

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870912

研究課題名(和文)不均質媒体応力環境下の滑り伝播に伴う割れ目形成の実験的検討

研究課題名(英文)Laboratory experiments on fracture formation associated with slip propagation along a rock fault under heterogeneous stress

研究代表者

溝口 一生 (Mizoguchi, Kazuo)

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号：50435583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：断層周辺の岩石に発達する割れ目の性状から過去の地震の震源位置を特定する方法を開発するため、割れ目性状と破壊伝播方向の関係を実験的に検証するための断層の地震性動的滑りを再現する室内実験を行った。その結果、断層滑りイベントを再現することに成功したが、その滑り伝播速度は自然地震に比べて非常に遅いものであった。実験後の試料を観察した結果、断層沿いでの割れ目の顕著な発達は認められなかった。この原因としては、実験により再現した滑り伝播イベントの伝播速度が遅いため、割れ目の形成に至らなかった可能性が考えられる。今後自然地震に近い伝播速度を持つ滑りイベントの再現実験に取り組む必要がある。

研究成果の概要(英文)：Theoretical studies have suggested that fracture pattern developed along faults records rupture propagation direction of earthquakes. In order to investigate the damaging behavior of rocks with slip propagation, I conducted the experiments on spontaneous propagation of fault slip along a pre-cut rock surface. I observed several fault slip events where a slip nucleates spontaneously in a subsection of the fault and propagates to the whole fault. The rupture speed increased with increasing stress applied on the fault. However, the maximum speed is about 2.4m/s, much lower than the S-wave velocity of the rock. The slip events were not earthquake-like dynamic rupture ones. The observation of the rock specimens after the experiments showed no formation of microcracks along the fault. This might be due to the much slower rupture speed and its associated low stress drop of the slip events. More efforts are needed to reproduce earthquake-like slip events in the experiments.

研究分野：構造地質

キーワード：断層 地震 滑り伝播 実験 割れ目

### 1 . 研究開始当初の背景

断層周辺には母岩に比べて割れ目密度が高いダメージゾーンが発達しており、その割れ目の方位から断層の地震発生時の破壊伝播方向が推定できる可能性が指摘されている ( Vermilye and Scholz, 1998 ). しかし岩石を用いた実験や自然地震に関する現地調査による検証はほとんどなされていないのが現状である .

### 2 . 研究の目的

本研究では、室内において断層の滑り伝播を再現した実験を行い、滑りに伴う断層周辺の割れ目性状と破壊伝播方向の関係を明らかにすることを目指している . この成果は、過去の地震の震源位置や破壊伝播方向を、自然断層の割れ目調査から推定できることに繋がり、地震動予測の精度向上に大きく貢献できると思われる .

### 3 . 研究の方法

本実験では、断層面を模した斜めの切れ込み面を有する幅 30cm 高さ 40cm 厚さ 1cm のインド産変斑レイ岩 ( metagabbro ) 薄板試料を、鉛直方向から 1 軸プレスにより载荷することで、断層滑りを再現した ( 図 1 ; Xia et al., 2004 ). 面内剪断変形が卓越するように、変位方向と直交する試料厚さを薄くしている . また試料全体にかかる荷重は試料上部に接するプレス先端に設置した荷重計でモニタリングしている .

断層沿いで自発的なせん断滑りが発生する条件を探るため、試料内部の切れ込みの角度 ( 载荷方向と断層の角度 ) を  $70^{\circ}$  から  $60^{\circ}$  までの  $1^{\circ}$  刻み、及び、 $61^{\circ}$  から  $60^{\circ}$  の  $0.1^{\circ}$  刻みで変化させた非常に多くの実験を実施し、最終的に  $60.5^{\circ}$  において高い再現性を伴う断層滑り伝播イベントを発生させることに成功した . 斜めの切れ込み角度の選定について、1 年半の時間を要した .

断層面は、载荷方向から  $60.5$  度傾斜させ、5kN の鉛直荷重を加えた場合に、断層の垂直応力及び剪断応力は、それぞれ 1.25MPa と 0.72MPa になる . 断層沿いに 8cm 間隔で 4 箇所 に貼付した半導体歪ゲージ ( 図 1 の右から Ss1, Ss2, Ss3, Ss4 ) を用いて、断層滑りに伴う剪断応力の低下を断層沿いの複数箇所

で計測しており、その結果から断層滑りの開始点や伝播方向を特定することができる . 剪断歪 50 マイクロストレインは剪断応力 3.8MPa に相当する . 歪データは解像度 16bit サンプリング周波数 1MHz でデジタル収録している .

