

氏名	真田佳典
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第1926号
学位授与の日付	平成12年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科資源工学専攻
学位論文題目	地中レーダのための高精度モデリングとイメージングに関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 芦田 讓 教授 青木謙治 教授 足立紀尚

### 論文内容の要旨

本論文は地表および坑井近傍の地下構造の推定に有力な物理探査手法の一つである地中レーダを対象として、電磁波の高精度モデリングおよび地下のイメージングに関する研究成果をまとめたもので7章から構成されている。

第1章は緒論であり、地中レーダ法の工学的な役割と位置付け、技術的な歴史および現状での問題点を示し、本研究の背景および目的を明確に示している。また、本論文の構成と内容を概説している。

第2章では、第3章以降に先立って電磁波の物理的な性質および時間領域有限差分法(FDTD法)の基礎的な性質を明らかにしている。電磁波動方程式、位相速度と減衰、境界条件、反射と透過について述べ、その後、FDTD法の具体的な計算手法、励起方法、シミュレーションの精度に影響を及ぼす安定条件、グリッド分散現象、境界条件について数値計算例を示しながら論述している。

第3章では、地下のイメージング手法としてリバースタイムマイグレーション手法を述べている。電磁波の本来の性質である電場および磁場のベクトル方程式を差分式で定式化し、その差分スキームを用いて順時間・逆時間過程と電磁波の拡散・集中過程との関係を数値計算例を用いて明らかにしている。また、この手法の不適切な例およびその適用範囲を明らかにし、導電率が未知の場合において、イメージングが不適切にならないために、振幅補正を用いた後に、減衰項を含まないリバースタイムマイグレーションを施すという方法を提案し、数値計算およびフィールドデータへ適用することによって、この手法の有効性を実証している。

第4章では、計算機による2次元・3次元モデリングのように、大量のデータを取り扱うモデリングあるいは大量の繰り返し計算を必要とするインバージョンに適した電磁波のモデリング手法を述べている。この手法は、従来のFDTD法と同程度の精度を保ち、なおかつ計算機の記憶確保領域(メモリ)の節約を図ることを目的として、FDTD法の一階微分演算にフーリエ変換を用いている。まず、一階微分演算においてナイキスト周波数の値が誤差の原因となっていることを明らかにし、その改良法およびFDTD法に適用する際の具体的な計算手順を示している。また、グリッド間隔と時間ステップの決定法を示し、この手法を用いることによるグリッド間隔や計算ステップの減少効果を論述している。さらに、数値計算結果からメモリおよび計算時間の縮小、境界面での安定な計算が達成できることを実証している。

第5章では、地中レーダを用いて坑井間の岩盤の導電率分布を推定するための電磁(EM)フルウェーブ・インバージョン手法を述べている。この手法は電磁場をベクトル場として解く必要があるため、まず、このインバージョンの鍵となるMaxwell方程式のベクトル随伴方程式について述べ、ついでEMフルウェーブ・インバージョン手法を導出している。そして、導電体ブロックモデルおよび含水破碎帯モデルの数値計算例から、このインバージョン手法が坑井間の導電率分布をイメージングできることを明らかにしている。

第6章では、反射法地震探査における波動方程式マイグレーションの基礎となる上方および下方接続のイメージング手法を一般的に拡張することによって、リバースタイムマイグレーション、フルウェーブ・インバージョンなどの波動方程式に基づく種々のイメージング手法の統一理論の構築を行っている。その概念を用いることにより種々のイメージング手法は、

下方深度接続法および時間接続法に分類できること、さらに MT 法などの電磁波の拡散方程式も波動現象と見なすことにより、この理論の範疇に含めることができることを示し、その場合における接続の方法および安定性について明らかにしている。そして、電磁マイグレーションおよびフルウェーブ・インバージョンを具体的な例として取り上げ、随伴方程式を用いた接続や、その安定性について示している。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、Maxwell 方程式をベクトル方程式のまま直接陽的解法で解く FDTD 法を用いて、地中レーダのより高精度なモデリングおよびイメージング手法を開発し、その有効性を検証したもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. リバースタイムマイグレーション手法を電磁波の電場および磁場ベクトルに従って定式化し、順時間・逆時間過程および拡散・集中現象の関係を明らかにした。また、媒質の導電率が未知の場合において、振幅補正を行った後、減衰項のないリバースタイムマイグレーションを施す方法を提案し、数値計算およびフィールドデータへ適用しその有用性を実証した。

2. 計算機による電磁波のモデリングにおけるメモリ容量の節約を目的として、FDTD 法の一階微分演算にフーリエ変換を用いた微分演算法を開発した。数値計算結果からメモリおよび計算時間を少なくし、境界面で安定的に計算できることを示した。

3. Maxwell 方程式の随伴方程式を用いた EM フルウェーブインバージョン手法を開発した。数値計算結果から、この手法が坑井間の導電率分布をよくイメージングできることを示した。

4. 上方および下方接続イメージング手法を拡張することによって、従来の波動方程式に基づく各種のイメージング手法が総合的に解釈できることを示した。随伴方程式を用いた接続や、その安定性について考察し、実際の接続法やその安定性について論述した。

以上要するに、本論文は Maxwell 方程式をベクトル方程式として解くことによって、地中レーダの高精度のモデリングおよびイメージングが行えることを実証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 12 年 1 月 24 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。