

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03775

研究課題名（和文）数値シミュレーションに基づいた誘発地震の発生メカニズムの研究

研究課題名（英文）Numerical simulations of earthquake and SSE triggering by dynamic stress changes

研究代表者

吉田 真吾（Yoshida, Shingo）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20202400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地震トリガーに関する数値シミュレーションを行なった。Nagata則を法線応力変動の影響も取り入れたものに拡張した摩擦則を用いた。円形アスペリティに地震波による応力擾乱を与えると地震波通過時、あるいは何日か遅れて地震あるいはSSEがトリガーされる。また、安定すべりが起こっている条件下でも、地震がトリガーされることを示した。普段は地震やSSEが発生していない領域であっても、地震波によりSSEなどがトリガーされる可能性を示唆する。アスペリティ内で深さによって応力が変化する場合についても調べ、深部から浅部にSSEが移動するという結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波により地震やSSEがトリガーされた例は数多く報告されているが、そのメカニズムは明らかになっていなかった。本研究は、実験データから求められた摩擦則に基づき、地震波によって強度弱体化が起こってトリガーされることを数値シミュレーションによって示した。大地震が発生した後、次にどのような地震が起こるか推定することは防災上重要な課題である。本研究はその課題解決に向け、一つのアプローチを提示した。

研究成果の概要（英文）：We performed numerical simulations of earthquake and SSE triggered by seismic waves. We assumed a revised Nagata frictional law which includes effects of normal stress changes. Shear or normal stress perturbations were applied to a circular asperity at some timing of earthquake cycle, earthquakes with high speed slip or SSE were triggered. In addition, we found that seismic wave can trigger earthquake or SSE at a patch where stable sliding occurs usually.

研究分野：地震学

キーワード：SSEのトリガー 応力依存Nagata摩擦則

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、地震波によってスロースリップイベント(SSE)や、高速滑りを伴う通常地震がトリガーされたいという報告が数多くなされている。例えば2016年の三重県沖地震の後にSSEが深部で発生し、その後浅部に移動したことが海底水圧観測により示されている。しかしSSEのトリガーのメカニズムについては明らかにされていなかった。また、2016年熊本地震の際、地震波が通過した時に、それまで微小地震しか発生していなかった由布院断層でM5.7の地震が発生したが、なぜそのようなことが起こるのか説明できていなかった。

(2) 大地震が発生すると、震源域周辺(近地)に静的な応力が増大し余震の原因となると、古くから考えられている。しかし、静的な応力増加は、震源から遠くなるとごくわずかになるため、遠地で地震が誘発されるのは動的な応力擾乱のためと理解されていた。しかし、近地では静的な応力擾乱と動的な応力擾乱のふたつがはたらいっているはずであり、どちらの影響が大きいかわかることができていない。

2. 研究の目的

(1) 地震波が原因の動的な応力擾乱、および静的な応力変動によるSSE、通常地震のトリガーのメカニズムについて理解するために、理論的、および数値シミュレーションに基づいて研究を行う。本震の近くで起こった地震を「余震」、離れたところで起こった地震を「誘発地震」と呼ぶことが多いが、両者を明確に区別する定義はなく、また発生メカニズムに本質的な違いがあるわけでもないと考えられる。余震については静的な応力変動(せん断応力の変化量と法線応力の変化量から導かれるCFF)による影響が主に調べられてきたが、動的な応力変動にも影響されているはずであり、両者の影響の大きさを比較する。

3. 研究の方法

(1) 動的な応力変動と静的な応力変動の両者の影響を取り入れてシミュレーションを行う。実験では時間の対数に比例して強度が回復する現象が見られ、また速度ステップ実験では速度をあげたときと下げたときの摩擦変化に対称性が見られるが、従来の速度及び状態依存摩擦則は両者を同時に再現できていなかった。Nagata et al. (2012)は両者を正確に再現できるように改良した摩擦則(Nagata則)を提案した。本研究では信頼性を高いシミュレーションを行うためにNagata則を用いた。さらに、より現実的な条件下について検討するために、法線応力変動の影響も取り入れた摩擦則に拡張した。

