

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01297

研究課題名(和文) 花崗岩類の脆性-塑性遷移領域での力学挙動と地殻応力に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental Research on the mechanical behavior of brittle-ductile transition of the granitic crust and crystal strength

研究代表者

武藤 潤 (Muto, Jun)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40545787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの地殻のレオロジーモデルでは、地殻を構成する主要鉱物であり、最も低温で流動を始める石英を用いて、その強度が調べられてきた。しかし、上部地殻を構成する花崗岩類は、石英より強度の高い長石や圧的に強度低く異方的に変形する雲母などを含む多相系からなる。本研究は、国内最高圧となる固体圧式岩石変形試験機の作成し、石英-長石-黒雲母の多相系での変形実験から、脆性-塑性遷移付近での変形強度や変形機構、および歪の増加に伴う組織及び強度発達を解明する研究を行った。これらの実験から、これまでの主に石英を使った地殻のレオロジーモデルとも比較しうる岩石の脆性-塑性付近での変形挙動を明らかにすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで地殻応力や地震発生分布などを議論するレオロジー断面では、上部地殻の強度を花崗岩中で最も低温で流動変形を始める石英の変形特性で代表してきた。一方で、多相系岩石においては、その強度が歪や組成に応じて変化することが知られているが、歪の効果を含んだ多相系岩石のレオロジーモデルは未だ提案されていない。本研究において、多相系岩石の強度と各鉱物の微細組織と変形機構を歪の関数として定量的に評価したことで、より実際の構成岩石の変形特性に基づく上部地殻の強度モデルの構築が可能になり、物質科学に基づく地震サイクルモデルの構築などにも貢献する。

研究成果の概要(英文)：The strength of the continental crust has been investigated using the rheology of quartz, a principal constituent of the upper crust, and begins to flow at the lowest temperature. However, the granitic rocks consisting of the upper crust are composed of polymineralic, including feldspar, which is stronger than quartz, and biotite, which is significantly weaker than quartz. In this study, we created a rock deformation apparatus with solid-confining media targeting the highest pressure in Japan and conducted deformation experiments of the polymineralic rock samples, including quartz-feldspar-mica, to investigate the strength and deformation mechanism near the brittle-plastic transition. From these experiments, we succeeded in clarifying the deformation behavior of rocks near brittle-ductile transitions, comparable to the previously proposed rheological models of the upper crust based on quartz rheology.

研究分野：構造地質学

キーワード：上部地殻 脆性塑性遷移 レオロジー 地殻応力

### 1. 研究開始当初の背景

プレートテクトニクスの原動力である地殻応力が、数百 MPa という高い値か、数十 MPa 程度の低い値かという論争は、地殻応力問題として知られている (Zoback et al., 1987)。2011 年の東北沖地震後の観測から、その論争に決着をつける決定的なデータが出された。深さ 10 km 程度での内陸地震断層周辺は、流体の存在により強度が 40MPa 程度と低いことが推定された (Yoshida et al., 2015)。それより深い領域では、温度の上昇により、マイロナイトと呼ばれる流動 (塑性) 変形岩が形成される。マイロナイトの微細組織から見積もられた流動強度は、240 MPa 程度と高く (図 1; Behr and Platt, 2014)、申請者らが岩石力学的に推定した流動応力 (Muto, 2011; 武藤・大園, 2012) とともに調和的である。なお地殻応力とは、岩石を変形するために必要な地殻が支えることのできる応力の最大値のことであり、変形実験により得られる強度と同じ値をもち実験的に評価することができる。

地殻の脆性-塑性遷移領域は、内陸地震の破壊開始点となることが知られ、地表に露出した過去の剪断帯でも、マイロナイト中に地震の化石であるシェードタキライトの産出が報告されている。流動変形が卓越する条件で、どのように高速すべりが起こるのだろうか？またこの領域で、岩石はどの程度の強度を持つのだろうか？脆性-塑性遷移領域 (図 1 の ? 部) は、強度が最大となるため、地殻を構成する花崗岩類の実験は難しく、未だその変形機構や構成則 (応力と歪・歪速度の関係式) は不明である。脆性-塑性遷移領域は、岩石の強度が最も高くなるため、応力降下を伴うような破壊イベントを抑制し