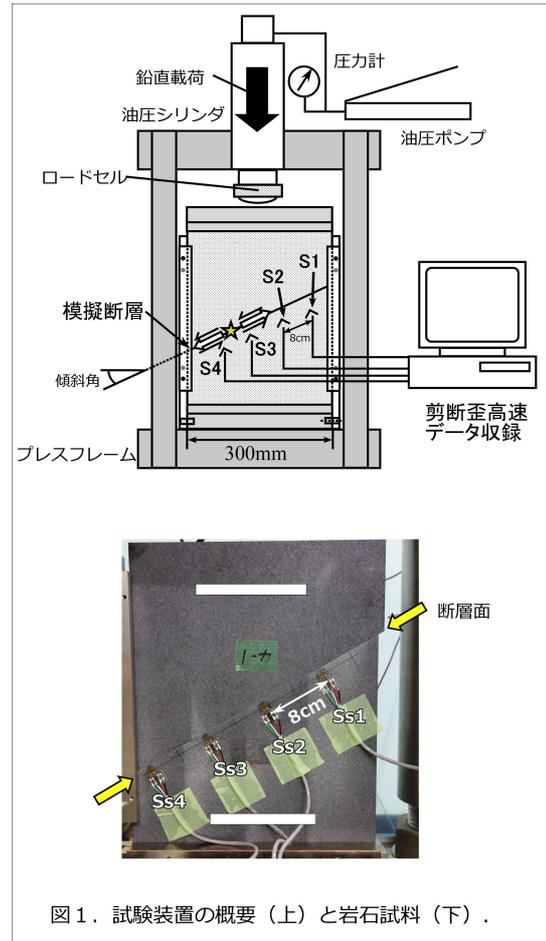


図 1 . 試験装置の概要 ( 上 ) と岩石試料 ( 下 ) .

### 4 . 研究成果

( 1 ) 角度  $60.5^{\circ}$  試料を用いた実験により、軸荷重 20kN 以下の応力条件下において、断層沿いの局所的な応力低下に特徴づけられ、自発進展する滑りイベントを再現することができた . 実験開始後は、時間と共に軸荷重を階段状に増加させていくが、軸プレスによる载荷を一時停止させると、突然の荷重低下が観察される . この荷重の低下は滑りイベントが起こり、蓄積されている歪を解消することで起こるものであり、本研究では、各滑りイベントについて、断層沿いに貼付した歪ゲージにより検出される歪変化をマイクロ秒以下の時間分解能で解析した . 次にその結果を示す .

( 2 ) 軸荷重 10kN 条件下で発生した滑りイ

ベントでは、滑りは S1 側で開始し、それが S4 側で 1 方向に進んでいく様子が観察された (図 2)。滑りの伝播速度は約 0.32m/s であった。

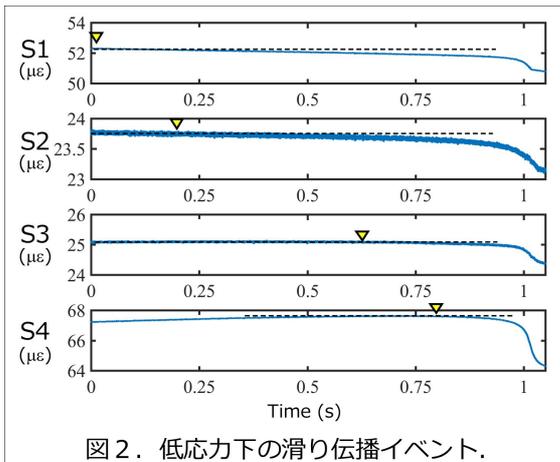


図 2. 低応力下の滑り伝播イベント。

(3) また 20kN の軸荷重下にて発生した滑りイベントでは、断層中央部の S2 周辺から滑りが起こり始め、断層両側に約 2.4m/s の速度で伝播していく様子が観察された (図 3)。

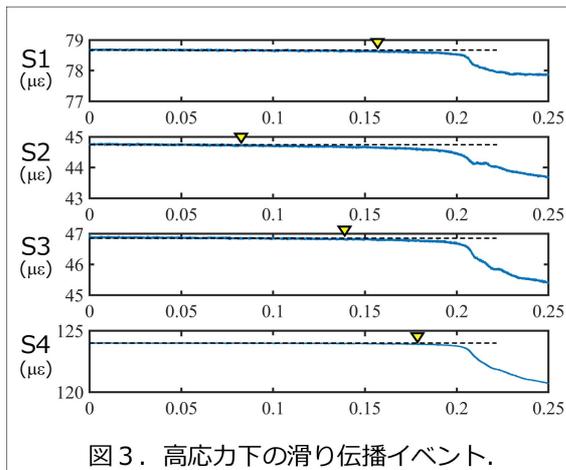


図 3. 高応力下の滑り伝播イベント。

(4) 载荷応力に比例して、滑りイベントの伝播速度は増加する傾向は見られたが、今回の実験における最大伝播速度は 2.4m/s であり、自然地震で観測される数 km/s に比べて非常に遅いものであった。これは、本実験においては地震性の動的な破壊伝播を再現するに至っていないことを示している。

(5) 実験後の試料に発達する微小割れ目を解析するため、試料から薄片を作成し、顕微鏡観察を実施した。しかし顕微鏡にて検出可能なマイクロスケールの割れ目の顕著な発

達は認められなかった。この原因としては、実験により再現した滑り伝播イベントの伝播速度が、自然地震よりも非常に遅く、イベント発生時の応力降下量が小さいため、割れ目の形成に至らなかった可能性が考えられる。

(6) 本研究課題の目標とした破壊伝播方向と割れ目性状の関係の実験による検証は、今期では成功することができなかった。しかしながら、本研究により得られた滑り伝播実験に関する知見は、今後自然地震に近い伝播速度を持つ滑りイベントの再現実験を成功するために欠かせない非常に重要な成果と思われる。今後も割れ目特性と地震伝播方向の関係の実験的研究を進めていき、地震被害予測向上へ寄与できる成果の創出を目指していきたい。

#### < 引用文献 >

Vermilye, J. M., and C. H. Scholz (1998), The process zone: A microstructural view of fault growth, *J. Geophys. Res.*, 103(B6), 12,223-12,237.