(2) Maeda et al. (2017)は不均質構造における地震波動場を計算する公開コードを開発したが、本計画においては応力変動も計算できるように改良する。2016年の三重県沖地震については、その改良コードを用い、震源モデルに基づいた現実的な動的な応力変動を計算し、その変動のトリガー効果を求める。

4. 研究成果

(1) 実験データを従来の摩擦則より再現できるNagata則を用い、地震トリガーに関する数値シミュレーションを行なった。3次元弾性体中に円形アスペリティを仮定したが、同じ半径のアスペリティでも、 a 、 b 、臨界滑り量などの摩擦パラメータの値を変化させると不安定-安定状況が連続的に変わり、周期的地震、周期的SSE、安定すべりなどが発生することがわかっている。周期的地震が起こっている条件下のある時点で、地震波による応力擾乱を与えると微小滑りが起こって、強度が下がり(滑り弱体化)、地震波通過時、あるいは何日か遅れて地震がトリガーされる。静的な応力擾乱を与えた場合は、動的な応力擾乱の場合より小さな応力変化量でトリガーされ、応力変化量の大小だけでトリガー効果を見積もることはできないこと、トリガー効果は応力擾乱の周波数に依存しないこと、などを示した。また、静的な場合は断層に働く応力が増大することにより、動的な場合は断層の強度が低下することによりトリガーされるが、ある動的な応力変化量に対し、トリガー効果が等価な静的な応力変化量を評価した。なお、Nagata則におけるCFFを導出しせん断応力、法線応力の両方を変化させてシミュレーションを行って導出したCFFによりトリガー効果が評価できることを確認した。

(2) 周期的SSEが起こっている条件下で、様々なタイミング、振幅で応力擾乱を与えると、擾乱の振幅が大きくなるにつれ、SSEの発生が早められ、SSE時の滑り速度が速くなる。さらに大きくすると、高速な地震滑りに移行する。また、安定すべりが起こっている条件下であっても、擾乱の振幅により、地震波通過時に、SSEあるいは高速な地震滑りがトリガーされることを示した。普段は地震やSSEが発生していない領域においても、地震波によりSSEなどがトリガーされる可能性を示唆する。2016年熊本地震の際、地震波が通過した時に、

それまで微小地震しか発生していなかった由布院断層で M5.7 の地震が発生したが、ひとつの説明になるかもしれない。さらに、アスペリティ内で浅くなるにつれ有効法線応力が小さくなるモデルについても調べ、深部で先に SES が発生し、その後浅部で SES が発生するという結果が得られた。これは 2016 年の三重県沖地震後の観測報告と整合的である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Yoshida Shingo, Maeda Takuto, Kato Naoyuki | 4. 巻 72 |
| 2. 論文標題 Earthquake triggering model based on normal-stress-dependent Nagata law: application to the 2016 Mie offshore earthquake | 5. 発行年 2020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/s40623-020-01272-5 | 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 Shingo Yoshida | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Numerical simulations of earthquake triggering by dynamic and static stress changes based on a revised friction law | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research | 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） 10.1029/2017JB014781 | 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 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉田真吾 |
| 2. 発表標題 RSF則に基づいた地震波によるSSEのトリガーに関する数値シミュレーション |
| 3. 学会等名 地震学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉田 真吾・福田 淳一・五十嵐 俊博 |
| 2. 発表標題 シミュレーションによる釜石沖繰り返し地震の予測実験の検証 |
| 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 吉田真吾・前田拓人・加藤愛太郎 |
| 2. 発表標題 動的応力変動および静的応力変動による地震のトリガー |
| 3. 学会等名 日本地震学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉田真吾・加藤尚之 |
| 2. 発表標題 RSF則に基づいたダイナミックトリガーに関する数値シミュレーション：2. 法線応力依存性 |
| 3. 学会等名 日本地震学会 |
| 4. 発表年 2018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 |
|-------|-----------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 前田 拓人 (Maeda Takuto) | | |
| 研究協力者 | 加藤 愛太郎 (Kato Aitaro) | | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|