

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340131

研究課題名(和文)地震発生メカニズム解明のための大型振動台を用いた高速摩擦実験

研究課題名(英文)Friction experiments using a large scale shaking table for the understanding of earthquake source dynamics

研究代表者

福山 英一 (Fukuyama, Eiichi)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット・総括主任研究員

研究者番号：60360369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円

研究成果の概要(和文)：メートルスケールの大型岩石試料の摩擦を調べることが出来る試験装置を大型振動台上に構築し、摩擦実験をおこなった。これまで行われてきたセンチメートルオーダの岩石試料を用いた実験結果と有意に異なる結果が得られた。岩石試料サイズによる摩擦の違いの原因を調べるため、同一岩石、同一条件で行った摩擦データを取得し、その違いを説明するモデルを構築した。その結果、摩擦のスケール依存性は空間的に不均一な摩耗現象に由来することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We constructed a friction testing apparatus for meter-scale rock specimens using a large scale shaking table facility. The obtained friction data is significantly different from those already obtained by centimeter-scale experiments. To investigate the fundamental cause of this difference, we conducted the experiments under the same condition using the same rock sample for both meter- and centimeter-scale specimens. We finally constructed a model explaining the difference. We identified from the model that spatially heterogeneous wear on the sliding surfaces causes different friction behavior.

研究分野：地震学

キーワード：地震発生メカニズム 岩石摩擦 大型振動台

1. 研究開始当初の背景

近年、地震の高速すべりのメカニズム解明のために高速剪断摩擦試験機(Shimamoto and Tsutsumi, 1994)が導入され、地震時の高速すべりメカニズムの解明が飛躍的に進み、数多くの研究成果が生み出されてきた(Tsutsumi and Shimamoto, 1997; Goldsby and Tullis, 2002; Hirose and Shimamoto, 2003; Di Toro et al., 2004; Mizoguchi et al., 2006; Fukuyama and Mizoguchi, 2010 など)。しかしながら、この試験機では断層面上の一点における高速すべり時の摩擦特性を調べることはできるが、破壊伝播の性質を調べることはできなかつた。一方、透明な媒質である Homelite を用いた破壊実験の様子を高速ビデオカメラで映像を取得し、破壊伝播の詳細を理解しようとする試みがなされてきた(Rosakis et al., 1999; Xia et al., 2004 など)。この実験により、高速破壊伝播する破壊フロントの映像から、破壊伝播速度の情報は取得できたものの、破壊先端での応力集中や、破壊先端から発せられる弾性波の詳細を調べるまでには至らなかつた。何より、透明な試料を用いる必要があるため、岩石特有の現象、特に、摩擦現象の効果は、十分考慮されていなかった。

一方、大型岩石試料を使った実験は、米国地質調査所により 1980 年代に精力的に行なわれてきた(Okubo and Dieterich, 1984; Dieterich and Kilgore, 1994)が、1990 年代以降は、これと言った進展は報告されていない。想像するに、USGS の試験機では 2m 四方の正方形柱を半分に切った 2 つの三角柱試料を用いたため、試料成形が難しく、しかも、すべり面に均等に法線応力をかけるのが難しかったためではないかと推測される。今回、防災科学技術研究所が所有する大型振動台を用いることで、大型試料の摩擦実験が可能となることがわかった。しかも、この振動台は 14m×15m の広さがあるため、10m スケールの試料を用いた実験が可能となる。また、この振動台は、横方向 1 軸に振動するように設計されているため、2 軸の摩擦実験を行うのに極めて適している。

2. 研究の目的

本研究においての大きな目的は 2 つある。一つは、破壊過程のスケール依存性を調べることである。メートルスケールでの断層摩擦とセンチメートルスケールでの断層摩擦の双方を計測し、スケール依存性を実験において確認することは、実験室で得られたデータの解析結果とフィールドにおける観測データの解析結果との間をつなぐスケールリング則を構築し、観測がきわめて困難な測定パラメータを実験において補完する上で、きわめて重要である。もう一つは、破壊伝播の加速及び減速現象である。in-plane 破壊(破壊伝播方向と破壊すべり方向が同じ破壊)の場合、破壊伝播の終端速度は媒質の P 波速度であり、Rayleigh 波速度と S 波速度の間には、破壊伝播できない速度が存在することが知られている。通常の地震は、Rayleigh 波速度以下で伝播(sub-Rayleigh rupture)し、ごく稀に、P

