

膨張・収縮を伴う低平地水田土壌中の塩分動態調査手法の開発

宮本 英揮¹, 上村 将彰², Ty P. A. Ferré³

¹佐賀大学農学部, ²佐賀大学大学院農学研究科, ³University of Arizona

概要 時間領域透過法(TDT)による重粘土の含水比(w)、塩分濃度、土壌間隙構造のモニタリング手法を確立するために、誘電特性の異なる流体(エタノール, NaCl 溶液)と粘土サスペンションを供試材料として、SDI-12 型 TDT センサーおよび自作インターフェイスを利用して時間領域波形(TDT 波形)を取得した。そして、TDT 波形の解析手法を考案し、それに基づく見かけの誘電率(ϵ_{TDT})、電気伝導度(σ_{TDT})、間隙比(e)の測定の可否を検討した。

TDT 波形は急峻なステップ状を示し、その形状は媒質の ϵ_{TDT} および σ_{TDT} によって大きく変化した。流体の場合、電気伝導度が 5.0 dS m^{-1} 以上となると、信号減衰に伴う TDT 波形の平滑化が原因で、 ϵ_{TDT} と σ_{TDT} とを決定できなかったが、 5.0 dS m^{-1} 以下では、従来の時間領域反射法(TDR)と同程度の感度で決定可能であった。一方、カオリナイトサスペンションでは、 ϵ_{TDT} または σ_{TDT} と w の間には相関性が認められ、 w - ϵ_{TDT} および w - σ_{TDT} の関係を表す経験的關係を見出した(Fig. 1, 2)。本研究の実験条件は少なく、 e の測定方法に対する更なる検討が必要であるものの、TDT は重粘土の w 、 σ_{TDT} 、 e の三者の同時モニタリングツールとして、非常に有望であると考えられた。

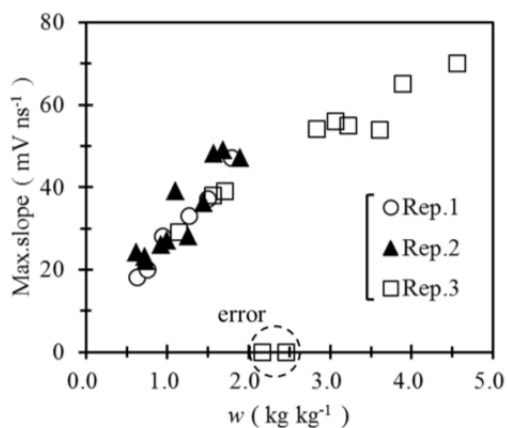


Fig. 1. w と最大勾配点の勾配値の関係

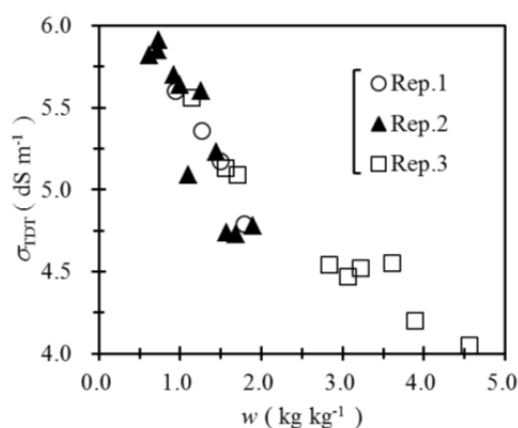


Fig. 2. w と σ_{TDT} の関係

1. はじめに

我が国の低平地には、難透水性の微細土粒子層、いわゆる重粘土層が厚く堆積した干拓農地が広がっている。海水中で堆積した微細土粒子を起源とする干拓農地は、海面下に位置するという立地条件の特殊性から、高潮、津波、塩水楔による地下水の塩水化などによる潜在的塩害リスクが高い。ゆえに、塩害リスクの管理や塩害農地の効果的な除塩法を確立することは、我が国をはじめ、モン

スーンアジアにおいて持続可能な低平地農業を展開するうえで大きな課題である。

重粘土中の塩分移動は、乾湿によって膨張・収縮を繰り返す土壌内部を、イオン交換を繰り返しながら水分とともに移動する極めて複雑なプロセスである。膨張・収縮に伴う土壌骨格構造の変化は、水分・塩分移動を支配する土の工学的性質をも変化させる。すなわち、塩分移動—水分移動—土壌間隙構造の三者は、互いに密接な相互

