

機関番号：17201  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21780227  
 研究課題名（和文） マイクロ波を利用した粘土地盤環境の非破壊モニタリング法の開発  
 研究課題名（英文） Non-destructive microwave sensing of soil environments in heavy-clay ground  
 研究代表者  
 宮本 英揮 (MIYAMOTO HIDEKI)  
 佐賀大学・農学部・准教授  
 研究者番号：10423584

研究成果の概要（和文）： 重粘土の水分・溶質濃度の非破壊モニタリング技術を確立するために、コロイド化学的性質の異なる3種類の粘土を供試材料として、時間領域透過法(TDT)による水分・電気伝導度(EC)の計測実験を行った。粘土への TDT の適用には、時間・周波数領域における透過信号の測定および解析手法のさらなる検討が必要であるものの、TDT による水分・EC 同時計測のための基本計測システムおよび計測モデルを構築することに成功した。

研究成果の概要（英文）： To establish a non-destructive monitoring method of water content and electrical conductivity(EC) in heavy-clay soils, we performed the measurements of travel time and amplitude of impulse-signal transmitted through a few types of clays using time domain transmissiometry(TDT). Although further investigations on signal measurements and their analyses in time/frequency domain are required for the practical application of TDT to the clays, we successfully designed a TDT system for the measurements of water content and EC and empirical models of their estimations.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学，農業土木学・農村計画学

キーワード：マイクロ波，時間領域透過法(TDT)，粘土，水分量，電気伝導度

#### 1. 研究開始当初の背景

わが国の低平地には、難透水性の重粘土が堆積した農地が広がっている。このような地域では、農地の特性、すなわち土壌の理工学性、水利条件、作目などを考慮した農地管理を行う必要がある。しかし、粘土を多量に含む重粘土については、土壌診断の基準となる水分量・溶質濃度の原位置測定手法が確立されていないため、リアルタイムで農地情報を取得することがで

きず、土壌サンプリングを主体とした実地調査に頼らざるを得ない。農地管理の省力化・最適化を図るためには、重粘土にも通用する新型モニタリング技術を確立することが急務である。

#### 2. 研究の目的

重粘土の理工学性を規定する水分量、そして溶質濃度と相関関係を有する電気伝導度(EC)の同時モニタリング手法として、本研究では、マ

マイクロ波インパルス信号を用いた時間領域透過法(TDT)に着目し、同法の実用化のための基礎的知見の収集および計測手法の確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下に述べる3つの事項について検討を行った。

#### (1) マイクロ波に対する粘土の応答特性の評価

粘土のコロイド化学的性質を考慮して、本研究ではベントナイト、イライト、カオリナイトの三種を供試材料とした。各粘土に蒸留水を加えて体積含水率( $\theta$ )を調整し、 $\theta$ 条件の異なるスラリー状の試料を作製した。そして、誘電分光法(Fig.1)により、各粘土の複素誘電率の実数部( $\epsilon'$ )および虚数部( $\epsilon''$ )の周波数スペクトルを測定した後、両者に基づき、粘土中を伝播する電気信号の速度スペクトルを算出した。そして、そのスペクトルから、伝播速度の周波数特性を明らかにするとともに、それらに及ぼす粘土種・ $\theta$ の影響を調査した。

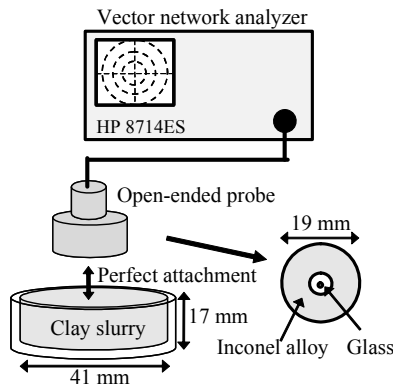


Fig.1 誘電緩和スペクトルの測定装置。

#### (2) TDTによる水分・EC同時計測手法の検討

単純な土粒子構造を有する砂を供試材料として、基本的なTDT計測システムの構築を試みた。すなわち、所定の溶液電気伝導度( $\sigma_w$ )を有するCaCl<sub>2</sub>溶液で飽和させた砂の下端に吸引圧を与えるのと同時に、砂中に埋設した小型TDTプローブ(Fig.2)の一端から広帯域のマイクロ波インパルス信号を与えて、他方に接続したサンプリングオシロスコープを用いてその透過信号を測定することにより、排水過程におけるTDT波形の経時変化を測定した(Fig.3)。そして、TDT波形の変化の特徴の把握、 $\theta \cdot \sigma_w$ の同時計測の可否の確認、波形解析アルゴリズムおよび計測モデルの構築などを試みた。

