

内99-67

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

時間領域電磁探査法の
3次元解析に関する研究
(Study on Three-Dimensional Analysis in the
Time-Domain Electromagnetic Method)

申請者

遠藤 仁

Masashi Endo

資源及材料工学専攻 物理探査工学研究

2000年2月



理 2497 (3012)

電磁探査法は、今世紀初めに考案され、それ以来今日まで資源探査や地下構造調査に広く用いられてきた。電磁探査法は、電磁波を地下に投入し地下の比抵抗構造に起因した応答（磁場）を測定して比抵抗異常を検出しようとするもので、物理的には誘導場（ベクトル場）を対象とした探査手法である。したがって電磁探査法は、多成分の応答を測定することにより、ポテンシャル場（スカラー場）を対象とする電気探査法（比抵抗法、IP法等）と比較して、より分解能の高い成果が期待できる手法である。電磁探査法の一つである時間領域電磁探査法（Time-Domain EM; TDEM法またはTransient EM; TEM法）では、周波数領域電磁探査法とは異なり、理論的には送信源による電磁場は存在しないため、地下の応答だけを取り出すことができるという利点がある。このことから、時間領域電磁探査法は近年、資源探査をはじめ、土木・岩盤、地下水、防災調査等、広く用いられるようになってきている。しかし、解析技術の現状は、電気探査法、周波数領域電磁探査法では2次元解析が主流であり、3次元の解析技術も実用化されつつあるのに対し、時間領域電磁探査法は理論的な扱いが非常に困難であるため、いまだに水平層状の地下構造を仮定した1次元解析が主流である。

近年の探査ターゲットは潜頭化、小規模化、複雑化してきており、さらに探査は山岳地域等、地形の急峻な地域で実施されることが多くなってきている。このような現状で、時間領域電磁探査法の信頼性・実用性を高め、また探査手法への理解を深めるためには、3次元解析に関する研究として、以下のような検討が必要である。

- (1) 任意の地下構造および任意の地表地形が表現可能なモデリング手法の開発
- (2) 応答に現れる地形の影響
- (3) 地中の電磁誘導現象
- (4) 不均質な地下構造に対する検出能力
- (5) 野外実測データ解析への適用

本研究は、時間領域電磁探査法について上記項目の検討結果をまとめたもので、次の7章から構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、TDEM法の発展経緯と基礎概念、電磁探査法における数値モデリングの発展経緯についてまとめた。また、電磁探査法解析技術の最近の動向についてまとめた上で、本研究の意義および目的について述べた。

第2章では、地形を考慮したTDEM法の3次元数値モデリングの開発について述べた。

近年TDEM法の3次元モデリング手法として用いられてきた時間領域差分法に境界適合座標法を適用することにより、任意の3次元地下構造とともに任意の3次元地表地形を表現できるモデリング手法を開発した。境界適合座標法は、これまで流体力学や電磁波（波動場）の分野における数値シミュレーションに用い

られてきた手法であり、現実の空間（物理空間）を非直交グリッドで分割し、これを直交グリッドで形成される計算空間に変換して計算を行う手法である。

電磁場の離散化には、比抵抗境界面における電場不連続の問題を回避できるStaggered-gridを用いた。また、波動方程式に対して常に安定な差分スキームを導くDuFort-Frankel法により差分方程式を形成したが、拡散方程式である電磁場の支配方程式（Maxwellの方程式）にDuFort-Frankel法を適用するため、Maxwellの方程式を一部修正した擬似波動方程式を支配方程式に組み込んだ。

従来、地表面においては、上方接続の境界条件が用いられてきたが、これは水平地表を前提としているため、地形モデル（物理空間）にこの境界条件をそのまま適用することは不可能である。そこで、直交グリッドで形成される計算空間において上方接続の境界条件が成り立つと仮定し、その結果導出される方程式と両空間における各単位ベクトルの対応関係とを利用した近似計算により、地表面における問題を解決した。

差分スキームに関する各パラメータについて解析解との比較により検討し、差分スキームの計算精度を他の数値モデリング手法による解との比較により確認した。また、境界適合座標法を用いた本計算手法の有効性ならびに適用の限界を示した。このために、一様に地表が傾斜したモデルの応答を、水平地表モデルの応答のベクトル合成、および境界適合座標法により求めて比較した。

