

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06642

研究課題名(和文) 単一坑井で断層等の3次元位置形状計測が可能なフルポラリメトリックボアホールレーダ

研究課題名(英文) Full polarimetric directional borehole radar for 3-D single-hole borehole radar measurement

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：フルポラリメトリック指向性ボアホールレーダの試作を行った。本システムでは、送受信アンテナで最大6素子のアレー化が可能である。本レーダを坑井内で使用する際には伝搬モードであるHE11モードが発生するが、適切なバンドパスフィルタをかけることで信号処理により伝搬モードを抑圧できることを示した。坑井に対し斜めに設置された基礎杭を実際に計測するフィールド実験を行ったところ、偏波を利用することで3次元位置情報だけでなく、基礎杭の傾きの情報も取得できることを実証した。本レーダでは、アンテナへ斜めに波が入射することが考えられるが、この場合には臨界の入射仰角が存在することを理論計算と実験により示した。

研究成果の概要(英文)：We developed full polarimetric direction borehole radar. In this radar, we may have six antenna elements maximally at both a transmitter and a receiver. The single-hole measurement showed occurrence of guide modes such as HE11 mode in single-hole measurement. However, we found that we might remove it with an optimal bandpass filtering. We conducted field experiments with a vertical foundation pile and an inclined borehole. In this measurement, we made use of the polarization information with the developed radar. The experimental results showed that successful estimation of an inclination of the pile as well as a position in three-dimensional space. Additionally the experimental and theoretical investigation showed that there are critical situations when a plane wave is incident on the dipole array antenna obliquely.

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 地中レーダ

1. 研究開始当初の背景

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。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。一方、申請者らはダイポールアレーアンテナによる指向性ボアホールレーダを開発していた。さらにこれに受信アンテナヘループアンテナを組み込むことで、受信側アンテナにおいて、到来する波の到来方向だけでなく、波の偏波状態も推定できる機能を付加していた。

大気中レーダでは、物体からの反射波の偏波状態を利用して、物体の判別等の情報を行うポラリメトリックレーダ計測が行われている。これをボアホールレーダで行う場合は送受信アンテナともに直交偏波を送受信できる必要があった。

2. 研究の目的

直交偏波を送受信できるフルポラリメトリック指向性ボアホールレーダ (Full polarimetric directional borehole radar, FPDBR) を開発し、岩石中の断層や土壌中の導体円筒などの物体の3次元位置だけでなく、物体の性質に関する情報を取得可能であること実証することを目的とする。

3. 研究の方法

最初にFPDBRを開発した。送信側でもアンテナをアレー化し、さらにダイポール素子とループ素子を導入した。これにより、送信側でも指向性を持たせ、垂直偏波と水平偏波を分離して波を放射可能にした。本研究では多数回の実験により開発したシステムの調整等を可能にするため、計測対象を土壌中の導体円柱の計測に絞ることにした。この実験を通して、物体の3次元位置計測と偏波計測を行った。

4. 研究成果

① フルポラリメトリック指向性ボアホールレーダの試作とその調整

図1に本研究で試作したFPDBRのシステムブロック図を示す。送受信アンテナ部に高周波スイッチングシステムを導入することで信号伝送システムは1チャンネルだけであるが、送受信アンテナで最大6素子までをアレー化することに成功した。FPDBRの受信データを確認するため、図2に示す実験を行った。送信アンテナからの直接到来する直接波を受信できる。図3はパルス応答受信波形

の一例である。本図では、送信側はダイポール素子に固定し、受信側でダイポール4素子とループ素子1素子を受信した。中心周波数 f_c のバンドパスフィルタを通過させた後の受信波形を掲載している。中心周波数は3パターンとした。 $f_c=100$ MHzの場合に比べ、 $f_c=300$ MHzへと周波数が高くなるにつれ、時刻40 ns以降に波の振動がみられていることがわかる。これは理論解析によると、送信アンテナが偏心した位置に存在することによって発生した伝搬モード(HE₁₁モード)であることが判明した。これは地中からの反射波の検出を阻害する可能性がある。このことより、FPDBRでは、 $f_c=100$ MHzのバンドパスフィルタをかけることで、伝搬モードの発生を抑え、地中からの反射波を検出することができるとわかった。

