

高水分粘土中のマイクロ波信号の伝播速度

Propagation Velocity of Microwave Signal in High-Moistened Clays

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

土壌水分のモニタリング法として、マイクロ波の伝播速度から誘電率を求め、それを体積含水率(θ)に変換する時間領域反射法(TDR)や時間領域透過法(TDT)が広く活用されている。信号の伝播速度(V)は、複素誘電率の実数部(ϵ')および虚数部(ϵ'')の関数として、次式で与えられる。

$$V = c / \sqrt{\epsilon' \frac{1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}{2}} \cong c / \sqrt{\epsilon'} \quad (1)$$

ここで、 c は光速 ($= 3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)、 δ は損失角、 $\tan \delta (= \epsilon''/\epsilon')$ は損失正接を示す。土壌水分計測に用いられるマイクロ波信号の周波数では、(1)式中の損失正接が非常に小さいと考え、 V は ϵ' のみの関数として扱う場合が多い。しかし、 ϵ'' が大きく、 ϵ' と ϵ'' の両者が強い周波数依存性を示す粘質土では、簡略化した(1)式に基づいて評価した V の妥当性が疑問視されている。本研究では、カオリナイトとベントナイトの誘電緩和スペクトルから $\tan \delta$ の周波数特性を評価し、マイクロ波信号の V に及ぼす $\tan \delta$ の影響と、 V - θ 関係の周波数依存性を調べた。

2. 実験方法

カオリナイトとベントナイト(クニゲル V1)を蒸留水と混合し、 θ 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均一に充填し、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、ネットワークアナライザー(HP8714ES, Agilent Technologies)で 0.1 – 3.0 GHz の範囲で各試料の ϵ' および ϵ'' の周波数スペクトルを計測した。各試料の ϵ' および ϵ'' の比から $\tan \delta$ 、そして得られた $\tan \delta$ を(1)式に代入して V を評価した後、 $\tan \delta$ および V と周波数との関係を調べた。周波数スペクトルの計測終了後、各試料を炉乾して θ を決定した。

3. 結果と考察

3.1 損失正接

蒸留水(DW)の $\tan \delta$ は、周波数(f)の増加とともに直線的に増加した(Fig.1)。DW の $\tan \delta$ は、0.12 GHz 以下ではほぼゼロで、3.0 GHz でも0.15と非常に小さいことが、従来の TDR や TDT において、(1)式中の $\tan \delta$ が無視して取り扱われる理由である。一方、カオリナイトの $\tan \delta$ は、周波数全域で高 θ の

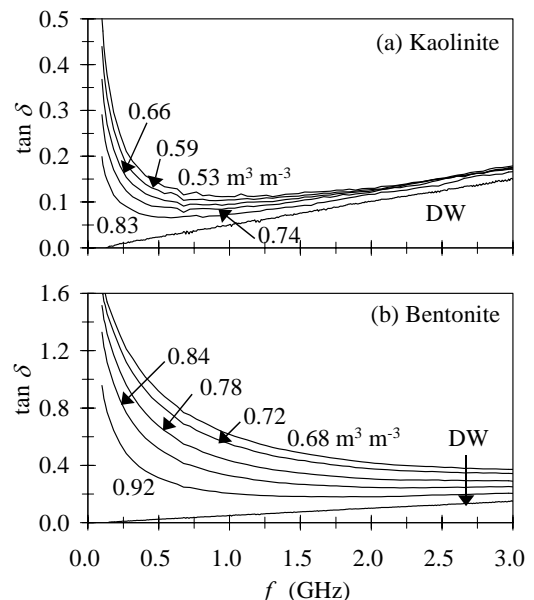


Fig. 1 試料の誘電正接($\tan \delta$).
Loss tangent ($\tan \delta$) for samples.

* 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: 損失正接, 伝播速度, 周波数, 体積含水率

試料ほど小さな値を示し、また低周波から高周波に向けて曲線的に急減した(Fig.1(a))。一方、ベントナイトにおいても類似した分布が観察されたが、低周波では $\tan \delta$ がカオリナイトの3倍程度の数値を示す場合もあり、全体的に大きい(Fig.1(b))。また、ベントナイトの $\tan \delta$ の分布は、カオリナイトの場合に比べ、 θ による差異が大きい。2つの粘土の結果から、粘土の $\tan \delta$ は、粘土の種類と周波数の両者に強く依存することが確認された。

