揮³

¹鹿児島大学大学院連合農学研究科・²Bangladesh Agricultural University・³佐賀大学農学部

要旨(Abstract) :

周波数可変機能を実装した土壌水分センサ(DIK-G300)を用いて、誘電特性および電気伝導度(EC)の異なる流体における複素誘電率の実数部(ϵ')および虚数部(ϵ'')を測定した。ベクトルネットワークアナライザ(VNA)を利用した場合と同等の精度で、両者を計測できることが明らかになった。

キーワード：複素誘電率、周波数、流体

Key words: Complex permittivity, Frequency, Fluid media

1.はじめに

土壌水分センサ市場が世界的な急成長を続ける中、高性能センサの需要が高まっている。体積含水率(θ)の増減に対する電磁波の応答を表す複素誘電率は、土壌の鉱物・粒度組成に加え、計測周波数によっても異なる。標準式・Topp 式¹⁾が通用しない土壌や、商用流通するセンサを用いても十分な精度が期待できない土壌は珍しくない。現行のセンサの多くは、周波数依存性を示す複素誘電率のごく一部しか利用しない周波数固定方式の静電容量法と、有効周波数が測定媒質によって異なる時間領域反射法(TDR)や時間領域透過法(TDT)に大別される。しかし、任意の周波数を選択したり、複数の周波数における誘電率を同時計測したりできる新型センサを確立できれば、あらゆる土壌の計測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、複素誘電率スペクトルを測定できる開放端反射法(OER)を利用した周波数可変式土壌水分センサを用いて、異なる流体のスペクトル計測実験を行い、同センサの有効性を実験的に評価した。

2.方法

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 本の同径ロッドから構成される周波数可変式土壌水分センサ(DIK-G300, 大起理化工業)を、内径 115 mm、高さ 130 mm の円筒容器中央部に鉛直に固定した(Fig.1)。このセンサでは、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'')に変換する校正法が採用されている。センサの影響領域は、周囲の金属ロッドの内側の約 5.0 cm³である。この領域が完全に浸るよう、蒸留水(DW)、濃度の異なる 6 種のエタノール(20, 30, 40, 60, 80, 99.5 %), 油, 空気等に加え、電気伝導度(EC)の異なる 10 種の NaCl 溶液(1.8~19.99 dS/m)のいずれかを円筒容器内に充填した。USB ポートを介してセンサをコンピューターに接続し、スペクトル計算用ソフトウェアを利用して、各流体における 10~514 MHz の ϵ' および ϵ'' を 1 MHz 間隔で計測した。85070E 誘電体プローブキット(Agilent Technologies)とベクトルネットワークアナライザ(VNA)(HP8714ES)の組合せ利用や、DIK-G300 のプロトタイプ(Type E)³⁾による結果とも比較した。

3. 結果と考察

測定された ϵ' のスペクトルは、媒質に占める水

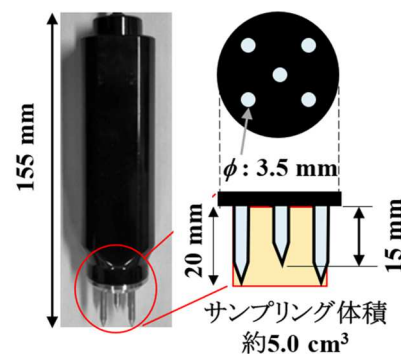


Fig.1 センサの外観

の濃度が高いほど大きくなる一般的特徴が認められた(Fig.2)。空気のスペクトルは、周波数によらず約 1、油は 2.0~3.6 であり、両媒質に周波数依存性は認められなかった(Fig.2)。99.5 %のエタノールの場合、 ϵ' が周波数とともに漸減し、誘電分散を示すエタノールの誘電特性が認められた。その周波数依存性は、エタノールの濃度が低下し、水の濃度比が高くなるほど弱くなり、蒸留水(DW)においてはほぼ平らなスペクトルとなった(Fig.2)。さらに、VNA や Type E による同一媒質の測定結果と比較した結果、DW および 99.5%エタノールのいずれにおいても、Type E のスペクトルに認められる周波数依存性が DIK-G300 のそれには認められず、VNA および真下ら⁴⁾の結果と概ね類似したことが確認された(Fig.3)。

