

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610140

研究課題名(和文) 差応力により生じる地震波速度・比抵抗異方性の実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on anisotropies of seismic velocity and resistivity under differential stresses

研究代表者

渡邊 了 (Watanabe, Tohru)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授

研究者番号：30262497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：差応力の場合における物性の異方性を理解するために、岩石に一軸圧縮を加えながら弾性波速度および電気伝導度を測定した。一軸圧縮により圧縮軸に垂直なクラックが選択的に閉じ、地震波速度には顕著な異方性が生じる。これとは対照的に、電気伝導度には差応力による異方性は生じない。圧縮を加えると、圧縮軸に垂直な方向でも平行な方向でも、電気伝導度は同じように低下した。これはどの方向の伝導経路も様々な向きのクラックによって構成されているためと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to understand anisotropies of seismic velocity and electrical conductivity under differential stress conditions, measurements of elastic wave velocities and electrical conductivity were conducted on a granitic rock under uni-axial compression. Cracks perpendicular to the compression axis are selectively closed to cause significant anisotropy of velocity. On the other hand, little anisotropy of electrical conductivity was induced by differential stresses. During uni-axial compressions, conductivity decreases similarly in the directions parallel and perpendicular to the compression axis. The conduction path in a direction must be composed of cracks of various orientations. In all directions, conductivity decreases by the closure of cracks perpendicular to the compression direction.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：差応力 異方性 地震波速度 比抵抗 電気伝導度 クラック

1. 研究開始当初の背景

観測網の高密度化，解析手法の高度化により，地殻内部の詳細な地震波速度，比抵抗構造が得られるようになった [例えば，地震波速度構造は Nakajima et al. (2010)。比抵抗構造は Yoshimura et al. (2009)。] 推定された比抵抗は，地殻のほぼ全域で乾燥岩石の値よりも数桁低い。このことから，地殻内では流体(水溶液)が連結して存在し，比抵抗を支配していると考えられている [例えば，上嶋 (2005)]。

低温低圧である上部・中部地殻では，流体は主として岩石中のクラックに存在する。クラックは最大圧縮軸方向に垂直なものが優先的に閉じるはずであり，地震波速度にも比抵抗にも異方性が生じる可能性がある。実際，地殻内部の S 波偏光異方性と地殻応力との関係を示す観測は数多く報告されている [例えば，Kaneshima (1990)]。一方，比抵抗の異方性についてはまだ異方性検出を狙った観測自体が行われていない。地球物理学的観測から地殻応力を推定する基礎として，差応力と比抵抗異方性との関係を理解することが必要である。

2. 研究の目的

地殻内部で期待されるような差応力条件で，どのような比抵抗の異方性が生じるかを明らかにする。また，それがどのような空隙構造の変化に対応するものであるかを明らかにする。

3. 研究の方法

岩石試料に一軸圧縮を加えながら弾性波速度および電気伝導度を測定する。弾性波速度からクラックの量，向きを推定し，空隙構造に関する情報を得る。

(1) 試料

細粒黒雲母花崗岩(庵治花崗岩)を岩石試料として選択した。この岩石を構成している鉱物は，斜長石(52.8%)，石英(36.0%)，黒雲母(8.2%)，カリ長石(3.0%)であり，粒径は 100-500 μm である。また，空隙率は，試料表面から連結している空隙の体積を求める定積ガス膨張法では 0.5%，固相密度とバルク密度から求める密度法では 2-3%であった。

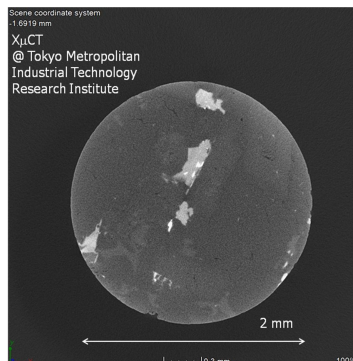


図1. 庵治花崗岩試料の X 線マイクロ CT 画像の例

X 線マイクロ CT による観察(図1)により，この岩石中に存在するクラックのほとんどは開いた粒界であることが分かった。また，かつて流体が存在した痕跡と考えられる孤立した丸い空隙も観察された。これが定積ガス膨張法と密度法により求めた空隙率の差の原因と考えられる。実験に用いたのは辺長 25 mm の立方体試料であり，P 波速度の速い順に X, Y, Z 軸を設定した。

