

1. はじめに

近年、土中水分量の簡便な計測法として誘電法が注目されている。誘電法は主にTDR法¹⁾の技術を背景に、FDR法²⁾やADR法³⁾など多くの研究開発がなされてきているが、これらの測定法では電極を特定長さだけ地盤に挿入する必要があるが、また、イオンを多く含む物質に関しては測定精度が低下すること⁴⁾など、その測定原理や性能にいくつかの問題がある。そこで今回、これらの課題を補う計測装置として、FDR-V法(Frequency Domain Reflectometry with Vector network analyzer)を開発した。ベクトルネットワークアナライザを用いた本計測システムは、被測定物質内の反射係数をSパラメータより直接求める接触式の測定方法で、測定周波数範囲が1～18GHzと非常に高周波で広範囲のため、水分量だけでなく汚染物質の含有量などより微細な地盤構造の測定が可能である。本報では、FDR-V計測装置のシステムや計測方法、各試料に対する水分量のキャリブレーションや不飽和砂における塩分濃度に対する校正結果等に関して報告する。

2. FDR-V計測システム

FDR-V計測システムは、基本的に図-1(a)のようにベクトルネットワークアナライザ、スイッチングユニット、測定プローブから構成されており、それぞれが50Ω SMA同軸伝送線により接続されている。ベクトルネットワークアナライザより出力された電磁波は、本体のA点から各チャンネルのポートを通して同軸伝送線により先端の同軸プローブに達して、プローブ先端のB点で反射して戻ってくる。その反射波から得られる反射係数と、あらかじめ測定された標準校正溶液の反射係数との比から被測定物の複素誘電率を算定する。なお、プローブの測定影響範囲は、図-1(b)のように、プローブ先端の1mm以内とごく近傍である。

複素誘電率 ϵ^* は、式(1)で示される電気容量性(実数部)と導電性(虚数部)を示す指標である。つまり、主に実数部では水分量を、虚数部では塩分や汚染物質の混入による影響を表している⁵⁾。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad \dots\dots\dots (1)$$

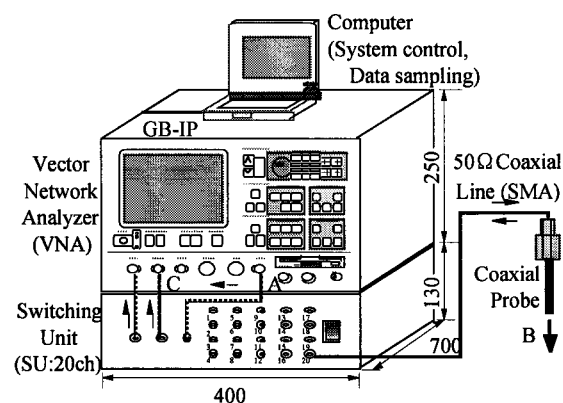
ここで、 ϵ' ：誘電率実数部、 ϵ'' ：誘電率虚数部である。測定データとしては図-2のように1～18GHzの周波数範囲で401ポイントの複素誘電率の実数部 ϵ' と虚数部 ϵ'' が得られる。したがって他の誘電法に比べて得られる情報が多いため、水分量だけでなく他の要素も測定が可能である。

3. 各試料に対する水分量のキャリブレーション

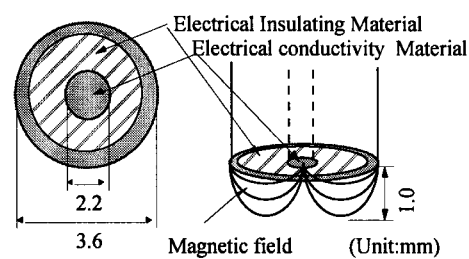
各試料を任意の含水量に調整し、内径50mm、高さ30mmのモールドに3層で均一に締固めて供試体を作成し、測定を行った。

キーワード：不飽和土、計測法、複素誘電率、体積含水率、汚染度

連絡先：〒700-8530 岡山市津島中3-1-1 TEL.086-251-8164 FAX.086-253-8257



(a) システム全体図



(b) センサー部

図-1 FDR-Vシステム概略図

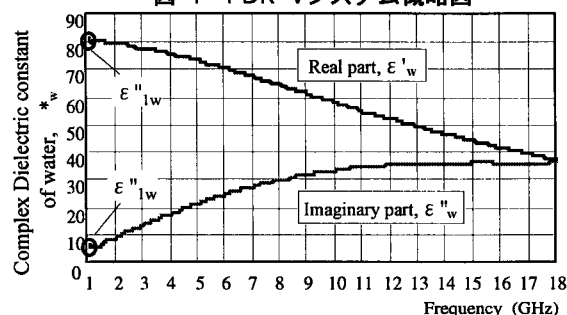


図-2 水の複素誘電率測定結果 (20℃)

試料は豊浦標準砂，マサ土，川砂，DLクレー，山形産ベントナイト，ベントナイト混合土（乾燥重量比：山形産ベントナイト：豊浦標準砂=15:85）の6種類を用い，それぞれ一定の温度，乾燥密度下で実施し

