

# き裂や断層の3次元イメージングのための 指向性ボアホールレーダの広帯域化に関する開発

海老原聡

大阪電気通信大学 工学部 電気電子工学科  
〒572-8530 大阪府寝屋川市初町18-8

## Development of Wide-band Directional Borehole Radar for 3-D Imaging of Fractures and Faults

Satoshi EBIHARA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering  
Osaka Electro-Communication University, Neyagawa 572-8530, Japan  
E-mail: s-ebihara@m.ieice.org

### 概要

本研究では、地中に存在するき裂や断層などの物体を3次元的にイメージングが可能な指向性ボアホールレーダを開発する。指向性アンテナは独自に提案した同軸給電したダイポールアレーアンテナ (CFCAB) である。このアンテナでは、中心導体円柱(CCC)の共振が、CFCABの動作帯域を制限しているため、本研究ではCCCにフェライト装荷することで共振を制御し、動作周波数を広帯域化することにした。このフェライトの効果を実験シミュレーションとフィールド実験によって確認した。CFCABによる指向性ボアホールレーダを試作し、中竜鉱山(福井県)で断層を貫通する坑井へ挿入した。断層からの反射波を受信し、この受信信号を解析することで断層の3次元イメージを出力することに成功した。

### 1. はじめに

地下空間の有効利用や資源探査などのため、地中の3次元計測が必要である。例えば、高レベル放射性廃棄物の地層処分では、廃棄物から漏洩した放射性核種が地下水を介して人間環境へ運ばれる可能性がある。このため、主要な地下水移行経路となる断層破碎帯やき裂が処分場から十分に離れていることを確認することは重要であり、き裂や断層の3次元的位置と形状を推定する技術が必要となる。

地中では電磁界が波動の性質をもつのは周波数約10 MHz以上であり、500 MHz以下では比較的地中の透過性に優れる。対応する波長は数十cm程度かそれ以上になる。水の比誘電率は80であり、岩石の比誘電率(5~20)に比べると極めて大きい。このため含水率が異なる場所が存在するならば、波動インピーダンスのコントラストが

生じ、電磁波の反射や散乱を起こすことになる。実際には均質な岩石でも小さな隙間が存在しており、ここへ地下水が入り込む。岩石ごとに隙間の体積比(間隙率)が異なるので含水率も異なり、この空間変化を電磁波で計測することができる。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。坑井の直径は6 cmから15 cmであり、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。1本の坑井だけを用いる場合、送信アンテナと受信アンテナを同じ坑井に挿入し、地中物体からの反射波を計測する。この場合、レーダは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次元推定が可能な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。

本研究では、受給者らが提案した指向性ボアホールレーダに対しフェライト装荷することで広帯域化を実現し、本レーダによって地中の断層の3次元計測が可能であることをフィールド実験によって実証する。

### 2. 指向性ボアホールレーダシステムの試作

指向性ボアホールレーダ用アンテナとして、ダイポールアレーアンテナ(CFCAB, Coaxial-Fed Circular Dipole Array Antenna in a Borehole)が提案された[1]。図1のように、坑井内にダイポールアンテナを円状に配列し、本アンテナへ電磁波が入射するとアレー素子間で波は時間差をもって受信される。アンテナ素子は50 Ωの細径同軸ケーブルで給電され、これら同軸ケーブルは中心導

体円柱 (CCC, centered conducting cylinder) 内に集められる。この導体円柱はアンテナ素子から離れた部分で太くすることで、電子回路や電池を内蔵することができる。このアンテナの特性はモーメント法で把握することができる[1]-[6]。ダイポールアンテナ素子の長さを  $2h$  とし、中心導体円柱の長さを  $2h'$  とすると、 $2h \ll 2h'$  を仮定できるならば  $2h'$  によって決まる CCC の共振と主に  $2h$  によって決まるアンテナ素子間の干渉で本アンテナが使用可能な周波数帯域を決定できる。CFCAB では坑井中にダイポールアンテナを円状に配列するが、これらは CCC からでている直径 1mm 以下の同軸ケーブルで給電されている。

