

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360374

研究課題名(和文)アレー型ボアホールレーダによる断層、き裂や鉱脈の3次元位置形状計測と分類法の確立

研究課題名(英文)Three-dimensional location and classifications of faults, fractures and veins by an array type borehole radar

研究代表者

海老原 聡 (EBIHARA, Satoshi)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：20301046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、ダイポールアレーとループアンテナ(DALAB)とそれに適用可能な信号処理法を提案している。これを用いると、坑井内で波の到来方向と偏波状態が推定可能になる。この信号処理では、ダイポール信号とループ信号の両方を時間領域で抽出し、2つの信号の比を計算する。この比と理論計算と比較することで、波の偏波状態を推定する。この研究では、実験データへ、提案した方法を適用した。実験場は垂直導体円柱と地層境界面が存在している。DALABで反射点の3次元位置と偏波状態を推定したところ、導体円柱からの反射波は垂直偏波に近く、地層境界面からの反射波は水平偏波成分を含むことがわかった。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a signal processing method suitable for a dipole array and a loop antenna in a borehole (DALAB) that enables estimation of the polarization states of a wave incident on the DALAB in directional borehole radar. In the processing, we pick complex amplitudes of both a dipole signal and a loop signal in the time domain, and calculate a ratio of the two amplitudes. The polarization state is estimated by comparing the theoretical and experimental ratios. We then applied the signal processing method to field experimental data. This experiment consists of a vertical conducting cylinder and inhomogeneity caused by an interface. We found an almost vertical and linearly polarized wave from the vertical conducting cylinder are estimated by the DALAB, whereas a rather elliptical and horizontally polarized wave are estimated from the inhomogeneity.

研究分野：地下電磁波計測工学

キーワード：ボアホールレーダ

1. 研究開始当初の背景

(1) 電磁波による地中計測法の1つにボアホールレーダがある。このレーダでは、直径約 10 cm の坑井内にレーダを挿入し、20 ~ 300 MHz の電磁波で地中物体の位置を計測するものである。クロスホール計測では、送受信アンテナを異なる坑井内に挿入し、送信アンテナから受信アンテナへ到達する直接波の伝搬速度を用いることで坑井間のトモグラフィイイメージを得ることができる。このような複数の坑井の掘削はコスト的に困難である場合もある。この場合でも、単一の坑井に送受信アンテナを挿入してレーダ計測を行うシングルホール計測が可能であり、き裂や断層からの反射波を測定できる。通常は送受信アンテナにダイポールアンテナを用いる無指向性レーダで、坑井から物体までの距離や物体が存在する深度の2次元計測ができる。近年では、1本の坑井で物体位置の3次元計測が求められている。

(2) レーダで一推定された物体がどのような物体なのかを判別することが放射性廃棄物の処分場選定の際に必要となっていた。このような計測は偏波情報を用いるポラリメトリックボアホールレーダとして提案されていたが、指向性を持たなかった。

2. 研究の目的

(1) 第一点は坑井内での電磁波の偏波、時刻と方向の同時推定の実現。ボアホール効果に偏波状態のパラメータを導入し定量化しつつ、これまでの垂直偏波に加え水平偏波に感度をもつ指向性アンテナを開発する。

(2) 第二点はこの原理にもとづき、偏波が利用可能な指向性レーダである3次元フルポラリメトリックボアホールレーダを開発する。レーダシステムの試作のみならず、目標物体の3次元位置形状や性質が既知である実験場で、試作レーダによるデータ取得、物体の3次元位置形状計測、さらには電磁界解析を踏まえて、直交2偏波のアレー信号の解釈を行い、物体の3次元位置と同時に性質を定量化していく。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、図1に示す、波の到来方向と偏波状態が推定可能なボアホールレーダ用ダイポールアレーとループアンテナ (a dipole array and a loop antenna in a borehole (DALAB)) を用いていく。ループアンテナは中心導体円柱(centered conducting cylinder (CCC))の周囲にあり、CCC から細い同軸ケーブルで給電されている。平面波が入射すると、このループアンテナはz軸方向の磁界に感度をもつ。全てのアンテナとCCCは細線近似が適用できるものとする。給電点には、平衡-不平衡の問題を解消するため、バルンが適用されている。モーメント法(Method of Moments (MoM)) を用いて、DALAB に平面

波が入射したときの給電点での電圧を計算できる。この計算の際には、アンテナ周囲の防水用容器と坑井内の媒質が複数層をもつ円筒モデルで表現される。計算では、CCC から出る給電線は無視した。

