

# マイクロ波信号領域における高水分粘土の誘電緩和

## Dielectric Relaxation of High-Moistened Clays in Microwave Frequency

宮本英揮\* 下町多佳志\*\* 筑紫二郎\* 安永円理子\*

Hideki Miyamoto Takashi Shimomachi Jiro Chikushi Eriko Yasunaga

### 1. はじめに

土中の体積含水率( $\theta$ )の測定法として、広帯域マイクロ波信号の反射特性を利用した時間領域反射法(TDR)が広く利用されている。しかし、粘質土中では、プローブに与えるマイクロ波信号が伝播中に著しく減衰することにより、TDR による水分計測が実施できない。表面を絶縁体で被覆したプローブを用いることで減衰の影響が緩和される場合もあるが<sup>1)</sup>、そうでない粘質土が多い。すなわち、粘質土に対する TDR の問題は、単に信号の減衰のみに起因する現象でないことを示す。本研究では、粘質土の水分計測に適した信号周波数についての知見を得るために、 $\theta$ を調整した粘土の誘電緩和スペクトルを計測し、 $\theta$ の変化に対するスペクトルの応答を検証した。

### 2. 実験方法

実験の供試材として、風乾のカオリナイトおよびベントナイト(クニゲル V1)を用いた。両者と蒸留水(DW)とを混合し、DW の混合比を変えることにより、 $\theta$ が異なる試料を作製した。25 に調整した各試料をペトリ皿に充填し、その表面に耐熱プローブ(85070D, Agilent Technologies)の先端平面部を密着させた(Fig.1)。そして、ネットワークアナライザー(HP8714ES, Agilent Technologies)および専用ソフトウェアを利用して、交流場における電気エネルギーの蓄電を表す複素誘電率の実数部( $\epsilon'$ )と、イオンの変位に伴う放電および水分子の回転運動に伴う摩擦による電気エネルギーの損失(吸収)を表す複素誘電率の虚数部( $\epsilon''$ )の周波数スペクトルを 0.001 – 3 GHz の範囲反復計測し、スペクトル分布の平均値を求めた。なお、メーカーが推奨する耐熱プローブの適用範囲は 0.2 – 3 GHz であるが、別途、実施した CaCl<sub>2</sub> 溶液に対する予備実験結果に基づき、0.1 GHz 以上のスペクトルを有効なデータとした。周波数スペクトルの計測後、各試料を炉乾燥して $\theta$ を決定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 カオリナイト

カオリナイトの $\epsilon'$ のスペクトルは、高 $\theta$ の試料ほど高い分布を示した(Fig.2(a))。また、各試料の $\epsilon'$ は周波数( $f$ )の増加とともに漸減したが、その低下量は DW の場合と類似して小さかった。このことは、本研究の計測帯域内では、カオリナイトの $\epsilon'$ に及ぼす周波数の影響が小さいことを示している。

カオリナイトの $\epsilon''$ は、 $\theta$ と周波数の両者に強く依存した(Fig.2(b))。土中水は、間隙中に自由水として、また土粒子表面に結合水として存在する。とりわけ、結合水は自由水よりも強く土粒子に拘束された状態にあるため、水分子の回転運動は電界の反転に対して速やかに追従できない。そのため、結合水と

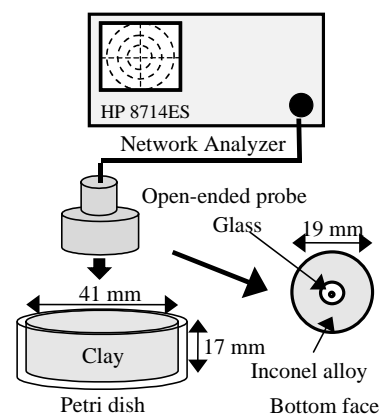


Fig. 1 実験の模式図.  
Schematic diagram of experiment.

\* 九州大学 生物環境調節センター Biotron Institute, Kyushu University

\*\* 長崎大学 環境科学部 Faculty of Environmental Studies, Nagasaki University

キーワード: 誘電緩和スペクトル, 複素誘電率, 周波数, 体積含水率

自由水の回転運動によるエネルギー損失が極大になる周波数は、それぞれ異なる<sup>2)</sup>。本研究は、両者による損失が極大となる緩和周波数の中間領域の計測であるため、 $\epsilon''$ が極大となる点を検出できない。しかし、各試料に共通して、低周波の $\epsilon'$ が大きかったことから、カオリナイトが低周波信号を大きく吸収し易い性質を持つことが分かる。また、低周波のスペクトルを比較すると、 $\theta$ による差は小さい。粘土 - 蒸留水の混合系では、 $\theta$ と連動して間隙水中のイオン濃度が変化するが、観察されたスペクトルの共通性から、これらの変化が低周波信号の吸収に与える影響は小さいと分かる。一方、1.0 GHz 以上の領域では、高 $\theta$ ほど $\epsilon''$ が大きく、各試料のスペクトルの差も顕著であった。一般に、 $\epsilon''$ に与えるイオンの変位の影響は、高周波ほど小さい。そのため、高周波における $\epsilon''$ の較差は、各試料の $\theta$ の違いを強く反映したものと考えられる。