#### (3) 粘土の $\theta \cdot \sigma_w$ の計測

前項までの取り組みを通じて構築したTDT計測システム(Fig.3)を利用して、 $\theta$ の異なる粘土スラリーのTDT波形を計測し、各粘土の $\theta$ および $\sigma_w$ の同時計測の可否を検討した。

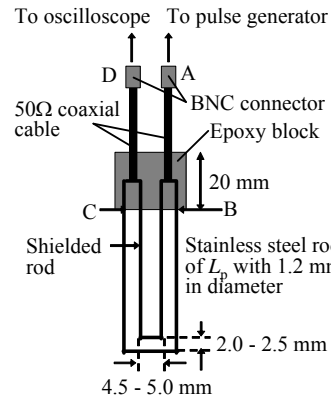


Fig.2 自作した小型TDTプローブ。

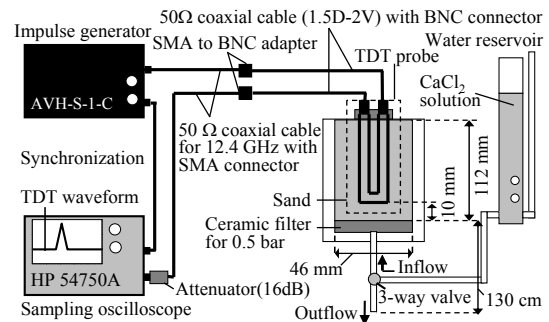


Fig.3 TDT計測システムの模式図。

### 4. 研究成果

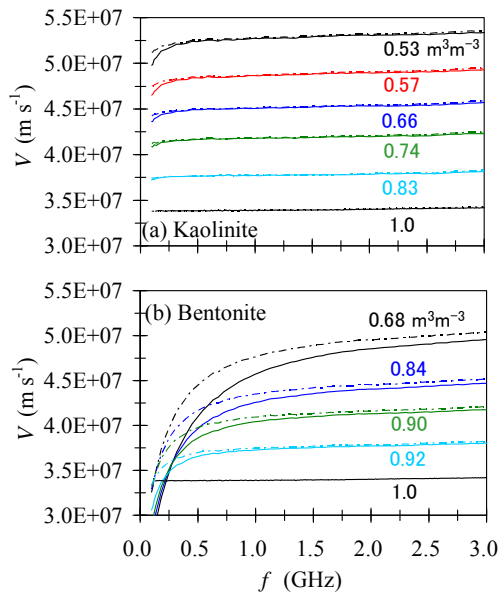
#### (1) 水分量の変化がマイクロ波信号の伝播速度( $V$ )に及ぼす影響

複素誘電率の実数部( $\epsilon'$ )および虚数部( $\epsilon''$ )から各粘土の $V$ の周波数スペクトルを算出した結果、全粘土において滑らかなスペクトルが得られた(Fig.4)。カオリナイトの $V$ は、高 $\theta$ の試料ほど小さい値を示し、スペクトルは下方に位置した(Fig.4(a)の実線)。低 $\theta$ の試料では、 $V$ が急変する周波数が低周波領域に認められるものの、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。

高 $\theta$ の試料ほどスペクトルが下方に位置する傾向は、ベントナイトにも共通した(Fig.4(b)の実線)。ただし、低周波領域では $\theta$ による $V$ の差が小さいこと、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点である。これは、ベントナイト中を伝播する信号の $V$ が、 $\epsilon'$ と $\epsilon''$ の比、すなわち損失正接( $\tan \delta$ )に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。類似した $V$ スペクトルの周波数依存性は、イライトにも認められた。

従来のTDRは、周波数による $V$ の差が小さいと考え、複素誘電率の虚数部が $V$ に影響を及ぼさないことを前提に、計測モデルが構築されたモニタリング手法である。しかし、本研究を通じて、ベントナイトに代表される粘土の水分計測においては、周波数によって $\theta$ に対する $V$ の変化の感度が大きく異なることが判明した。このことから、従来のTDRの計測周波数帯の信号をTDT

に適用しても、十分な計測感度が得られないと推察される。ゆえに、後述の TDT 計測システムには、従来の TDR に用いられる周波数よりも高い周波数成分を含むインパルス信号を与えることとした。



