

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05628

研究課題名(和文)地殻内の流体移動解明に向けた岩石物性研究

研究課題名(英文) Study of physical properties of rocks for understanding fluid migration in the crust

研究代表者

渡邊 了 (Watanabe, Tohru)

富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授

研究者番号：30262497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：封圧下での含水岩石の弾性波速度・電気伝導度同時測定、SEMによる空隙の微細構造観察を行った。圧力増加に伴いクラックはほとんど閉じるが、開口の大きな部分は閉じ残る。このような閉じ残り部分が、高圧での地震波速度、電気伝導度を支配していることを明らかにした。また、数値実験によって、25%以上の粒界で開口の大きな部分が連結していれば、流体の連結したネットワークが形成されることを示した。地殻内に存在するクラックにおいても、開口の大きな部分がチューブ状に連結しているはずである。このような空隙構造を考えれば、地殻で観測されている10%程度の地震波速度変化、4桁以上の電気伝導度変化を同時に説明できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地殻内部には、さまざまなサイズのクラックが存在しており、開口もクラック内で大きく変化しているはずである。地殻内のクラックにおいても、開口の大きな部分が閉じ残っているはずである。この閉じ残りが、地震波速度や電気伝導度を支配していると考えられる。物性測定と微細構造観察を通して、地殻流体に具体的なイメージを与えたことにより、観測量から流体量を推定することが可能になった。地殻流体は、地殻の変形や地震活動に大きな影響を与えている。流体分布を具体的に推定することは、地震発生の場合を理解することであり、地殻における地震活動の深い理解につながると考えている。

研究成果の概要(英文)：Simultaneous measurements of elastic wave velocity and electrical conductivity on brine-saturated rocks were conducted under confining pressure and microstructure of pores examined. Some cracks have remarkable variation in aperture. Narrow aperture parts are closed under pressure, while wide aperture parts remain open at high pressure. Such wide aperture parts in cracks govern velocity and conductivity. Numerical experiments on the percolation of open grain boundary have shown that more than 25% of grain boundaries must be open to form an interconnected network of open grain boundaries. Wide aperture parts in cracks must form connected paths also in the crust. Such pores can shoe observed seismic velocity and electrical conductivity in the crust.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地震波速度 電気伝導度 岩石物性 水 クラック 流体 地震

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地殻流体(主として水)は、塑性変形の促進や摩擦強度の低下を通して、地殻の変形や地震活動などで重要な役割を果たしている。地殻プロセスを理解するためには、地殻内部の流体分布を理解することが不可欠である。

地殻内部の流体分布を明らかにすることを目的として、詳細な地震波速度構造、電気伝導度構造が求められてきた。電気伝導度の低い領域であっても、その伝導度は乾燥岩石で説明できない高い値であり、広範囲に流体が存在することを示した。また、同じ深さにおいて、伝導度が4桁以上も地域によって変化することが見られた。流体の連結度が変化しないと考えると、4桁以上の伝導度変化は、流体量が4桁以上変化していることを意味する。一方、観測される地震波速度は水平方向で最大10%程度の変化しか示していない。流体が地殻内のクラックに存在していると考えれば、この4桁以上の伝導度変化と10%程度の地震波速度の変化を同時に説明することは困難である。

観測される地震波速度、電気伝導度から流体量を推定するためには、地殻内に存在する流体の形状およびその連結度についての理解が必要であった。

### 2. 研究の目的

脆性領域である上部・中部地殻において、(1) 流体がどのような形態で存在するかを理解する。(2) 流体の連結度を理解する。(3) 含水岩石の弾性波速度、電気伝導度、浸透率の同時測定を行い、地球物理学的観測量から、地殻流体の移動を支配する「浸透率」を推定する方法を開発する。

### 3. 研究の方法

- (1) 高圧下での含水花崗岩の弾性波速度・電気伝導度同時測定、SEM(走査型電子顕微鏡)による空隙の微細構造観察により、地殻条件(高圧)で物性を支配する空隙の形態を推定する。
- (2) 粒界クラックのパーコレーションについて数値実験を行い、どの程度のクラック量でパーコレーションが起きるか、パーコレーション閾値を求める。
- (3) 過渡パルス法による浸透率測定を行う。

### 4. 研究成果

(1) 高圧下での含水花崗岩の弾性波速度・電気伝導度同時測定、SEMによる空隙微細構造観察

0.1M塩化カリウム水溶液(電気伝導度:1.2 S/m)を空隙に満たした庵治花崗岩を試料として、最高圧力150 MPaまで封圧を増加させながら、縦波速度、横波速度、電気伝導度を測定した(図1)。

