

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

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

2022年11月

地下数 km～数十 km といった地下深部の構造の調査は、未活用のエネルギー資源の調査や自然災害の予測の観点から、日本国内において近年重要性を増している。カーボンニュートラル実現に向けて期待が寄せられる地熱発電事業においては、超臨界地熱流体が高いエネルギーを持ち、国内の地熱発電容量を従来の数十倍以上にできると考えられている。今後探査・開発技術の確立により、地下 4 km～5 km 程度の領域に推定される超臨界地熱流体の詳細な賦存状態の解明が求められる。また、火山地域直下の深度数 km～数十 km の構造から火山性流体や部分熔融域の分布を推定することは、マグマの活動の監視や火山噴火予知の観点で肝要である。さらに、プレート運動に起因して地下数十 km の領域から上昇する流体が地震・断層活動に関与する可能性が指摘されているため、過去の地震発生地域での調査事例を蓄積することが望まれる。

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として、地磁気地電流 (MT) 法電磁探査が挙げられる。MT 法は、太陽の黒点活動に起因する自然電磁場を観測対象とする。大地に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唯一の手法という優位性から、MT 法探査は今後一層推進されることが期待できうる。その一方で、「できるだけ誤差が小さく、信頼性の高い自然電磁場の応答の安定的な取得」は、長年の切実な課題である。特に直流電化鉄道に代表される電气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、電場と磁場の両方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つきにくいことに加え、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 (S/N 比) 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が不足してしまう。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性能が左右されることが多い点が依然課題として残る。本研究では、高精度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、地磁気脈動を発生源とし地下深部まで浸透する ULF 帯に相当する、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 法電磁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 法電磁探査の概要として、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、一般に観測データの

解釈や品質の評価は周波数領域で行う。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、さらに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について述べた。

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。STFTの窓関数に相当するウェーブレットを周波数に応じて拡張可能である連続ウェーブレット変換（CWT）は、新しいスペクトル変換手法としてMT法における有効性が報告されている。しかし、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には任意性がある。そのため、不適切なCWTの計算設定により自然電磁場の真の応答から乖離したスペクトルの値が算出されてしまう可能性があるが、時系列から周波数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）については、複数の種類の信号から構成されるMT法データの処理方法として有望とされる。しかしその際、経験的なパラメータ設定に依存せずに、自然信号とノイズによる応答を安定的に識別することが望ましい。それに加え、観測電磁場を分解して得られる分離信号からの値の減算が不適切な場合には、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につながり、真の自然電磁場応答の導出に失敗してしまう。

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十分に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探査曲線を与えるる、ウェーブレットの基底関数とパラメータについて検証した。その結果、基底に正弦波成分を含み6以上10未満の次数を持つ複素Morlet関数を用いた時、基準曲線からの二乗平均平方根偏差が最小となる高品質な探査曲線を得たため、これらをCWTの最適な計算設定として提案した。さらに、直流電化鉄道区間からの漏洩電流の影響を受けたS/N比が低い和歌山県内の実データを用いた検証も行った。その結果、当該観測点では、提案した計算設定のCWTによる探査曲線の品質向上がより顕著に認められた。S/N比が低い観測データにおいては、ノイズの数値誤差と自然信号の数値誤差との間の相互パワースペクトルが無視できず、多くの回数のスタッキングでもその影響を低減しにくいことを考察している。

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方法について述べた。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の各成分の S/N 比を、観測点のノイズの影響を受けない遠方の参照点における磁場を用いて定量的に判定する。参照磁場との相互パワースペクトルと自己パワースペクトルとの比が大きい 2 成分を東西及び南北方向の地磁気変動による自然信号が多い成分、比が小さい残りの成分をノイズが多い成分と推定できる。そして、ノイズが最も多い成分に対しては全てまたは中央値を超える値を除去し、ノイズを含む他の成分に対しては同様の減算または全ての値の保存を行うことで、分離信号に対する最大 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。水平電場と磁場の比によって電磁場応答関数を考える時、それらは 10 数時間の時間スケールではほぼ一定値を示し、周波数方向では滑らかに推移する。こうした時間・周波数両領域における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、観測電磁場を復元する。

