

機関番号：17102

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20580265

研究課題名 (和文) TDR計測の応用の拡張とその機能特性

研究課題名 (英文) Extension and functional properties for TDR measurement application

研究代表者

筑紫 二郎 (チクシ ジロウ)

九州大学・生物環境調節センター・教授

研究者番号：00127458

研究成果の概要 (和文)：

TDR の新しい応用を展開し、それらの機能特性を明らかにすることによって、新計測手法を確立することを目的とした。本報告では、行った研究のうち、3 つのテーマの成果をまとめている。(1)地表面付近の土壌水分分布を計測するために、幅 3cm の電子基板に 8 個のプロブを備えた多点 TDR プロブ (MWP) を開発し、その性能について調べた。砂とマサ土における蒸発過程について計測したところ、MWP の利用によってそれら土壌における水分変化の特徴をとらえられることが認められた。(2)水中の土砂の堆積をモニタリングするための TDR 計測法の適用性を調べた。計測において、水の電気伝導度の影響が小さいことを見出すとともに、誘電率と堆砂深との間で線形関係を得た。(3)TDR による淡水と塩水との境界面の検出を試みた。TDR 波形の分析から、境界面のレベルを高精度で推定することが可能であった。同時に淡水の電気伝導度も高精度で測定できることを認めた。

研究成果の概要 (英文)：

The purpose of the present study was to establish new applications of TDR measurement and to clarify their functional properties. In this report, three major research topics are included. (1) A multi TDR probe (MWP), having 8 probes in the electric board of 3-cm wide, was developed and properties of the MWP were investigated to measure water content profile near soil surface. The measurements of the profile conducted during evaporation process for sand and decomposed granite soil by using the MWP revealed clear difference of the profile between the soils. (2) Applicability of TDR technique to the monitoring of soil deposit level in water reservoir. A linear relationship between dielectric constant and the deposit level was found with minor impact of electrical conductivity of water. (3) The detection of boundary between fresh- and salt-water using TDR was examined. The analysis of TDR wave form made it possible to estimate the boundary level with high accuracy. With the measurement, we also found that the electrical conductivity of the fresh water can be also evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業土木学・農業計画学

キーワード：TDR, 誘電率, 電気伝導度, 電磁波パルス, マイクロ波, 淡塩境界面, 校正曲線

## 1. 研究開始当初の背景

### ① 研究の学術的背景

近年、時間領域反射法 (TDR) は土壌水分計として発達してきた。この方法は、誘電率が土壌中の水分 (自由水) に最も強く反応することから、計測した誘電率と土壌水分量との関係を利用したものである。電磁波の計測は、高周波の電磁波パルスを送信させて、ケーブルあるいは電極上を伝播させ、戻ってくる信号をオシロスコープで捉え、その波形進行速度を分析することによって誘電率を割り出すという原理に基づいている。1980年、カナダの研究者 C. G. Topp (1980) が TDR を初めて土壌水分計測に利用し砂質土壌には統一的に適用できる校正式を発表して以来、土壌水分計としての TDR は爆発的に世界中に広がった。

しかし、Topp の研究によって普遍的な土壌水分計測法として確立されたわけではなく、計測には様々な問題が内蔵されていた。適正使用周波数、土壌密度の影響、粘性土やガラスビーズに対する不適合、プローブと土壌の接触性、プローブのサイズ・形状、TDR の自動計測化、プローブの小型化、土壌温度の影響、校正曲線のモデル化など多くの課題に対して現在でもなお世界中の研究者が取り組み続けている。

しかしながら、TDR は必ずしも土壌水分計測だけでなく、それ以外にも多くの土壌特性の計測の可能性を秘めている。その一つは、電気伝導度 (EC) の計測で、電磁波の伝播エネルギーの減衰から求めるものである。この方面の研究は世界的に活発に行われているが日本でも少しずつ普及してきている。また、実際に計測される誘電率は水分以外にも土壌の成分・密度によっても変化する。この性質を利用して、水位計測、土壌懸濁液中の物質の沈降、土壌の圧密、土壌の固化等の方面にも応用が考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、TDR のもつ機能を明らかにし、それらの機能を土壌物理学的分野および土質工学的分野への応用・展開を図り、それらに対して計測手法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、標準的な TDR 計測とは異なる新たな応用開発を行ったので、それらの代表として3つの研究について簡潔に述べる。