② 3次元ポラリメトリック計測の実験

土壌中に鉛直に導体円柱があり、そこから離れた場所に坑井がある実験場(東京都内)で計測実験を行った。円柱は建物の基礎杭を模擬している。図4は試作したレーダによって得られた3次元推定結果である。(a)では、坑井は鉛直に掘削されており、(b)では坑井は斜めに掘削されている。色がついている小さな丸は電磁波の偏波の変換されやすさを表している。また、赤い棒は偏波の方向を表している。この方向が導体円柱の向きを表していると解釈できる。この結果により、物体の3次元位置の推定だけでなく、円筒状の物体が向く方向の情報が得られることがわかった。これはポラリメトリック指向性ボアホールレーダが物体の3次元位置だけでなく、物体の性質に関する情報を取得できることを示している。

③ ダイポール及びループアンテナアレーへの波の斜め入射

FPDBRを今後使用していくことを考えると、アンテナへ斜めに波が入射することが多くなる。この場合で、本研究ではこれまで想定されていなかった特異な現象は起こることを発見した。図5のように、2つの坑井のそれぞれに送信用と受信用のダイポールループアレーアンテナを設置し、受信アンテナへの波の入射仰角を変えながら受信した。図6は受信波形を示している。図(a)で、深度 $z=0$ cmが入射仰角 90° で波が入射したときであり、 z が低くなるにつれて入射仰角 θ が小さくなる。この図によると、入射仰角が小さくなるに従い、ダイポールアレーアンテナ間の波の到達時間が小さくなる。 $z=-180$ cm付近で波の到達時間差が無くなった後、さらに深度を下げると逆に波の到達時間差が大きくなることがわかった。この状況は図(a)の波を縦方向に拡大した図(b)ではっきりとわかる。図7は、波の入射仰角 θ に対し波の到来方位角を推定した結果である。真の波の到来方位角は 0° である。青丸印が実験値であり、オレンジ色の印が2通りの計算機シミュレーション結果である。両者ともに、入射仰角

が小さくなるにつれて、推定される方位角が真値から離れる傾向があり、それは最大で 180° であることがわかる。本研究では、理論解析を行ったところ、波が臨界入射仰角 θ_c で入射するとダイポールアレーアンテナ間の波の到達時間差が無くなることがわかり、その θ_c を超えた入射仰角で波が入射すると 180° づれた方位角方向に推定されることがわかった。このことを利用して、波の到来方向推定法として、従来の順方向推定法(Forward method)に加えて、逆方向推定法(Backward method)を提案した。

図8は、岩石中の断層からの反射波の到来方位角を推定した結果である。図(a)では、ダイポールアレーアンテナ間で発生する最大到達時間差 2τ を示している。深度 $z=3.76\text{ m}$ で 2τ が極小になるとき、波の入射仰角が臨界入射仰角となることがわかる。したがって、この深度の前後で波の入射仰角の推定法を変えることで正しい波の到来方向を推定できることが予想される。図(b)は波の到来方位角の推定結果である。波の真の到来方位角は 0° である。予想した通り、深度 $z=3.76\text{ m}$ よりも大きな深度では順方向推定法でよく推定できており、小さな深度では逆方向推定法で首尾よく波の方位角推定ができていくことがわかる。以上より、FPDBRで使用されているダイポールアレーアンテナでは、臨界入射仰角が存在することがわかり、これを念頭においた波の到来方向推定を行うことが重要であることがわかった。

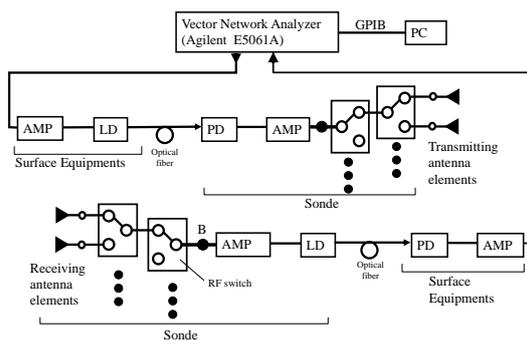


図1 フルポラリメトリック指向性ボアホールレーダシステムブロック図

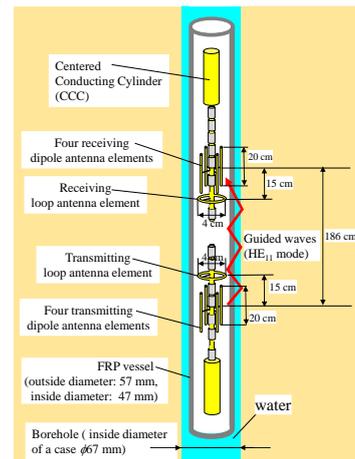
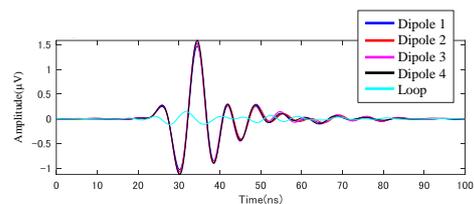
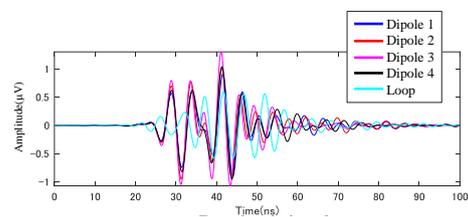