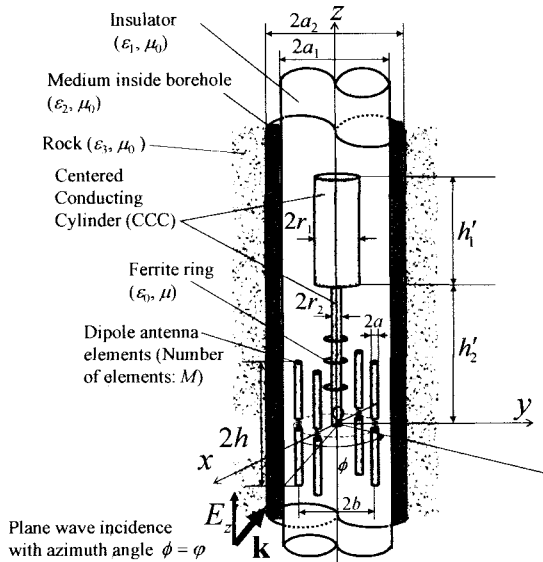


図1 同軸給電したダイポールアレーアンテナ (CFCAB)

### 3. フェライト装荷による広帯域化

#### A. モーメント法解析

CFCAB が動作可能な周波数帯域を広げるためには、CCC の共振の発生自体を抑圧するか、CCC の共振周波数を動作周波数の外に移動させることが必要である。一般に、導体上に流れる電流の制御にはフェライトを装荷することが有効であり、本研究においても CCC にフェライト装荷することで CCC の共振を制御することにする。

前節で述べた通り、細径近似を用いたモーメント法で、ダイポールアンテナ及び CCC 上の電流分布を計算できる。この計算では、坑井内の媒質 (通常、地下水) やアンテナを収納しているベッセルを考慮した計算をしている。これはグリーン関数を適切に変更することで対応している。文献[1]では、フェライトが装荷されていない場合の CFCAB のためのモーメント法が示されている。一方、均質媒質中導体へのフェライト装荷に対するモーメント法における扱いは文献[9]で述べられ

ており、本研究ではこれを導入することでフェライト装荷した CFCAB の解析を可能にした[8]。

#### B. 計算機シミュレーション

CFCAB に対するフェライトの効果を調べるため、計算機シミュレーションを行った。商用のフェライトビーズ (TDK ZCAT 1730-0730) を CCC の細径部分へ装荷した状態を図2に示す。6個の磁性体リングを連続して設置することで、フェライトビーズを表現することにした。この磁性体の透磁率はフェライトを模擬して、図3のように与えることにした。本図でわかる通り、フェライトの透磁率は周波数特性があり 100 MHz 以下ではインダクタンスとして、100 MHz 以上ではレジスタンスとして動作することがわかる。このようなフェライト装荷した CFCAB に波が入射したとき、CFCAB の受信電圧をモーメント法で計算した。この計算では、坑井は水で満たされていることを仮定し、内側から第2層目は水である。平面波は  $z$ -軸に直交するように入射する。

図4に、計算したアンテナの受信電圧だけを用いて、入射波の到来方向の推定をした結果を示す。横軸は波の到達時刻であり、縦軸は到来するパルス波の中心周波数である。色は波の到来方向に対する推定誤差を表わしている。誤差が  $0^\circ$  (濃い青色) であるとき精確に方向推定ができているといえる。フェライトを装荷しない場合では、周波数 100 MHz 以下、時刻 5 ns 以降で 45度以上の推定誤差が見られる。一方、フェライトを装荷すると、100 MHz 以下の低周波数でもほとんどの時間で方向推定ができていることがわかる。フェライトが装荷されている場合では、CCC で散乱された波がアンテナ素子へ入射することで、アンテナへ直接入射した波の方向とは異なる方向に推定してしまう。フェライトが装荷されると、CCC 上での電流の共振周波数がアンテナの動作帯域よりも低い周波数に移動することで、50 MHz 以上においては散乱される波のパワーが低下する。このため、測定周波数帯域 50 - 300 MHz では CCC の存在を無視して波の到来方向推定ができる。以上の考察により、フェライト装荷によって CFCAB の動作帯域を広帯域化できることがわかった。