### (1) 多点 TDR プローブ (MWP) の開発

#### ① MWP プローブ

図-1 に示す MWP プローブは、長さ 10.5 cm、幅 3 cm、厚さ 0.2 cm のガラスとエポキシ樹脂との積層基板に、長さ 10 cm、幅 0.02 cm、厚さ 0.001 cm の電極銅線を 0.14 cm の間隔で埋め込んだものであり、3 線式プローブを 8 組 (P1~P8) 並列した構造となっている。比誘電率の測定について、プローブへのステップパルス送受信装置には、1502C 型ケーブルテスター (Tektronix) を使用した。8 組のプローブを SDMX50 型マルチプレクサー (Campbell Scientific) を介してケーブルテスターに接続し、WinTDR を用いて TDR 波形の計測ならびに解析を行った。

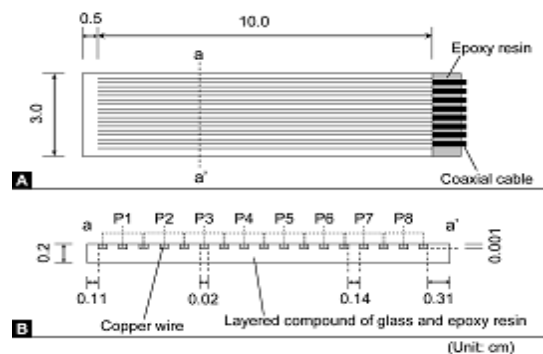


図-1 MWP プローブの模式図 (図 B は図 A の a-a' 断面図)

### ② 実験概要

MWP プローブを用いて砂の体積含水率を測定するために、内径 5 cm、高さ 13 cm のアクリル製円筒形カラム内の中央部にプローブを固定し、そこに風乾の砂を均一に充填した。砂の表面に蒸留水を霧吹きで噴霧し、水が一様に拡散するのを待った後、MWP プローブ上の 8 組のプローブで比誘電率を計測した。同時に、カラム全質量を計量し、充填した砂および噴霧した蒸留水の質量から、砂の体積含水率を評価した。一連の加湿ならびに計測を繰り返すことで、広範な水分条件にお

ける砂の比誘電率と体積含水率との関係を調べた。

砂およびマサ土における地表面直下の鉛直水分プロファイルの経時変化を調べるために、縦 10 cm、横 20 cm、高さ 4 cm の塩化ビニール製の直方体容器に 8 組のプローブが鉛直軸上に並ぶように、P1 を上面、P8 を底面に向けて固定した。その後、蒸留水を加えながら砂を容器上面まで充填し、水分飽和試料とした。飽和試料の表面を大気に開放して水分の蒸発を促し、8 組のプローブで、蒸発

過程における比誘電率分布の経時変化を記録した。

(2) TDR による水位・電気伝導度および土砂表面位の計測

①CaCl<sub>2</sub>溶液による水深変動実験

長さ 0.48 m, 直径 0.004 m の 2 本のステンレス鋼棒を 0.01 m 間隔で平行に固定し, 一方のロッドを同軸ケーブルのシールド部に接続し, 他方をケーブル芯部に接続した 2 線式プローブを使用した (図-2)。このプローブを円筒容器 (内径 0.07 m, 高さ 0.5 m) の中央に設置し, 容器下端から伝導度 ( $\sigma_w$ ) の異なる CaCl<sub>2</sub> 溶液 (0~0.2 S m<sup>-1</sup>) の水深 ( $h_w$ ) を 0.05 m 間隔で増加させた。水深が増加する過程における TDR 波形を TDR100 ケーブルテスター (Campbell 社製) で計測し, 水面 ( $t_1$ ) およびプローブ先端 ( $t_2$ ) の反射地点と反射波の反射係数 ( $\rho_w$ ) から, 誘電率 ( $\epsilon_{eff}$ ) および電気伝導度 ( $\sigma_{eff}$ ) を決定した。

