

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400445

研究課題名(和文)地震発生の規則性と複雑性の起源に関する研究

研究課題名(英文)Origin of regularity and complexity of earthquakes

研究代表者

加藤 尚之(Kato, Naoyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60224523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生の複雑さの原因を理解するために、バネ-ブロックモデルと連続体モデルを用いて地震活動の数値シミュレーションを行った。速度・状態依存摩擦則を仮定することにより、バネ-ブロックモデルでも破壊核形成過程や様々な非地震性すべり過程が再現できることを確認した。また、連続体モデルでは、少数のアスぺリティの相互作用により、地震発生サイクルが非周期的になるなど複雑な地震活動が再現されることがわかった。地震活動の解析では、速度・状態依存摩擦則を用いたモデルから期待される、先行的な非地震性すべりにより説明可能な地震活動の静穏化が世界中の多くの巨大地震に対して見つかった。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the origin of complexity of earthquakes, we conduct numerical simulations using a spring-block model and an elastic continuum model. By the use of a rate- and state-dependent friction law, the slip nucleation process and various kinds of aseismic slip processes are reproduced in the spring-block model. In the elastic continuum model, complex earthquake cycles are reproduced even with a few asperities. From analyses of global earthquake catalogue, precursory seismic quiescence was found for some great earthquakes, which can be explained by preseismic sliding expected from the models with rate- and state-dependent friction.

研究分野：地震学

キーワード：地震活動 摩擦 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

地震発生は複雑な現象であり、その複雑な性質が予測を難しくしている。地震の繰り返しや規模別頻度分布などについて比較的単純な統計的性質が知られているが、その起源については複数の説があり、決着がつかない。もっとも単純な地震の起こり方は、同じ場所で同じ規模の地震が繰り返し発生することであるが、近似的にもこのような現象が起こるのは限られた場合のみである。多くの場合、ある領域における地震の繰り返し間隔は大きくばらつくし、規模も一定ではない。また、地震の規模別頻度分布はほぼべき乗則に従い、規模が大きな地震ほど発生頻度が低い。このような地震発生の複雑性について大きく分けて2つの説明がある。一つは、断層面上の摩擦特性や強度の不均一があるため破壊の停止などが起こり、様々な規模の地震が起こるとするものである。もう一つは、断層面上の物性は一樣であるが、破壊の動的な効果により断層面上の不均一応力場が自発的に形成され、その結果として様々な規模の地震が発生するとしたものである。前者は主に地震学分野において盛んに研究され、後者は統計物理学分野で研究されることが多い。これら2種類のモデルは、ほとんど別々に発展しており、両者の比較検討などは十分に行われていない。

### 2. 研究の目的

地震発生の予測を行い、その限界を明確にするためには、地震発生の規則性と複雑性を十分に理解する必要がある。本研究では、2つの異なる考え方に基づいた地震発生のモデルを用いたシミュレーションを行うことにより、地震発生の規則性と複雑性の原因について理解を進め、規則性と複雑性の程度を支配する要因を明らかにする。2つの考え方とは、断層面上の強度などの物性の不均一性を仮定するものと、摩擦の性質などに起因する動的に形成される不均一性が重要とするものである。地震活動データを利用して2つの考え方に基づくモデルの妥当性を検討し、地震発生の規則性と複雑性の程度の変動幅を支配する要因を明らかにする。

### 3. 研究の方法

統計物理学でよく用いられている地震のモデルであるバネ-ブロックモデルについて、バネの強さや摩擦の性質等のパラメータによって、再現される地震活動がどのように変化するかを数値シミュレーションにより調べる。原則的に、物性値は空間的に一樣で不均一性は導入しない。また、統計物理学でよく用いられる速度弱化摩擦則ではなく地震学で標準的に用いられている速度・状態依存摩擦則を用いて、仮定する摩擦則によるモデルの振る舞いの違いを明らかにする。破壊核形成過程など、地震学的なモデルでは詳しく調べられているが、統計物理モデルではあ

まり調べられていない現象が再現されるかを確かめる。

地震学では、弾性体中の断層に摩擦則を仮定して地震のシミュレーションを行うのが最も一般的である。断層面上に複数の速度弱化の摩擦特性を持つ断層パッチを仮定し、パッチごとに異なる摩擦パラメータを設定して数値シミュレーションを行う。これらの摩擦の不均一性が実現される地震サイクルに及ぼす影響を調べる。断層パッチの数は、バネ-ブロックモデルの自由度(ブロックの数)に対応すると考えられるので、連続体モデルとバネ-ブロックモデルの比較を、モデルの自由度ごとに調べ、2つのモデルで再現される地震サイクルの違いが生じるか否かを調べる。

