

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04038

研究課題名(和文)脆性塑性遷移における間隙流体圧変化の地震サイクル挙動への影響

研究課題名(英文)Effect of pore pressure change in brittle-ductile transition to earthquake cycles

研究代表者

野田 博之(Noda, Hiroyuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50619640

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)：京都大学防災研究所設置の高温高压ねじり試験機を改修し、垂直応力を自動で保持する機構を作成、実験の力学データの質の向上を達成した。脆性変形と塑性変形へのテンソルとしての変形の分配を考慮し、S-C-C' マイロナイトを生成する脆性・塑性遷移域の剪断帯の強度に関するモデルを提唱した。動的破壊の計算に用いる境界積分方程式法に関して、数値振動を抑えて精度を向上させる時間発展アルゴリズムを発見。スペクトル法を用いた動的地震サイクルシミュレーションに対して周期境界条件の除去、粘弾性緩和や多孔質弾性反発の実装に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究計画では主に、脆性塑性遷移領域における剪断帯の力学的性質の理解の前進と、媒質の非弾性変形や流体移動を考慮に入れた地震サイクルシミュレーションの高度化に貢献した。前者では岩石の構造(すべり面の角度や結晶伸長方向)と剪断強度を結びつける事に成功したが、これは構造地質学的研究と地球物理学的研究を橋渡しする知見と言える。また後者に関しては、本研究計画で目指した脆性塑性遷移と流体圧変化を考慮した地震サイクルのモデリングのみならず、一般に多孔質・粘弾性体の変形の解析に適用可能な技術であり、学際的価値があるといえる。

研究成果の概要(英文)：An automatic control unit of normal stress is set up to the high-temperature high-pressure rotary-shear apparatus in DPR1, Kyoto University, which improves quality of mechanical data. A mechanical model of a shear zone in brittle-plastic transitional regime is constructed based on tensorial partitioning of deformation to brittle and plastic deformations. A new time-stepping algorithm in a boundary integral equation method (BIEM) for dynamic rupture simulation is proposed which suppress numerical oscillation. Spectral BIEM for dynamic earthquake sequence simulation is improved by removing an artificial periodic boundary condition. Viscoelastic relaxation and poroelastic rebound are implemented in the dynamic earthquake sequence simulation.

研究分野：断層力学

キーワード：脆性塑性遷移 地震サイクル シミュレーション 境界積分方程式法 間隙流体 粘弾性緩和

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 1980年代から、地殻で発生する多くの大地震は地震が発生する深さ(地震発生層)の下部から破壊が開始する傾向がある点が指摘されている。岩石が脆性的に破壊する深さ領域の下部には、岩石の構成鉱物が結晶塑性変形により延性的に流動する領域がある。その様な延性剪断帯の変形による脆性領域下部への载荷が、上述の様な大地震に関係している可能性が高い。

(2) 脆性変形と塑性変形の遷移領域では、両変形が混在した S-C マイロナイトが生成されるが、その様な構造と力学的挙動の関係、脆性変形の強度に影響を及ぼす間隙水圧の影響などは解明されていなかった。断層の地震サイクル挙動における間隙水圧の時間的変化の影響の重要性は指摘されていたが、脆性塑性遷移領域では岩石の構造の変化により間隙水圧が大きく変化する可能性がある。

(3) 脆性塑性遷移域における剪断帯の強度は、脆性変形の強度と塑性変形の強度をスムーズに繋いだ現象的な物や、剪断帯を粒状体の集合と見て定式化した物が存在するが、S-C マイロナイト構造を考慮したモデルは存在しなかった。

2. 研究の目的

(1) 脆性塑性遷移領域における岩石の力学的性質の変化を、岩石の構造の変化に着目して理解する事を目指す。

(2) 地殻内の大断層に対する動的地震サイクルシミュレーションを高度化し、間隙水圧の変化等を実装する。

3. 研究の方法

(1) 京都大学防災研究所設置の高温高压ねじり剪断試験機を改修し、自動で垂直応力保持する機構を作成する。また、サンプルアセンブリを改良し、力学的データの質の向上を図る。また、実験データを説明できる微物理モデルを、変形の幾何の観点から定式化する。

(2) 地殻内の大断層を深さ方向に改造する動的地震サイクルシミュレーションとしては、スペクトル境界積分方程式法を用いた物が現在最も効率的である。しかし、フーリエ基底を用いる事による人為的な周期境界や、媒質が弾性体に限る事等、制約が多い。新たに積分核を導出し、またメモリー変数を定義して時間畳み込みを常微分方程式に変換する事により、これらの問題を解消する。

