

学 位 論 文 題 名

線電流源を使った比抵抗トモグラフィの基礎的研究

学位論文内容の要旨

近年、コンピュータを使った比抵抗探査の逆解析法が実用化され、任意の電極配置のデータを処理することが可能となったため、ボーリング孔を使った比抵抗探査すなわち比抵抗トモグラフィが実現した。比抵抗トモグラフィは、探査領域の比抵抗分布を極めて精度よく把握できる手法であり、地下の断層や変質帯の分布、地下の含水状態や温度分布に関する有益な情報を提供してくれる探査手法であるが、鋼ケーシングの入ったボーリング孔では適用できないため、1km以上の地下深部や大規模な破碎帯における実施は難しい。

本研究では、地下深部や大規模な破碎帯の調査にも適用できる探査法として、ケーシングやロッドを線電流源として使う新しいタイプの比抵抗トモグラフィ法を考案し、そのための測定法および解析法を検討した。

測定法に関する検討では、線電流源を使った従来の探査法（流電電位法）の欠点、すなわち深度方向の分解能が低いことに対処するため、線電流源の挿入深度を変えて多くの電極配置で測定データを取得する方法を考案した。固定したケーシングを電流源とする従来の流電電位法では、1層あるいは2層構造程度の解析が限度であり、水平方向の比抵抗分布を把握するにとどまっていたが、種々の線電流源深度のデータを取得する方法によって、水平方向ばかりでなく深度方向を含めた2次元的な比抵抗分布を精度よく求めることが可能になった。

解析法に関する検討では、線電流源上の電流密度が一定と仮定した従来の解析方法が不均質媒質中の計算には適用できないことを指摘し、これに代わる等価散乱ソース法を新たに考え出した。この方法は、2.5次元FEMモデルの中に存在する線電極を一つの散乱体として考え、線電極上の節点に散乱電流に相当する等価散乱ソースを配置することによって、線電極の影響を考慮するものである。等価散乱ソースの強度は1次元FEMの方程式によって与えられるため、電流密度が一定というような根拠の曖昧な条件を用いる必要がない。

等価散乱ソース法の精度を検討する目的で、均質媒質中および水平多層構造中の線電流源に対するシミュレーションを実施した。均質媒質に対するシミュレーション結果によると、線電極上の電流密度は厳密には一定ではなく、電極先端部において電流が集中する傾向が見られた。この現象は、有限な径の円筒電極に特有の現象であり、線要素を用いた等価散乱ソース法の解析は、理想的な線電極ではなく、有限な径を有する電極に対する電流分布を与えることが明らかにされた。また、このときの電極径（等価電極径）は、①FEMモデルの要素サイズや要素形状などに依存し、さらに②接地抵抗を与えることで任意に調節できることが示された。次に、水平多層構造中に対するシミュレーションでは、電極上の電流密度が地層比抵抗と反比例することが明らかにされた。これは、理論的な検討結果とも一致しており、等価散乱ソース法は不均質な比抵抗構造に対しても精度よい電流分布を与えることが示された。

次に、本研究で考案した線電流源トモグラフィの測定法の有効性および等価散乱ソース法を使ったトモグラフィ解析の適用性を検討する目的で、模擬データを使ったシミュレー

ション・テストを行った。検討したモデルは、①3孔の鉛直ボーリングによる地盤調査を想定したモデルと、②斜めボーリングによる断層調査を想定したモデルである。線電流源トモグラフィを想定した電位シミュレーションを実施し、その結果を模擬データとして逆解析に使用した。等価散乱ソース法を使ったトモグラフィ解析の結果、いずれのモデルについても、もとのモデルをよく再現した比抵抗断面が得られ、線電流源を使った比抵抗トモグラフィの有効性が示された。比較のため、電流密度を一定と仮定した従来の電位計算法を使ったトモグラフィ解析を行ったところ、解が発散し、もとのモデル構造をまったく再現しないことが判明した。このことは、線電極に対する従来の電位計算法がトモグラフィ解析には使えないことを示している。また、地表探査を想定したシミュレーション結果は、深部の解析精度が低く、地下深部まで精度の高い測定を実施するためには、トモグラフィ配置の探査が必要であることが示された。

線電流源を使った比抵抗トモグラフィは地表からの比抵抗探査にくらべて極めて分解能の高い探査法であり、孔の状態が劣悪な条件下でも比較的測定が容易であるため、従来の点電流源を使ったトモグラフィの適用が困難であった対象にも適用することができる。線電流源トモグラフィの適用対象としては、

- (1) 500m～数kmまでの大深度の調査。
- (2) コントロール・ボーリングや水平ボーリングを使った調査
- (3) 破碎帯などで孔が自立しない場合。
- (4) 地下水位以浅で浮遊型の点電極ケーブルが使えない場合

