

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23780251

研究課題名(和文) 時間領域透過法(TDT)による土壌水分・EC計測手法の検討

研究課題名(英文) Time domain transmissiometry (TDT) for measuring soil moisture and electrical conductivity

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：時間領域透過法(TDT)による土中の体積含水率およびバルク電気伝導度(EC)の同時計測システムの構築・実用化を図るために、システム設計のための土壌電磁物性データの取得、TDT計測システムの構築、システムの有効性検討などを段階的に実施した。また、得られた知見に基づき、SDI-12プロトコル対応の低価格TDT計測システムを構築したところ、極端な高EC条件や低EC条件を除けば、同システムを用いて広範な水分・EC条件下における水分量・ECの同時計測が可能であることが判明した。また、適切な校正を行えば、問題が生じたEC条件においても同システムを適用することが可能であることを見出した。

研究成果の概要(英文)：To establish a method to determine soil moisture and bulk soil electrical conductivity (EC) using Time domain transmissiometry (TDT), we investigated the dielectric properties of soils in wide microwave frequency and performed calibration experiments using a TDT system we designed. We also developed a low-cost TDT system and verified its performance. While the system performed very well in moderately conductive soils, limitations for highly conductive soils as well as for soils with less conductive soils. An empirical relationship between the maximum slope of the TDT waveform and the bulk EC was developed to improve measurement capabilities in the soils.

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：時間領域透過法(TDT) 土壌水分量 バルク電気伝導度 モニタリング マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

近年の高周波技術の発展は目覚しく、GHz帯のマイクロ波信号を利用したリモートセンシング(MRS)による広域スケールの土壌探査技術開発が進められており、農業・環境・防災分野における利用拡大が期待されている。我が国でも、2006年にLバンド(1.27GHz)合成開口レーダー(PALSAR)を搭載した陸域観測技術衛星・ALOSの運用が始まり、その後継機・ALOS-2の打ち上げが予定されるなど、天候や表面植生の有無に左右されることなく、昼夜の広域土壌探査を実施できる環境が整いつつある。

土壌の広域探査にMRSを活用するうえで不可欠になることは、グラントゥルースデータの取得、すなわち地上における土壌のモニタリングである。Toppら(1980)の研究以降、土壌の水分量・EC計測に時間領域反射法(TDR)が多用されている。TDRでは、広帯域のマイクロ波ステップパルス信号の発生器と、反射信号の時間領域波形(TDR波形)を計測するオシロスコープとを搭載したケーブルテスターを利用するのが一般的であり、沿岸帯水層における塩水楔や河川底質環境の探査などにも利用されている。

ところが、現行のTDRは、必ずしも万能ではない。室内実験に用いる均一なカラム土壌と違い、フィールド観測の観測対象土壌は不均一である。そのため、TDRセンサーの挿入方向に誘電特性の不連続面、たとえば水分量・ECの急変面、亀裂、土層境界面などが存在すると、TDR波形に不規則な凹凸が混入し、既存の信号解析アルゴリズムに基づくTDR波形の自動解析が困難になることが原因で、安定した中長期観測を実施することが難しい。また、粘土画分を多く含む土壌では、ステップパルス信号の計測周波数帯域において発現する粘土の特異な誘電特性が原因で、TDRを含めたどのような手法を用いても、モニタリングを実施することができない。これらは、反射信号計測に基づくTDRの仕組みと、既存のケーブルテスターの仕様起因の問題である。従って、新たな手法・計測システムを構築しない限り、これらの問題を解決することは出来ない。

2. 研究の目的

本研究では、先述の既存のモニタリング法の問題の解決手段として、国内外で脚光を浴びる誘電物性測定法、すなわち、マイクロ波信号の透過特性に基づく時間領域透過法(TDT)(Toppら, 2001)に着眼した(図1)。TDTについては、信号の送受信・解析手法、センサー、EC計測などの研究事例は乏しく、未だ開発途上の技術ではあるものの、高い安定性と拡張性を備える点が、土壌のモニタリングに従事する研究者・技術者らの関心を集めており、TDRに代わる新たな土壌水分・EC計測法として、その早期実用化を求める声が強い。