#### C. フィールド実験

図5のように、フィールド実験を大阪電気通信大学四条畷キャンパス構内のフィールド実験場で行った。坑井 BR3 の深度 7 m の位置に CFCAB を設置した。送信用のダイポールアンテナを坑井 BR2 の同一深度においた。両坑井間の距離は 6 m

である。測定はベクトルネットワークアナライザを用いて、周波数領域で測定した。レーダゾンデの直径は 54 mm である。送信アンテナから受信用CFCABへ直接到来する直接波が受信できることが期待できる。

図6はフェライトを全く装荷しない場合、フェライト 8 個装荷した場合及び 30 個装荷した場合の波の到来方向推定結果である。フェライト無装荷の場合、全周波数で波の到来方向推定誤差が  $45^\circ$  以上となり推定ができていない。8個装荷の場合では、130 MHz 以上でほぼ全ての時刻で推定誤差が  $10^\circ$  以内となった。さらに、30個装荷の場合では、周波数約70MHz以上で誤差  $10^\circ$  以内で推定が可能となった。これらの結果は、計算機シミュレーションで予想した通り、フェライト装荷することで CFCAB で方向推定できる周波数帯域を広帯域化できることを示している。

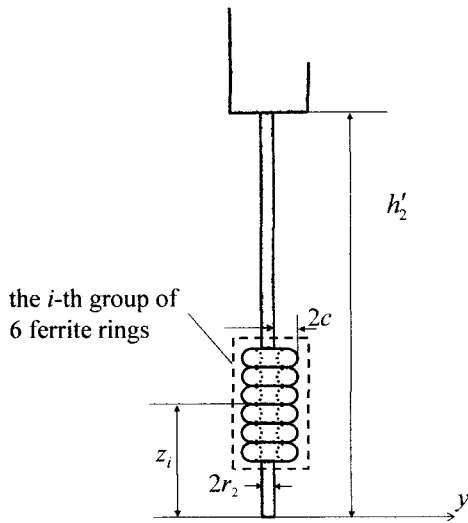


図2 中心導体円柱(CCC)の細径部へのフェライト装荷。

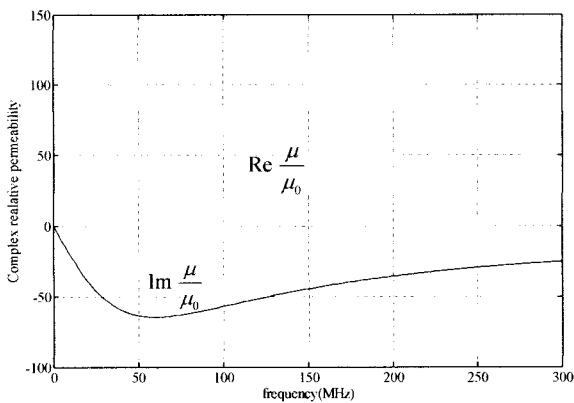
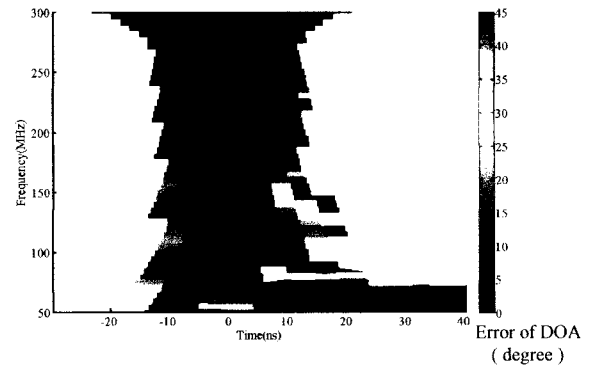
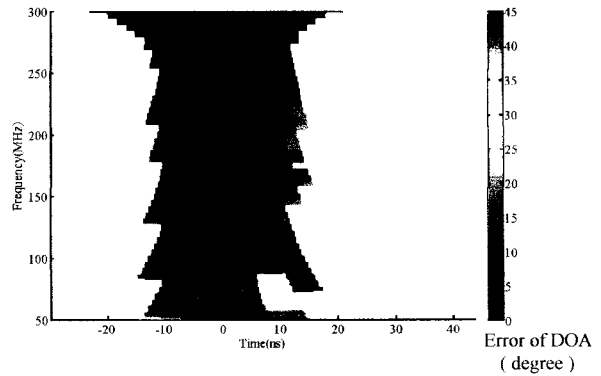


