

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04041

研究課題名(和文)天然変形岩から評価する地殻の塑性変形強度

研究課題名(英文)Plastic strength of the crust evaluated from naturally deformed rocks

研究代表者

福田 惇一 (Fukuda, Junichi)

大阪公立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10726764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：断層深部の地下10数km以浅までは、岩石鉱物は破壊を伴う変形の脆性変形が起こり、以深では伸びる変形の塑性変形が起こる。岩石鉱物の塑性変形は不純物として含まれる水により促進される。しかし、岩石鉱物の塑性変形と水の挙動との関係はよく分かっていない。

本研究では、塑性変形を被った天然花崗岩中に含まれる石英中の含水量を測定した。その結果、塑性変形が進展し、細粒な石英が生成すると、その領域での含水量は近傍の元の石英粒子よりも低いことが分かった。このことは、実際の断層内部で石英の塑性変形に伴う粒径減少により、石英内部から水が放出されて断層内に分布していくことを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

断層深部で起こる塑性変形は、上部地殻に歪を蓄積させ、歪の解放が地震となる。このように塑性変形は地震発生の前駆運動として振る舞う。

塑性変形は岩石鉱物に不純物として含まれる水により促進されるため、塑性変形を被った水の量や分布を測定することは重要である。本研究では地殻の主要構成鉱物である石英の塑性変形の進展と含水量分布の変化を明らかにした。また、岩石変形実験により、長石試料中に水を加えることによって、塑性変形が促進されることを見出した。このことは、実際の地殻内部において、水のパーエーションによって、塑性変形挙動が異なることを示唆する。

研究成果の概要(英文)：Within the depth at shallower than 8-12 kilometers in fault zones, rocks and minerals are deformed by fracturing; this type of deformation is called brittle deformation. On the other hand, at the greater depth, rocks and minerals are deformed by stretching; this type of deformation is called plastic deformation which accommodates permanent strain. Plastic deformation of rocks and minerals is enhanced by the presence of water as impurities.

In this study, we measured water contents and distributions in plastically deformed quartz in granite mylonite samples. In the samples, fine-grained quartz is formed by development of plastic deformation (dynamic recrystallization). We found that the water contents in the fine-grained quartz regions are lower than those in the adjacent original quartz grains. This suggests that water is released from grain interiors of quartz due to the grain size reduction process and released water distributes within the fault zone.

研究分野：構造地質学、岩石力学

キーワード：地殻 石英 長石 塑性変形 水 天然 実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大陸地殻の断層帯内部において、深度 10 数 km までは脆性変形が卓越し、以深では塑性変形が卓越する。塑性変形の進展に伴い、上部地殻へ歪が集中し、それが岩石の破壊により解放されるとき地震が発生する。このように塑性変形は地震の前駆運動として働くため重要な機構である。

塑性変形は岩石鉱物に不純物として取り込まれている「水」によって促進される。しかし、岩石鉱物の含水量およびその分布と、塑性変形に寄与する応力、歪速度などのパラメータや発達する組織との関係性についてよく分かっていない。

### 2. 研究の目的

#### (1) 天然塑性変形岩試料の組織観察と含水量分析 (以下「天然」の項目)

過去に断層運動により主に塑性変形を被った天然の花崗岩試料を用い、試料に含まれる主要構成鉱物である石英に注目する。試料の組織観察と赤外分光法を用いた石英の含水量分析から、石英の塑性変形による組織発達と含水量分布を評価する。

#### (2) 岩石変形実験による水と塑性変形との関係性の評価 (以下「実験」の項目)

上記の天然試料の分析に加えて、実験として、大陸地殻の主要構成鉱物である長石に注目し、無水長石多結晶体に加える水の量を変化させ、温度、圧力、応力、歪速度と発達する組織との関係性を評価する。

以上の結果から、断層帯内部において、塑性変形への水の効果と、塑性変形による組織発達と水の挙動について考察する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 天然

天然試料として、阿武隈山地双葉断層の東側に産出する塑性変形を被った割山花崗岩マイロナイトを用いた。同試料は野外調査から、東西範囲約 500 m において、ほぼ非変形で典型的な花崗岩の組織を示す試料から連続的に塑性変形が進展し、強く面構造が発達する試料へと変化する。