そこで、本研究では、広帯域ステップパルス信号を用いたTDTによる体積含水率および電

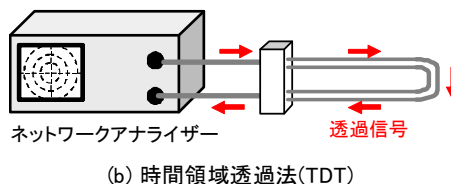
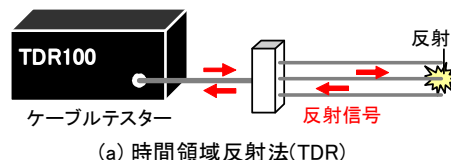
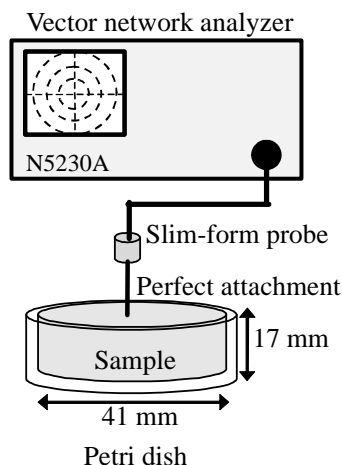


図1 TDRとTDTの概略



気伝導度の同時計測を確立することを目的として、鉱物組成の異なる種々の供試土に広帯域のステップパルス信号を印加し、その応答を観測するとともに、透過信号の波形(TDT波形)を測定・解析した。そして、信号の伝播速度(v)および強度の特性を明らかにすることにより、TDTによる体積含水率および電気伝導度の同時計測の有効性を検証するとともに、得られた知見を踏まえて低価格のTDT計測システムの構築を試みた。

3. 研究の方法

(1) 新型TDT開発のための基礎知見の収集

TDRに代表される既存のモニタリング法が通用しない粘土、すなわちカオリナイトおよびベントナイト(クニゲルV1)とを供試土とした。両供試土と蒸留水(DW)とを混合し、DWの混合比を変えることにより、水分量が異なるスラリー状の試料を作製した。

25℃に調整した各供試土をペトリ皿に充填し、その表面に開放端型スリムフォームプローブ(0.5GHz～20GHz用)の先端平面部を密着させた(図2)。そして、ベクトルネットワークアナライザー(N5230A, Agilent Technologies)および85070E誘電体プローブ・キット付属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(ϵ')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(ϵ'')の周波数スペクトルを 0.001 – 50 GHz の範囲で反復計測した。そして、収斂した ϵ' および ϵ'' のスペクトルの平均値から、伝播速度(v)スペクトルを算出した。

(2) 20 GHz 帯 TDT 計測システムの構築

0.5 bar 用セラミックフィルター上に設置した内径 85 mm のアクリル製円筒カラム内に、DW で洗浄した豊浦標準砂を高さ 30 mm まで沈降充填し、これを飽和砂カラムとした。砂層の中間位に、感知部長 150 mm の自作 TDT センサーを固定した(写真 1)。

フィルター底面に所定のサクシオンを与えることにより間隙水の排水を促し、平衡条件に達した時点で排水量を計測するとともに、オシロスコープ(86100B, Agilent Technologies)および TDR/TDT 共用モジュール(54754A, Agilent Technologies)を用いて最大周波数 20 GHz の広帯域ステップパルス信号を砂に印可し、その TDT 波形を取得・解析した。サクシオンを段階的に増加させながら、上述の測定を反復し、水分量およびバルク電気伝導度(σ_b)の変化に対する TDT 波形の形状およびステップパルス信号の v の応答を観察した。