図3 フェライトの透磁率



(a)



(b)

図4 電磁波の到来方向推定結果 (計算機シミュレーション)  
(a) フェライト無装荷、(b) フェライト装荷

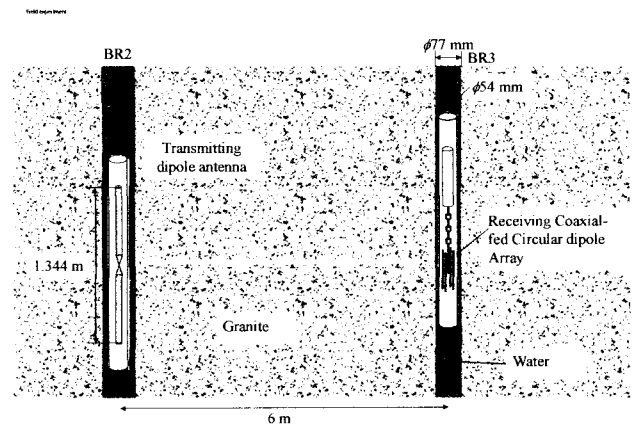


図5 フィールド実験

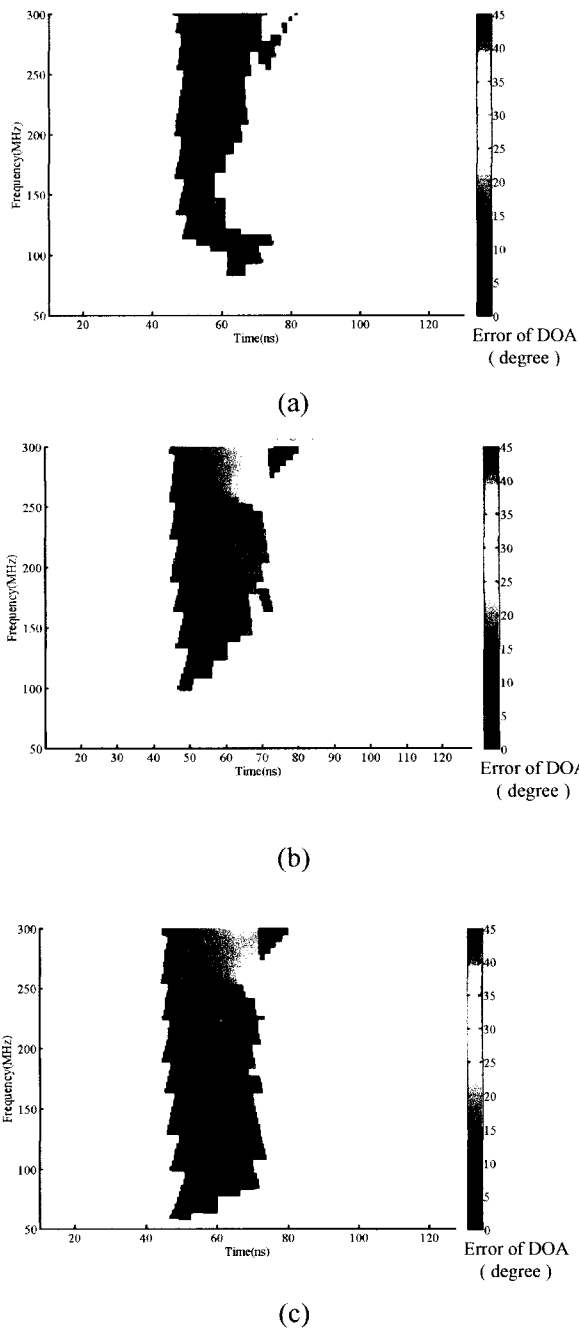


図6 電磁波の到来方向推定結果（フィールド実験）(a) フェライト無装荷、(b) フェライトビーズ8個装荷、(c) フェライトビーズ30個装荷

#### 4. 地中物体の3次元イメージング

##### A. アレー信号処理法の開発

物体からの反射波がCFCABに入射するとき、物体上の反射点の3次元位置を推定するためのアルゴリズムを開発する。図7のように、ダイポールアレーアンテナを受信アンテナとするレーダが坑井内に存在し、地中に反射点が存在するとする。送受信アンテナ間の間隔を一定に保ったまま、2深度の測定を行うものとする。これら2深度分の円形アレー信号から反射点の位置を表す座標 ( $\rho, \phi, z$ ) を推定するアルゴリズムを考えた。一深度の円形アレーのデータから方位角  $\phi$  を推定し、2深度分のデータで  $\rho$  と  $z$  を推定するアルゴリズムである。詳しくは文献 [7] を参照されたい。

