

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04969

研究課題名（和文）透水性き裂3次元分布推定フルポラリメトリックMIMOボアホールレーダと実証実験

研究課題名（英文）3D estimation of water-permeable fractures using full polarimetric MIMO borehole radar and demonstration experiment

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：3次元分布推定するフルポラリメトリックボアホールレーダを開発し、その性能評価を学内実験場で実施した。さらに、このレーダを野外実験へ適用した。結論として、開発したボアホールレーダは期待したポラリメトリックレーダとしての性能を有していることがわかった。この成果は、ボアホールレーダにより、物体の3次元位置だけでなく、き裂や断層に関する形状の情報を取得できる可能性を示唆したものである。これは国際的にみても初めてのことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射性廃棄物の地層処分ではき裂や断層を位置推定するだけでなく、透水性などの詳細な情報が必要である。今後、研究を進めることで、本研究で開発したボアホールレーダがこのような応用の場で使用できることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：We developed a full polarimetric radar for estimating 3D distribution and evaluated its performance at a university experiment site. Furthermore, we applied this radar to outdoor experiments. In conclusion, we found that the developed borehole radar has the expected performance as a polarimetric radar. This result suggests that the borehole radar may obtain not only the 3D position of an object but also information on the shape of fractures and faults. For example, in the geological disposal of radioactive waste, not only is it necessary to estimate the position of faults, but detailed information such as permeability is also required. This suggests that the borehole radar may be used in such applications with further research.

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 アレーアンテナ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射性廃棄物地層処分場の選定のため、近い将来、ボーリング調査が行われ、坑井が掘削されることになる。この坑井周囲にある断層やき裂の3次元的位置や形状だけでなく、透水性といった詳細な情報取得が期待されるだろう。

2. 研究の目的

岩石中の坑井を用いて、坑井周囲の断層やき裂の3次元位置だけでなく、その形状などの情報を、電磁波を用いて測定できるかを調査する。このためには、坑井内で電磁波の伝搬方向だけでなく、電磁波の偏波の情報を取得できるボアホールレーダが必要となる。

3. 研究の方法

ボアホールレーダ用アンテナ素子に、ダイポールアンテナだけでなく、ループアンテナを新規に送受信アンテナに導入する。これにより、坑井内で垂直偏波だけでなく水平偏波の送受信が可能になる。このレーダを実際にレーダ計測に適用し、物体の形状に応じたデータ（ポラリメトリックレーダデータ）が取得できるか確認することで性能評価をする。

4. 研究成果

(1) 3次元分布推定フルポラリメトリック MIMO ボアホールレーダの開発

図1は、本研究で坑井内でのポラリメトリック測定のために開発したアンテナを示す。送信と受信のそれぞれに4個のダイポールアンテナと2個のループアンテナを配置した。ダイポールアンテナとループアンテナは、それぞれ垂直偏波と水平偏波の波を放射および受信する。これらのアンテナは、細い導体円柱に集められた同軸ケーブルの給電線によって給電される。全ての給電線は、増幅器と高周波スイッチに接続されている。光ファイバケーブルで、レーダーゾンデ中のアンテナと地表のベクトルネットワークアナライザなどの地上機器を接続する。送受信アンテナ間の直接結合は、特定の周波数で地中からの反射の検出に影響を与えるので、これを避けるようにアンテナを慎重に設計することが重要であった。

(2) レーダの大学構内での試験

大阪電気通信大学の寝屋川キャンパスにはいくつかのボーリングホールが掘られており、そのうちの4個を以下のフィールドテストで使用した。ここでは、比誘電率が約30と推定される湿った土壌で構成されている。ベクトルネットワークアナライザで測定された周波数領域のデータに、中心周波数150 MHzのバンドパスフィルタを適用した。次に、フィルタ処理されたデータに逆デジタルフーリエ変換を適用して、時間領域信号を取得する。

