

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560814
 研究課題名（和文） 地中物体の広域な3次元イメージングのための同軸給電アレー型ボアホールレーダの開発
 研究課題名（英文） Development of the directional borehole radar with the dipole array antenna fed by coaxial cables for wide detectable range.
 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

研究成果の概要：

坑井から数十 m 以内に存在するき裂や断層の3次元イメージングを可能にする指向性ボアホールレーダを開発した。ダイポールアレーアンテナを同軸ケーブルで給電し、到達時間差で波の到来方向を推定するレーダシステムである。導体円柱とアンテナ間の干渉の度合いを定量化することに成功し、これを用いてアンテナの設計手法を確立した。この設計法では坑井の影響であるボアホール効果が十分に考慮されている。フィールド実験では6 m離れた位置に存在する波源の方向を推定でき、設計手法の有効性を実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
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：ボアホールレーダ、指向性、アレーアンテナ、イメージング

1. 研究開始当初の背景

(1) 光変調器型レーダによる3次元計測

大気中CO₂抑制のため、回収したCO₂を地下深部に貯留させる方法が有望視されている。また、原子力発電所から排出された放射性廃棄物は地層へ処分する方向で進行中である。これらの技術を安全かつ確実にを行うためには、き裂や断層を3次元的に位置形状推定することが不可欠であり、水の流路となり得る厚さ数mm以下のき裂を10m以上の範囲でイメージングできる技術が必要である。直径

10cmほどの坑井内で周波数10-500MHz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cm～数十cm程度であり、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、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。代表者らは、欧米諸国とは異なる

独自のダイポールアレーアンテナを提案し、本アンテナを用いたき裂や断層の3次元イメージングをおこなってきた。この中では、アンテナ素子の給電点で電気/光変換する光変調器を導入することを提案し、光変調器を用いたアレー型ボアホールレーダ（以後、光変調器型レーダと呼ぶ）を世界に先駆けて開発した。この2007年3月までに代表者らは光変調器型レーダで花崗岩中のき裂上の反射点の3次元追尾に成功した。

(2) ボアホール効果の理論計算

ボアホールレーダでは、坑井がアンテナ特性へ影響を与える「ボアホール効果」が国際的に認識され、数グループがFDTD法(有限差分時間領域法)による計算法を提案した。これに対し、申請者は高速計算が可能なモーメント法(Method of Moment、境界要素法の1つ)をベースとしてボアホール効果を考慮したアンテナ特性計算法(ボアホールレーダモーメント法、以後、BRMoMと呼ぶ)を独自に開発し、本計算法の有効性をフィールド実験データとともに検証した。本計算法は光変調器型レーダでアンテナ設計及び信号処理に十分使用されている。

(3) 感度向上の必要性

光変調器型レーダではダイポールアンテナを円筒状にアレー配列している。代表者の計算では、波長よりも短いアンテナ(微小ダイポール)を用いる必要がある。微小ダイポールは広帯域で一定したアンテナ特性が得られる一方、感度が低い。微小ダイポールのインピーダンスは純抵抗+容量性リアクタンスであるが、光変調器のインピーダンスは3pF程度の容量性リアクタンスである。このため、アンテナと光変調器はインピーダンスマッチングが極めて悪く、感度の低下をもたらす。不均質な花崗岩中や海水を含む導電性媒質では、坑井から1~2m程度以下の探査距離しか得られない場合がある。広範囲でき裂や断層の3次元イメージングを可能にするにはレーダシステムの高感度化が必要である。光変調器型レーダの精度は維持しながらも、高感度化を目指すことが必要である。そこで本研究では、特性インピーダンス50Ωの同軸ケーブルをダイポールアンテナへ給電する新しいアンテナを導入することにした。

