

# マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく 電磁探査 2次元インバージョン結果の誤差評価

後藤忠徳\*・小路久穂\*

## Error evaluation of two-dimensional inversion result by electromagnetic survey using Markov Chain Monte-Carlo method

Tada-nori Goto\* and Hisanori Koji\*

\*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, E-mail: goto.tadanori.8a@kyoto-u.ac.jp

キーワード：比抵抗構造, 地磁気地電流法, マルコフ連鎖モンテカルロ法

Key words: Resistivity Structure, magnetotellurics, Markov Chain Monte-Carlo method

### 1. はじめに

電磁探査法は非破壊で地下の比抵抗構造を可視化する物理探査法の一つであり、資源探査や活断層調査等に用いられている。近年は特に、装置の簡便さや、探査深度の深さなどから、地磁気地電流法 (Magnetotelluric 法; MT 法) による探査が盛んになされている。MT 法で得られる観測値 (見掛比抵抗・位相など) に対して逆解析 (インバージョン) を行うことで、地下比抵抗構造を決定できる。

MT 法などの電磁探査で得られる比抵抗モデルは、測定時の電磁ノイズや、インバージョンを行う上での諸制約のために、真の比抵抗構造とは一致しない。従って、推定された比抵抗構造の信頼性の議論が必要となる。従来の研究では、得られた比抵抗モデルの一部を変化させた時に観測値が変化する度合いを調べ (感度チェック)、これに基づいて比抵抗モデルの妥当性を議論している (例えば Goto et al., 2005)。しかし、この方法は定性的であるといえる。

本研究では、従来法とは異なり、比抵抗モデルの定量的かつ客観的な誤差評価方法の開発を目指す。ここでは、定量的な感度検定方法として、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) を用いることとした。本手法は近年、物理探査の精度推定に用いられており、例えば Oh and Kwon (2001) では電気探査へ適用を試みている。また山中(2013)は、地震探査 (微動探査) に MCMC 法を適用し、地層の S 波速度や厚さの平均値や標準偏差を求めている。

MCMC 法を電磁探査のインバージョンに適用する場合、比抵抗モデルの未知数の多さが問題となる。例えば、ある測線沿いに実施した電磁探査に基づいて、測線下の断面図 (2次元比抵抗モデル) を得るためには、地下を水平・鉛直方向へ細かく分割し、各小領域の比抵抗値を求める必要がある。このときの未知数は数万個に及ぶが、MCMC 法では計算時間の制約から、全ての未知値を安定して求めることは困難である。既往研究では、MCMC 法に平滑化制約を導入してこの問題を解決した例も見られるが (Chen et al., 2012; Rosas-Carbajal et al., 2013)、平滑化の程度によって得られる解の平均値や標準偏差は大きく異なることが報告されている。そこで本研究では、主成分分析を用

いて比抵抗モデルのパラメータ数を低減し、これに対して MCMC 法を適用するアルゴリズムを提案する、

### 2. 手法

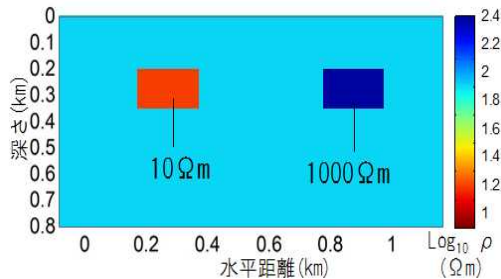
本研究での比抵抗モデルの誤差評価法は次のようである。第1段階として、(MCMC 法ではなく) 従来型のインバージョンを用いて最適な比抵抗モデルを得る。ここでは ABIC 最小化法に基づき平滑化の程度を決定できる 2次元インバージョンコード (Uchida, 1993) を用いる。第2段階として、インバージョンで得られた 2次元比抵抗モデルを 1枚の画像と捉えて主成分分析を行う。モデル中の主な比抵抗異常体は、寄与率の大きな主成分に反映されていると考えられる。つまり、主成分情報の一部を用いればモデルの特徴的構造の抽出が可能となり、比抵抗モデルのパラメータの削減につながる。第3段階では、抽出された主な比抵抗異常体に対して MCMC 法を適用する。メトロポリス・ヘイスティング法に従って、乱数によって異常体の比抵抗を定数倍し、新たな比抵抗モデルのサンプリングを繰り返す。このサンプル群から、異常体の比抵抗値の平均値・最頻値・標準偏差を算出することができる。

本提案法の妥当性を検証するため、仮想的な比抵抗モデルから得られる合成データ (MT 法の TE モードでの見掛比抵抗・位相) に対してインバージョンを行い、得られた比抵抗モデルの信頼度評価を行うこととした。例えば、第1図のような 2つの異常体が埋没しているモデルを用意する。これから得られる合成データに対して、主成分分析によって比抵抗異常体の抽出が可能かを確認し、さらに MCMC 法によって異常体の比抵抗値の誤差推定が可能かどうかを検討した。