(2) 装置

図2に一軸圧縮実験システムの概略を示す。この一軸圧縮装置は，汎用のテーブルプレスとロードセル，エンドピースを組み合わせたものである。エンドピースは，弾性波速度測定のための圧電素子を組み込んだタイプと，圧縮軸方向の電気伝導度を測定するために電極として使用するタイプの2タイプを作製した。ロードセルで測定した軸荷重は一定時間間隔でコンピュータに記録される。このシステムは，さらに，ファンクション・ジェネレータ(Agilent Technology, 33210A)，オシロスコープ(Agilent Technology, DSO-X2002A)，マルチプレクサ(Agilent Technology, 34970A)，コンピュータからなる弾性波速度測定システムおよび LCR メータ(エヌエフ回路ブロック, ZM2355)，コンピュータからなる電気インピーダンス測定システムから構成される。弾性波速度測定にはパルス透過法(中心周波数: 2 MHz)，電気インピーダンス測定には2電極法を採用した。

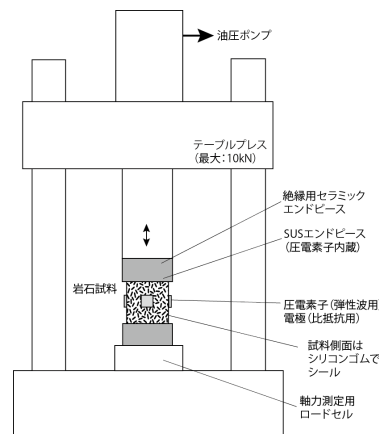


図2. 一軸圧縮装置の概略図

(3) 実験

差応力状態での電気伝導度の異方性を理解するために，以下のような実験を行った。

封圧下での乾燥試料の弾性波速度測定

花崗岩試料中のクラックの分布を推定するためには，岩石固相の弾性的性質が必要である。そのため，最大封圧 180MPa を加えて，岩石試料内のクラックを閉鎖させながら弾性波速度を測定した。圧力発生には，最大圧力 200 MPa の圧力容器(理研機器，PV-2M-6SF)を使用し，弾性波速度測定にはパルス透過法(中心周波数: 2 MHz)を採用した。

一軸圧縮下での乾燥試料の弾性波速度測定

一軸圧縮下でどのようにクラックが閉鎖するかを理解するために、最大軸圧 20MPa を加えながら乾燥試料の弾性波速度を測定した。

一軸圧縮下での含水試料の電気伝導度測定

一軸圧縮下で電気伝導度にどのような異方性が生じるかを明らかにするために、電気伝導度測定を行った。

4. 研究成果

(1) 封圧下での乾燥試料の弾性波速度測定

図3に乾燥試料(AJGcb8)の弾性波速度の封圧依存性を示す。P波、S波ともに封圧の増加にともなう速度が増加した。これは封圧増加によるクラック閉鎖を反映していると考えられる。封圧 180 MPa におけるP波速度は、どの方向もほぼ同じ値であり、岩石固相がほぼ等方的であることを示している。常圧においてZ軸方向のP波速度が遅いことは、Z軸に垂直なクラックがX軸やY軸に垂直なクラックが多く存在していることを示していると考えられる。