2. 研究の目的

本研究はき裂や断層の3次元イメージングを10~500MHzの電磁波で可能にすることを目的とする。このため、レーダシステムとして、同軸給電アレー型ボアホールレーダ(以後、同軸型レーダと呼ぶ)を開発の対象にする。さらに、本レーダの設計手法を確立

し、坑井内で電磁波の到来方位角を推定できることをフィールド実験で実証する。

3. 研究の方法

(1) 同軸型レーダの設計法確立

ダイポールアンテナを直径 $2b$ の円状に配列し、アンテナそれぞれに細い同軸ケーブル(50Ω)で給電する。これらダイポールアンテナの受信電圧を測定し、波の到達時間差より到来方向を推定する。同軸ケーブルは坑井内の中央で導体円柱内に収束させる。この導体円柱内には高周波信号/光変換や増幅のための電子回路、電池が内蔵される。このようなアンテナは図1のようにモデル化できる。1本のダイポールアンテナの長さは $2h$ であり、導体円柱の長さは $2h'$ である。実際の製作のことを考えると、 $2h \square 2h'$ と仮定してよい。重要なことはアンテナの周囲には円柱状の境界面が存在することであり、この影響もアンテナ解析の際に組み込むことが必要である。この境界面は坑井内に存在する水が存在することに起因する。

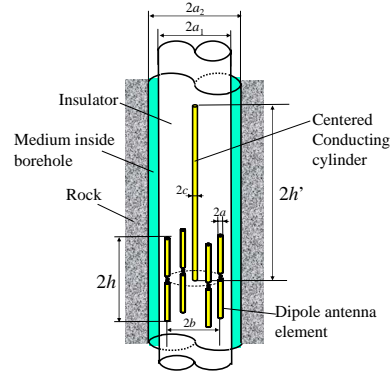


図1 ダイポールアレーアンテナのモデル

本アンテナ設計の重要な点は各アンテナと中心に存在する導体円柱の間に干渉が生じることである。ある条件下ではこの干渉が大きく、波の到来方向推定ができなくなる。本研究では、この干渉の大きさを定量的に表す式を提案した。BRMoMによると、坑井の外から電磁波が直交入射すると仮定するとき、各アンテナの給電点に流れる電流 I_n は以下のように分離できる。

$$I_n = I_n^{(1)} + I_n^{(2)}$$

ここで、 $I_n^{(1)}$ はアレーアンテナへ直接入射する直接波の成分、 $I_n^{(2)}$ は中心導体円柱で散乱された散乱波の成分である。このとき、本研究では、導体円柱とアンテナ間の干渉度を定量化するため、干渉度を

$$I(f) = \left| \frac{I_n^{(2)}}{I_n^{(1)}} \right|$$

と定義する。これは周波数 f [Hz] の関数である。干渉度が小さいときには干渉が小さくなり、アレーアンテナで測定が可能になる。考察によると、この干渉度が $I_0 = -10$ dB 以下のとき、到来方向推定が可能である。干渉度を実際に計算すると、図 2(a)のように、導体円柱の長さ $2h'$ と波長によって決まる半波長共振の周波数で干渉度は最大値をとったあと、周波数が上昇するにつれて緩やかに減少する。この共振周波数よりも上の周波数でアンテナを使用することを考えると、アンテナを使用可能な最低周波数 f_0 は

$$20\log_{10} I(f) \leq I_0 \quad (f_0 \leq f)$$

で決定できる。この周波数 f_0 を下側の遮断周波数と呼ぶことにする。使用可能な周波数の上限はアンテナ素子間の共振である Phase-Sequence Resonance (PSR) が関係している。PSR はアレー信号に波の到来方向に影響を与えることがわかっており、PSRが生じる周波数帯域は使用することは避ける必要がある。BRMoM によると、ある周波数 f_1 よりも低い周波数帯域でこの共振の影響を受けないことがわかっており、この周波数 f_1 を上側の遮断周波数と呼ぶことにする。以上まとめると、使用周波数 f が