縦波速度、横波速度は封圧増加とともに増加した。含水試料は乾燥試料に比べて、速い弾性波速度を示すが、圧力150 MPaでは乾燥試料との差がほとんどなくなった。このことは、空隙が圧力150 MPaにおいてほぼ閉鎖することを示す。電気伝導度は、0.1 - 5 MPaで、急激に低下し、その後は緩やかな低下を示した。高圧での電気伝導度も乾燥試料では説明できない高い値であり、流体の連結が維持されていることを示している。

イオンミリングによって研磨した面をSEMにより観察すると、粒界クラックの開口がクラックに沿って大きく変化していることが分かった(図2)。クラックの開口の狭い部分は低圧で閉じ、開口の大きな部分は高圧でも開いていると考えられる。FIB-SEMによって3次元構造を調べた結果、開口の大きな部分は粒界内部で連続していることも分かった。

物性測定および微細構造観察から、高圧で流体の連結を維持しているのは、クラックの開口の大きな部分であると考えられる。地殻内に存在するクラック内においても、開口は変化しているだろう。チューブ状に連結した開口の大きな部分が、流体の連結を維持し、電気伝導度を支配しているものと考えている。このような高圧でも閉鎖しないアスペクト比

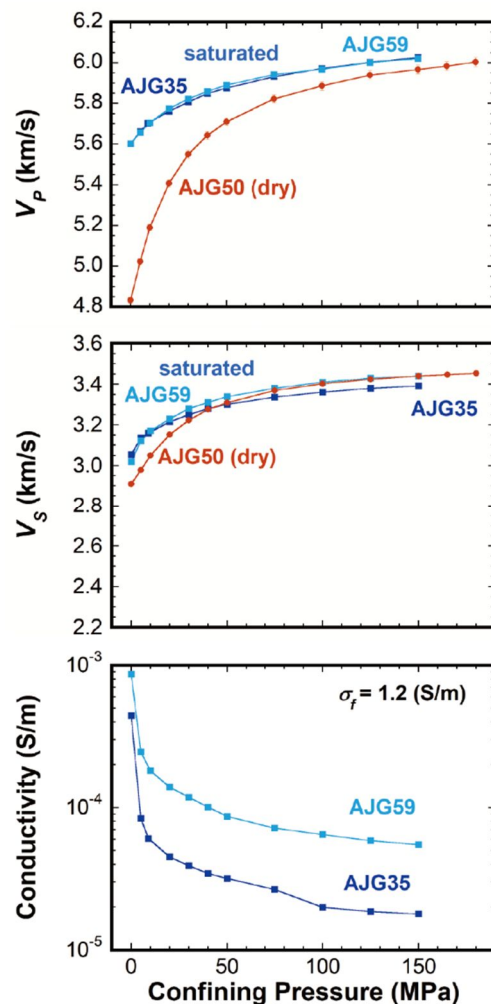


図1. 弾性波速度と電気伝導度

の大きなチューブ状の空隙を考えると、地殻で観測されている4桁以上の電気伝導度変化と10%程度の地震波速度変化を同時に説明することができる。アスペクト比の大きなチューブ状の空隙の場合、流体量増加による速度低下が小さいからである。地震波速度、電気伝導度からの流体量の推定には、このようなチューブ状のモデルを想定すべきである。(Watanabe et al., 2019)

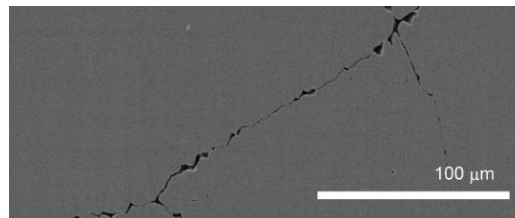


図2 . 粒界クラックのSEMイメージ

### (2) 粒界クラックのパーコレーション

使用した庵治花崗岩においては、粒界クラックが支配的な空隙であった。そのため、どの程度の割合の粒界が開けば連結したネットワークが形成されるかを数値実験によって調べた。多結晶体のモデルとして、立方体粒子およびKelvin14面体(切頂八面体)を考えて数値実験を行い、それぞれ21%、25%という閾値を得た(図3)。閾値はボンド(結合手)の配位数によって変化する(図4)。花崗岩の粒界の配位数を、X線CT画像から調べたところ、平均が8.7であった。そのため、25%以上の粒界が開いていれば、連結したネットワークが形成されると考えられる。