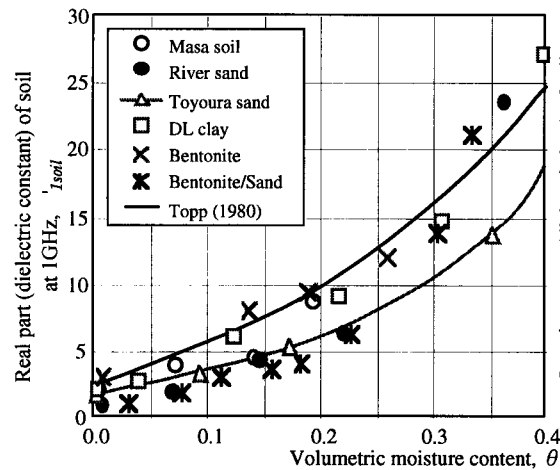


図-3 各試料に対する複素誘電率実数部の測定結果（FDR-Vシステム：1GHz，20℃）

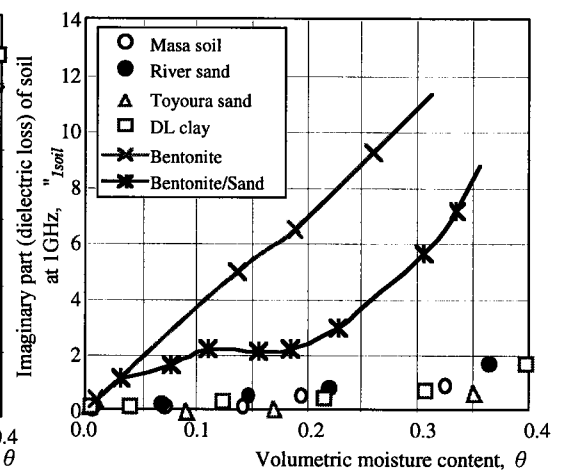


図-4 各試料に対する複素誘電率虚数部の測定結果（FDR-Vシステム：1GHz，20℃）

た。なお，標準校正溶液としてはアセトンを用いた。図-3に，キャリブレーションの結果を示す。結果は最も変化の大きかった1GHz誘電率実数部(ϵ'_{1})について整理した。この図から，どの試料に対しても水分量の増加に伴う誘電率値の上昇がみられており，ほぼ同一の曲線で校正が可能である。

4. 不飽和土に対する水分量と汚染物質の濃度の測定

図-4に，図-3と同一測定時における1GHzでの虚数部の結果を示す。この中でベントナイト，ベントナイト混合土が水分量の増加に伴って値が上昇している。つまり，溶出イオンによる濃度上昇の影響をとらえている。この性質を利用して不飽和土（豊浦標準砂）における塩分濃度の校正を行った結果を式(2)及び図-5に示す。これより，高濃度の測定が可能であることがわかる。

$$C = 6.42\theta - 0.16\epsilon''_{1\text{soil}} + 8.26\epsilon''_{1\text{soil}} \cdot \exp(-8.67\theta) - 2.03 \quad (R^2=0.90) \quad \dots\dots (2)$$

また，誘電損率の特性をまとめたものを図-6に示す。今回は1GHzのデータしか用いていないが，さらに高周波領域では地盤の骨格構造（間隙率）の変化による影響を確認している。

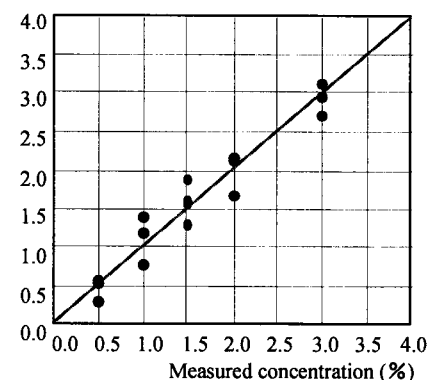


図-5 不飽和土の塩分濃度校正結果



図-6 誘電損率の周波数特性と地盤構造。

5. おわりに

今回，誘電法の新しい装置としてFDR-V法を開発し，システムや計測方法について述べた。また，各試料に対するキャリブレーションを行った結果，同一の校正曲線を用いた水分量の測定が可能であることがわかった。また，本システムで不飽和土に対して水分量と汚染物質の濃度が同時に測定できることを豊浦標準砂を用いた塩分濃度の校正結果により示した。今後の課題としては，さらに多様な試料に対してキャリブレーションを行い，本計測法の適用性を検討すること，また，様々な汚染物質に対する適用性や，地盤の間隙率の変化を測定するために，これらの影響を引き出すだけの高精度の測定を行うことが挙げられる。

【参考文献】

- 1) Topp, et al.: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, *Water Resour. Res.*, Vol.16, No.3, pp.574-582, 1980.
- 2) 冀他：FDR法による土壌誘電率測定と特定深さの土壌水分測定，*農業土木学会論文集*, No.182, pp.25-30, 1996.
- 3) Gaskin et al.: Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, *J. Agric. Eng. Res.*, No.63, pp.153-160, 1996.
- 4) 井上：塩分を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価，*水門・水資源学会誌*, Vol.11, No.6, pp.555-564, 1998.
- 5) Ulaby, et al.: *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, Volume III, From Theory to Applications, Artech House, pp.2017-2103, 1986.