**Fig.4** 粘土中のマイクロ波信号の速度スペクトル。破線は、虚数部による修正を行わない場合のスペクトルを表す。

(2)水分量・EC の同時計測法としての TDT の有効性

①ピーク時間の水分量依存性

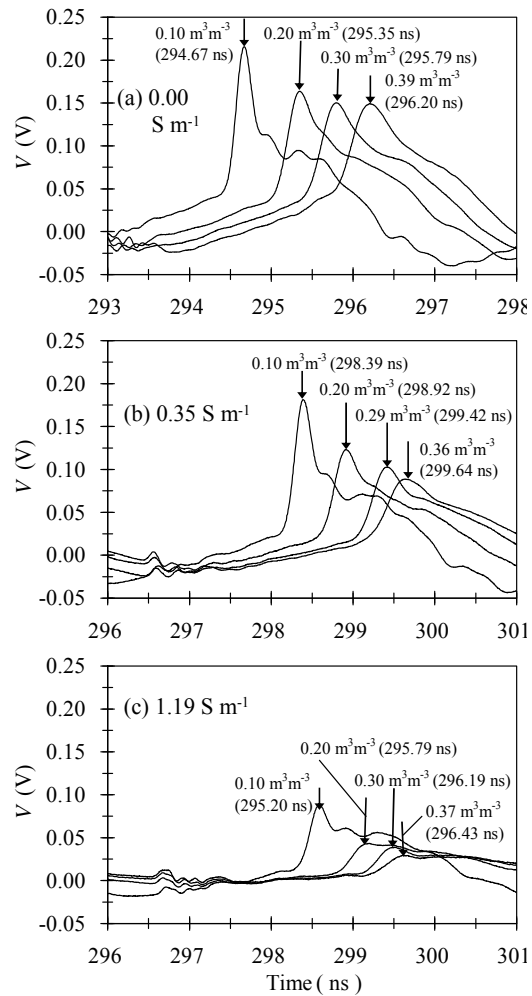
砂に与えたインパルス信号のピーク時間(下向き矢印)は、排水の進行とともに変化した(Fig.5)。間隙を蒸留水(0.0 S m<sup>-1</sup>)で満たした場合(Fig.5(a)),  $\theta$ の低下とともにピーク時間が小さくなった。類似した変化は、0.35および1.19 S m<sup>-1</sup>溶液で満たした場合(Fig.5(a)(b))をはじめ、全 $\sigma_w$ 条件に共通して認められた。さらに、 $\sigma_w$ が高いほど、また $\theta$ が高いほど、ピーク電圧( $V_p$ )は低下したことから、導電性と $V_p$ との関連性が示唆された。

②伝播時間と水分量との関係

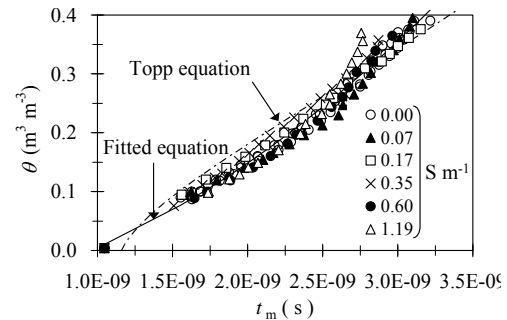
ピーク時間の計測値から伝播時間( $t_m$ )を求めた結果、高 $\theta$ ほど $t_m$ は大きくなる傾向が認められた。この結果をもとに、 $t_m$ と $\theta$ との関係を表す次の経験式(Fig.6の実線)を得た。

$$\theta = 3.21 \times 10^{16} t_m^2 + 4.61 \times 10^7 t_m - 7.23 \times 10^{-2} \quad (1)$$

各実験から得た $t_m$ 値を(1)式に代入して計算した $\theta$ 値と、炉乾法で得た $\theta$ 値とを比較した結果、ピーク時間を評価できなかった1.19 S m<sup>-1</sup>の $\theta \geq 0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ を除き、計算値は概ね1:1線上に分布した(図は省略)。計算値のRMSEは0.015 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>であったことから、極端な高導電性条件を除けば、小型TDTプローブを用いたTDTにより、単一の $t_m$ - $\theta$ 関係式に基づいて、良好な精度で $\theta$ を評価できると考える。



