

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04102

研究課題名(和文) 高圧下の空隙微細構造およびそれが支配する地震波速度と電気伝導度

研究課題名(英文) Microstructure of pores in rocks under high pressure and its control on seismic velocity and electrical conductivity

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：上部・中部地殻に存在する流体の形状を理解することを目的として、圧力下での亀裂閉鎖に関する高圧実験と数値実験を行った。亀裂内では多数の小さなアスペリティ接触が離散的に生じており、流体はアスペリティ接触によって支えられた空隙に存在する。圧力下でアスペリティの接触部分は弾性変形だけではなく、破壊を伴って変形することが分かった。破壊が関与しているため数値実験による推定は困難であり、加圧した亀裂表面の系統的な解析が必要であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上部・中部地殻には様々なスケールの亀裂が存在する。流体は亀裂の「閉じ残り」部分に存在するため、亀裂がどのように閉鎖し、どのような閉じ残りが存在するかは、地殻の流体量を推定する上で不可欠な情報である。2020年以降活発な活動を続けている能登半島北部の地震は、地殻内の流体が関係していると考えられている。「閉じ残り」についての理解は、流体量の定量的評価および、流体の地震への関与の理解につながるものである。

研究成果の概要(英文)：High-pressure experiments and numerical experiments on the closure of fracture were conducted to understand the fluid geometry in the upper- and mid-crust. In the crust, there exist numerous fractures of various sizes. Asperities on fracture surfaces come into contact when fractures are closed under pressure. Fluids must exist in remaining pore spaces around asperity contacts. High pressure experiments showed that the deformation of asperity contacts is accommodated by microcracking. Acoustic emissions were clearly observed during the increase in pressure. Fine particles (< 50 micrometers), which must be the product of microcracking, were observed on the fracture surfaces after loading. Numerical experiments, which considered only elastic deformation of asperity contacts, could not reproduce the increase in electrical resistance under pressure. Remaining pore spaces around asperities should be studied further through microstructural observations of fracture surfaces after loading.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地殻 流体 地震波速度 電気伝導度 亀裂

1. 研究開始当初の背景

地殻内の流体（主として水）は、地震発生においてカギとなる役割を果たしていると考えられている（例えば、Sibson, 2009）。地殻内部でどこにどれだけの量の流体が存在しているかを知ることは、地震活動など地殻ダイナミクスを理解する上で重要である。流体分布を知ることを目的として、地殻の地震波速度構造（例えば、Iidaka et al., 2015）や電気伝導度構造（例えば、Usui et al., 2021）が調べられてきたが、流体量を定量的には制約できていない状況であった。これは、地殻内の流体の形状についての理解が不十分であり、地殻の含水岩石に適用可能な弾性および電気伝導度の物理モデルが確立していないことに起因すると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上部・中部地殻条件での流体の形状を明らかにするとともに、地殻の含水岩石に適用可能な弾性および電気伝導度の物理モデルを構築することである。

3. 研究の方法

上部・中部地殻には様々なスケールのクラックが存在する。それらは地殻内の圧力により閉鎖しており、流体はそのクラックの「閉じ残り」に存在するはずである。本研究では、この「閉じ残り」の形状を理解するために、(1) クラック閉鎖に伴う物性変化に関する高圧実験、および(2) 圧力下でのクラック閉鎖に関する数値実験を行った。

(1) クラック閉鎖に伴う物性変化に関する高圧実験

亀裂をもつ岩石試料の含水状態での弾性波速度および電気抵抗を封圧下で測定した。圧力発生には、シリコンオイルを圧媒体とする圧力容器を使用した（最高封圧：150 MPa）。間隙流体圧は封圧と独立に制御できる。全ての実験において、間隙流体圧は大気圧に設定した。試料は、軸方向にほぼ平行に割れている庵治花崗岩の円柱試料（直径 26 mm、長さ 30 mm）である（図 1）。亀裂の隙間などの空隙は 0.1 mol/L 塩化カリウム水溶液で満たした。縦波（P 波）速度は亀裂に垂直な方向でパルス透過法により測定した。トランスデューサの中心周波数は 2 MHz である。電気抵抗は軸方向で 2 電極法により測定した。岩石試料を高圧容器に接続するためのステンレスエンドピースを電極として用いた。

