

令和 3 年 5 月 10 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05019

研究課題名（和文）地熱探査用MIMO型3次元指向性ボアホールレーダのフィールド実証実験

研究課題名（英文）Field demonstration experiment of MIMO type 3D directional borehole radar for geothermal exploration

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ボアホールレーダを地下深部における断裂3次元計測へ適用するための研究開発を行った。まず、Multiple-input and multiple-output (MIMO) 型3次元指向性ボアホールレーダに関する原理確認をフィールド実験によって行った。これにより、レーダにより坑井から断裂などの3次元計測が原理的に可能であることを示した。さらに、本レーダを応用していく上で重要な要素技術や現象に関して研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は30～300 MHzの電磁波によって1本の坑井から離れた物体を3次元的に位置・形状推定を可能にする研究である。この技術は、地熱開発における貯留層評価、放射性廃棄物地層処分場の健全性評価や建造物建て替えの際の基礎杭調査などで活躍できる可能性がある。このような応用において、本研究により、物体からの反射波の伝搬方向推定を深度区間20m程度で、短時間で多数に配列したアンテナでレーダ計測できるシステムが実現する可能性が示唆された。これにより、地熱貯留層で坑井から20m程度離れた断裂の3次元イメージングの可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：We developed a borehole radar system for the estimation of fractures and faults in 3-D space. First, we designed and developed a prototype of multiple-input and multiple-output type 3D directional borehole radar. Our field experiments with the radar ensured the estimation of the objects in the subsurface. Also, we researched critical phenomena about radar and invented some signal processing methods.

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

地熱探査では地中深部に存在する貯留層を探査することが必要になる。ここでは、岩盤中に存在する断裂の3次元イメージングを1本の坑井だけで行うことが求められる。地熱地帯では地中が高温であることや測定対象が地下深部であることを考慮すると、計測装置を坑井に置くことができる時間は限られてくる。このような計測へボアホールレーダを応用していくには、いくつかの問題を解決していくことが必要になる。

2. 研究の目的

ボアホールレーダを地下深部における断裂3次元計測へ適用するための研究開発を行うことを目的とする。まず、Multiple-input and multiple-output (MIMO) 型3次元指向性ボアホールレーダに関する原理確認をフィールド実験によって行うことで、坑井から、断裂などの3次元計測が原理的に可能であることを示す。さらに、本レーダを応用していく上で重要な要素技術や現象に関して研究を行う。

3. 研究の方法

MIMO 型3次元指向性ボアホールレーダを試作した上で、性能評価のためのフィールド実験を行う。この評価を行いながら、本レーダが原理的に実現可能であることを示す(4章研究成果(1))。これと同時に、レーダ装置に対する再検討(4章研究成果(2))を行い、新たに発見された現象がボアホールレーダによる3次元推定へ与える影響を抑圧するための研究を行う(4章研究成果(3))。

4. 研究成果

(1) MIMO 型3次元指向性ボアホールレーダの実証実験

本研究では、1 m程度の短い区間に多数のアンテナを坑井内に配列したボアホールレーダを設計し試作した。図1(a)に、本研究で試作したアンテナのモデル図と性能評価のために使用した導体円柱(レーダターゲット)を示す。このアンテナでは、送信側と受信側のそれぞれで6素子アンテナ素子が存在している。周波数 0.3 ~ 600 MHz の電磁波を送受信することが可能である。これらのアンテナ素子で、高周波スイッチを活用することで、一時に1素子だけが地表装置

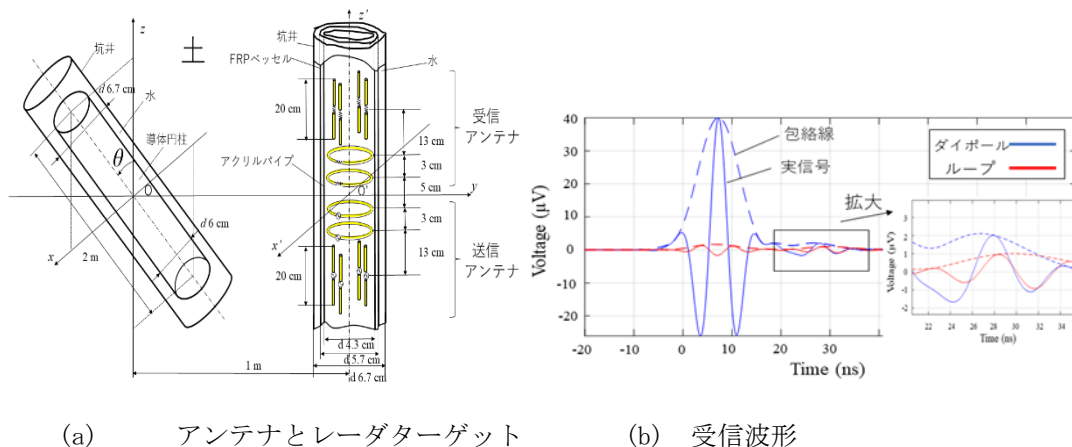


図1 MIMO 型3次元指向性ボアホールレーダ用アンテナと受信波形 (小山幸輝ら、2021年)

