

シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法の開発

石須慶一*・後藤忠徳**・深畑幸俊***・小池克明****・Chatchai Vachiratienchai^{*5}・Weerachai Siripunvaraporn^{*6}

Development of an inversion method for reproducing subsurface resistivity structures with sharp discontinuous boundaries

Keiichi Ishizu*, Tada-nori Goto*, Fukahata Yukitoshi***, Katsuaki Koike***, Chatchai Vachiratienchai^{*5} and Weerachai Siripunvaraporn^{*6}

*九州大学工学研究院 Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka, 819-0395, Japan. E-mail: ishizu@mine.kyushu-u.ac.jp

**兵庫県立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, University of Hyogo, 2167, Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280 JAPAN.

***京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan.

****京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8540, Japan.

*5Curl-E Geophysics Co., Ltd., Nakhon Pathom, Thailand.

*6 マヒドン大学理学部 Faculty of Science, Mahidol University, Rama VI Rd., Rachatawee, Bangkok 10400, Thailand.

キーワード：逆解析，シャープ境界，比抵抗，電気探査

Key words：Inversion, Sharp boundary, Resistivity, Direct current resistivity survey

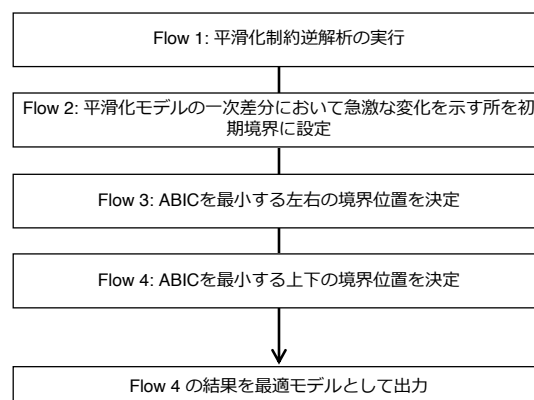
1. はじめに

電気探査は、直流電流を用いた電位差測定によって地下比抵抗構造を把握するための技術である。比抵抗は流体、粘土、金属に敏感な物性値のため、電気探査は土壌特性、地下水、海水侵入、埋立地、火山構造、地滑り、空洞などの調査に広く活用されている。電気探査逆解析では、測定データとモデルから計算されたデータとの残差を最小化することで地下比抵抗構造を推定する。電気探査の逆解析は悪条件問題のため、平滑化制約を適用し、安定した解を得ることが通常行われる。しかし、平滑化制約は隣合うモデルパラメータが滑らかに変化するという条件を課すため、比抵抗分布が直線的に不連続となる境界（以下シャープ境界）を含む地下比抵抗構造を正しく再現できない。このような問題のため、地質境界、人工物、金属鉱床などのシャープ境界を示す対象物への探査精度が低かった。本問題を解決するため、シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法を開発する。具体的には、平滑化制約をシャープな境界が予測される場所で弱め、この最適化を Akaike Bayesian Information criterion (ABIC)を用いて行うアルゴリズムを提案する。本発表の内容は、Ishizu et al. (2025)で発表された内容に基づいている。

2. 手法

シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法 (SBI: sharp boundary inversion) について述べる (第1図)。SBIでは、まず従来法である平滑化制約逆解析を行い、滑らかな比抵抗モデルを推定する (Flow 1)。この滑らかな比抵抗モデルに関して一次差分を計算し、急

激な変化を示す所を初期境界に設定する (Flow 2)。この初期位置から探索を開始し、ABICを最小化する左右の境界位置を決定する (Flow 3)。Flow 3で決定した左右の位置を固定し、ABICを最小化する上下の境界位置を決定する (Flow 4)。Flow 4で得られた結果を最適モデルとして出力する。



第1図 SBI アルゴリズムの概要 (Ishizu et al., 2025 を改変)。

3. 仮想・野外データへの適用結果

開発した SBI アルゴリズムの有効性をシャープ境界を含む仮想比抵抗モデルを用いて検証する。仮想モデルは 10 ohm-m の低比抵抗異常体が 100 ohm-m の半無限媒質中に存在するモデルを仮定する (第2図 a)。低比抵抗異常体は、地下に埋没している人工物を模擬している。データ取得は、2m の電極間隔のダイポールダイポール配置を用いた 54m のプロファイルで行われ、合計 172 データポイントを取得

したものとする。第2図aのモデルから順解析を行い得られたレスポンスに2%のガウシアンノイズを加えて仮想データを作成した。まずは、従来法である平滑化制約逆解析を用いた結果を示す(第2図b)。人工物は滑らかな比抵抗分布として再現され、実際のシャープ比抵抗境界は再現できていない。一方で、SBIでは人工物の真の境界位置と同じ場所にシャープ比抵抗境界を再現できた(第2図c)。これは平滑化制約を真のシャープ境界位置で弱めることで、ABICが最小値を示したことに起因する。

