

氏名	やま した ふとし 山 下 太
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2620 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	<i>In Situ Earth Resistivity Monitoring as a Probe for Stress Changes in the Rocks</i> (岩盤内の応力変化の探査針としての現場における大地比抵抗モニタリング)
論文調査委員	(主 査) 助教授 柳 谷 俊 教 授 大 志 万 直 人 教 授 町 田 忍

### 論 文 内 容 の 要 旨

断層近傍における応力モニタリングの重要性の観点から、応力変化に敏感に応答する物理量のひとつである岩石の電気的比抵抗に注目し、現場において岩盤の比抵抗を精密かつ連続的に測定できる装置を新たに開発した。そして、応力変化によって作りだされる比抵抗変化を現場において確認する目的と、現場観測を通して、比抵抗モニタリングによる応力モニタリングを実用化に近づける目的で油壺サイトと野島断層サイトの二つのサイトを選び、大地比抵抗変化の観測を行った。これら二つのサイトを選んだ理由は、応力変化の推定が容易で、さらにその変化量が大きいことが予想されたためである。

油壺サイトは海岸から近いこと、海水の満ち引きによる載荷に起因して  $10^{-6}$  オーダーのひずみが日常的に観測されている。また、このサイトの地下水位は、海水位変動に励起されて潮汐周期で変動している。したがって、このサイトで観測されている大地比抵抗の潮汐変動が、応力に起因するのかが地下水に起因するのかが明らかでなく、かねてよりの問題だった。測定は、過去の研究と同様の、地下水位より上の部分飽和している岩盤を主にしている短い測線 (2m の Wenner 電極配置) に加え、水位より下の完全に飽和している岩盤を主にしている長い測線 (10m の Wenner 電極配置) の二つの測線で行った。どちらの測線でも  $10^{-4}$  オーダーの比抵抗の明瞭な潮汐変動をとらえたが、短い測線の比抵抗変動の位相は、海水位 (応力) の位相とも地下水位の位相ともずれを生じていた。精密に議論を行うため、比抵抗、海水位、3成分のひずみ、地下水位変動から  $M_2$ ,  $O_1$  分潮の変動を抽出し、それらの位相の違いをくわしく解析した結果、短い測線の比抵抗変動は、応力変動と地下水位変動のそれぞれが作りだす二つの比抵抗変動の重ね合わせでつくられていることが明らかとなった。一方、長い測線の比抵抗変動は、一義的に応力変動だけに起因していることが明らかとなった。

野島断層サイトでは、2000年に断層近くの地下 540m へ注水が行われた。水は 4.5MPa の圧力で岩盤に注入されたため、注水によって岩盤に新たに圧縮応力が付加され、それにより比抵抗が変化することが予想された。ただし、変化が生じる地下深部をモニターするために、電極間隔を大きくする必要があった。そこで、測定対象の領域を電流を流し込む電極対とそれによって生じるポテンシャルを測定する電極対ではさみこむダイポール・ダイポール配置を採用した。そして二つの電極対を GPS 衛星からの精密な信号をつかうことによりケーブルなしで同期し、位相検波を行う新しい測定装置を製作した。この装置を用い、600m を越えるダイポール・ダイポール測線をはって、これまでに例のない深い領域までの連続的な比抵抗モニタリングを行った。測定の結果、加圧水の注水にとまなうステップ状の約 1% の比抵抗の増加と、それに続く水が徐々に拡散することによる緩やかな比抵抗の減少をとらえることに成功した。この比抵抗の増加量から、野島断層周辺の岩盤の応力変化に対する比抵抗変化の感度を推定したところ、室内実験の結果から推定される値より 3~4 桁大きいことが判明した。この値の違いは、室内実験で使用された無傷な岩石試料に比べ、断層周辺の岩盤が断層運動によって破壊され、多くのクラックを含んでいることに由来している可能性がある。

これらの結果より、岩盤の水の飽和状態に注意し、地下水の影響を適切に取り除くことで、比抵抗モニタリングを通じた応力の精密なモニタリングができることが示された。さらに断層近傍で応力がビルドアップしていく過程をモニターするう

えて、比抵抗モニタリングが非常に有効なツールとなりうることも示された。

## 論文審査の結果の要旨

申請者の研究は、岩盤の比抵抗変化をモニターすることによって、岩盤の応力変化が検出できるかどうかを実験的に検証したものである。水をふくむ岩石の比抵抗はクラックのネットワーク中に存在する水のつながり具合に大きく左右されるが、それは応力変化に敏感であり、実験室においては、比抵抗変化の応力変化に対する増幅率はおよそ2～3桁に達することがわかっている。

申請者はまず、現行の比抵抗測定システムをみなおし、システムの差動化やデジタル位相検波機能をもつロックイン・アンプの導入など大幅な改良を行い、大きな雑音が重畳するフィールドのような環境下でも、長期的に安定かつ正確に比抵抗を測定できるシステムを完成させた。このような改良の結果、従来3.5桁(0.5%)程度であった精度を5桁(0.01%)程度に向上させることに成功した。つぎに申請者は、このシステムを使って、東大油壺地殻変動観測所と野島断層サイトで観測を行い、そこで観測された比抵抗の変化が、たしかに岩盤の応力変化に起因することを実証した。

本論文の前半では、油壺観測所壕内において長期にわたって連続的に観測された比抵抗の変動が、油壺湾の海水位、壕内のひずみ、地下水の変動のデータとともに総合的に解析されている。比抵抗は Wenner 電極配置を採用し、地上から2m下の地下水位より上の部分飽和の層を主としてセンスする電極間隔が2mの短い測線と、地下水位より下の完全飽和の層を主としてセンスする電極間隔が10mの長い測線の2系統で観測された。どちらの観測においても、海洋潮汐の変動の時系列によく似た $10^{-4}$ オーダーの変動がとらえられた。さまざまなデータからとりだした $M_2$ 分潮と $O_1$ 分潮の位相の情報を比較検討することにより、電極間隔が2mの短い測線では、(油壺観測所のある半島が海洋潮汐によって載荷されて生じる)応力変動と地下水位がそれぞれにつくりだす比抵抗変動が重ね合わさったものが測定されるのに対し、電極間隔が10mの長い測線では、応力変動に起因する比抵抗変動が測定されることを明らかにした。

本論文の後半では、野島断層サイトで実施された地下540mの1点に対する加圧水の注水に伴ってつくりだされる岩盤の応力変化を検出するために行った観測の結果が議論されている。ここでは、注水点をはさむようなダイポール・ダイポール電極配置のもとで比抵抗が測定された。従来の測定法では、ひじょうに遠く離れた電極対における電流と電圧を正確に測定するのがむずかしいという難点があったが、申請者は、GPS信号を受信しそれを両者の位相検波用の同期信号として用いるという新しい手法を完成させ、この問題を解決した。観測された比抵抗の変化は、加圧水の注入と同時に岩盤が広範に圧縮されること、その後、水圧が徐々に拡散してゆくプロセスをはっきりととらえている。

申請者の開発した新しい比抵抗システムは、その精度と長期的な安定性かんがえると、将来の標準的なシステムの規範となる可能性を秘めている。さらに申請者がおこなったフィールド観測は、比抵抗を測定することによって、岩盤の応力変化を検出できることを実証しており、今後の発展につながる有効な手段が提供されたと評価できる。このような観点から、本申請論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これらに関連する研究分野について諮問した結果、合格と認めた。