

淡塩水境界位計測のための同軸型TDRプローブの開発と有効性の評価

Development and effectiveness of coaxial TDR probe to measure interface level
between fresh and salt water layers

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

1. はじめに

沿岸域では、良質な淡水を利用するうえで、海水侵入に伴う地下水や貯水池の塩水化が障害となる。塩水化の状況を把握するためには、海水侵入によって深部に生じる淡塩水境界面の位置(淡塩水境界位)変動を把握する必要があるが、そのモニタリング法は未確立である。一方、近年、ケーブルテスターを活用した時間領域反射法(TDR)に基づく、物質層間境界面の検出が検討されている。同法は、ケーブルテスターから発信したマイクロ波の境界面における反射・吸収特性を利用したものであり、淡塩水境界位の計測についても適用が試みられている¹⁾。しかし、既存のTDRプローブは、感知部が露出しているためマイクロ波が周囲の異物の影響を受けやすく、また野外計測では数メートル程度の長大なプローブの運搬や設置が困難である。本研究では、野外計測に適したプローブを開発するために、連結式の同軸型プローブを試作し、淡塩水境界位の室内計測実験によって、その有効性を評価した。

2. 同軸型TDRプローブ

内径2.4 cmのステンレス鋼管の内部に、直径0.5 cmのステンレス鋼ロッドを配し、同軸型プローブを作製した(Fig.1)。その最大の特徴は、ロッドが外部導体の鋼管によって電気的にシールドされ、鋼管外へのマイクロ波の漏れが少ない点である。また、各部材の端部には連結用のねじ加工が施しており、境界位の変動幅に応じたプローブ長の伸縮が可能である。本研究では、同軸ケーブルとの接合部に、30 cm長の鋼管とロッドを2連結した、全長63 cm、感知部長61.2 cmのプローブを作製した。

3. 実験概要および解析方法

カラム内に創出した淡塩水境界位 h_i の変動を、同軸型プローブと電気伝導度(EC)測定用センサーによって計測した(Fig.2)。内径15 cm、高さ102 cmのアクリル製円筒カラムの中央に、同軸型プローブを垂直に挿入し、その先端を底面から高さ3 cmの位置に固定した。同軸ケーブルによりプローブをTDR100ケーブルテスターに接続し、TDR100をコンピュータに接続した。カラム側面には、底面から高さ4.5~66.5 cmの位置に32個の4極ECセンサー²⁾を2 cm間隔に配置し、AM416マルチプレクサーを介してセンサーをCR10Xデータロガーに接続した。カラム内を0.013 S m⁻¹の淡水(18°C)で満たしプローブを水没させた後、底面から5.5 S m⁻¹の食塩水をゆっくりと給水することで、 h_i の上

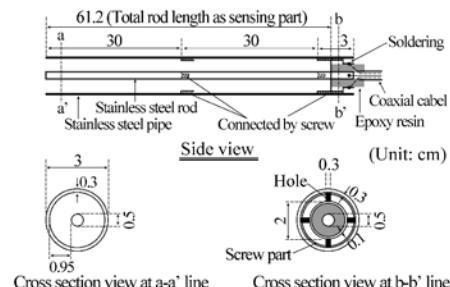


Fig.1 同軸型TDRプローブの模式図

Schematic diagram of the coaxial TDR probe

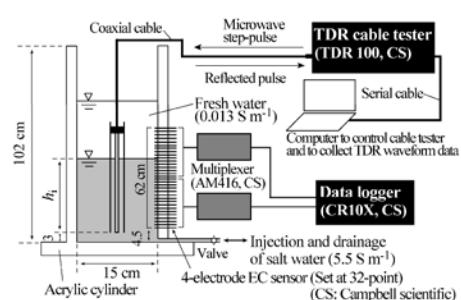


Fig.2 室内実験の模式図

Schematic diagram of laboratory experiment

*佐賀大学低平地沿岸海域研究センター (Institute of Lowland and Marine Research, Saga University) **佐賀大学農学部 (Faculty of Agriculture, Saga University) ***九州大学生物環境調節センター (Biotron Institute, Kyushu University)

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、海水侵入、淡水資源

昇を促した。その際、 h_i の異なる5条件において、TDR100からプローブに与えたマイクロ波の反射波形(TDR波形)をソフトウェア・PCTDRにより計測し、同時に4極センサーでECプロファイルを測定した。