① 鉛直導体円柱の測定

最初の実験では、レーダーゾンデは水が満たされた坑井1内にある。図2に示すように、坑井1と平行にもう1個の坑井2が掘削されている。坑井間の距離は約1 mである。長さ4 m、直径6 cmの導体円柱がレーダーターゲットとして坑井2に挿入されている。坑井1の1個の深度で36通りの組み合わせ(=送信アンテナ6個×受信アンテナ6個)のS21測定データを取得した。

図3(a)は、送信器がダイポールアンテナで受信器がダイポールアンテナまたはループアンテナの場合の受信時間領域信号の一例を示す。直接波は0から13 nsの間に到着する。坑井2の導体円柱からの反射波は、約30 nsで受信機に到達する。反射波では、受信ダイポールアンテナとループアンテナの2個の信号に大きな違いが見られる。受信ダイポールの振幅は、受信ループアンテナの振幅よりもはるかに大きい。この違いの重要な理由は、レーダーターゲットの形状によって発生する。送信ダイポールは垂直偏波を放射する。受信ダイポールは放射された波と同じ偏波を受信するが、受信ループアンテナは水平偏波を受信する。レーダーターゲットの垂直導体円柱も垂直偏波を反射し、ループアンテナよりもダイポールで多く受信されることになる。さらに、もう1つの理由は、ダイポールアンテナのアンテナ効率がループアンテナよりも高いことである。

図3(b)は、送信器がループアンテナである場合の時間領域信号の一例を示しています。直接波が10~20 nsの間に到着していることがわかる。この波の後、垂直円柱からの反射波が約30 nsに到着する。反射波のループ信号振幅は、ダイポールの信号振幅よりも少し大きい。これは、導体円柱の直径は波長の約10分の1であり、レーダーターゲットの導体円柱は非常に細い導体円柱ではないことを意味する。したがって、導電性円柱は、ループアンテナが放射および受信する水平偏波を良好に反射する。この理由により、大きなループアンテナ信号が生成される。