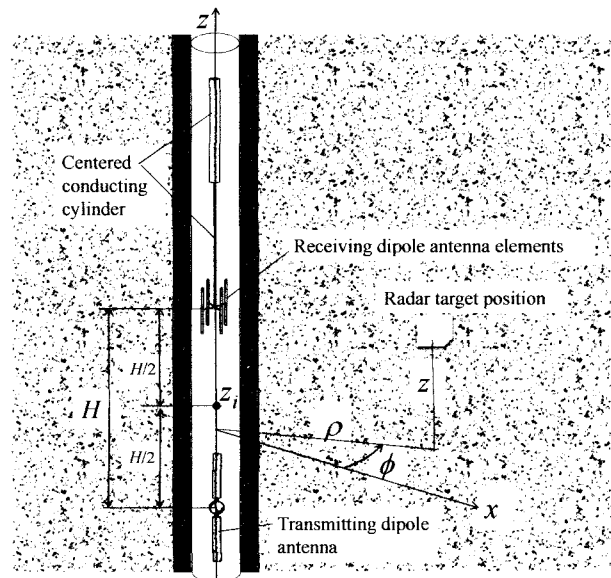


図7 反射点の3次元位置推定

##### B. 中竜鉱山内実験場におけるフィールド実験

中竜鉱山（福井県）内の実験場を図8に示す。本実験場の母岩は古生代堆積岩中のスカルンである。坑道から断層破碎帯が目視で確認でき、傾斜角は82度である。本研究では、この断層が平面状であり、地中に延びていると仮定し、この断層を3次元推定の対象と設定した。坑道で断層が確認される場所から6.5 m離れたところから断層を貫通するように傾斜角60度、全長20 mにわたり坑井を掘削した。本研究では、深度とは孔口から坑井に沿った距離と定義することにする。掘削時に取得したボーリングコアによると深度10 m付近に断層破碎帯がみられ、これは坑道で見られた断層が平面的に伸びたと考えると、合理的である。ボーリングコアによると、断層破碎帯は1 m程度の幅をもっており、図においてもその上面と下面を示している。

図9のように、坑井へレーダゾンデを挿入し、地中で図10のように測定を行った。計測にはネッ

トワークアナライザを用い、0.3 MHz ~ 600 MHz の 1601 Points で測定を行った。深度 705 cm ~ 880 cm を5 cm 間隔で測定を行った。ゾンデを坑道から塩ビパイプで位置制御ができるようにした。ダイポールアンテナ素子は円状に4素子配列されている。