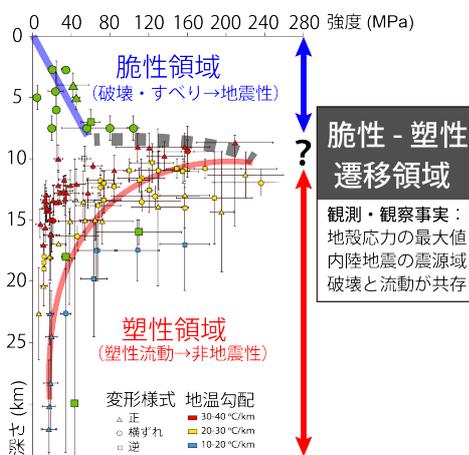


図 1. 武藤 (2017) による地殻の応力分布 (原図は Behr & Platt, 2014 GRL による)

つつ流動変形を起こすためには、高い封圧が必要になる。またこれまでは、石英や長石などの単相での変形実験が多く、石英-長石-雲母などを含む多相系の岩石の変形実験はあまり行われていない。

### 2. 研究の目的

地殻の広範な温度・歪速度を再現でき、かつ脆性-塑性遷移付近でも破壊を抑制しつつ流動変形の可能な高温・高压岩石変形実験機を作成し、実際の上部地殻の花崗岩を模擬した多相系岩石粉末試料の脆性-塑性遷移挙動の力学特性 (強度の歪速度、温度、圧力依存性) を調べる。

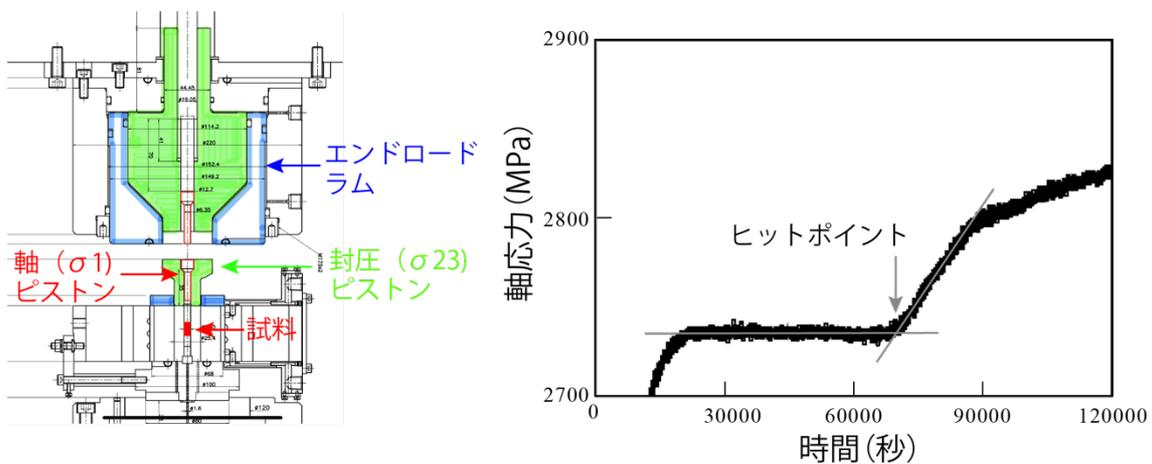
### 3. 研究の方法

本研究は、地殻の広範な温度・圧力・歪速度を再現できる変形試験機を作成し、花崗岩類を模擬したような複数鉱物からなる多相系の岩石変形実験から、脆性-塑性遷移での岩石の変形挙動 (力学特性、変形機構) を明らかにすることを目的とする。具体的には、以下の 3 ステップで、研究を推進した。①国内最高圧となる岩石変形試験機の作成し、②石英-長石の 2 相系の変形実験から脆性-塑性遷移付近での強度変化を解明、そして、③石英-長石-黒雲母の 3 相系での変形実験から、歪の増加に伴う花崗岩質剪断帯の組織及び強度発達を解明する研究を行った。