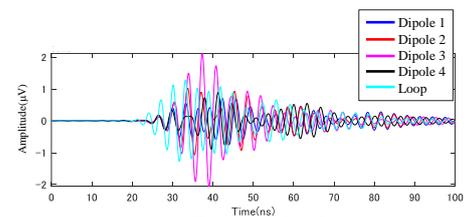
図2 フルポラリメトリック指向性ボアホールレーダシステム



(a) $f_c = 100\text{ MHz}$

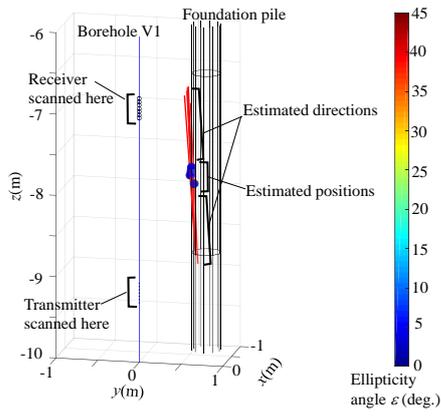


(b) $f_c = 200\text{ MHz}$

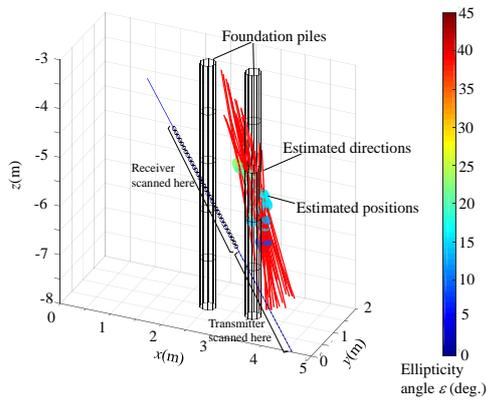


(c) $f_c = 300\text{ MHz}$

図3 受信波形の例



(a) 垂直坑井によるイメージング



(b) 斜め坑井によるイメージング

図4 3次元推定の結果

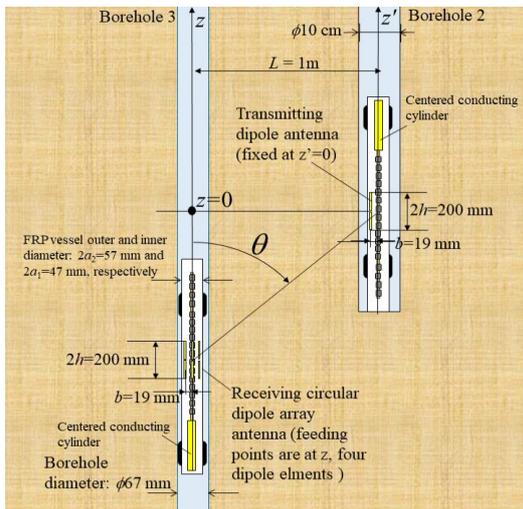
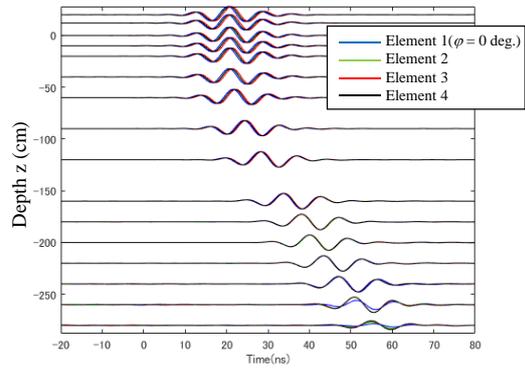
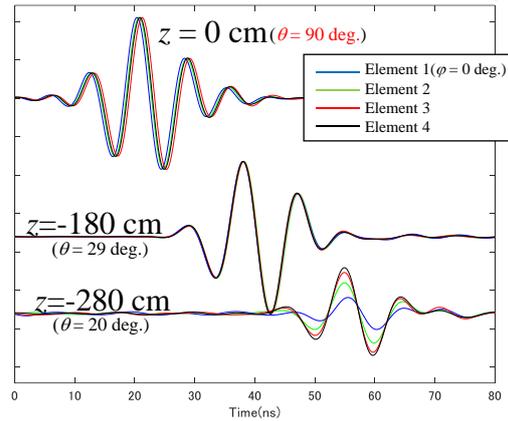


