

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540444

研究課題名（和文） 電気伝導度から地殻内部の水を探る

研究課題名（英文） Probing water in the crust via electrical conductivity

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）・准教授

研究者番号：30262497

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、地震波速度や電気伝導度の観測から地殻内部の間隙流体圧を推定する手法を考案することである。間隙流体圧を知ることにより、地震発生の危険性を評価することが可能となる。本研究期間では、その基礎として、含水岩石の電気伝導度を研究するための、間隙流体圧制御機構を開発した。また、狭い間隙に存在する水が通常の水とは異なる物性を示すこと、黒雲母が比較的高い電気伝導度を示すことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this study is to devise a method to estimate the pore-fluid pressure in the crust via observations of seismic velocity and electrical conductivity. The knowledge of the pore-fluid pressure enables us to evaluate the risk of earthquakes. As a basic tool for the study of electrical conductivity in water-bearing rocks, we have invented a new mechanism for controlling the pore-fluid pressure in rock samples. We have studied physical properties of a thin film of water and the electrical conductivity of micas. The dielectric permittivity of a thin film of water between glass plates is lower than bulk water by one order of magnitude. The electrical conductivity of biotite is higher than muscovite and phlogopite by 2-3 orders of magnitude.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：地球内部物性

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：電気伝導度、岩石物性、水、地殻、地震、流体圧、粒界、濡れ角

## 1. 研究開始当初の背景

観測および解析技術の進歩により、地殻の詳細な電気伝導度構造が得られるようになった(例: Ogawa et al., 2000). 得られている電気伝導度構造には、次のような共通する特徴がある.

(1) 乾燥岩石では説明できないような高い電気伝導度をしめす領域が広く存在する.

(2) 断層を境にした電気伝導度のコントラストが見られる.

高い電気伝導度の原因としては、岩石間隙中で流体(主として水)が連結していると考えられている(例: 上嶋, 2005). 強いコントラストは、変形の強弱に依存した流体の連結度の違いを反映すると考えられている(例: Ogawa et al., 2000).

岩石の摩擦強度は、間隙流体の影響を強く受ける. 電気伝導度のような観測量をもとに、地殻内部の間隙流体圧を推定できれば、断層深部の摩擦強度の推定が可能となり、内陸地震活動についての理解は飛躍的に進むものと考えられる. しかしながら、従来の研究(例: 上嶋, 2005)は、電気伝導度を含水量に翻訳して、地震発生における水の重要性を指摘するにとどまっており、間隙流体圧の推定には至っていない.

われわれは水を含む地殻岩石とその物性について、以下の(1)~(6)のように考え、地震波速度、電気伝導度という2つの観測量から地殻内部の間隙流体圧が推定可能であると考えた.

(1) 地殻の大部分を構成するのは緻密な花崗岩類であり、水は岩石のクラックを満たす形で存在する.

(2) 岩石の含水量は、クラック密度(破壊の程度を反映する)およびクラック開口(間隙流体圧の大きさを反映する)に依存する.

(3) クラックを含む岩石の地震波速度は、専らクラック密度に依存して決まり、クラック開口には鈍感である(O'Connell and Budiansky, 1974).

(4) 電気伝導度は、クラック密度だけでなく、クラック開口にも敏感である.

(5) 含水岩石の電気伝導度をクラック密度およびクラック開口の関数として理解できれば、地震波速度からクラック密度を求め、電気伝導度からクラック開口を求めることができる.

(6) クラック開口が分かれば、それを基に間隙流体圧が推定できる.

## 2. 研究の目的

(1) 含水岩石の電気伝導度をクラック密度

およびクラック開口の関数として明らかにする.

(2) 岩石間隙中に存在する水の物性を厚さの関数として明らかにする.