### 4. 研究成果

## 1) 国内最高圧となる固体圧変形試験機の作成

岩石の強度が最大となる脆性-塑性遷移付近での岩石の変形特性を明らかにするには、高い差応力下でも亀裂の発生を抑制し、流動変形を起こせる試験機の開発が必要である。岩石の流動に必要な差応力が封圧を上回ると、脆性変形が卓越することが経験的に知られている (Goetze's Criterion: Goetze and Evans, 1979)。これまでの研究では、上部地殻構成鉱物である石英の脆性-遷移付近での流動応力は 1.5 GPa を超えることが知られており、そのような条件で破壊を抑制しつつ流動変形を起こすには、国内最高封圧となる 3 GPa の封圧を発生可能な試験機を作成する必要がある。そこで、本研究では、圧力容器に上部からエンドロード（死荷重）を掛けることで、容器の破損を防ぐ機構を導入し、最大封圧 3 GPa が可能な変形実験装置を開発した (図 1a)。エンドロードなしでも封圧 2 GPa を達成可能な超硬鋼帯巻圧力容器を使い、圧力 2.5 GPa で行った予察の実験では、温度 1100°C を達成し、図 1b のような明瞭なヒットポイントを得ることができた。このことから、既存のアセンブリを使用したまま、封圧 2.5 GPa での変形実験が可能になった。これにより実際の上部地殻に近い高応力下での変形実験が可能になった。



## 2) 2相系（石英・長石）の変形実験

これまでの地殻のレオロジーモデルでは、地殻を構成する主要鉱物であり、最も低温で流動を始める石英を用いて、その強度が調べられてきた (Muto, 2011; 武藤・大園, 2012)。しかし、上部地殻を構成する花崗岩類は、石英より強度の高い長石を 30-50% 程度含んでいる。そこで本研究では、より実際の上部地殻に近い石英 50%—長石 50% の混合物を使った変形実験を行い、実際の地下の温度勾配・圧力勾配での変形実験から、その強度と変形機構を調べた。地温勾配と静岩圧勾配によって決めた 5 つの温度・圧力条件下 (それぞれ、7、8、10、13、18km に相当する) で剪断変形した試料を観察し、温度・圧力の変化による変形の遷移を調べた。

剪断歪速度  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  /s で行った変形実験から、温度・圧力の増加に伴い、強度は増加することが明らかになった。また今回行ったすべり速度条件においては、いずれの相当深度の条件でも、剪断応力はすべり速度とともに増加する速度強化特性を示すことが明らかになった (図 2)。光学顕微鏡による観察から、地殻浅部に相当する低温・低圧条件では、脆性的な組織が卓越し、より高温・高圧の深部条件ではより塑性的な組織が卓越する。電子顕微鏡画像を用いた画像解析から、試料中に発達した亀裂の抽出を行い、その長さ・方位分布を調べたところ、温度圧力の増加に伴い、低温・低圧での様々な方位を向く短い亀裂の卓越から、高温・高圧下での R1 および Y 剪断面に平行な亀裂の卓越への変化が見られた。また、ガウジ中に微量に含まれる白雲母はガウジ中で受動的に変形し、歪マーカーとなっていることから、その形状の自己相関関数 (ACF) を求めたところ、浅部条件での脆性変形による様々な方位を向いた伸長度の低い形状から、より深

部条件での塑性流動による歪楕円に調和的な方向に伸長した形状が得られた。これらの指標はまだ定性的なものであるが、温度、封圧の増加による相当深度が増加するにつれ、完全脆性的な変形から徐々に歪が集中していき、かつ、塑性変形の寄与が増えていくことを示している。しかし、図2が示すように未だ圧力依存性のある脆性挙動が卓越することから、当初目的とした塑性領域までを含む脆性塑性遷移の完全の実験的再現はいまだできていない。今後はさらに、深い領域（高温、高圧）での実験や本研究で開発した高間隙圧下での変形実験を行い、完全な脆性塑性遷移領域のカバーを目指す。

