

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

宮本英揮*・筑紫二郎*・呉 宅根*

Measurement of Water Level, Electrical Conductivity, and Sediment Surface Level Using Time Domain Reflectometry

Hideki MIYAMOTO*, Jiro CHIKUSHI* and Taek-Keun OH*

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

Abstract

Time domain reflectometry (TDR) has been drawing a lot more attention as a way to identify the interfaces in between different dielectric media. To monitor water level (h_w) with electrical conductivity (σ_w) and sediment surface level (h_{sed}) in river by applying TDR, we developed a mathematical model to evaluate these properties and verified its effectiveness by measuring the dielectric constant of conductive fluid media and a soil material (sand) using TDR probes with different lengths. Although the determination of h_w in extremely high-conductive media was technically incompleting, we could successfully determine h_w , σ_w , and h_{sed} with a probe in moderate-conductive media. Judging from the relatively good agreement between properties evaluated from the model and observed data, we concluded the TDR measurement could be useful to evaluate h_w , σ_w , and h_{sed} with sufficient accuracy for practical use within an appropriate conductive range. In actual application of TDR to a river monitoring, the calibration of the probe used must be required to conduct accurate measurement based of the model.

Key words : Time domain reflectometry, Microwave, Dielectric constant, Water level, Electrical conductivity, Sediment surface level

1. はじめに

集中豪雨により河川が増水すると、水流による洗掘が原因で河川を横断する橋梁が傾斜し、列車や自動車の安全運行が脅かされることがある。安全性の高い防災・減災計画を構築するためには、河川構造物の施工方法の改良や補強などによる強度向上に加え、構造物の危険度を評価することが必要である。とりわけ、洗掘に伴う危険度判定には、従来の水位を主体としたモニタリングに加え、河川中の土砂動態を把握し河床変動を監視することが重要である。また、近年、地域住民の憩いの場あるいは環境教育および学習の場として、河川を含めた水辺空間の親水機能が再確認されている。水辺の生態系の生育

環境や景観の保全には、河川の水質や底泥の監視体制の強化が重要である。このような社会の要請に対応するためには、河床や水質を含めた包括的なモニタリングを実施することが必要である。しかし、台風や集中豪雨などによる濁流中で、河川の水質や洗掘の状況を連続的に観測し得る手法は確立されておらず、早急な対応が期待されている。

土壌科学や水文学関連分野では、土中の水分および電気伝導度の計測に時間領域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) が広く活用されているが、近年、この TDR の持つ境界面検知能を活用した境界面計測が注目されている。TDR による境界面計測は、複素誘電率の実数部 (以後、誘電率と呼ぶ) の不連続点において生じ

*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

キーワード : 時間領域反射法, マイクロ波, 誘電率, 電気伝導度, 土砂表面位

るマイクロ波の反射を利用したものである。1997年にはドイツの Krohne 社, Endress+Hauser 社, Vega 社などから、液面および粉粒面を検知できる TDR 方式の境界面計測計が発売され、徐々に普及が進んでいる。計測限界や計測対象媒体は機種によって異なるものの、空気との境界面を検知する場合には、計測対象媒体の誘電率が 1.8 以上であれば、既往の計測計は概ね適用できるとされている (松山, 2003)。

TDR を境界面計測に用いる利点は数多い。マイクロ波の速度や強度は、気体種、大気圧、大気中の粉塵や巻き上げられた水中の懸濁土粒子などにほとんど影響されない。そのため、TDR は水、液体燃料、アルコール類、油類、スラリーなどの液状の媒体をはじめ、セメント、フライアッシュ、石灰粉といった粉粒体など、工業用タンク内の物質計測などに広く利用されている (Cataldo *et al.*, 2006; Thomsen *et al.*, 2000; 谷, 2003)。土壌および水文学関連分野では、マリオット給水装置内の液体量計測、乾燥した土壌中の浸潤前線の検知、水中に堆積した土砂の洗掘深の計測などへの利用も始まっている (Thomsen *et al.*, 2000; Yu and Yu, 2006; 筑紫, 1996)。また、市販の TDR 計測器やソフトウェアの種類が豊富で、多チャンネルのマルチプレクサーを複数接続することにより、最大で 512 点の多点同時計測が可能である。さらに、一組のセンサーで、電気伝導度を計測できることも大きな利点である。

以上のような利点を持つ TDR を利用することにより、水位、水質、河床などの包括的監視が実施できる可能性が高い。しかし、これまでに河川のモニタリングへの適用事例はほとんど見られないため、水位が動的に変化する条件における電気伝導度の評価方法、計測に用いることができるプローブの限界長、土砂表面位の評価方法に関する知見の早期収集が急務である。

そこで本稿では、市販の TDR ケーブルテスターを利用して行った水位、電気伝導度、水中における土砂表面位の計測実験について紹介し、三者の計測に対する TDR の有効性とその適用限界についての考察を示した。また、水位と電気伝導度の同時計測および土砂表面位の評価モデルを示し、実測値に対するモデルの適合性についても検討した。

2. TDR による境界面計測原理

2.1 誘電率および電気伝導度

誘電率および電気伝導度が異なる物質 A および B の層状堆積物に、長さ L (m) の TDR プローブを先端から h_B (m) まで垂直に挿入した場合に得られるマイクロ波の TDR 波形の一例を図-1 に示す。物質 A の誘電率 (ϵ_A)

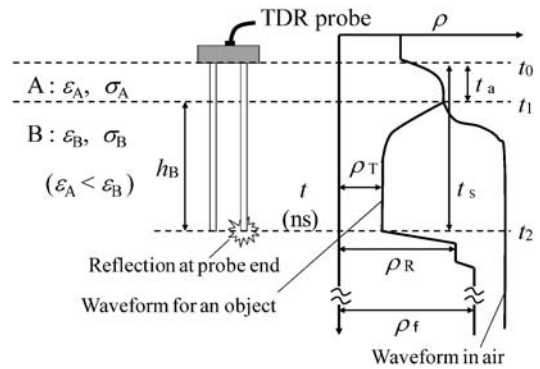


図-1 TDR プローブを誘電体に部分的に挿入したときの TDR 波形の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of a TDR waveform in inserting a probe partly into a dielectric material.

が B の誘電率 (ϵ_B) と大きく異なる場合、プローブの根端 (t_0) と先端 (t_2) に加え、A-B の境界面 (t_1) で反射が生じ、各位置で反射係数 (ρ) が大きく変化する。物質 A および B のトータルの誘電率 (ϵ_{eff}) は、プローブ部を往復するマイクロ波の伝播時間 (t_s)、すなわち TDR 波形上の t_2 と t_0 の差に基づき、次式で決定できる。

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{ct_s}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 c は光速 ($=3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) を示す。

一方、マイクロ波の電気エネルギーは、プローブを伝播する過程で水分子などの周囲の極性分子に運動エネルギーとして吸収されることが原因で、与えたマイクロ波の信号強度が減衰する。信号強度の低下は導電性の高い媒体ほど、また伝播経路であるプローブが長いほど大きく、その影響は反射波の末端部における反射係数 (ρ_i) に現れる。この原理を活用すると、物質 A および B のトータルの電気伝導度 (ϵ_{eff}) は、広範囲の導電媒体に適用できる、次の Heimovaara *et al.* (1995) の式で決定できる。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{s}{R - R_c} + t \quad (2)$$

R は TDR で計測される物質のインピーダンス、 s および t は個々のプローブの校正係数、 R_c はケーブルテスターからプローブ根端までのインピーダンスであり、プローブ根端を短絡させることによって決定できる (登尾, 2003)。

2.2 水位・電気伝導度の同時計測モデル

図-1 に示した 2 相水平配列系にプローブを垂直に設置したときに得られるトータル誘電率 (ϵ_{eff}) の平方根

は、次式で表すことができる (Topp *et al.*, 1982; Robinson *et al.*, 2003b)。

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \nu_A \sqrt{\epsilon_A} + \nu_B \sqrt{\epsilon_B} \quad (3)$$

ここで、 ν_A および ν_B はそれぞれ物質 A および B の体積分率を表す。この (3) 式を空気および電解質を含んだ水 (以後、水と略す) の 2 相水平配列系に適用すると、

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{h_w}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{L-h_w}{L} \sqrt{\epsilon_a} \quad (4)$$

が得られる。 ϵ_w および ϵ_a は、それぞれ水および空気の誘電率、 h_w (m) はプローブ先端を基準点とした場合の水位を表す。この (4) 式を変形すると、水位とトータルの誘電率との関係を表す Moret *et al.* (2004) の式が得られる。

$$h_w = L \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} - \sqrt{\epsilon_a}}{\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_a}} \quad (5)$$

一方、 σ_{eff} も各媒体の電気伝導度の合成値として表すことができる。本研究では、Yu and Yu (2006) が示した並列抵抗モデルを拡張し、 σ_{eff} を次式で定義した。

$$\sigma_{\text{eff}}^{\beta} = \frac{\nu_A \sigma_a^{\beta} + \nu_B \sigma_b^{\beta}}{L} \quad (6)$$

σ_A および σ_B は、物質 A および B の電気伝導度 (S m^{-1}) であり、 β は本研究で新たに導入した非線形パラメータである。空気および水の電気伝導度をそれぞれ σ_a ($\equiv 0$) および σ_w として、(6) 式を空気-水の 2 相平行配列系に適用すると、

$$\sigma_{\text{eff}}^{\beta} = \frac{h_w}{L} \sigma_w^{\beta} + \frac{L-h_w}{L} \sigma_a^{\beta} = \frac{h_w}{L} \sigma_w^{\beta} \quad (7)$$

となる。これを変形すると、次式が得られる。

$$\sigma_{\text{eff}} = \left(\frac{h_w}{L} \right)^{1/\beta} \sigma_w \quad (8)$$