②土砂堆積深の変動実験

円筒容器を蒸留水で完全に満たし, その内部に砂を高さ 0.05 m 間隔で沈降充填した。前述の TDR 機器で, 土砂堆積深 ( $h_{sed}$ ) の増加に対する波形の変化を計測した。プローブ長の影響を調べるために, 高さ 1.0 m の容器に設置した 0.97 m 長のプローブでも同様の計測を行った。

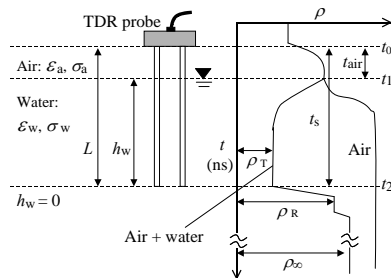


図-2 TDR による推進・伝導度計測の模式図

(3) マイクロ波を利用した淡水の水位・電気伝導度および淡塩水境界位の同時計測システム

①計測原理

空気と淡水との境界面に TDR プローブを垂直に挿入して固定し, そのロッド部にケーブルテスターからマイクロ波のステップパルスを与えると, ロッド先端で反射係数  $\rho$  の急変を伴った TDR 波形が得られる (図-3)。波形上のロッド根端位置を  $t_0$ , ロッド先端での  $\rho$  の急変点を  $t_1$  とすると, ロッドを往復するパルスの伝播時間  $t_1$  は両者の差 ( $= t_1 - t_0$ )

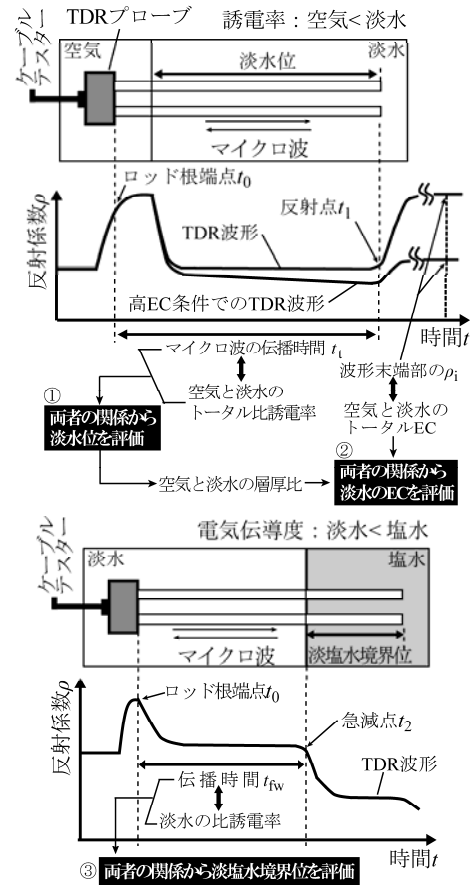


図-3 淡水の水位-EC 計測及び淡塩水境界位計測で得られる TDR 波形とその解析過程の模式図

として表される。  $t_0$  はケーブルテスターやケーブルなどの機器の構成が変わらない限りは不変であるが,  $t_1$  は空気と淡水との層厚比, すなわちロッド先端からの淡水位に応じた両層のトータル比誘電率によって変化する。このことを利用すれば, 淡水位を  $t_1$  とトータル比誘電率との関係に基づいて評価することができる (図-3 の①)。

また, 淡水の EC が上昇すると, 伝播過程のパルスが減衰するため,  $\rho$  の低下が認められる (図-3 の高 EC 条件での波形参照)。TDR では, 波形末端部で測定される反射係数  $\rho_i$  に基づいてロッド周囲のトータル EC が求められる。トータル EC も両層の層厚比によって変化するため, 前述の方法で淡水位が測定されれば, それから逆算した層厚比と TDR で測定したトータル EC に基づいて, 淡水の EC を評価できる (図-3 の②)。