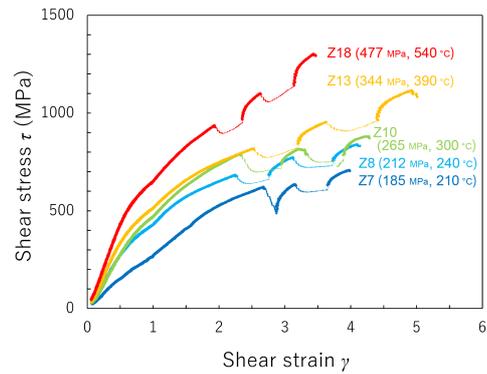


図3. 石英-長石からなるガウジの応力歪曲線。色は相当深度（圧力、温度）を示す。

### 3) 3相系（石英・長石・黒雲母）の変形実験

細粒の花崗岩類をもちいた剪断 変形実験を封圧:1.5 GPa、温度:800°C、歪速度: $10^{-5}$ /s の条件で剪断歪7程度までの変形実験を行った。試料は過去の研究（Holyoke and Tullis, 2006）でも用いられており、主に 20~30%石英、40~50%長石、20~40%黒雲母からなる Gneiss Minuti を使用した。すべての試料は $\gamma \sim 1$ 程度で降伏し、最大剪断強度は700~800 MPa程度であった。試料は降伏後、著しい歪軟化を示した（図4）。回収試料の微細組織観察から、剪断歪が3以上の試料では、試料中心に細粒の伸長した黒雲母の配列によって特徴づけられる剪断帯が形成され、その後の変形は剪断帯での黒雲母の底面すべりによって賄われていることが明らかになった。一方、剪断帯からはなれた部分では、剪断歪の増加により受動的に回転するが、結晶内塑性による変形は停止する。このことは、ある程度の歪量を被った大きな剪断帯中では、主すべり（剪断）面以外は、ほとんど変形が止まり、組織発達も停止することを示唆し、断層帯全体の強度も断層面を構成する弱い鉱物の強度で代表されるということを示している。剪断歪量の異なる3つの試料の電子顕微鏡組成像を用いた画像解析から、石英および黒雲母の形状を抽出した。歪の増加とともに、石英、黒雲母の伸長比は増加し、粒子の長軸は剪断方向へと回転し、多くの粒子がS面（最大伸長方向）に平行に配列する。変形に伴い、石英は動的再結晶(亜粒回転再結晶)によりもともとの粒子は多結晶・細粒化する。黒雲母も細粒化し、C面（剪断面）に沿うすべりとキンクバンドの発達が認められた。剪断歪が3以上の試料では、試料を貫く剪断帯が発達し、細粒化・伸長化が著しいが、剪断帯から離れた領域ではさらなる粒子の伸長・細粒化は起こらない。また石英・黒雲母のサイズは小さくなり、アスペクト比は大きくなる。このサイズは動的再結晶粒径ではなく各鉱物のドメインとしてのサイズであるため、歪とともに、各鉱物が伸長するだけではなく、剪断面の発達によって、千切れ細粒化することを意味している（図5）。また、これらの結果は、ある程度の歪量を被った剪断帯中では、剪断面以外ではほとんど変形がおこらず、組織発達も停止することを示唆している。この