また、溶液電気伝導度(σ_w)の異なる CaCl₂ 溶液を供試材料として、上述の計測を反復することにより、TDT 波形およびその解析に及ぼす σ_w の影響も、実験的に検討した。

(3) SDI-12 型 TDT センサーを利用した低価格の TDT 計測システムの構築

プラスチック製円筒容器内に蒸留水を満たし、5組のSDI-12型デジタルTDTセンサー(図3(a))を固定した。各センサーを自作のマルチチャンネル測定回路を介して CR800 データロガー(Campbell Scientific 社)に接続した(図3(b))。蒸留水に NaCl を加えて溶液電気伝導度(σ_w)を段階的に増加させながら、各段階において体積含水率(θ)、温度、見かけの誘電率(ϵ_{TDT})、電気伝導度(σ_{TDT})に 5 項目の波形解析情報を加えた計 9 項目を 1 分間隔で計 10 回測定し、それらの平均値を記録した。同一モデルの 5 組の TDT センサーについても、一連の計測を反復した。

豊浦標準砂と NaCl 溶液(5.0 dS m⁻¹)との混合比を調整し、 θ および σ_b の異なる供試土を準備した。プラスチック製箱型容器(高さ 10 cm, 横 26 cm, 奥行き 20 cm)に、高さ 5 cm まで供試土(乾燥密度は 1.55 ± 0.03 Mg m⁻³)を充填し、2 組の TDT センサーを高さ 2.5 cm の位置に水平に埋設した(図 3(c))。自作 SDI-12/RS-232C インターフェイスを介して、先述の計 9 項目の測定を行うとともに、コンピュータに再現したオシロスコープ画面上に TDT 波形を取り込んだ。その後、容器内の任意の 5 地点から試料を採取し、炉乾法(105°C)により各試料の体積含水率を求めた後、それらの平均体積含水率(θ)を決定した。全供試土において、一連の計測を反復した。