(2) 本研究では、図1のように、任意の偏波状態をもつ平面波がDALABへ入射したとき、給電点電圧から波の到来方向と偏波状態を推定する方法を開発する。

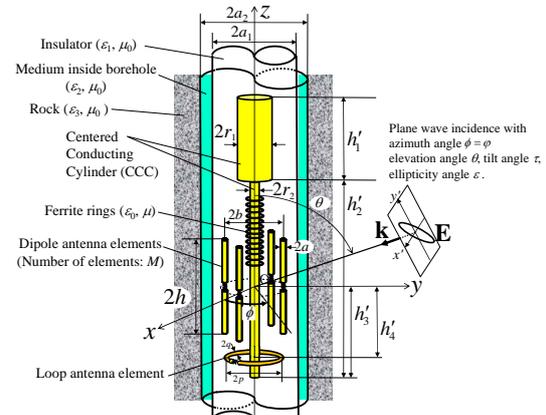


図1 坑井内のダイポールアレーとループアンテナ(DALAB).

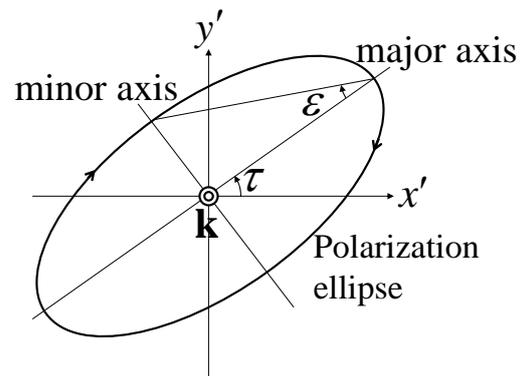


図2 偏波における傾き角 τ と膨らみ角 ϵ の定義

4. 研究成果

(1) 偏波状態(ϵ, τ)をもつ平面波が仰角 θ と方位角 ϕ でDALABへ到来する。 θ と ϕ は引用文献①に述べる方法によって推定できていると仮定する。 ϵ は膨らみ角、 τ は傾き角と呼ばれ、図2で定義される。ここでは、(ϵ, τ)を推定する方法を述べる。

坑井内に、波長よりも短い、等しい長さの垂直ダイポールアンテナ素子が円形に配列され、この近くに1つの水平ループアンテナが置かれている。ダイポールアンテナ素子の数は $M \geq 3$ である。時間領域の受信波形は周波数 f_m で変調されたパルスであるとする。平面波だけがDALABへ入射する。いま、平均されたダイポールアレー信号を

$$x(t) = \sum_{i=1}^M x_i(t), \quad (1)$$

と定義する。ここで、 $x_i(t)$ は i 番目のダイポールアンテナ素子の給電点における複素電圧である。ループアンテナ素子の複素受信信号を $y(t)$ とする。これらの受信信号は、周波数領域で MoM によって計算でき、これを逆フーリエ変換 (IFFT) によって時間領域へ変換できる。IFFT の適用の前に、周波数領域で窓関数 $W(f)$ で重み付けをする。次式で定義されるアンテナ測定ベクトルは、線形性によって分解される。

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_H(t) \\ y_H(t) \end{pmatrix} + \rho(\varepsilon, \tau) \begin{pmatrix} x_V(t) \\ y_V(t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ここで、下つき文字 H と V はそれぞれ水平偏波と垂直偏波が DALAB へ入射したときのアンテナ給電点における受信電圧を表す。また、偏波比 $\rho(\varepsilon, \tau)$ は

$$\rho(\varepsilon, \tau) = \frac{\sin \tau \cos \varepsilon + j \cos \tau \sin \varepsilon}{\cos \tau \cos \varepsilon - j \sin \tau \sin \varepsilon}. \quad (3)$$

と表される。入射波の到達時刻は

$$T = \begin{cases} \arg \max_t |x(t)|, & (\max_t |y(t)| < \max_t |x(t)|) \\ \arg \max_t |y(t)|, & (\max_t |x(t)| < \max_t |y(t)|) \end{cases}, \quad (4)$$

で推定する。本研究では、理論的なアンテナ電圧比 $V(\varepsilon, \tau)$ を

$$V(\varepsilon, \tau) = \begin{cases} \frac{x(T)}{y(T + \Delta T)}, & (\max_t |y(t)| < \max_t |x(t)|) \\ \frac{x(T - \Delta T)}{y(T)}, & (\max_t |x(t)| < \max_t |y(t)|) \end{cases}, \quad (5)$$

で定義する。ここで、時間遅れ ΔT は

$$\Delta T = \frac{(z_{dipole} - z_{loop}) \cos \theta}{v} = \frac{h'_4 \cos \theta}{v}. \quad (6)$$

で推定する。この式で、値 z_{dipole} と z_{loop} はそれぞれダイポールアンテナとループアンテナの z 座標である。値 v は媒質中の波の速度である。

