

令和 4 年 4 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04039

研究課題名(和文)断層物性科学と動力学解析の統合による南海トラフ地震破壊伝播過程の解明

研究課題名(英文) Evaluation of earthquake rupture process at the Nankai Trough by integrated method of fault material analysis and numerical simulation

研究代表者

廣野 哲朗 (Hirono, Tetsuro)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70371713

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)：本研究では、東南海地域の南海トラフのプレート境界断層および巨大分岐断層の物質科学的特徴を明らかにし、動力学破壊伝播シミュレーションによる地震時の破壊伝播過程の時空間変化について調べた。摩擦係数が0.01-0.06のとき、海溝底付近で約30 mの滑りが発生、一方で摩擦係数が0.21の場合、震源からの滑りは抑制され、海溝底付近での滑りはほぼ0であった。但し、断層の間隙水圧が地震前にほぼ静岩圧に等しい場合、摩擦係数が0.21であっても、海溝底付近では約25 mの滑りが生じることが明らかになった。よって、海溝底付近の滑り量は、断層の摩擦係数のみならず初期の間隙水圧の状態に大きく依存すると言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

来たる南海トラフ地震での破壊伝播過程の事前把握のため、地震時における海溝底付近のプレート境界断層の滑り量の定量的評価が重要である。統合国際深海掘削計画で採取された断層試料の分析と実測値を用いた動力学シミュレーションの結果、海溝底付近の滑り量は断層の摩擦係数と初期の間隙水圧の状態に依存し、かつ、それらの僅かな差によって大きく変化することが明らかになった。これは、南海トラフ全体の地震時の滑り量の事前評価には、海溝に並行な方向での断層の物質科学特徴の評価が不可欠であることを示唆する。

研究成果の概要(英文)：Dynamic rupture simulations using reported friction datasets measured in fault rocks on the Nankai Trough, that was ruptured during the 1944 Mw8.0 Tonankai earthquake, were performed. A steady-state friction triggered large slip (about 30 m) near the trench, whereas a high friction suppressed the rupture. The environmental condition in which the pore-fluid pressure was nearly equal to the lithostatic stress decreased the slip about 25 m in case of low friction. However, in case of high friction with negative stress drop, the slip reached about 20 m because the low shear strength did not arrest the inertial motion of rupture propagation. Such differences in fault-rock properties and fluid conditions may fundamentally influence on the complexity and the variability of rupture propagation along the Nankai trough.

研究分野：地球物理学

キーワード：南海トラフ地震 動力学 断層

1. 研究開始当初の背景

地震・津波が人間社会に与える影響は計り知れないほど大きく、地震多発国の日本のみならず、変動帯で活動する人類にとって、地震を理解するという事は共通の目的である。しかし、一言で地震の理解と言っても、その発生プロセスは震源核の形成、動的破壊の開始、広域への破壊伝播、地震波放出、地殻変動(津波発生)などと非常に複雑である。なかでも、破壊伝播過程において滑りが浅部に達し、断層が大規模に滑る現象が生じると、人間社会に甚大な被害をもたらす。2011年東北地方太平洋沖地震では、プレート境界の地下24 kmで発生した破壊が海溝底まで伝播し、かつ50-80 mもの滑りが生じたと推定されている。この巨大滑りは、海底面を大きく隆起させ、波高10 m以上、最大遡上高40 m以上という巨大津波を励起、未曾有の被害をもたらした原因である。そのため、複雑な地震現象の中でも、断層の大規模滑りの発生メカニズムの解明とその定量的評価は喫緊の最重要課題である。

そこで、統合国際深海掘削計画では、東北沖地震時の大規模滑りの原因を早急に調査すべく、2012年4-5月に日本海溝プレート境界断層の調査掘削(J-FAST)を実施、研究代表者は、陸上研究者として参加した。プレート境界から採取した断層コア試料の透水性・摩擦特性および熱物性を実験的に計測し、二次元での動力学破壊シミュレーションを実施、海溝付近の滑り量の再現を試みた。その結果、海底下10 kmまでのプレート境界断層では約80 m程度の滑り量が算出され、おおむね観測結果と整合的であった。

一方で、南海トラフ地震の発生確率は今後30年以内に約70%と切迫しており、津波発生規模に直結する地震時の海溝付近の断層滑り量の事前評価が急務である。

2. 研究の目的

来たる南海トラフ地震での破壊伝播過程の事前把握のため、本研究では、東南海地域の南海トラフのプレート境界断層および巨大分岐断層の物質科学的特徴(鉱物組成や透水性、摩擦特性、熱物性等)を明らかにし、さらに、その実測値を用いて断層滑り弱化的数値解析および動力学破壊伝播シミュレーションによって地震時の破壊伝播過程の解明を目的とする。

