

TDRによる水中の堆積土砂表面位および電気伝導度の同時計測 Coupled Measurement of Sediment-surface-level and Electrical Conductivity in water 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

時間領域反射法TDR(Time Domain Reflectometry)を活用した物質層間の境界面計測では、プローブのロッドの根端-先端間に存在する誘電率の異なる物質同士の境界面を、ロッドに与えたステップパルスの伝播時間に基づいて評価する。伊藤ら¹⁾は、実験用円筒カラムを用い、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をロッドの根端から境界面までのパルスの伝播時間に基づく部分伝播法PPM(partial-range propagation method)とロッドの根端-先端間における伝播時間に基づく全伝播法WPM(whole-range propagation method)により測定している。一方、TDRによる電気伝導度の計測では、パルスがロッドを伝播する過程で電気エネルギーの一部が周囲の媒体に散逸することを利用し、エネルギー損失量に応じて変化するパルスの電圧または反射係数に基づいてロッド周囲の媒体の電気伝導度が評価される。よって、これらの原理を利用することで、土砂表面位と水の電気伝導度を1つのプローブで同時に計測できると考えられる。しかし、媒体の導電性の増大またはパルスの伝播経路であるロッドの増長によりエネルギー損失量が所定の閾値を超えると、パルスの反射位置の特定が困難になり境界面計測ができなくなる可能性がある。

本研究では、土砂表面位と水の電気伝導度の同時計測法を確立するために、両者を導電性の異なる条件下でPPMとWPMに基づき測定し、両法の適用の可能性について比較検討した。また、土砂表面位と電気伝導度の同時計測に適用できるロッドの限界長について考察した。

2. 水中の土砂表面位と電気伝導度の同時計測モデル

PPMおよびWPMにおける水中土砂表面位 h_{sed} は、それぞれ次式で表される¹⁾。

$$h_{\text{sed}} = L - \frac{c t_w}{2\sqrt{\epsilon_w}} \quad (1) \quad h_{\text{sed}} = \frac{L(\sqrt{\epsilon_t} - \sqrt{\epsilon_w})}{C_g \theta_s (\sqrt{\epsilon_s} - \sqrt{\epsilon_w}) - (1 - C_g)\sqrt{\epsilon_w}} \quad (2)$$

ここで、 L はロッド長、 c は真空における光速、 t_w はパルスの中水部のみの伝播時間、 ϵ_w は水の比誘電率、 ϵ_t はプローブ周囲のバルクの比誘電率、 ϵ_s は土砂層内の固相の比誘電率(=4)、 C_g は補正係数¹⁾、 θ_s は固相率である。一方、プローブ周囲の媒体の電気伝導度 σ_t は、水の電気伝導度 σ_w と堆積土砂層の電気伝導度 σ_{sed} を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_t = \frac{L - h_{\text{sed}}}{L} \sigma_w + \frac{h_{\text{sed}}}{L} \sigma_{\text{sed}} \quad (3) \quad \text{ここで、} \quad \sigma_{\text{sed}} = (1 - \theta_s)^f \sigma_w \quad (4)$$

とし、式(4)を式(3)に代入して整理すると、 σ_w は次式で表される。

$$\sigma_w = \frac{L \sigma_t}{[(1 - \theta_s)^f - 1] h_{\text{sed}} + L} \quad (5)$$

ここで、 f は土粒子の形状と配向に関するパラメータである。

h_{sed} と σ_w の同時計測モデルでは、 C_g 、 θ_s 、 f が既知であるとき、 h_{sed} を式(1)または式(2)で求め、この h_{sed} とプローブで測定される σ_t を式(5)に代入することで σ_w が評価される。

3. 実験概要およびロッド限界長の計算法

本研究では、均一粒径の珪砂を用い、 $\sigma_w = 0.005 \sim 0.103 \text{ S m}^{-1}$ の間の4条件において実験を行った。蒸留水と塩化カルシウムを混合して作成した電気伝導度の異なる電解液の中に、珪砂を沈めて攪拌し洗浄した。そのまま約1日間静置し、電気伝導度に変化がないことを確認した上で、上澄み液の σ_w を記録した。 h_{sed} の計測には、長さ48 cmの2本のステンレスロッドからなるプローブ

*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、電気伝導度、水環境保全

ブを用い、コンピューターによってステップパルスの送受信、計測制御、TDR波形の解析を行った。高さ52 cmの亚克力製円筒容器の中央部にプローブを固定し、先述の要領で作成した電解液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。その後、硅砂を5 cm間隔で段階的に沈降堆積させ、同時に各段階のTDR波形および σ_t を測定した。その際、 $h_{sed}=0.48$ m(ロッド全体が堆積土砂層内に埋設された条件)において測定した σ_t を、本実験における σ_{sed} とした。一連の計測終了後、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の固相率 θ_s を求めた。