上記と同様にして、実験データからもアンテナ電圧比 V_{Ex} を求める。この実験値と理論値の差を最小にする問題:

$$(\hat{\varepsilon}, \hat{\tau}) = \arg \min_{\varepsilon, \tau} |V_{Ex} - V(\varepsilon, \tau)|^2, \quad (7)$$

を解くことで、偏波状態 (ε, τ) を推定する。

(2) 坑井 1 と坑井 2 が大阪電気通信大学寝屋川キャンパスに掘削されている。実験場の媒質は湿った土で構成されている。推定された比誘電率は 25 である。媒質の損失は高い。実験データは地下水面 (90 cm) よりも深いところで取得した。図 3 はフィールド実験のセットアップを示す。坑井 1 に、送信用ダイポールアンテナと DALAB を走査する。坑井 2 は、坑井 1 は 2 m 離れており、反射体用の導体円柱が置かれている。掘削記録によると、深度 5 m 付近に砂層とシルト層の境界面が存在している。

図 4(a) は受信した時間領域波形を示す。30 ns 付近には、振幅が大きき、送信アンテナからの直接波が到来している。この同じ時刻では、ループアンテナでは、振幅が小さいことに注意のこと。これは送信アンテナから放射されている波は垂直偏波であることに起因する。この直接波後に、いくつかの地中からの反射波が到来している。ループアンテナの振幅の大きさは、ダイポールアンテナよりも、時々大きくなるのがわかる。これは図 4(b) を見ると明確である。黒破線の枠内にある波は坑井 2 内にある導体円柱からの反射波である。これは、導体円柱を取り除くと黒枠内の波が変化することを確認していることから明らかである。全深度で、提案したアルゴリズムを適用した。一例として、図 5 に、深度 465 cm で推定した結果を示す。実験値の $|x_{Ex}(t)|$ か $|y_{Ex}(t)|$ の最大値から、波の到達時刻 T_{Ex} を推定した。時刻 40 ns 以降では、図 5(a) に示す、5 つの波の到達時刻を推定した。図 5(b) は式(7)で推定した (ε, τ) によって求めた、理論的な波を示している。例えば、図 5(b) の波(5)は図 5(a) の 69 ns 付近に到来する波に対応している。図では、波(1)と(5)の時刻に垂直偏波した波が到来している。波(2),(3)及び(4)の時刻では、傾き角の絶対値が 80° 以下であり、膨らみ角が 4° 以上である。これは、波(1)と(5)に比べて、波(2),(3)と(4)のほうが水平偏波成分を含むことを示している。ダイポールアレー信号だけを用いて、物体の 3 次元位置推定が可能である (引用文献①)。本研究では、偏波状態と反射点の 3 次元位置を結びつけることにする。図 6 に、推定された反射点の 3 次元推定結果と偏波比の大きさを示す。反射点の位置をみると、反射点は 2 つに分類できる。クラスタ(A)は図 5(a)の波(1)-(4)から推定された反射点である。これは坑井 2 とは逆方向にあるので、深度 5 m 付近にある境界面であると考えられる。クラスタ(A)の偏波比は 15 dB 以下である。これはクラスタ(B)よりも低い。これは、送信アンテナから放射された垂直偏波が幾何学的に複雑な形状をもつ境界面の不均質によって、水平偏波成分が発生したである。クラスタ(B)は波(5)から推定された。クラスタ(B)は坑井 2 の底部に付近にあるので、これは坑井 2 の中の導体円柱上の反射点である。クラスタ(B)は偏波比 20 dB 以上である。これは垂

直導体円柱は垂直偏波を反射したことによる。なお、垂直偏波の場合、理論的には、偏波比の大きさは無限大に発散する。以上により、偏波比の大きさをを用いると、物体の判別が行えることがわかる。