いくつかの岩石試料では、ステンレスのスペーサーを用いて、亀裂に沿った 0.5 mm および 1.0 mm の剪断変位を与え、剪断変位の影響を調べた。また、弾性波速度のためのトランスデューサを用いて加圧時の AE 発生も観察した試料もある。

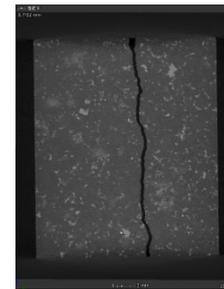
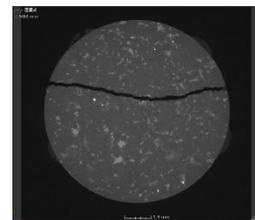


図 1 クラックをもつ試料 (b3cr03) の X 線 CT 画像

(2) 圧力下でのクラック閉鎖に関する数値実験

岩石試料の X 線マイクロ CT 画像から亀裂表面の 3 次元モデルを構築し、それを用いて亀裂閉鎖の数値実験を行った。X 線マイクロ CT 画像の取得には、富山県産業技術研究開発センター機械電子研究所所有の島津製作所製、inspeXio SMX-225CT FPD HR を使用した。亀裂閉鎖の数値実験には、トライボロジー分野のコミュニティが運営する Tribonet で公開されている TriboSolver を使用した。このアプリケーションの中の Half-space dry contact model を使用することによって、弾性変形による亀裂の閉鎖をシミュレートできる。

また、加圧前の亀裂の開口分布、および数値実験から得られる加圧時の開口分布から亀裂の電気抵抗を計算し、測定値と比較した。

4. 研究成果

(1) クラックの閉鎖に伴う物性変化に関する高圧実験

クラックをもつ含水岩石試料の P 波速度を封圧の関数として図 2 (a) に示す。比較のため、クラックのない試料 (intact) の P 波速度も示している。クラックのない試料の P 波速度は、低圧においては、含水状態が乾燥状態に比べて有意に大きな値をとる。圧力増加とともにその差は小さくなり、封圧 150 MPa 以上では有意な差はなくなる。これは岩石中に存在するマイクロクラック（ほとんどが開いた粒界）が、封圧増加とともに閉鎖していくことを反映していると考えられる。クラックをもつ含水岩石試料は、剪断変位がない場合 (0 mm) には、封圧 0.1~10 MPa でクラックのない含水試料に比べて有意に低い値をとるが、封圧 30 MPa 以上では有意な差は見られなくなる。一方、0.5 および 1.0 mm の剪断変位を与えたクラックをもつ含水試料は、常に剪断変位のない試料に比べて低い速度を示した。このことは、圧力を増加させてもクラック表面間の接触が良くなることを示している。ただし、剪断変位 0.5, 1.0 mm での速度の違いは、それ

ほど顕著ではなかった。

クラックをもつ含水試料の電気抵抗を封圧の関数として図 2 (b) に示す。比較のため、クラックのない含水試料の電気抵抗も示している。常圧において、クラックのある試料の電気抵抗はクラックのない抵抗に比べて 1 桁以上低い。クラックが電気伝導経路を支配していることを示している。クラックの有無にかかわらず、封圧増加に伴って電気抵抗は増加した。クラックのない試料と剪断変位なしの試料の電気抵抗の差は、封圧増加とともに小さくなるが、封圧 100 MPa 以上では差は変化しなくなった。一方、剪断変位の異なる試料では、圧力増加に伴って電気抵抗の差が大きくなる傾向がみられた。

