

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

地磁気地電流法探査における
ウェーブレット変換及び独立成分分析を用いた
ノイズ低減による高精度な地下深部情報の推定

Accurate estimation of deep subsurface information
by noise reduction using wavelet transform and
independent component analysis in magnetotelluric soundings

申請者

小川 大輝

Hiroki OGAWA

地球・環境資源理工学専攻 物理探査工学研究

2023年7月

地下数 km - 数十 km といった地下深部（大深度）の探査は，エネルギー資源の開発や自然災害予測，さらには循環型社会の実現の観点からも重要である。このような大深度探査においては，掘削コストやリスクを鑑み，非破壊で地下深部を推定する物理探査手法の役割は非常に大きい。例えば，地下 1 - 4 km 程度にその多くが存在する在来型地熱貯留層の探査においては，電磁探査法の 1 種であり本研究の主題となる地磁気地電流（MT）法探査の実施が必須となっている。また，地下 4 - 5 km 程度の領域に推定される非在来型の超臨界地熱流体は，国内外の地熱発電容量を飛躍的に増大できると考えられており，その詳細な賦存状態の解明のために探査・開発技術の確立が望まれる。また，地下浅所～数十 km の探査を通じて地殻内部における流体の存否や移動経路を把握することは，火山・火成活動や地震・断層活動の評価及び将来予測の観点で肝要である。加えて，地下流体の把握や監視が求められる CO₂ 地中貯留における圧入箇所選定や圧入後のモニタリング，さらには高レベル放射性廃棄物地層処分における適地選定においても MT 法探査を含む電磁探査の実施が不可欠とされている。このように地下を非破壊で探査する物理探査法，その中でも比抵抗物性を探査対象とする電磁探査法，特に大深度探査が可能な MT 法探査はカーボンニュートラルや持続可能な循環型社会の実現を下支えする技術として大きな役割を担うことが期待される。

前述のように，地下深部構造調査において注視すべき地殻内流体に敏感な比抵抗を利用する探査手法である MT 法は，主に太陽の黒点活動に起因して大地に発生する自然電磁場を観測対象とする。電磁信号を能動的に流す必要が無いという安全性や簡便性に加え，地下数 km 以深の比抵抗構造を把握可能な他の探査手法が実質的には存在しないという優位性から，MT 法探査は今後も推進されることが期待されている。一方で，地下情報を反映する高い S/N 比を持つ電磁応答の安定的な取得は困難を伴う。特に直流電化鉄道に代表される電氣的設備から発せられる強大な電磁ノイズ（以下，「人工ノイズ」と呼ぶ）は，電場と磁場に高い相関度をもって混入する「コヒーレントノイズ」であるため，自然電磁場との区別が付きにくく，微弱な自然電磁場を覆い隠してしまう。観測電磁場応答の品質が大幅に低下すると，逆解析及び地下構造解釈に耐えうるデータ数の不足を招く。MT 法において，上記のような人工ノイズの影響の低減の試みは数多く報告されてきたが，要求される計算設定の恣意性や煩雑さがあることや，人工ノイズの形状や振幅等にノイズ低減の効果が左右されやすい点が依然課題として残る。これらの課題を解決するため，本研究では，高品質な自然電磁場の応答を安定的に取得可能な独自の手法を開発した。対象とする周波数帯域は，MT 法で測定・解析対象となり，主に太陽の黒点活動に起因する概ね 0.001 Hz - 数 Hz の範囲とする。開発手法は，ウェーブレット変換に基づく高精度なスペクトル変換と，独立成分分析に基づく人工ノイズ低減を両輪とする。

本論文は 6 章から構成されており，以下に各章の概要を述べる。

第 1 章は序論であり，近年の地下深部構造調査の動向とその社会的重要性について述べるとともに，MT 法探査の有効性と観測データの品質に関する問題点についてまとめた。また，それらを踏まえ，本研究の目的について述べた。

第 2 章では，MT 法探査の概要として，その歴史，原理及び測定における手順についてまとめた。MT 法では，取得された電場と磁場の周波数スペクトルを線形結合させるインピーダンスに地下の情報が集約される。そのため，電磁場の時系列を周波数ごとのインピーダンスに変換し，それらから見掛比抵抗・位相曲線（以下，「探査曲線」と呼ぶ）を求める一連の観測データ処理の概要を述べた。

第 3 章では，MT 法の観測データ処理に関する既往技術についてまとめた。

電磁場の時系列のスペクトル変換に関しては，時系列を複数の小区間に分割しそれぞれの区間でスペクトルを求める短時間フーリエ変換（STFT）が広く使用されてきた。連続ウェーブレット変換（CWT）は，STFT の窓関数に相当するウェーブレットを拡張することで，周波数に応じて時間・周波数分解能を柔軟に変化させようとする。処理の対象の信号の各時間及び周波数の情報を精度良く求めるためには，ウェーブレットの形状を決定する基底関数やパラメータを適切なものに設定する必要があるが，時系列からスペクトルに変換する際の数値誤差が MT 法データ処理結果に与える影響について詳細に検証された例は無い。