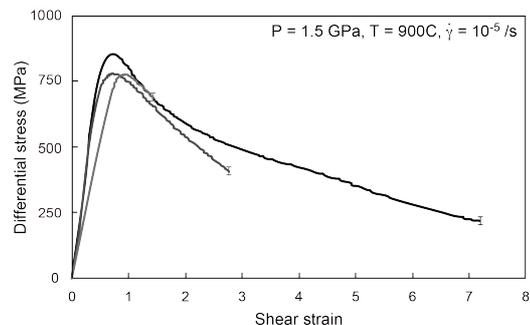


図4. 石英-長石-黒雲母を含む岩石の応力歪曲線

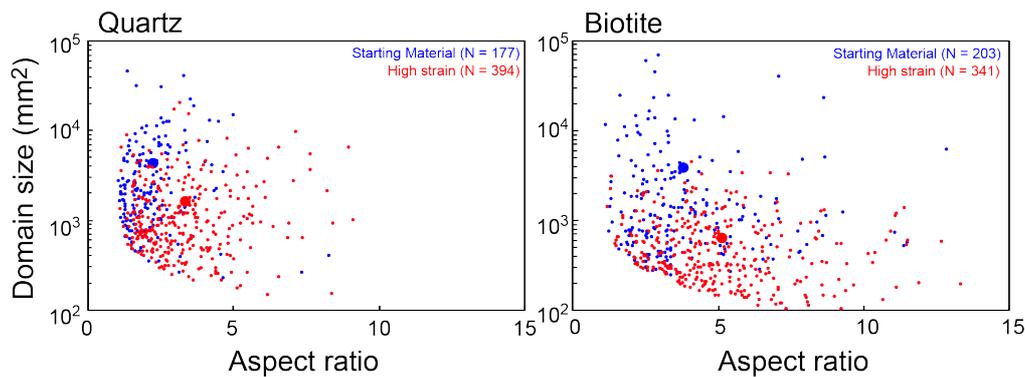


図 5. 電子顕微鏡組成 (COMPO) 像から得られた石英と黒雲母のサイズの変化

ことは、地質学的観察から報告されている剪断帯内での組織の不均質性に関して重要な示唆を持つ。つまり、断層形成直後のピーク強度に至る歪量が小さい条件においては、断層の強度は、石英-長石 (Load bearing minerals) の強度で代表されるが、ピーク強度以降は雲母鉱物の連結 (Interconnected weak layers) により歪の増加に伴い低下し、最終的に雲母の流動応力まで低下すると考えられる。上記のような断層強度の発達は、これまで定性的に知られてきた (Holyoke and Tullis, 2006) が、試料の歪を計測することのできる歪マーカーを使った本研究によって、より正確な岩石の組織発達・強度変化のモデル構築に貢献する、各鉱物の変形様式を温度・圧力・歪量の関数として定量的に記述することができた。今後は、各歪量での構成鉱物の変形機構を明らかにすることで、多相系岩石の強度発達に関する力学モデルの構築を目指す。

以上から、研究の3カ年において、国内最高圧となる固体圧変形実験機の開発を行い、この実験機を使った多相岩石の変形実験から、これまでの主に石英を使った地殻のレオロジーモデルとも比較しうる岩石の脆性-塑性付近での変形挙動を明らかにすることに成功した。しかし、多相系岩石を使った完全塑性領域までの変形特性や、歪の効果による組織発達および流体の効果などは、今後の課題と言えるだろう。