P 波速度および電気抵抗の結果から、剪断変位を与えると、クラック表面の接触が悪くなるとともに、閉じ残りが増えることが分かった。

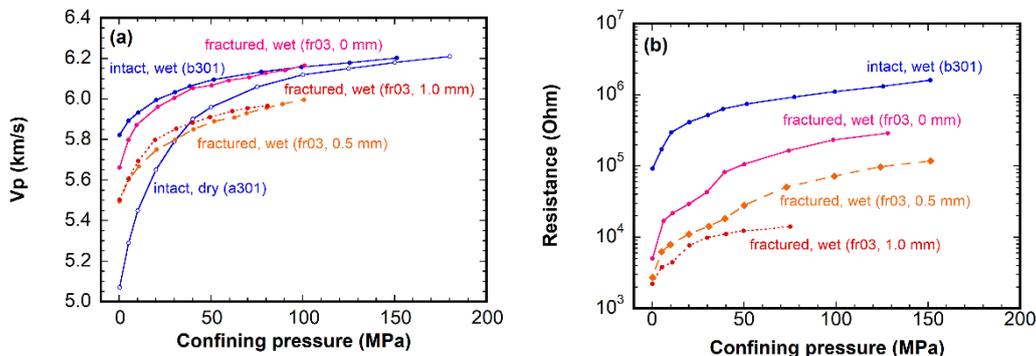


図 2 クラックをもつ岩石試料の P 波速度 (a) および電気抵抗 (b) の封圧に伴う変化

図 3 には、クラックの閉鎖実験に伴って観察された AE (積算回数) を示している。加圧時に回数が増加することから、圧力増加によるクラックの閉鎖は微小破壊を伴う変形により進行することが分かった。

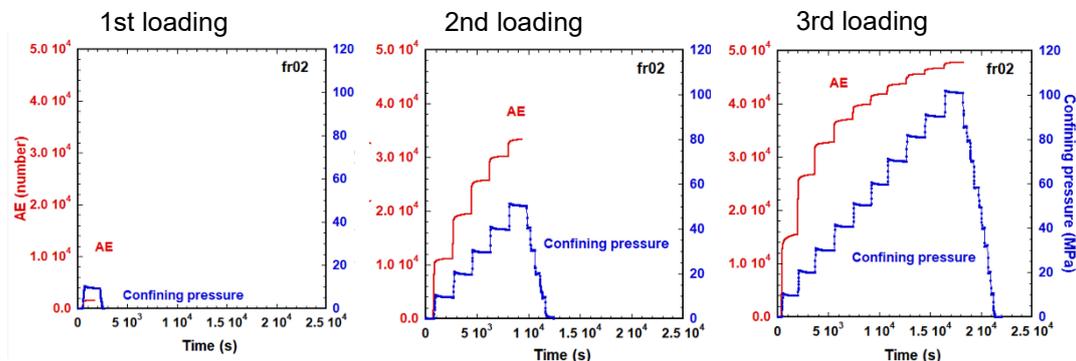


図 3 クラックをもつ含水試料(fr02)の閉鎖実験に伴って観察された AE

(2)

力下でのクラック閉鎖に関する数値実験

クラック閉鎖に関する数値実験では、ヤング率およびポアソン比をそれぞれ 86.0 GPa、0.24 とし、アスペリティ接触で弾性変形のみが生じる場合 (降伏応力 2 GPa) と降伏応力が低く (0.22 GPa) 塑性変形も生じる場合を考えた。図 4 に試料 fr02 についての電気抵抗の測定値と計算値を示す。常圧では、電気抵抗の測定値と計算値はよい一致を示している。弾性変形のみが生じる場合はクラック閉鎖が進まず、測定値よりもたいへん低い値を示す。降伏応力を下げて塑性変形が生じるようにすると、測定値に近い電気抵抗を示した。ただし、10 MPa を超える圧力ではクラックの開口がピクセルサイズ (54 μm) よりも小さくなり、現在のモデルの適用限界を超えるため、意味のある計算はできなかった。

