

# 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

宮本英揮\*・伊藤直樹\*\*・安永円理子\*・高市信也\*\*・間瀬 淳\*\*・筑紫二郎\*

Measurement of Dielectric Properties Using Time Domain Transmissiometry  
(TDT) with Broad Band Impulse-Signal

Hideki MIYAMOTO\*, Naoki ITO\*\*, Eriko YASUNAGA\*, Shinya TAKAICHI\*\*,  
Atsushi MASE\*\* and Jiro CHIKUSHI\*

\* Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku,  
Fukuoka city, Fukuoka 812-8581, Japan

\*\* Art, Science and Technology Center for Cooperative Research, Kyushu University,  
6-1 Kasuga-koen, Kasuga city, Fukuoka 816-8580, Japan

## Abstract

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 and solute concentration in soils. To establish the monitoring method by applying TDT, we measured travel time and amplitude of impulse-signal transmitted through several types of fluid media using TDT probes with different lengths, and verified the effectiveness of TDT for the estimation of apparent permittivity and electrical conductivity of the media. Although the determination of apparent permittivity and electrical conductivity of an extremely high-conductive medium was not completed due to the inadmissible loss of the transmitted signal, we successfully determined both properties by TDT in moderate-conductive media. Judging from their distribution from referential values in literature, we concluded that the longer probes provided more accurate estimations of apparent permittivity and electrical conductivity.

**Key words** : Time domain transmissiometry (TDT), Apparent permittivity, Electrical conductivity, Travel time, Signal intensity

## 1. はじめに

土中の水分量および溶質濃度の定量法として、時間領域反射法 (TDR) が広く活用されている。TDR は、土中に埋設した金属プローブに広帯域のマイクロ波信号を与え、その反射信号の伝播時間から求まる見かけの誘電率に基づいて水分量、そしてその強度に基づいて電気伝導度を決定する手法である。TDR は、両者を同時かつ非破壊的に計測できること (Topp *et al.*, 1980; Dalton *et*

*al.*, 1984), プローブの自作や多点の自動計測が容易であること、また市販の計測器やプログラムの種類が豊富であることなど、多くの利点を備えた手法である (Noborio, 2001; Jones *et al.*, 2002; Robinson *et al.*, 2003a)。

一方、現行の TDR の代替法として、一部の研究者の間で時間領域透過法 (TDT) が検討され始めている (Topp *et al.*, 2001, 2003)。TDT は、TDR と同様に、プローブを伝播するマイクロ波信号の伝播時間を計測する技術である。しかし、同一経路でステップパルス信号の

\*九州大学生物環境調節センター 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

\*\*九州大学産学連携センター 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

キーワード : 時間領域透過法 (TDT), 見かけの誘電率, 電気伝導度, 伝播時間, 信号強度

送受信を行う TDR と違い、TDT ではプローブに与える電気信号の送信部と受信部が分離され、一方から送信、他方から受信する仕組みとなっている。すなわち、透過した信号の時間領域波形 (TDT 波形) を計測することが、TDR と異なる点である。

TDT では、基準となる媒質 (一般的には空気) 中および測定対象媒質中のトータル伝播時間の差に基づき、媒質中の伝播時間を決定することが可能であり (Harlow *et al.*, 2003; Hook *et al.*, 2004), その手法は二つに大別される。すなわち、第一は媒質に広帯域信号を透過させ、その信号の伝播時間を決定する方法、第二は広帯域信号の周波数スペクトルと位相を高速フーリエ変換で求め、特定の周波数成分の伝播時間を決定する方法である。決定方法は異なるが、両者は同等の土壌水分計測精度を有する (Harlow *et al.*, 2003)。しかしながら、後者の手法は、各周波数成分の位相を考慮している点で厳密な手法ではあるものの、その実施には高額なネットワークアナライザの利用が必要である。そのため、少コスト化の観点からは、従来の TDR と同様に、パルスジェネレーターとオシロスコープを組み合わせて実施できる前者の計測方式が望ましい。

広帯域信号を用いた TDT による水分量および溶質濃度計測は、TDR と比べ、十分に確立されていない。TDR ではステップパルス信号を利用するのが一般的であるが、TDT ではインパルス信号やステップパルス信号などの形態の異なる信号が利用されるだけでなく、その解析手法も前述のように異なるなど (Hook *et al.*, 2004; Blonquist *et al.*, 2005), 現在もなお最適な計測手法の構築のための試行錯誤の段階にある。また、TDR と同様に電気信号の伝播を計測する計測原理上、TDT においても電気伝導度の計測が可能であると考えられるものの、その可否や感度についての検証はなされていない。さらに、既往の研究に用いられた TDT プローブは、最小のものでも長さが 260 mm (Harlow *et al.*, 2003) と比較的大きいため、プローブの小型化もまた実用上の課題の一つである。

以上の課題は、理想的な条件下で検証することが望ましい。電気信号の伝播時間には、周囲の媒体の誘電特性、すなわち供試体とプローブとの接触や均一性などが強く影響を及ぼすことが多い。そのため、TDR の計測精度や実効周波数に関する既往の研究では、均質かつプローブとの完全接触が期待でき、他の手法による比較検証が容易である液体や気体などを土壌の代替試料として供した報告が多い (Blonquist *et al.*, 2005; Robinson *et al.*, 2003a, 2003b, 2005)。

本研究では、小型 TDT プローブによる見かけの誘電

率および電気伝導度計測の有効性を検討するために、単純な解析アルゴリズムに基づいて波形解析が実施できる広帯域インパルス信号を用いた TDT (Harlow *et al.*, 2003) により、誘電特性が異なる種々の流体中を透過するインパルス信号の伝播時間および強度を計測した。そして、小型プローブによる見かけの誘電率と電気伝導度の同時計測の可否、計測精度に及ぼすプローブ長の影響、高導電性溶液に対する適用限界などについて検証するとともに、従来の TDR との比較を行った。