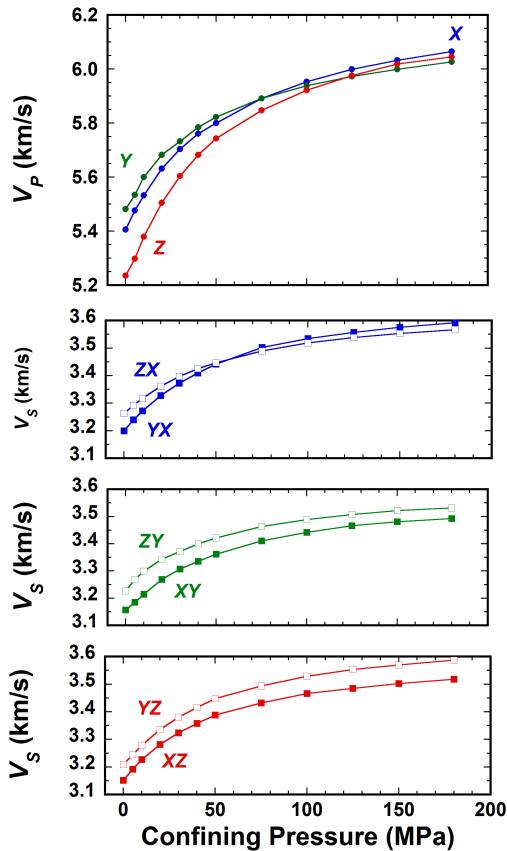


図3. 乾燥試料(AJGcb08)のP波およびS波速度の封圧依存性。上から、P波速度、X、Y、Z軸方向に進行するS波速度。

(2) 一軸圧縮下での乾燥試料の弾性波速度測定

図4に一軸圧縮に伴う弾性波速度の変化を示す。圧縮は岩石試料のZ軸方向(P波速度が最も遅い方向)に平行に加え、最大軸圧を5 MPa から 20 MPa まで変えながら加圧と減圧を繰り返した。

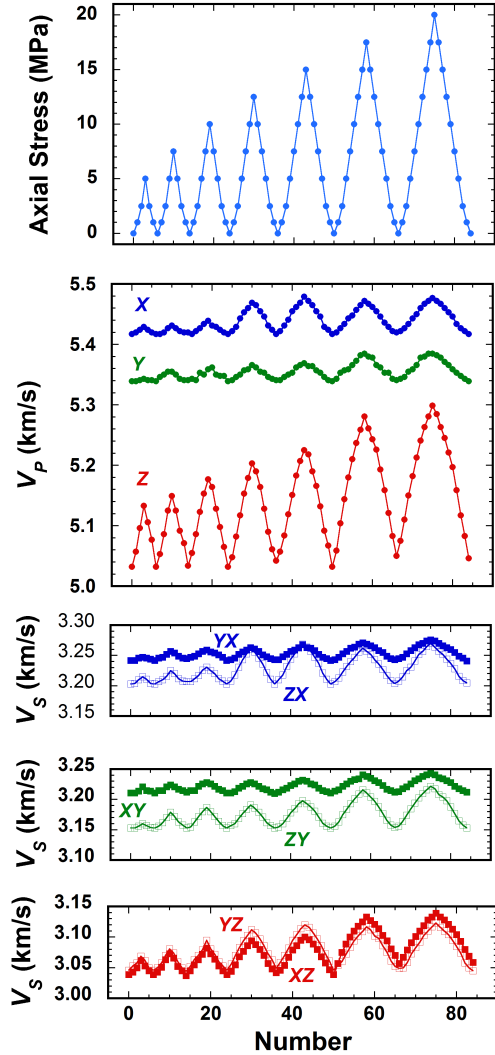


図4. 乾燥試料(AJGcb07)に一軸圧縮を加えながら測定したP波およびS波速度。上から、軸圧、P波速度、X、Y、Z軸方向に進行するS波速度。

全ての方向のP波速度およびS波速度が、軸圧とともに増加した。加圧・減圧に対して弾性波速度は可逆的に変化しており、最大軸圧 20 MPa の範囲内ではクラック量の有意な変化は認められない。P波速度の最大の变化はZ軸方向で見られた。S波速度の大きな変化は、Z軸方向に進行または振動するS波において見られた。これらの観察事実は、一軸圧縮による圧縮軸(Z軸に平行)に垂直なクラックの閉鎖で説明できる。X軸方向、Y軸方向のP波速度、XY面内に進行方向、振動方向をもつS波速度に大きな違いは見られなかった。

