

氏名	みわ たかし 三輪 空司		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成11年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)地球工学専攻		
学位論文題目	地下計測のためのボアホールレーダポーラリメトリに関する研究		
指導教官	東北大学教授 新妻 弘明		
論文審査委員	主査 東北大学教授 新妻 弘明	東北大学教授 佐藤 源之	東北大学教授 澤谷 邦男

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

地下計測技術は不可視の領域である地下を視るための技術として、資源エネルギー開発、土木建築、環境保護といった分野において、異なる原理に基づいた多様な計測技術が開発されてきた。その中でも、坑井内において1m程度の波長帯域の電波を用いるボアホールレーダ計測は、大深度において高分解能な情報が取得可能であり注目されている。しかし、これまでのボアホールレーダ計測は坑井に平行なダイポールアンテナのみを用いており、反射体の位置情報のみが議論されていた。一方、衛星等からのリモートセンシングの分野では、偏波情報から反射体の形状情報を抽出する技術であるレーダポーラリメトリ技術が盛んに議論され、その有効性が確認されている。したがって、レーダポーラリメトリ技術をボアホールレーダ計測技術に導入することにより、これまで得ることのできなかった反射体の形状情報を反映した地下情報の取得が期待される(例えば、き裂表面の粗さ評価、反射体の識別、人工物の探査等)。本研究を遂行する上での大きな問題点は、坑井によりアンテナ形状が大きく制限されるため、散乱行列を計測するために必要な同一の周波数特性を有する直交偏波アンテナ対を使用することが困難である点である。そのために、本論文は坑井内において散乱行列を計測し、ボアホールレーダ計測に応用する新たな手法(ボアホールレーダポーラリメトリ)の確立を目的として研究を行うものである。

### 第2章 ポーラリメトリックボアホールレーダ計測システムによるフィールド実験

本章では試作したポーラリメトリックボアホールレーダシステムの概要、フィールド実験の結果について述べた。

まず、図1に示すような、深度100mまでのポーラリメトリックボアホールレーダ計測が可能な光伝送型SFCWポーラリメトリックボアホールレーダシステムを開発した。本計測システムは10～500MHzにおいて、ダイナミックレンジは71dB(IF帯域幅1Hz時)である。互いに直交する偏波を送受信可能なアンテナとしては、坑井軸方向の偏波を放射するダイポールアンテナと水平偏波を放射する導体円筒上軸方向スロットアンテナを用いている。本システムを用い釜石鉱山内実験フィールドにおいてクロスホール(坑井間計測)を行った結果で

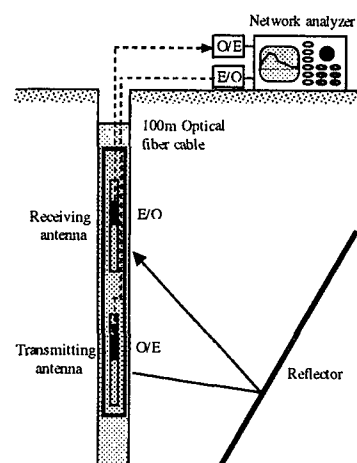


図1 計測システムの概要

は、ダイポールアンテナとスロットアンテナの媒質中での共振周波数は、それぞれ、70 MHz、210 MHz 程度と極端に異なっているものの、坑井軸方向の指向性が 50 ~ 100 MHz 付近の帯域においてほぼ同様であることを実験的に確認した。つぎに、シングルホール計測（反射計測）の結果を図 2 に示すが、アンテナ形状の違いにより、各アンテナの組合せでの周波数特性が顕著に異なり、アンテナ伝達特性の違いの補償が必要であることがわかった。また、各偏波系では容易に反射波が確認され、ポーラリメトリックボアホールレーダのデータとして利用可能であることがわかった。