## 2. 理 論

### 2.1 見かけの誘電率の計測原理

交流場における誘電体の誘電特性は、電気エネルギーの蓄電を表す実数部 ( $\epsilon'$ ) (以後、比誘電率と称する) と誘電体による吸収を表す虚数部 ( $\epsilon''$ ) の 2 成分から成る複素誘電率 ( $\epsilon^*$ ) で表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j\tan\delta) \quad (1)$$

$j$  は虚数単位、 $\delta$  は損失角、 $\tan\delta (= \epsilon''/\epsilon')$  は損失正接である。光速を  $c (= 3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})$  とすると、ある任意の複素誘電率を持つ誘電体中を伝播する信号速度 ( $V$ ) は、

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

と表される (Topp *et al.*, 1980)。一方、任意の長さ ( $L$ ) の経路を電気信号が伝播するとき、信号速度と伝播時間 ( $t_s$ ) との関係は次式で与えられる。

$$V = \frac{L}{t_s} \quad (3)$$

したがって、(2)式および(3)式から、比誘電率は

$$\epsilon' = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta}} \left( \frac{ct_s}{L} \right)^2 \quad (4)$$

と表され、伝播時間と損失正接の関数であることが分かる。ただし、土壌水分計測では、虚数部が比誘電率と比べて非常に小さい、すなわち  $\tan\delta \approx 0$  と考え、次に示す簡略化した(4)式が利用されている。

$$\epsilon' \approx \left( \frac{ct_s}{L} \right)^2 = \epsilon_a' \quad (5)$$

なお、(5)式で得られる数値は見かけの誘電率 ( $\epsilon_a'$ ) として、実際の比誘電率と区別されている。

### 2.2 TDT による伝播時間および信号強度の計測原理

TDT では、比誘電率が既知である誘電体に対して、計測の基準となる TDT 波形を得る必要がある (本研究では、基準となる TDT 波形を得る誘電体を、基準媒質と呼ぶ)。基準媒質として用いる媒質は、比誘電率が誘電分散を示さない、すなわち周波数依存性を示さない空気や

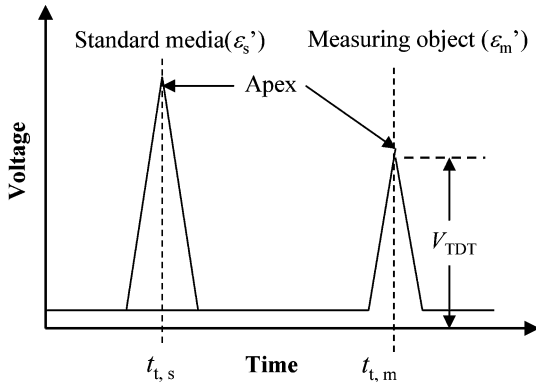


図-1 時間領域透過法（TDT）で計測される透過信号の模式図。

Fig. 1 Schematic diagram of transmitted signal measured using time domain transmissiometry (TDT).

油などが望ましい。Harlow *et al.* (2003) は、空気を基準媒質としたが、ここでは基準媒質の比誘電率を  $\epsilon_s'$  として、伝播時間の計測原理を一般化して説明する。

反射による信号のロスが無視できる、長さ  $L_p$  の TDT プローブを基準媒質中に設置し、その一端から広帯域のインパルス信号を与えると、上に凸の TDT 波形を得ることができる (図-1)。基準媒質より大きな比誘電率 ( $\epsilon_m'$ ) を持つ誘電体に対しても同じ計測を実施すると、凸部が現れる時間が大きくなる (TDT 波形の右方に移動する)。凸部が現れる時間は、感知部を含めた信号発生器から受信器までの全長によって与えられるため、Harlow *et al.* (2003) の方法に習って、これらの媒質のトータル伝播時間は次式で与えられる。

$$t_{t,s} = t_s + t_{\text{stuff}} = \sqrt{\epsilon_s'} \frac{L_p}{c} + t_{\text{stuff}} \quad (6)$$

$$t_{t,m} = t_m + t_{\text{stuff}} \quad (7)$$

$t_{t,s}$  および  $t_{t,m}$  は、それぞれ基準媒質および計測対象媒質中で計測されるトータル伝播時間、 $t_s$  および  $t_m$  はプローブ部の伝播時間、 $t_{\text{stuff}}$  は感知部以外の全行程に要する伝播時間である。(6)式と(7)式の辺々を引いて変形すると、最終的に次式が得られる。

$$t_m = t_{t,m} - t_{t,s} + \sqrt{\epsilon_s'} \frac{L_p}{c} \quad (8)$$

したがって、既知の比誘電率を持つ誘電体に対して  $t_{t,s}$  を事前に決定しておけば、 $t_{t,m}$  から伝播時間  $t_m$  が決定され、それを(5)式に代入すると見かけの誘電率を得ることができる。

一方、電気信号が誘電体中を伝播するとき、電気エネ

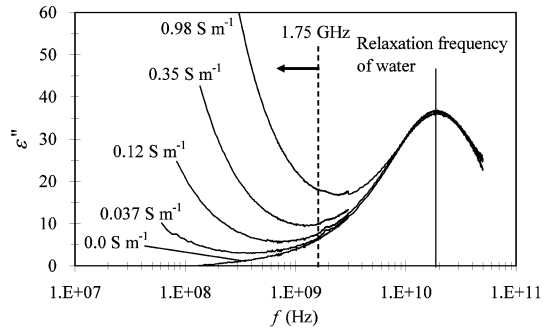


図-2 CaCl<sub>2</sub>溶液の複素誘電率の虚数部 ( $\epsilon''$ ) に与える電気伝導度の影響。

Fig. 2 Response of imaginary permittivity ( $\epsilon''$ ) to electrical conductivity in CaCl<sub>2</sub> solutions.