$$f_0 \leq f \leq f_1$$

を満たすとき、あらゆる共振や干渉に影響されずに波の到来方向を推定できると予想される。

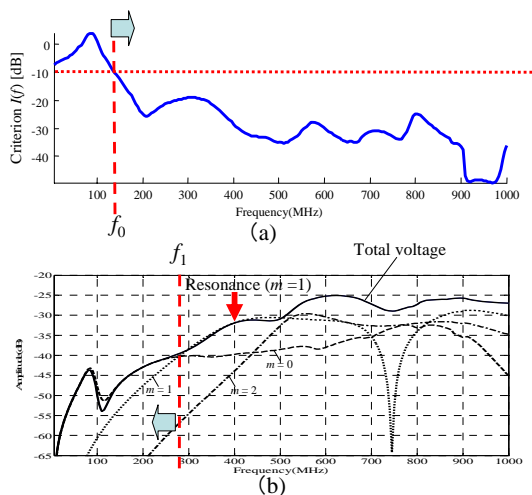


図 2 干渉度とPSR解析結果 使用パラメータ: $2h=20\text{cm}$, $2h'=135\text{cm}$, $2a=2$, (a) 青線: 干渉度、赤点線: $I_0 = -10\text{dB}$ 、赤破線: $f_0=138$ MHz (b) PSR解析。赤破線: $f_1=277$ MHz

(2) 設計法のフィールド実験による検証

図 3 は試作した同軸型レーダのブロックダイアグラムを示す。これらのうち、高周波スイッチ、アンプやレーザダイオードが中心導体円柱へ内蔵される。このため、導体円柱の一部の直径は太くなる。図 4 に実際に試作したダイポールアンテナの図を示す。アンテナ素子は 4 つであり、それぞれのアンテナが細いセミリジッドケーブルを介して高周波スイッチに接続される。図 1 と図 4 間の相違は中心導体円柱の一部の太さが異なる点と導体円柱とアンテナ素子間に同軸ケーブルが存在する点である。理論解析する際には、太い直径を細い導体円柱と近似した。これらの相違を無視できるならば、試作したアンテナの干渉度は図 2 で与えられる。

フィールド実験は花崗岩を母岩とする大阪電気通信大学構内の四條畷実験場で行った。図 5 のように、坑井間距離 6m の 2 本の坑井 BR2 及び BR3 を用いた。ベクトルネットワークアナライザを用いて、0.3 – 300 MHz の周波数帯域で測定した。信号処理のフローチャートを図 6 に示す。非常に重要な処理は 3 番目のバンドパスフィルタ処理である。ここでのバンドパスフィルタは図 7 (b) 及び (c) に示すフィルタ A とフィルタ B を用意した。図中には、干渉度によって定められた下側の遮断周波数 f_0 と上側の遮断周波数 f_1 も示した。干渉度の解析によると、フィルタ A では干渉が大きい周波数帯域を含んでいるので、到来方向推定が困難になることが予想される。一方、フィルタ B では干渉が大きくなる帯域を含んでいないので、推定が良好にできることができると予想できる。

図 8 (b) 及び図 9 (b) は各フィルタを用いた場合の時間領域波形を示す。約 60 ns 付近に送信アンテナからの直接波が到来している。これらの受信波形はそれぞれ図 8 (a) 及び図 9 (a) の波が送信アンテナ給電点に入力されたときの応答と考えることができる。図 8 (c) 及び図 9 (c) は各フィルタ処理後の時間領域波形の到達時間差から各到達時刻における波の到来方向の推定値を示している。本図で、'true' が付された破線は真の送信アンテナの方向を示す。図 8 (c) では、直接波の振幅が大きくなる 60 ~ 80 ns で、推定誤差が大きくなっている。当初予想したとおり、これは中心導体円柱からの散乱波の成分が大きいためである。一方、図 9 (c) では、直接波が到達する 50 ~ 70 ns で、正確に推定が行えている。この結果も予期したとおりであり、干渉度が中心導体円柱からの散乱波の成分が大きくなる周波数を正確に推定できていると考えてよい。