写真 1 20GHz 帯 TDT 計測システム

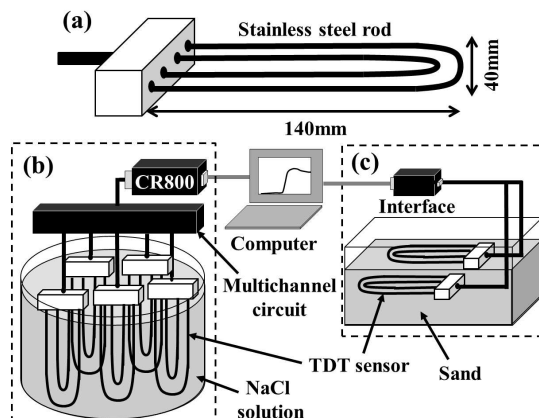


図 3 速度スペクトル測定装置の概略

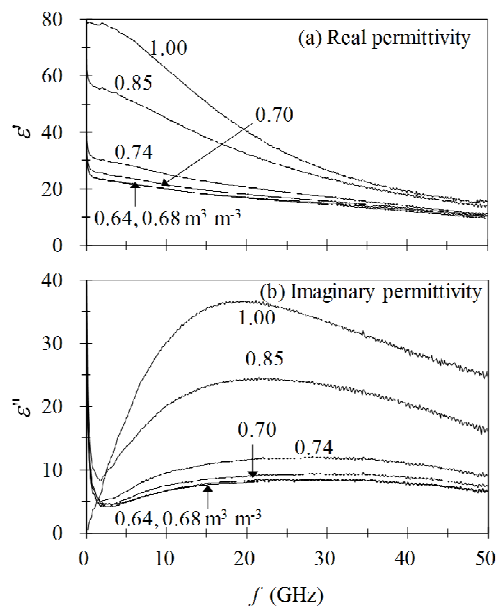


図 4 カオリナイトの誘電緩和スペクトル

4. 研究成果

(1) GHz 帯の信号に対する粘土の応答

カオリナイト(図 4(a))およびベントナイトの ϵ' のスペクトル(図 5(a))は、いずれも高 θ の試料ほど高い分布となった。また、各試料の ϵ' は周波数(f)の増加とともに漸減したが、その低下量は低 θ の試料ほど小さかった。一方、両試料の ϵ'' は、 θ と周波数の両者に強く依存した(図 4(b), 図 5(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、水分子の回転速度は電界の反転に対して速やかに追従できない。結合水と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。本研究は、両者の効果を合せた損失が極大となる、水の緩和周波数(約 20 GHz)を測定領域に含む計測であったため、両試料の ϵ'' も水の緩和周波数において極大となる傾向が認められた。

ϵ' および ϵ'' から算出したカオリナイトの ν スペクトルは、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(図 6(a))。高 θ 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(図 6(b))。ただし、低周波帯では θ による ν の較差が小さいこと、また各試料の ν が周波数の増加とともに急増する領域が認められる点が、カオリナイトと異なる。

1.5 GHz 以下の信号を計測に用いる従来の時間領域反射法(TDR)の計測帯域において、 θ による ν の較差が小さいことは、 ν 測定に基づいた θ の評価が技術的に困難であることを示唆するものである。システム全体の低コスト化の観点から、本研究の TDT 計測システムは、従来の TDR と同程度の周波数帯の信号を適用することが望ましい。ゆえに、後述する TDT 計測システムも、土壌による誘電特性の違いを考慮した設計・運用が必要であろう。

(2) 20GHz 帯の TDT 計測システムの有効性

20 GHz 帯 TDT システム(写真 1)を用いて測定した DW と混合した砂の TDT 波形の形状は、 θ の低下とともに変化した(図 7)。ステップパルスの立ち上がり点の時間は、 θ の低下とともに左方へシフトし(図 7)、それから算出される伝播速度は低下した(図 8)。こうした θ と ν との関係は、従来の TDR の測定結果と類似している。

波形の立ち上がりの勾配については、 θ による明確な差異は認められなかった(図 7)。高速フーリエ変換(FFT)を用いて TDT 波形を解析したところ、 θ によるパワースペクトルの差異も小さかった(図 9)。DW の電気伝導度はゼロであるため、その量的変化、すなわち θ の変化が、透過信号の強度特性に及ぼす影響が軽微であったことが、波形の立ち上がり点の勾配やパワースペクトルの差異が認められない原因であろう。

一方、CaCl₂ 溶液の波形は、 σ_w によって上方へシフトするものの、立ち上がり点の時間の差は認められなかった(図 10(a))。これは、伝播速度測定に対する σ_w の影響は小さいことを示す。しかし、勾配は σ_w によって大きく異なることから、透過信号の減衰に σ_w は大きく寄与すると考えられる。TDT 波形の勾配が最大となる点の勾配を最大勾配(S_{Max})と定義し、それと σ_w との応答関係を調べたところ、両者の間には経験的關係が成立すること、また経験式に基づき TDT を用いて σ_w を決定することができることが明らかになった(図 10(b))。

