

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04042

研究課題名(和文) 岩石中の亀裂分布・断層形成時の応力条件が断層の透水性におよぼす影響の解明

研究課題名(英文) Impacts of initial microfracture distributions and stress conditions on permeability of induced faults

研究代表者

上原 真一 (UEHARA, Shin-ichi)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：20378813

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)：岩石内部の微小亀裂分布を再現した模擬岩石試料を用いて、室内実験装置内部において応力条件下で断層を作成しながら、断層沿いの透水性を測定することで、微小亀裂分布が断層の内部構造(断層ガウジ帯とダメージゾーンの発達様式)および断層の透水性にどのように影響するかを明らかにすることを試みた。

その結果、変形前の岩石中の亀裂密度が高いほど、形成される断層のダメージゾーン幅は大きくなり、その結果断層沿いの透水性が高くなること、巨視的な破壊後の断層すべりにおける、断層コア部分の発達が顕著になることが明らかとなった。自然の断層においても、母岩の亀裂分布の違いが断層の透水性に影響する可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下の断層(割れ目沿いに地盤がずれた構造)は、他の部分に比べて隙間が大きくなったり、あるいは目が詰まったりするなどしているため、地下水の流れ方に影響を与える。そのため、断層沿いの水の流れやすさ(透水性)を評価することは、例えば石油工学、地熱発電開発、二酸化炭素の地中貯留、地殻内の物質循環、地震の発生メカニズムなど様々な分野を横断して重要な課題である。断層の透水性は様々な要因によって決まるが、元々の亀裂の分布の様子もその1つと考えられる。本研究では、元々の亀裂分布が、断層の内部構造(すべりによって粉碎された部分や、断層周辺の割れ目の分布など)の様子や透水性にどのように影響を与えるのかを調べた。

研究成果の概要(英文)：To investigate how the initial crack density affects damage zone structure and permeability of a fault, we operated axial deformation and flow experiments under confining pressure with rock specimens having various initial crack densities, and investigated the inner structure of deformed specimens.

The results indicated that, as an initial crack density is increased, a width of damage zone and fault permeability is increased, and development of fault gouge zone by fault sliding becomes more effective. This implies that crack density of host rock may influence inner structure and permeability of faults.

研究分野：構造地質学, 実験岩石力学

キーワード：断層 透水性 岩石室内実験 ダメージゾーン 断層ガウジ 破壊 亀裂 変形

## 1. 研究開始当初の背景

岩盤中に存在する断層沿いの流体の流れやすさ(透水性)を評価することは、例えば石油工学、地熱発電開発、二酸化炭素の地中貯留、地殻内の物質循環、地震の発生メカニズムなど様々な分野を横断して重要な課題であり、これまで関連した多くの研究が行われてきた。

断層の透水性は状況によって様々であり(例えば Uehara et al., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2012), どのような要因がその透水性を支配しているかを解明することは重要である。代表研究者らはこれまで、実験室で断層を形成しながら断層沿いの透水性を評価する実験を行い、岩石の物性(破壊する条件など)と断層形成時の応力条件によって、せん断変形に伴う断層の透水性の変化の様子が異なることを示した(例えば Uehara & Takahashi, *J. Struct. Geol.*, 2014)。この特徴の違いに影響する要素の一つに、断層の周辺部に分布する亀裂密度の高い領域(ダメージゾーン)の発達の様子が挙げられる。このダメージゾーンの形成が、どのような要素にどのように影響され、その結果透水性にどのように反映されるかを解明することは重要である。

## 2. 研究の目的

この研究では、岩石内部の微小亀裂分布を再現した模擬岩石試料を用いて、室内実験装置内部において応力条件下で断層を作成しながら、断層沿いの透水性を測定することで、微小亀裂分布が断層の内部構造(断層ガウジ帯とダメージゾーンの発達様式)および断層の透水性にどのように影響するかを明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

変形後試料の内部に生成したせん断変形構造を小断層と捉え、それが生成する条件と、変形前後の透水性、断層の内部構造について、系統的に調べた。変形・透水実験には、インド産の砂岩(石英 68.2%, 斜長石 9.5%, カリ長石 18.2%, 雲母 0.7%, その他 3.3%。高知コア研究所より情報提供)を、直径 20 mm, 長さ 50 mm の円柱形に整形したものを用いた。初期亀裂の分布の条件を再現することを目的として、整形後に 650°C に加熱し、加熱炉内に静置し徐冷した試料(650°C\_slow; 間隙率 11.7%), 650°C に加熱し、氷水に入れ急激に冷却した試料(650°C\_rapid; 間隙率 13.2%), および未加熱試料(Intact; 間隙率 11.5%)の3種類を用意した。それぞれの試料について、応力ひずみ曲線において、応力の大幅な低下後、ただちに軸変位を止めた実験(SD シリーズ)と、応力の低下後、軸ひずみで約 1% の変形をしたのち、軸変位を止めた実験(LD シリーズ)の2種類を実施した。軸ひずみ速度は  $1 \times 10^{-5}$  /s とし、 $P_c = 10$  MPa で実験をおこなった。変形の前後では透水実験をおこなった。

実験後、それぞれの実験試料について、薄片試料を作成し、偏光顕微鏡と走査電子顕微鏡を用いた観察から、断層コアの幅の計測と、断層コアからの距離に対する亀裂密度の導出をおこなった。亀裂密度の導出では、薄片試料の中央付近に、破断面に対して平行な、長さ約 1.5 mm の線分 1 を、薄片試料の側面に至るまで約 0.5 mm 間隔で引いた。線分 1 上に存在する石英粒に、ランダムな角度の線分 2 を引き、線分 2 上に存在する亀裂の総数を、線分 2 の長さの合計で割ることで、その地点での亀裂密度とした。

## 4. 研究成果

### (1) 断層の内部構造

650°C\_slow シリーズでは、SD と LD とで断層コア幅に違いは見られなかったが、650°C\_rapid シリーズでは、SD に対し LD の断層コア幅は約 1.5 倍となった(表 1)。

650°C\_slow シリーズと 650°C\_rapid シリーズのどちらについても、データのばらつきはあるものの、断層コア付近では亀裂密度が高く、断層コアから離れるにつれ低下し、ある一定の値になる、という傾向が見られた(図 1)。650°C\_slow シリーズでは、SD・LD とともに亀裂密度の最大値やダメージゾーン幅、断層コアから十分に離れた領域(バックグラウンド)での亀裂密度の平均値はほとんど同じとなった。650°C\_rapid シリーズでは、LD では 3 つのパラメータが明確に判断できたが、SD ではデータのばらつきが大きく、判断ができなかった。LD 同士で比較すると、650°C\_rapid のダメージゾーン幅は、650°C\_slow の約 2 倍となった。

表 1 断層ガウジ幅の計測結果

断層コア幅 (mm)			
	Intact	650°C_slow	650°C_rapid
SD	0.39 ± 0.05	0.22 ± 0.07	0.20 ± 0.07
LD	0.18 ± 0.06	0.24 ± 0.06	0.31 ± 0.09

## (2) 透水係数

変形前試料の透水係数は、650°C\_rapid, 650°C\_slow, Intact の順に高かった。これは、変形前の岩石の亀裂密度の違いを反映したためであると考えられる。変形前後での透水係数を比較すると、Intact ではほとんど変化が見られなかったが、650°C\_slow と 650°C\_rapid では増加した (図2)。