クラック開口が小さくなり間隙が狭くなってくると、水の物性が通常のパルクの水とは大きく異なってくるのが指摘されている(例: Watanabe and Peach, 2002). これは、固体表面から働くクーロン力による水分子の拘束が強くなるためである. 含水岩石の電気伝導度をクラック開口の関数として理解するためには、このような狭い間隙中の水の物性を理解することも必要である.

## 3. 研究の方法

本研究では、目的(1)、(2)を達成するために、2つの実験的研究を並行して進めた.

(1) 封圧および間隙流体圧を制御した含水岩石の電気伝導度測定

### ① 間隙流体圧制御機構の開発

封圧下での含水岩石の電気伝導度測定と間隙流体圧の制御を両立させるために、岩石中の間隙流体(水)を圧力容器(金属)と絶縁し、かつ間隙流体圧を制御できるような間隙流体圧制御機構を開発する. なお、封圧、間隙流体圧ともに最高圧力を200MPaとする.

### ② クラック開口を制御した電気伝導度測定

①で開発した機構を用いて、岩石試料の電気伝導度測定を行い、あるクラック密度における電気伝導度のクラック開口依存性を明らかにする. なお、クラック密度は弾性波速度測定により求める. これをクラック密度の異なる岩石試料に対して行うことにより、電気伝導度をクラック密度、クラック開口の2つの量の関数として明らかにする.

### (2) 狭い間隙に存在する水の物性測定

固体シート(カバーガラスやマイカシートなど)で水を挟み、これを狭い間隙のモデルとする. これをマイクロメータに挟んで積層構造としての誘電率を測定する. 水を挟まない状態での測定と比較することにより、狭い間隙にある水の誘電率を求め、間隙の厚さとの関係を調べる.

## 4. 研究成果

(1) 封圧および間隙流体圧を制御した含水岩石の電気伝導度測定

間隙流体圧制御機構の開発に時間がかかったため、実際に含水岩石の電気伝導度を封圧、間隙流体圧を制御しながら測定することはできなかった. しかし、従来の間隙流体制御機構(例: Glover et al., 1997)に比べて格

段に使いやすく、信頼性の高い機構を開発できたと考えている。

当初は、Glover et al. (1997)のを使用した流体圧制御機構を参考にして、図1のような間隙流体圧制御機構を考えた。

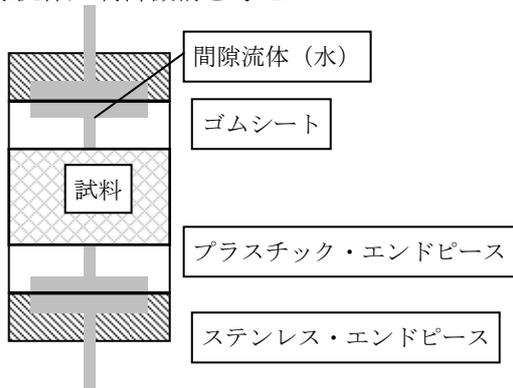


図1. 当初の間隙流体圧制御機構の概念図

プラスチック・エンドピース側の水は試料内部の間隙流体（水）に接続している。一方、ステンレス・エンドピース側の水は圧力容器外部のポンプに接続している。プラスチックおよびステンレス・エンドピース内の水はゴムシートによって仕切られており、間隙水は圧力容器金属部と絶縁が保たれる。ステンレス・エンドピース側の水圧を制御し、ゴムシートを介して間隙流体圧を制御しようという考えである。このゴムシートを介した圧力制御機構の試験機を製作し、試験を行ったが、ゴムシートでは高压流体のシールができないことが判明した。また、間隙水と容器金属との絶縁をより確保するためには、ステンレス・エンドピース側の流体としてシリコン・オイルなど絶縁性のよい流体を使用すべきであることが分かった。

間隙流体圧制御機構の試験機として、図2のようなものを製作した。ここでは、岩石間隙流体（水）と圧力制御流体（シリコン・オイル）とをOリングを使用したピストンで隔てている。油圧の変化によりピストンが動き水圧を制御するというものである。ピストンはプラスチック製であり、間隙流体と容器金属との絶縁は確保されている。

