

自然岩石試料の電気トモグラフィーに向けた
電流印加表面電位分布の計測手法

鈴木健士

1. 序論

電磁場観測データから地中の比抵抗およびその分布（比抵抗構造）を推定し、その推定された比抵抗が何を反映したものなのかを解釈することで、これまでに多くの地球物理学的知見が得られてきた。解釈のために参照する情報として最も基礎的なものが、岩石の平均的な比抵抗であるバルク比抵抗であり、これまでに多くの岩石種において調べられてきた（例えば、Coster, 1948; Kariya and Shankland, 1983; Fuji-ta et al., 2004; Fuji-ta et al., 2007）。ただし、電磁場観測データから推定される比抵抗は解像可能な空間スケールより小さな構造を複合的に反映したものであり、小さな構造の単純な平均値ではない。そのため、多くの比抵抗構造推定結果の解釈の中でなされている、分解可能なサイズよりも小さな構造に帰着するという議論（例えば、Unsworth et al., 1997; Yamaguchi et al., 2010; Ichihara et al., 2011）の正しさは保証されない。もし、これまでに広く調べられてきた岩石試料全体の平均的な比抵抗だけでなく、試料内部の比抵抗構造を推定することができれば、この問題の答えに迫ることが出来る。なぜなら、実験室スケールで岩石の比抵抗構造を求められれば、それとX線CTイメージなどを対比することで内部構造が比抵抗構造にどのように反映されるのかを確かめられるからである。これはフィールドスケールの比抵抗構造を理解するうえで重要な情報となる。これ以外にも、岩石試料の内部比抵抗構造推定は、圧縮試験中の比抵抗構造を用いた破壊現象・滑りの素過程解明や、深部掘削で得られるコア試料の比抵抗構造を用いた検層データでは識別できていなかった可能性のある細かなクラック・ガウジ層の検出などにも有用であると期待できる。

しかし、岩石のバルク比抵抗の計測例が多いのに対し、比抵抗構造の推定（電気トモグラフィー）の例は極めて少ない（例えば、Borsic et al., 2005; Stacey, 2006）。電気トモグラフィーは、その手順に含まれる技術的制約から、現在は高水分飽和度の高空隙率試料という非常に限定された対象にしか実行できない。制約の中で最も深刻なものが高抵抗試料に対する多点電気計測技術の欠如である。測定上必要な大きな試料サイズによる大きな試料抵抗と、多点計測のための小さな電極がつくる大きな接触抵抗を既往の測定手法で克服することは難しい。これを克服可能な技術を確立できれば、幅広い岩石試料に対する電気トモグラフィーは実現に近づくといえる。そこで、高抵抗試料に対する多点での電気計測を実現する手法を確立すること

を目的として、そのために必要となる数値計算手法を含めて測定システムを設計し、実際に試験的に高比抵抗試料に対する測定を行い、得られた結果を検討することで手法の有効性を評価するとともに、その過程で得られた計測結果の意味を考察した結果をまとめたものが本論文である。

2. 円筒座標系における比抵抗法の3次元モデリング

岩石試料に直流電流を印加し、それによって生じる電位分布から内部比抵抗構造を推定する際に必要となる計算手法の定式化を行った。必要な計算は、岩石コアサンプルに任意の比抵抗構造を設定し、そこに任意の定常電流を印加したときに生じる静電位場の計算である。具体的には、野外探査への適用を目的とする Dey and Morrison (1979)の定式化を円筒座標系へ拡張し、特異となる円筒軸周辺においての計算法を別途新たに提案する形で計算コードを作成した。計算の性能は、新たに確立した取り扱いで計算する円筒軸周辺と、電位の実測定データとの比較の際に重要となる外部境界に注目して、複数の解析解と比較することにより評価した。その結果、誤差0.3%以下という高い精度を達成した計算コードであることを確かめた。電位分布の計測精度を考え、これは目的に対して十分な精度であると評価した。

3. 高接触抵抗・高試料抵抗の岩石試料に対する電気測定手法

高い接触抵抗・高い試料抵抗を有する岩石試料に対しても適用可能な電気測定手法を新たに考案し、具体的な構成を提案した。手法として必要なことは、多測定点による安定した電流印加と電位計測、そして環境に起因するノイズの排除であった。まず、電極に設置の自由度が高い導電性エポキシ樹脂を採用することで、多点での電位計測のために必須の高い接着性を確保した。また、高入力インピーダンスの直流定電流源を用いることで安定した電流印加を実現した。電位計測においては、高入力インピーダンスの電位差計の使用だけでは測定に不具合が生じることを明らかにし、電位測定を負極を電流源の負極と共通化し差動測定を行うことでその問題を解決した。さらに、変圧器を介した電力供給、ガード測定、遠隔自動測定システム、可能な限り計測環境を制御することなどでノイズ低減を行った。

