

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5464548号
(P5464548)

(45) 発行日 平成26年4月9日(2014.4.9)

(24) 登録日 平成26年1月31日(2014.1.31)

(51) Int. Cl. F I
G O 1 F 23/00 (2006.01) G O 1 F 23/00 E

請求項の数 2 (全 8 頁)

(21) 出願番号	特願2010-182921 (P2010-182921)	(73) 特許権者	504145342 国立大学法人九州大学 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号
(22) 出願日	平成22年8月18日(2010.8.18)	(74) 代理人	100087745 弁理士 清水 善廣
(65) 公開番号	特開2011-39064 (P2011-39064A)	(74) 代理人	100098545 弁理士 阿部 伸一
(43) 公開日	平成23年2月24日(2011.2.24)	(74) 代理人	100106611 弁理士 辻田 幸史
審査請求日	平成25年7月1日(2013.7.1)	(72) 発明者	伊藤 祐二 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内
(31) 優先権主張番号	61/272, 121	(72) 発明者	官本 英揮 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内
(32) 優先日	平成21年8月18日(2009.8.18)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 淡塩水境界面の測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

a) 淡水と塩水との重層系に、淡水側からTDRプローブを挿入して、前記TDRプローブの根端及び先端の間に、淡水と塩水との境界面が位置するように前記TDRプローブを配置するステップ、

b) TDR波形の急減点までの時間 t_{fw} を測定するステップ、及び

c) 前記TDRプローブの先端から前記境界面までの距離 h_i を下記数1から求めるステップ

【数1】

$$h_i = L - \frac{ct_{fw}}{2\sqrt{\epsilon_{fw}}} \quad (3)$$

10

(数1中、 ϵ_{fw} は前記淡水の比誘電率、Lは前記TDRプローブのロッド長、cは光速とする。)とから構成されることを特徴とする淡塩水境界面の測定方法。

【請求項2】

前記TDRプローブの根端側をケーブルに接続し、地表面から前記淡塩水境界面までの距離を、前記地表面以下のケーブル長とロッド長の和から前記 h_i を差し引いた距離として求めることを特徴とする請求項1記載の淡塩水境界面の測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【 0 0 0 1 】

本発明は、淡水と塩水との境界面を計測する方法に関するものである。

【背景技術】

【 0 0 0 2 】

大きな河川やダムなどがなく利用できる地表水が少ない沿岸地域では、農工業や生活用水などの地域の水資源として、地下水が利用される場合が多い。沿岸帯水層では、一般に高密度の海水が地下水下部に楔状に侵入している(図1(a))。こうした地域で地下水を利用する場合、淡水域への海水侵入が良質な水資源を確保する上で障害となる場合がある。塩分濃度の低い淡水を持続的に利用していくためには、揚水、降雨、潮汐などによって変化

10

する淡水層厚を把握すること、すなわち海水侵入によって創出される淡水と塩水との境界面(以下、「淡塩水境界面」と称す。)をモニタリングすることが重要である。

淡塩水境界面の測定法として、電気探査法が挙げられる。この方法は、地表面から与えた電流によって測定される地中の比抵抗分布から、淡塩水境界面を非破壊的に検出するものである。しかし、機器の出力や電極間隔などによって測定深度が制限されるうえ、井戸での直接観測に比べて測定精度が低い(例えば、電磁法では誤差が10m以上になる場合がある)。また、井戸にセンサーを手動で落としこみ、地下水の鉛直電気伝導度プロファイルの急変点に基づき塩水浸入状況を観測する直接法でも、潮汐や降雨による境界面の時間変動を調べるのに多大な労力、費用、時間を要する。

その一方で、近年、時間領域反射法(TDR)により土壌含水量、導電率、水位等を計測することが、例えば、特許文献1において紹介されている。

20

しかしながら、TDRは、高塩分環境下では信号減衰のため計測ができなくなる場合があるという問題があった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 3 】

【特許文献1】特開2009-204601号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 4 】

そこで、本発明は、高塩分環境下でのマイクロ波信号の減衰の特性を逆に利用し、淡塩水境界面の測定方法を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 5 】