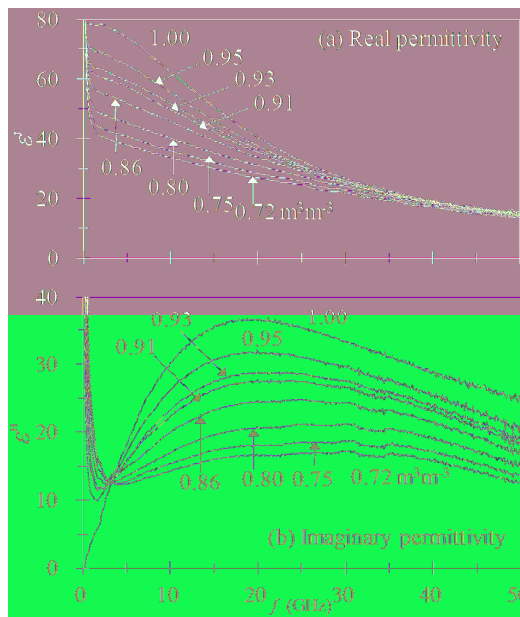


図 5 ベントナイトの誘電緩和スペクトル

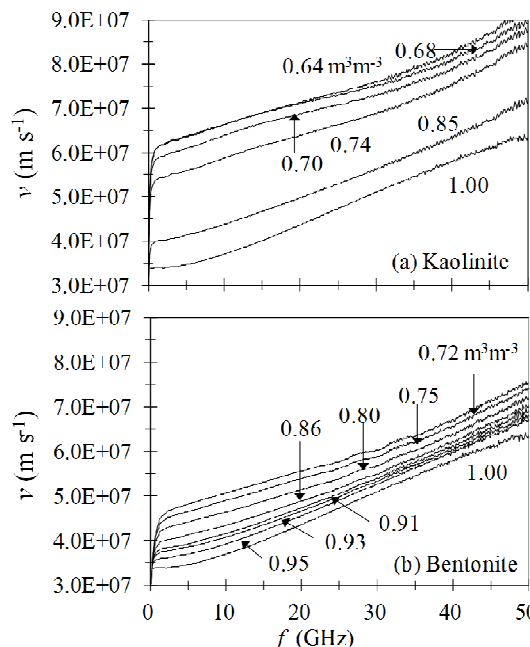


図 6 カオリナイトとベントナイトの速度(ν)スペクトル

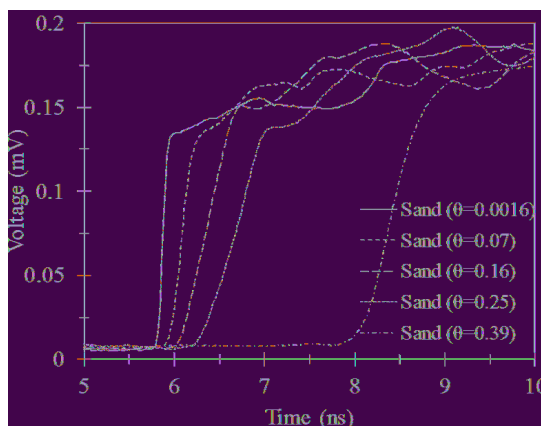


図 7 蒸留水混合砂の TDT 波形

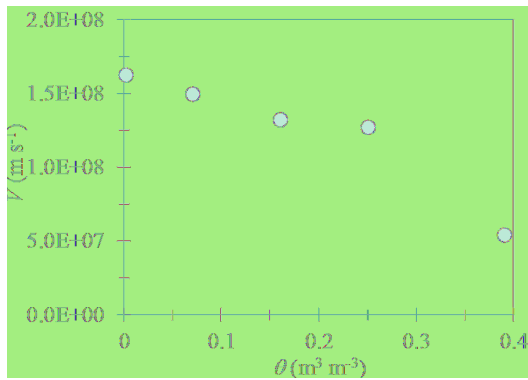


図 8 体積含水率(θ)と速度(v)の関係

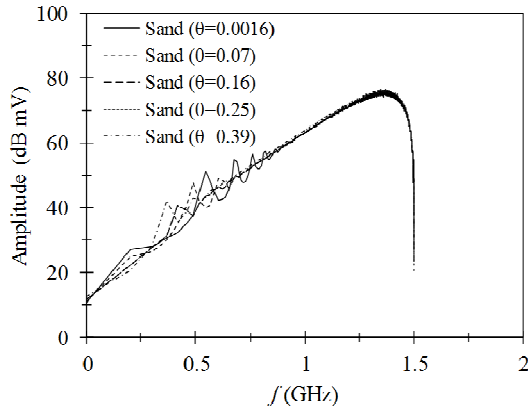


図 9 FFT で求めたパワースペクトル

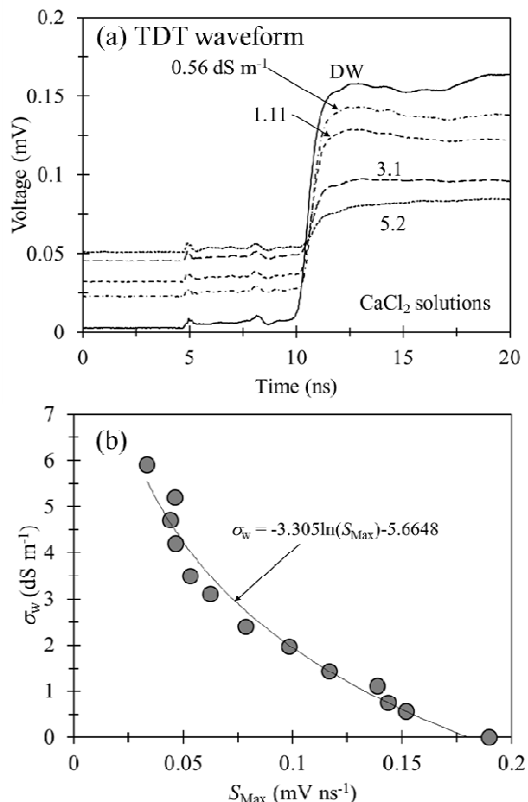


図 10 CaCl₂ 溶液の(a)TDT 波形と(b)波形最大勾配(S_{Max})と溶液電気伝導度(σ_w)の関係

(3) SDI-12 型 TDT センサーを利用した TDT 計測・波形解析システムの有効性
SDI-12 型センサーで測定した NaCl 溶液の

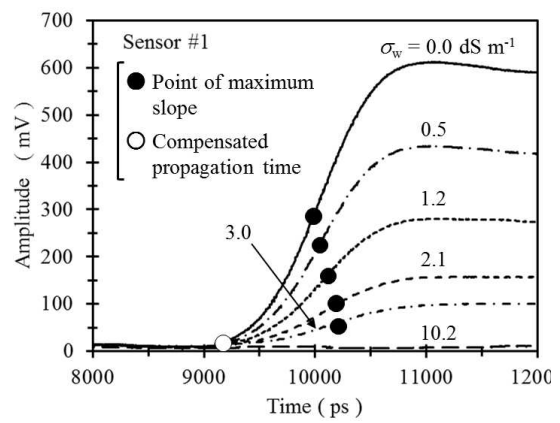


図 11 NaCl 溶液の TDT 波形

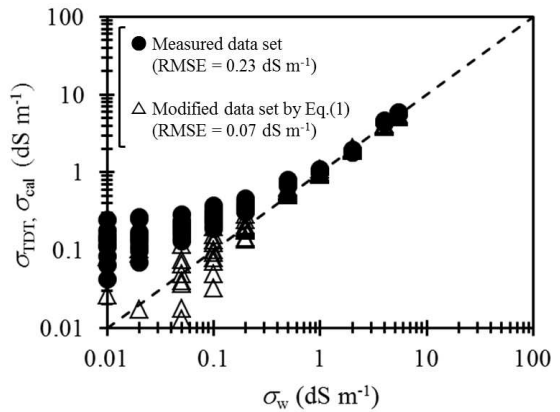


図 12 溶液電気伝導度(σ_w)とバルク電気伝導度(σ_{TDT} , σ_{cal})との関係

TDT 波形はピーク点を伴った急峻な立ち上がり、それに続く横ばいの形状を示した(図 11)。 $\sigma_w \geq 0.5 \text{ dS m}^{-1}$ における NaCl 溶液の σ_{TDT} 値は概ね 1:1 線上に分布したが、 $\sigma_w \leq 0.5 \text{ dS m}^{-1}$ の低 σ_w 条件のそれは過大評価され、 σ_w に対する測定値の二乗平均平方根誤差(RMSE)は 0.23 dS m^{-1} であった(図 12)。10 組のセンサーで測定した各 NaCl 溶液の TDT 波形の S_{Max} (図 11 の黒丸)には、センサー間の個体差が認められなかった(図は割愛)。