波と S 波の間の速度で破壊伝播する(supershear rupture)ことがあることが知られている。本研究では、破壊の nucleation から sub-Rayleigh rupture、そして supershear rupture と遷移していく破壊モードを実験で再現し、破壊遷移におけるダイナミクスの解明を行う。

3. 研究の方法

1) すべり面(断層面)の荒さは、破壊の構成則のパラメータに大きな影響を及ぼす。Okubo and Dieterich (1984)によれば、#240 で磨かれた面は、breakdown zone が 10cm 程度であるのに対し、#80 で磨かれた面は breakdown zone が 1m にも達する。破壊伝播の様子をうまくモニターするためには、試料サイズが breakdown zone よりも十分大きい必要がある。つまり、断層面の荒さが滑らかになるようにする必要がある。断層面が十分に滑らかで均一に垂直応力が働いているかどうかを、感圧シートを用いてチェックする。試験機の動作を確認し、長さ 2m 程度の岩石試料を用いて、摩擦試験を行う。実験条件は、論文等で公開されている実験データの実験条件を参考とし、歪ゲージ、加速度センサ、変位計など各種測定機器の動作確認を行い、センサの分解能が十分かどうかの確認を行う。

2) 0.1mm/s から 1m/s といった比較的高速な速度レンジでの摩擦すべり実験を行い、メートルスケールの試料を用いて測定された摩擦係数と、センチメートルスケールの試料を用いた摩擦係数との比較を行う。実験室スケールで行なわれている実験データを実際の地震現象に適用する際のスケールリングについて考察する。また、ローカルな摩擦係数測定のために、断層すべり面近傍に多数の歪ゲージを貼付け、断層すべり面近傍の応力を測定するとともに、非接触型変位計により、local なすべり量も同時測定する。両者から、摩擦構成関係が断層面の場所ごとに得られるはずであり、ミクロな摩擦の挙動を測定する。また、岩石試料全体に与えた垂直応力と断層すべり速度、および、岩石試料全体として受けた剪断応力から、グローバルな摩擦係数を測定し、センチメートルオーダーの試料の実験結果と比較し、摩擦係数のスケール依存性を議論する。

3) nucleation process に焦点を当てた実験を行う。プレスリップが開始する領域をあらかじめ同定し、プレスリップが成長して、不安定すべりが開始していくプロセスを歪ゲージなどでモニターしながら応力状態のデータを取得する。非常にゆっくりしたすべりから、S 波速度の数%で伝播するような破壊(sub-Rayleigh rupture)へと遷移する過程、さらに、そこから、不安定すべりへと移行し、supershear velocity で破壊伝播していくデータを取得する。その際、能動的に弾性波を出力し、nucleation zone の速度構造の変化をモニターし続け、破壊成長に関するデータを得る。

4) nucleation した破壊の成長に焦点を当てた実験を行う。断層面のダメージをコントロー

ルした上で、sub-Rayleigh rupture で伝播する場合と、supershear rupture へ遷移する場合とのデータを取得する。理論的な考察から、破壊フロント先端で消費される破壊エネルギーとすべりによって解放される歪エネルギーが釣り合いながら破壊伝播していく (Freund, 1991) ので、これらのパラメータを調節することで、破壊伝播速度はコントロールされるはずである。そのような状況下での破壊フロントにおける応力集中やbreakdown zoneの収斂の様子 of データを取得し、理論的考察と比較することで、破壊伝播速度の遷移現象を理解し、各種の物理パラメータを規定していく。