上記課題を解決するために下記の通り解決手段を見出した。

即ち、本発明の淡塩水境界面の測定方法は、請求項1に記載の通り、a)淡水と塩水との重層系に、淡水側からTDRプローブを挿入して、前記TDRプローブの根端及び先端の間に、淡水と塩水との境界面が位置するように前記TDRプローブを配置するステップ、

b)TDR波形の急減点までの時間 t_{fw} を測定するステップ、及び

c)前記TDRプローブの先端から前記境界面までの距離 h_i を下記数1から求めるステップ

【数1】

40

$$h_i = L - \frac{c t_{fw}}{2\sqrt{\epsilon_{fw}}} \quad (3)$$

(数1中、 ϵ_{fw} は前記淡水の比誘電率、Lは前記TDRプローブのロッド長、cは光速とする。)とから構成されることを特徴とする。

また、請求項2記載の本発明は、請求項1記載の発明において、前記TDRプローブの根端側をケーブルに接続し、地表面から前記淡塩水境界面までの距離を、前記地表面以下のケーブル長とロッド長の和から前記 h_i を差し引いた距離として求めることを特徴とする。

【発明の効果】

50

【0006】

本発明によれば、淡塩水境界面を高い精度で検出することができる。

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】淡塩水境界面の(a)観測イメージと(b)計測されるTDR波形の模式図

【図2】本発明の淡塩水境界面の測定を実施するための実験概略図

【図3】蒸留水 ($\sigma_{fw}=0.0005S \cdot m^{-1}$) と塩水 ($\sigma_{sw}=5.2S \cdot m^{-1}$) との境界面計測で得られたTDR波形

【図4】伝播時間 t_{fw} と淡塩水境界面位置 h_i の実測値又は数1による計算値との関係を示すグラフ

【図5】蒸留水中及び導電性の異なるNaCl溶液中で計測されたTDR波形

【図6】導電性の異なる淡水 ($\sigma_{fw}=0.1 \sim 0.4S \cdot m^{-1}$) と塩水 ($\sigma_{sw}=5.2S \cdot m^{-1}$) との境界面計測で得られたTDR波形

【図7】導電性の異なる淡水と塩水との境界面位置 h_i の実測値と数1による計算値の比較

【図8】淡塩水境界面が変動した場合のTDR波形

【図9】淡塩水境界面が変動した場合の h_i の実測値と計算値の比較

【発明を実施するための形態】

【0008】

TDR(Time Domain Reflectometry)では、マイクロ波等の電磁波が、電極ロッドに沿って導電性媒質中を伝播する過程において、その電気エネルギーが媒質に吸収される。エネルギー吸収量は、パルスの伝播距離が長くなるほど、また周囲媒質の導電性が高くなるほど増大する。したがって、パルスの伝播距離が同じ条件で淡水と塩水とのエネルギー吸収量の違いを比較すると、塩水の吸収量の方が極めて大きい。

本発明では、上記知見に基づき、TDRで計測されるマイクロ波ステップパルスのエネルギー吸収特性から淡塩水境界面を検出するものである。

【0009】

[淡塩水境界面の計測モデル]

TDRプローブに与えたマイクロ波ステップパルスがプローブのロッドを往復するのに要する時間を t_t (s)とすると、プローブ周囲の媒質の比誘電率 ϵ_t は、 t_t 、光速 $c(3.0 \times 10^8 m \cdot s^{-1})$ 及びロッド長 $L(m)$ を用いて以下の数2で表される。

【0010】

【数2】

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

【0011】

図1(a)、(b)に示すような、淡水(上部)と塩水(下部)との重層系にプローブ1を垂直に挿入した場合、ロッド根端2 aから先端2 bに向けて伝播するパルスが塩水領域に達すると、その電気エネルギーは塩水に吸収される。その吸収量は、電気伝導度と正の相関を持ち、反射係数(電気エネルギーの指標)の急減としてTDR波形上に現れる(図1(b))。その急減点(図1(b)における $t=t_1$ の位置)を淡塩水境界面3の位置と考え、ロッド根端2 a位置(図1(b)における $t=t_0$ の位置)から境界面3までのパルスの伝播時間、すなわち淡水中のパルスの伝播時間を t_{fw} (s)、ロッド先端2 bから境界面3までの距離を h_i (m)とすると、淡水の比誘電率 ϵ_{fw} は数2に基づいて次式で与えられる。