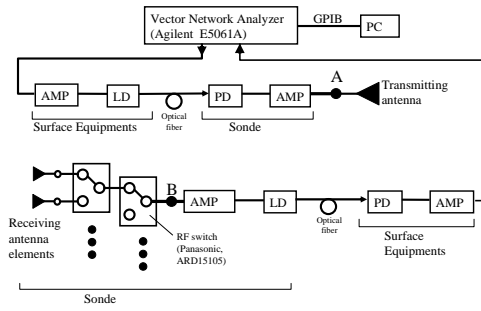


図3 試作したレーダのブロックダイアグラム

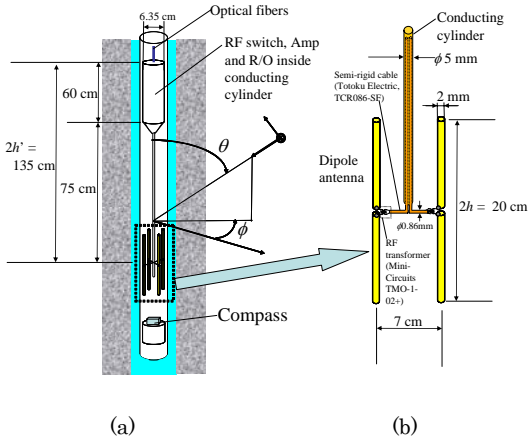


図4 試作したセミリジッドケーブルで給電したダイポールアレーアンテナ (a) アレーアンテナ (b) アンテナ素子

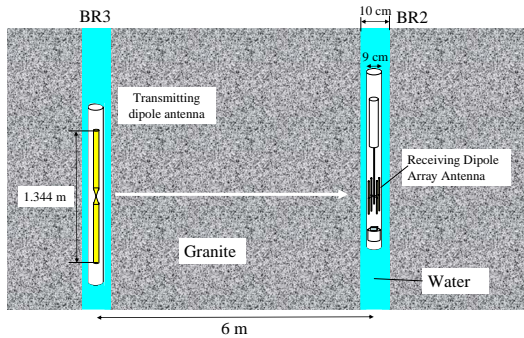


図5 フィールド実験

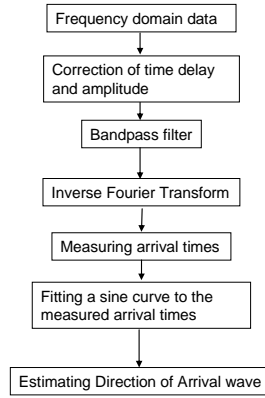


図6 信号処理

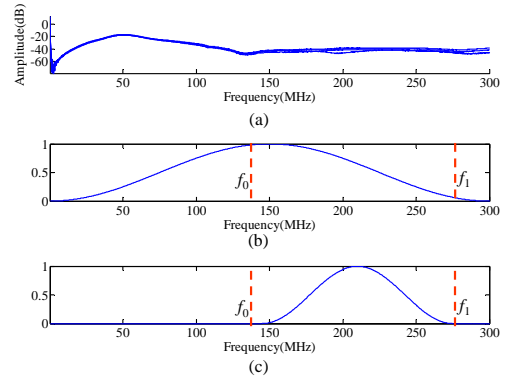


図7 パワースペクトルとフィルタ (a) 受信したパワースペクトル (b) フィルタ A (c) フィルタ B

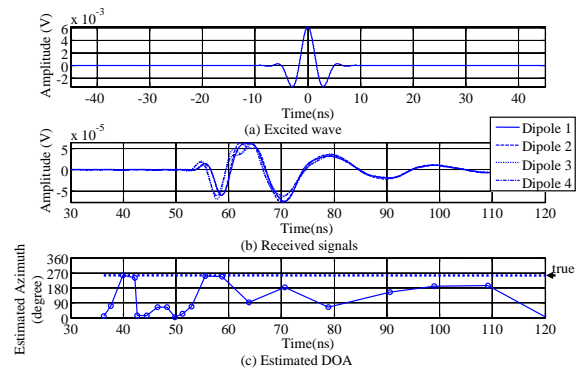


図8 フィルター-Aを用いた場合の結果

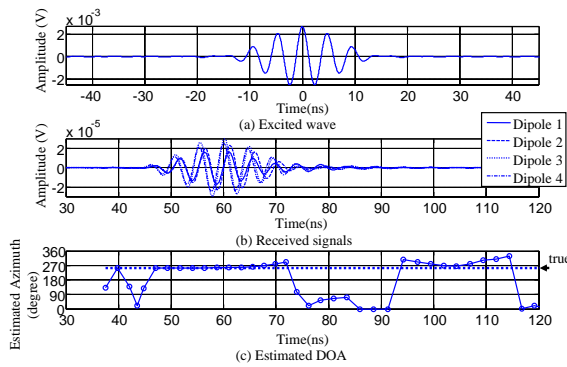


図9 フィルターBを用いた場合の結果

4. 研究成果

本研究の成果をまとめると以下のようになる。

1. 高感度化が期待でき、製作が容易な同軸型指向性ボアホールレーダを試作した。
2. 同軸型指向性ボアホールレーダにおける指向性アンテナの設計手法を提案した。
3. 上記の2の設計手法が妥当であることを花崗岩中におけるフィールド実験で実証した。

上記の成果により、坑井内でのダイポールアレイアンテナの使用に関しては、光変調器などの感度の抑圧や高コストを招くデバイスを使用せずに実現できることを示した。国際的には、指向性ボアホールレーダの実現のため、1) 直交ループアンテナの使用や2) キャビティバックドダイポールの使用が提案され、一部は商用システムが存在している。これらはいずれも一般に高度な計測ができるアレイアンテナの原理を用いていない。このような状況において、本研究の意義は、坑井内でアレイアンテナを用いたボアホールレーダシステムの実用化の可能性を与えたということである。

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 1件)

- ① 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. 査読有

[学会発表] (計 5件)

- ① S. Ebihara and H. Hanaoka, "Designing

Dipole Array Antenna Fed by Coaxial Cables for Directional Borehole Radar," Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, pp. 2-6, Granada, Spain, May 27-29, 2009.