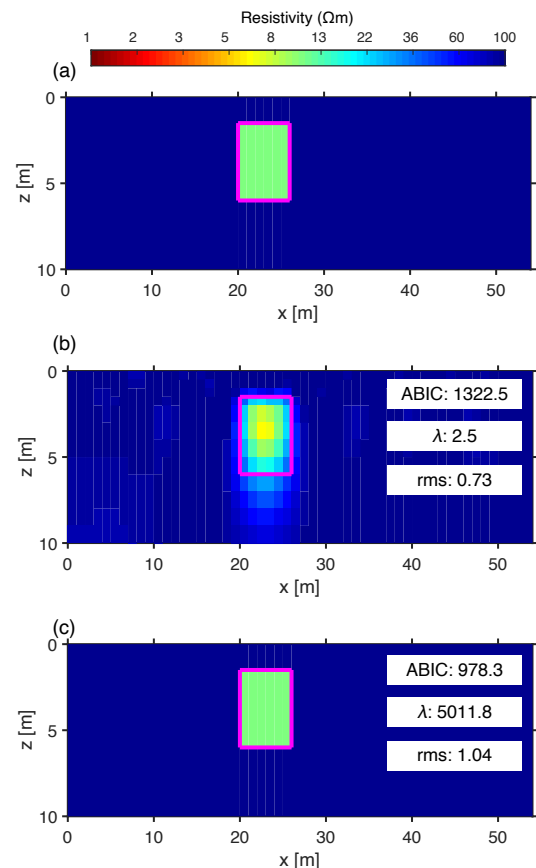
SBIを野外データに適用し、野外環境での適用性を実証する。探査対象は、枠が金属で形成された人工物のトンネルである。仮想データと同じく2mの電極間隔のダイポールダイポール配置を用いた54mのプロファイルでデータ取得が行われた。平滑化制約逆解析の結果、トンネルが滑らかな分布を持つ比抵抗構造として再現された(第3図a)。一方、SBIの結果では、シャープな境界が再現され、設計図を基に知られているトンネルの水平位置と整合的な結果が得られた(第3図b)。この結果は、実際の野外環境においてもSBIがシャープな比抵抗構造再現できることを示している。

4. おわりに

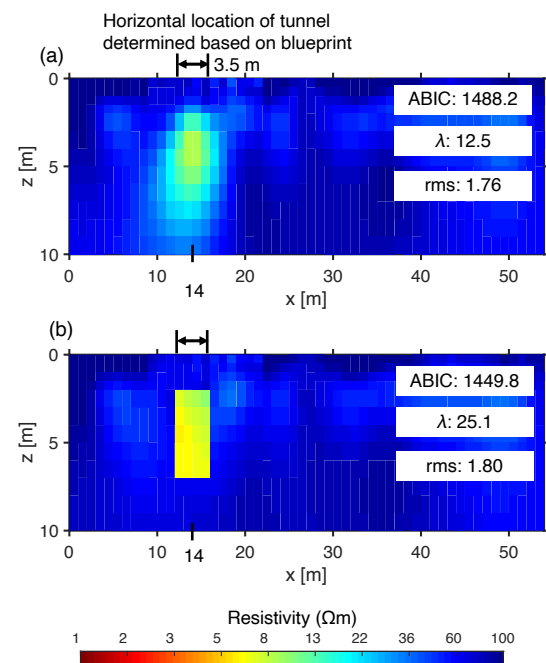
シャープ不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現できる逆解析法(SBI)の開発を行った。シャープな不連続境界を再現することは、地質境界、人工物、金属鉱床などの探査精度向上に必要である。SBIは平滑化制約をシャープ境界が予想される場所で弱め、この最適化をABIC最小化で行うという手法である。仮想データを用いた実験により、SBIでは人工物の真の境界位置と同じ位置にシャープ比抵抗境界を再現できることが示された。一方、従来法である平滑化制約逆解析では、人工物の境界は滑らかな比抵抗分布として再現され、シャープ比抵抗境界は再現できていない。SBIを野外データに適用した結果、トンネルのシャープ境界を再現でき、その境界位置は設計図で知られている位置と整合的であった。SBIは、境界位置を解析者が他の先験情報から決めることなく、データ駆動型の方法で決定できるため、多くのデータに適用できる可能性がある。また、SBIは電気探査のみならず、重力探査、磁気探査など多くの物理探査データ逆解析に応用可能であり、実装も比較的容易であるという高い汎用性も有する。

文 献

Ishizu, K., Goto, T. N., Fukahata, Y., Koike, K., Vachiratienchai, C., & Siripunvaraporn, W. (2025). Inversion algorithm determining sharp boundaries in electrical resistivity tomography, *Geophysics*, 90, WA221-WA233.



第2図 仮想データによる検証実験 (Ishizu et al., 2025 を改変)。(a) 真のモデル。本モデルは、10 ohm-m の低比抵抗異常体が 100 ohm-m の半無限媒質中に存在するモデルを仮定する。(b)平滑化制約逆解析の結果。(c) SBI による最適結果。マゼンタの線は、人工物の真の境界を示す。



第3図 野外データによる検証実験 (Ishizu et al., 2025 を改変)。(a) 平滑化制約逆解析による結果、(b) SBI による最適結果。黒の矢印は、設計図から知られている人工物の真の境界を示す。