さらに，観測電磁場の自然信号とノイズへの数学的分解に基づいた MT 法データの S/N 比改善方法が，近年盛んに報告されている。特に観測値を分解して得られる分離信号の数学的独立・無相関性に基づいて，源信号を推定する独立成分分析（ICA）は，自然信号やノイズが混合した MT 法データの処理方法として有望とされる。その際，経験的なパラメータ設定に依存せず，自然信号とノイズの応答を安定的に識別することが望ましい。さらに，観測電磁場を分解して得られる分離信号からノイズの成分を差し引く際，ノイズの値の取りこぼしや除去すべきでない自然信号の値の損失が生じると，真の自然電磁場応答の導出に失敗する。

第 4 章では，CWT に基づいた MT 法における高精度なスペクトル変換方法を提案した。まず，人工ノイズの影響が小さい高品質な探査曲線（以下，「基準曲線」と呼ぶ）を有する鹿児島県内の実データに，CWT を適用した。それにより，CWT に基づくデータ処理で得た探査曲線は STFT による曲線に比べて，値のバラつきやエラーバーが小さくスペクトル変換に伴う数値誤差を抑えやすいことが判った。そして，連続性が高く地下の情報を良く反映する見掛比抵抗・位相曲線を与える，ウェーブレットの基底関数とパラメータの範囲を提案した。提案する計算設定による CWT の有効性は種々の実データを用いた検証によって示された。特に観測データの S/N 比が低い場合には，従来手法である STFT に対する優位性が明瞭に認められることが示唆された。

第 5 章では，周波数領域独立成分分析（FDICA）に基づいて開発した人工ノイズの低減手法について述べた。まず，第 4 章で提案した計算設定の CWT から得

た周波数ごとの観測電磁場に対して、FDICAを適用する。出力される分離信号において、自然信号及びノイズに相当する成分を、観測点のノイズの影響を受けない参照点における磁場を用いて定量的に判定する。そしてノイズを多く含む分離信号成分に対して最大6通りのノイズ減算を試行する。それらによる観測電磁場の再構成結果を比較し、自然電磁場の特徴を最も良く表す結果を与える減算方法を採用する。MT応答関数は時間領域で定常的な変動を示し周波数領域で滑らかに推移するため、こうした電磁場応答関数の連続性に関する評価関数を導入し、最適なノイズ減算方法を判断した上で、観測電磁場を再構成する。

高品質な鹿児島県内の実データにコヒーレントノイズを模した波形を加算した時系列を用いて、開発手法及びFDICAに基づく既存手法の性能を比較した。その結果、高速不動点法によるアルゴリズムを使用する開発手法は、自然勾配法を用いる既存手法の半分未満の時間でICAの高速な収束を達成できた。また、開発手法によるデータ処理結果は大部分の周波数でエラーバーが小さいことに加え、ノイズ加算前の元の探査曲線との乖離度の評価により、ノイズの影響を既存手法の1/5以下に低減できた。さらに、長野県内の直流電化鉄道区間周辺における実データにも開発手法を適用した。その結果、直流電化鉄道のノイズの影響である見掛け抵抗の単調増加や位相の 0° への漸近が顕著に抑制され、かつ約0.005 Hz以下の帯域を除いてはエラーバーが小さく滑らかな探査曲線を得ることができた。

第6章は結言と提言であり、本研究で得られた成果をまとめた。第4章で提案したウェーブレット変換の適用方法は、時間・周波数両領域での分解能の両立により自然電磁場の真値を良く反映した電磁場応答を与え、特に観測データのS/N比が低い場合にその優位性を示しうる。第5章における独立成分分析に基づくノイズ低減手法は、観測電磁場の高速な分解、自然信号とノイズの堅牢な識別及びノイズの減算の最適化を実現するものである。開発手法は一部の周波数ではノイズ低減性能が十分ではないものの、MT法データの数値実験を通じて既存手法に対する優位性を確認でき、さらには、S/N比が極めて低い市街地近傍の実データに対する有効性も認められた。今後はMT法実データへの適用事例を積み重ね、データ解析手法として確立することが重要である。

一連のデータ処理・数値計算プログラムの独自開発と数値実験による検証評価、そしてS/N比が低い国内市街地近傍データでの有効性の確認という本研究の成果は、地下深部の情報を持つMT法における電磁場応答を高精度に推定可能で、資源及び防災分野で需要が高まる地下深部構造調査へのMT法探査の適用可能性の拡大に資することが期待できる。以上を踏まえ、本論文は博士（工学）に値すると考えるものである。

2023年7月

審査委員

主査 早稲田大学創造理工学部准教授

Ph. D. (ユタ大学)

上田 匠

副査 早稲田大学創造理工学部教授

Ph. D. (テキサス大学)

栗原正典

副査 早稲田大学創造理工学部教授

Ph. D. (テキサス大学)

古井健二

副査 東京工業大学科学技術創成研究院教授

博士 (理学) (東京大学)

小川康雄