計測したTDR波形に基づき、プローブ先端からの淡塩水境界位 $h_{i,TDR}$ を決定した。すなわち、計測波形に生じた境界面におけるマイクロ波の吸収点(**Fig.3**の↓印)と、事前に決定した空中と水中におけるTDR波形の分岐点(**Fig.3**の点x)から、淡水中的マイクロ波の伝播時間 t_{fw} を求め、 t_{fw} を次式¹⁾に代入して $h_{i,TDR}$ を計算した。

$$h_{i,TDR} = L - c t_{fw} / (2\sqrt{\epsilon_{fw}}) \quad (1)$$

ここで、 L は感知部長、 c は真空中の光速、 ϵ_{fw} は淡水の比誘電率であり、 ϵ_{fw} には18°Cの水の比誘電率を与えた。

一方、ECプロファイルから淡塩水境界位 $h_{i,m}$ を評価した。本研究では、実験に供した淡水と塩水のEC中間値(2.76 S m⁻¹)の位置を $h_{i,m}$ と考え、2計測点間のEC値を線形補間して求めた連続的なプロファイルから $h_{i,m}$ を決定した。

4. 結果と考察

同軸型プローブで計測した淡水と淡塩水2重層のTDR波形は、異なる形状を示した(**Fig.3**)。淡水中では、プローブ先端におけるマイクロ波の反射(↑)を表す、凹状の波形が得られた。一方、淡塩水2重層中では、プローブの根端-先端間ににおいて、高導電性の塩水にマイクロ波が吸収されたことを表す反射係数 ρ の急減(↓)が認められ、その急減点は h_i が大きいほど図の左方に位置した。得られた波形の既往の研究¹⁾で確認された波形に対する類似性から、試作した同軸型プローブにより、計測媒質の誘電特性に応じたTDR波形を計測できることが確認された。

h_i 計測においても、同軸型プローブの有効性が認められた。ECプロファイルより求めた $h_{i,m}$ (**Fig.4**の破線とマーカーの交点)と同軸型プローブで計測した $h_{i,TDR}$ (**Fig.4**の実線)は、検討した全 h_i 条件で淡水-塩水間のECの急変領域に位置した。 $h_{i,m}$ に対する $h_{i,TDR}$ のRMSEは0.3 cmとなり、両者はよく一致したことから(**Fig.5**)、開発したプローブは、 h_i 変動の計測に適用できるものと考える。

5. おわりに

本研究では、淡塩水境界位計測用のプローブを開発するために、同軸型TDRプローブを作製し、その有効性を室内実験によって評価した。カラム内に創出した境界位の変動に対し、プローブによる計測値は、淡水と塩水のECの中間値とよく一致することを確認した。今後は、同プローブを野外で適用し、計測システム全体の妥当性を検証する予定である。

参考文献 1) 伊藤ら(2010): 土木論集B, **66**(2), 189–195. 2) 井上・塩沢(1994): 土壤の物理性, **70**, 23–28.

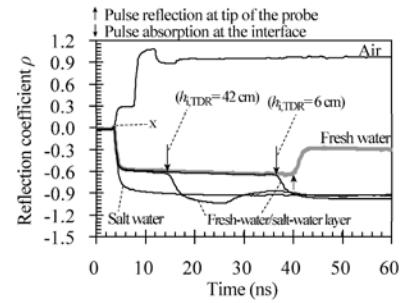


Fig.3 同軸型プローブで計測した空気・淡水・塩水・淡塩水2重層のTDR波形
TDR waveform measured for air, fresh water, salt water, and fresh-water/salt-water layer with the coaxial probe

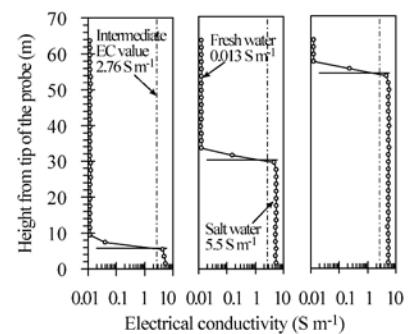


Fig.4 ECプロファイル(---)と同軸型プローブによる淡塩水境界位(—)の比較
Comparison of EC profile (---) and interface level (—) between fresh and salt water layers measured by the coaxial probe

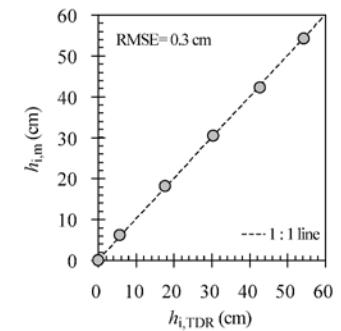


Fig.5 ECプロファイル($h_{i,m}$)と同軸型プローブ($h_{i,TDR}$)による淡塩水境界位の比較
Comparison of interface level between fresh and salt water layers estimated by EC profile measurement ($h_{i,m}$) and the coaxial TDR probe ($h_{i,TDR}$)