弾性変形のみを考慮した場合の平均開口およ

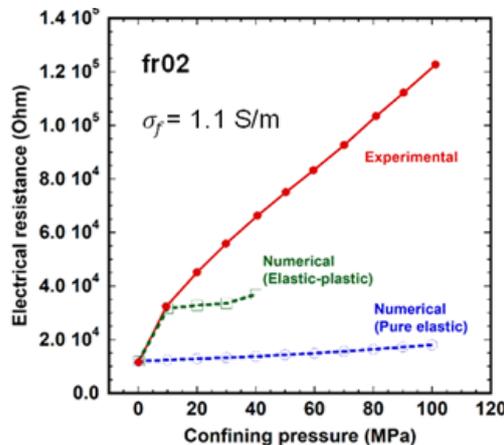


図 4 クラックをもつ含水試料 (fr02) の電気抵抗の圧力依存性

び接触面積の全面積に占める割合を図5に示す。接触面積の割合はほとんど変化せず、平均開口の変化も測定された電気抵抗の変化を生じるには不十分である。接触面積が全体の1%とすると、圧力が10 MPaの場合、接触部分には1 GPa程度の応力が生じている。これは接触部分で破壊により変形が進行していることを示唆しており、圧力増加に伴い AE 発生が観察されたことと矛盾しない。降伏応力を0.22 GPaにして圧力10 MPaでの電気抵抗を再現できたのは、その塑性変形が破壊で生じた接触部分の変形と同様の電気抵抗変化を生じるためであり、実際に塑性変形が起きているのではないだろう。

常圧および圧力10 MPaでのクラックの開口分布(a)および電流分布(b)、接触応力分布(c)を図6に示す。10 MPaでの開口分布は降伏応力を0.22 GPaとして得たものであり、測定された電気抵抗を与えるものである。高圧下のクラックは、(c)のように離散的なアスペリティ接触が生じている2つの面として捉えるべきであると考えられる。

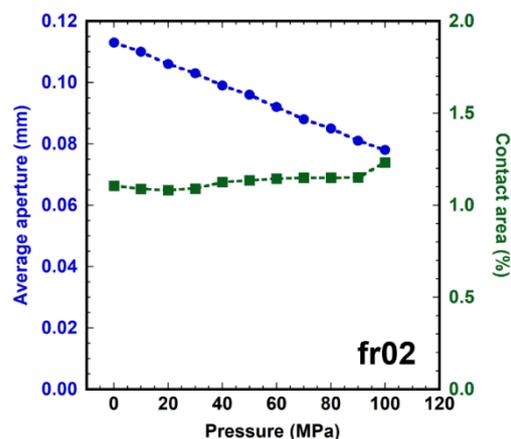


図5 圧力増加に伴う平均開口および接触面積の割合の変化(fr02)

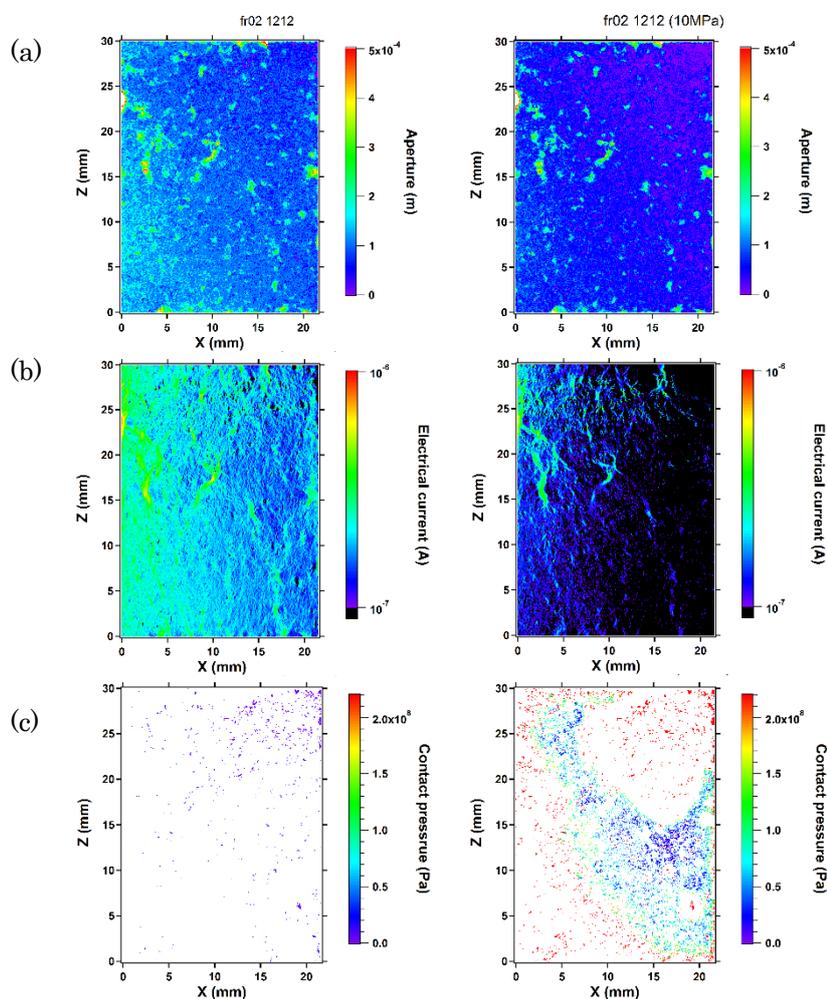
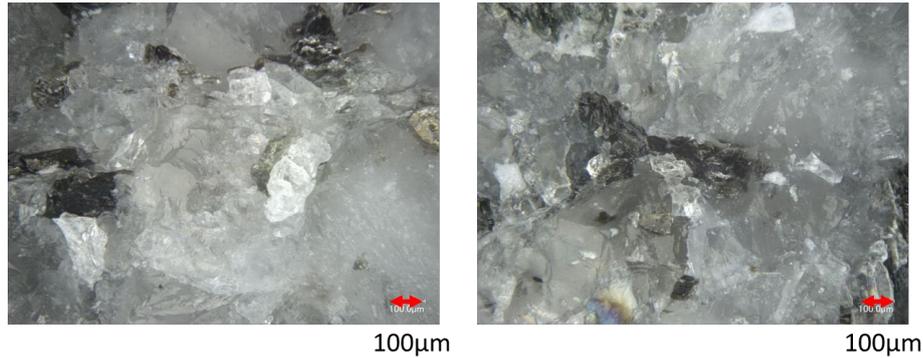