4. 研究成果

(1) 京都大学防災研究所設置の高温高压ねじり剪断試験機に垂直応力の自動制御機構を作成した。垂直応力は油圧ジャッキを用いて資料に载荷される仕組みになっているが、油圧系に接続した手動式微量吐出型ポンプのハンドル部にサーボモータを取り付けた(1年目)。また、垂直応力の出力値を目標値に近付けるフィードバック回路を組み込んだ(2年目)。この事により、本試験機を用いた実験中に人力での垂直応力を制御する必要から解放され、長時間の実験が可能となり、力学データの質が向上した。

(2) S-C-C' マイロナイトの構造を反映した変形の幾何に関する考察から、脆性塑性遷移域にける剪断帯の強度のモデルを構築した。剪断帯に鋭角に斜交する脆性滑り面による変形は、剪断帯を薄く引き伸ばす変形を生じる。母岩によってその様な変形は制限されるため、結晶塑性変形による剪断帯の全体的な変形がこれを補償しなければならない。これらの変形要素を速度勾配テンソルの合成として組み合わせることにより(図1)脆性変形と塑性変形のそれぞれの強度から剪断帯の強度を導出する事に成功した。その結果、[1] 滑り面の傾きは、脆性・塑性両強度からの弱化を引き起こす事、[2] 剪断帯と平行方向の応力が垂直応力の2倍程度に上昇する事、[3] S-C-C' マイロナイトの結晶の伸長方向で規定される S 面は、剪断歪を十分に大きくしても剪断帯と平行にはならず、一定の角度に漸近する事、が明らかとなった。本成果は2021年に国際誌(Journal of Structural Geology)に掲載された()。

(3) 地震破壊の計算には準解析的な手法である空間領域での境界積分方程式法がしばしば使用される。既存の時間発展手法では数値振動が増大する問題が報告されており、人為的な粘性の導入が必要であった。[1] 時間方向のスタッガード格子の導入、[2] 時間ステップ中に一定の滑り速度を仮定した積分核と線形内挿による滑り速度の評価、[3] 放射減衰項を上手く用いて時間ステップの境界直後で摩擦則と弾性の式を解く事、を行い時間2次精度の解法を構成した所、数値安定性が劇的に改善した。特に、破壊のモード I、II、III の全てについて安定的に解ける数値条

件領域が広く発現した。この事により、本研究計画のみならず多くの3次元地震破壊の計算において、本手法は数値安定性および精度の向上に大きく貢献する事が期待できる。本成果は2020年に国際誌 (Earth, Planets, and Space) に掲載された ()。

(4) フーリエ基底を用いたスペクトル境界積分方程式法による動的地震サイクルシミュレーションでは、人為的な周期境界条件が現れる。この影響を低減するために、実際にシミュレートする断層よりも数倍長い計算領域を確保する必要がある。一方、過去の研究では動的破壊のシミュレーションに関して、波数空間を離散化せずに解析的に行った畳み込み積分の結果に対して、フーリエ級数展開を行う事により、高速フーリエ変換の恩恵を受けつつ周期境界条件を取り除く手法が提唱されていた。本研究ではその手法を動的地震サイクルシミュレーションに用いることにより、周期境界条件を解消することに成功した。この事により、孤立断層に対して物理的に正しい解が得られるようになった他、計算コストの削減にもつながった。本成果は2020年に国際誌 (Earth, Planets, and Space) に掲載された ()。

(5) 浅部の脆性領域から深部の塑性領域へ温度の上昇に伴い、岩石の非弾性変形が徐々に重要となってくる。地震間の粘弾性緩和が顕著になると、媒質が弾性歪エネルギーを蓄える事が困難になり、断層が非地震性へと遷移する事が予想される。マクスウェル粘弾性体中の断層を仮定し、媒質の粘弾性緩和をスペクトル境界積分方程式法を用いた動的地震サイクルシミュレーションに実装した。動的地震サイクルシミュレーションでは、動弾性の計算の為に滑り速度履歴のメモリーと、時間畳み込みの計算負荷が主要なコストである。粘弾性緩和は時間依存の変形であり時間畳み込みによる計算が可能であるが、これを実装すると計算負荷の増加が無視できない。本研究ではメモリー変数として有効滑り量 (静弾性積分核を畳み込めば粘弾性緩和を考慮した応力変化が得られる、仮想的な滑り量) を定義し、上述の時間畳み込みの時間発展をメモリー変数の常微分方程式で表す事ができる事を見出し、畳み込みを数値的に実施せずに粘弾性緩和を実装する事に成功した。シンプルな一つのパッチを考慮した計算の結果、これまでに提唱されていたタイプ (ホップ分岐) とは異なる地震性 - 非地震性の遷移が起こる事を発見した。粘弾性の緩和時間が短くなると地震サイクルの再来周期が増加し、一定の緩和時間で無限大に発散し、より短い緩和時間では速度弱化パッチは永久に固着する。また緩和時間を一定とした場合には、パッチのサイズが大きいほど永久固着が起こりやすい事が示された。すなわち、地震発生層下部で粘弾性緩和が有効に働くと、比較的大きな地震から先に姿を消す事が予想される。本成果は2020年に国際誌 (Earth, Planets, and Space) に掲載された ()。