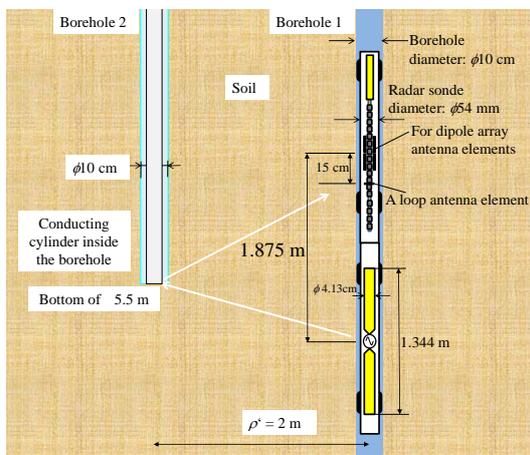


図3 フィールド実験

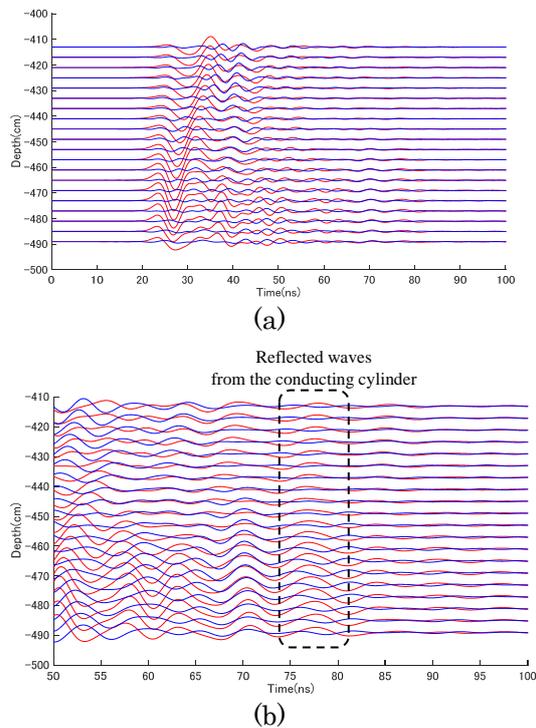


図4 フィールド実験の受信信号。赤線が平均したダイポールアンテナの波形。青線が実験のループアンテナ信号。

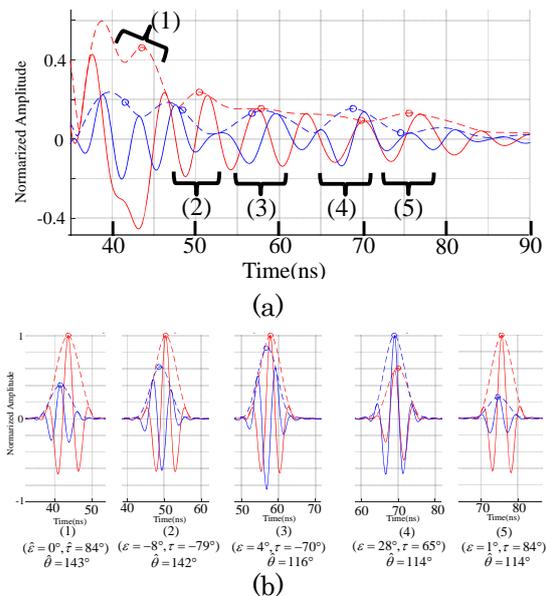


図5 深度 465 cm における、偏波状態 (ϵ, ϕ) の推定結果。赤線が平均したダイポールアンテナの波形。青線が実験のループアンテナ信号。

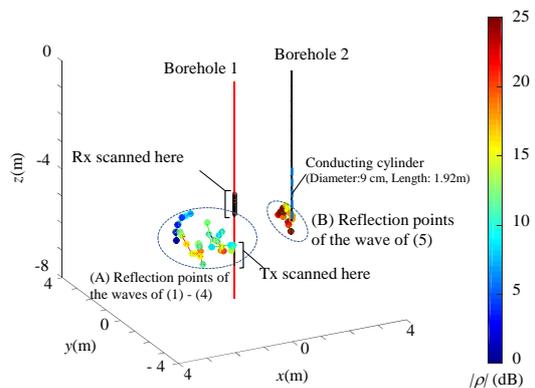


図6 反射点の3次元位置と偏波比の推定結果

<引用文献>

- ① S. Ebihara, H. Kawai and K. Wada, "Estimating 3-D Position and Inclination of a Planar Interface with Directional Borehole Radar," Near Surface Geophysics, vol. 11, pp. 185-195, 2013.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① S. Ebihara, Y. Kimura, T. Shimomura, R. Uchimura and H. Choshi, "Coaxial-fed Circular Dipole Array Antenna with Ferrite Loading for Thin Directional Borehole Radar Sonde," IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 4, pp. 1842 - 1854, 2015. (査読有) DOI:10.1109/TGRS.2014.2349921

[学会発表] (計2件)

- ① S. Ebihara, Y. Koresawa and K. Kawata, "Borehole Radar Measurement with a Dipole Array and a Loop Antenna," Proceedings of the 8th International Workshop on Advanced Ground-Penetrating Radar (IWAGPR2015), 4 pages, Florence, Italy, July 7-10 2015.(to be published)(査読有)
<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- ② S. Ebihara, Y. Nakamoto and K. Kawata, "Cylindrical Air Layer to Reduce the Influence of the Direct Wave in Singlehole Borehole Radar," Proceedings of the 8th International Workshop on Advanced Ground-Penetrating Radar (IWAGPR2015), 4 pages, Florence, Italy, July 7-10 2015.(to be published)(査読有)
<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

[その他]

ホームページ

<http://www.osakac.ac.jp/labs/ebihara/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

海老原 聡 (EBIHARA, Satoshi)

大阪電気通信大学工学部・教授

研究者番号：20301046