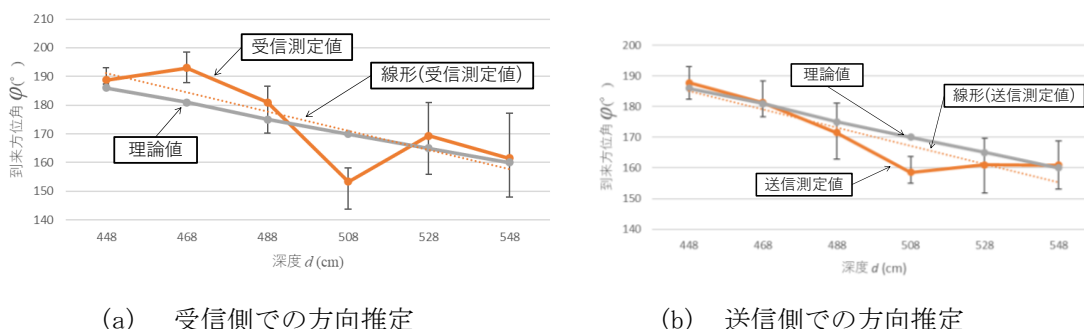


図2 方向推定結果(辻川裕貴ら、2021年)

へ接続されるようになっている。アンテナとしては、円形ダイポールアレーアンテナとループアレーアンテナを採用した。円形アレーにより垂直偏波の電磁波の伝搬方向（方位角と仰角）を推定し、ダイポールとループを組み合わせることで電磁波の偏波状態がわかる。図1(b)に、受信信号の一例を示す。実験は、土壌中に掘削された水で満たされた坑井内に、試作したアンテナを挿入することで行われた。送信側のダイポールアンテナに、中心周波数 100 MHz のパルス電圧が給電された。図中、9 ns 付近に送信アンテナからの直接波が到来していることがわかる。ダイポール送信のため、受信電圧は偏波に依存するため、ダイポールアンテナで電圧が大きく、ループで小さくなっている。時刻 26 ns 付近には、地中にある斜めに置かれた導体円柱からの反射波が到来している。ここでは、直接波とは異なり、レーダターゲットの形状を反映して、ダイポールとループで受信電圧が近い値を示している。これはアンテナへ入射した反射波の偏波状態に対する情報が得られていることを示す。図2(a)と(b)に、送信側と受信側における電磁波の伝搬方向（方位角）をレーダで推定した結果を示す。「理論値」は幾何学的な位置関係から求めた反射点の方向である。オレンジ線がレーダで推定された方向であり、これらを直線でフィッティングしたものがオレンジ破線である。これらより、送信側と受信側の両方で、ほぼ誤差  $10^\circ$  以内で伝搬方向を推定できていることがわかった。これらの他、仰角についても推定可能であることが実験によりわかっており、波の到達時刻から反射点の3次元位置推定が原理的に可能であることが判明した。これらの成果は、本研究で試作したアンテナを坑井の上下方向に組み合わせることで、広い深度範囲で短時間に物体の3次元推定と形状推定に繋がることを示唆している。本研究成果は2021年3月電子情報通信学会総合大会で発表済である。

## (2) レーダシステムに関する検討

ボアホールレーダにおいて、高周波信号の発生・受信装置を地表に置き、地表と坑井内のアンテナ間の信号伝送をアナログ光信号で行う方式が前節(1)で使用されている。現実の計測において、この伝送法はコストが課題となる可能性がある。ここで、伝送法をデジタル光伝送に変更できれば、市中で使用されているブロードバンド光通信システムが流用でき、画期的にコストダウンが図れる。しかし、この場合、高周波信号の発生・受信装置を坑井内に組み込む必要がでてくる。本研究では、近年市販された小型のベクトルネットワークアナライザを直径 10 cm の坑井内に挿入し、ボアホールレーダ計測できることをフィールド実験により実証した。この成果により、前節(1)の研究成果を実用化する上で、デジタル光伝送方式を採用することが視野にはいつてきた。これらの研究成果は the 18th International Conference on Ground Penetrating Radar (2020 年) で発表済である。