4. 研究成果

以下に年度ごとの成果を報告する。

平成 23 年度

防災科学技術研究所所有の大型振動台上に大型 2 軸摩擦試験機を構築し、長さ 2m の大型岩石試料を用いた摩擦試験を行った。岩石試料として、インド産の変斑礫岩を準備し、表面の荒さを $20\mu\text{m}$ 以下に抑えた加工を行った。実験に先立って、感圧シートを用いた測定をおこない、面の接触具合を調べた。面にかかる圧力分布は、事前に有限要素法にて行った予測とかなり近いものであり、法線応力をかけるプレスの機能は、うまく働いているものと判断された。さらに、試験機の強度を測定するため、岩石試料同士がすべらずに変形のみをするような実験条件下で実験を行い、試験機各部の強度を測定した。その結果、試験機の半力受け部分に強度の弱い部分が発見された。さらに、その強度が十分でないため、高速すべり条件下では、大振幅の stick slip が起こることがわかった。摩擦係数は 0.7 程度であり、大きな試料を用いても、摩擦係数はこれまでの小スケールサンプルを用いた実験と同程度の値であり、低速すべりの場合は、試料サイズの影響は小さいことがわかった。ひずみゲージ、加速度センサ、AE センサ、ハイスピードカメラなどを用い、センサの安定性と分解能を調べた。当初、金属製のひずみゲージを利用していたが、分解能が十分でないことが判明し、半導体ゲージに交換したところ、十分な精度でひずみデータが取得できた。

平成 24 年度

1. 3MPa の法線応力下において 0.1mm/s から 10mm/s のすべり速度範囲において、岩石試料外部に設置したロードセルによってマクロな摩擦を測定した。メートルオーダの岩石試料より得られた摩擦係数は、既往の研究で得られているセンチメートルオーダの摩擦係数とほぼ一致し、摩擦係数に関しては、そのスケール依存性は小さいことがわかった。さらに、試験機の強度を上げるために、反力支持部品の交換と、岩石試料の幅を狭くする改良を行った。この改造により、摩擦係数は、より精度よく測定可能になり、1.3MPa の法線応力をかけた場合、15mm/s あたりのすべり速度において、すべり弱化的挙動を示すことがわかった。岩石試料側面に設置した歪みゲージおよび AE センサのデータ解析より、破壊

が試料端まで達していないイベントが多数発生していたことがわかった。これらのイベントは、必ずしも、剪断強度の高い場所でおこっているのではなく、すべり後の応力レベルの低下も、背景の応力場とはあまり相関がないことがわかった。ミクロな摩擦は必ずしも、クーロン摩擦則に沿っていない可能性がある。さらに、摩擦すべり実験中にすべり面を透過する波動の測定を行った。stick slip 前に透過波の振幅が減少するデータが得られた。

平成 25 年度

2. 6MPa および 6.7MPa の法線応力をかけ、0.1mm/s の載荷速度で、すべり摩擦実験を行った。岩石試料側面に設置した AE センサ及び歪みゲージの測定により、stick slip 地震の発生プロセスに関するデータが得られた。stick slip 発生直前に、10m/s 程度の非常にゆっくりと成長する初期 slow slip フェイズが観測され、slow slip 領域が 40mm を超えたあたりで、破壊成長速度は加速し、初期加速フェイズを形成した。さらに、slow slip 領域の内部の一点から、不安定すべりが成長し、実験断層面全体に破壊が伝播していった。このような初期破壊伝播は、6.7MPa の法線応力の実験で特徴的に見られた。一方、2.6MPa での実験においては、不安定すべりが発生する前に、多数の前震が発生し、本震の不安定すべりへと成長していった。さらに、この slow slip の様子は、岩石試料内部に埋設した歪みゲージにおいても観測されており、slow slip が 2 次的に伝播していく様子が捉えられた。また、岩石試料に与えた法線力と岩石試料が受ける剪断力を、岩石試料外部に設置したロードセルにより測定し、岩石の摩擦係数を測定した。5mm/s-15mm/s あたりの載荷速度を与えたとき、摩擦係数が低下することが明らかとなった。その傾向は、一見、センチメートルオーダの岩石試料を用いた実験と同じように見えるが、仕事率と摩擦係数の関係を見てみると、メートルオーダの岩石試料を用いた本実験のほうが低い仕事率で低下することがわかった。このことから、すべり面における母岩の形状やガウジ生成層の不均質が摩擦係数に影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、AE センサ特性を補正するためのデータを取得し、断層面を透過する波動の測定を行った。送信子として低周波数の横振動センサを用い、受信する波動の S/N 比の改善をはかった。