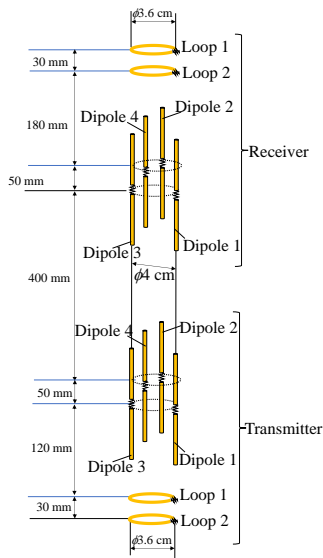


図1 3次元分布推定フルポラリメトリック MIMO ボアホールレーダ

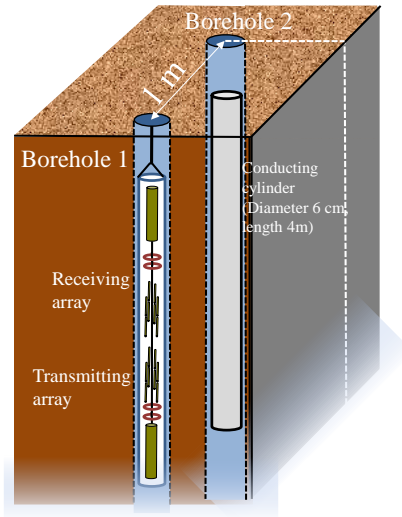


図2 鉛直導体円柱の測定

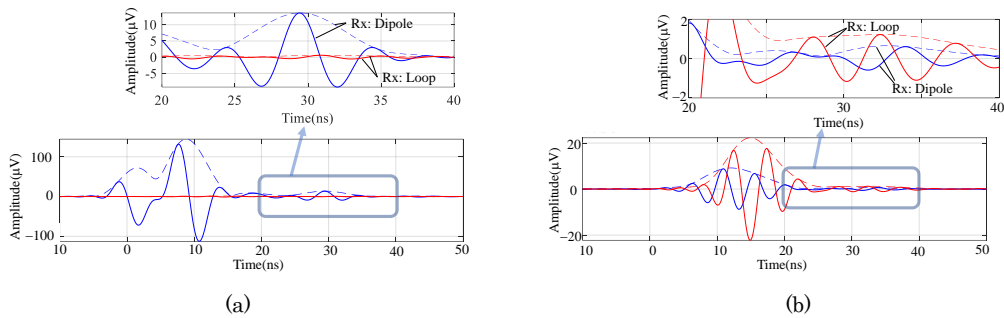


図3 鉛直導体円柱の測定で取得した時間領域波形 (a) 送信：ダイポール、(b) 送信：ループ、実線は実信号であり、破線は信号包絡線である。各図で、下図は-10~50 ns の時間での測定波、上図はこの図を拡大したものである。

② 斜め導体円柱の測定

2 番目の実験では、レーダーゾンデは垂直の坑井である坑井 4 にある。レーダーターゲットは、図 4 に示すように坑井 3 中にある傾斜した導電性円柱です。導体円柱と坑井 3 は両方とも地表に対して 45° だけ傾斜しており、深度約 500 cm でボーリングホール 4 に最も近くなる。坑井 3 と 4 は、別のボアホールレーダ実験に使用されている。図 5 (a) は、ダイポールアンテナが送信機である場合の時間領域信号の一例を示しています。図 3 (a) で見たように、強い直接波は約 7 ns で受信ダイポールアンテナに到達し、傾斜した導電性円柱からの反射波は約 30 ns で到着する。ループアンテナが受信機である場合、図 5 (a) の反射波の振幅は図 3 (a) の反射波の振幅よりも大きくなります。図 5 (a) の反射波の受信ダイポール信号とループ信号の差は、図 3 (a) の差よりも小さい。この事実は、傾斜した導体円柱が水平偏波だけでなく垂直偏波も反射させたことを示している。これは、一般的な導体円柱の散乱特性と一致している。

図 5 (b) は、ループが送信機である場合の時間領域信号の一例を示している。ダイポール信号である直交偏波成分は、ループ信号である平行偏波成分よりも振幅が大きい。これは、傾斜した導体円柱が直交偏波の反射波を引き起こしたことを示唆している。

③ フルポラリメトリックデータの考察

これまでの時間領域信号で見たように、垂直導体円柱と傾斜導体円柱の間には違いがあった。ここでは、その違いを統計的に考察する。図 6 は、各時間領域信号の信号包絡線の最大振幅を示す。たとえば、ダイポール信号は、図 5(a) の 28.3 ns で反射波の最大振幅 15.6 V を持ち、図には青い円があります。同様に、全ての信号の最大振幅を記録し、図にプロットしている。図 6 の上図のデータは、垂直導電円柱ターゲットの実験で測定されたものです。ループ・ダイポールとダイポール・ループの組み合わせの直交偏波成分は、ダイポール・ダ

イポールとループ-ループの平行偏波成分よりも振幅が小さいことがわかる。また、ダイポール-ダイポールの組み合わせの振幅は、ループ-ループの組み合わせの振幅よりも大きいこともわかる。これは、垂直導体円柱での反射とアンテナ効率が原因である。