地震活動データとモデルを比較することにより、モデルの妥当性を検討する。ここでは、速度・状態依存摩擦則から期待される大地震発生に先行する非地震性滑りが応力場を乱すことによる地震活動の変化、とくに地震活動静穏化に着目する。信頼性の高い地震カタログを用いて、大地震発生前の地震活動静穏化が現れるかどうかを世界中の多くの地震について検討し、静穏化の期間等について経験則を得て、モデルから期待される現象との比較を行う。

### 4. 研究成果

#### バネ-ブロックモデル

3自由度のバネ-ブロックモデルを用いたシミュレーションにより、ブロック間相互作用が地震活動に及ぼす影響を調べた。摩擦パラメータやバネの強さによって、ほぼ周期的に地震が発生する期間と不規則に地震が発生する期間が交互にあらわれる場合があることがわかった。このような現象は2自由度のバネ-ブロックモデルでは観測されなかった。また、2自由度の場合も3自由度の場合も、非地震性すべりの発生は地震サイクルを複雑にする傾向があることがわかった。

多自由度バネ-ブロックモデルと連続体モデルの比較では、連続体モデルで多くの研究が行われてきた破壊核形成過程をバネ-ブロックモデルで再現した。速度・状態依存摩擦則に従う1次元バネ-ブロックモデルに対する数値シミュレーションにより、地震先行現象としての破壊核形成過程の物理を探索した。初期フェーズから加速フェーズ、そして本震に至るまでのダイナミクスを、数値的および解析的手法により精査し、速度・状態依存摩擦則に従う一樣均質な断層においては常に初期フェーズを伴う破壊核形成過程が先行することを示し、各フェーズの継続時間と核形成長さを評価した。さらに、このモデルに関して、余効すべりやサイレント地震等のスロースリップ現象について調べた。速度・状態依存摩擦則を特徴づける  $a, b$  パラメータの大小で、高速破壊、余効すべりを伴う高速破壊、スロー地震の領域に分かれ

ることなど、少数個の摩擦則・弾性パラメータにより、多様な地震性および非地震性のすべり現象が、単一の枠組みにおいて再現できることが判った。これは、複雑多様な地震現象の物理的起源に関する理解を得る際に、有用な指針を与えるものと期待される。

#### 連続体モデル

均質弾性体中の平面断層上に2つのアスペリティを仮定したモデルで長期間のすべり挙動の数値シミュレーションを行った。その結果、アスペリティの一方ですべり挙動が地震的から非地震的に変化する際に、地震発生サイクルが複雑になり多重周期や非周期的なサイクルになることがわかった。ほかに、サイスミックカップリング係数(非地震性すべり量と全すべり量の比)が急変するときに、多重周期や非周期的な地震サイクルが現れることがわかった。

均質弾性体中の平面断層上に3つのアスペリティを仮定したモデルで長期間のすべり挙動の数値シミュレーションを行った。2つのアスペリティを考慮したモデルでの結果と同様に、1つのアスペリティですべり挙動が地震的から非地震的に変化する際に、地震発生サイクルが複雑になり非周期的なサイクルになることがわかった。2つのアスペリティが存在するモデルよりも非周期的なサイクルになる割合が高い傾向がみられたが、これは、アスペリティ数が増えたことで、複数のアスペリティ破壊が同期する組み合わせが増えたことと関係するようである。この結果と3自由度バネ-ブロックモデルの結果を比較すると、すべり挙動が地震的から非地震的に変化する際に地震発生サイクルが複雑になるは共通するが、バネ-ブロックモデルの方がより複雑な地震サイクルになりやすい。バネ-ブロックモデルのシミュレーション結果の解釈の際には注意が必要である。

#### 地震活動データ解析

速度・状態依存摩擦則に基づくモデルから期待される非地震性の先行すべりによる地震活動静穏化を観測データから検証した。2004年スマトラ(Mw9.1)地震に先行した地震活動の長期静穏化について、1964年から2004年までに発生した実体波マグニチュードが5.0以上、深さ100km以浅の地震をISCの地震リストから選び、地震活動度の時間変化を調べた。その結果、本震発生の13年前から地震活動が低下していたことが明らかとなった。その領域は、本震時に最大の滑りが生じた震源域南東部に位置している。このような静穏化は、本震震源域の深部延長での長期的スロースリップによる応力擾乱で説明可能である。