一方、 ϵ'' のスペクトルも、一般的な変化を示した(Fig.4)。空気や油の ϵ'' スペクトルには、若干の周波数依存性が認められたが、 ϵ'' の値が小さいため、誤差の範囲の変動である。エタノール濃度が高いほど、そして周波数が高いほど大きかったのは、媒質固有の誘電特性を表したものと考えられる。

DIK-G300 による ϵ' に及ぼす EC の影響は軽微であった。水を供試材料とした場合、商用流通する TDR や静電容量式のセンサの適用限界は 5.0 dS/m 程度であるが、本研究では、実験上限とした 19.9 dS/m 以下の ϵ' の値を得た(Fig.5)。EC が ϵ' に及ぼす効果は高 EC ほど高いが、350 ~360 MHz において各スペクトルが収斂したことから、この周波数では EC の影響が無視できると考える。

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、各種流体の ϵ' および ϵ'' のスペクトルを計測した結果、プロトタイプ Type E よりも高い精度で、誘電率や EC の異なる流体のスペクトルを計測できることが明らかとなった。

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より高機能誘電率測定システムおよび奨学寄附金の提供を受け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

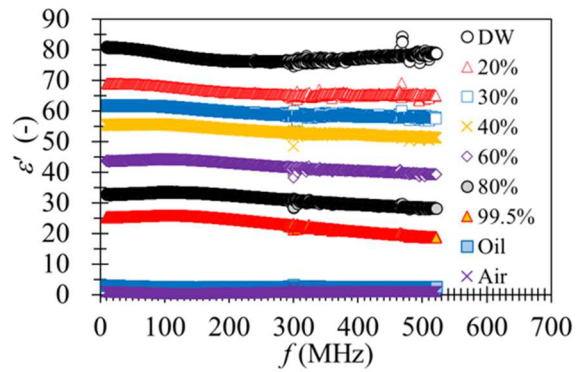


Fig.2 ϵ' のスペクトル

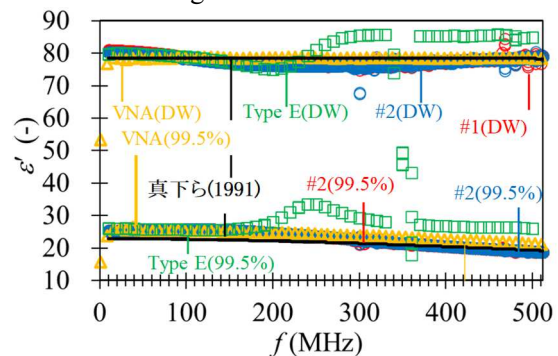


Fig.3 異なるセンサによる ϵ' のスペクトルの比較

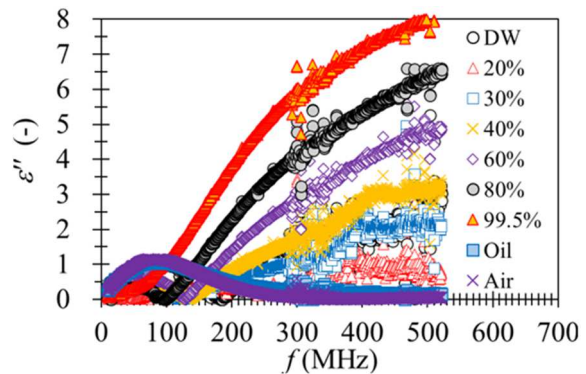


Fig.4 ϵ'' のスペクトル

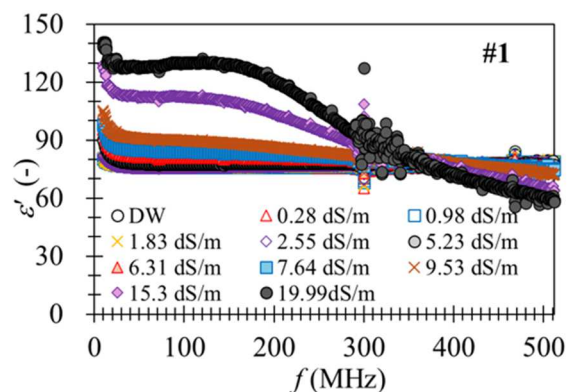


Fig.5 NaCl 溶液の ϵ' のスペクトル

Journal, 66(6), 2173-2180., 3) 升田ら(2023): 土壤物理学会大会講演要旨集, 42-43. 4) 真下ら(1991): American Institute of Physics, 6257-6260.