3. 研究の方法

統合国際深海掘削計画の第316次航海で採取されたプレート境界から派生する巨大分岐断層の試料にて、粉末X線回折法による鉱物組成の定量分析、熱重量-示唆熱走査熱量測定装置を用いた熱変化特性の分析、顕微赤外分光器を用いた脱水速度論的分析、水理特性(透水係数・間隙率等)の計測、低速～高速滑りでの摩擦係数の計測を行なった。さらに、南海トラフは砂粒子に富むため、砂岩の摩擦特性および微小スケールでの機械的プロセスの解明を目的とし、インド砂岩を用いたrock-to-rock摩擦実験と実験後試料の電子顕微鏡観察も実施した。

以上の分析・実験で得られた実測値を用いて、摩擦発熱-熱拡散方程式、エネルギー保存則、化学反応速度式を連立させた数値解析を実施し、間隙水の熱的圧化の効果を含め、各深度(0.5 kmごと)における剪断応力の時間発展を求めた。これによって降伏剪断応力、動的剪断応力、応力緩和等を算出し、研究協力者のサポートのもと、三次元動力学破壊伝播シミュレーションを実施し、地震時の断層滑り挙動の時空間変化について調べた。

4. 研究成果

熊野沖南海トラフでの巨大分岐断層の試料において、文献調査の結果、その摩擦係数は0.06および0.21と報告されている。さらに本研究でのthermal pressurizationの影響を考慮した数値解析によって、摩擦係数は0.01-0.04であった。これらの値を用いて、巨大分岐断層の地震時の滑り伝播過程の数値シミュレーションを実施した。震源は海底下11 kmと設定し、3 MPaの応力降下によって地震を発生させ、その滑りが断層沿いに伝播する時空間発展を明らかにした。その結果、0.01-0.06の摩擦係数の場合には約30 mの滑りが海溝底付近で発生することが判明した。一方で、摩擦係数が0.21の場合、震源からの滑りは抑制され、海溝底付近での滑りはほぼ0であることも判明した。さらに、環境条件の影響として、断層の間隙水圧が地震前にほぼ静岩圧に等しい場合でシミュレーションを実施した結果、断層の摩擦係数が0.21であっても、海溝底付近では約25 mの滑りが生じることが明らかになった。以上の結果は、プレート境界断層および巨大分岐断層の海底付近の滑り量は、断層の摩擦係数のみならず初期の間隙水圧の状態に大きく依存することを示唆している。さらに、これらのわずかな差が、破壊伝播過程や最終的な滑り量に大きな影響を与えうることも示唆する。

また、砂岩のrock-to-rock摩擦実験の結果、高速滑り(1.0 m/s)では摩擦係数の増減を繰り返す不安定な摩擦挙動を示し、砂岩ブロックが大きく摩擦した。一方で、低速滑り(0.1 m/s以下)では指数関数的な弱化和その後の安定した滑りが生じ、実験後のブロック表面には断層鏡面が観察された。電子顕微鏡観察の結果、高速滑りの実験後試料では摩擦したブロック表面に10 μm程の岩石の破片が確認された。一方で、低速滑りの試料面々には鏡面状の凹凸のない平坦な面が観察された。さらに、球状になったナノ粒子が確認され、鏡面とナノ粒子の境界部では粒子が集