そして、構築した測定手法を実際に高比抵抗試料に適用し、そこから印加電流量・電位計測値の安定性とそこから推定される比抵抗の妥当性を評価した。安定性の評価には、接触抵抗・試料抵抗が特に大きい自然乾燥状態の花崗岩試料(半径26 mm, 高さ100 mm)を使用した。ここではまず、多電極測定に適用可能なサイズ(10 mm × 10 mm)の正方形電極を4つ用いた4端子測定で評価を行った。安定性評価の結果、提案した手法は1 GΩ-数 MΩの試料抵抗と100 GΩ-数10 MΩの接触抵抗をもつ試料であっても、設定値のおよそ7%のばらつきで電流を印加できること、電流印加の制限で信号レベルが低下した測定(温度30°C・相対湿度80%条件下での測定)を除けばおよそ40%のばらつきで電位計測が行えることを確認した。妥当性の検証には、岩

石よりも物性値のばらつきが少ないと考えられる導電性プラスチック試料を使用し、従来の方法（小さなサイズの試料の両端面に面電極を接着するレイアウトでのバルク比抵抗測定）と本研究で提案した手法それぞれで試料比抵抗値を推定し、比較した。岩石試料に相当する高比抵抗な導電性プラスチック試料に対する結果として、その両差は最大で16%しか異なることを確認した。

4. 多電極アレイを用いた電気測定への応用

3章で構築した計測方法を、合計40個の電極で構成される多電極アレイによる測定へ拡張し、電流印加時に測定された試料側面の電位分布の測定を行った。無垢な試料と、推定したい構造として想定する岩石中のフラクチャーを単純・極端化した厚さ1 mmのスリットを組み込んだ試料の2通りの形状の試料に対して測定を行い、試料側面の電位分布の計測精度を検討した。その結果、両試料で、測定された電位分布が理論から期待される電位分布とよく一致することが確かめられた。そして、測定された電位分布と均質モデルを仮定して計算した電位分布の残差のRMSは電位分布の10-20%程度であった。ここには、計測上の誤差と、均質であると仮定した試料に含まれる不均質というモデル誤差の両者が混在し得るが、均質モデルとの残差が高々20%であったということは、これを超える大きな不均質の検出に十分な精度を本手法が備えていることを意味している。

5. 議論

前半では、考案した測定手法の検証・試験の過程において確認された、試料抵抗と電極の接触抵抗が共に高い湿度依存性を示すという結果の考察を行った。後半では、手法を岩石試料の内部に不均質構造をもった試料に適用した場合に、どの程度の検出感度をもつかのケーススタディを行った。

考察ではまず、確認された湿度変化に対する比抵抗の変化は試料表面部のみで起きているものではなく、試料の大部分で起きている可能性が高いことを、簡単な数値実験に基づき指摘した。つぎに、計測例を通じて詳細が明らかになった試料抵抗の湿度依存性について、その原因を考察した。計測結果の検討および水分子の試料内部への浸透の速さの見積もりに基づき、考えられる複数のメカニズムのうち、試料を構成する鉱物への水の気体分子吸着がその主要因であるという結論に至った。

ケーススタディでは、圧縮試験で生じる内部構造を表現する数値モデルを設定し、その構造がつくる電位変化量を積もった。さらに、フラクチャーを表現する形状を、その平面上でいくつか変えて同様の見積もりを行った。そして、見積もられた電位変化量を4章で得られた電位分布の計測精度（計測値と均質モデルとの残差RMS）と比較し、前者が後者を超えるかという指標を以て不均質構造の検出限界を評価した。母岩に対して与える不均質構造の比抵抗は、例えば試料外部まで達する構造の場合、1桁以上の比抵抗コントラス

トがあれば、また試料内部に留まる場合でも2桁の比抵抗コントラストがあれば検出可能であるという見通しを得た。

6. 結論と将来への展望

本研究では、コアサンプルサイズの岩石試料を念頭に、幅広い条件下での電気トモグラフィーに向けて必要となる高抵抗試料に対する多点電気計測手法を考案し、その手法の性能を評価した。精度検証およびケーススタディから検出可能な下限として得られた1-2桁のコントラストは、極端な連結形態やパラメータの値でない限りは生じ得る大きさであり、フラクチャーなどの岩石中の細かな幾何学的構造がそれより大きな比抵抗構造にどう表れるかを調べるという目的で電気トモグラフィーを実施する場合には、本手法は十分な感度を持つと期待される。検出されなかったとしても、その結果から幾何学的構造が持ちうる母岩に対する比抵抗コントラストの上限が抑えられることになるため、クラックの連結性などを検討する際に有用な情報になると期待できる。したがって、計測感度の上では、すでに高比抵抗試料の電気トモグラフィーを実用化できるレベルに達したと評価できる。ただし、様々な対象に対する電気トモグラフィーを実現するためには、今回注力した計測技術に加えて、逆解析をどのような方法で行うのが望ましいかを比較検討し、その手順を確立する必要がある。

深部掘削で得られるコア試料への適用や圧縮試験中の岩石試料に対する電気計測についても、測定性能の評価結果やフラクチャーの検出可能性の評価結果を踏まえると、実現可能性が高まったと言える。また、議論の中で、水分子を含む空気の岩石試料内部への浸透による電位分布の変化を本手法で検出できる可能性が見いだされた。近年、火山活動域で熱活動の消長による火山性ガスの増減が原因で生じたと解釈される比抵抗構造の時間変化例も報告されており、本研究で新たに提案した電気測定手法で気体の流れに伴う岩石試料中の乾燥化・湿潤化の過程をモニタリングできれば、このような推論に対する実験的検証として重要な知見となると期待できる。