また本研究では、 L_{max} をパルスのエネルギー損失が最大となる条件で計算した。すなわち、 σ_t が最大となる $h_{sed}=0$ mの条件から式(2)と(3)より $\varepsilon_t=\varepsilon_w$ と $\sigma_t=\sigma_w$ を得て、これらをDalton and van Genuchten²⁾の L_{max} 計算式に代入して得た次式により L_{max} を計算した。

$$L_{max} = 6.11 \times 10^{-3} \frac{\sqrt{\varepsilon_w}}{\sigma_w} \quad (6)$$

4. 結果と考察

σ_w が0.005, 0.011, 0.050, 0.103 S m⁻¹の条件における h_{sed} の実測値と式(1)による計算値との比較をFig. 1に示す。PPMによる h_{sed} の計算精度は高く、全 σ_w 条件のRMSEの平均値は0.9 cmであった。一方、WPMでは、4つの σ_w 条件に対するRMSEはそれぞれ0.9, 1.6, 1.9, 2.9 cmであり、水の導電性が高くなるほど h_{sed} の計測誤差は拡大した(Fig. 2)。WPMにおける h_{sed} の精度低下の原因として、導電性が高い条件では、伝播時間の推定精度が低下したこと、 h_{sed} の変化に対する伝播時間の感度が低かったことが挙げられる。

f を最適化するために、 θ_s と σ_w の実測値を式(4)に代入して σ_{sed} を計算し、実測値との比較を行った。その結果 $f=1.48$ を得た。この f 値を用いて式(5)より σ_w を計算したところ、WPMに基づく結果では、 σ_w が0.050 S m⁻¹および0.103 S m⁻¹の場合に実測を過小評価する場が生じた。 h_{sed} の計測精度が高かったPPMに基づく評価の方がWPMに基づく評価法よりも高い精度を示した(Fig. 3)。

L_{max} は、プローブ周囲の電気伝導度条件に応じて大きく変化する。たとえば、 $\sigma_w=0.200$ S m⁻¹での $L_{max}=0.274$ m、 $\sigma_w=0.0020$ S m⁻¹での $L_{max}=27.4$ mであり(Fig. 4参照)、 σ_w が1/100倍低い水域では、ロッドを100倍まで長く設定することができる。また、日本の一般的な河川水の電気伝導度 $\sigma_w=0.013$ S m⁻¹に対する L_{max} は4.2 mであった。

5. おわりに

本研究では、水中に設置したプローブのロッド先端からの堆積土砂表面位 h_{sed} および水の電気伝導度 σ_w のTDRに基づく同時計測法を確立するために、 $\sigma_w=0.005\sim 0.103$ S m⁻¹の間の4条件で各々の測定精度を調べた。計測した h_{sed} と σ_w はWPMよりPPMの方が高い精度を示した。WPMでは、導電性媒体へのパルスのエネルギー損失や伝播時間の h_{sed} に対する感度が低かったことが精度低下に影響したと考えられる。また、日本の一般的な河川水($\sigma_w=0.013$ S m⁻¹)で h_{sed} - σ_w 計測が実施できるロッドの限界長 L_{max} は約4 mであることを明らかにした。

参考文献 1)伊藤ら (2009): TDRによる水中堆積土砂表面位の評価法, 農業農村工学会講演要旨集. 2) 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.

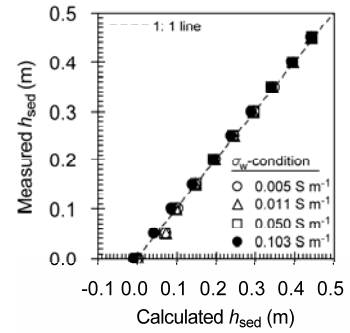


Fig.1 h_{sed} の実測値と式(1)による計算値の比較
Comparison of measured and calculated h_{sed}

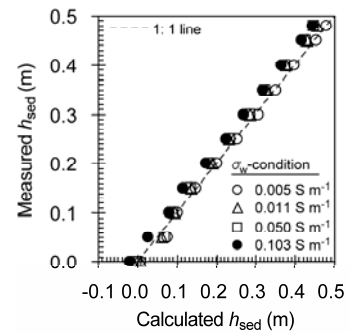


Fig.2 h_{sed} の実測値と式(2)による計算値の比較
Comparison of measured and calculated h_{sed}

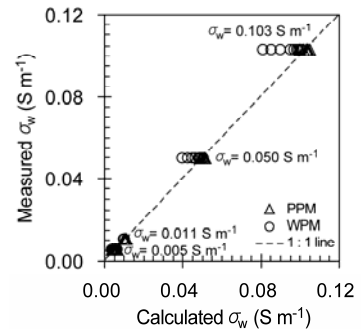


Fig.3 σ_w の実測値と式(5)による計算値の比較
Comparison of measured and calculated σ_w

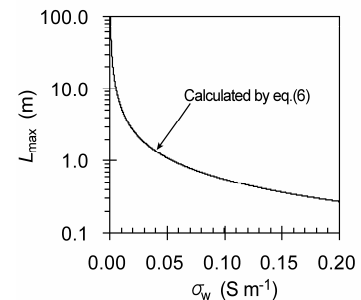


Fig.4 h_{sed} - σ_w 計測に使用できるロッド限界長 L_{max}
Practicable max. rod length in the h_{sed} - σ_w measurement