これらの非変形割山花崗岩からマイロナイトに含まれる石英について、偏光顕微鏡を用いて、塑性変形の進展に伴う動的再結晶による粒径変化を観察した。そして、赤外分光法を用いて、このような石英の組織変化に伴う含水量分布変化を分析した。

#### (2) 実験

石英と並んで地殻の主要構成鉱物である長石について、数  $\mu\text{m}$  からなる細粒灰長石集合体を準備した。固体圧変形試験機を用いて、試料に水を 0 から 0.5 wt% と変化させて加えて剪断変形実験を行った。各添加した水の量に応じて、脆性変形から塑性変形への進展を評価し、発達する微細組織を観察した。

### 4. 研究成果

#### (1) 天然

偏光顕微鏡観察により、ほぼ非変形の割山花崗岩では、最大 2 mm 程度の石英粒子 (ホスト石英粒子) が見られ、わずかな変形の作用として、粒界に約 10  $\mu\text{m}$  程度の動的再結晶粒子が発達している (図 1)。一方、マイロナイト試料では、ホスト石英粒子は伸長し、それら周囲には数百  $\mu\text{m}$  領域において約 10  $\mu\text{m}$  の動的再結晶粒子が発達している。動的再結晶粒径古応力計により、この粒径は数十 MPa の応力を与える。さらに塑性変形が発達した試料では、動的再結晶粒子の領域が発達し、岩石基質を構成する。

赤外分光法を用いて、ホスト石英粒子と近傍に発達する動的再結晶石英領域を面分析した (図 2)。ホスト石英粒子内部と動的再結晶石英領域中の水は、共に 2800-3800  $\text{cm}^{-1}$  の波数に幅広い吸収帯を示す。この吸収帯の形状から、水は  $\text{H}_2\text{O}$  流体として含まれていることが分かる。また、 $\text{H}_2\text{O}$  流体はホスト石英粒子内部では流体包有物として含まれていることが偏光顕微鏡観察からも確認できる。動的再結晶領域では、個々の粒子の粒径は約 10  $\mu\text{m}$  と小

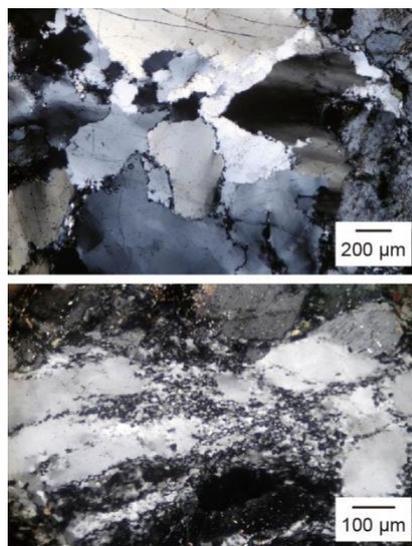


図 1 割山花崗岩の石英集合領域の偏光顕微鏡像。ほぼ非変形 (上) とマイロナイト (下)。Fukuda et al. (2023) を改変。

さいため、測定された H<sub>2</sub>O 流体は、流体包有物として保持されていることに加えて、より多くの流体を保持できる粒界に保持されていると考えられる。赤外スペクトルにおいて、2800–3800 cm<sup>-1</sup> の波数に見られた水の吸収帯の積分強度を含水量に換算した。その結果、含水量はホスト石英粒子内部と動的再結晶領域で明瞭に異なる。ホスト石英粒子内部の含水量は 40–1750 wt ppm H<sub>2</sub>O と不均質で幅広い含水量を示すことに対して、動的再結晶領域では 100–510 wt ppm H<sub>2</sub>O と、含水量は低く、均質に分布している。さらに、ホスト石英粒子近傍の動的再結晶機構が進展中である亜粒子領域の含水量は中間的な値を示す。以上の結果から、ホスト石英粒子内部の水は、マグマからの結晶時に取り込まれた水で、変形条件下では平衡に存在していないと考えられる。これは石英粒子内部の水の拡散速度が小さいことを意味する。そして、石英中の水は動的再結晶の進展と共に、拡散速度の大きい粒界が形成されることにより、系の水と平衡状態になるために放出されることが示唆される。この現象は、断層内部における水の挙動と分布を考える上で重要な知見を与えた。

