

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 21 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560849

研究課題名（和文）高感度指向性ボアホールレーダによるき裂や断層の 3 次元位置形状計測法の開発

研究課題名（英文）Development of 3-D Imaging of Faults and Fractures with Supersensitive Directional Borehole Radar

研究代表者

海老原 聡（EBIHARA SATOSHI）

研究者番号：20301046

研究成果の概要（和文）：本研究では、ダイポールアレイ型指向性ボアホールレーダを用いた地中物体の 3 次元イメージング法に関する研究を行った。レーダゾンデを坑井内で走査することで得られる複数深度のダイポールアレイ信号から物体の 3 次元イメージを推定する方法を提案した。この方法を用いて中竜鉱山（福井県）にある断層の 3 次元イメージングをしたところ、ボーリングコア等から推定される断層の 3 次元位置と調和的であった。

研究成果の概要（英文）：We investigated the method to estimate 3-D image of a buried object with directional borehole radar using dipole array antenna. We proposed the array signal processing to estimate the 3-D image with array data, which is acquired at multiple depths. Using this method, we estimate the 3-D image of the faults in Nakatatsu mine actually. This estimation results are reasonable, since the radar estimation agreed to the images, which was estimated by observation of boring cores and gallery wall.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：地球計測

## 1. 研究開始当初の背景

直径 10 cm ほどの坑井内で周波数 10 - 500 MHz の電磁波をつかうボアホールレーダが 1970 - 80 年代から国際的に研究開発されている。使用波長は数十 cm 程度以上であり、波長と同程度の空間分解能が期待できる。ボアホールレーダでは坑井の形状による制約から、通常ダイポールアンテナを用いる。この場合、坑井の周方向で無指向性となり、物体が存在する深度や距離に対する推定に限定されていた。このため、1 本の坑井だけで、3 次元推定を目的とした指向性ボアホールレーダの開発は国際的に重要課題となっ

ていた。著者は坑井内の水がアンテナ特性へ影響を与えるボアホール効果が存在することを理論計算と実験で確認し、アンテナの坑井内での偏心の影響も明らかにした。この計算法として、水を模擬した円柱状誘電体からの散乱波を含むように補正したボアホールレーダ用モーメント法を開発した。これらの過程で、誘導電流が流れる空間が面や立体の場合、アンテナの傾斜や偏心によって理論的に予測しにくい電流が流れることがわかった。一方、誘導電流が流れる空間が 1 次元に拘束されている場合、つまり線状アンテナの場合には、坑井内の媒質を円筒状誘電体とモ

デル化することで、理論計算と実験結果がよく一致することを見出した。この発想のもと、図1のように、著者は複数のダイポールアンテナ素子とレーダ信号/光変換部、アンプやバッテリーなどの電子回路を直径1mm以下の同軸ケーブル(50Ω)で接続する新たなダイポールアレーアンテナを提案し、その有効性を実験的に検討した。その結果、花崗岩中のフィールド実験で、周波数100～300MHzの周波数帯域を用いて、誤差5度以内で電磁波の到来方位角の推定に成功した。さらに、受信アンテナ給電点で-160dBm程度の電圧まで受信可能になった。

## 2. 研究の目的

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で地中に存在する物体の3次元イメージングを可能にする計測法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 3次元イメージング法の開発

図2に示すように、均質媒質中に円状にアンテナ素子が配列されている。これに平面波が入射しているとき、平面波はアンテナ素子間で遅延時間をもって測定される。この時間差は波の到来方位角 $\phi$ の情報をもっており、最小二乗法によって方位角を推定できる。実際には、アンテナ素子間の干渉、坑井の影響、中心に存在する導体円柱の影響が存在する。本研究では、これらに対し、坑井の影響を考慮したモーメント法によって、その影響を除去可能な周波数帯域の設定やアンテナ形状の設計を可能にした。

図3に送信アンテナ(無指向性)、受信アレーアンテナ及び物体表面上での反射点の位置関係を示す。3次元イメージングのためには、反射点が存在する方位角 $\phi$ だけでなく、反射点の深度 $z$ や坑井からの距離 $\rho$ の情報が必要になる。本研究では、図4のように、レーダゾンデを深度方向にわずかに動かすことで生じる波の到達時刻の変化を用いて、 $\rho$ 及び $z$ を推定する信号処理法を開発した。

### (2) 計算機シミュレーションによる3次元イメージング

図5に、計算機シミュレーションで用いたモデルを示す。水で満たされた坑井内に無指向性の送信アンテナ及び同軸ケーブルで給電されたダイポールアレーアンテナが存在する。境界面が傾斜角度 $38^\circ$ で坑井に交差している。図6に、レーダゾンデを坑井内で