(3) 一軸圧縮下での含水試料の電気伝導度測定

岩石試料に0.1mol/LのKCl水溶液を含ませたのち、一軸圧縮を加えながら電気伝導度を測定した。電気伝導度は岩石試料(AJGcb06)のZ軸方向(P波速度が最も遅い方向)で行った。

圧縮軸に平行な方向の電気伝導度

試料のZ軸に平行に一軸圧縮を加えた。この場合は、KCl水溶液を内部に貯えることが可能なステンレス・エンドピースを使用し、試料との接触部には多孔質ステンレスを使用した(図5)。

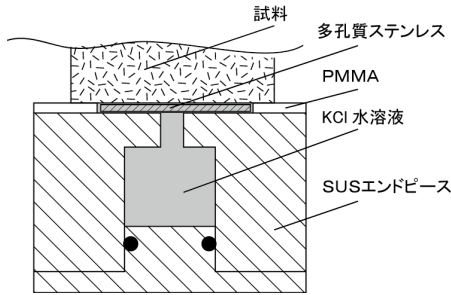


図5．圧縮軸に平行な方向の電気インピーダンスを測定する場合のエンドピースの概略図。

図6に軸圧および電気伝導度の変化を示す。軸圧増加に伴い電気伝導度は低下し、軸圧を減少させると電気伝導度は増加した。軸圧をゼロにしたときの電気伝導度は、圧縮を加えるごとに2%程度ずつ増加した。最大軸圧時の電気伝導度は、最大軸圧の値が15, 17.5, 20 MPaと変化しても、ほとんど変わらなかった。

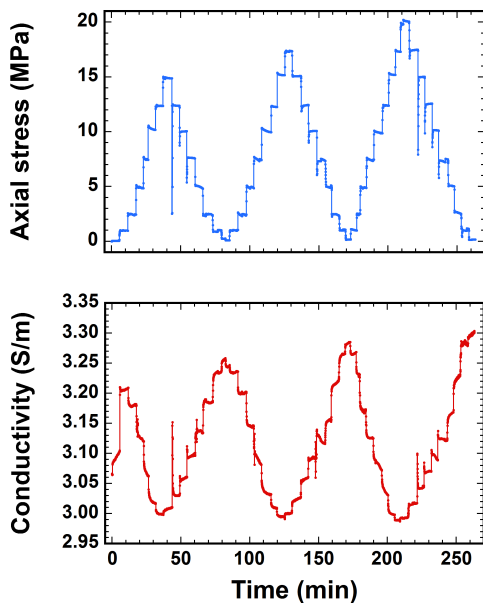


図6．含水試料(AJGcb06)のZ軸方向に一軸圧縮を加えながら測定したZ軸方向の電気伝導度。

圧縮軸に垂直な方向の電気伝導度
試料のZ軸に垂直に一軸圧縮を加えた。この場合は、図7に示すようなアクリル板と銀塩化銀板からなる電極を使用した。電極と試料の間にはKCl水溶液が存在している。

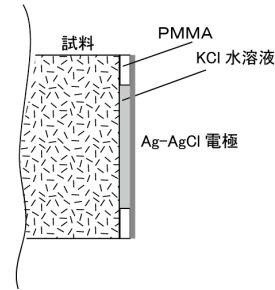


図7．圧縮軸に垂直な方向の電気インピーダンスを測定するための電極。

図8に軸圧および電気伝導度の変化を示す。圧縮軸に平行な方向と同様に、軸圧増加に伴い電気伝導度は低下し、軸圧を減少させると電気伝導度は増加した。軸圧をゼロにしたときの電気伝導度は、はじめの値よりも約2%増加していた。