ルギーが誘電体に吸収される。エネルギーの吸収は、水分子の回転運動に対する周辺分子の抵抗と、導電性物質の存在による電圧降下の両者に起因する (石田, 2003)。

図-2は、蒸留水 ( $0.0 \text{ S m}^{-1}$ ) および電気伝導度が異なる CaCl<sub>2</sub> 溶液に対する  $\epsilon''$  の周波数スペクトルの計測例である。蒸留水は電解質を含まないため、このスペクトルは水分子の回転運動に伴って消費されるエネルギー量と対応している。回転運動によるエネルギー吸収量は、120 MHz を起点として周波数とともに増加し、また緩和周波数において極大となる性質を持つ。

また、電気伝導度が異なる CaCl<sub>2</sub> 溶液の  $\epsilon''$  のスペクトルを比較すると、高導電性の溶液ほど  $\epsilon''$  が大きい (図-2)。そのため、水中を伝播する過程で生じるエネルギー吸収は、電気伝導度が大きいほど大きい。この特性に基づき、TDR では反射信号の強度から電気伝導度が評価されているが (Dalton *et al.*, 1984)、TDT においても透過信号 (図-1) の強度 ( $V_{\text{TDT}}$ ) に基づいて同様の計測が可能であると見込まれる。

### 3. 実験

#### 3.1 供試材料

本研究では、温度が  $17^\circ\text{C}$  で電気伝導度の異なる 7 種類の CaCl<sub>2</sub> 溶液 ( $0.014, 0.037, 0.074, 0.12, 0.35, 0.60, 0.98 \text{ S m}^{-1}$ )、空気、サラダ油、質量分率 (エタノール/(エタノール+蒸留水)) の異なる 3 種類のエタノール ( $0.30, 0.60, 1.0 \text{ kg kg}^{-1}$ )、蒸留水 (DW) の計 13 種類を供試材料とした。各供試材料の一覧と、電気伝導度および比誘電率を表-1 に示す。なお、空気および水の比誘電率は理科年表 (国立天文台, 2000) より引用したものを記載し、

表-1 供試材料の電気伝導度 ( $\sigma_w$ ) および比誘電率 ( $\epsilon'$ ) の一覧.

Table 1 Electrical conductivity ( $\sigma_w$ ) and real permittivity ( $\epsilon'$ ) of materials under test.

Fluid media	$\sigma_w$ ( $S m^{-1}$ )	$\epsilon'$
CaCl <sub>2</sub> solution, #1	0.014	—
CaCl <sub>2</sub> solution, #2	0.037	—
CaCl <sub>2</sub> solution, #3	0.074	—
CaCl <sub>2</sub> solution, #4	0.12	—
CaCl <sub>2</sub> solution, #5	0.35	—
CaCl <sub>2</sub> solution, #6	0.60	—
CaCl <sub>2</sub> solution, #7	0.98	—
Air	0.0	1.00 <sup>†</sup>
Cooking oil	—	3.00 <sup>‡</sup>
Ethanol, 1.0 kg kg <sup>-1</sup> *	—	33.1 <sup>‡</sup>
Ethanol, 0.6 kg kg <sup>-1</sup> *	—	44.2 <sup>‡</sup>
Ethanol, 0.3 kg kg <sup>-1</sup> *	—	62.1 <sup>‡</sup>
Distilled water (DW)	0.0	81.5 <sup>†</sup>

\* Ethanol/(ethanol+water)

<sup>†</sup> Chronological scientific tables 2001

<sup>‡</sup> Averaged  $\epsilon''$ -value from 30 MHz to 100 MHz at 25°C

また CaCl<sub>2</sub> 溶液の比誘電率は、蒸留水と等しいと考えて省略した。さらに、サラダ油および質量分率の異なるエタノールの比誘電率は、温度が 25°C で、開放端型プローブ (85070D, Agilent Technologies) およびネットワークアナライザー (HP8714ES, Agilent Technologies) を利用して計測した 30 MHz から 100 MHz の比誘電率の平均値を記載した。これらの平均値の計測温度は本研究の実験温度と若干異なるが、供試材料は広範な電気伝導度と比誘電率を持つ媒質であると分かる。

### 3.2 TDT による伝播時間および信号強度計測

実験に用いた TDT プローブの模式図を図-3 に示す。直径 1.2 mm の 2 本のステンレス鋼棒をループ状に成型し、屈曲部を除いた各辺が平行になるように両者をエポキシ樹脂で固定した。そして、内側のロッドの両端を 50 Ω 同軸ケーブル (1.5D-2V, Fujikura 社) のシールド部、外側のロッドの両端をケーブルの芯線にそれぞれはんだ付けした。自作した TDT プローブの感知部 (点 B から点 C までの芯線) の長さは 47.4 mm, 97.3 mm, 197 mm の 3 種類で、内側と外側のプローブの間隔は 2.0 から 2.5 mm であった。なお、各プローブで得た TDT 波形を同一時間軸上で比較しやすいように、点 A から点 D までのトータル長が約 1.0 m になるように同軸ケーブル長を調整した。

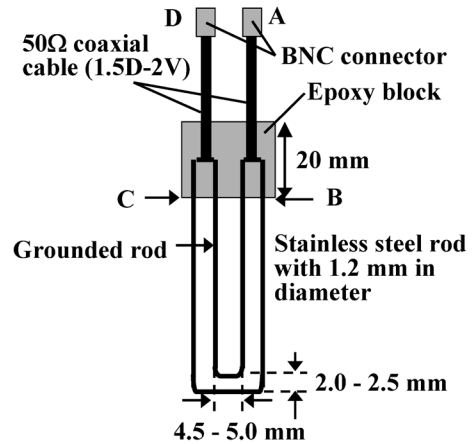


図-3 自作した TDT プローブの模式図.

Fig. 3 Schematic diagram of a TDT probe designed.