全センサーの S_{Max} - σ_{TDT} 関係を対数関数で近似し(図 13 の Eq.(1)), 測定された S_{Max} 値を同式に代入して得た計算値は 1:1 線近傍に分布し、それらの RMSE は 0.07 dS m^{-1} であった(図 12 の白抜き三角)。同一モデルの TDT センサーを用いる場合には、Eq.(1)に基づき、より高い精度で σ_w を計測できると考える。

NaCl 溶液混合砂の TDT 波形は、NaCl 溶液の場合(図 11)と類似した形状を示した(図 14)。すなわち、 θ の低下とともに波形の立ち上がり点(図 14 の白丸)の時間が小さくなり、また、それに続く勾配は急峻になった(図 14)。各試料の ϵ_{TDT} は、 θ_0 の増加とともに大きくなり、 ϵ_{TDT} から求めた θ 値は、Topp 式のそれと概ね一致した(図 15)。

各試料の σ_{TDT} は、 θ_0 の増加とともに曲線的に増加したが、 $\theta_0 \leq 0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ではゼロとなった(図 16)。低電気伝導度条件に認められた測定感度の低下問題を改善するために、 0.2 または 0.5 dS m^{-1} の NaCl 溶液と風乾砂の S_{Max} 値とを直線で結び、2 つの近似式(Eq.(2), Eq.(3))を得た(図 13)。Eq.(2)に基づく再計算値は、鳥取砂丘砂に対す

る実験式4)上に分布したが(図16), 計算値の妥当性を明らかにするには, 豊浦標準砂を対象に, 更なる実験データの蓄積が必要であろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- 1) 宮本英揮, 伊藤直樹, 間瀬 淳, 徳本家康, 筑紫二郎, 土壤水分・電気伝導度の同時計測への時間領域透過法の適用, 農業農村工学会論文集, 288: 513 – 519, 2013.(査読有)