依存関係にあることから、重粘土中の塩分動態を明らかにするためには、三者を把握することが必要となる。

重粘土の状態をリアルタイムで把握するための直接的な手段が、モニタリングである。近年、GHz 帯のマイクロ波信号を利用したリモートセンシング、地中レーダー、時間領域反射法 (TDR) といった土壌モニタリング技術が普及しており、特に水分・塩分のモニタリングには、マイクロ波の反射特性を利用した時間領域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) が多用されている¹⁾³⁾。しかし、粘土-水混合系は特異な誘電特性を示すため⁴⁾、重粘土においては、TDR を含めた既存のほぼ全てのモニタリング技術が通用せず、現在もなお、水分・塩分の変動をリアルタイムで把握する術がない。観測技術開発の遅延は、低平地における塩分動態研究の進展を阻害する一因になっているため、観測技術の確立は急務である。

本研究では、近年、国内外で脚光を浴びる、マイクロ波信号の透過特性に基づく新型土壌モニタリング技術、すなわち、時間領域透過法 (Time Domain Transmissiometry, TDT)⁵⁾⁶⁾に着目し、同法による①重粘土中の水分・塩分の計測と、②土壌構造の指標値としての間隙比の計測の可否について、段階的に検討を行った。すなわち、第1に、均質かつセンサーとの完全接触が期待できる流体の TDT 波形を取得し、波形解析手法を決定するとともに、塩分濃度の指標である電気伝導度、そして水分量の指標である見かけの誘電率の測定手法を構築した。第2に、主要粘土鉱物の一つであるカオリナイトと水とを混合したサスペンションを供試材料として、水分量、電気伝導度、間隙比の同時計測に対する TDT の有効性を検討した。

2. 実験方法

2.1 流体の誘電特性測定実験

空気、蒸留水、濃度の異なるエタノール (20%, 40%, 60%, 80%, 99.5%) をプラスチック製円筒容器内に満たし、その中央に SDI-12 型 TDT センサー (Acclima 社) を鉛直方向に固定した。自作インターフェイスを介して、各流体の TDT 波形をコンピュータ上に再現したオシロスコープ画面 (時間分解能は 5 ps) に取り込んだ (Fig. 1 (a))。また、センサーを CR800 データロガー (Campbell Scientific 社) に接続し直した後、データロガーを介してセンサーに SDI-12 コマンドを送信し、各流体の見かけの誘電率 (ϵ_{TDT})、電気伝導度 (σ_{TDT})、TDT 波形の振幅 (Amplitude)、波形最大勾配点の勾配値 (Maximum slope) の計 4 項目を 10 分間隔で 20 回測定した (Fig. 1 (b))。

また、溶液電気伝導度 (σ_w) の異なる 5 種類の NaCl 溶液 (0.5, 1.2, 2.1, 3.0, 10.2 dS m⁻¹) をそれぞれ円筒容器内に注ぎ、各溶液中に設置した TDT センサーをインターフェイスに接続し、TDT 波形を取得した (Fig. 1 (a))。さらに、蒸留水に NaCl を加えて σ_w を段階的に増加させながら、データロガーを用いて先述の計 4 項目を各段階において測定することより、広範な電気伝導度領域におけるセンサー特性を調べた (Fig. 1 (b))。

2.2 粘土サスペンションの誘電特性測定実験

風乾のカオリナイトと蒸留水との混合比を変えることにより、含水比 (w) の異なるサスペンションを作製した。 $w \leq 1.1$ kg kg⁻¹ のサスペンションをアクリル板上で直方体状に整形し、その中央に TDT センサーを水平に埋設した (Fig. 2 (a))。 $w > 1.1$ kg kg⁻¹ のサスペンションは、流動性が高く直