3.2 伝播速度

ϵ' および $\tan \delta$ から算出したカオリナイトの V の分布は、高 θ の試料ほど下方に位置し、DWの分布に近づく傾向がみられた(Fig.2(a))。低 θ の試料では、 V が急変する領域が低周波帯に見られるものの、それを除けば、各試料とも周波数の増加とともに漸増する傾向がみられた。ただし、本研究の計測周波数内における各試料の V の増加量は、DWの場合と同様に小さい。

高 θ の試料ほど V の分布が下方に位置する傾向は、ベントナイトにも共通した(Fig.2(b))。ただし、低周波帯では θ による V の較差が小さいこと、また各試料の V が周波数の増加とともに急増することが、カオリナイトと異なる。これはベントナイト中を伝播する信号の速度に $\tan \delta$ が大きく影響されること、また高周波信号ほど高速で伝播することを意味する。従来の TDR や TDT では、広帯域信号を同位相で土壌に入射させる仕組みになっているが、粘土中を伝播する過程では、各周波数成分の位相差に起因する速度差が発生する。速度差の影響は伝播距離が長いほど、すなわち長いプローブを利用した場合ほど大きくなる。時間領域の信号計測では、Fig.2 に示す各周波数成分の速度差に基づく時間的な遅延が、信号解析に影響を及ぼすことが懸念される。そのため、TDR や TDT を粘土の水分計測に適用する場合には、広帯域信号の活用の是非を検討する必要がある。

3.3 伝播速度と体積含水率との関係

0.30, 0.70, 1.75 GHz におけるカオリナイトの $\theta - V$ 関係は、周波数によらず類似した分布となった(Fig.3)。これは本研究の周波数内であれば、 V から θ を同一校正式で決定できることを示している。一方、ベントナイトでは、0.30 GHz およびその周辺周波数において、 θ に対する V の変化量が小さく、低周波信号は θ の計測に適さないと判断される。しかし、周波数が高くなると θ に対する V の変化量が大きくなり、0.70 GHz 以上ではカオリナイトと類似した勾配を持つ $\theta - V$ 関係が得られた。よって、TDR や TDT でベントナイトの θ を計測する場合には、可能な限り高い周波数の信号を用いること、また利用する周波数に対する $\theta - V$ 関係の校正式を決定することが必要である。

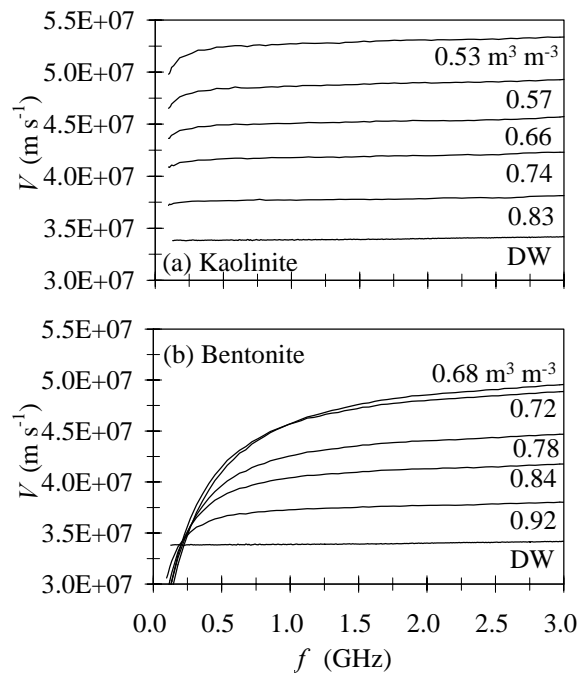


Fig. 2 周波数(f)と伝播速度(V)との関係。 Propagation velocity (V) for frequency (f).

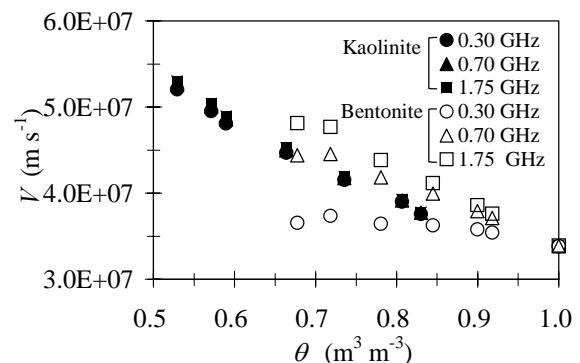


Fig. 3 伝播速度(V)と体積含水率(θ)との関係。 Propagation velocity (V) for water content (θ).