等が想定される。特に、地球物理学的な大深度の調査では、ボーリング孔の全長にわたってケーシングなしで測定することが難しく、比抵抗トモグラフィを適用した例はほとんどなかった。本研究で提案したケーシングを使った比抵抗トモグラフィではこのような場合にも問題なく適用できるため、将来性のある探査法と考えられる。

最後に、等価散乱ソース法を使ったトモグラフィ解析は、従来の比抵抗探査の精度を低下させていた埋設管やボーリング孔内の泥水の影響を適切に除去することが可能であり、このような用途に対しても効果が期待される。本研究では、地表探査測線の下に埋設された水平埋設管の影響やケーシングの影響、さらに点電流源を使った比抵抗トモグラフィにおける孔内水の影響について、シミュレーションによる検討を加え、これら埋設管や孔内水の影響を適切に除去することによって偽像の少ない精度よい解析断面が得られることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	西 田 泰 典
副 査	教 授	小 山 順 二
副 査	教 授	蓬 田 清
副 査	助教授	笹 谷 努

学 位 論 文 題 名

線電流源を使った比抵抗トモグラフィの基礎的研究

地下の比抵抗は、含水状態、温度、伝導鉱物の分布などに依存するため、重要な地球科学的情報をもたらす。近年コンピュータを使った比抵抗探査の逆解析法が実用化され、任意の電極配置のデータを処理することが可能となった。そのためボーリング孔を使った比抵抗探査(比抵抗トモグラフィ)が可能となった。一般には、電氣的に良導体である鋼ケーシングの入ったボーリング孔ではその方法が適応できないため裸孔を用いているが、地圧の高い地下深部では裸孔が崩壊し実施が困難となる。また裸孔の場合でも、傾斜ボーリングや水平ボーリングでは電極の挿入が困難なため、探査が不可能な場合が多い。

本学位申請論文では、その問題を解決するため、以下のようにケーシングやロッドを線電流源として使う新しいタイプの比抵抗トモグラフィ法を考案し、そのための測定法や解析法を詳細に検討している。

線電流源を使った従来の測定法(流電電位法)では、比抵抗構造の深さ方向の分解能が低いのが一つの欠点であった。申請者は、ケーシング又はロッドを上げ下げして線電流源の挿入深度を変えると同時に、多くの電位受信電極を配置する方法を開発することにより、この欠点を克服している。

さらに従来の流電電位法では、線電流源における電流密度が一定であると仮定していたが、申請者は理論的考察よりその仮定に誤りがあることを見だし、これに代わる等価散乱ソース法を新たに考案している。この方法は、2次元構造をした媒質中に線電流源が分布している、いわゆる2.5次元モデルの中に存在する線電極を一つの散乱体として考え、線電極上の節点に散乱電流に相当する等価散乱ソースを配置することによって、線電極の影響を考慮するものである。等価散乱ソースの強度は基礎的な方程式によって与えられるため、電流密度が一定であるというような根拠の曖昧な仮定をもうける必要がなくなる。

申請者は、均質媒質中および水平多層構造中の線電流源にたいするシミュレーションを行い、独自に考案した等価散乱ソース法の精度や得られた結果の性質を検討している。均質媒質に対するシミュレーション結果によると、線電極上の電流密度は一定ではなく、電極先端部に集中する傾向が見られた。この現象は、有限な径

の円筒電極に特有なものであり、線要素を用いた等価散乱ソース法の解析は、理想的な線電極ではなく、有限な径を有する電極に対する電流分布を与えることが明らかにされた。さらに水平多層構造に対するシミュレーションでは、電極上の電流密度が地層比抵抗と反比例することが明らかにされ、上記理論的考察とも一致することが確かめられた。

次に申請者は従来の方法である、地表探査法と流電電位法との比較において、本研究で考案した線電流源トモグラフィ法の有効性を確かめるため、模擬データを使ったシミュレーションテストを行った。幾つかの構造モデルに対し、いずれも線電流源トモグラフィ法は比抵抗構造決定の精度の高いことが示された。

以上のように、申請者は従来にない新しい原理にもとづいた比抵抗探査法を考案すると同時に、多方面からの注意深いシミュレーションを通じて、その方法が地下比抵抗推定に高い分解能を有することを確認した。この線電流源トモグラフィ法は500～数 km までの大深度に対し、傾斜ないし水平ボーリングや、破碎帯などでボーリング孔が自立しないような、従来極めて実施が困難な場合においても比抵抗探査を可能にしているため、今後の地球科学的研究に資するところ大である。

よって申請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。