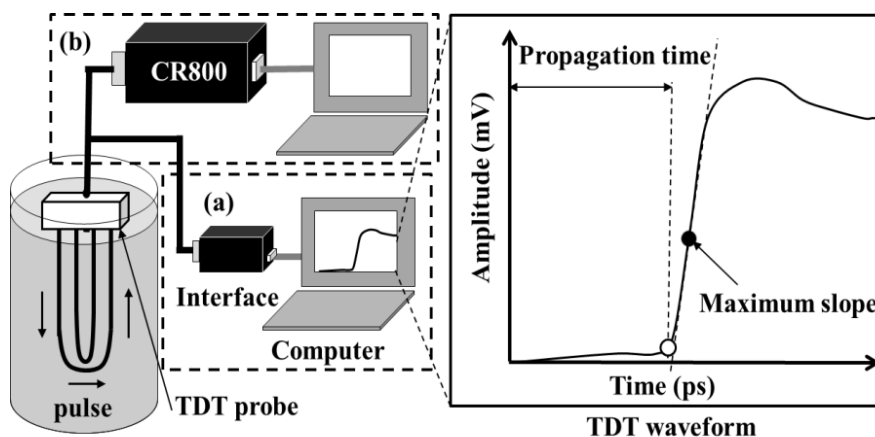


Fig. 1. 流体の (a) TDT 波形および (b) 多項目測定の模式図

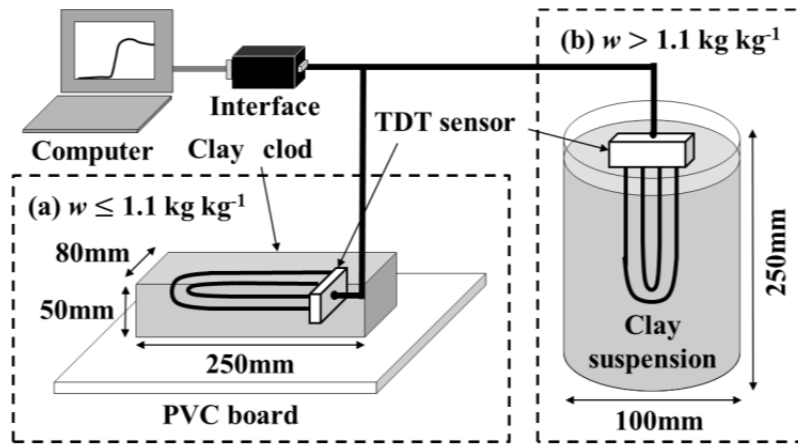


Fig. 2. カオリナイトサスペンションの誘電特性測定の様式図

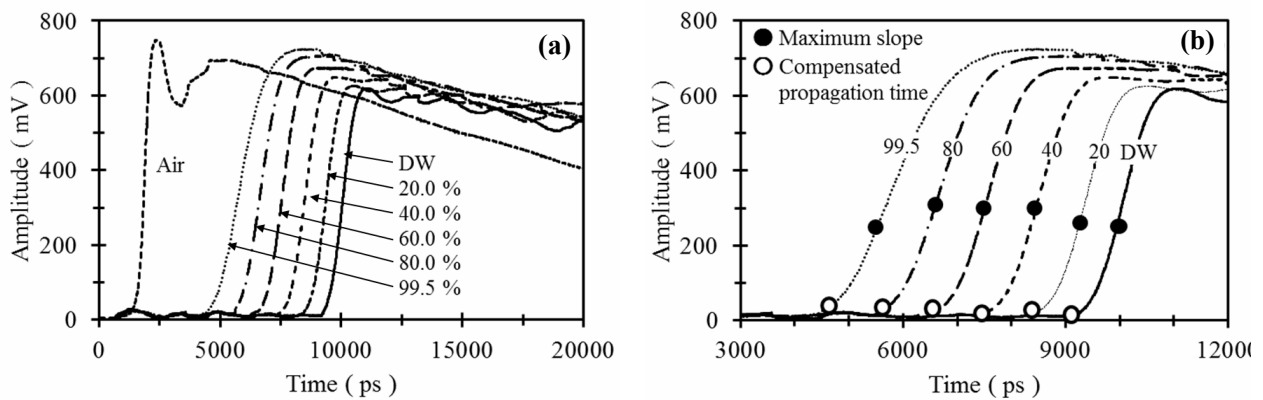


Fig. 3. エタノールの (a) TDT 波形およびその (b) 拡大図

方体状に整形することが難しかったため、アクリル製円筒容器に充填した後、その水平断面中央に TDT センサーを鉛直方向に固定した (Fig. 2 (b))。そして、自作インターフェイスを介して TDT 波形を取得するとともに、 ϵ_{TDT} 、 σ_{TDT} 、振幅、波形最大勾配点の勾配値の計 4 項目を測定した。測定終了後、サスペンションの一部を採取して炉乾 (105°C) して w を求めた後、 w と測定した各項目との関連性を調べた。