TDT 計測装置の概略を図-4 に示す。表-1 に掲載した媒質をプラスチック製円筒ボトル (内径 75 mm, 高さ 130 mm) の上部まで注ぎ、その水平断面の中央部に各 TDT プローブを鉛直に設置した。BNC/SMA 変換コネクタおよび 18 GHz 用テストリード (Atem 社) を介して、TDT プローブに接続した同軸ケーブルの一方をインパルス発生器 (AVH-S-1-C, AVTEC ELECTRO-SYSTEMS 社)、他方をサンプリングオシロスコープ (HP54750A, Hewlett-Packard 社) にそれぞれ接続した。

インパルス発生器が発信する信号の時間領域波形ならびに高速フーリエ変換で求めた周波数スペクトルの一例を、図-5 に示す。なお、比較のために、TDR100 ケーブルテスター (Campbell Scientific 社) が発するステップパルス信号の一例を、図-5 に併記する。インパルス信号は鋭い立ち上りを示し (図-5 (a)), また TDR100 の場合よりも高周波成分の強度が大きい (図-5 (b))。信号の時間的遅延の揺らぎを示すジッターは ±15 ps であるため (取扱説明書より抜粋)、本研究の伝播時間計測においても、15 ps 以下の変化は、ジッターによる誤差の範囲内にある。オシロスコープへの入力信号を許容電圧以下に調整するために、インパルス発生器の出力電圧を 6.0 V に設定し、さらに出力部に取り付けたアッテネータ (16 dB) で振幅を約 1/6.3 に減衰させた (図-4)。一方、使用したサンプリングオシロスコープの時間間隔分解能は 0.0625 ps であるが、本研究ではテキスト形式で出力される波形データのサイズとその解析の利便性を考慮し、TDT 波形の時系列データの取得点数を 1,024 点、各点の

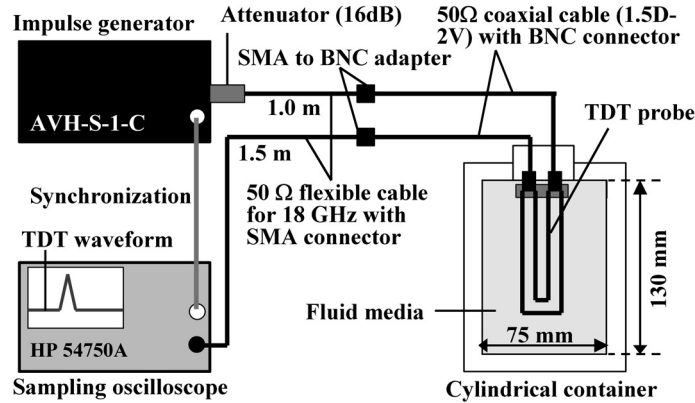


図-4 実験装置の模式図.

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup.

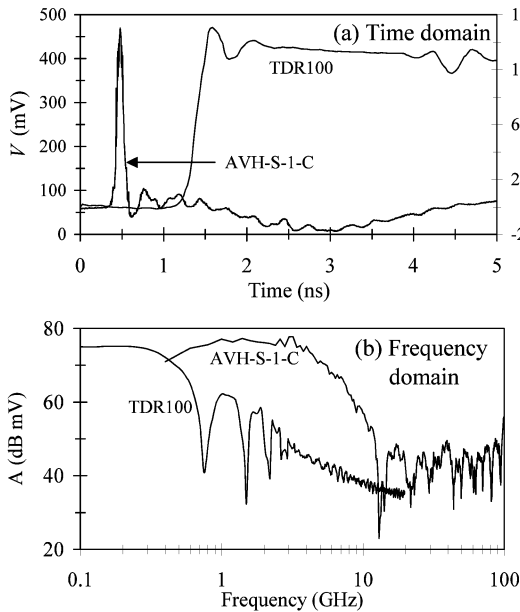


図-5 インパルス信号および TDR100 ケーブルテスターから発するステップパルス信号の (a) 時間領域および (b) 周波数領域波形.

Fig. 5 Transmitted signal and step-pulse signal emitted from a TDR100 cable tester expressed in (a) time domain and (b) frequency domain.

時間間隔を 19.5 ps とした。

液体中に設置した各 TDT プロブの一端から上述のインパルス信号を入力し、他方に接続したサンプリングオシロスコープで、透過した信号の TDT 波形を計測し

た。比誘電率の周波数依存性が小さい空気またはサラダ油を基準媒質として、2.2 節で述べた手法により  $t_{t,s}$  を決定した。この  $t_{t,s}$  と各液体で得た  $t_{t,m}$  に基づき、(8)式から伝播時間および(5)式から見かけの誘電率を決定した。なお、(8)式の計算に用いる基準媒質の比誘電率値には、表-1の数値を与えた。CaCl<sub>2</sub> 溶液についてはピーク点の振幅も計測し、電気伝導度との関連性を調べた。以上の計測は同一媒体で3反復し、その平均値を各媒体における計測値とした。

### 3.3 TDR による計測

直径 1.6 mm、長さが 100 mm の 3 本のステンレス鋼棒を、エポキシ樹脂で 6 mm 間隔に平行に固定し、中心のロッドを 50 Ω 同軸ケーブル (1.5 D-2 V, Fujikura 社) の芯部、外側の 2 本のロッドをシールド部に接続した。この TDR プロブを、前節で述べた各媒質が入った円筒ボットの中央に鉛直に設置し、ステップパルス信号 (図-5) の発生器とオシロスコープを内蔵した TDR100 ケーブルテスター (Campbell Scientific 社) で、各媒質の TDR 波形を計測した。そして、TDR100 専用の波形解析ソフト (PCTDR) を利用して、各媒質の見かけの誘電率および電気伝導度を決定した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 電気伝導度の評価

#### 4.1.1 時間領域波形

100 mm 長 TDR プロブおよび TDR100 ケーブルテスターで計測した、蒸留水 (DW) および電気伝導度の異なる CaCl<sub>2</sub> 溶液の TDR 波形の一例を図-6 に示す。蒸留水の TDR 波形には、プロブの始端部および先端部におけるステップパルス信号の反射を表す急峻な波形の

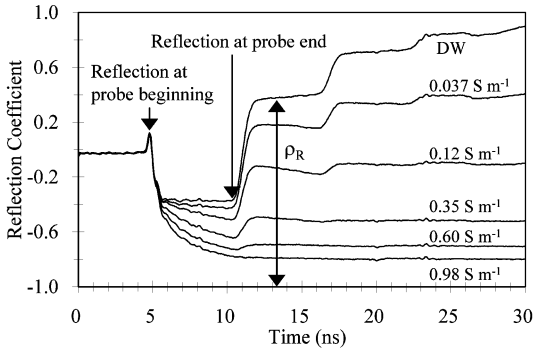


図-6 TDRプローブで計測した電気伝導度が異なるCaCl<sub>2</sub>溶液のTDR波形。

Fig. 6 TDR waveforms measured with a TDR probe in CaCl<sub>2</sub> solutions with different electrical conductivities.