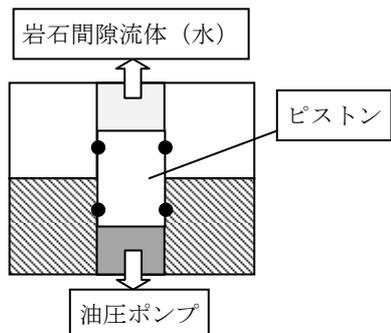


図2. 間隙流体圧制御機構試験機概念図

この試験機の油圧と水圧の関係を図3に示す。

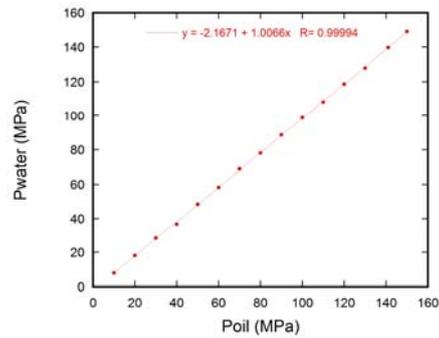


図3. 試験機の油圧と水圧の関係

油圧は圧力ポンプの圧力ゲージから読んだ。水圧は、水側に接続した圧力センサー（NEC Avio infrared Tec., 9E02-P4）で測定した。線形性、再現性ともに良好で、油圧と水圧との差は水圧によらず2 MPa程度である。この差は、主としてOリングの摩擦によるものと考えている。図3のような油圧と水圧関係を用いてOリングの影響を補正することにより、正確な間隙流体圧制御が可能となる。

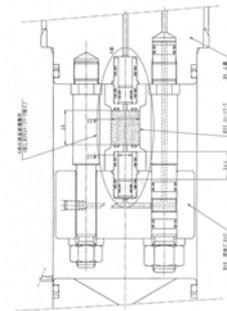


図4. 間隙流体圧制御機構の組み込み

現在、図2の方式の間隙流体圧制御機構を現有の圧力容器に組み込むことを進めている（図4）。この改造が終わり次第、封圧および間隙流体圧を制御した含水岩石の電気伝導度測定に取りかかり、電気伝導度をクラック密度およびクラック開口の関数として整理していく予定である。

## (2) 狭い間隙に存在する水の物性測定

含水岩塩を用いた電気インピーダンス測定データ（Watanabe and Peach, 2002）を解析し、濡れ角測定からは予測されない連結した粒界水の存在を明らかにした（Watanabe, 2010）。このような狭い間隙に存在する水の物性がバルク水とどのように異なるのか、物性を間隙の厚さの関数として明らかにすることを目標としてガラスに挟まれた水（脱イオン水）の誘電率測定を行った。誘電率は、水分子の電場に応答した回転しやすさを反映する物性である。

カバーガラスで挟んだ水の誘電率測定か

ら、ガラスに挟まれた水の誘電率がバルク水よりも1桁低いという結果を得た。これはガラス-水界面の影響により、水分子の回転が阻害されるからと考えている。ただし、厚さについては1  $\mu\text{m}$  以下であるという以上の情報を得られなかったため、誘電率を厚さの関数として求めるには至らなかった。今後は、干渉縞の応用など、間隙の厚さを推定する手法の開発が必要である。