**Fig.5** 砂中で計測したTDT波形の一例



**Fig.6** 伝播時間( $t_m$ )と体積含水率( $\theta$ )との関係

③溶液電気伝導度( $\sigma_w$ )の推定

砂のTDT波形には先鋭な凸状のピークが存在し、ピーク時間は高 $\theta$ ほど大きくなるが、逆にピーク電圧( $V_p$ )は小さくなった(Fig.5)。類似した $V_p$ 変化は全 $\sigma_w$ 条件に共通し、 $V_p$ は $\theta$ の増加とともに曲線的に低下した(Fig.6)。 $\sigma_w$  -  $V_p$ 関係を3次多項式で近似し、同一 $\theta$ における $\sigma_w$  -  $V_p$ 関係を調べた結果、 $V_p$ は $\sigma_w$ に対して負の応答を示すことが判明した。

TDTによる $\sigma_w$ の計測方法を確立するために、一連の実験結果をもとに、 $V_p$ を $\theta$ と $\sigma_w$ 関数として

定式化することを試みた結果、次の経験式を得た。

$$\sigma_w = \frac{-6.82\theta^3 + 6.27\theta^2 - 1.97\theta + 0.361 - V_p}{1.85\theta^3 - 0.713\theta^2 - 0.0766\theta + 0.126} \quad (3)$$

TDT では、ピーク時間を(1)式に代入することで、別途、 $\theta$ を決定することができる。よって、 $V_p$ 値と(1)式から得た $\theta$ とを(3)式に代入すれば、 $\sigma_w$ をRMSE = 0.16 S m<sup>-1</sup>の精度で決定可能であることが判明した(Fig.7)。ただし、高 $\sigma_w$ 領域に比べ、低 $\sigma_w$ 領域における測定誤差が大きいこと、また(3)式が本実験系固有の経験式であり、他の計測器を用いた場合に同一式を適用できないことから、 $\sigma_w$ の計測精度の向上に加え、他のシステムにも適用し得る、汎用性の高い $\theta$ と $\sigma_w$ の同時計測モデルを確立することが必要である。

### (3)重粘土に対する TDT の有効性

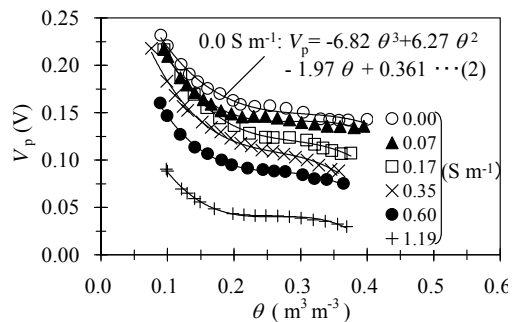


Fig.6 体積含水率( $\theta$ )とピーク電圧( $V_p$ )の関係

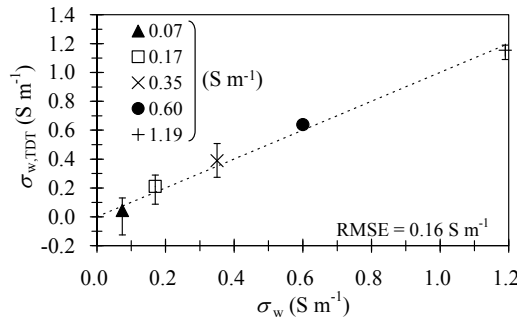


Fig.7 TDT による溶液電気伝導度( $\sigma_w$ )の計測精度

(1)および(2)の取り組みで構築した TDT システムを利用して、3 種類の粘土の供試材料として TDT 波形の計測実験を実施した。その結果、粘土スラリー特有の高い導電性が原因で、TDT プローブに与えた電気信号が減衰し、オシロスコープで測定することができないことが明らかとなった。

こうした技術的課題を解決するために、信号減衰予防措置を施した新たな TDT プローブの開発に加え、時間・周波数領域における信号解析を新たに導入するなど、重粘土に適用し得る TDT の早期実用化を目指した研究を継続中である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- 1) 宮本英揮, 筑紫二郎, 間瀬 淳, 伊藤直樹, インパルス型時間領域透過法による土壌水分の計測, 土壌物理学会, 川崎市, 2009. 10. 24.
- 2) 宮本英揮, 伊藤直樹, 間瀬淳, 筑紫二郎, 伊藤祐二, 時間領域透過法による土壌水分・塩分の同時計測, 平成22年度農業農村工学会大会講演会, 神戸市, 2010. 8. 31.

[図書] (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

宮本 英揮 (MIYAMOTO HIDEKI)

佐賀大学・農学部・准教授

研究者番号:10423584

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし