

TDRによる水中堆積土砂表面位の評価法

Dielectric Approaches of Sediment-surface-level Measurement by TDR

伊藤 祐二* 宮本 英揮** ○筑紫 二郎*
Yuji ITO, Hideki MIYAMOTO, and ○Jiro CHIKUSHI

1. はじめに

近年、誘電率の異なる物質同士の境界面の検知に、時間領域反射法TDR(Time Domain Reflectometry)を活用した研究事例が報告されている。著者らは、TDRによる境界面計測の一環として、水中の堆積土砂表面の検出にTDRを活用することを考えており、既に均一粒径の砂に対して適用の可能性が高いことを確認している¹⁾。土砂表面位計測へのTDRの有効性をより詳細に検討するため、本研究では粒径の異なる珪砂と玉砂利を対象に2つの評価法を比較した。すなわち、プローブに与えたステップパルスの中中部のみの伝播時間に基づく評価法とロッド全体の伝播時間に基づく評価法の有効性および2つの評価法におよぼす土砂粒径の影響について検討した。

2. 堆積土砂表面位の計測モデル

TDRプローブに与えたステップパルスがロッドの根端から先端の間を往復するのに要する時間を t_t とすると、ロッド周囲の媒体の比誘電率 ϵ_t は次式で表される。

$$\epsilon_t = \left(\frac{ct_t}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 c は真空における光速、 L はロッド長である。土砂が水中に設置したプローブのロッドの先端から高さ h_{sed} まで堆積している場合(Fig. 1参照)、ロッドを伝播するパルスの一部は土砂表面で反射する。この反射点とロッド根端との間のパルスの往復時間を t_w とし、 t_w と水の比誘電率 ϵ_w との関係を式(1)にあてはめて整理すると、 h_{sed} は次式で表される(部分伝播法PPM: Partial-range Propagation Method)。

$$h_{sed} = L - \frac{ct_w}{2\sqrt{\epsilon_w}} \quad (2)$$

一方、ロッドの根端-先端間における水の層と堆積土砂層の厚さの比率を $(L-h_{sed})/L$ および h_{sed}/L とし、水-堆積土砂層に誘電混合モデルを適用すると、 ϵ_t の平方根は次式で表される。

$$\sqrt{\epsilon_t} = \frac{L-h_{sed}}{L} \sqrt{\epsilon_w} + \frac{h_{sed}}{L} \sqrt{\epsilon_{sed}} \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{sed} は堆積土砂層の比誘電率であり、 ϵ_w と固相の比誘電率 $\epsilon_s(=4)$ より次式で与えられる。

$$\sqrt{\epsilon_{sed}} = (1-\theta_s)\sqrt{\epsilon_w} + \theta_s\sqrt{\epsilon_s} \quad (4)$$

ここで、 θ_s は固相率である。式(3)と(4)より、 h_{sed} は次式で表される(全伝播法WPM: Whole-range Propagation Method)。

$$h_{sed} = \frac{L(\sqrt{\epsilon_t} - \sqrt{\epsilon_w})}{\theta_s(\sqrt{\epsilon_s} - \sqrt{\epsilon_w})} \quad (5)$$

3. 実験概要

本研究では、粒径範囲の異なる4種類の珪砂と玉砂利を対象に4つの実験を実施した。実験1と2では、それぞれの粒径範囲が0.15~0.6 mmおよび1.0~3.0 mmの珪砂、実験3と4では、それぞれの粒径範囲が2.0~5.0 mmおよび5.0~10.0 mmの玉砂利を使用した。ケーブルテスターか

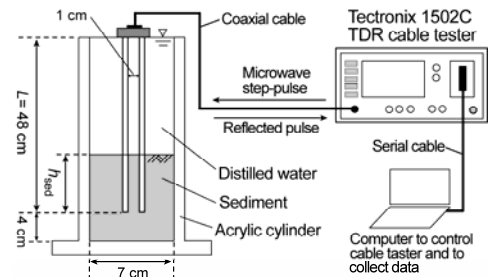


Fig. 1 土砂表面位計測の実験概要図
Schematic diagram of experiment

*九州大学生物環境調節センター Biotron Institute, Kyushu University
**佐賀大学文化教育学部 Faculty of Culture and Education, Saga University
キーワード：時間領域反射法(TDR), 誘電率, 堆積土砂, 水環境保全

らプローブに与えるステップパルスやTDR波形の取得に至る計測全般をコンピューターで制御した(Fig. 1).

アクリル製円筒容器の中央部にプローブを固定し、蒸留水をロッド根端まで満たした. この状態で取得したTDR波形に基づいて、本実験における ε_w を評価した. ε_w の計測後、供試土砂を5 cm間隔で段階的に沈降堆積させ、同時に各段階でのTDR波形を取得し、得られた波形から t_w と t_t を読み取った. $h_{sed} = 0.48$ mに対する計測終了後、容器内の水分飽和土砂の重量を測定して炉乾燥させ、乾燥前後の質量差に基づいて各実験における固相率 θ_s を評価した.

4. 結果と考察

実験1~4における h_{sed} の実測値と式(2)による計算値との比較をFig. 2に示す. PPMによる h_{sed} の計算精度は高く、実験1~4のRMSEの平均値は0.7 cmであった. 一方、WPMでは、すべての実験で h_{sed} の計算値が実測を過小評価した(Fig. 3). RMSEは、実験1で1.7 cm, 実験2で2.2 cm, 実験3で4.1 cm, 実験4で4.8 cmであり、平均粒径が大きい土砂ほど誤差は拡大した.

WPMにおける誤差について、以下ではその原因を ε_{sed} モデルの不適合のためと仮定し検証した. すなわち、 ε_{sed} のモデル式(4)が土砂粒径に関する補正係数 C_g によって修正できるものとする、式(4)は次式で書き換えられる.

$$\sqrt{\varepsilon_{sed}} = C_g \{ (1 - \theta_s) \sqrt{\varepsilon_w} + \theta_s \sqrt{\varepsilon_s} \} \quad (6)$$

ここで、 C_g を上式より
$$C_g = \frac{\sqrt{\varepsilon_{sed}}}{(1 - \theta_s) \sqrt{\varepsilon_w} + \theta_s \sqrt{\varepsilon_s}} \quad (7)$$

のように表し、 $h_{sed} = 0.48$ m(ロッド全部が堆積土砂で覆われた状況)で得た ε_t を ε_{sed} の実測値とし C_g を計算した. 式(4)が ε_{sed} を適切に評価しているならば $C_g = 1$ である. しかし、式(7)で計算した C_g は、すべての実験で $C_g > 1$ となり、各実験で使用した土砂の最大粒径と最小粒径の平均値 D_{mid} が大きくなるにしたがって増大した(Fig. 4). この結果に基づき、 C_g を次式で近似し、式(3)と(6)から次の h_{sed} の修正モデルを導いた.

$$C_g = \alpha D_{mid} + \beta \quad (8) \quad h_{sed} = \frac{L(\sqrt{\varepsilon_t} - \sqrt{\varepsilon_w})}{C_g \theta_s (\sqrt{\varepsilon_s} - \sqrt{\varepsilon_w}) - (1 - C_g) \sqrt{\varepsilon_w}} \quad (9)$$

ここで、 α および β はフィッティングパラメータである. 式(8)で与えられる C_g を導入することで、WPMにおける h_{sed} の誤差は改善されることが明らかとなった(Fig. 5; 実験1~4のRMSEの平均値は0.9 cm).

5. おわりに

粒径の異なる水中堆積土砂の表面位置をTDRに基づく2つの評価法により計測した. 水中に設置したプローブのロッド先端からの土砂表面位 h_{sed} は、ステップパルスの水中部だけの伝播時間に基づいて(PPM)、高精度で計測できることを確認した. 一方、水-土砂層の全伝播時間と土砂層の比誘電率 ε_{sed} に基づく評価法(WPM)では、平均粒径が大きい土砂ほど計測精度が低下した. しかし、 ε_{sed} に土砂の最大粒径と最小粒径の平均値の1次式に基づく補正を加えることで、その精度は改善されることを明らかにした.

参考文献 1)宮本ら (2008): 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, 土壌の物理性, 108, 37-45.

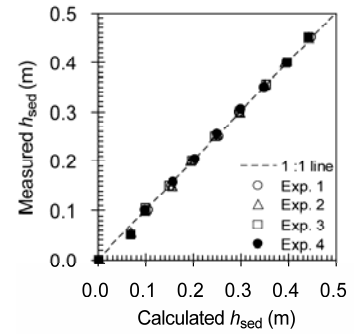


Fig. 2 h_{sed} の実測値と式(2)による計算値の比較
Comparison of measured and calculated h_{sed}

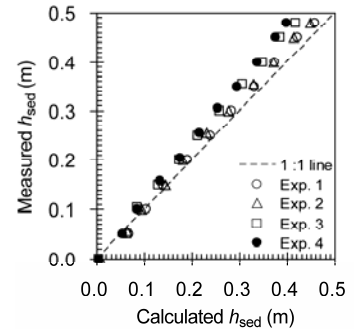


Fig. 3 h_{sed} の実測値と式(5)による計算値の比較
Comparison of measured and calculated h_{sed}

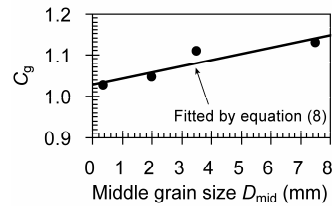


Fig. 4 D_{mid} と式(7)による係数 C_g との関係
Relationship between D_{mid} and C_g by eq. (7)

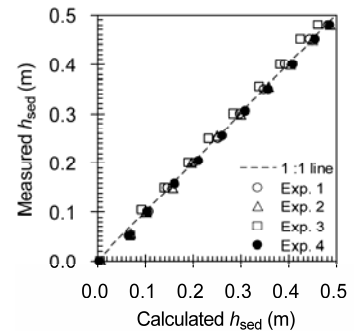


Fig. 5 h_{sed} の実測値と式(9)による計算値の比較
Comparison of measured and calculated h_{sed}