## (3) 平面状物体の3次元計測における臨界角を考慮した3次元イメージング法開発

坑井内でアレーアンテナを使用する場合、坑井の壁面等が受信信号に影響を与え、臨界角で電磁波が伝播するとアンテナ素子間で位相差が発生しないなどの現象が発生することが発見された。本研究では、この現象が物体の3次元位置推定へ与える影響を回避することが急務となった。ここでは、発生する現象を電磁界解析により明らかにし、この結果を用いて信号処理法を開発した。図3に、その信号処理を実際の岩盤中の断層3次元イメージングを行った実験データへ適用した結果を示す。図中、赤線がレーダを含む坑井であり、この坑井に横切るように断層が存在していることが分かっている。白い平面はボアホールレーダ以外の方法で断層の位置を推定した結果である。赤茶色の塊がレーダによって位置推定された断層の位置を表している。図(a)は、本研究で開発した信号処理法を適用した結果である。赤茶色の塊が白い平板に近い位置に存在しており、首尾よく物体位置推定ができていていることがわかる。一方、図(b)は、従来の信号処理法による結果である。坑井壁面による異常現象により、一部の赤茶色の塊が白い平板から離れたところに存在することがわかる。この研究に関連する成果は、IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (2020 年)、IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing (2020 年) 等で発表済である。

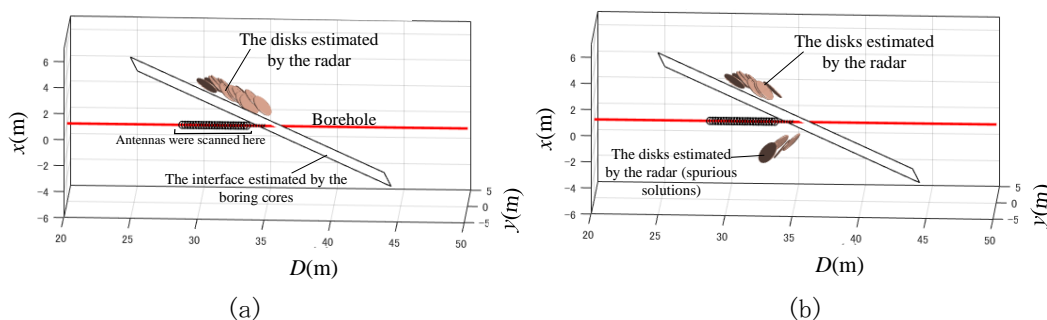


図3 鉱山内の断層の3次元イメージング (Ebihara et al., 2020)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9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 1件）

1. 著者名 S. Ebihara, S. Kotani, K. Fujiwara, Y. Kimura, T. Shimomura, and R. Uchimura	4. 巻 13
2. 論文標題 Consideration of Oblique Incidence in 3-D Imaging of a Planar Interface with a Circular Dipole Array in an Air-filled Borehole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3711-3722
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSTARS.2020.3004479	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. Ebihara, S. Kotani, K. Fujiwara, Y. Kimura, T. Shimomura, and R. Uchimura	4. 巻 1
2. 論文標題 Borehole effects on direction finding of a planar interface with an array-type directional borehole radar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Conference on Ground Penetrating Radar	6. 最初と最後の頁 344-347
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 -
1. 著者名 S. Ebihara, K. Okamoto, and S. Kobayashi	4. 巻 1
2. 論文標題 S11 Measurement of Dipole Antenna in a Borehole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Conference on Ground Penetrating Radar	6. 最初と最後の頁 348-351
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 -
1. 著者名 辻川裕貴, 海老原 聡, 小山幸輝, 加古智也, 山本久也	4. 巻 1
2. 論文標題 送受信ダイポールアレーを用いたボアホールレーダによる波の到来方向推定実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年電子情報通信学会総合大会, 通信講演論文集1	6. 最初と最後の頁 193
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 -

1. 著者名 小山幸輝, 海老原 聡, 山本久也, 辻川裕貴, 加古智也	4. 巻 1
2. 論文標題 坑井内ダイポール・ループによる斜め導体円柱からの反射波測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年電子情報通信学会総合大会, 通信講演論文集1	6. 最初と最後の頁 194
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 -

1. 著者名 S. Ebihara, K. Toyozawa and T. Hasegawa	4. 巻 2019
2. 論文標題 Field Experiments to Investigate Cross-polarization Characteristics of a Dipole Array Antenna in a Water-filled Borehole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th edition of the biennial series of the International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3997/2214-4609.201902583	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, S. Kotani and K. Fujiwara	4. 巻 58
2. 論文標題 Arrival Times of Plane Waves Obliquely Incident on a Dipole Array Antenna in a Borehole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3273-3286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2019.2951823	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, S. Kotani, and K. Fujiwara	4. 巻 1
2. 論文標題 Consideration of Oblique Incidence in Planar Interface Measurement with a Dipole Array Antenna of Directional Borehole Radar	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th SEGJ International Symposium	6. 最初と最後の頁 1-4
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, S. Kotani, and K. Fujiwara	4. 巻 1
2. 論文標題 3-D IMAGING OF A PLANAR INTERFACE CLOSE TO A BOREHOLE WITH AN ARRAY-TYPE DIRECTIONAL BOREHOLE RADAR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019 (IGARSS 2019)	6. 最初と最後の頁 3590-3593
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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------