### (3) 雲母族鉱物の電気伝導度測定

これは申請時には計画していなかった実験的研究である。電気伝導度から地殻内部の水を探るためには、乾燥状態の岩石の電気物性に関する理解が必要である。筆者は地殻・マントル物質の電気伝導度についてのレビュー(渡辺, 2009)を行う過程で、黒雲母が比較的高い電気伝導度を示す可能性が指摘されている(Fuji-ta et al., 2007)ことを知り、黒雲母、白雲母、金雲母の単結晶の電気伝導度測定を常圧高温(<800°C)で行った。この結果、黒雲母がほぼ同じ結晶構造をもつ白雲母、金雲母よりも2~3桁高い電気伝導度を示すことが分かった(図5)。これは、黒雲母中で等価なサイトを占める2価および3価の鉄イオン間を電子がホッピングすることによるものと考えている。Brindley and Lemaire (1987)は、400~650 °Cにおいて、黒雲母中の2価の鉄イオンが3価に変化することを報告している。黒雲母に見られる加熱による電気伝導度の不可逆的増加は、この3価の鉄イオンの増加によるものと考えている。

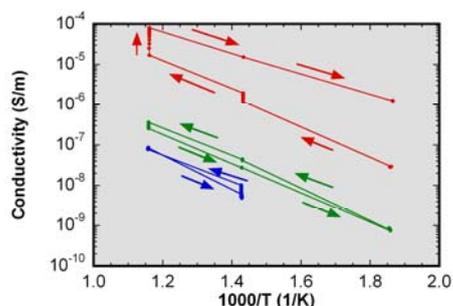


図5. 黒雲母(赤)、白雲母(緑)、金雲母(青)の電気伝導度の温度依存性。電気伝導度は雲母のへき開に垂直な方向に測定したもの。

黒雲母の電気伝導度は、異方性が非常に強い(図6)。雲母のシートに平行な方向の電気伝導度は、垂直な方向に比べて約3桁高い。ただし、電気伝導度の活性化エネルギーは両方向でも大きな違いは見られない。このため、シート内伝導は電子のホッピングに支配され、シート間伝導は積層欠陥のような構造の乱れ(数は少ないが非常に電子の動きやすいところ)に支配されていると考えている。こ

の結果は、2008年のアメリカ地球物理学連合秋季大会で発表しており、現在論文を作成中である。

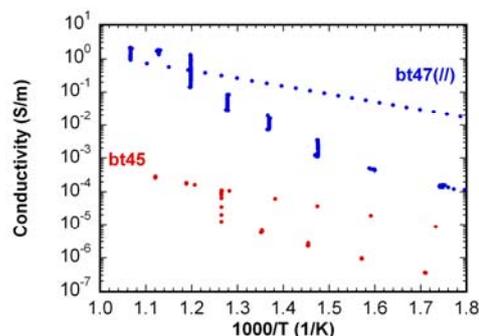


図6. 黒雲母の電気伝導度の温度依存性。bt47(青)はへき開に平行な方向、bt45(赤)はへき開に垂直な方向の電気伝導度を示す。

### 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)

[雑誌論文](計3件)

① Watanabe, T., Geometry of intercrystalline brine in plastically deforming halite rocks: inference from electrical resistivity, Geological Society, London, Special Publications, 査読有, 332, 2010, 69-78.

② 渡辺 了, 地殻・マントル物質の地震波速度と電気伝導度: 沈み込み帯の水を探る, 地震2, 査読有, 61, 2009, S541-561.

③ 鏡味 芳宏, 渡辺 了, 弾性波速度測定に基づく跡津川断層周辺線部地殻物質の推定, 地震2, 査読有, 61, 2009, 99-111.

[学会発表](計3件)

① Watanabe, T., Experimental study on dielectric permittivity of thin film water, Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, 2009年9月8日, リバプール, クラウンプラザ・ホテル(イギリス)

② Watanabe, T., Electrical conductivity of micas at high temperatures, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, 2008年12月17日, サンフランシスコ, モスコーネ国際会議場(アメリカ)

③ Watanabe, T., Intercrystalline brine in deforming halite rocks, Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, 2007年9月27日, ミラノ大学(イタリア)

[図書](計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

研究成果の一部を次のホームページで公開  
している

<http://www3.u-toyama.ac.jp/twatnabe/>

## 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）・

准教授

研究者番号：30262497

### (2) 研究分担者

該当なし

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

該当なし

( )

研究者番号：