3. 結果と考察

3.1 流体に対する TDT の有効性

各流体の TDT 波形は、急峻な立ち上がり、ピーク点に続く右肩下がりの形状を示した (Fig. 3 (a) (b))。伝播時間を決定する立ち上がり点 (Fig. 3 (b) の白丸) の時間は、エタノール濃度の増加とともに小さくなった (Fig. 4)。エタノール濃度の低下とともに、波形最大勾配点 (Fig. 3 (b) の黒丸) の傾きは漸減したが (Fig. 4)、エタノールと蒸留水との混

合物である各媒質の電気伝導度差は小さいため、同点における各媒質間の振幅の差も小さかった。

CR800 データロガーを用いて反復測定した各媒質の ϵ_{TDT} は一定で推移し、その数値はエタノールの濃度の増加に伴い減少した (Fig. 5)。また、各媒質の ϵ_{TDT} と、ケーブルテスターを利用して測定した TDR による測定値 (ϵ_{TDR}) とを比較したところ、 ϵ_{TDT} は概ね 1:1 線上に分布したことから (Fig. 6)、SDI-12 型 TDT センサーにおいても、TDR と同程度の感度で ϵ_{TDR} を決定できると考える。

一方、NaCl 溶液の TDT 波形は、ピーク電圧を伴った急峻な立ち上がり、それに続く右肩下がりの傾斜または横ばいの形状を示した (Fig. 7)。伝播時間を決定する波形の立ち上がり点 (Fig. 7 の白丸) は、 σ_w の増加によらず、ほぼ一定であった。波形は σ_w の増加に伴って平滑化し、10.2 dS m⁻¹ ではほぼ平坦な波形となった。

立ち上がりの最大勾配点 (Fig. 7 の黒丸) の勾配値は、電気伝導度が高い媒質ほど高周波成分の吸収量が大き

くなるため、高 σ_w ほど低下した (Fig. 8)。最大勾配点の振幅も、信号強度の減衰により低下した。 σ_w が 3.0 dS m^{-1} から 10.2 dS m^{-1} に増加すると波形の勾配がほぼゼロになったように (Fig. 7)、 σ_w が 5.0 dS m^{-1} を超えると勾配値もゼロ、すなわち、立ち上がり点の位置が不明確になったことが原因で (Fig. 8)、 σ_w が 5.0 dS m^{-1} 以上の条件では ε_{TDT} を決定

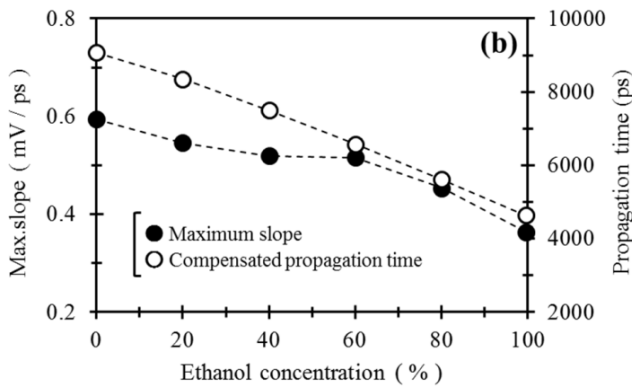


Fig. 4. エタノール濃度と波形勾配・伝播時間の関係

することができなかった (Fig. 9)。 σ_w が 5.0 dS m^{-1} 以下の条件では、 ε_{TDT} は概ね 80 であり、EC 依存性も認められなかった (Fig. 9)。一方、 σ_w が 5.0 dS m^{-1} 以下の条件では、 σ_{TDT} は概ね 1:1 線上に分布したこと、また 3 組のセンサーの 2 乗平均平方根誤差 (RMSE) は 0.63、0.59、0.43 であったことから、適用条件を 5.0 dS m^{-1} 以下に限定すれば、