第 4 章でも用いた鹿児島県内の実データにコヒーレントノイズを模したノイズ波形を加算して作成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、開発手法を適用して得られた探査曲線は、大部分の周波数でエラーバーが小さく、基準曲線からの二乗平均平方根偏差が最小となった。さらに、長野県内の市街地近傍で取得された S/N 比が低い実データにも、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として典型的な見掛比抵抗の単調増加や位相の 0° への漸近がほとんど認められず、かつ $0.001 \text{ Hz} - 0.005 \text{ Hz}$ 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 章は結論であり、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方法は、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 法データの数值実験を通じて既存手法に対する優位性を確認でき、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。以上のことから、本研究の成果は、地下深部の情報を持つ MT 信号の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うる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 小川 大輝

印

(2023年 7 月 13 日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
筆頭論文(筆頭, 査読有り)	<p>OA novel method for processing noisy magnetotelluric data based on independence of signal sources and continuity of response functions, Journal of Applied Geophysics vol.213, 105012, 2023.3, <u>Hiroki Ogawa</u>, Koichi Asamori, Tateyuki Negi and Takumi Ueda</p> <p>OMT法時系列データ処理における連続ウェーブレット変換の最適な計算設定の提案, 物理探査 75, 38-55, 2022.5, <u>小川大輝</u>, 濱 友紀, 浅森浩一, 上田 匠</p>
講演論文(筆頭, 査読有り)	<p>ONumerical experiment for processing noisy magnetotelluric data based on independence of signal sources and continuity of response functions, Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium, 51-54, 2021.11, <u>Hiroki Ogawa</u>, Koichi Asamori and Takumi Ueda</p>
講演論文(筆頭, 査読無し)	<p>○連続ウェーブレット変換と独立成分分析による地磁気・地電流データの品質改善方法, 物理探査学会学術講演会講演論文集 139, 137-140, 2018.10, <u>小川大輝</u>, 浅森浩一, 濱 友紀</p> <p>OMT法時系列データ解析への連続ウェーブレット変換の導入に関する一考察, 物理探査学会学術講演会講演論文集 138, 207-210, 2018.5, <u>小川大輝</u>, 浅森浩一, 濱 友紀</p>
口頭発表(筆頭, 査読無し)	<p>○地磁気・地電流データに含まれる電磁場コヒーレントノイズの除去に関する数値実験, 地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会 146, R003-P01, 2019.10, <u>小川大輝</u>, 浅森浩一, 濱 友紀</p>
その他(査読無し)	<p>1997年鹿児島県北西部地震震源域における広帯域MTデータの1次元解析, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SEM14-P19, 2023.5, 松永佳大, 相澤広記, <u>小川大輝</u>, 宇津木充, 吉村令慧, 山崎健一, 内田和也(口頭発表(共著))</p> <p>宮崎平野及びその周辺におけるS波偏向異方性の推定, 日本地球惑星科学連合2022年大会, SSS08-P03, 2022.5, <u>小川大輝</u>, 平塚晋也, 浅森浩一, 島田耕史(口頭発表(筆頭))</p> <p>南九州せん断帯におけるGNSS観測(第5報), 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG50-P04, 2021.5, 渡部 豪, 浅森浩一, 島田顕臣, 雑賀 敦, <u>小川大輝</u>, 梅田浩司, 後藤 翠, 島田耕史, 石丸恒存(口頭発表(共著))</p> <p>南九州せん断帯におけるGNSS観測(第4報), JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS14-P23, 2020.7, 渡部 豪, 浅森浩一, 島田顕臣, <u>小川大輝</u>, 雑賀 敦, 梅田浩司(口頭発表(共著))</p> <p>九州南部のせん断帯におけるGNSS観測(第3報), 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS16-P22, 2019.5, 渡部 豪, 雑賀 敦, 浅森浩一, <u>小川大輝</u>, 島田顕臣, 梅田浩司(口頭発表(共著))</p> <p>石灰石鉱山における亀裂調査のための物理探査手法の検討, 物理探査学会学術講演会講演論文集 135, 232-234, 2016.10, 横井浩一, 手島 稔, <u>小川大輝</u>, 松隈勇太, 雨宮 裕, 幕内 歩, 山下善弘, 谷口秀平(講演論文(共著))</p> <p>新潟県十日町市における泥火山を対象とした物理探査, 物理探査学会学術講演会講演論文集 129, 279-282, 2013.10, 陶 菜, <u>小川大輝</u>, 中山圭子, 斎藤 章(講演論文(共著))</p> <p>CCSにおけるCO₂挙動のTDEM法を用いたモニタリング, 物理探査学会学術講演会講演論文集 129, 242-245, 2013.10, <u>小川大輝</u>, 中山圭子, 斎藤 章(講演論文(筆頭))</p>