ここで、 $\beta=1$ である場合、 ϵ_{eff} はプローブ長に対する水位の相対値と水の電気伝導度の単純な積で与えられることになる。ところが、後述する実験より、空気-水の 2 相平行配列系における β は必ずしも一定値で与えられず、水の電気伝導度に強く依存することが明らかになった。そこで、本研究では、 β が水の電気伝導度に依存するパラメータとして、次の対数関数で経験的に与えられると考えた。

$$\beta = a \ln \sigma_w + b \quad (9)$$

(9) 式中の a および b は、個々のプローブに依存するパラメータである。(9) 式を (8) 式に代入すると、

$$a (\ln \sigma_w)^2 + (b - a \ln \sigma_{\text{eff}}) \ln \sigma_w + \ln \frac{h_w/L}{\sigma_{\text{eff}}} = 0 \quad (10)$$

となり、これを σ_w について解くと、最終的に次式が得ら

れる。

$$\sigma_w = \exp \left(\frac{-(b-a \ln \sigma_{\text{eff}}) + \sqrt{(b-a \ln \sigma_{\text{eff}})^2 - 4a \ln \frac{h_w/L}{\sigma_{\text{eff}}}}}{2a} \right) \quad (11)$$

(11) 式の特徴から判断して、水位が動的に変動する条件において、マイクロ波の伝播経路に部分的に存在する水の電気伝導度を決定するためには、 h_w と σ_{eff} の両者を決定する必要がある。TDR は、両者を独立したプロセスで決定できるため、(11) 式中のパラメータ a および b が既知である場合には、単一プローブで水位と電気伝導度とを同時に決定できることになる。

2.3 土砂堆積量の計測モデル

プローブが完全に水没した状態で、水中の土砂に先端から h_{sed} (m) までプローブを垂直に挿入すると、プローブの根端、境界面、終端における反射を伴った TDR 波形が計測される。そうした水-土砂の系にも (3) 式を適用すると、次の Yu and Yu (2006) の式が得られる。

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{h_{\text{sed}}}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{L-h_{\text{sed}}}{L} \sqrt{\epsilon_s} \quad (12)$$

ここで ϵ_{sed} は、堆積した土砂層の誘電率を示す。(13) 式中の堆積土砂層についても (3) 式を適用し、 ϵ_{sed} を水と土砂 (ϵ_s) の誘電率とそれらの体積分率、すなわち固相率 (θ_s) の関数として表すと、

$$\sqrt{\epsilon_{\text{sed}}} = (1-\theta_s) \sqrt{\epsilon_w} + \theta_s \sqrt{\epsilon_s} \quad (13)$$

となる。この (13) 式を (12) 式に代入すると、

$$h_{\text{sed}} = \frac{L}{\theta_s} \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} - \sqrt{\epsilon_w}}{\sqrt{\epsilon_s} - \sqrt{\epsilon_w}} \quad (14)$$

が得られる。(14) 式から判断して、理論上、 h_{sed} は ϵ_{eff} の平方根の一次関数で与えられること、両者の傾きは固相率とプローブ長の大小で決定されることが分かる。

3. 実験

3.1 ケーブルテスター

本研究の反射波形の計測実験には、TDR100 ケーブルテスター (Campbell Scientific 社製) を使用した。TDR 100 は、電圧 0.25 V、パルス幅 14 μs 、立ち上がり時間 300 ps 以下の広帯域のステップパルス発生器と、それを受信するオシロスコープの両者を内蔵した計測器である。ステップパルスに含まれる信号の最大周波数は 1.75 GHz 程度である (Robinson *et al.*, 2003a)。

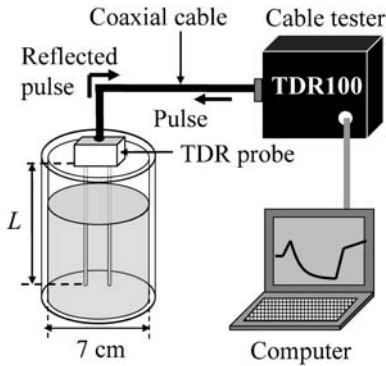


図-2 実験装置の概略図

Fig. 2 Schematic diagram of experimental stuff.

3.2 電気伝導度が異なる液体の水位変動実験

水位変動実験の概略を図-2に示す。 $L=0.48\text{ m}$ 、直径 4 mm の2本のステンレス鋼棒を 10 mm 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、他方をケーブル芯部に接続した。そして、接続部全体をエポキシ樹脂で固定することにより2線式平行プローブを作製した。このプローブを内径 0.07 m 、高さ 0.52 m の亚克力製円筒容器の水平断面中央に設置し、容器下端から温度 15°C の蒸留水(DW)、水道水(TW)、電気伝導度の異なる CaCl_2 溶液($\sigma_w=0.008, 0.016, 0.040, 0.082, 0.112, 0.200\text{ S m}^{-1}$)の水位を、 0.05 m 間隔で段階的に増加させた。なお、日本の河川水の電気伝導度(18°C)の平均値が 0.011 S m^{-1} (川村・永山, 1981)であるが、本実験では、それを大きく超える高導電性溶液も計測対象とした。

水位が異なる条件における各液体のTDR波形を、TDR100ケーブルテスターで計測し、TDR100専用の波形解析ソフト・PCTDRでトータルの電気伝導度を決定した。パルスの伝播経路に反射面を持つ本実験では、多重反射を伴った凹凸の激しい波形が計測される。PCTDRに代表される既存のソフトウェアを利用して、こうした波形から適切に反射地点を決定することが難しい。よって、得られた波形をスプレッドシートに取り込み、空气中で計測した波形との分岐点から水面に置ける反射地点を、また、波形底部と立ち上り部に与えた2つの近似直線の交点からプローブ先端における反射地点を決定した。そして、この反射地点の時間値を(1)式に代入することにより、空気-水の2相系に対するトータルの誘電率を計算した。

プローブ長の大小による水位および電気伝導度計測への影響を検討するために、 $L=0.97\text{ m}$ 、直径 5 mm の2本

のステンレス鋼棒を 20 mm 間隔で固定したプローブを、高さ 1.0 m の同型の円筒容器の中央に設置し、蒸留水および水道水の水位を 0.1 m 間隔で増加させた。そして、各水位で得た蒸留水および水道水に対するトータルの誘電率を、 0.48 m 長プローブで得た結果と比較した。なお、 $L=0.97\text{ m}$ 長プローブを用いた実験では電気伝導度の計測を行っていないため、本研究で示す電気伝導度の計測結果は、 0.48 m 長プローブのものに限られる。

3.3 土砂表面位の計測実験

前節の水位変動実験に使用した 0.48 m 長プローブおよび 0.97 m 長プローブを、それぞれ高さ 0.52 m および 1.0 m の円筒容器の中央に設置し、その内部を蒸留水で満たした。なお、 0.97 m 長プローブを設置した容器内の蒸留水温度は 15°C であるが、 0.48 m 長プローブを用いた実験は夏季に行ったため、水温は 35°C と非常に高かった。

実験に用いた土砂は、粒径が $0.105\sim 0.59\text{ mm}$ の珪砂(西戸崎興産)である。これを水道水および蒸留水で十分に攪拌洗浄を繰り返して風乾し、供試土とした(以後、砂と略す)。各プローブを設置した容器に、蒸留水または水道水が常時満水状態を維持した状態で砂を段階的に沈降充填した。そして、前節で使用した同一の計測器ならびに手法により、土砂表面位が増加する過程におけるTDR波形を計測し、各表面位におけるトータルの誘電率を決定した。なお、砂の充填量と容器の体積に基づき、プローブ根端まで砂を充填した際の平均固相率を評価した結果、 0.48 m 長プローブを設置した場合が $0.51\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 、 0.97 m 長プローブの場合が $0.53\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ であった。

4. 結果と考察

4.1 水位および電気伝導度の同時計測

4.1.1 液体中のTDR波形

0.48 m 長プローブで測定したTDR波形の中から、水位 $h_w=0.25\text{ m}$ における各液体の波形を図-3に示す。最も電気伝導度が低い蒸留水(DW)に対する波形は、プローブ先端の t_2 において先鋭な立ち上りを示した。他の液体においても、蒸留水の場合と等しい t_2 値が得られた。これは伝播速度の計測に、電気伝導度が影響しなかったことを示す。

また、点 t_2 の前後に現れた波形の立ち上りは、高電気伝導度の溶液ほど緩やかになる傾向がみられた。なかでも、最も電気伝導度が高い 0.200 S m^{-1} 溶液では、波形の立ち上り部を計測することができず、また点 t_2 も特定できなかった。水位が極端に低い場合でも、波形の著しい凹凸により、点 t_2 を適切に検出できなかった。そのため、 0.200 S m^{-1} 溶液に対する誘電率の計測を断念した。

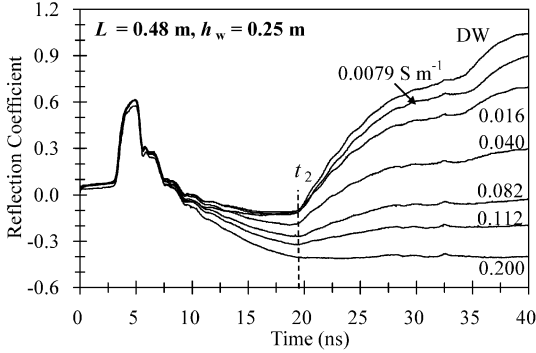


図-3 0.48 m 長プローブで計測した水位 0.25 m における液体の TDR 波形

Fig. 3 TDR waveforms measured with a 0.48-m long probe in different conductive solutions.

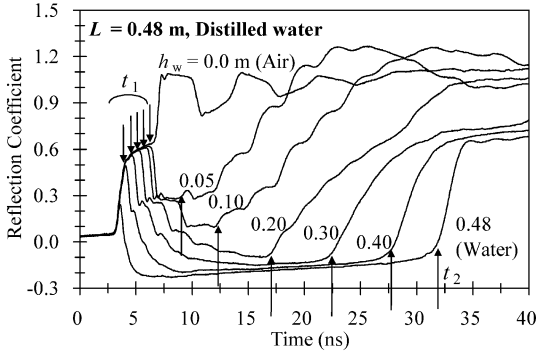


図-4 0.48 m 長プローブで計測した蒸留水の水位 (h_w) が異なる条件下における TDR 波形

Fig. 4 TDR waveforms measured with a 0.48-m long probe in different levels (h_w) of distilled water.

異なる水位条件における波形の一例として、0.48 m 長プローブで計測した蒸留水の波形を図-4 に示す。なお、図-4 中の下方への矢印は水面、上方への矢印はプローブ先端における反射地点を示す。蒸留水の 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 は右方に位置する傾向がみられた。他の溶液に加え、0.98 m 長プローブを使用した場合にも、類似した水位と点 t_1 および点 t_2 の対応関係が観察された。

上部に位置する空気の誘電率は 1 であるため、この誘電率値と $t_0 - t_1$ 間の時間差とを (1) 式に代入して得られる L から、水面の位置を評価することができる。しかし、点 t_2 に比べ、水位に対する点 t_1 の変化量が小さいこ

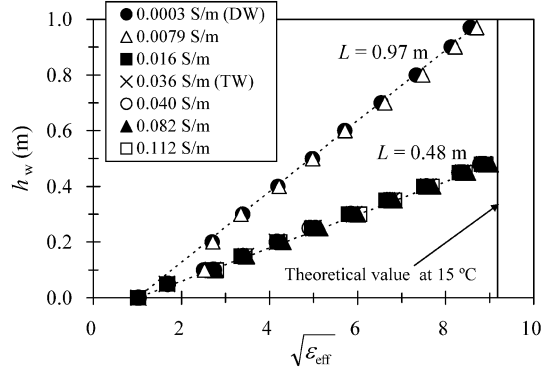


図-5 長さ 0.48 m および 0.97 m のプローブで測定したトータル誘電率の平方根 ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) と各液体の水位 (h_w) との関係。破線は (5) 式で求めた理論値を示す

Fig. 5 Water level (h_w) for the square root of dielectric constant ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) measured with a 0.48-m long probe and a 0.97-m long probe in different solutions. Broken lines in the figure indicate theoretical values estimated from eq. (5).

と、また点 t_1 の決定方法の妥当性が十分に検討されていないことなどから、現段階では、点 t_2 との対応関係を利用して水位を決定する方が、高い信頼性を確保できると考えられる。

4.1.2 誘電率と水位との関係

図-5 は、0.48 m 長および 0.97 m 長プローブの TDR 波形の点 t_2 から決定した ϵ_{eff} の平方根 ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) と各液体の水位 h_w との関係である。なお、点 t_2 を決定できなかった 0.200 S m^{-1} における $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は示していない。理科年表によれば、15°C の水の誘電率は 82.2、すなわち容器が液体で満水状態にある場合の $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は 9.07 である。この理論値と各液体における満水時の実測値とを比較すると、各プローブで計測した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は 9.07 より小さかった。この理論値との乖離は、プローブのサイズが非常に大きいため、低誘電性の媒体であるアクリル容器の影響が $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ の計測に及んだものと考えられる。

h_w が 0.1 m 以下の低水位条件では、多重反射に伴う波形の凹凸が顕著になったことが原因で点 t_2 の特定が困難になり、各プローブで計測した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は大きな誤差を伴った。しかしそうした条件を除けば、 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は液体の電気伝導度の大小によらず、 h_w の増加とともに同一勾配で増加した。 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ と水位との関係は直線で与えられ、その関係が各プローブ長によって異なることは、(5) 式が与える両者の関係と一致している。(5) 式の適合性を確認する

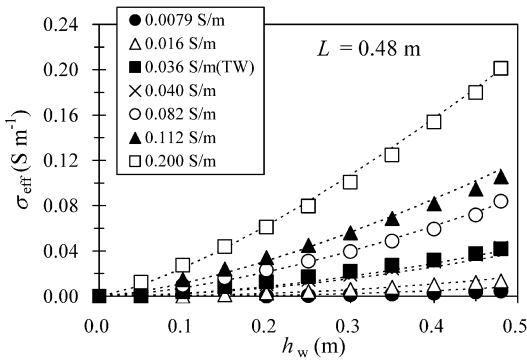


図-6 長さ0.48 mのプロープで測定された電気伝導度 (σ_{eff}) と水位 (h_w) との関係。破線は(8)式のフィッティングカーブを示す

Fig. 6 Electrical conductivity (σ_{eff}) measured with a 0.48-m long probe for water level (h_w) in different fluid media. Fitting functions of eq. (8) for experimental data plots are expressed by broken lines.

ために、満水時に計測された各プロープの ϵ_{eff} を水の誘電率、また空気の誘電率を1と考え、(5)式から $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}} - h_w}$ 関係を試算して図-5に破線で併記した。(5)式は、各プロープで得た全計測溶液に対する実測値と一致していることから、モデルの適合性の高さを確認することができた。

河川にプロープを設置する際には、水流に対する強度を確保するために、何らかの手法でプロープを河川構造物に固定する必要がある。本実験ではアクリル材が計測値に影響を与えたように、周囲の構造物も測定値に影響を与える可能性がある。よって、(5)式に基づいて水位を評価する場合には、河川の構造物に固定した後、一度プロープ根端まで完全浸水させた状態で水の誘電率を計測し、これをモデルに与えることにより、計測精度の向上を図る必要があると考えられる。

4.1.3 電気伝導度

電気伝導度の計測結果の一例として、0.48 m 長プロープで計測した σ_{eff} と h_w との関係を図-6に示す。なお、蒸留水に対する計測値は常にゼロであったため、図-6から除外した。液体の電気伝導度が高いほど、 σ_{eff} は h_w とともに大きく増加した。また、両者の関係は曲線で与えられ、その曲率が液体の電気伝導度によって異なった。

$h_w - \sigma_{\text{eff}}$ 関係に及ぼす液体の電気伝導度 σ_w の影響を定量化するために、本研究で定義した(8)式を実測値にフィッティングさせ、(8)式中のパラメータ β の最適化を行った。なお、最適化した各液体の β に対するフィッ

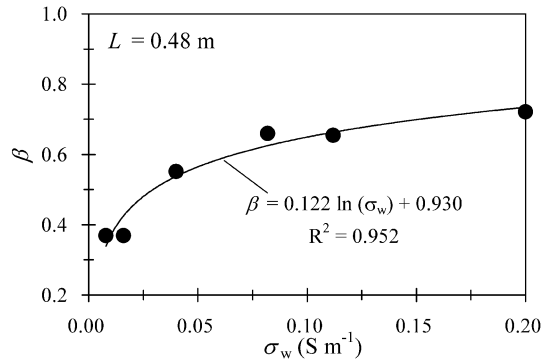


図-7 液体の電気伝導度 (σ_w) とパラメータ β との関係

Fig. 7 A parameter β for electrical conductivity of fluid media (σ_w).

ティングカーブを、図-6中に破線で追記した。図-7は、各溶液の β 値と σ_w との関係である。 β は、液体の電気伝導度が高いほど大きくなった。この結果に(9)式をフィッティングして得たパラメータ a および b の値は、それぞれ0.122 および0.930であった。

2.2節で述べたように、本研究では、部分的にプロープを浸した場合の電気伝導度の評価式として、(11)式を導出した。図-8は、一連の実験から得た a および b の値を(11)式に代入し、プロープ長に対する水位の相対値 h_w/L (以後、相対水位と呼ぶ) に対する σ_w 値を評価した図である。なお、図中の破線は、各液体の電気伝導度である。

相対水位が小さい条件では、モデルから求めた σ_w 値と破線とのずれが大きかった。同一液体の計測では、水位が変動しても液体自身の電気伝導度は変化しないため、ここでのずれはモデルの持つ誤差であると考えられる。しかし、相対水位が高くなるほど誤差は小さくなる傾向がみられ、 0.5 m^{-1} 以上では計算値とのずれは比較的小さい。単一プロープで河川の水位と電気伝導度を同時に計測する場合には、少なくとも先端から半分程度が常に浸水する条件での使用が好ましいと判断される。よって、河川への設置の際には、予測される水位および水質変動域を慎重に考慮して、プロープ長およびその設置位置を決定する必要がある。

4.1.4 プロープの限界長

0.48 m 長プロープによる一連の実験結果より(図-3, 4)、高電気伝導度の液体ほど、パルスの信号強度の減衰が著しく、プロープ先端の反射地点 l_2 の特定が困難になることが確認された。この問題は、土中の塩分濃度が高いと TDR による土壌水分計測が実施できなくなる問題として、認知されている。一方、日本の河川水の電気伝

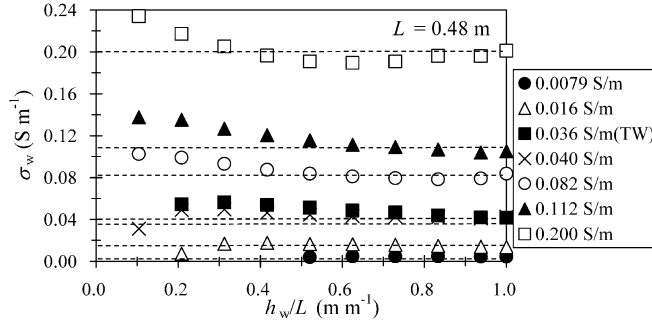


図-8 液体の相対水位 (h_w/L) と推定された電気伝導度 (σ_w) との関係. 破線は実験に使用した液体の伝導度を示す

Fig. 8 Estimated electrical conductivities of fluid media (σ_w) for relative water level (h_w/L). Broken lines in the figure indicate actual electrical conductivity of each fluid medium.

導度 (18°C) の平均値は 0.011 S m^{-1} (川村・永山, 1981) であり, 本実験に使用した溶液の電気伝導度よりもかなり低い。しかし, 水質が悪化した河川および高塩濃度の河口域への適用や, 非常に長いプローブを利用する場合を想定すると, プローブの限界長に対する検討が必要である。

Dalton and van Genuchten (1986) は, TDR で誘電率計測が実施できるプローブの限界長 L_{MAX} (m) を, トータルの誘電率および電気伝導度の関数として次式で表した。

$$L_{MAX} = \frac{\ln(1/0.1) \sqrt{\epsilon_{eff}}}{120 \pi \sigma_{eff}} \quad (15)$$

この(15)式に, 本研究で導出した(4)式, (8)式, (9)式を代入すると,

$$L_{MAX} = 0.00611 \frac{\frac{h_w}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{L-h_w}{L} \sqrt{\epsilon_a}}{\sigma_w \left(\frac{h_w}{L} \right)^{1/(a \ln \sigma_w + b)}} \quad (16)$$

が得られる。図-9 は, (16)式に 0.48 m 長プローブで得た a および b 値を与え, 液体の電気伝導度 0.005, 0.011, 0.020, 0.050, 0.100, 0.200 S m^{-1} に対する相対水位と L_{MAX} との関係の評価したものである。 L_{MAX} は, 高電気伝導度の液体ほど小さくなり, また相対水位の増加とともに指数関数的に低下するといった試算結果が得られた。平均的な水質の河川 (0.011 S m^{-1}) において, 相対水位が 1.0 になる条件を計測限界と考えた場合の L_{MAX} は 4.83 m である。すなわち, 4.83 m 以下のプローブであれば, 平均的な河川の水位計測に適用できると判断される。

以上の限界長に関する検討は, 本研究で使用した 0.48 m 長プローブについてのものである。そのため, ここで

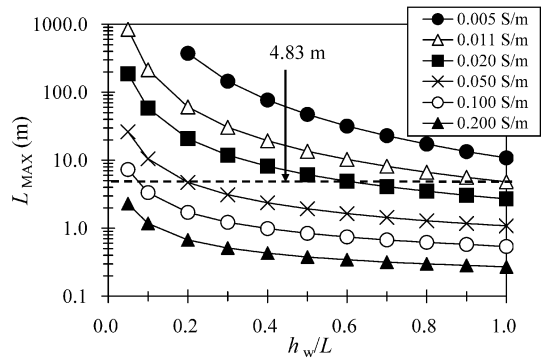


図-9 水位計測に適用できるプローブの限界長 (L_{MAX}) と相対水位 (h_w/L) との関係

Fig. 9 Maximum probe length (L_{MAX}) being applicable to relative water level (h_w/L) measurement.

の試算結果は, 必ずしも他の形状のプローブにそのまま適用できるとは限らない。正確な限界長の評価のためには, 個々のプローブで a および b を決定し, (16)式から L_{MAX} を評価する必要がある。ただし, プローブの変形および破損や不必要な信号強度のロスを防ぐために, 実際にプローブを河川に設置する場合には, 計測対象河川における水位および水質の経時変化量を考慮して, 可能な限り短いプローブを利用することが望ましい。

4.2 砂の表面位の計測結果

蒸留水中の砂の表面位を段階的に増加させたときに 0.48 m 長プローブで計測された TDR 波形の一例を図-10 に示す。なお, 下方への矢印は表面位, 上方への矢印はプローブ先端における反射地点を示す。 h_{sed} が高い条件ほど, 点 t_1 および点 t_2 はともに左方に位置した。表面

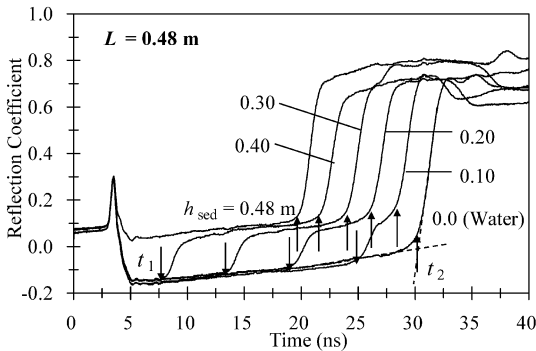


図-10 長さ 0.48 m のプローブで計測した土砂堆積高さ (h_{sed}) が異なる場合の TDR 波形

Fig. 10 TDR waveforms measured with a 0.48-m long probe in different thickness of soil sediment.

位が 0.10 m^{-1} 以下になると点 t_2 の特定が困難になったが、それ以外の条件では、容易に検知できた。同様の反射地点の変化は、0.98 m 長プローブを使用した場合にも観察された。

各プローブの t_2 値から評価した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ と h_{sed} との関係を図-11 に示す。0.48 m 長プローブで計測した $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ は、 h_{sed} の増加とともに直線的に減少した。この直線関係は 0.97 m 長のプローブにも共通したが、その勾配は大きく違った。

ここで、0.48 m 長プローブ使用時の砂の平均固相率は $0.51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、測定された 35°C の蒸留水の誘電率は 70.5 である。一方、0.97 m 長プローブ使用時の平均固相率は $0.53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、測定された 15°C の蒸留水の誘電率は 72.8 であった。これらの数値に加え、土の誘電率を 4 とみなして、(14) 式から各プローブに対する ϵ_{eff} の平方根と h_{sed} との関係を計算し、図-11 に実線で追記した。実線と実測値との比較により、(14) 式は実測値をよく再現していることが分かる。

なお、ここで示した結果は蒸留水のみのものであるが、空気-水の二相系の実験において、本実験の実験条件では電気伝導度がパルスの伝播速度に影響しないこと、すなわち誘電率の計測にも影響しないことを述べた (図-3)。よって、図-11 の実測値および (14) 式も、水質が異なる河川にも適用できると考えられる。

以上の結果から、本研究により、TDR による土砂の表面位の計測が河川水の電気伝導度に左右されないこと、またプローブ長、固相率、プローブで評価される水の誘電率の三者が決定されれば、(14) 式を適用できることが確認された。こうした結果は、気象条件や排水の流入状況によ

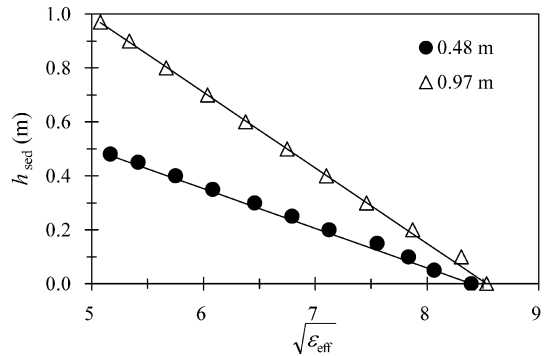


図-11 長さ 0.48 m および 0.97 m のプローブで測定したトータル誘電率の平方根 ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) と土砂堆積高さ (h_{sed}) との関係。実線は (14) 式による推定値を示す。

Fig. 11 Sediment thickness (h_{sed}) for the square root of dielectric constant ($\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$) measured with a 0.48-m long probe and a 0.97-m long probe. Solid lines in the figure in the figure indicate theoretical values estimated from eq. (14).

り、経時的に水質が変化することが予測される河川に対して、TDR によるモニタリングが有効であることを示している。ただし、本研究に用いた供試土は砂に限られているため、礫などの粗大粒子やコロイドを多く含む微細土粒子に対する有効性の検討や、河川への適用事例を積み重ねていくことが今後の課題であると考えている。

5. 摘 要

時間領域反射法 (TDR) による河川の水位および電気伝導度と土砂表面位計測の有効性を検証するために、電気伝導度が異なる CaCl_2 溶液および砂の表面位が異なる条件において、誘電率および電気伝導度の特性を調べ、その計測のモデル化を試みた。水位および土砂表面はトータル誘電率の平方根 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ との間には、河川水の電気伝導度によらず直線関係が一意的に成立し、この直線から両者を高精度で評価することができた。一定の水位が確保された条件では、水位と電気伝導度の同時計測が可能である。ただし、TDR による計測の精度や計測可能域は、河川水の電気伝導度や設置環境に強く依存するため、適切なプローブ長の検討およびその校正が重要であると考えられた。

引用文献

Cataldo, A., Tarricone, L., Attivissimo, F. and Trotta,

- A. (2006) : Simultaneous measurement of dielectric properties and levels of liquids using a TDR method. *J. Hydrology*, in press and available at doi : 10.1016/j.measurement.2006.11.006.
- 筑紫二郎 (1996) : TDR 法による浸潤前線の検出. *農業土木学会論文集*, 182, 163-164.
- 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.
- Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1994) : Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59** : 689-698.
- 川村静夫・永山政一 (1981) : 電気伝導度, 水の分析 (第3版), pp. 166-169, 化学同人, 京都.
- 松山 裕 (2003) : 重鐘式レベル計とガイド付マイクロ波式レベル計. *MS TODAY*, **12** (8) : 2-3.
- Moret, D., López, M.V. and Arrúe, J.L. (2004) : TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *J. Hydrology*, **297** : 229-235.
- 登尾浩助 (2003) : 実線 TDR 活用法—土壌中の水分・塩分量の同時測定—. *土壌の物理性*, **93** : 57-65.
- 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 J.*, **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 Sci. Soc. Am. J.*, **67** : 62-70.
- 谷多久二 (2003) : 液面, および界面の計測が可能なガイドレーダレベル計. in フィールド, 2003 年春号 : 11-15, 工業技術社, 東京.
- Thomsen, A., Hansen, B. and Schelde, K. (2000) : Application of TDR to water level measurement. *J. Hydrology*, **236** (3-4) : 252-258.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1982) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Application to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 672-678.
- Yu, X. and Yu, X. (2006) : Measurement of simulated scour by time domain reflectometry, *Proc. TDR 2006*. available on line at <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers>.

要 旨

時間領域反射法 (TDR) による河川の水位および電気伝導度と土砂表面位計測の有効性を検証するために, 電気伝導度が異なる CaCl_2 溶液および砂の表面位が異なる条件において, 誘電率および電気伝導度の特性を調べ, その計測のモデル化を試みた。水位および土砂表面はトータル誘電率の平方根 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ との間には, 河川水の電気伝導度によらず直線関係が一意的に成立し, この直線から両者を高精度で評価することができた。一定の水位が確保された条件では, 水位と電気伝導度の同時計測が可能である。ただし, TDR による計測の精度や計測可能域は, 河川水の電気伝導度や設置環境に強く依存するため, 適切なプローブ長の検討およびその校正が重要であると考えられた。

受稿年月日 : 2007 年 12 月 2 日

受理年月日 : 2008 年 1 月 24 日