図11 に、受信した時間領域波形を示す。送信アンテナ給電点の入射波形は中心周波数 200 MHz のバンドパス状のスペクトルをもつパルスである。矢印で示した波形では深度が 9 m に近づくと到達時刻が早くなる。このことから、断層から到来した反射波と考えられる。

各深度のボアホールレーダのアレー信号を解析することで、推定した反射点を3次元空間に微小な円板で表わすことにした。図12に、測定深度数と同数の44個の円板を描いた。円板の集合を計測対象である断層のイメージと考えることができる。本図では、坑道壁面での目視による観察及びボーリングコアから予想される断層の位置と形状も加えてある。レーダによって推定された円板の集合は1つの2次元物体を形成しており、大まかには、これは平面状の形をしている。この推定された物体の位置と向きは目視で予想されたものに近いことがわかる。



図9 レーダゾンデの挿入 (中竜鉱山,2009年9月)

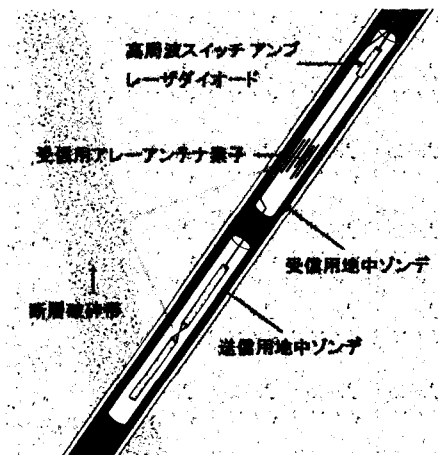


図10 フィールド実験測定図

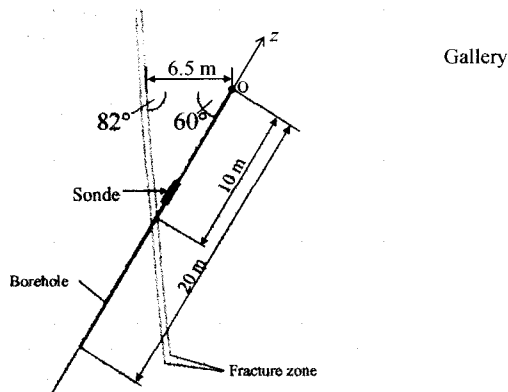


図8 中竜鉱山内実験場の断面図

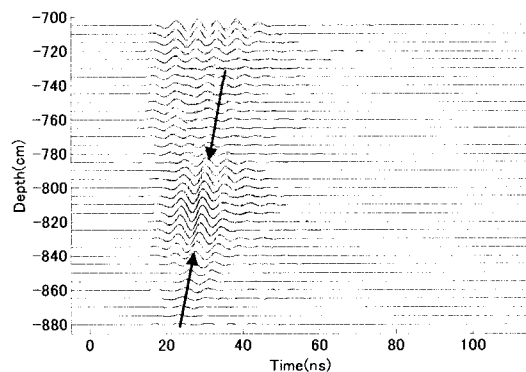
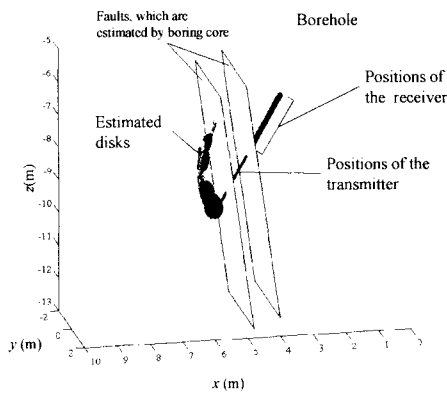
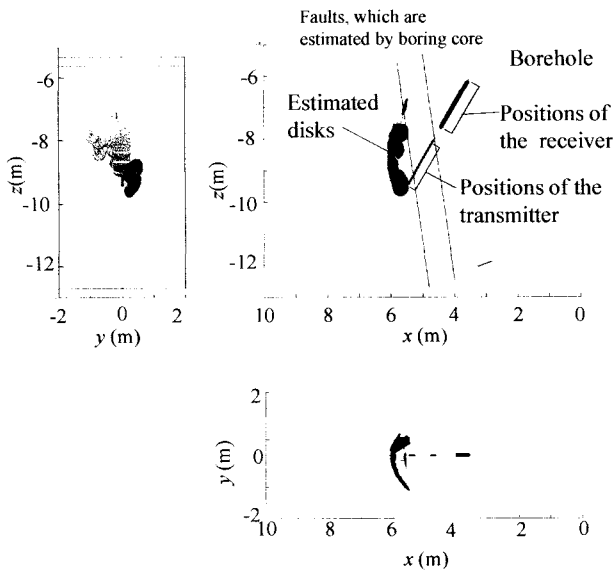