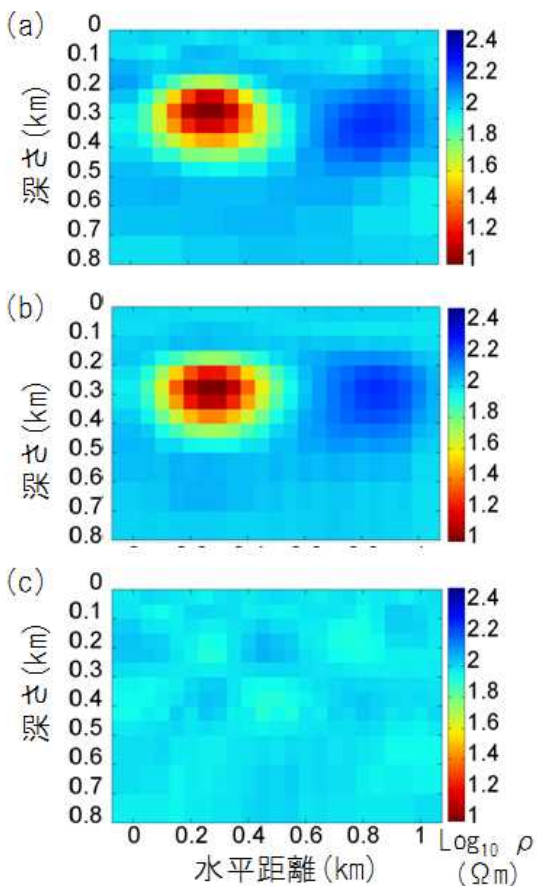
### 3. 結果および考察

簡単な比抵抗モデルに対しては、本提案手法によって、比抵抗異常体の推定誤差評価を行うことができた。まず、図1に示した比抵抗モデルに対して主成分分析を行った結果を図2に示す。第1・2主成分のみで 2つの異常体の抽出が可能となっている。次に、MCMC 法を適用し、低比

抵抗・高比抵抗異常体の比抵抗値についてサンプリングを行った。第3図にその頻度分布を示す。従来型インバージョンで求められた比抵抗値は、MCMC法でサンプリングされたモデル群の最頻値近傍に位置することが第3図から分かる。すなわち、MCMC法での最適解と、インバージョンで得られた最適解が概ね一致することが示された。



第1図 仮定した地下比抵抗モデル

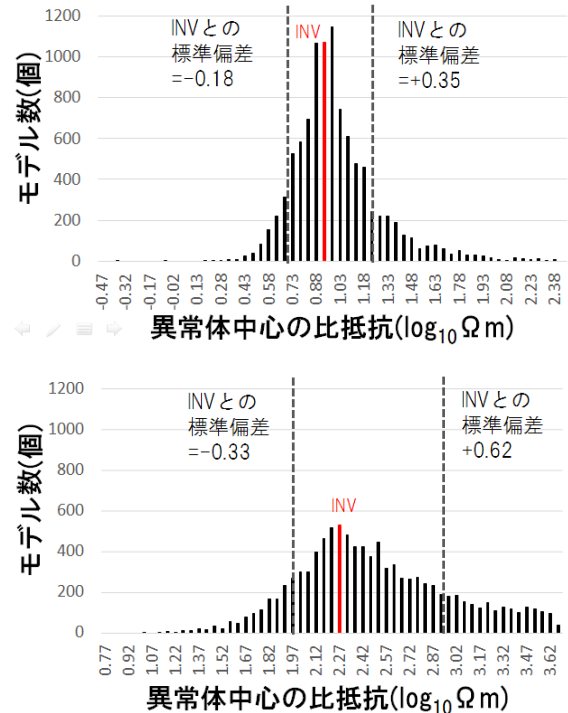


第2図 (a)従来のインバージョン法で得られた比抵抗モデル。  
(b) (a)のモデルのうち、第1・第2主成分のみを重ね合わせて表示。  
(c) (a)のモデルのうち、第1・第2主成分以外の成分を表示。

低比抵抗体・高比抵抗体の比抵抗値の推定精度を定量化するため、各々の比抵抗値の分散に注目する。第3図では、最頻値を中心として、グラフの左側および右側で頻度分布は非対称である。そこで、最頻値の左側・右側別々にガウス分布を仮定して、標準偏差を求めた(第3図中に表示)。これらからは、低比抵抗体の比抵抗値のほうが、高比抵抗体よりも標準偏差の幅が小さいことが示された。すなわち、低比抵抗体のほうが精度良く決定できている様子が示唆される。高比抵抗体については、最適解の4倍程度高い比抵抗値であっても標準偏差の範囲内であった。一般に、MT

法では高比抵抗異常体よりも低比抵抗異常体の決定精度が高いことが知られている。第3図の頻度分布の特徴は、このMT法の一般的な特徴と矛盾しない結果となった。

本研究では、より複雑な比抵抗モデルに対しても同様の数値実験を行ったが、本提案手法が比抵抗構造の推定精度評価に有効であることが示された。今後は比抵抗値以外のパラメータ(異常体の位置や幅など)の誤差評価を試みるとともに、実データへの適用を行う予定である。



第3図 低比抵抗体(上)および高比抵抗体(下)の比抵抗値を変化させた場合に、得られたサンプルの頻度分布

## 文 献

- Chen, J., Hoversten, G. M., Key, K., Nordquist, G., and Cumming, W. (2012). Stochastic inversion of magnetotelluric data using a sharp boundary parameterization and application to a geothermal site. *Geophysics*, 77(4), E265-E279.
- Goto, T., Y. Wada, N. Oshiman and N. Sumitomo (2005), Resistivity structure of a seismic gap along the Atotsugawa Fault, Japan, *Phys. Earth. Planet. Int.*, 148, 55-72.
- Oh, S. H., and Kwon, B. D. (2001). Geostatistical approach to Bayesian inversion of geophysical data: Markov chain Monte Carlo method. *Earth, planets and space*, 53(8), 777-791.
- Rosas-Carbajal, M., Linde, N., Kalscheuer, T., and Vrugt, J. A. (2013). Two-dimensional probabilistic inversion of plane-wave electromagnetic data: methodology, model constraints and joint inversion with electrical resistivity data. *Geophysical Journal International*, 196(3), 1508-1524.
- Uchida, T. (1993). Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 45(9), 841-858.
- 山中浩明. (2013). マルコフ連鎖モンテカルロ法による表面波の位相速度の逆解析. *物理探査*, 66(2), 97-110.