図5 ダイポールループアンテナへの波の入射実験



(a) 全深度の受信波形



(b) 3深度の拡大図

図6 図5の実験の受信波形

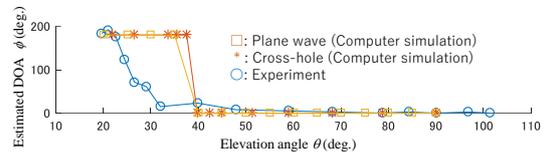


図7 図5の実験における波の到来方向推定結果

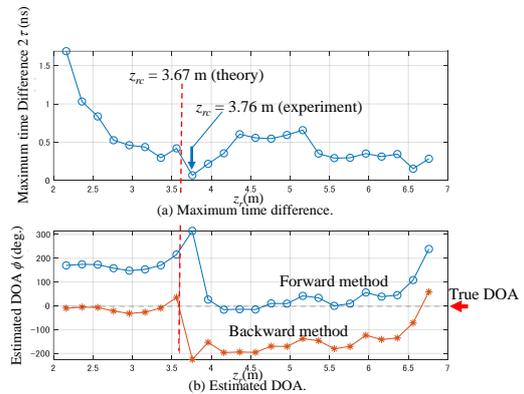


図8 岩石中の断層からの反射波の解析結果 (a) ダイポールアンテナの最大到達時間差 (b) 順方向推定法と逆方向推定法による断層の方向推定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ① S. Ebihara, S. Kotani and K. Fujiwara, "Plane Wave Arrival Time Studies with a Dipole Array Antenna in a Borehole," Proceedings of the 17th International Conference of Ground Penetrating Radar (GPR 2018), 6 pages, Rapperswil, Switzerland, June 18-21, 2018. (査読あり) https://www.gpr2018.hsr.ch/index.php?id=15715&no_cache=1
- ② S. Ebihara, K. Kobayashi, K. Okuhira and H. Maeda, "3-D Estimation of a Foundation Pile Using Polarization-Sensitive Directional Borehole Radar," Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground-Penetrating Radar (IWAGPR2017), 6 pages, Edinburgh, Scotland, June 28-30 2017. (査読あり) DOI: 10.1109/IWAGPR.2017.7996030
- ③ S. Ebihara, S. Yamamoto, K. Inada, K. Ishida, and A. Kawasaki, "Experiments in Skarn with a Polarization-sensitive Directional Borehole Radar," Proceedings of the 16th International Conference of Ground Penetrating Radar (GPR 2016), 6 pages, Hong Kong, 13-16 June 2016. (査読あり) DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572658
- ④ S. Ebihara, Y. Shimomura, K. Hotta, K. Hosokawa, and G. Hoshii, "Experiments with a dipole array and loop antenna in a cylindrical water layer," Proceedings of the 16th International Conference of Ground Penetrating Radar (GPR 2016), 6 pages, Hong Kong, 13-16 June 2016. (査読あり) DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572659
- ⑤ S. Ebihara, T. Kuroda, Y. Koresawa, K. Inada, A. Uemura, and K. Kawata, "Improved Discrimination of Subsurface Targets Using Polarization-sensitive Directional Borehole Radar," IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, no. 11, pp. 6429 – 6443, 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2585178(査読あり)

〔図書〕(計1件)

- ① S. Ebihara, pp. 55-59, The test sites for borehole radar in Osaka electro-communication University, Catalogue of GPR test sites, COST action TU1208, 1st edition, 2017.(ISBN: 9788888173009, DOI: 10.978.8888173/009, <http://gpradar.eu/resources/books.html>)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：ダイポールアレイアンテナによる平面

状探査対象の方向推定システム及び方法

発明者：海老原 聡

権利者：大阪電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2018-112724

出願年月日：2018年6月13日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<https://research.osakac.ac.jp/index.php?%E6%B5%B7%E8%80%81%E5%8E%9F%E3%80%80%E8%81%A1>

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

(2) 研究協力者

和田 一成 (WADA, Kazushige)

三井金属資源開発株式会社・代表取締役社長