一方, 淡水と塩水の 2 重層系では, パルスの電気エネルギーは高導電性の塩水に吸収されるため, 得られた TDR 波形の  $\rho$  値は境界面に対する位置で急減する。急減点を  $t_2$  と定義すると, パルスが淡水中を往復する時間

$t_{fw}$  は、 $t_2$  と  $t_0$  の差として評価できる。ロッド先端を基準位置とした場合、そこから境界面までの距離、すなわち淡塩水境界位は、 $t_{fw}$  と淡水の比誘電率との関係に基づき評価される (図-3の③)。

#### 4. 研究成果

##### (1) 多点 TDR プローブ (MWP) の開発

MWP プローブで測定した砂の比誘電率  $\epsilon$  と体積含水率  $\theta$  との関係調べたところ、MWP プローブで評価した  $\epsilon$  と  $\theta$  との関係は、Topp 式で評価される関係とは異なった。同様の傾向は、8 組のプローブすべてで認められたことから、Topp 式を用いた体積含水率の評価は困難である。よって、Topp 式に代わる校正式として、本研究では、測定された  $\epsilon$  と  $\theta$  との関係から対数校正式を導いた。校正式は、実測をよく再現できたことから、体積含水率の評価に適用可能であると考えられる。

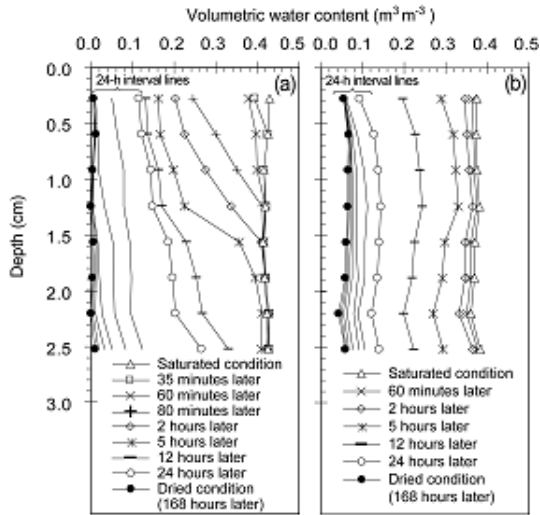


図-4 (a)砂と(b)マサ土における鉛直土壌水分プロフィール

図-4 は、砂とマサ土に対する蒸発実験から得た深さ 0.28~2.52 cm の体積含水率  $\theta$  の経時変化を示す。砂(図-4(a))における深さ 0.28 および 0.6 cm の  $\theta$  は、蒸発開始から約 2 時間の間に急速に低下し、初期水分の約半分が蒸発により失われた。一方、深さ 1.56~2.52 cm の  $\theta$  は、2 時間後においても変化が小さく、蒸発による水分減少は小さかった。また、図に示されるように、蒸発開始以降、表層から下層に向けて乾燥前線が進行する様子が確認された。一方、マサ土(図-4(b))における  $\theta$  は、各深度においてほぼ一様に低下し、砂で観察された下方への乾燥前線の進行は認められなかった。

本研究では、自作した MWP プローブを用

いることで、これまで室内実験においても測定困難とされてきたミリメートル間隔での水分プロファイルの計測が可能であることを示した。MWP プローブは、少なくとも地表面から深さ 3~25 mm の表層局所領域の水分プロファイルを計測できることから、地表面直下の水分動態の把握に極めて有用である。

##### (2) TDR による水位・電気伝導度および土砂表面位の計測

###### ①水深・伝導度について

蒸留水の水深  $h_w$  が高いほど、点  $t_1$  は波形の左方に位置し、逆に点  $t_2$  は右方に位置する波形が得られた。波形の凹凸に差異はあるが、同様の傾向は他の伝導度の  $\text{CaCl}_2$  溶液でも観察された。 $h_w$  によって大きく変化する  $t_2$  値に基づき  $\epsilon_{\text{eff}}$  を評価した結果、各伝導度の  $\text{CaCl}_2$  溶液の  $\epsilon_{\text{eff}}$  は  $h_w$  とともに同一経路で増加した。 $h_w - \epsilon_{\text{eff}}$  関係が一つの曲線で与えられるのは、溶液の伝導度が  $\epsilon_{\text{eff}}$  値の大小に影響しないためである。