平成 26 年度

stick slip 地震発生直前にスロースリップが卓越する場合と前震活動が卓越する場合が存在することがわかった。これらの活動様式の違いが何に起因するかを調べるため、6.7MPa および 3.3MPa の法線応力下において、slow slip および前震の再現実験を行った。その結果、地震発生前の断層面のダメージの程度によって、本震前の活動がコントロールされていることがわかった。さらに、摩擦実験によって生成された摩耗物(ガウジ)の観察により、黒色ガウジと灰色ガウジからなる摩耗物で、灰色ガウジの生成量と地震直前の活動が関係していることがわかった。

灰色ガウジは、ダメージを受けた断層面で多く生成される傾向があり、ダメージの程度と本震発生前の活動が関係する事を裏付けるデータとなっている。さらに、摩擦係数のスケール依存性についても考察を行った。センチメートルスケールの岩石試料を用いて得られた摩擦係数と同じ条件でメートルスケールの岩石試料を用いて得られた摩擦特性は有意に異なり、その原因は断層面上における摩耗の不均質分布にある事がわかった。摩擦実験中に摩耗物が生成されると、摩耗物によって局所的な法線応力分布が変化し、摩擦特性の空間的なばらつきを作り出す。これまであまり考慮されてこなかった摩擦特性の空間的なばらつきは、自然界においても普通に存在し、地震発生シミュレーションにおいては十分考慮する必要がある。また、歪ゲージやAEセンサを岩石試料中に埋め込み、それらのデータを用いて、stick slip地震の発生、成長過程をモニターし、面内および面外方向の破壊伝播速度を推定する事に成功した。岩石試料内部のセンサにより、破壊フロントをモニター出来た事により、実験的なアプローチによる岩石破壊伝播の性質の解明への貴重なデータを取得する事ができた。

平成 27 年度

stick slip 地震の破壊伝播を詳細に調べるため、すべり面(断層面)近傍に高密度で歪ゲージを設置し、破壊伝播の様子を詳細に記録した。その結果、岩石の S 波速度を超える破壊伝播速度の破壊(supershear rupture)がいくつか見つかった。これらの破壊は、一時的に supershear モードで伝播するものの、ある程度破壊伝播すると、通常の sub-Rayleigh rupture モードに移行して破壊を続けていた。破壊モードの遷移は、破壊先端における背景応力と密接に関わっていることが実験において確かめられた。摩擦係数のスケール依存性の検証のためメートルサイズの大型実験試料とセンチメートルサイズの実験試料を用いて、同じ条件の実験データを比較し、大型試料の場合は、摩耗によって、応力不均質が生成され、その不均質がさらに断層面上の不均質な摩耗を進展させ、空間的に不均質に生成される摩耗物質が更なる応力不均質を作り出すというループの存在を発見し、その研究成果が Nature 誌に掲載された。岩石試料中に歪ゲージを埋込み、slow slip の発生及び成長、それに引き続く stick slip 地震の発生をモニターすることに成功した。破壊フロントの応力歪状態を直接モニター出来たという点で、画期的なデータである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

山下太・福山英一・溝口一生、東郷徹宏、御子柴正、佐藤誠、箕輪親宏, 2011, 防災科学技術研究所大型耐震実験施設の大型振動台の準静的制御性能について, 防災科学技術研究所研究報告, 79, 9-23.

Fukuyama, E., Mizoguchi, K., Yamashita, F., Togo, T., Kawakata, H., Yoshimistu N.,

Shimamoto, T., Mikoshiba, T., Sato, M., Minowa, C., Kanezawa, T., Kurokawa H., and Sato T., 2014, Large-scale biaxial friction experiments using a NIED large-scale shaking table -Design of apparatus and preliminary results-, Rep. Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., 81, 15-35.

Togo, T., Shimamoto, T., Yamashita, F., Fukuyama, E., Mizoguchi, K., Urata, Y., 2015, Stick-slip behavior of Indian gabbro as studied using a NIED large-scale biaxial friction apparatus, Earthquake Science, 28, 97-118.