図6 0.1MPa (左) および10 MPa (右) における(a) 開口分布, (b) 電流分布, (c)接触応力分布。0.1 MPaはX線CT画像から構築したモデルであり、10 MPaはそのモデルを用いた数値実験によるものである。

(3) クラック表面の微細構造観察

クラック表面をデジタルマイクロスコープで観察すると、加圧後のクラック表面に多くの微小粒子 (<math>< 50 \mu\text{m}</math>) が見られた (図7)。アスペリティ接触部での微小破壊により生じたものと考えている。



(4) まとめと課題

図7 加圧前（左）および加圧後（100 MPa）（右）のクラック表面

圧力下でのクラック閉鎖に関する高圧実験および数値実験、クラック表面の微細構造観察より、圧力下でのクラック閉鎖は、アスペリティ接触部の微小破壊を伴う変形によって進行していることが分かった。圧力下のクラックは、離散的にアスペリティ接触が生じている2つの面として捉えるべきである。

破壊を伴うアスペリティの変形を理論的に扱うことは非常に難しい。変形の結果として生じるクラックの表面形状の観察から、クラック表面をどのような面として扱うべきかを検討すべきだろう。その際、今回用いた X 線マイクロ CT は、加圧による表面形状の変化を捉えるには分解能不足である。プロフィロメータ等を用いる高分解能の測定を行う必要がある。

引用文献

- Iidaka, T., Kurashimo, E., Iwasaki, T., Arai, R., Kato, A., Katao, H. and Yamazaki, F. (2015) Large heterogeneous structure beneath the Atotsugawa fault, central Japan, revealed by seismic refraction experiments. *Tectonophysics*, 657, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.031>
- Sibson, R. (2009) Rupturing in overpressured crust during compressional inversion – the case from NE Honshu, Japan. *Tectonophysics*, 473, 404-416.
- Usui, Y., Uyeshima, M., Ogawa, Y., Yoshimura, R., Oshiman, N., Yamaguchi, S., et al. (2021) Electrical resistivity structure around the Atotsugawa fault, central Japan, revealed by a new 2-D inversion method combining wideband-MT and Network-MT data sets, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126. E2020JB020904. [Hpppts://doi.org/10.1029/2020JB020904](https://doi.org/10.1029/2020JB020904)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tohru Watanabe, Hayato Hitotsumatsu
2. 発表標題 Competition between Grain Boundaries and a Fracture in Electrical Conduction
3. 学会等名 American Geophysical Union 2021 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayato Hitotsumatsu, Tohru Watanabe
2. 発表標題 Structure of pores in a fracture under pressure
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺 了
2. 発表標題 Fracture as an electrical conduction path under pressure
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------