

学位論文題名

# Two and a Half-Dimensional Modeling and Inversion of Controlled-Source Electromagnetic Exploration Data

(人工信号源電磁探査法データの2.5次元モデリングおよびインバージョン)

## 学位論文内容の要旨

電気・電磁探査法は資源探査、土木・環境調査、地震・火山防災調査さらに地殻構造調査と幅広く用いられている探査法である。特に電気探査比抵抗法データの2次元解析は、100m以浅の浅部調査に一般に利用され、地下水探査や岩盤評価に貢献している。さらに電磁探査法の一つである Magnetotelluric (MT)法は、我が国において地熱探査目的に精力的に技術開発が行われ、データの2次元解析は恒常的に実施されており、深度数 km から数十 km の深部調査に適している。しかし、MT法は自然の電磁場変動を信号源としているために、市街地近郊や電車等の人工ノイズ源が存在する場合、良質なデータの取得が困難になり、一観測点の測点到数日を費やしてしまう。地下数 km の資源探査や放射性廃棄物の地層処分に関連した深部地質環境調査には、MT法の代わりに、人工信号源を利用した Controlled-source audio-frequency MT (CSAMT)法や Long-offset transient electromagnetic (LOTEM)法の適用が考えられるが、CSAMT法にはニアフィールドの問題、LOTEM法には1次元解析しか実用化されていないといった技術的問題点がある。

本研究では、CSAMT法やLOTEM法のそれら問題点を克服するために、人工信号源電磁探査 (Controlled-source electromagnetic, CSEM)法データの周波数領域における2.5次元モデリングおよびインバージョン技術の開発、また時間領域データを周波数領域に変換するインバージョンによるフーリエ変換法の技術開発を実施した。2.5次元とは人工信号源を3次元、比抵抗構造を走向方向には一定であるとした2次元構造であるとする仮定である。開発したデータ解析手法の実測データへの適用事例として、秋田県由利原地域で取得されたLOTEMデータについて、インバージョンによるフーリエ変換法の適用、2.5次元インバージョン法の適用を実施し、その有効性を確認した。以下に本論文の各章の要約を示す。

第1章では、岩石の比抵抗、電気・電磁探査法の基礎的な事項について解説し、特に人工信号源を利用したCSAMT法とLOTEM法におけるソース効果について説明した。そして、その影響を評価するために信号源を組み込んだ測線配置と、探査対象領域を挟み込むように二つの信号源を設置する新しい配置を考案し、さらに取得データを2.5次元解析することを提案した。

第2章では、CSEMデータの2.5次元解析に必要なファワードモデリング手法を有限要素法により開発した。モデリングにソース項を組み込むとそこは特異点となり、周辺域での数値解の精度が低下する。そこで、ソース項を空間的に分配させ、特異性を緩和し、精度向上を図った。また、アイソパラメトリック要素を採用することで任意の地形を表現できるよう工夫した。さらに、開発したモデリング手法の信頼性を、他の既存結果と比較することにより確認した。

第3章では、インバージョンによるフーリエ変換法及び2.5次元インバージョン法の

開発に必要な、経験的ベイズ法による不適切逆問題の正則化技術に関する基礎的研究成果を解説する。どちらのインバージョン法においても、本研究では、解に平滑化拘束条件を課しており、その拘束条件とデータへの当てはめのバランスを Akaike's Bayesian Information Criterion (ABIC)により調節している。経験的ベイズ法は ABIC の基礎となる技術であり、この章ではその特性を簡単な事例、数値実験例を通して詳細に調査研究している。

第4章では、インバージョン法により時間領域データを周波数領域データにフーリエ変換する手法の研究開発について説明する。本手法は、データに含まれるノイズの影響や、ノイズの相互相関の影響を考慮できるだけでなく、インパルス応答だけでなくフラックスゲート磁力計で測定されるステップ応答もフーリエ変換できるなど、高速フーリエ変換では対処できないことが可能となっている。さらに、実際の LOTEM 法データに適用し、ノイズが大きなデータに対しても高速フーリエ変換に比べて、安定した結果が得られることを示した。