- 2) 宮本英揮, 上村将彰, 時間領域透過法(TDT)を利用した重粘土の含水比・間隙比のモニタリング, 2013 土壤水分ワークショップ論文集, 43 – 48, 2013.(査読無し)

[学会発表] (計9件)

- 1) 宮本英揮, 上村将彰, 時間領域透過法(TDT)を利用した重粘土の含水比・間隙比のモニタリング, 2013 土壤ワークショップ, 2013. 12. 21.
- 2) Hideki Miyamoto ほか5名, Application of time domain transmissiometry (TDT) to coupled measurements of soil moisture and electrical conductivity, ASA, CSA, & SSSA International Annual Meeting, 2013. 11. 4.
- 3) 平嶋雄太, 上村将彰, 宮本英揮, TDTによる砂のバルク EC 計測, 土壤物理学会, 2013. 11. 26.
- 4) 上村将彰, Ty P. A. Ferré, Markus Tuller, 宮本英揮, 粘土スラリーの含水比・EC・間隙比の同時計測に対する TDT の適用, 土壤物理学会, 2013. 11. 26.
- 5) 上村将彰, 宮本英揮, TDT による重粘土水田の含水比・間隙比のモニタリング, 土壤物理学会, 2013. 11. 26.
- 6) 平嶋雄太, 上村将彰, 宮本英揮, 時間領域透過法(TDT)による土壤電気伝導度計測の高精度化, 日本生物環境工学会, 2013. 9. 3.
- 7) 上村将彰, 宮本英揮, 時間領域透過法(TDT)による土壤水分・電気伝導度計測, 日本生物環境工学会, 2013. 9. 3.
- 8) 濱川明伸, 上村将彰, Ty P. A. Ferré, Markus Tuller, 宮本英揮, 高導電性媒質の誘電特性計測に対する SDI-12 型 TDT センサーの適用, 土壤物理学会, 2012. 11. 2.
- 9) 上村将彰, 濱川明伸, Ty P. A. Ferré, Markus Tuller, 宮本英揮, SDI-12 型 TDT センサーによる誘電特性の計測, 土壤物理学会, 2012. 11. 2.