高压での連結を考えると、25%以上の粒界で開口の大きな部分が連結している必要がある。低压で高い電気伝導度を示すことは、低压では、開口の狭い部分も開いて連結した経路をつくり、開口大きな部分のつくる経路と並列に働くためと考えられる。SEM画像の解析によって得られた、開口の狭い部分、広い部分の量は測定された電気伝導度を説明する。

地殻で観測されている電気伝導度の値は、閾値付近で予想される値よりも桁が高い。すなわち、地殻内の流体は十分に連結した状態と考えることができる。

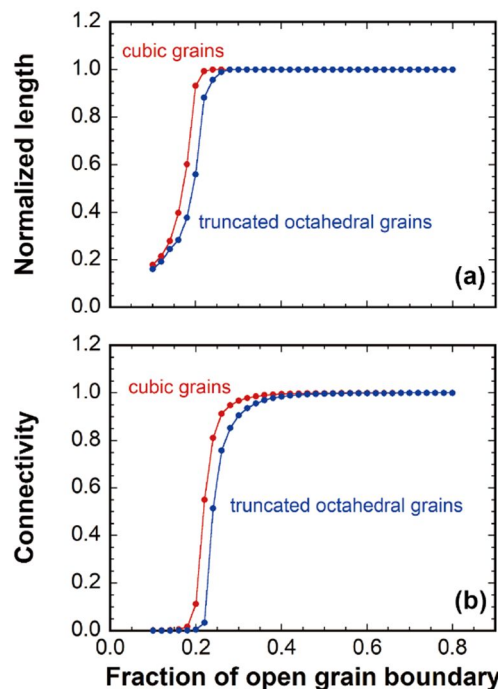


図3 . 開いた粒界の連結

### (3) 過渡パルス法による浸透率測定

間隙流体圧制御システムを、試料両端の間隙流体圧を独立に制御できるようにした。一方の間隙流体圧を急激に増加させ、両端の圧力差の時間変化から浸透率を求めるのが、過渡パルス法である。

油圧 水圧伝達機構に摩擦の小さなフッ素ゴム系 O リングを使用することにより、理論上は  $10^{-20} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$  の浸透率測定が可能であった。しかし、実際には、かなり O リングの摩擦が大きかった。これは、油圧 水圧伝達機構を構成するステンレス製のピストン、シリンダーの加工法まで見直す必要があると考えている。

また、浸透率測定の性能評価がまだ十分とはいえない。難しさは、このような浸透率が非常に低い標準試料を得ることにある。これについては、引き続き、標準試料の作製と浸透率測定を行い、当初目標としていた、弾性波速度、電気伝導度、浸透率の同時測定の実現を目指す予定である。

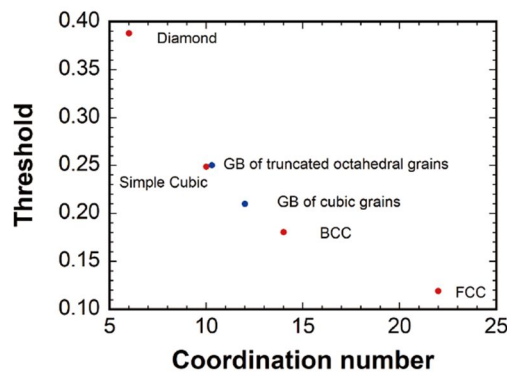


図4 . 閾値と配位数の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Watanabe, T., Makimura, M., Kaiwa, Y., Desbois, G., Yoshida, K., Michibayashi, K.	4. 巻 71
2. 論文標題 Elastic wave velocity and electrical conductivity in a brine-saturated rock and microstructure of pores	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1186/s40623-019-1112-9">https://doi.org/10.1186/s40623-019-1112-9</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 片境 遥, 荒館佳子, 渡邊 了
2. 発表標題 A new apparatus for measuring elastic wave velocity, electrical conductivity and permeability of fluid-saturated rocks at various confining and pore-fluid pressures
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺 了, 吉田健太
2. 発表標題 Fluid distribution in the crust - inference from seismic velocity and electrical conductivity
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺 了, 富岡愛梨奈, 吉田健太, Desbos, G.
2. 発表標題 地震波速度・電気伝導度分布から推定される地殻内の流体分布
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	デボア ギローム (Desbois Guillaume)		
研究協力者	吉田 健太 (Yoshida Kenta)		