図の深度 419~523 cm のデータは、傾斜導体円柱の実験で同じ深さで測定されたものに対応しています。反射波の波形はレーダーゾンデの深度によって異なる。このため、複数の深さで測定した。大まかに言えば、すべての組み合わせで、深度が深くなるにつれて振幅が大きくなっている。これは、アンテナがある坑井 4 が、深度約 500 cm で導体円柱がある坑井 3 に最も近づくためです。この一般的な傾向に加えて、ダイポール-ダイポールとループ-ループの平行偏波成分の振幅の大きさは、深さが深くなるにつれて細かく振動している。これは、反射波が到達した時点で強い直接波のエネルギーが残っているために発生し、この影響は平行偏波成分で大きい。最も重要なことは、ダイポール-ループとループ-ダイポールの両方の振幅の大きさが、常にダイポール-ダイポールとループ-ループの振幅の大きさの間にあることである。この関係は、垂直導体円柱の場合とは異なる。この事実は、傾斜導体円柱が垂直導体円柱よりも垂直偏波成分を反射させることと一致している。ダイポール-ループの振幅はループ-ダイポールの振幅とほぼ同じであり、これら 2 つの組み合わせの振幅の差は小さく、深さ 459~503 で約 1 dB 以内である。これは、この実験結果が相反定理と一致することを意味している。上記を考慮すると、フルポラリメトリックボアホールレーダーは非常にうまく機能していると考えられる。

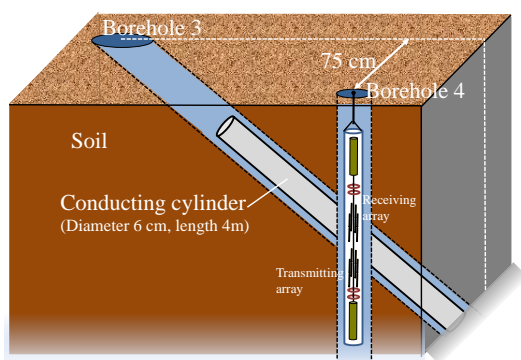


図4 斜め導体円柱の測定実験

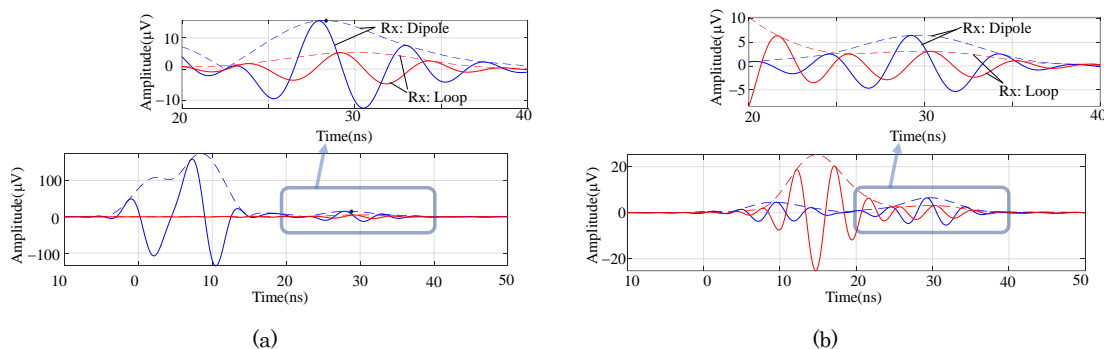


図5 斜め導体円柱の測定で得られた時間領域波形。深度 499 cm。(a) 送信：ダイポール、(b) 送信：ループ、実線は実信号であり、破線は信号包絡線である。各図で、下図は-10~50 ns の時間での測定波、上図はこの図を拡大したものである。