### 3.2 ベントナイト

カオリナイトと同様、ベントナイトの $\epsilon'$ のスペクトルも高 $\theta$ の試料ほど大きかった(Fig.3(a))。ただし、低周波帯において各試料の $\epsilon'$ の差が小さいこと、また $\epsilon'$ が周波数の増加とともに急減することが、カオリナイトと大きく異なる。

一方、ベントナイトの $\epsilon''$ は、カオリナイトと類似して低周波ほど大きい(Fig.3(b))。しかし、カオリナイトよりも $\epsilon''$ の数値が膨大であり、低周波信号の吸収量は大きい。 $\theta$ によるスペクトル差が顕著であり、その差が 0.1 から 2.5~3.0 GHz 付近にかけて観察されることも、ベントナイトの特徴である。ベントナイトは、カオリナイトより比表面積と陽イオン交換容量が大きい。同一の $\theta$ であっても、間隙水のイオン濃度がカオリナイトよりも高く、 $\theta$ の変化に伴うイオン濃度の変化が大きかったことが、ベントナイトの $\epsilon''$ 値および $\theta$ 依存性に反映されたと考えられる。

### 3.3 $\epsilon'$ と $\theta$ の関係

$\epsilon'$ のスペクトル(Fig.2(a), Fig.3(a))から読み取った任意の周波数における各粘土の $\epsilon'$ は、 $\theta$ の増加とともに大きくなった。カオリナイトの $\epsilon'$ - $\theta$ 関係は周波数によらず類似した分布となり、TDR で得た結果<sup>1)</sup>と概ね一致している。一方、ベントナイトでは、高周波ほど $\theta$ に対する $\epsilon'$ の変化量が大きく、感度が高い。以上のことは、カオリナイトの $\theta$ は周波数によらず単一校正式で評価されるが、ベントナイトでは校正式が周波数依存性を示すことを示唆している。

引用文献: 1) 宮本ら(2007):農業農村工学会講演要旨集, 196-197., 2)石田(2003):土のコロイド現象, 129- 142.

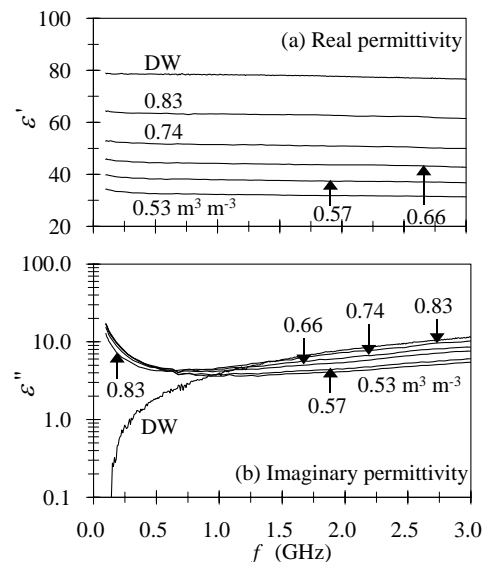


Fig. 2 カオリナイトの誘電緩和スペクトル. Dielectric relaxation spectra for kaolinite.

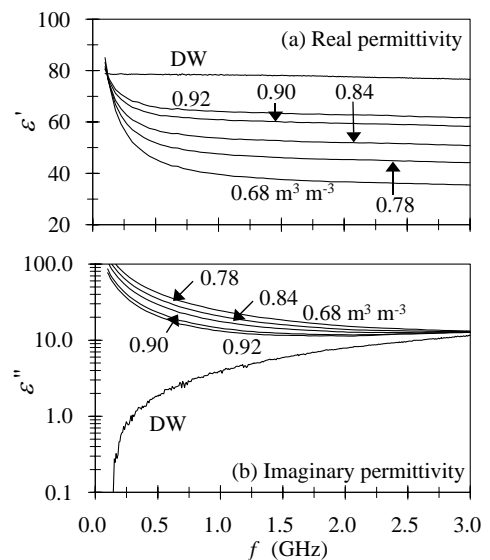


Fig. 3 ベントナイトの誘電緩和スペクトル. Dielectric relaxation spectra for bentonite.

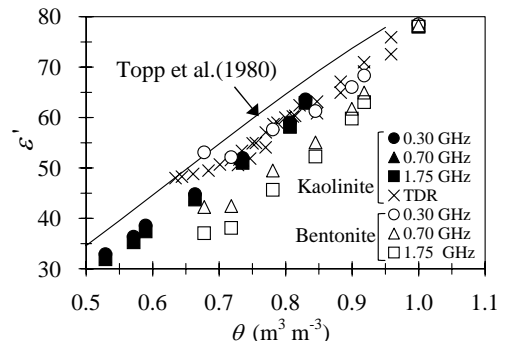


Fig. 4 ベントナイトの誘電緩和スペクトル. Dielectric relaxation spectra for bentonite.