走査しながらダイポールアレーで受信した信号を合成したものを示す。この合成では、坑井の影響を考慮したモーメント法を用いた。各深度で受信した5素子のアレー信号は非常に似ているため、アレー信号どうしが重畳しているのがわかる。直接波が取り除いて信号を合成したため、深度の変化とともに時刻が変化する反射波のみが見えることが確認できる。

図7に反射体の3次元イメージングをした結果を示す。赤色の線が坑井であり、Interface Aは仮定した境界面の位置を示している。Estimated disksはレーダによって推定された反射体のイメージである。レーダでは、境界面上で鏡面反射する場所の3次元位置とその場所での面の傾斜を推定している。このため、推定されたイメージは仮定した物体の一部分となる。図では、推定したイメージは仮定した境界面に含まれており、推定ができていないと考えられる。

### (3) 中竜鉱山における断層の3次元イメージング

図8に示すように、中竜鉱山(福井県)内にはFracture zoneで示される断層が存在している。本研究では、この断層を深度約10m付近で貫通するように坑井を掘削した。坑井内のレーダによって、断層の3次元イメージを取得することを目標とした。

図9に、無指向性ボアホールレーダによる受信波形を示す。併せて、各深度におけるボアリングコアの岩質を示す。コアによると、深度10m付近に断層が存在していることがわかる。その上の深度である深度10m～9m付近(図中(A))では、深度とともに到達時刻が変化する波が存在している。これは断層上面からの反射波である。本研究では、この深度付近の波を用いて、断層の3次元イメージングを行うことにした。なお、深度7m～8m付近(図中(B))の波は深度5mよりも浅い層からの反射波である。

図10に、深度9m付近で測定されたダイポールアレー信号を示す。時刻30ns付近に深度とともに到達時刻が変わる波があり、これらは断層からの反射波である。各深度でのアレー信号は非常に似ているが、わずかな到達時間差が存在することがわかる。

図11に、深度9m付近のアレー信号を用いて断層の3次元イメージングをした結果を示す。図中、赤線は坑井である。白い平面はボアリングコアと坑道から推定された断層である。レーダによって推定された3次元イメージを茶色で示した。レーダによる推定結果

は白い平面の付近に存在しており、レーダによる断層の3次元推定結果は合理的であることがわかった。

#### 4. 研究成果

本研究では、同軸給電したダイポールアレーを用いた指向性ボアホールレーダによる地中物体の3次元イメージング法に関する研究を行った。まず、複数深度で測定されたダイポールアレー信号から物体上の反射点の3次元推定法を提案した。この推定法を用いた計算機シミュレーションをした結果、坑井付近に存在する平面状境界面上の反射点を推定し、物体の3次元位置形状推定を行えることを示した。中竜鉱山に造成した実験場にて、断層の3次元イメージングを行った結果、ボアリングコアや坑道壁面から予想される断層の位置と調和的であることがわかった。