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

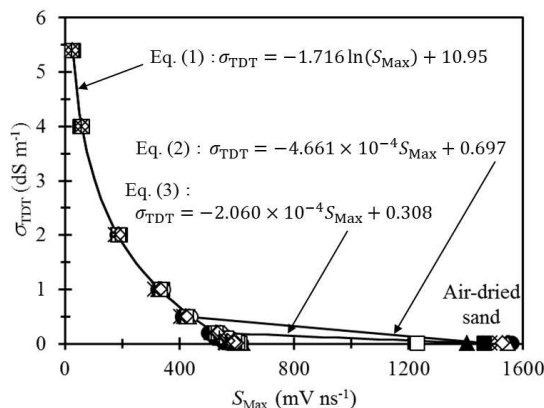


図13 最大勾配値(S_{Max})とバルク電気伝導度(σ_{TDT})の関係

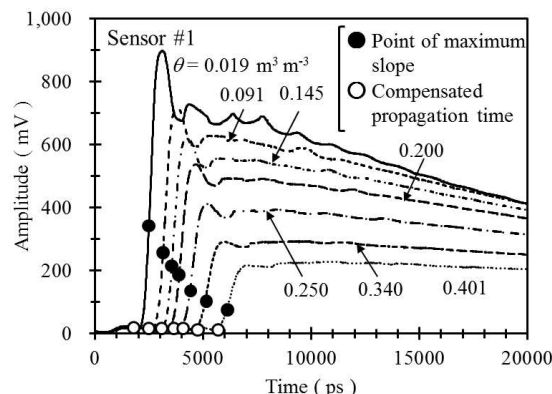


図14 NaCl 溶液混合砂の TDT 波形

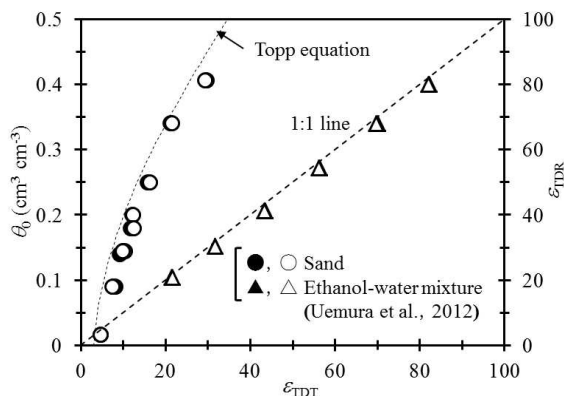


図15 見かけの誘電率(ϵ_{TDT})と体積含水率(θ_0)または TDR で測定した見かけの誘電率(ϵ_{TDR})の関係

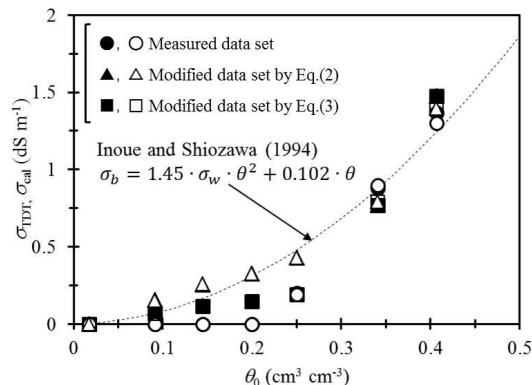


図16 体積含水率(θ_0)とバルク電気伝導度(σ_{TDT} , σ_{cal})の関係