立ち上がりが観察された。プローブ先端部の立ち上がりが見られる時間は、溶液の電気伝導度によらずほぼ一定であった。しかし、反射信号の反射係数 ( $\rho_R$ ) は、電気伝導度が高いほど大きく低下し、波形が平滑になる傾向が見られた。なかでも、最も電気伝導度が高い  $0.98 \text{ S m}^{-1}$  溶液では波形の平滑化が顕著であり、先端部の立ち上がり点を特定することができなかった。

感知部の長さが 47 mm, 97 mm, 197 mm の TDT プローブで計測した蒸留水および電気伝導度の異なる CaCl<sub>2</sub> 溶液の TDT 波形の一例を図-7 に示す。197 mm 長プローブで計測した  $0.98 \text{ S m}^{-1}$  溶液の TDT 波形は全体的に平坦であり、TDR の場合 (図-6) と同様に信号を得ることができなかった。しかし、この条件を除けば、全プローブにおいて複数の凹凸を伴った TDT 波形が計測された。47 mm 長プローブではおよそ 588.2 ns, 97 mm 長プローブではおよそ 589.6 ns, 197 mm 長プローブではおよそ 592.2 ns において、各 CaCl<sub>2</sub> 溶液における振幅が最大となる凸状の信号が計測された。この最大振幅を示す凸部は、インパルス発生器から発信され、最短時間でオシロスコープに到達した成分 (以後、第1信号と称する) である。

また、第1信号の後続には、同軸ケーブルとステンレス鋼棒との接合部や、エポキシ樹脂とプローブとの境界面 (図-3, 点Bおよび点C) などの誘電特性の不連続点で生じた反射波が連なっている。第1信号より振幅が小さくなること、また遅れてオシロスコープに到達することが、TDT で計測される反射信号の特徴である。使用した TDT プローブはインピーダンス整合を行った精密なものではないため、計測された TDT 波形から反射信号

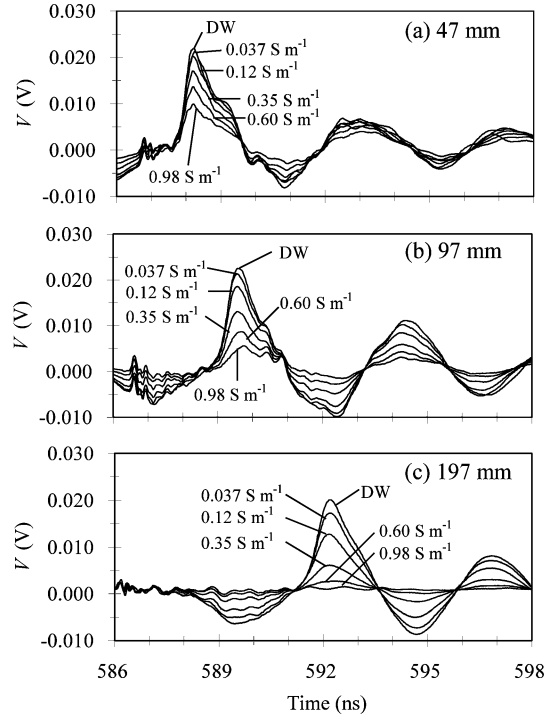


図-7 長さの異なる TDT プローブで計測した CaCl<sub>2</sub> 溶液の TDT 波形。

Fig. 7 TDT waveforms measured for different probe lengths in CaCl<sub>2</sub> solutions with different electrical conductivities.

を取り除くことは難しい。しかし、反射信号の振幅が第1信号よりも小さいため、TDT 波形の時系列データから振幅の最大値を検出するアルゴリズムを適用することで、ピーク点を容易に検出できた。

TDR で計測した反射信号と同様に (図-6), 各プローブの第1信号の振幅は電気伝導度が高い溶液ほど小さくなり (図-7), 電気信号のエネルギーが大きく吸収されることが分かった。また、同一の電気伝導度で各 TDT プローブの第1信号を比較すると、感知部が長いプローブほど振幅が小さかった。同様の現象は、TDR においても報告されている (Dalton and van Genuchten, 1986; Ren *et al.*, 1999)。

#### 4.1.2 振幅と電気伝導度との関係

各 TDT プローブで得た第1信号のピーク点の振幅 ( $V_{TDT}$ ) と電気伝導度 ( $\sigma_w$ ) との関係を図-8 に示す。なお、図-8 中の実線は、最小二乗法で決定した各 TDT プローブに対する校正曲線である。全 TDT プローブに共通して、 $\sigma_w$  が高い溶液ほど  $V_{TDT}$  が小さくなる傾向がみ

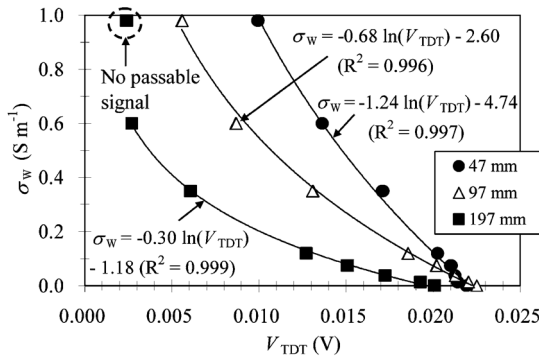


図-8 第一信号の強度 ( $V_{TDT}$ ) と  $\text{CaCl}_2$  溶液の電気伝導度 ( $\sigma_w$ ) との関係。

Fig. 8 Electrical conductivity of  $\text{CaCl}_2$  solutions ( $\sigma_w$ ) versus signal voltage ( $V_{TDT}$ ).