- ② S. Ebihara, A. Sasakura and T. Takemoto, "Influence of Eccentricity of Sonde on Direct Wave in Singlehole Borehole Radar," Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, pp. 93-97, Granada, Spain, May 27-29, 2009.

- ③ S. Ebihara, Y. Inoue and A. Sasakura, "Borehole Effect for Eccentered Radar Sonde," Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, 7 pages, on CD, University of Birmingham, United Kingdom, June 15 - 19, 2008.

- ④ H. Hanaoka, S. Ebihara, M. Note, and T. Nakatsuka, "Estimation of Electromagnetic Parameters by Linear Dipole Array in a Borehole," Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, 5 pages, on CD, University of Birmingham, United Kingdom, June 15 - 19, 2008.

- ⑤ S. Ebihara, T. Ohnoki, R. Shinoda and Y. Kishimoto, "Criterion for Estimation by Reflection Measurement with Array-type Directional Borehole Radar," Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, 6 pages, on CD, University of Birmingham, United Kingdom, June 15 - 19, 2008.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称: 「三次元位置推定システム、及び、ダイポールアレイアンテナ」

発明者 海老原聡

権利者 同上

種類 特許権

番号 2009-004685

出願年月日 2009年1月13日

国内

[その他]

ホームページ

<http://www.osakac.ac.jp/labs/ebihara/Japanese/index.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