Yamashita, F., Fukuyama, E., Mizoguchi, K., Takizawa, S., Xu, S., Kawakata, H., 2015, Scale dependence of rock friction at high work rate, Nature, 254, 257-528.

Fukuyama, E., Xu, S., Yamashita, F., Mizoguchi, K., 2016, Cohesive zone length of metagabbro at supershear rupture velocity, J. Seismology, 10.1007/s10950-016-9588-2.

[学会発表] (計 53 件)

福山英一・山下太・溝口一生, 2011, 高速剪断領域を透過する弾性波の性質, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS029-13.

山下太・福山英一・溝口一生、柳谷俊, 2011, 電気抵抗を通してみる模擬断層の接触状態, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS029-P04.

山下太・福山英一・溝口一生, 2011, 電気伝導度測定によって示される模擬断層の接触状態の定量的評価, 日本地震学会, P1-54.

Fukuyama, E., Yamashita, F. and Mizoguchi, K., 2011, Voids Strengthen Rock Friction at Subseismic Slip Velocity, AGU Fall Meeting, T42C-04.

Yamashita, F., Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., 2011, Contact State Monitoring of Simulated Faults at Various Slip Rates by Electrical Conductivity Experiments, AGU Fall Meeting, T33F-2487.

福山英一・山下太・溝口一生、東郷徹宏, 2012, 透過波振幅を通して見たすべり弱体化過程, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-05.

川方裕則・吉光奈奈・福山英一、溝口一生、山下太、東郷徹宏、佐藤誠、土井一生, 2012, 大型試料のせん断すべり時における透過弾性波の特徴, 研究集会「不均質媒質における波動伝播の物理学の深化」

福山英一・溝口一生・山下太、東郷徹宏、川方裕則、吉光奈奈、嶋本利彦、御子柴正、佐藤誠、箕輪親宏, 2012, 大型振動台を用いた大型 2 軸摩擦実験, 日本地震学会, D31-01.

山下太・福山英一・溝口一生、東郷徹宏、御子柴正, 2012, 大型二軸摩擦実験中に発生したスティックスリップイベントの特徴, 日本地震学会, P3-34.