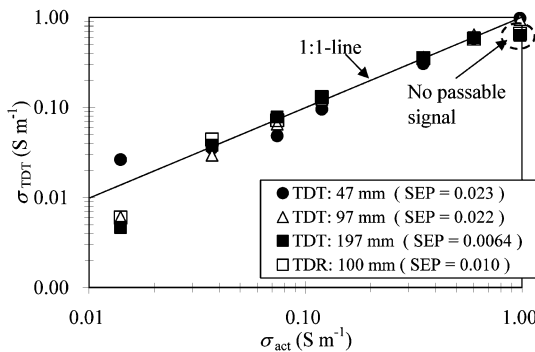


図-9 TDT および TDR で評価した  $\text{CaCl}_2$  溶液の電気伝導度 ( $\sigma_{TDT}$ ) と実際の電気伝導度 ( $\sigma_{act}$ ) との関係。

Fig. 9 Electrical conductivity ( $\sigma_{TDT}$ ) of  $\text{CaCl}_2$  solutions determined by TDT and TDR versus actual electrical conductivity ( $\sigma_{act}$ ).

られた。 $V_{TDT}$ の低下は、長いプローブほど著しい。これは電気信号の伝播経路長が大きいほど、溶液による電気エネルギーの総吸収量が大きくなるためである。また、197 mm 長 TDT プローブでは、 $0.98 \text{ S m}^{-1}$  溶液の透過信号を観測できなかったことから判断して(図-7)、電気伝導度の計測限界の上限は、 $0.60 \sim 0.98 \text{ S m}^{-1}$ の間であったと考えられる。一方、47 mm および 97 mm 長の TDT プローブでは、 $0.98 \text{ S m}^{-1}$  溶液中でも先鋭な第1信号が得られたことから、両者の計測可能域の上限は  $0.98 \text{ S m}^{-1}$  以上であったと推察される。

TDT プローブの校正曲線から決定した電気伝導度

( $\sigma_{TDT}$ ) と実際の電気伝導度 ( $\sigma_{act}$ ) との関係を、図-9 に示す。なお、図-9 には、真値との比較のための 1:1 線に加え、その線と破線で囲んだ計測不能条件を除いた  $\sigma_{TDT}$  値とのずれを予測標準誤差 (SEP) で表し、それぞれを図中に併記した。また、TDR との比較のために、100 mm 長 TDR プローブで計測値も併記した。

縦軸の  $\sigma_{TDT}$  を対数スケールで表しているため、 $0.014 \text{ S m}^{-1}$  溶液におけるばらつきが際立って見えるものの、各 TDT プローブで評価した  $\sigma_{TDT}$  は、TDR プローブの場合と同様に、概ね 1:1 線上に分布した(図-9)。このことは、振幅に基づいた電気伝導度評価の有効性を示すと考えられる。また、TDR を含めた全プローブの SEP を比較すると、197 mm 長 TDT プローブの数値が 0.064 と最小であった。このことから、インパルス信号を利用した TDT による電気伝導度の計測精度は、感知部長が大きいほど高いと考えられる。ただし、長いプローブほど第1信号の振幅の低下が大きくなるため、適用できる電気伝導度の上限が小さいことに留意する必要がある。

#### 4.2 TDT による見かけの誘電率の評価

ここまでの検証は導電性の媒質に対するものであったが、比誘電率の変化に対する TDT 波形の応答をみるために、各 TDT プローブで計測した基準媒質(空気またはサラダ油)、エタノール ( $1.0 \text{ kg kg}^{-1}$ )、蒸留水の TDT 波形を図-10 に示す。なお、本研究では空気を基準媒質として利用しているが、47 mm 長 TDT プローブについては、測定時に生じたコンピュータの誤作動が原因で空気の波形データが欠損したため、サラダ油を基準媒質とした。また、図中に併記した下方への矢印および括弧内の数値は、各媒質に対する第1信号のピーク時間を表す。

全 TDT プローブにおける3種類の媒質の第1信号を比較すると、蒸留水のピーク時間が最大で、次にエタノールが大きかった。図-10 に示さなかった他の媒質も含め、全媒質のピーク時間の序列は、表-1 に示した各媒質の比誘電率の大小関係の序列と完全に一致した。このことから、比誘電率が高い媒質ほど、インパルス信号の伝播時間が大きくなると考えられる。類似した比誘電率-伝播時間の関係は、TDR においても観察された(図は省略)。

また、媒質の種類によって、第1信号の尖度に、大きな違いがみられた(図-10)。エタノールを含めたアルコール類の誘電特性は強い周波数依存性を示し(Mashimo *et al.*, 1989, 1991)、緩和周波数も本研究の TDT や TDR の計測帯域内に存在することが知られている。そうした液体中では、高周波の信号ほど減衰が著しい。本研究では、広帯域の周波数成分から構成されるインパルス信号を利用したが、高周波信号の著しい減衰が原因で、エタ

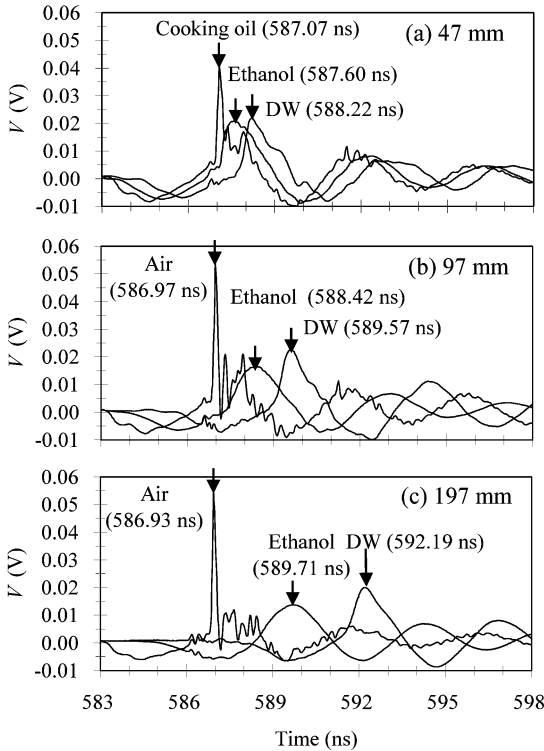


図-10 長さの異なる TDT プロブで計測した基準媒質 (空気またはサラダ油), エタノール, 蒸留水 (DW) の TDT 波形。

Fig. 10 TDT waveforms measured with different TDT probes for standard medium (air or cooking oil), ethanol, and distilled water (DW).

ノールの第 1 信号が緩やかな凸状を示す結果となったと考えられる。ただし、第 1 信号の形状の変化は、ピーク時間の評価の支障にはならなかった。TDR においても、プローブ先端の反射地点近傍の波形の勾配が緩やかになる現象が観察され、高周波信号の減衰が示唆された (図は省略)。

図-11 は、表-1 に示した全媒質の比誘電率 ( $\epsilon'$ ) と TDT および TDR プロブで計測した見かけの誘電率 ( $\epsilon'_a$ ) との関係である。サラダ油およびエタノールの  $\epsilon'$  値は本研究と異なる温度条件の計測値であるが、各 TDT プロブで計測した  $\epsilon'_a$  は、100 mm 長 TDR プロブと同様に全体的に 1:1 線の近傍に分布した。このことは、インパルス信号を利用した TDT により、TDR と同様に、 $\epsilon'$  の変化を検知できることを示唆している。

感知部長が見かけの誘電率の計測に与える影響を検証

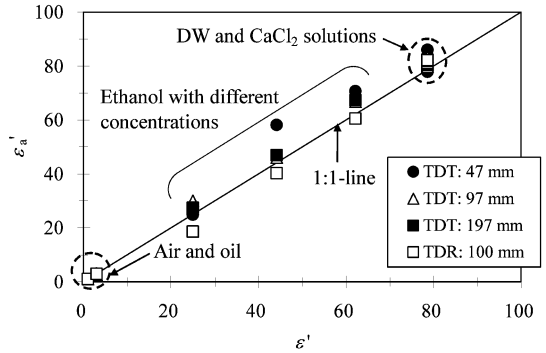


図-11 流体の比誘電率 ( $\epsilon'$ ) と TDT および TDR で評価した見かけの誘電率 ( $\epsilon'_a$ ) との関係。

Fig. 11 Apparent permittivity ( $\epsilon'_a$ ) measured by TDT and TDR versus real permittivity ( $\epsilon'$ ) of fluid media.

するために、比誘電率が 81.5 で与えられる  $\text{CaCl}_2$  溶液の電気伝導度と見かけの誘電率との関係を図-12 に示す。なお、長さ 100 mm の TDR プロブで計測した  $\epsilon'_a$  も、図中に併記した。4.1.1 節で述べたように、100 mm 長 TDR プロブでは  $0.98 \text{ S m}^{-1}$  溶液に対する反射信号を得ることができなかった (図-6)、それを除けば、各プローブで得た  $\epsilon'_a$  は概ね破線の近傍に分布した。このことは、反射信号が得られる条件においては、本研究に用いた TDR 計測器による見かけの誘電率の計測が、電気伝導度、すなわち複素誘電率の虚数部の影響を受けにくかったことを示している。一方、TDT では、第 1 信号の減衰による TDT 波形の平滑化 (図-7) が原因で、97 mm および 197 mm 長の TDT プロブで計測した  $0.60 \text{ S m}^{-1}$  および  $0.98 \text{ S m}^{-1}$  溶液に対するピーク時間の検出が難しくなり、 $\epsilon'_a$  は破線から大きく離れて分布した。しかし、それらを除く溶液では先鋭な第 1 信号が得られ (図-7)、各 TDT プロブで得た  $\epsilon'_a$  は TDR と同様に虚数部の影響を受けず、破線の近傍に分布した。

第 1 信号の減衰がピーク時間の評価に影響を及ぼさない電気伝導度条件下において、図-12 中の破線に対する  $\epsilon'_a$  のばらつきを評価するために、ピーク位置が明瞭だった  $0.35 \text{ S m}^{-1}$  以下の条件における  $\epsilon'_a$  の平均値 (Ave.) と標準誤差 (SE) を求め、図-12 に併記した。47 mm, 97 mm, 197 mm 長の TDT プロブの SE はそれぞれ 1.22, 0.56, 0.16 であったことから、TDT による導電性溶液の  $\epsilon'_a$  の計測精度は、感知部長いプローブほど高くなることが判明した。本研究のようなマイクロ波信号の時間領域計測では、ピーク時間の測定誤差が原因で、伝播時間のばらつきが発生する。(5)式より、見かけの誘



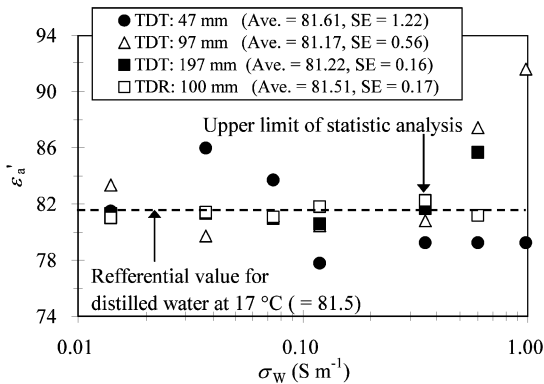


図-12 TDT および TDR で評価した  $\text{CaCl}_2$  溶液の見かけの誘電率 ( $\epsilon'_a$ ) と電気伝導度 ( $\sigma_w$ ) との関係。

Fig. 12 Apparent permittivity ( $\epsilon'_a$ ) of  $\text{CaCl}_2$  solutions determined by TDT and TDR versus actual electrical conductivity ( $\sigma_w$ ).

電率は伝播時間と感知部の長さの比の平方で与えられる。ばらつきに伴う比の変化量は、感知部が長いプローブほど小さくなることから、TDT による見かけの誘電率の計測精度が感知部の長さに依存する原因と考えられる。

また、最も高い精度を示した 197 mm 長 TDT プローブの SE は、100 mm 長の TDR プローブの SE 値 (= 0.17) とほぼ等しかった。このことは、本研究のインパルス信号を利用した TDT により、TDR と同程度の精度で見かけの誘電率を計測するためには、TDR の場合よりも長い感知部を持つプローブを利用する必要があると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、広帯域インパルス信号を利用した時間領域透過法による見かけの誘電率および電気伝導度の同時計測の可否およびその精度と適用限界を検討するために、自作した小型 TDT プローブを用いて、誘電特性の異なる種々の液体を対象に、透過信号の伝播時間および強度を計測した。Harlow *et al.* (2003) の方法に習って、最も短時間でオシロスコープに到達した第一信号を解析した結果、ピーク時間から求められる伝播時間から見かけの誘電率、ピーク電圧から電気伝導度をそれぞれ決定できることが明らかになった。導電性の媒質中では、TDT プローブの感知部の長さに応じて、両者の計測に適用できる条件に限界がある。しかし、その限界値を超

えない範囲であれば、感知部が長いプローブほど、高精度で見かけの誘電率と電気伝導度を決定できることが明らかになった。

本研究では、プローブの小型化のため、感知部をループ状に成型した TDT プローブを提案した。このプローブは、土壤への貫入が比較的容易である従来の平行ロッド型 TDR プローブと違って、土壤に挿入することができない。そのため、TDT プローブの設置には土壤の掘削および覆土が必要であり、土壤が乱れやすいことから、形状の改善が必要である (Blonquist *et al.*, 2005)。また、TDR に比べ、TDT を実施するための小型計測ユニットや波形解析専用ソフトウェアなどが十分に整備されていないことも問題である。しかしながら、第一信号のピークから見かけの誘電率および電気伝導度を決定するインパルス信号を利用した TDT は、TDR よりも遥かに単純なアルゴリズムで両者を決定可能できる利点を備えており、今後のさらなる発展が期待できると考える。

今後は、土壤に対する有効性の検証に加え、上述のプローブ形状の改善に取り組むことにより、TDT による土壤水分および溶質濃度計測の実用性向上を目指す予定である。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、長崎大学の下町多佳志准教授には複素誘電率およびその計測に関する貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 引用文献

- Blonquist Jr., J.M., Jones, S.B. and Robinson, D.A. (2005): A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*, **314**: 235-245.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. and Rhoades, J.D. (1984): Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, **224**: 898-990.
- Dalton, F.N. and van Genuchten, M.Th. (1986): The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, **38**: 237-250.
- Harlow, R.C., Burke, E.J. and Ferré, P.A. (2003): Measuring water content in saline soils using impulse time domain transmission techniques. *Vadose Zone Journal*, **2**: 433-439.
- Hook, W.R., Ferré, T.P.A. and Livingston, N.J. (2004):

- The effects of salinity on the accuracy and uncertainty of water content measurement. *Soil Science Society of America Journal*, **68** : 47-56.
- 石田智之 (2003) : 誘電率による粒子表面の同定. 土のコロイド現象, 学会出版センター, 129-142.
- Jones, S.B., Wraith, J.M. and Or, D. (2002) : Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, **16** : 141-153.
- Mashimo, S., Kuwabara, S., Yagihara, S. and Higashi, K. (1989) : The dielectric relaxation of mixtures of water and primary alcohol. *J. Chem. Phys.*, **90** (6) : 3292-3294.
- Mashimo, S., Umehara, T. and Redlin, H. (1991) : Structure of water and primary alcohol studied by microwave analyses. *J. Chem. Phys.*, **95** (9) : 6257-6260.
- Noborio, K. (2001) : Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, **31** : 213-237.
- Ren, T., Noborio, K. and Horton, R. (1999) : Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Science Society of America Journal*, **63** : 450-457.
- 国立天文台 (2000) : 理科年表 2001 (第 74 冊), 丸善株式会社.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D. and Friedman, S.P. (2003a) : A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, **2** : 444-475.
- Robinson, D.A., Schaap, M., Jones, S.B., Friedman, S.P. and Gardner, C.M.K. (2003b) : Considerations for improving the accuracy of permittivity measurement using time domain reflectometry : Air-water calibration, effects of cable length. *Soil Science Society of America Journal*, **67** : 62-70.
- Robinson, D.A., Schaap, M.G., Or, D. and Jones, S.B. (2005) : On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials. *Water Resources Research*, **41** : W02007, doi : 10.1029/2004WR003816.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Research*, **16** : 574-582.
- Topp, G.C., Lapen, D.R., Young, G.D. and Edwards, M. (2001) : Evaluation of shaft-mounted TDR readings in disturbed and undisturbed media. *Proc. of TDR 2001 : Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications*, <http://www.iti.northwestern.edu/tdr/tdr2001/proceedings/>.
- Topp, G.C., Lapen, D.R., Edwards, M.J. and Young, G.D. (2003) : Laboratory calibration, in-field validation and use of a soil penetrometer measuring cone resistance and water content. *Vadose Zone Journal*, **2** : 633-641.

## 要 旨

広帯域インパルス信号を利用した時間領域透過法 (TDT) による見かけの誘電率および電気伝導度の同時計測法を確立するために、自作した小型 TDT プローブにより、誘電特性の異なる種々の媒質中を伝播する透過信号の TDT 波形を計測した。最も短時間で感知部を伝播した信号 (第一信号) を解析した結果、第一信号のピーク時間から見かけの誘電率、ピーク電圧から電気伝導度をそれぞれ決定することができた。感知部が長い TDT プローブほど電気信号の減衰が大きいため、計測可能条件は制限されるものの、見かけの誘電率および電気伝導度は高精度で決定できることが確認された。また、従来の時間領域反射法 (TDR) との比較により、TDR と同程度の精度を確保するためには、TDT プローブの感知部長を TDR の場合より長くする必要があることが分かった。

受稿年月日 : 2008 年 1 月 25 日  
受理年月日 : 2008 年 6 月 13 日