図11 時間領域波形



(a)



(b)

図12 中竜鉱山実験場での断層の3次元イメージング結果

## 5. 結論

本研究では、同軸給電型ダイポールアレーアンテナを用いた指向性ボアホールレーダの開発を行った。まず、アンテナの動作帯域を広帯域化するため、中心導体円柱にフェライトを装荷すると100 MHz以下では、フェライトはインダクタンスとして動作し、円柱の共振周波数を50MHz以下まで低下させることができることを計算機シミュレーションとフィールド実験によって確認した[8]。試作した指向性ボアホールレーダを用いて、中竜鉱山内にある坑井を用いて実験を行った。この坑井の付近には断層が存在することがわかっている。ダイポールアレーの信号を提案したアルゴリズムにより解析した結果、断層の3次元イメージを出力することができた[7]。坑道の壁の目視による観察により断層の傾斜角度を予想した。この結果と指向性ボアホールレーダの推定結果は調和的であることがわかった。

本研究により指向性ボアホールレーダの基本技術については確立したと考えている。今後は、様々な条件下のフィールド計測に指向性ボアホールレーダを適用していきながら、新たな問題点を抽出していくことが必要である。さらに、反射物体の3次元形状だけでなく、物体が鉱床なのか、人工物体なのかまたは断層やき裂のかなどの物体判別の機能を充実させていくことで、レーダの適応性を広めていくことが必要と考えている。

## 6. 謝辞

本研究は(財)高柳記念電位の助成により行われました。心から謝意を表します。

## 7. 参考文献

- [1] S. Ebihara, H. Hanaoka, T. Okumura and Y. Wada, "Interference Criterion for Coaxial-Fed Circular Dipole Array Antenna in a Borehole," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 9, pp. 3510 – 3526, Sep. 2012.
- [2] S. Ebihara, Directional borehole radar with dipole antenna array using optical modulators, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 1, pp. 45-58, January 2004.
- [3] S. Ebihara and T. Yamamoto, Resonance Analysis of Circular Dipole Array Antenna in Cylindrically Layered Media for Directional Borehole Radar, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 1, pp. 22-31, January 2006.
- [4] S. Ebihara and Y. Hashimoto, "MoM Analysis of Dipole Antennas in Crosshole Borehole Radar, and Field Experiments," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 8, pp. 2435 – 2450, Aug. 2007.
- [5] S. Ebihara and Y. Inoue, "Analysis of Eccentered Dipole Antenna for Borehole Radar," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 4, pp. 1073-1088, April 2009.
- [6] 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.
- [7] S. Ebihara, H. Kawai and K. Wada, "Estimating 3-D Position and Inclination of a Planar Interface with Directional Borehole Radar," *Near Surface Geophysics*. (掲載決定)
- [8] S. Ebihara and K. Toma, "Effect of ferrite beads on reduction of resonance of thin conducting cylinder in a water-filled borehole," *Proceedings of the 14th Int. Conf. on GPR*, pp. 901-905, Shanghai, China, June, 2012.
- [9] N. Wang, and L. Jr. Peters, L., Jr., "Scattering by thin wire loaded with a ferrite ring," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 41, no. 5, pp. 694 – 697, 1993.