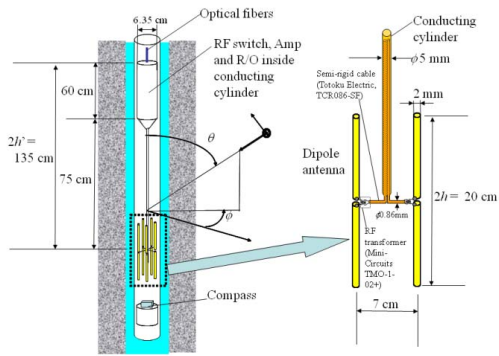


図1 ダイポールアレーアンテナ

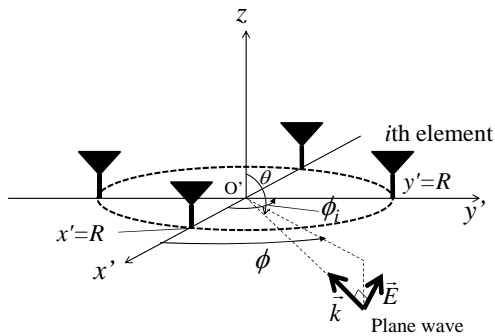


図2 円形アレーアンテナへの平面波入射

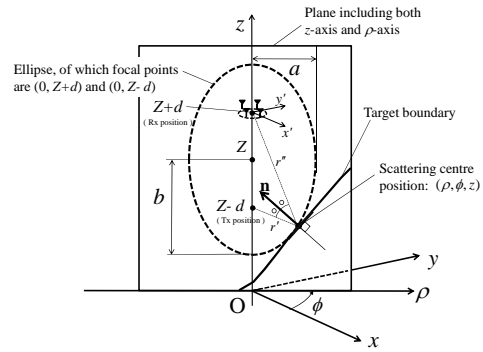


図3 同一坑井内に設置した送信アンテナ・受信アンテナと反射点

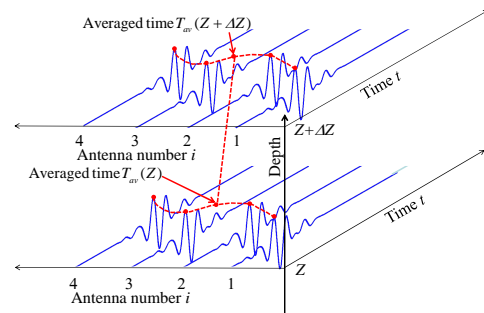


図4 2深度で測定された円形アレー信号

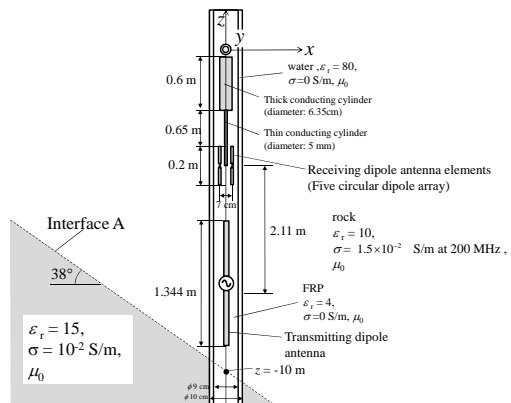


図5 坑井内の送受信アンテナと境界面

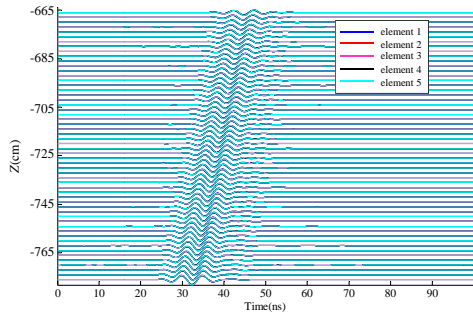


図6 合成された円形アレー信号

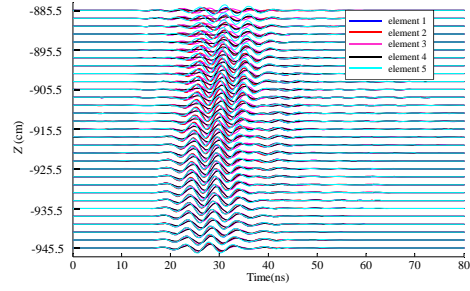


図10 円形アレー信号

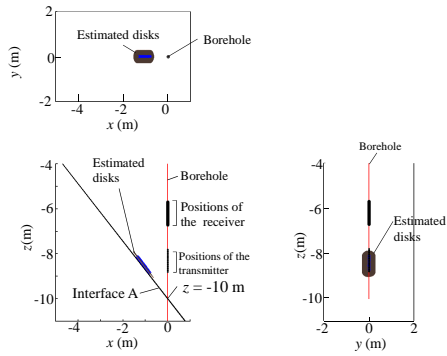


図7 3次元イメージング

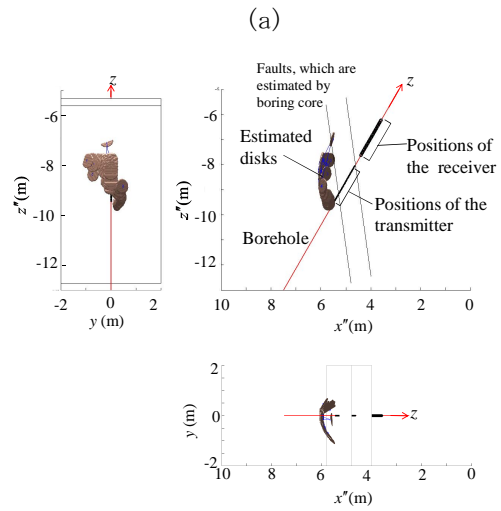
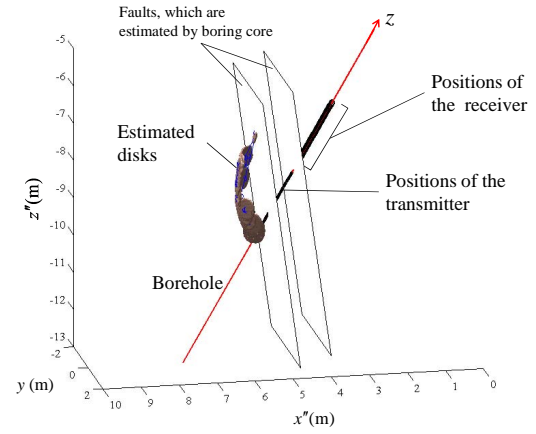