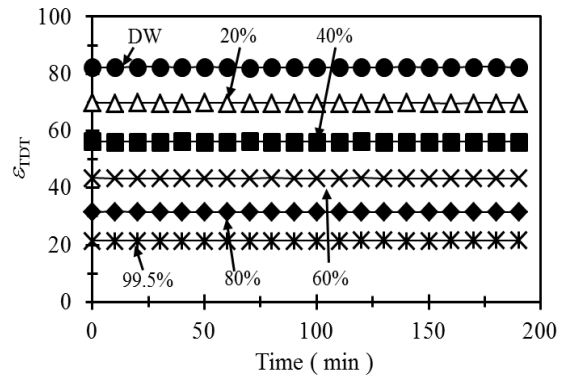


Fig. 5. ε_{TDT} の経時変化

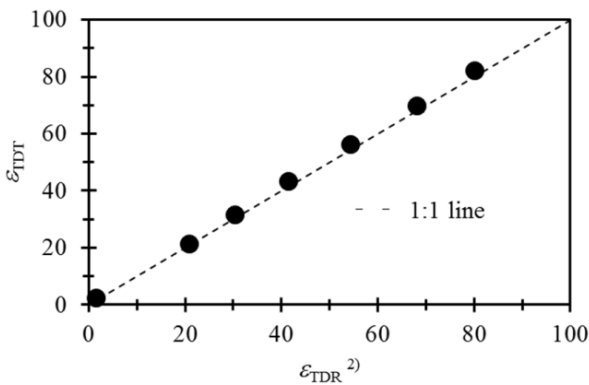


Fig. 6. ε_{TDT} と ε_{TDR} の関係

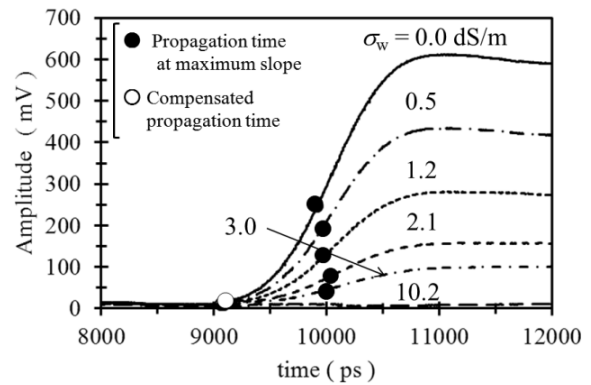


Fig. 7. TDT 波形の拡大図

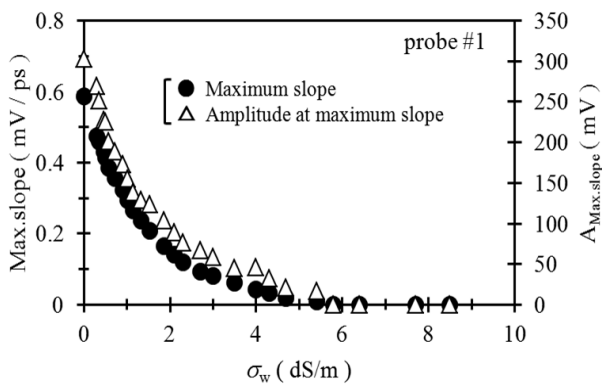


Fig. 8. 最大勾配点の勾配値およびその振幅と σ_w との関係

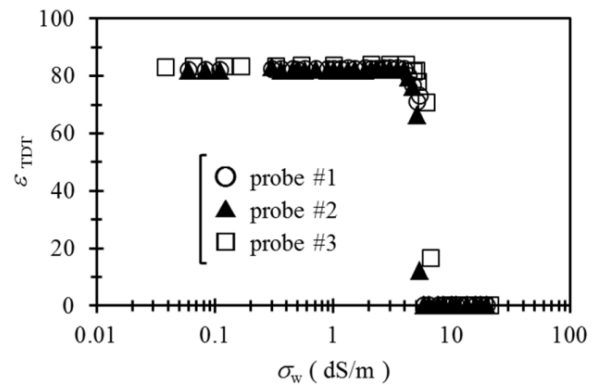


Fig. 9. ε_{TDT} と σ_w の関係

TDT センサーを用いて ε_{TDT} と σ_{TDT} とを同時に決定することが可能であると考え (Fig. 10)。

3.2 カオリナイトに対する TDT の有効性

各サスペンションの TDT 波形は、複数の凹凸を伴った形状を示した (Fig. 11 (a))。 w の増加とともに、波形の立ち上がりが鋭さを増し、また信号の伝播時間は増加した (Fig. 11 (b))。伝播時間から決定される ε_{TDT} は、 w の増加に伴って曲線的に増加した (Fig. 12)。 $0.47 \leq w \leq 1.78$ では、信号減衰防止のための絶縁被膜塗装を感知部に施した特殊 TDR センサーによる測定結果⁸⁾ と本研究の ε_{TDT} が部分的に一致したことは (Fig. 12)、TDT が TDR と概ね同程度の計測感度を有するとした前節の考察を支持するものである。ただし、TDR と違って感知部の特殊加工を必要としないうえに、広範な水分条件において w を決定できる点は、TDT の長所であると考え。

各試料の波形最大勾配点 (Fig. 11 (b) の黒丸) における振幅は、類似した w 条件であってもばらつきが大きく、 w と振幅との間には明確な相関性は認められなかった (Fig.

13)。一方、勾配値は w の増加に伴って曲線的に大きくなり、ばらつきは小さかった (Fig. 14)。勾配値から算出される σ_{TDT} は、 w の増大、すなわちサスペンションに占める DW の体積比が大きくなるほど低下した (Fig. 15)。このような、 w に対する σ_{TDT} の応答特性より、カオリナイトサスペンションのような高導電性粘土においても、電気伝導度測定に TDT が有効であると考え。