第5章では、CSEM 法データの 2.5 次元インバージョン法の研究開発結果について説明する。数値実験の結果、平滑化拘束条件の採用により解析結果の初期モデルの依存性が低下し、またデータノイズのレベルに応じて平滑化が調節されることが明らかになった。また、一つの信号源を用いただけでは、解析結果は信号源の位置に大きく依存し、真のモデルに近い結果を得るのは難しいことが理解された。そして調査対象領域を挟み込むように二つの信号源を設置することで、インバージョンの収束過程は安定し、満足の行く解析結果を得ることができた。さらに、実際の LOTEM データに本手法を適用し、深度約 1 km までは MT 法の調査結果と調和する結果が得られた。調査地域の比抵抗が非常に低いため、より深部の探査にはさらに低周波数のデータが必要であることが示唆された。

第6章では、本研究の結論と、今後の展望について記述する。

最後に、本研究により人工信号源電磁探査法データの 2.5 次元解析が可能となり、これまでの電気探査比抵抗法や MT 法に加えて、この新しい探査手法の利用が実用化されることとなるであろう。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 西 田 泰 典

副 査 教 授 蓬 田 清

副 査 助 教 授 茂 木 透

副 査 教 授 小 川 康 雄

(東京工業大学火山流体研究センター)

## 学位論文題名

### Two and a Half-Dimensional Modeling and Inversion of Controlled-Source Electromagnetic Exploration Data

(人工信号源電磁探査法データの2.5次元モデリングおよびインバージョン)

近年、地震・火山活動に関連する地殻構造調査に電磁探査法が適用されてきている。電磁探査法はこれまで、金属鉱床や地熱資源の探査を中心に、開発・適用されてきたが、結果として得られる地下の比抵抗分布は、地震活動に関連する深部流体の存在を捉え、また比抵抗不連続部として活断層の存在を抽出することができる。しかしその多くは、電磁探査法として、自然界の電磁場変動を利用したMT(Magnetotelluric)法が中心に適用されている。MT法には、データ解析は容易であるが、鉄道などの人工的なノイズ源がある場合、良質なデータの取得は困難であるといった問題がある。一方、接地電線などを送信源とした人工信号源電磁探査 (Controlled-source electromagnetic, 略して CSEM)法は、ノイズに強く、また迅速な現場調査が可能であるといった利点がある。しかし、そのデータの解析は地下を水平多層構造と仮定した1次元解析が中心であり、送信源から十分に離れた受信点においてのみ、平面波入射を仮定し、従来の2次元解析が実施されている。実際、送受信点間に異常体が存在する場合、リバーサルと呼ばれる極性反転を示すデータが生じ、それは1次元解析では説明できない。また平面波近似の制約から低周波データの解析ができないといった問題が生じている。

本論文は、このような CSEM 法データ解析の問題点を克服するために、まず CSEM 法データの周波数領域における 2.5 次元モデリングおよびインバージョン技術を開発している。2.5 次元とは人工信号源を 3 次元、比抵抗構造を走向方向には一定であるとした 2 次元構造であるとする仮定である。著者は、有限要素法によるモデリングを実施し、任意の地形が表現できるようアイソパラメトリック要素を採用している。さらに任意の場所に送信源を配置できるよう、擬似デルタ関数に従い送信源を空間的に配分するよう工夫している。またインバージョンの不安定性を避けるためにモデルパラメータの平滑化を拘束条件として考慮し、データへの当てはめと拘束条件のバランスを経験的ベイズ法に基づく情報量規準により調節している。さらに時間領域データを周波数領域に変換するインバージョンによるフーリエ変換法を考案し、開発を実施している。そして、送信源から受信点間全ての地下領域を解析対象とすることで、平面波近似を必要とせず、リバーサルデータも説明できることを示している。また、送信源を今までの一つではなく、さらに追加することで、インバージョンが安定化し、信頼性の高い解析結果が得られることを示している。

これを要するに、著者は、人工信号源電磁探査法のデータ解析について、特に送信源も考慮した多次元解析の必要性および多重信号源配置の必要性という新知見を得たものであり、今後の人工信号源電磁探査法の地球科学への適用さらには資源探査・土木・環境問題への適用に対して、その技術開発において貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。