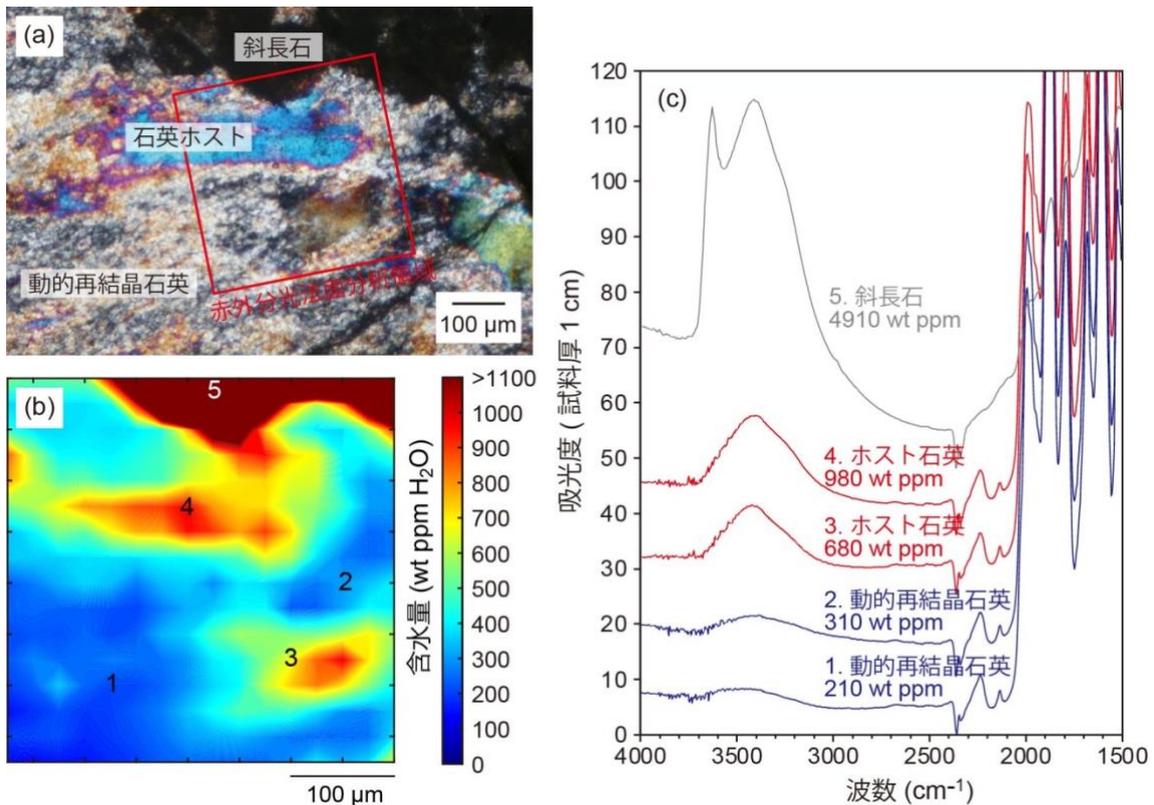


図2 割山花崗岩マイロイトの赤外分光法分析結果。(a)偏光顕微鏡像。試料の厚みは約 100 μm。(b)含水量分布。数字 1-5 の箇所を生赤外スペクトルを (c) に示す。Fukuda et al. (2023) を改変。

## (2) 実験

固体圧変形試験機を用いて、数 μm からなる無水の灰長石多結晶体に水を加えて剪断変形実験を行った。実験条件は温度 900°C、圧力 1.0 GPa、剪断歪速度を 10<sup>-3.5</sup>、10<sup>-4.0</sup>、または 10<sup>-4.5</sup>/秒で、試料重量に対して水を 0–0.5 wt% と変化させて加えた実験を行い、応力-歪の関係を示す力学データを測定した (図 3)。