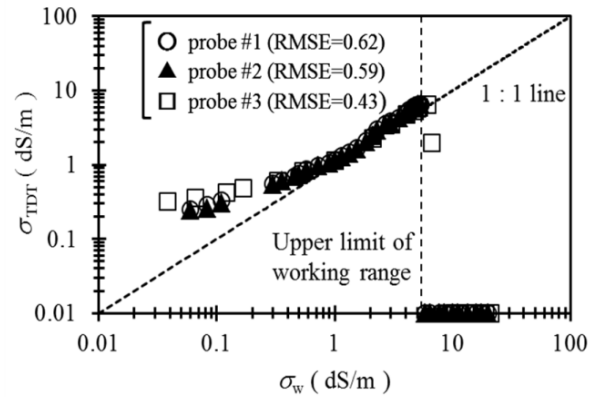


Fig. 10. σ_{TDT} と σ_w の関係

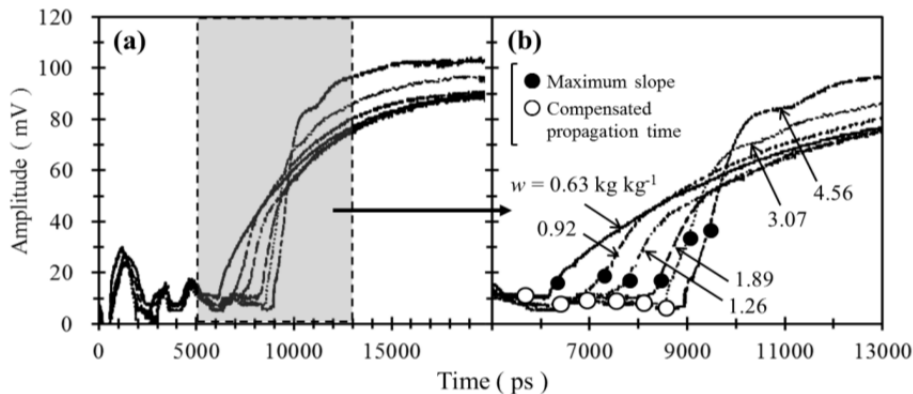


Fig. 11. w の異なるカオリナイトの (a) TDT 波形と (b) その拡大図

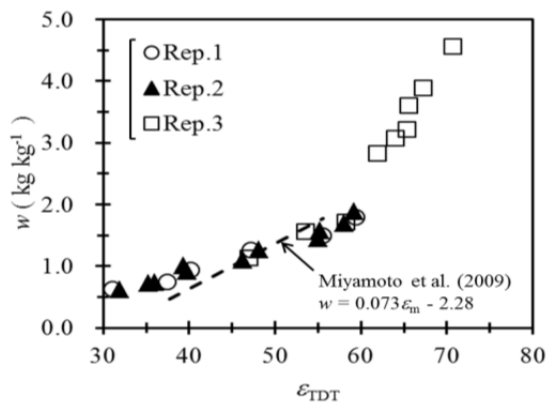


Fig. 12. w と ε_{TDT} の関係

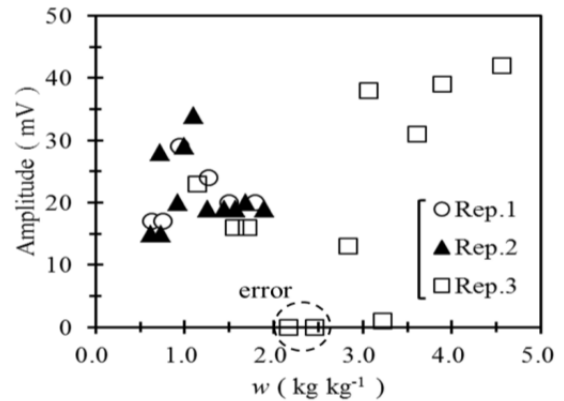


Fig. 13. w と最大勾配点の振幅の関係

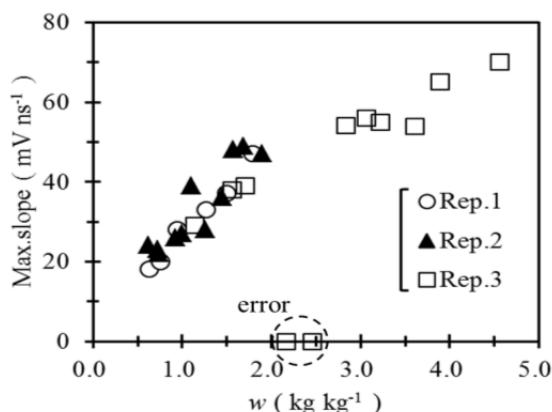


Fig. 14. w と最大勾配点の勾配値の関係

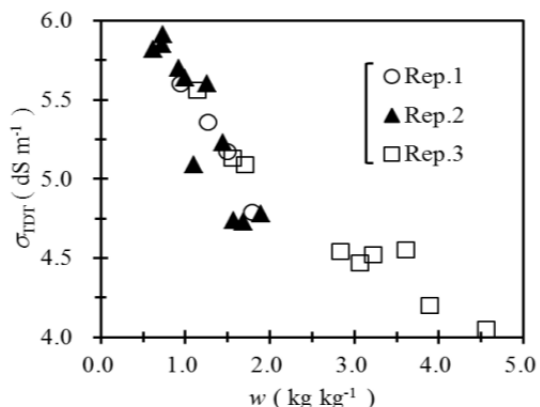


Fig. 15. w と σ_{TDT} の関係

4. おわりに

重粘土の含水比(w)、電気伝導度(σ_{TDT})、間隙比(e)の同時計測手法を確立するために、種々の流体および蒸留水(DW)と混合したカオリナイトサスペンションを供試材料として、SDI-12型TDTセンサーによる時間領域波形(TDT波形)の取得ならびにその解析手法を検討するとともに、同センサーによる三者の同時測定可否を調べた。

TDT波形の形状は、測定対象媒質の見かけの誘電率および電気伝導度によって、大きく変化した(Fig. 3, 7, 11)。流体の場合、電気伝導度が 5.0 dS m^{-1} 以上となると、信号減衰に伴うTDT波形の平滑化が原因で、 ϵ_{TDT} と σ_{TDT} とを決定することができなかったが、 5.0 dS m^{-1} 以下では、従来のTDRと同程度の感度で両者を決定することができた(Fig. 6, 10)。一方、カオリナイトサスペンションにおいては、 w と ϵ_{TDT} 、そして w と σ_{TDT} との間に、それぞれ一意的な経験的關係が成立することが判明し、粘土の w および σ_{TDT} の測定法としてTDTが有望であることが示唆された。