(6) 上述(4)の手法をさらに発展させ多孔質弾性体へ拡張した。断層滑りによって体積歪の不均質分布が生じると、それに伴い間隙水圧の空間分布が生じる。これが拡散により解消される過程で、poroelastic expansion による変形 (多孔質弾性緩和、PER) が発生する。これを動的地震サイクルシミュレーションに導入した。応力変化を静弾性の積分核で逆畳み込みした有効滑りに関する常微分方程式を発見する事は出来なかったが、非排水・排水条件間の遷移をつかさどる物性値に依らない時間関数を、異なる緩和時間を持つ複数の緩和過程の和として近似する事で、時間畳み込みを避けてPERを計算する手法を見出した。PERは、地震時に応力降下した領域を地震後に載荷する働きがある。摩擦係数を動摩擦で一定と仮定した過去の研究では、PERによって地震性滑り域に余効滑りが生じる可能性が指摘されていた。しかし、岩石摩擦実験で観察される、摩擦滑り後の固着時の強度回復を考慮に入れた地震サイクルシミュレーションでは、強度回復がPERによる載荷に勝るため余効滑りが生じない事が示された。本成果は2022年に国際誌 (Earth, Planets, and Space) に受理された ()。

< 引用文献 >

Noda, H., 2021. Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning. *JSG*, 146, 104313. doi:10.1016/j.jsg.2021.104313.

Noda, H., Sato, D.S.K., Kurihara, Y., 2020. Comparison of two time-marching schemes for dynamic rupture simulation with a space-domain BIEM. *EPS*, 72, 76. doi:10.1186/s40623-020-01202-5.

Noda, H., 2021. Dynamic earthquake sequence simulation with a SBIEM without periodic boundaries. *EPS*, 73, 137. doi:10.1186/s40623-021-01465-6.

Miyake, Y., Noda, H., 2019. Fully dynamic earthquake sequence simulation of a fault in a viscoelastic medium using a spectral boundary integral equation method: does interseismic stress relaxation promote aseismic transients? *EPS*, 71, 137. doi:10.1186/s40623-019-1113-8.

Noda, H., Dynamic earthquake sequence simulation with an SBIEM accounting for interseismic poroelastic rebound, *EPS*, doi:10.1186/s40623-022-01649-8, in press.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Noda Hiroyuki, Sato Dye S. K., Kurihara Yuuki	4. 巻 72
2. 論文標題 Comparison of two time-marching schemes for dynamic rupture simulation with a space-domain BIEM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01202-5	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 Noda Hiroyuki	4. 巻 146
2. 論文標題 Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural Geology	6. 最初と最後の頁 104313 ~ 104313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsg.2021.104313	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 Miyake Yuki, Noda Hiroyuki	4. 巻 71
2. 論文標題 Fully dynamic earthquake sequence simulation of a fault in a viscoelastic medium using a spectral boundary integral equation method: does interseismic stress relaxation promote aseismic transients?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1113-8	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 Noda Hiroyuki	4. 巻 73
2. 論文標題 Dynamic earthquake sequence simulation with a SBIE without periodic boundaries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01465-6	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 Hiroyuki Noda	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamic earthquake sequence simulation with an SBIEM accounting for interseismic poroelastic rebound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-022-01649-8	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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Hiroyuki Noda, Keishi Okazaki
2. 発表標題 A fault constitutive law in a brittle-plastic transitional regime accounting for geometry of deformation in a shear zone
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 Hiroyuki Noda
2. 発表標題 Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Noda, Yuuki Kurihara, Dye S. K. Sato
2. 発表標題 On stability of time-marching schemes for simulation of dynamic rupture using a boundary integral equation method
3. 学会等名 The Seismological Society of Japan 2019 fall meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Noda
2. 発表標題 Dynamic earthquake sequence simulation with a SBIEM without a periodic boundary condition
3. 学会等名 Seismological Society of Japan 2020 Fall meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Noda
2. 発表標題 Simulation of dynamic earthquake sequence in a linear poroelastic medium
3. 学会等名 Seismological Society of Japan 2021 Fall meeting
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

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