力学データにおいて、添加した水の量が、0、0.1、0.3 wt% の場合は、いずれも最大剪断強度は高く、約 500 MPa であった。一方、添加した水の量が 0.5 wt% の場合のみ、剪断歪速度を減少させた各実験を比較すると、系統的に剪断応力が減少した。10<sup>-3.5</sup>/秒の剪断歪速度の場合は、最大剪断応力は 410 MPa で、剪断歪が 1.4 のとき、310 MPa まで減少した。10<sup>-4.0</sup>/秒の剪断歪速度の場合は、最大剪断応力は 380 MPa、その後 180 MPa と大きく減少した。10<sup>-4.5</sup>/秒の剪断歪速度の場合は、最大剪断応力は最も低く、30 MPa で、その後 10 MPa まで減少した。

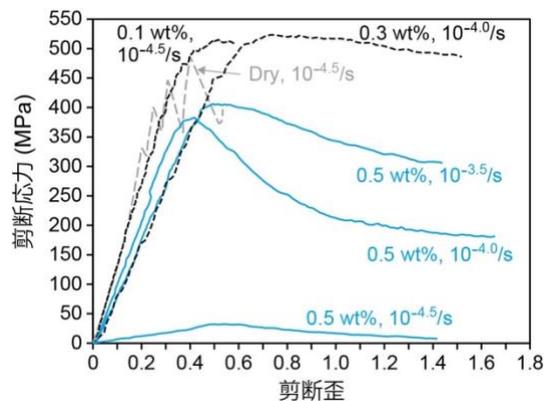


図3 灰長石多結晶体の変形実験による力学データ。温度 900°C、圧力 1.0 GPa。図中に添加した水の量と歪速度を示す。Fukuda et al. (2022) を改変。

実験回収試料の偏光顕微鏡観察から、添加した水の量が 0.3 wt%以下では灰長石試料中には割れが卓越し、脆性変形により変形したことを示す(図4)。このことは添加した水の量が 0.3 wt%以下での実験で共通して高い剪断応力を説明する。一方、添加した水の量が 0.5 wt%のとき、試料中には割れはあまり見られず、塑性変形(連続的な変形という意味では延性変形)が卓越したことを示す。このことは、力学データで剪断歪速度の減少と共に、系統的な剪断応力の減少を説明する。また、試料中の Ni 歪マーカは、試料下部で剪断歪の集中を示す(図4)。この剪断歪集中領域の発達は、力学データで、最大剪断応力からの大きな減少を説明するのかもしれない。すなわち、その領域の強度が低いことを意味し、力学データの剪断応力減少に反映される。また、0.5 wt%を添加した試料は、水と灰長石との反応により生成したゼイサイトが見られ、歪マーカと平行に分布している。このような反応生成物の配列が偏光顕微鏡像での縞模様を形成する。

赤外分光分析により実験回収試料中の水を測定した。その結果、添加した水の量の量が 0 から 0.5 wt%と増加することによって、灰長石の含水量は 0 から 0.2 wt%と系統的に増加した。水の吸収帯は図2と同様に、 $2800\text{--}3800\text{ cm}^{-1}$ の波数領域に幅広い吸収帯を示すことから  $\text{H}_2\text{O}$  流体として存在していることが分かり、灰長石多結晶体の粒界に多く存在していると考えられる。

以上の力学データ、微細組織観察、含水量分析の結果から、添加する水の量の増加と共に、試料内部により多くの水がおそらく拡散により導入され、塑性変形強度が下がることを示唆される。この結果は、実際の地殻内部においても、系の水の量に応じて、塑性変形の局所化が起こっていることを示唆する。

上記の成果以外にも、水を含む石英多結晶体の粒成長則を実験的に決定し、地殻内部における温度圧力条件下において、地質学的スケールでの粒成長について議論した(Fukuda et al. 2019)。また、その他の天然試料として、三波川変成岩に含まれる石英の含水量分布が、割山花崗岩中の石英のそれと調和的であることが分かった(Fukuda and Shimizu 2019)。三波川変成岩の場合は、石英粒径が  $30\text{--}150\text{ }\mu\text{m}$  と割山花崗岩中の動的再結晶石英粒径の  $10\text{ }\mu\text{m}$  よりもより大きい。このような粒径の違いと含水量との関係や、外部から水が導入される場合などについて今後理解する必要がある。

以上のように、本研究では「地殻物質の変形と水」に焦点を当て、天然試料と実験の双方の観点から水が変形に与える影響が評価でき、当初から目指していた成果が十分に得られた。