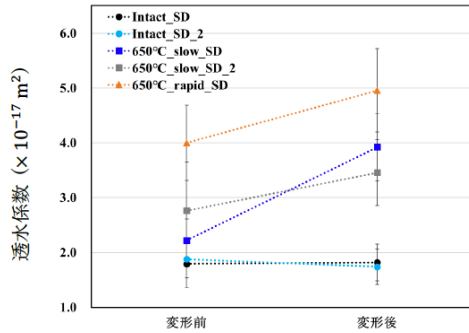


図2 変形前後の透水係数

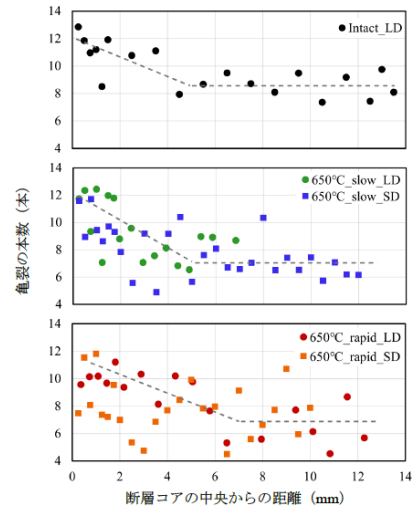


図1 断層コアの中央からの距離に対する、粒内亀裂密度 (測線単位長さあたりの、交差した亀裂の本数)

## (3) 考察：微小亀裂分布の影響

これらの結果から、変形前の岩石中の亀裂密度が高いほど、① 形成される断層のダメージゾーン幅は大きくなり、その結果断層沿いの透水性が高くなること、② 巨視的な破壊後の断層すべりにおける、断層コア部分の発達が顕著になること、が明らかとなった (図3)。自然の断層においても、母岩の亀裂分布の違いが、主に断層のダメージゾーンの幅に影響を与え、透水性を決定づける可能性が示唆された。

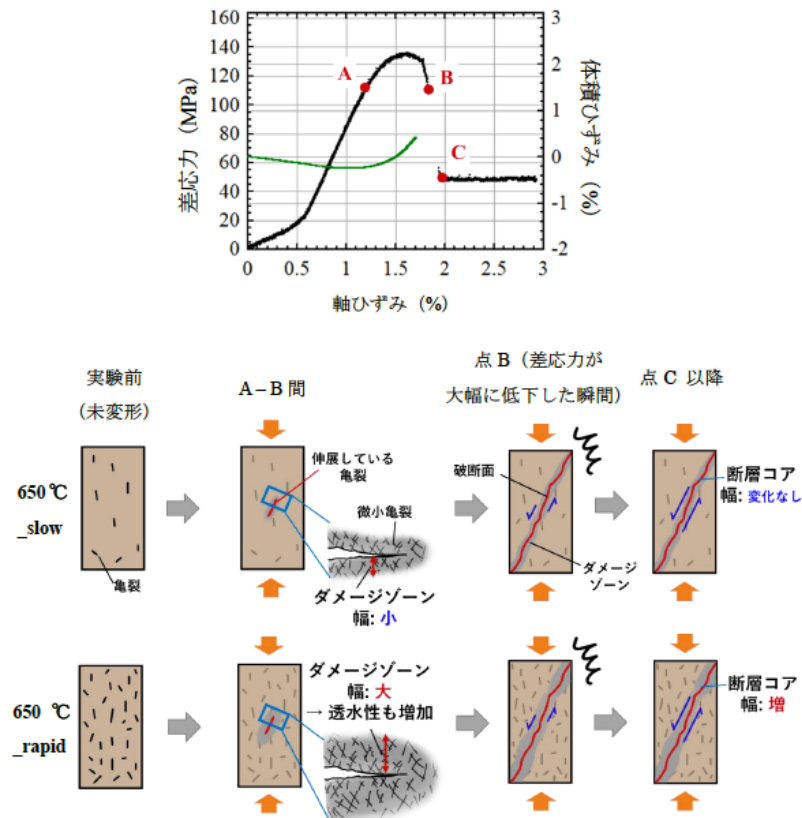


図3 軸ひずみに対する差応力と体積ひずみの変化 (上) と、変形に伴う内部構造の変化についての概念図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 菊池結花、上原真一
2. 発表標題 岩石中の初期亀裂分布がせん断破壊時の内部構造および透水性に与える影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池結花、上原真一、溝口一生
2. 発表標題 初期亀裂の分布が断層帯の内部構造と透水性に与える影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学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
---------	---------