結・連結し鏡面を形成していく過程が観察された。すなわち、砂質な断層では滑り速度に応じて摩擦・摩耗のメカニズムが大きく異なると考えられる。高速滑りではブロックの摩耗が支配的であり、ガウジ層内に散在した大きな破片が噛み合いや離脱を起こすことによって、摩擦係数の増減を繰り返す不安定な摩擦挙動を示し、一方で、低速滑りでは摩耗によって形成されたナノ粒子が集結、同時に空隙を埋めることで滑らかな断層鏡面を形成し、その結果として、滑り弱化を引き起こした後、安定した摩擦挙動を示すと考えられる。このような滑り速度に依存した砂岩の摩擦・摩耗プロセスを考慮した南海トラフ地震時の断層滑り挙動の数値解析はまだ実施できていないが、これは新たな重要な研究課題として、今後も継続して研究を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tetsuro Hirono, Shunya Kaneki, Tsuyoshi Ishikawa, Jun Kameda, Naoya Tonoike, Akihiro Ito, Yuji Miyazaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Generation of sintered fault rock and its implications for earthquake energetics and fault healing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43247-020-0004-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 -
1. 著者名 Shunya Kaneki, Kiyokazu Oohashi, Tetsuro Hirono, Hiroyuki Noda	4. 巻 125
2. 論文標題 Mechanical amorphization of synthetic fault gouges during rotary shear friction experiments at subseismic to seismic slip velocities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020jb019956	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 Hirono, T., Tsuda, K., and Kaneki, S.	4. 巻 9
2. 論文標題 Role of weak materials in earthquake rupture dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-43118-5	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 Kaneki, S., and Hirono, T.	4. 巻 6
2. 論文標題 Diagenetic and shear-induced transitions of frictional strength of carbon-bearing faults and their implications for earthquake rupture dynamics in subduction zones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7884
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-44307-y	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 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Shuhei Yamashita and Tetsuro Hirono
2. 発表標題 Thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip: Evaluation of effects by initial maturity, heating rate, and mechanochemical activation
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 Yutaro Shimamoto, Tetsuro Hirono, and Hideki Mukoyoshi
2. 発表標題 Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material by repeated earthquakes
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 Keita Iwagaki and Tetsuro Hirono
2. 発表標題 Evaluation of reactivity under hydrous condition on thermal maturity of carbonaceous materials as a proxy of seismic slip
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 Tadashi Miyamoto, Kenichi Tsuda, and Tetsuro Hirono
2. 発表標題 Determination of frictional characteristics and evaluation of strong motion by dynamic rupture simulations of the Kamishiro fault at the 2014 Northern Nagano earthquake
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 山下修平、廣野哲朗
2. 発表標題 断層摩擦発熱指標としての炭質物の熱熟成反応1：速度論的影響の実験的評価
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島村優太郎、廣野哲朗
2. 発表標題 断層摩擦発熱指標としての炭質物の熱熟成反応3：繰り返し地震イベントの影響の実験的評価
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩垣恵太、廣野哲朗
2. 発表標題 断層摩擦発熱指標としての炭質物の熱熟成反応2：含水状態での反応性の実験的評価評価
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本英、大橋聖和、福家朱莉、廣野哲朗
2. 発表標題 実験と数値計算を組み合わせた断層における複合面構造の発達過程の解明
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Hirono, T.
2 . 発表標題 Tectono-geochemical characteristics of faults in the shallow portion of an accretionary prism
3 . 学会等名 Goldschmidt Conference 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Osada, S., Hirono, T., Yoshioka, S., and Baba, T.
2 . 発表標題 Numerical simulations of tsunamis at hypothetical megathrust earthquakes
3 . 学会等名 International Symposium Crustal Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Fuke, A., Hirono, T., and Kaneki, S.
2 . 発表標題 Low- to high-velocity frictional properties and microstructure evolution of volcanoclastic sediments
3 . 学会等名 International Symposium Crustal Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takeshi Miyamoto, Tetsuro Hirono, Akari Fuke, Kiyokazu Oohashi, and Satoshi Yukawa
2 . 発表標題 Experimental and numerical demonstrations for development of composite planar fabrics in fault zones
3 . 学会等名 EGU General Assembly 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Ayana Shimamoto, Tetsuro Hirono, and Tsuyoshi Ishikawa
2. 発表標題 Geochemical approach to evaluate slip behavior of an ancient plate boundary fault in the Shimanto accretionary complex, Japan
3. 学会等名 AOGS2021 VIRTUAL 18th annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本英、廣野哲朗、福家朱莉、湯川諭
2. 発表標題 摩擦実験と数値計算による断層複合面構造の発達過程の物理的描像の解明
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢野弘道、宮本英、廣野哲朗
2. 発表標題 回転式せん断摩擦試験機を用いた砂岩の摩擦挙動の解明
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋本朱那、廣野哲朗、石川剛志、小川丈彰
2. 発表標題 四万十帯日高川層群美山累層における太古のプレート境界断層の滑り痕跡:有機地球化学 -地球化学的分析によるアプローチ
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩垣恵太、廣野哲朗
2. 発表標題 含水条件における炭質物の熱熟成反応の実験的評価：地震時の断層摩擦発熱の指標として
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本英、廣野哲朗、湯川諭
2. 発表標題 様々なスケールで断層に発達する複合面構造とその物理的描像
3. 学会等名 日本活断層学会2021年度秋季学术大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩垣恵太、廣野哲朗
2. 発表標題 断層摩擦発熱の指標としての炭質物の熱熟成反応の含水条件下での実験的評価
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>地震時に断層でセラミックスが作られる！？ https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200817_1 断層の動力学解析により東北地方太平洋沖地震でプレート境界が大規模に滑った原因を特定 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20190429_1 断層に含まれる有機物が地震発生メカニズムに影響している！？ https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20190527_1</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
研究協力者	津田 健一 (Tsuda Kenichi)		
研究協力者	大橋 聖和 (Oohashi Kiyokazu)		

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