川方裕則・吉光奈奈・福山英一、溝口一生、山下太、東郷徹宏、佐藤誠、土井一生, 2012,

- 大型試料のせん断すべり時における透過弾性波の特徴, 日本地震学会, D31-02.
- 溝口一生・東郷徹宏・山下太、福山英一、御子柴正, 2012, 自然地震の断層すべりを模した既存断層面上の限られた領域でおこる不安定すべりに関する大型二軸摩擦実験, 日本地震学会, P3-35.
- Fukuyama, E., Mizoguchi, K. and Yamashita, F., Togo, T., Kawakata, H., Yoshimitsu, N., Shimamoto, T., Mikoshiba, T., Sato, M., Minowa, C., 2012, Large-scale biaxial friction experiments with an assistance of the NIED shaking table, AGU Fall Meeting, S12A-04.
- Yamashita, F., Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., Togo, T., 2012, Influences of wear material, fault roughness and loading rate on stick-slip behavior revealed by large-scale biaxial friction experiments, AGU Fall Meeting, S21B-2500.
- 福山英一・溝口一生・山下太、東郷徹宏、川方裕則, 2013, Smooth stress drop under very heterogeneous background stress, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SSS29-06.
- 東郷徹宏・福山英一・山下太、溝口一生, 2013, 大型二軸試験機によるスティックスリップ時のガウジ生成に消費されるエネルギーの見積もり, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SSS28-17.
- Yamashita, F., Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., Togo, T., 2013, Influence of fault surface characteristics on stress drop due to stick-slip events revealed by large-scale biaxial friction experiments, 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 1045.
- Kawakata, H., Yoshimitsu, N. and Fukuyama, E., Mizoguchi, K., Yamashita, F., Togo, T., Sato M., Doi, I., 2013, Characteristics of transmitting waves across a fault plane during stick slip tests using a large shaking table, 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 1156.
- 滝沢茂・福山英一・山下太、溝口一生、川方裕則, 2013, 巨大二軸型岩石摩擦試験機で生成されたガウジの物性特性, 日本地質学会学術大会, R13-0-8.
- 福山英一・溝口一生・山下太、滝沢茂、川方裕則, 2013, Stick slip event のはじまり, 日本地震学会, A11-11.
- 山下太・福山英一・溝口一生、滝沢茂、川方裕則, 2013, メートルスケールにおける岩石摩擦の速度弱体化, 日本地震学会, A11-12.
- 溝口一生・福山英一・山下太、滝沢茂、川方裕則, 2013, 大型二軸摩擦実験で再現された地震性断層運動時の破壊伝播速度, 日本地震学会, P3-41.
- 土田琴世・川方裕則・福山英一、山下太、溝口一生、加納靖之、吉光奈奈、土井一生、滝沢茂, 2013, 大型二軸摩擦実験時に発生した微小破壊活動について, 日本地震学会, P1-54.
- Fukuyama, E., Mizoguchi, K., Yamashita, F., Kawakata, H. and Takizawa, S., 2013, How is a stick slip rupture initiated?, AGU Fall Meeting, T33C-2644.
- Yamashita, F., Fukuyama, E., Mizoguchi, K., Takizawa, S., and Kawakata, H., 2013, Velocity weakening of friction strength on meter-sized rock samples, AGU Fall Meeting, MR13A-2243.
- Mizoguchi, K., Fukuyama, E., Yamashita, F., Takizawa, S. and Kawakata, H., 2013, Rupture propagation speed during earthquake faulting reproduced by large-scale biaxial friction experiments, AGU Fall Meeting, T51C-2483.
- 福山英一・徐世慶・溝口一生、山下太, 2014, Stress concentration ahead of supershear rupture, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS29-09.
- 山下太・福山英一・溝口一生、滝沢茂、川方裕則, 2014, 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, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS32-07.
- 土田琴世・川方裕則・福山英一、山下太、溝口一生, 2014, 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, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS32-P07.
- Tsuchida, K., Kawakata, H., Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., and Yoshimitsu, N., 2014, Two-dimensional rupture propagation of stick-slip events during large-scale biaxial frictional experiments, AOGS 2014, SE25-A007.
- 福山英一・山下太・徐世慶、溝口一生、川方裕則、滝沢茂, 2014, 前震と初期すべり: 大型摩擦実験からの知見, 日本地震学会, A32-09.
- 山下太・福山英一・徐世慶、滝沢茂、溝口一生、川方裕則、Francois Passelegue、Alexandre Schubnel, 2014, 空間的不均質が引き起こす岩石摩擦のスケール依存性, 日本地震学会, A32-10.
- Xu, S., Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., Takizawa, S. and Kawakata, H., 2014, Evolution of Rupture Style with Accumulation of Fault Displacement during Large-scale Biaxial Friction Experiments, 日本地震学会, A32-12.
- 溝口一生・福山英一・山下太、滝沢茂、川方裕則, 2014, 前駆的ゆっくり滑りに続く本震発生の時間遅れに関する実験的検討, 日本地震学会, S12-P04.
- 土田琴世・川方裕則・福山英一、山下太、溝口一生, 2014, 大型岩石試料を用いたせん断実験時に発生したスティック・スリップ・イベントの二次元的破壊伝播推定, 日本地震学会講, A32-11.
- Fukuyama, E., Xu, S., Mizoguchi, K. and Yamashita, F., 2014, Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity,

AGU Fall Meeting, S11C-4351.

Fukuyama, E., Yamashita, F., Xu, S., Kawakata, H. and Mizoguchi, K., 2014, Foreshocks and Premonitory Slip during Large Scale Friction Experiments, AGU Fall Meeting, T11D-4600.

Xu, S., Fukuyama, E., Yamashita, F., Kawakata, H. and Takizawa, S., 2014, Evolution of Rupture Style with Accumulation of Fault Displacement during Large-scale Biaxial Friction Experiments, AGU Fall Meeting, T13-05.

Mizoguchi, K., Fukuyama, E., Yamashita, F., Takizawa, S. and Kawakata, H., 2014, Unpredictable Main Rupture Initiation after Premonitory Slow Slip, AGU Fall Meeting, T11D-4601.