一方、 $\sigma_{\text{eff}}$  も  $h_w$  とともに増加したが、両者の関係は  $\sigma_w$  によって異なる。すなわち、 $\sigma_{\text{eff}}$  は  $h_w$  と  $\sigma_w$  の関数で表される。TDR では、 $h_w$  は独立して決定できるため、 $\sigma_{\text{eff}} - h_w$  の関係が既知である場合は、水深が経時的に変動する場合でも  $h_w$  と  $\sigma_w$  を同時に決定できる。ただし、高伝導度溶液ほど、伝播中のマイクロ波の減衰が大きいため、計測に供し得るプローブ長は制限される。

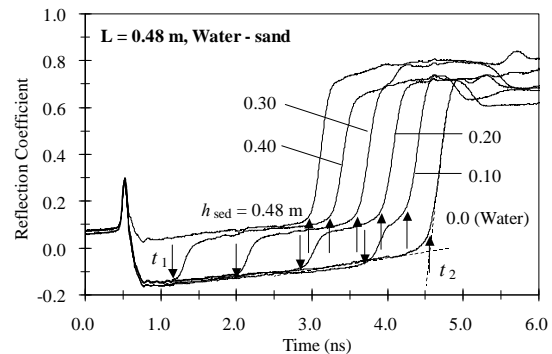


図-5 土砂堆積深 ( $h_{\text{sed}}$ ) が異なる場合の波形

###### ②土砂堆積深について

0.48 m 長のプローブで蒸留水-砂混合試料の波形を計測した結果、 $h_{\text{sed}}$  が高いほど、点  $t_1$  および点  $t_2$  はともに左方に位置することが確認された(図-5)。空気- $\text{CaCl}_2$  溶液の場合と異なり、点  $t_1$  も大きく変化した。 $t_2$  値から  $\epsilon_{\text{eff}}$  を評価した結果、 $\epsilon_{\text{eff}}$  は  $h_{\text{sed}}$  の増加とともに直線的に減少した。上部に位置する水層の誘電率は既知であるため、点  $t_1$  から  $t_2$  値を利用する場合と同程度の精度で  $h_{\text{sed}}$  を評価できる

と考えられる。以上の波形および誘電率の特徴は 0.97 m 長のプローブにも共通したが、 $h_{\text{sed}} - \epsilon_{\text{eff}}$  関係の勾配が緩やかな点が異なる。これは同一の  $h_{\text{sed}}$  であっても、プローブ長が大きいほどサンプリング体積内に占める水の割合が相対的に大きくなるためである。

### ③まとめ

$\epsilon_{\text{eff}}$  は  $\sigma_w$  の影響を受けないため、得られた各プローブの  $h_{\text{sed}} - \epsilon_{\text{eff}}$  関係は、 $\sigma_w$  が異なる溶液でも適用できると考えられる。ただし、測定結果はプローブに依存するため、実用性向上の観点から、各プローブの実験結果を统一的に解釈でき得るモデルの確立が必要と考えられる。

### (3) 淡水の水位・電気伝導度および淡塩水境界位の同時計測システム

#### ①淡水の水位と EC の計測

実験では、2つの TDR プローブを用いて、淡水の水位と EC、淡塩水境界位の3者の計測を試みた。まず、1つ目のプローブで淡水の水位と EC を同時に計測するために、観測井戸を模擬した円筒カラム内に 48 cm 長の2線式 TDR プローブを固定し、EC の異なる淡水 ( $0.004 \text{ S m}^{-1}$  と  $0.1 \text{ S m}^{-1}$ ) をカラムに給水して水位 (0~48 cm) 上昇過程の TDR 波形を計測した。その結果、計測波形に現れたロッド先端でのパルス反射点  $t_1$  は、水位の上昇とともに増大したのに対して、 $t_1$  付近の  $\rho$  値は、淡水の EC が高い場合に低下した。測定された  $t_1$  とトータル EC から、淡水の水位と EC を評価したところ、単一のプローブを用いて、水位を測定誤差 1 cm 未満、EC を相対誤差 7% 未満 (EC が  $0.004 \text{ S m}^{-1}$  と  $0.1 \text{ S m}^{-1}$  の場合の測定誤差が、それぞれ  $0.0002 \text{ S m}^{-1}$  未満と  $0.007 \text{ S m}^{-1}$  未満) で評価できた。