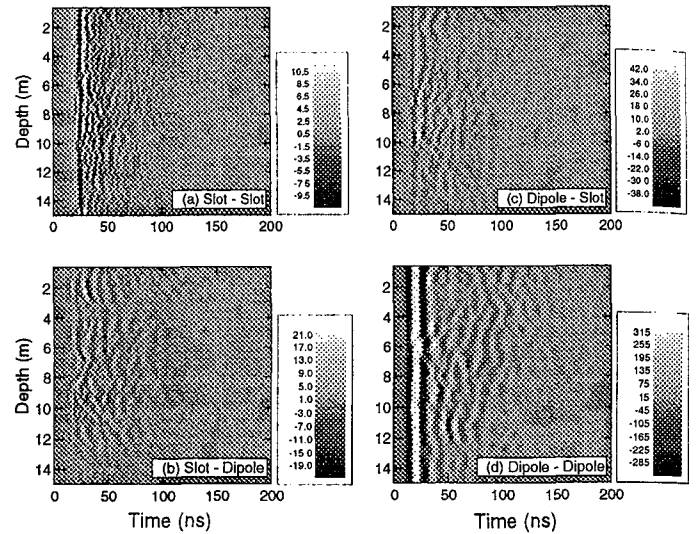


図 2 ポーラリメトリックボアホールレーダ計測例

### 第 3 章 ボアホールレーダポーラリメトリの定式化

本章ではポーラリメトリックボアホールレーダ計測を、同一方向を軸とする微小電気、磁気ダイポールアンテナにより構成されるポーラリメトリックシステムとしてモデル化し、アンテナ伝達特性の違いを補償するためのアルゴリズムの検討、ならびに、クロスホール計測、及びシングルホール計測における直達波や反射波の受信信号の理論的偏波特性等、ボアホールレーダポーラリメトリの基本原理について検討した。

まず、クロスホール計測、シングルホール計測の直達波に関し、各微小ダイポールのベクトル実効長から受信信号の定式化を行った。また、シングルホール計測の直達波が伝搬方向に振動する誘導電磁界成分を主成分とする信号であることも示した。さらに、平面反射体からの反射波についても同様な定式化を行い、クロスホール計測での直達波を用い、反射信号に含まれるアンテナ特性の違いを補償することにより、散乱行列の評価を行う手法を示し、ボアホールレーダポーラリメトリの基礎を構築した。

### 第 4 章 ポーラリメトリックボアホールレーダ計測における散乱行列の評価

本章では定式化において得られたアルゴリズムをもとに実フィールドデータに対しアンテナ特性の補償を行い、散乱行列の評価を行った結果について検討した。

まず、クロスホール計測における直達波からアンテナ特性補償のためのインバースフィルタリングに用いる参照波の抽出を行い、釜石フィールドでのクロスホール計測において散乱行列を評価した結果、その直達波は理論散乱行列に近い値が得られ、両アンテナの交差偏波成分の感度は平行偏波成分に比べ -20 dB 以下であることも明らかとした。また、図 3 にポーラリメトリックシングルホール計測の結果に対し直達波を除去し、地下き裂の散乱行列を評価した

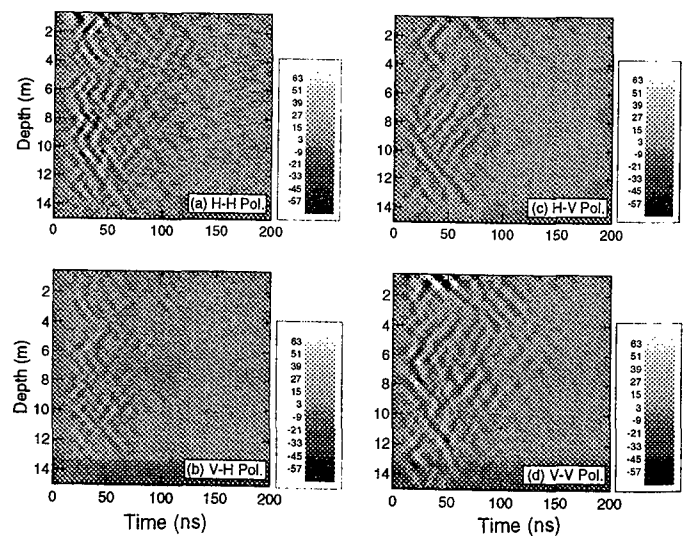


図 3 アンテナ特性補償後の時間波形（散乱行列）

結果を示す。この結果より、各々のき裂によって顕著な交差偏波成分の違いがあることを明らかとした。

次に、シングルホール計測における直達波の信号を用いアンテナ伝達特性を補償する手法の有効性を示した。まず、数値シミュレーションにより、シングルホール計測における直達波の微分信号が共振周波数程度の帯域までアンテナ伝達特性として近似できることを確認した。また、本システムにおいてアンテナ間隔がアンテナ長の1.5倍以上のとき、散乱行列を定量的に評価できることも示した。さらに、本手法の妥当性をフィールドデータにおいて検証した結果、実験的にもシングルホール計測における直達波の微分信号がアンテナ伝達特性補償のための参照信号として利用可能であることを明らかにした。本手法は、大深度でのポーラリメトリックボアホールレーダ計測等、クロスホール計測からアンテナ伝達特性を評価困難な場合等に有効であると考えられる。