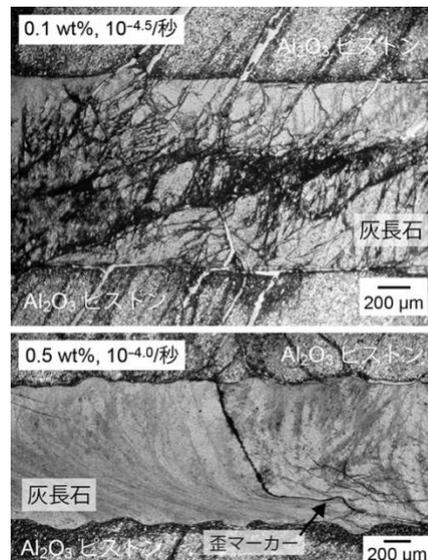


図4 剪断変形実験後の灰長石多結晶試料。添加した水の量と剪断歪速度を左上に示す。Fukuda et al. (2022)を改変。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Junichi Fukuda, Takamoto Okudaira, Yukiko Ohtomo	4. 巻 14
2. 論文標題 Water release and homogenization by dynamic recrystallization of quartz	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Solid Earth	6. 最初と最後の頁 409 ~ 424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/se-14-409-2023	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 -
1. 著者名 Junichi Fukuda, Jun Muto, Sanae Koizumi, Sando Sawa, Hiroyuki Nahagahama	4. 巻 156
2. 論文標題 Enhancement of ductile deformation in polycrystalline anorthite due to the addition of water	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural Geology	6. 最初と最後の頁 104547 ~ 104547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsg.2022.104547	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masayuki Hyodo, Kenta Banjo, Tianshui Yang, Shigehiro Katoh, Meinan Shi, Yuki Yasuda, Jun-ichi Fukuda, Masako Miki, Balazs Bradak	4. 巻 7
2. 論文標題 A centennial-resolution terrestrial climatostratigraphy and Matuyama-Brunhes transition record from a loess sequence in China	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 No. 26 (1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-020-00337-z	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
1. 著者名 Junichi Fukuda, Hugues Raimbourg, Ichiko Shimizu, Kai Neufeld, Holger Stunitz	4. 巻 10
2. 論文標題 Experimental grain growth of quartz aggregates under wet conditions and its application to deformation in nature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Solid Earth	6. 最初と最後の頁 621-636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/se-10-621-2019	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

1. 著者名 Jun-ichi Fukuda, Ichiko Shimizu	4. 巻 71
2. 論文標題 Water distribution in quartz schists of the Sanbagawa Metamorphic Belt, Japan: infrared spectroscopic mapping and comparison of the calibrations proposed for determining water contents	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1117-4	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 -

1. 著者名 Masayuki Hyodo, Takuroh Sano, Megumi Matsumoto, Yusuke Seto, Balazs Bradak, Kota Suzuki, Jun-ichi Fukuda, Meinan Shi, Tianshui Yang	4. 巻 125
2. 論文標題 Nanosized Authigenic Magnetite and Hematite Particles in Mature Paleosol Phyllosilicates: New Evidence for a Magnetic Enhancement Mechanism in Loess Sequences of China	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB018705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 福田惇一、奥平敬元、大友幸子
2. 発表標題 石英の動的再結晶の発展と含水量の変化
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 兵頭 政幸、番匠 健太、楊 天水、加藤 茂弘、時 美楠、安田 裕紀、福田 惇一、三木 雅子、ブラダック バラージュ
2. 発表標題 Centennial-resolution terrestrial climatostratigraphy and Matuyama-Brunhes transition from a loess sequence in China
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun-ichi Fukuda, Hugues Raimbourg, Ichiko Shimizu, Kai Neufeld, Holger Stunitz
2. 発表標題 Normal grain growth of quartz by experiment and discussion on the effect of grain size reduction by deformation in natural conditions
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪公立大学大学院 理学研究科 地球学専攻 福田惇一 ホームページ  <a href="http://sun4.gmob.jp/quartz.feldspar/">http://sun4.gmob.jp/quartz.feldspar/</a></p> <p>ResearchGate  <a href="https://www.researchgate.net/profile/Junichi-Fukuda-4">https://www.researchgate.net/profile/Junichi-Fukuda-4</a></p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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		
フランス	オルレアン大学		
ノルウェー	トロムソ大学		