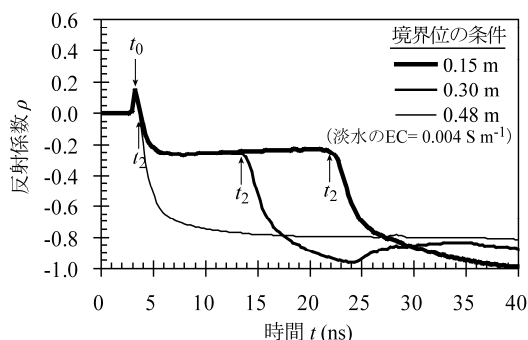


図-6 淡塩水境界位の計測実験で得られた TDR 波形

#### ②淡塩水境界位の計測

淡塩水境界位の計測実験では、淡水で満た

したカラムの底部から塩水をゆっくりと給水することにより、境界位 (0~48 cm) の上昇過程における TDR 波形を計測した。得られた波形上の急減点  $t_2$  は、境界位が上昇にしたがって小さくなった (図-6)。  $t_2$  から評価した  $t_{fw}$  と淡水の比誘電率との関係に基づき、境界位を評価したところ、測定誤差は 1 cm 未満となり、淡塩水境界位を TDR によって高精度で評価できることを確認した。

### ③まとめ

本研究では、TDR による淡水の水位と EC、淡塩水境界位の評価システムの開発について、それらの測定原理を概説し、室内実験の結果について報告した。今回の実験結果から、2組の TDR プローブを用いることにより、淡水の水位と EC、淡塩水境界位の3者を同時に評価できることを確認した。今後、沿岸の地下淡水資源の保全に有用な観測システムとするために、その実用化に向けたさらなる研究開発に取り組む必要がある。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① 伊藤祐二, 宮本英揮, 郡山益実, 筑紫二郎, 瀬口昌洋. マイクロ波のエネルギー吸収特性を利用した淡塩水境界面の計測. 土木学会論文集 **B**, 66/2, 189-195, 2010.5
- ② 伊藤祐二・筑紫二郎・宮本英揮: TDR による表層水分計の開発とその有効性の評価. 土壤の物理性, 111, 35-41, 2009.
- ③ 宮本英揮・筑紫二郎・呉宅根: 時間領域反射法による水位・電気伝導度および土砂表面位の計測. 土壤の物理性, 108, 37-45, 2008.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Ito, Y., J. Chikushi, and H. Miyamoto. Multi-TDR probe designed for measuring soil moisture distribution near the soil surface. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 - 6 August 2010, 117-120, Brisbane, Australia.
- ② Ito, Y., H. Miyamoto, M. Koriyama, J. Chikushi, and M. Seguchi. Measurement of interface level between fresh and salt water layers in terms of energy absorption characteristics in microwave. Joint Symposium on Integrated Water and Soil Management between Water Resources University, Vietnam, and Kyushu University, Japan, 2010, Nov. 22, Hanoi, Vietnam..

- ③伊藤祐二・筑紫二郎・宮本英揮, TDR による水中堆積土砂表面位の評価法, 平成 21 年度農業農村工学会大会講演会 (平成 21 年 8 月), 筑波

〔図書〕 (計 1 件)

- ①筑紫二郎, 九州大学出版会, 土壌の誘電特性: 計測原理と応用, 2010, 135.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

筑紫 二郎 (CHIKUSHI JIRO)  
九州大学・生物環境調節センター・教授  
研究者番号: 00127458

### (2) 研究分担者

伊藤 祐二 (ITO YUJI)  
佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・  
研究機関研究員  
研究者番号: 60526911