【0012】

10

20

30

40

【数3】

$$\varepsilon_{fv} = \left[\frac{ct_{fw}}{2(L - h_i)} \right]^2 \quad (2)$$

【0013】

上記数3より、 h_i は次の数1により表される。

【0014】

【数1】

$$h_i = L - \frac{ct_{fw}}{2\sqrt{\varepsilon_{fv}}} \quad (3)$$

10

【0015】

t_{fw} が既知のとき、TDRで計測される t_{fw} を数1に代入することで h_i が得られる。

【実施例】

【0016】

[実験及び解析概要]

淡水の水質(電気伝導度)又は境界面位置が変動する状況を室内実験で再現し、TDRにおけるマイクロ波のエネルギー吸収特性を利用した淡塩水境界面の計測の可否と精度について検討した。

20

図2に本実験の概略図を示す。実験では、ロッド長が48cmの2線式TDRプローブ1を1502C型ケーブルテスター4(Tektronix)に接続し、計測制御及びTDR波形の記録にソフトウェア(WinTDR18)を用いた。海水の電気伝導度に相当する $\sigma_{sw}=5.2S \cdot m^{-1}$ のNaCl溶液を塩水の代替溶液と考え、電気伝導度 $\sigma_{fw}=0.0005, 0.013, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4S \cdot m^{-1}$ のNaCl溶液を淡水の代替溶液とした。本実施例では、上述の電気伝導度を有するNaCl溶液を便宜的に塩水又は淡水と呼ぶこととする。なお、各々の溶液温度は約22であった。

【0017】

式(3)に与える t_{fw} を得るために、内径7cm、高さ52cmのアクリル製円筒型カラム5の中心部にプローブ1の長手方向が鉛直となるように設置し、プローブ1のロッド2の根端2aまで淡水を満たした状態でTDR波形を計測した。取得した波形をWinTDRで解析し $t_{fw}(=75.11)$ を求めた。これを、モデル式数1の t_{fw} の実測値として与えることにした。計測した t_{fw} は水温22における理論値(=79.63)を過小評価したが、これは実験に用いたアクリル製円筒カラム5(アクリルの比誘電率は約3)の壁面が比誘電率の計測に影響をおよぼしたためであった。その後、カラム5の下端からロッド2の根端2aまで塩水をゆっくりと給水した。このようにして再現した淡塩水境界面上昇実験では、塩水がロッド先端2bに達したときを $h_i=0cm$ とし、それ以降、 h_i が5cm間隔のTDR波形を計測した。

30

【0018】

また、塩水楔が前進又は後退した場合の本法の有効性を確認するために、淡塩水境界面の上下変動を室内実験で再現することにした。すなわち、上述の方法で、塩水をカラム下端から $h_i=30cm$ までゆっくりと給水することにより、境界面上昇過程を再現した。その後、カラム5の下端から塩水を排水すると同時に排水量と等量の淡水をカラム5の上端から静かに給水して満水状態を維持し、 $h_i=10cm$ までの境界面の下降過程を再現した。一連の上昇と下降を3反復し、5cm間隔の高さでTDR波形を記録した。なお、この実験で境界面変動範囲を $h_i=10 \sim 30cm$ としたのは、上端及び下端における給排水に伴う淡塩水境界面の攪乱を避けるためである。

40

以上の実験における境界面の位置は、変動幅に応じたカラム容量を予め測定しておき、それと等量の塩水を給排水することによって決定した。

【0019】

50

各実験で取得した波形データは、スプレッドシートに展開し、マニュアルで解析した。すなわち、本解析ではカラム内において空気中と蒸留水中で予め計測したTDR波形を重ね合わせたときに生じる分岐点を t_0 (図1(b)参照)、 ψ 値の急減点前後における波形線に描いた近似直線の交点を t_1 とした。 t_0 と t_1 との差から t_{f_w} を求め、求めた t_{f_w} と予め決定した f_w とを数1に代入することにより、各段階の h_i を計算した。

【0020】

[結果と考察]