Yamashita, F., Fukuyama, E., Xu, S., Takizawa, S., Mizoguchi, K., Kawakata, H., François Passelègue and Alexandre Schubnel, 2014, Spatial Heterogeneity Induces Scale Dependent Rock Friction, AGU Fall Meeting, T11D-4602.

Tsuchida, K., Kawakata, H., Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., 2014, Characteristics of 2-D Rupture Propagation of Stick-slip Events during Meter-sized Biaxial Friction Experiments, AGU Fall Meeting, T11D-4603.

Kawakata, H., Yoshimitsu, N., Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., Togo T. and Doi, I., 2014, Foreshock Activity during Laboratory Friction Tests using Meter-scale Rock Specimens Inferred from two Apparatuses with Different Stiffness, AGU Fall Meeting, S21-02.

福山英一・徐世慶・溝口一生、山下太, 2015, Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity (2), 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, SSS30-25.

Fukuyama, E., Xu, S., Yamashita, F., Mizoguchi, K., Takizawa, S. and Kawakata, H., 2015, Cohesive Zone Length of Gabbro at Supershear Rupture Velocity, Symposium to Honour Prof. Raul Madariaga.

Fukuyama, E., Yamashita, F. and Mizoguchi, K., 2015, Voids strengthen rock friction at subseismic slip velocity: A microscopic view of dilatancy effects, 26th IUGG General Assembly, IUGG-2746.

Xu, S., Fukuyama, E. and Yamashita, F., Mizoguchi, K., Takizawa, S., Kawakata, H., 2015, Evolution of rupture style with total fault displacement: Insight from meter-scale direct shear experiments, 26th IUGG General Assembly, IUGG-3020.

Xu, S., Takizawa, S. and Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., Kawakata, H., 2015, Laboratory Investigation of Slip Mode along A Bimaterial (Gabbro/Marble) Fault

Interface: Preliminary Results and Implications, Workshop on Numerical Modeling of Earthquake Motions: Waves and Ruptures,

福山英一・徐世慶・山下太、溝口一生、滝沢茂、川方裕則, 2015, 短命な Supershear Rupture, 日本地震学会, S08-26.

川方裕則・福山英一・溝口一生、山下太、徐世慶、滝沢茂, 2015, 大型試料のせん断すべり時における稠密な透過弾性波計測, 日本地震学会, S08-027.

滝沢茂・福山英一・山下太、徐世慶、溝口一生、川方裕則, 2015, 大型岩石摩擦実験中のガウジ生成によって消費された非弾性エネルギー, 日本地震学会, S12-01.

Xu, S., Takizawa, S. and Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., Kawakata, H., 2015, Brittle Asperities and Stick-Slip Motion: Insight from Friction Experiments along A Gabbro/Marble Interface, 日本地震学会, S08-25.

Fukuyama, E., Xu, S. and Yamashita, F., Mizoguchi, K., Takizawa, S., Kawakata, H., 2015, Short-lived Supershear Rupture, AGU Fall Meeting, S43E-07.

Yamashita, F., Fukuyama, E. and Xu, S., Mizoguchi, K., Kawakata, H., Takizawa, S., 2015, Effect of fault surface evolution on slip behaviors in large-scale biaxial experiments, AGU Fall Meeting, T43C-3007.

Xu, S., Takizawa, S. and Fukuyama, E., Yamashita, F., Mizoguchi, K., Kawakata, H., 2015, Brittle Asperities and Stick-Slip Motion: Insight from Friction Experiments along A Gabbro/Marble Interface, AGU Fall Meeting, T43C-3006.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福山 英一 (FUKUYAMA Eiichi)

防災科学技術研究所 観測予測領域 地震火山防災研究ユニット 総括主任研究員
研究者番号: 60360369

(2) 研究分担者

川方 裕則 (KAWAKATA Hironori)

立命館大学 理工学部 教授
研究者番号: 80346056

(3) 連携研究者

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

山下 太 (YAMASHITA Futoshi)

防災科学技術研究所 観測予測領域 地震火山防災研究ユニット 主任研究員
研究者番号: 90374165

滝沢茂 (TAKIZAWA Shigeru)

防災科学技術研究所 観測予測領域 地震火山防災研究ユニット 客員研究員
研究者番号: 80114099