#### 引用文献

- Behr, W. M., and J. P. Platt (2014), Brittle faults are weak, yet the ductile middle crust is strong: Implications for lithospheric mechanics, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 8067–8075, doi:10.1002/2014GL061349.
- Goetze, C., Evans, B., 1979. Stress and temperature in the bending lithosphere as constrained by experimental rock mechanics. *Geophys. J. Roy. Astro. Soc.* 59, 463–478.
- Holyoke III. C. W. and J. Tullis (2006) Formation and maintenance of shear zones. *Geology*, 34, 105-108.
- Muto, J. (2011), Rheological structure of northeastern Japan lithosphere based on geophysical observations and rock mechanics, *Tectonophysics*, 503, 201–206.
- 武藤 潤・大園 真子 (2012) 東日本太平洋沖地震後の余効変動解析に向けた東北日本弧レオロジー断面. *地質学雑誌 特集号 (東北地方太平洋沖地震 — 統合的理解に向けて —)*, 118, 323-333.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T. (2015) Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations. *Tectonophysics*, 647–648, 63–72.
- Zoback et al. (1987) New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system, *Science*, 238(4830), 1105–1111.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 奥平敬元・豊島剛志	4. 巻 128
2. 論文標題 大陸下部地殻における破壊と延性剪断帯の形成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 747-760
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.747	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 MUTO Jun, KIDO Masanori	4. 巻 128
2. 論文標題 Flow of Lower Crust and Upper Mantle Inferred from Geological and Geophysical Observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 731 ~ 745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.731	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 Muto J., Moore J. D. P., Barbot S., Iinuma T., Ohta Y., Iwamori H.	4. 巻 5
2. 論文標題 Coupled afterslip and transient mantle flow after the 2011 Tohoku earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaaw1164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaw1164	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 Fukuda Jun-ichi, Muto Jun, Nagahama Hiroyuki	4. 巻 70
2. 論文標題 Strain localization and fabric development in polycrystalline anorthite+melt by water diffusion in an axial deformation experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0776-2	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 Iwata Daichi, Nagahama Hiroyuki, Muto Jun, Yasuoka Yumi	4. 巻 8
2. 論文標題 Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-31341-5	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 Athurupana Bhatiya, Muto Jun, Nagahama Hiroyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of quartz ribbons in felsic granulites under strong coaxial deformation in the Highland Complex of Sri Lanka	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The structural geology contribution to the Africa-Eurasia Geology	6. 最初と最後の頁 33 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-01455-1_8	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 Jayawickrama Eranga Gayanath, Tamai Hayata, Muto Jun, Nagahama Hiroyuki	4. 巻 84
2. 論文標題 Pressure dependence of elastic deformation at multiple contacts and estimation of contact state of thin cracks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GEOPHYSICS	6. 最初と最後の頁 WA153 ~ WA160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/geo2018-0501.1	査読の有無 無
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 Nagaya Takayoshi, Okamoto Atsushi, Oyanagi Ryosuke, Seto Yusuke, Miyake Akira, Uno Masaoki, Muto Jun, Wallis Simon R.	4. 巻 105
2. 論文標題 Crystallographic preferred orientation of talc determined by an improved EBSD procedure for sheet silicates: Implications for anisotropy at the slab-mantle interface due to Si-metasomatism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 873 ~ 893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7006	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 Hirauchi Ken ichi, Yoshida Yoshiaki, Yabe Yasuo, Muto Jun	4. 巻 21
2. 論文標題 Slow Stick Slip Failure in Halite Gouge Caused by Brittle Plastic Fault Heterogeneity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GC009165	査読の有無 無
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 Shigematsu Norio, Ohtani Tomoyuki, Kobayashi Kenta, Okudaira Takamoto, Toyoshima Tsuyoshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Architecture of onshore fault zones	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 759 ~ 775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2018.0004	査読の有無 無
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 Soda Yusuke, Okudaira Takamoto	4. 巻 30
2. 論文標題 Microstructural evidence for the deep pulverization in a lower crustal meta-anorthosite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Terra Nova	6. 最初と最後の頁 399 ~ 405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ter.12355	査読の有無 無
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 Soda Yusuke, Harigane Yumiko, Kajimoto Keisuke, Okudaira Takamoto	4. 巻 108
2. 論文標題 Crystallographic preferred orientations of plagioclase via grain boundary sliding in a lower-crustal anorthositic ultramylonite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 2057 ~ 2069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00531-019-01749-z	査読の有無 無
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 Soda Yusuke, Matsuda Taku, Kobayashi Sachio, Ito Motoo, Harigane Yumiko, Okudaira Takamoto	4. 巻 105
2. 論文標題 Reversely zoned plagioclase in lower crustal meta-anorthosites: An indicator of multistage fracturing and metamorphism in the lower crust	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1002 ~ 1013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7284	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 荒井 駿、武藤 潤、奥平 敬元、岩田 大地
2. 発表標題 Image analysis on experimentally sheared granitic rocks: Shear zone development at brittle-ductile transition zone
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okudaira T, Soda Y
2. 発表標題 Formation and development of lower crustal shear zones: A petrological perspective
3. 学会等名 International Symposium on Crustal Dynamics 2 (ISCD-2), Uji (Kyoto) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Norio SHIGEMATSU, Koichiro FUJIMOTO, Masao. KAMETAKA, Takamoto OKUDAIRA, Hiroshi MORI, Simon WALLIS
2. 発表標題 Recent Studies along the Median Tectonic Line (MTL) in the Eastern Kii Peninsula, SW Japan
3. 学会等名 International Symposium on Crustal Dynamics 2 (ISCD-2), Uji (Kyoto) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Arai, S., Muto, J. and Kido, M.
2. 発表標題 Microstructural development and strain partitioning in experimentally-sheared granitic rocks at brittle ductile transition zone
3. 学会等名 International Symposium on Crustal Dynamics 2 (ISCD-2), Uji (Kyoto) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Soda, Y. Okudaira T
2. 発表標題 発表] Fracturing of plagioclase grains: Roles for deformation mechanism and fluid pathway at lower crust
3. 学会等名 International Symposium on Crustal Dynamics 2 (ISCD-2), Uji (Kyoto) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒井 駿、武藤 潤、木戸正紀
2. 発表標題 Griggs 型変形試験機を用いた花崗岩質岩石の脆性 - 塑性 遷移付近における力学的性質の解明
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 曾田祐介・鍛冶本佳亮・針金由美子・奥平敬元
2. 発表標題 褶曲した斜長岩マイロナイト中の斜長石定向配列
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥平敬元・曾田祐介・豊島剛志
2. 発表標題 下部地殻の変形と延性剪断帯の形成
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. A. Verberne, S. Arai, M. Takahashi, J. Muto
2. 発表標題 Simulated quartz-feldspar faults sheared under conditions spanning the brittle-plastic transition
3. 学会等名 7th International Conference on Coupled THMC Processes in Geosystems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川美穂、B. A. Verberne、武藤潤、高橋美紀、長濱裕幸
2. 発表標題 脆性 - 延性遷移領域における石英長石質断層の変形
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
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
研究分担者	奥平 敬元  (Okudaira Takamoto)  (20295679)	大阪市立大学・大学院理学研究科・教授   (24402)	

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
---------	---------