(1)非導電性の蒸留水が上層に位置する場合

h_i が変化した場合に計測されるTDR波形の一例として、上層の蒸留水($f_w=0.0005S \cdot m^{-1}$)を塩水($f_w=5.2S \cdot m^{-1}$)が押し上げる過程で測定した波形を図3に示す。蒸留水は非導電性の媒質であるため、ロッド2に与えたステップパルスの電気エネルギー吸収量は小さい。そのため、 $h_i=0m$ では、ロッド先端2bの t_2 に急峻な立ち上がりを伴うTDR波形となった。他の h_i 条件では、立ち上がり点が認められない代わりに ψ 値の急減点 t_1 (図中の上向き矢印)が認められ、 t_1 の位置は、 h_i が大きくなるにしたがって図の左方にシフトした。この t_1 から求めた t_{f_w} は、 h_i が増大するにしたがって直線的に減少し(図4)、また h_i の実測値と数1に基づくTDR計測値の平均二乗誤差の平方根RMSE(Root mean square error)は0.8cmとなった。

10

現実の沿岸帯水層では上層に位置する淡水が導電性を示すが、上層にエネルギー吸収の小さい蒸留水のような媒質が存在する理想条件では、TDRにより高い精度で h_i の評価が可能であると考えられる。

20

【0021】

(2)導電性の淡水が上層に位置する場合

伝播経路が同一である場合、導電性媒質による電気エネルギーの吸収量は、伝播距離が長いほど、また媒質の導電性が高いほど増大することを先に述べた。そのため、淡塩水境界面のような電気伝導度の局所変化を示さない均質な媒質中では、ロッドが長くなるほど、また媒質の導電性が高くなるほど、TDR波形の凹凸も不明瞭となり、 t_2 の位置を特定するのが困難となった(図5)。

【0022】

同様の傾向は、淡塩水境界面の計測においても生じた(図6)。上層の淡水に $f_w=0.1, 0.2, 0.3, 0.4S \cdot m^{-1}$ のNaCl溶液を用いた場合の各 t_1 位置における ψ 値は、図3の上層に蒸留水($f_w=0.0005S \cdot m^{-1}$)を用いた場合と比べて小さかった。いずれの f_w 条件においても、パルスが境界面に達するまでに喪失するエネルギー量は、蒸留水の場合と比べて大きい。このことが原因で、 t_1 位置が不明確になる傾向が認められ、 h_i が小さいほど、また f_w が大きいほど t_1 位置の検出が困難になった。特に、 $f_w=0.3S \cdot m^{-1}$ では $h_i=0.05 \sim 0.2m$ 、 $f_w=0.4S \cdot m^{-1}$ では $h_i=0.05 \sim 0.3m$ に対する t_1 を検出することができなかった。 t_1 が得られた各 f_w 条件において h_i の実測値と数1に基づくTDR計測値とを比較したところ、 $f_w=0.1, 0.2, 0.3, 0.4S \cdot m^{-1}$ における各 h_i のRMSEは、0.5, 0.8, 0.7, 0.7cmであり(図7)、理想条件と考えられた蒸留水の場合(図4)と、ほぼ同等の計測精度であることが判明した。

30

【0023】

高 f_w 条件では t_1 が検出できない場合が認められたことから、本発明の方法の適用限界を調べるために、 t_1 が検出できる淡水層の最大厚、すなわち最大淡水層厚 D_{max} (m)を調べた。その結果、 $f_w=0.1$ と $0.2S \cdot m^{-1}$ に対する D_{max} は0.45m以上であり、 $f_w=0.3S \cdot m^{-1}$ では $D_{max}=0.23m$ 、 $f_w=0.4S \cdot m^{-1}$ では $D_{max}=0.13m$ であると考えられる。つまり、 h_i が計測できる範囲は、 $f_w=0.1$ と $0.2S \cdot m^{-1}$ では $h_i=0 \sim 0.48m$ 又はそれよりも広い範囲、 $f_w=0.3S \cdot m^{-1}$ では $h_i=0.25 \sim 0.48m$ 、 $f_w=0.4S \cdot m^{-1}$ では $h_i=0.35 \sim 0.48m$ であった。