Xia, K., A. J. Rosakis and H. Kanamori (2004), Laboratory earthquakes: the sub-rayleigh-to-supershear rupture transition, *Science*, 303, 1859-1861.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

1. Yamashita, F., E. Fukuyama, K. Mizoguchi, S. Takizawa, S. Xu, H. Kawakata (2015), Scale dependence of rock friction at high work rate, *Nature*, 528, 254-257, doi:10.1038/nature16138. (査読有)

2. Yamashita, F., E. Fukuyama, K. Mizoguchi (2014), Probing the slip-weakening mechanism of earthquakes with electrical conductivity: Rapid transition from asperity contact to gouge comminution, *Geophysical Research Letters*, 41, 341-347, doi:10.1002/2013GL058671. (査読有)

[学会発表](計 18件)

1. 瀧口一生, 岩石を用いた動的破壊伝播に関する室内実験, 日本地球惑星化学連合 連合大会 2015 年大会, 幕張メッセ, 2015.

2. 西村佳也, 上原真一, 瀧口一生, 熱クラックを生成した斑レイ岩の弾性波速度および  $V_p/V_s$  比の間隙圧依存性, 日本地球惑星

化学連合 連合大会 2015 年大会 幕張メッセ, 2015 .

3 . 福山英一, Shiqing Xu, 溝口一生, 山下太, Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity (2), 日本地球惑星化学連合 連合大会 2015 年大会, 幕張メッセ, 2015 .

4 . 溝口一生, 1 軸プレスを用いた断層滑り伝播実験, 日本地震学会 2015 年度秋季大会, 神戸国際会議場, 2015 .

5 . Mizoguchi, K., Experimental study on propagation of fault slip along a simulated rock fault, AGU 2015 Fall Meeting, San Francisco, 2015 .

6 . Nishimura, K., S. Uehara, K. Mizoguchi, Dependencies of pore pressure on elastic wave velocities and Vp/Vs ratio for thermally cracked gabbro, AGU 2015 Fall Meeting, San Francisco, 2015 .

7 . Fukuyama, E., S. Xu, F. Yamashita, K. Mizoguchi ほか, Short-lived Supershear Rupture, AGU 2015 Fall Meeting, San Francisco, 2015 .

8 . Yamashita, F., E. Fukuyama, S. Xu, K. Mizoguchi ほか, Effect of fault surface evolution on slip behaviors in large-scale biaxial experiments, AGU 2015 Fall Meeting, San Francisco, 2015 .

9 . 福山英一, 徐世慶, 溝口一生, 山下太, Stress concentration ahead of supershear rupture, 日本地球惑星化学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィック横浜, 2014 .

10 . 西村佳也, 上原真一, 溝口一生, 玄武岩, 斑レイ岩および花崗岩の弾性波速度およびポアソン比への熱クラッキングの影響, 日本地球惑星化学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィック横浜, 2014 .

11 . 田中姿郎, 蒲池孝夫, 蟹井猛宏, 溝口一生, 中田 英二, 活断層の表面組織の電子顕微鏡観察, 日本地球惑星化学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィック横浜, 2014 .

12 . 土田琴世, 川方裕則, 福山英一, 山下太, 溝口一生, 大型二軸摩擦実験におけるスティック・スリップ・イベントの二次元的破壊伝播, 日本地球惑星化学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィック横浜, 2014 .

13 . 山下太, 福山英一, 溝口一生, 滝沢 茂, 川方裕則, 大型二軸摩擦実験によって示された岩石摩擦のスケール依存性, 日本地球惑星

化学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィック横浜, 2014 .

14 . 岸田実紀, 溝口一生, 高橋美紀, 廣瀬丈洋, ナノからミリスケールにおける断層面の形状特性, 日本地球惑星化学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィック横浜, 2014 .

15 . Tsuchida, K. ほか, K. Mizoguchi, Characteristics of 2-D Rupture Propagation of Stick-slip Events during Meter-sized Biaxial Friction Experiments, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, 2014 .

16 . Fukuyama, E., S. Xu, K. Mizoguchi, F. Yamashita, Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, 2014 .

17 . Kishida, M., K. Mizoguchi ほか, Roughness of fault surfaces over a length-scale range from nano- to millimeters, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, 2014 .

18 . Mizoguchi, K., ほか Unpredictable Main Rupture Initiation after Premonitory Slow Slip, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, 2014 .

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

溝口 一生 (MIZOGUCHI, Kazuo)

電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号: 50435583