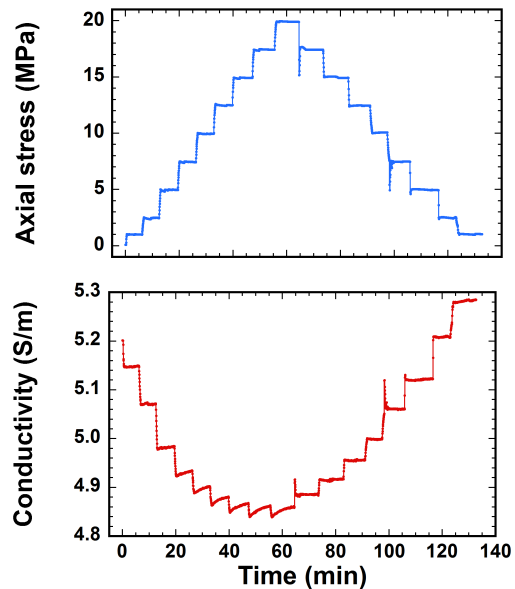


図8．含水試料(AJGcb06)のX軸方向に一軸圧縮を加えながら測定したZ軸方向の電気伝導度。

伝導経路の性質

図9に圧縮軸と平行な方向の電気伝導度、図10に圧縮軸と垂直な方向の電気伝導度を軸圧の関数として示す。圧縮軸に平行、垂直、どちらの方向でも軸圧20 MPaに対して、約10%の電気伝導度の低下が見られた。また、軸圧増加に対する電気伝導度の低下率は、軸圧増加とともに小さくなる傾向があり、これも両方の方向に共通している。弾性波速度とは対照的に、電気伝導度の変化には異方性はほとんど見られなかった。

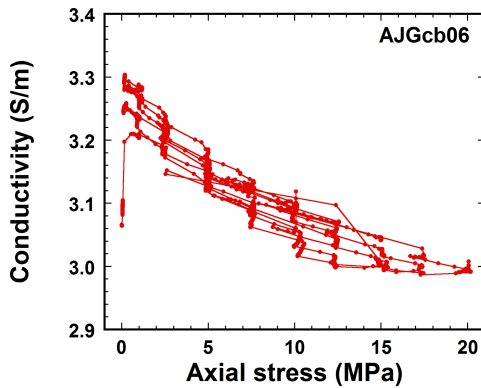


図 9 . 圧縮軸と平行な方向の電気伝導度と軸圧の関係 (AJGcb06)

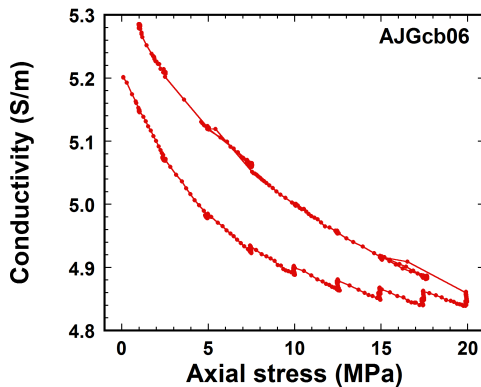


図 10 . 圧縮軸と垂直な方向の電気伝導度と軸圧の関係 (AJGcb06)

岩石試料内部で電気伝導を担う経路は、様々な向きのクラック（開いた粒界）から構成されていると考えられる。一軸圧縮により閉鎖するクラックは、主として圧縮軸に垂直なものであるが、このクラックが圧縮軸に垂直な方向の伝導経路にも、平行な方向の伝導経路にも同様に寄与しているので、一軸圧縮に伴う電気伝導度の変化には異方性がほとんど見られないと考えられる。

有効媒質理論 (Kirkpatrick, 1977) を基にして、閉鎖するクラックの影響を評価する。一軸圧縮を加える前は、すべてのクラックを同じコンダクタンス g をもっているものとし、ひとつのクラックはノード（節）において Z 個のクラックにつながっているとする。一軸圧縮を加えると、割合 x のクラックのコンダクタンスが閉鎖に伴い $\alpha g (0 < \alpha < 1)$ と変化するものとする。残り $(1-x)$ のクラックのコンダクタンスは変わらないものとする。このときの有効コンダクタンス g_{eff} は、

$$\frac{(g_{eff} - \alpha g)x}{\left(\frac{Z}{2} - 1\right)g_{eff} + \alpha g} + \frac{(g_{eff} - g)(1-x)}{\left(\frac{Z}{2} - 1\right)g_{eff} + g} = 0$$

から求めることができる。

クラックの閉鎖に伴う電気伝導度の変化を図 11 に示す。電気伝導度は初期値で規格化している。 Z が大きいほどクラック閉鎖に

伴う電気伝導度の低下は小さくなるが、 $Z=9 \sim 13$ では大きな差は見られない。 α が 0.05 の場合、電気伝導度が 10% 低下するためには、10% 程度のクラックの閉鎖が必要であることが分かる。

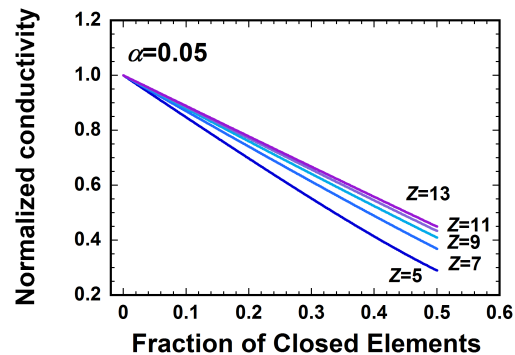


図 11 . クラックの閉鎖に伴う電気伝導度の変化。電気伝導度は初期値で規格化している。

Z を 11 に固定した場合の規格化された電気伝導度の変化を図 12 に示している。 α が小さくなるほど大きな電気伝導度変化を示しているが、 α が 0.1 以下では α の値による違いは非常に小さくなる。これは、 α が桁で小さくなった場合、そこでの連結が実質的に切れるためであると考えられる。したがって、クラックの閉鎖によりその部分のコンダクタンスが桁で低下するような場合を考えると、10% の電気伝導度低下が生じるためには、10% のクラックが閉鎖すればよいことになる。

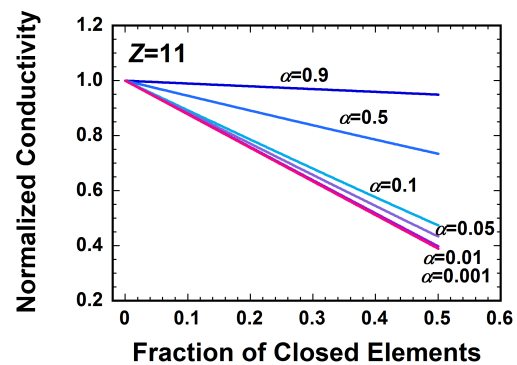


図 12 . $Z=11$ の場合のクラック閉鎖に伴う電気伝導度変化。電気伝導度は初期値で規格化している。

まとめ

差応力により生じるクラックの選択配向は、弾性的性質の顕著な異方性を生じるが、電気伝導度には有意な異方性を生じない。これは、伝導経路が様々な向きのクラックから構成されているからである。

有効媒質理論を用いると、10% のクラックコンダクタンスが閉鎖によって桁で低下すると、有効電気伝導度が 10% 低下することが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3件)

・森本美咲・渡辺 了, 一軸圧縮に伴う含水花崗岩の弾性波速度と電気伝導度の変化, 平成 27 年 5 月 27 日, 幕張メッセ(千葉市)

・澤城 凌・森本美咲・渡辺 了, 一軸圧縮に伴う含水花崗岩の電気伝導度変化, 平成 28 年 5 月 23 日, 幕張メッセ(千葉市)

・澤城 凌・渡辺 了・渡邊真也, Change in electrical conductivity in a brine-saturated granite under uni-axial compression, 平成 29 年 5 月 23 日, 幕張メッセ(千葉市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 了 (WATANABE, Tohru)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・

教授

研究者番号: 30262497

(4) 研究協力者

森本 美咲 (MORIMOTO, Misaki)

富山大学・理学部地球科学科

澤城 凌 (SAWAKI, Ryo)

富山大学・理学部地球科学科

渡邊真也 (WATANABE, Shinya)

富山大学・理学部地球科学科