第3章では、TDEM法において応答に現れる地形の影響について述べた。

典型的な地表地形（傾斜面、2次元の山・谷、および3次元の山・谷）モデルについて、応答に現れる地形の影響を検討した。その結果、地形の影響は初期の時間帯ほど応答の差として大きく現れ、また局所的には2次元地形と見なせる場合でも、応答には3次元地形の影響が現れることが明らかとなった。さらに、地形起伏がある区域に埋没している低比抵抗異常体の応答について検討した結果、異常体の応答も地形の影響を受けるため、異常体の比抵抗や形状が誤って解釈される可能性があることも明らかとなった。

以上のことから、地表地形を3次元的にモデル化し、さらに地表地形と地下構造とを同時に考慮した解析が必要であることを示した。

第4章では、TDEM法における電磁誘導現象を明確にするために、誘導電流および磁場の2次元・3次元的な分布を求め、これらの挙動について検討した。その結果、均質媒質中の誘導電流は2本の互いに逆符号のスモークリングにより表現され、媒質中を送信源から俯角約27度で地中に浸透していくことが明らかとなった。また、低比抵抗の異常体領域では、送信源に近い端点から電流が誘導され、最終的には電流が異常体の側面を回転するように流れることが明らかとなった。さらに、応答磁場の強度や方向は誘導電流の挙動から説明できることが明らかとなった。

地中で生ずる電磁誘導現象はスモークリングの挙動により説明することができることから、誘導電流の挙動を明らかにすることにより、電磁誘導現象を容易にイメージすることができることを示した。さらに応答磁場の挙動は誘導電流の挙動から説明できることから、誘導電流の挙動解析は応答磁場から地下構造を推定する有益な手段となり得ることを示した。

第5章では、TDEM法の感度分布から、TDEM法で用いられる各送受信配置の地下不均質構造に対する検出能力について検討した。ここで感度は、ある送受信配置において、異常体が存在することにより現れるTDEM応答の変化を、異常体が存在しない場合のTDEM応答で規格化した値として定義した。感度解析の結果、Central-loop配置は送受信直下に埋没している低比抵抗異常体に対して感度が非常に高く、Outer-loop配置は送受信間の地下に埋没している低比抵抗異常体に対して感度が高いことが明らかとなった。また、送信ループを大きくすれば、可探深度を大きくできることが明らかとなった。

さらに、地形モデルにおいて感度解析を行った結果、特に地形起伏のある区域において水平地表の場合とは異なった感度分布が得られた。

感度分布はTDEM法の検出能力に関する指標の1つであるため、探査を実施する際の送受信配置および測定時間帯の設計に極めて有効である。また、地形モデルにおける感度解析の結果から、地形を考慮したモデリングの重要性が明らかとなった。

第6章では、野外実測データの解析について述べた。

鹿児島県菱刈地域で測定されたTDEM法データに対し、地形を考慮した3次元解析を行った。解析の結果、測定地域において、深度方向に伸びた低比抵抗異常が検出された。同地域で過去に実施されたSchlumberger法電気探査データの1次元解析ならびにTDEM法データの1次元解析では、測定地域はほぼ水平多層構造と解析されたのに対して、電気検層データやボーリング結果では、同地域の地下には深度方向の断裂系の存在が推定されていることから、地形を考慮した3次元解析の必要性が明らかとなった。またここで取得された実測データでは、特に浅部構造の同定が困難であることを明らかにし、測定条件や測定機器に関する改良点について提言した。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめて示した。

近年の探査は地形の急峻な地域で実施されることが多くなってきており、探査ターゲットも複雑化してきている。本研究で開発したモデリング手法では、任意の3次元地下構造と同時に任意の3次元地表地形が表現できるため、その有効性は極めて高い。また、地中で生じている電磁誘導現象ならびに時間領域電磁探査法の検出能力について明らかにしたことによって、今後の電磁探査技術の開発に有益な指針を与えた。さらに、野外実測データ解析に適用し、時間領域電磁探査法の信頼性・実用性向上に貢献した。