## 第5章 導体円筒上斜めスロットアンテナを用いた広帯域ポーラリメトリックボアホールレーダシステム

本章では、より高分解能、高精度に散乱行列を評価可能な計測システムとして、新たに導体円筒に斜めにスロットを切ったアンテナ対を提案し、実験的に斜めスロットアンテナのポーラリメトリックボアホールレーダ用アンテナ対としての適応性を検討した結果について述べた。

まず、空中実験、地中実験により周方向の偏波特性、周波数特性の評価を行った結果、地中ではアンテナ軸方向偏波成分が顕著に周方向指向性を有することが明らかとなり、アンテナのメカニズムとして周方向偏波成分は周方向のループアンテナ、軸方向偏波成分は軸方向と給電点方向を含む面内での長方形ループアンテナと等価な電流が放射に寄与している可能性が得られた。そこで、垂直成分を周方向に無指向性とするため裏方向にスロットを同じ向きに追加し、2点給電を行った結果、軸方向偏波の平衡電流を抑圧し、両偏波成分を周方向に無指向性とすることができ、電気、磁気ダイポールの組み合わせられたアンテナ対としてモデル化できることがわかった。

さらに、右向きと、左向きの2点給電型斜めスロットアンテナ対を用いたポーラリメトリックシングルホール計測により散乱行列の評価を行った。図4に地中実験の結果を示すが、直達波や空洞からの壁面の散乱行列は理論に近い値が得られた。また、時間波形は0.4～1.5 m程度の波長帯域を有しており、ダイポールアンテナとスロットアンテナを組み合わせた計測システムに比べ可探距離は短くなるものの2倍程度広帯域、かつ高精度なポーラリメトリック計測が行える可能性があることを明らかにした。

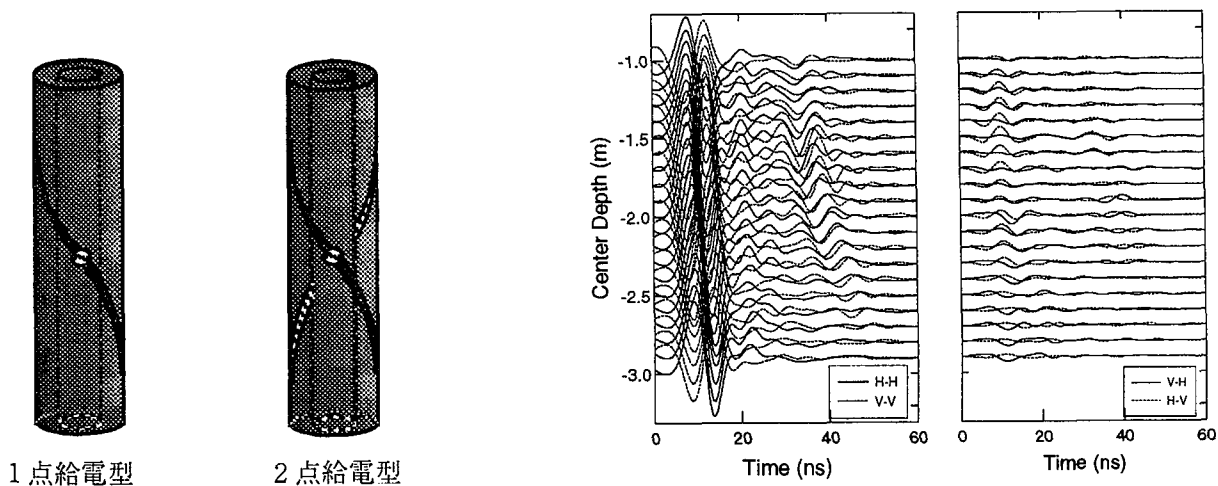


図4 導体円筒上左回り斜めスロットアンテナの形状と2点給電型の右回り、左回りスロットアンテナを組み合わせた地中内での散乱行列計測例（30 ns 付近に空洞壁面からの反射波が存在）