40

以上の結果より、 D_{max} を超えない範囲であれば f_w が高い場合でも、数1を介して淡塩水境界面を十分な精度で評価できるものとする。

【0024】

(3)境界面が上下に変動した場合

図8は、淡塩水境界面の位置が上下に変動した場合のTDR波形の中から、上昇過程にお

50

る $h_i=0.15\text{m}$ 及び下降過程における $h_i=0.25\text{m}$ に対する波形を示す。境界面が変動すると、淡水と塩水との混合が促進されることで電気伝導度の鉛直勾配が小さくなり両者の境界が不明瞭になると考えられたが、 $h_i=0.15$ と 0.25m のいずれの場合においても、上昇と下降を1~3反復してもTDR波形の形状に大きな差異は認められなかった。また、いずれの波形においても明確な値の急減が認められた。類似した傾向は他の h_i 条件($h_i=0.1, 0.2, 0.3\text{m}$)にも共通した。すべての h_i 条件におけるTDR波形では t_1 位置が概ね等しく、 h_i の計算値と実測値はよく一致した(図9)。

【0025】

本実験結果から、TDRによる淡塩水境界面の検出には、淡水と塩水との導電性の較差が保持され、そこに電气的特性の急変点の存在が必要であることが確認された。実際の観測井戸では、降雨や潮汐に伴う淡塩水境界面の挙動は周囲の水文地質によって特徴づけられ、例えば境界面の変動や地下水の流れが激しい場所では導電性の較差が本実施例で形成された較差よりも小さくなる可能性がある。しかし、地下水流などによって境界面が常時攪乱されるような特殊な水文地質でなければ、その位置が潮汐や降雨によって変動したとしても、TDRによって検出できる可能性は高いと考える。

【0026】

本研究では、円筒カラム内に淡水と塩水との二重層を再現し、時間領域反射法TDRを利用して淡塩水境界面の検出を試みた。

蒸留水と塩水との境界面に垂直にTDRプローブを挿入し、そこにマイクロ波のステップパルスを与えたところ、TDR波形上に反射係数(電気エネルギーの指標)の急減点 t_1 が記録された。 t_1 から求めたプローブのロッド根端から境界面までのパルスの伝播時間 t_{fw} と、ロッド先端から境界面までの距離 h_i との関係は1次式(数1)で表され、同式を介して $RMSE < 1\text{cm}$ の範囲で h_i を計測できることが明らかとなった。

【0027】

一方、淡水の電気伝導度 σ_{fw} が高くなると、パルスが淡水中を伝播する過程で失うエネルギーが大きくなり、 t_1 の検出が困難になる場合が生じた(図6又は図7)。しかし、淡水層厚が薄い場合には、正味のエネルギー損失量が少なくなるため、 t_1 が検出可能となり、そのような条件における $RMSE$ は 1cm 未満であった。また、境界面の位置が上下に変動しても、乱れない流れ場では同一の精度で h_i を決定できることを確認した。

しかしながら、現場レベルでの実用化には、いくつかの課題もある。降雨や潮汐による境界面の変動幅を考慮し、計測範囲は比較的広いほうが望ましいが、本発明の方法の適用範囲は、 t_1 が検出できるロッド根端からの最大淡水層厚 D_{max} に依存することを論じた。実験結果からも明らかのように、 D_{max} は、 σ_{fw} が高く淡水のエネルギー吸収が大きいほど小さくなる。そのため、 h_i の計測は、対象水域の σ_{fw} に対する D_{max} を超えない範囲に制限されることに留意する必要がある。

【符号の説明】

【0028】

- 1 プローブ
- 2 ロッド
- 3 淡塩水境界面
- 4 ケーブルテスター
- 5 アクリル製円筒型カラム

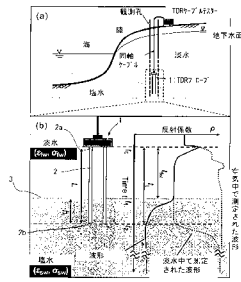
10

20

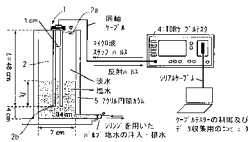
30

40

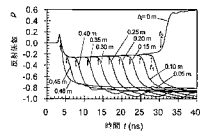
【図1】



【図2】



【図3】



フロントページの続き

審査官 藤田 憲二

- (56)参考文献 特開2006-091018(JP,A)
特表2009-511933(JP,A)
特表2003-529779(JP,A)
特表2002-535641(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01F 23/00