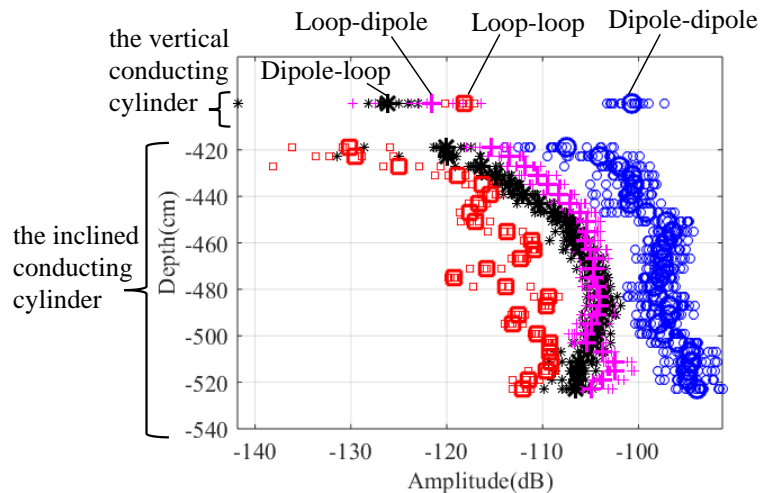


図6 反射波の信号包絡線の最大振幅。小さいマーカーは測定データであり、大きなマーカーは同一深度で同じアンテナで得られた測定データを平均した値である。

(3) 断層・き裂計測の実証実験

① 福井県中竜鉦山内でのき裂・断層計測

2022年8月に、福井県中竜鉦山で断層破碎帯の計測を実施した。断層に対し、3次元分布推定フルポラリメトリックMIMOボアホールレーダを用いた測定を行った。この結果、断層からの反射波を実際に取得することができた。さらに、フルポラリメトリックデータを取得できた。

② 宮城県石越町でのき裂計測

2023年8月に宮城県石越町にある石切場の掘削した坑井内で、3次元分布推定フルポラリメトリックMIMOボアホールレーダを用いた測定を行った。その結果、き裂からの反射波を実際にとらえることができ、フルポラリメトリックデータを測定した。これによると、き裂を平面的な物体と考えたときと似たデータが取得できていた。

(4) 研究成果のまとめ

上記(1)～(3)により、3次元分布推定するフルポラリメトリックボアホールレーダを開発し、その性能評価を学内実験場で実施した。さらに、このレーダを野外実験へ適用した。結論として、開発したボアホールレーダは期待したポラリメトリックレーダとしての性能を有していることがわかった。この成果は、ボアホールレーダにより、物体の3次元位置だけでなく、き裂や断層に関する形状の情報を取得できる可能性を示唆したものである。これは国際的にみても初めてのことであり、例えば、放射性廃棄物の地層処分ではき裂や断層を位置推定するだけでなく、透水性などの詳細な情報が必要である。今後、研究を進めることで、ボアホールレーダがこのような応用の場で使用できることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ebihara Satoshi, Matsumoto Masayuki	4. 巻 60
2. 論文標題 Loop Array Antenna in a Borehole for Directivity to a Horizontally Polarized Wave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2022.3177444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Ebihara, Y. Tsujikawa, and K. Koyama	4. 巻 1
2. 論文標題 DOA Estimation of an Inclined Conducting Cylinder with a Dipole Array Antenna in a Borehole	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The proceedings of the 12th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Lisbon, July 5-7, 2023.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Ebihara, Y. Tsujikawa, and K. Koyama	4. 巻 1
2. 論文標題 Full Polarimetric Borehole Radar Measurement of Conducting Cylinder with Dipole and Loop Antenna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The proceedings of the 12th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Lisbon, July 5-7, 2023.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Tsujikawa, S. Ebihara, K. Koyama, T. Kako, and H. Yamamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Estimation of the direction of an object by directional borehole radar with dipole array for a transmitter and a receiver	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium	6. 最初と最後の頁 pp. 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Ebihara, K. Koyama, H. Yamamoto, Y. Tsujikawa, and T. Kako	4. 巻 1
2. 論文標題 Measurement of wave polarization scattered by a cylindrical conductor with a dipole and loop array borehole radar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium	6. 最初と最後の頁 pp. 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小山幸輝、海老原聡、辻川裕貴	4. 巻 1
2. 論文標題 坑井内ダイポールループによる導体円柱からの反射波の偏波測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第38回センシングフォーラム計測部門大会	6. 最初と最後の頁 pp. 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 海老原聡
2. 発表標題 地中物体の3次元位置推定のための指向性ボアホールレーダ
3. 学会等名 IEEE AP-S Kansai Joint Chapter 特別講演 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------