図11 断層の3次元イメージング

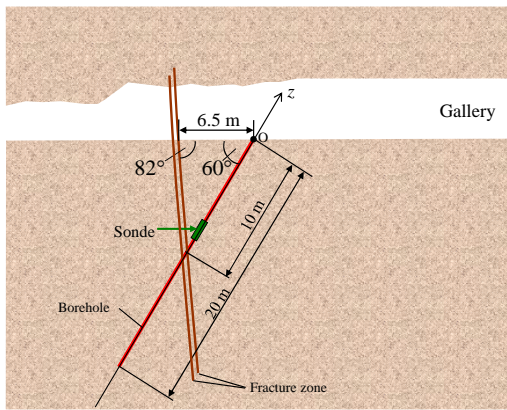


図8 中竜鉱山での坑井の掘削

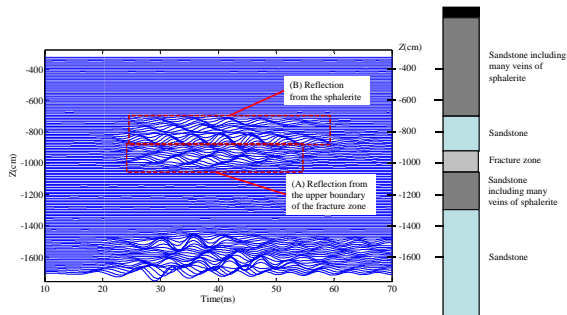


図9 無指向性ボアホールレーダによるレーダ計測

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 2 件)

① S. Ebihara, H. Hanaoka, T. Okumura, Y. Wada, "Interference Criterion for Coaxial-Fed Circular Dipole Array Antenna in a Borehole," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 17 pages, 2012 (印刷中). 査読有  
DOI: 10.1109/TGRS.2011.2182517

② S. Ebihara, A. Sasakura and T. Takemoto, "HE<sub>11</sub> Mode Effect on Direct Wave in Singlehole Borehole Radar," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 2, pp. 854-867, Feb. 2011. 査読有  
DOI: 10.1109/TGRS.2010.2057437

[学会発表] (計 6 件)

① S. Ebihara and Y. Wada, "Investigation of Wideband Coaxial-Fed Circular Dipole Array Antenna in a Borehole," *The proceedings of the 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar 2011*, 6 pages (on CD), Aachen, Germany, June 22-24, 2011. (査読あり)

② S. Ebihara, H. Kawai and K. Wada, "3-D Imaging of Faults with Directional Borehole Radar," *The proceedings of the 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar 2011*, 7 pages (on CD), Aachen, Germany, June 22-24, 2011. (査読あり)

③ S. Ebihara, H. Kawai, H. Hanaoka, "DIRECTIONAL BOREHOLE RADAR USING COAXIAL-FED CIRCULAR DIPOLE ARRAY," *Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference*, F1-3, Toyama, Japan, Sep. 22-26, 2010 (招待講演) (査読あり)

④ S. Ebihara and H. Kawai, "Singlehole Borehole Rader Measurement Using Dipole Array Antenna Fed by Coaxial Cable," *Proceeding of the XIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR*, pp. 145-150, LECCE, Italy, 21-25 JUNE 2010. (査読あり)

⑤ S. Ebihara, A. Sasakura and T. Takemoto, "Influence of HE<sub>11</sub> mode on Direct Wave in Singlehole Borehole Radar," *Proceeding of the XIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND*

*PENETRATING RADAR*, pp. 876-991, LECCE, Italy, 21-25 JUNE 2010. (査読あり)

⑥ S. Ebihara, H. Hanaoka, T. Okumura, "Influence of Feed Line on DOA Estimation with Dipole Array Antenna for Directional Borehole Radar," *Proceeding of the XIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR*, pp. 810-815, LECCE, Italy, 21-25 JUNE 2010. (査読あり)

[その他]

ホームページ等

[http://www.osakac.ac.jp/labs/ebihara/Japanese/ebihara/PublishedPapers/papers\\_from2001.htm](http://www.osakac.ac.jp/labs/ebihara/Japanese/ebihara/PublishedPapers/papers_from2001.htm)

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・准教授

研究者番号：20301046