## 第6章 ポーラリメトリックボアホールレーダ計測による地下反射体情報の抽出法

本章では、ボアホールレーダポーラリメトリ技術の地下計測への応用による新たな地下情報の抽出技術の検討を行った。

まず、直達波を抑圧し、平面からの反射波を強調するような偏波フィルタリング法としてHH，VV偏波成分の和を用いる手法の有効性を実験的に示した。また、2本の平行な坑井間でのポーラリメトリッククロスホール計測において得られる反射波の散乱行列を用い3次元的な反射体の位置を評価する新たな手法について具体的に示した。

さらに、き裂性状のキャラクタリゼーションの方法として、等方的に粗いき裂、滑らかなき裂の特徴抽出を目的とし、偏波基底の回転における交差偏波成分の値を最小にするような回転角に着目する手法について検討した。その結果、釜石フィールド実験において得られる地下き裂の散乱行列から、偏波基底の回転により回転角に対し常に交差偏波成分が小さくなるようなき裂（等方的に荒い表面性状を有するき裂）と、 $0^\circ$ ， $90^\circ$ 方向に小さくなるようなき裂（滑らかなき裂）の特徴が確認され、ボアホールスキャナの坑壁写真から得られる特徴と調和的な結果が得られた。

## 第7章 結論

本論文の結論として、同一方向を向く微小電気、磁気ダイポールを基礎とするボアホールレーダポーラリメトリ独自の理論、散乱行列計測法の基礎を確立することにより、レーダポーラリメトリ技術のボアホールレーダ計測への導入に成功し、従来得ることのできなかつた地下反射体の数10 cmオーダーでの3次元的形状を反映した情報を議論可能としたといえる。

## 審査結果の要旨

地下深部の詳細な情報取得は、地球工学の分野において特に重要な技術である。本論文は、坑井を用いた地下電磁計測法であるボアホールレーダ計測において、電磁波の偏波を利用するポーラリメトリ技術の構築を目的とし、そのための問題点の提示と具体的解決方法を示したもので、全文7章からなる。

第1章は緒論である。第2章では、本研究で開発を行ったポーラリメトリックボアホールレーダ計測システムとそれを用いたフィールド実験について述べている。本システムは、互いに直交する偏波信号の送受を可能にするため、ダイポールアンテナとスロットアンテナを組み合わせ、周波数領域において計測を行うものである。ここではフィールド実験結果により、本システムを用いてポーラリメトリックボアホールレーダ計測が可能であることを示すとともに、計測上の問題点を明らかにしている。

第3章では、ポーラリメトリックボアホールレーダ計測を、同一方向を軸とする微小電気、磁気ダイポールモーメントにより構成されるシステムとしてモデル化し、アンテナ特性を補償するためのアルゴリズムの検討、ならびに、クロスホール計測及びシングルホール計測における直達波や反射波の受信信号の理論的偏波特性等、ボアホールレーダポーラリメトリの基本原理について検討を行うとともに、その基本式を導出している。

第4章では、実データに関し散乱行列の評価を行った結果を述べている。まず、クロスホール計測において、直達波からアンテナ特性を補償し散乱行列を評価する方法を提示し、それによって、散乱波の交差偏波成分はき裂により顕著な違いがあることを明らかにしている。これは重要な知見である。さらに、シングルホール計測において、直達波の微分信号をアンテナ特性補償のために利用する新たな方法を提示し、その有効性を確認するとともに、それに基づき散乱行列の評価を行っている。

第5章では、より高性能なポーラリメトリックボアホールレーダ計測を実現するために、導体円筒に右向きと左向きの斜めスロットを有するアンテナ対により等価的に直交する偏波基底を構成する新たな方法を提案している。本計測システムは従来のシステムに比べて広い波長範囲にわたり高精度なポーラリメトリック計測を行うことを可能にするもので、重要な成果である。

第6章では、ボアホールレーダポーラリメトリによる地下情報の抽出法について論じている。まず、ポーラリメトリック計測により得られる散乱行列の情報を用い、平面からの反射波情報を強調する方法を提案するとともに、3次元的な反射体の位置を推定する方法を具体的に提示している。さらに、散乱行列の偏波基底の回転によりき裂の粗さ異方性を評価する方法を提案し、実データによりその有効性を確かめている。第7章は結論である。

以上要するに本論文は、坑井を用いた地下電磁計測に関し、新しい計測概念と具体的な手法を提案し、さらにフィールド実験によってその有効性を実証したもので、地球工学ならびに地殻工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。