ただし、本研究に用いた粘土は、1:1型粘土鉱物の一つであるカオリナイトのみであり、またそれと混合した溶液も蒸留水であることから、測定条件は少ない。粘土-水混合系は、粘土鉱物の種類によって異なる誘電特性を示すため⁴⁾、自然界に存在する多種多様な粘土を供試材料として、広範なNaCl濃度条件下において更なる検討を行い、本研究を通じて見出した経験的關係(Fig. 12, 14, 15)の妥当性を評価することが必要であろう。また、現在も解析中である間隙比測定についても、更なる検討を要する。

以上、本研究は、TDTを利用した重粘土の w 、 σ_{TDT} 、間

隙比の同時計測手法の確立を目指した、いわばパイロット的研究であり今後のさらなる検討が待たれるものの、本研究を通じて、従来法が通用しなかった重粘土のモニタリングの実現への方途を見出した意義は大きいと考える。潮受け堤防の開門に伴う諫早湾干拓農地への塩水侵入問題への対応や、東日本大震災による津波浸水農地の除塩が急がれることから、上述の課題を速やかに解決し、強力な塩分動態調査ツールの確立と普及を目指す。

謝辞

本研究は、ソルトサイエンス研究財団の研究助成(助成番号1225)を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Jones, S.B., Wraith, J.M. and Or, D., Time domain reflectometry measurement principles and applications, Hydrological Processes, 16: 141-153, 2002.
- 2) Noborio, K., Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry, Computers and Electronics in Agriculture, 31: 213-237, 2001.
- 3) Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D. and Friedman, S.P., A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry, Vadose Zone Journal, 2: 444-475, 2003.
- 4) 宮本英揮, 下町多佳志, 筑紫二郎, 安永円理子, マイクロ波信号領域における粘土の誘電特性, 土壤の物

- 理性, 110: 13-23, 2008.
- 5) 宮本英揮, 伊藤直樹, 安永円理子, 高市信也, 間瀬淳, 筑紫二郎, 広帯域インパルス信号を用いた時間領域透過法(TDT)による誘電特性の計測, 土壌の物理性, 110: 3-12, 2008. 11.
- 6) 宮本英揮, 時間領域透過法, 水土の知, 24(3), 36, 2011.
- 7) 伊藤祐二, 筑紫二郎, 宮本英揮, TDRによる表層土壌水分計の開発とその有効性の評価, 土壌の物理性, 111: 35-41, 2009.
- 8) Miyamoto H., Chikushi J., and Kanayama M., Coupled measurements of water content and electrical conductivity in dielectrically lossy clay slurry using a coated TDR probe, Soils and Foundations, 49(2): 175-180. 2009.

Development of a Monitoring Method of Salinity Level in Lowland Swelling Heavy-Clays

Hideki Miyamoto¹, Masaaki Uemura², Ty P. A. Ferré³

¹ Saga University, ² Graduate School of Agriculture, Saga University, ³ University of Arizona

Summary

Time domain transmissiometry (TDT), a method of measuring transmitted broadband signal in microwave frequency, has been drawing a lot of attention more than ever as an alternative method to monitor water content (w), salinity level, and void ratio (e) in heavy-clays.

To establish their coupled monitoring method by applying TDT, we measured TDT waveforms of step-pulse transmitted through fluid media, such as ethanol-water mixtures and NaCl solutions with different electrical conductivities, using digital TDT sensors with serial/digital interface at 1200 baud (SDI-12), and verified the response of travel time and amplitude of the step-pulse to apparent permittivity (ε_{TDT}) and electrical conductivity (σ_{TDT}) of the media. Although the determination of ε_{TDT} and σ_{TDT} of an extremely high-conductive media (≥ 5.0 dS m⁻¹) was not completed due to the inadmissible loss of the transmitted step-pulse, we successfully determined both properties by TDT in moderate-conductive media (≤ 5.0 dS m⁻¹).

The pre-established approach for the fluid media was applied to the measurement of ε_{TDT} and σ_{TDT} of kaolinite-water mixtures with different w . The ε_{TDT} and σ_{TDT} of the mixtures were quite sensitive to the changes in w and empirical expressions of ε_{TDT} vs. w and σ_{TDT} vs. w were demonstrated. Although further investigation on the estimation of e for various natural heavy-clays are required, we believe that the TDT would be a more convenient method than time domain reflectometry (TDR) to simultaneously monitor w , salinity level, and e in heavy-clays.