さらに、ISCの地震カタログから1964年1月から2012年6月までに千島海溝、日本海溝および琉球海溝沿いに発生した実体波マグニチュード5.0以上、深さ60km以浅の地

震を選択し、デクラスタリング処理した後、ZMAPで地震活動の長期変化を解析した。その結果、9年以上継続する長期静穏化が11回観測され、その内3回はMw=8.25以上の巨大地震に先行する変化であった。特に、2011年東北地方太平洋沖地震では、2002年頃開始した長期的SSE(Yokota and Koketsu, 2015)と静穏化領域がほぼ同じ場所であることから、両者が密接に関連していると考えられる。

Global CMT カタログの、1990年以降発生した深さ100km以浅、モーメントマグニチュード8.0以上の地震24個すべてについて、地震活動の長期静穏化が本震前に見られるかどうかを調査した。24個の内5個に関しては定常地震活動が低いため解析不可能であった。それ以外の19個に関して、震源域及びその周囲において1964年から本震時まで発生した実体波マグニチュードが5.0以上、深さ60km以浅の地震をISCの地震リストから選び、地震活動度の時間変化を調べた。その結果、19個すべての地震において、本震前に長期静穏化が見られた。静穏化の継続時間は9年から25年であった。

#### 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7件)

Kawamura, H., Y. Ueda, S. Kakui, S. Morimoto and T. Yamamoto Statistical properties of the one-dimensional Burridge-Knopoff model obeying the date and state dependent friction law, Phys. Rev. E, 95, 042122(1-14), 2017. 査読有

Xie, Y. and N. Kato, Fracture energies at the rupture nucleation points of large strike-slip earthquakes on the Xianshuihe fault, southwestern China, J. Asian Earth Sci., 134, 55-62, doi: 10.1016/j.jseaes.2016.10.013, 2017. 査読有

Katsumata, K., Long-term seismic quiescences and great earthquakes in and around the Japan subduction zone between 1975 and 2012, Pure Appl. Geophysics, doi:0.1007/s00024-016-1415-8, 2017. 査読有

Kato, N., Earthquake cycles in a model of interacting fault patches: Complex behavior at transition from seismic to aseismic slip, Bull. Seismol. Soc. Am., 106, 1772-1787, doi: 10.1785/0120150185, 2016. 査読有

Katsumata, K., A long term seismic quiescence before the 2004 Sumatra (Mw9.1)

earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 105, 167-176, doi:10.1785/0120140116, 2015. 査読有

Ueda, Y., S. Morimoto, S. Kakui, T. Yamamoto and H. Kawamura, Dynamics of earthquake nucleation process represented by the Burridge-Knopoff model, European Physical Journal B 88, 235-(1-24), 2015. 査読有

Ueda, Y., S. Morimoto, S. Kakui, T. Yamamoto and H. Kawamura, Nucleation process in the Burridge-Knopoff model of earthquakes, Europhys. Lett., 106, 69001, 2014. 査読有

〔学会発表〕(計 12 件)

川村光, スロースリップから高速破壊へ統計物理モデルによる研究, 日本物理学会年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学(大阪府・豊中市).

Kawamura, H., From slow slips to high-speed rupture of earthquakes --- A statistical physical model study, Statphys Kolkata IX, 2016 年 12 月 13 日, Saha Institute of Nuclear Physics, Kolkata(India).

川村光, 沈み込み帯を模した非一様 Burridge-Knopoff モデルによるスロースリップと高速破壊, 日本地震学会秋季大会, 2016 年 10 月 5 日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市).

勝俣啓, 東北沖地震前の地震活動長期静穏化とスロースリップイベント, 日本地震学会秋季大会, 2016 年 10 月 5 日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市).

阿久刀川潤・川村光, 1 次元バネ-ブロックモデルによる高速破壊地震に対する不均一性の影響の数値的探究, 日本物理学会秋季大会, 2016 年 9 月 13 日, 金沢大学(石川県・金沢市).

勝俣啓, 2010 年チリ地震(Mw8.8)と 2001 年ペルー地震(Mw8.4)に先行した地震活動の長期静穏化, 地球惑星科学連合大会, 2016 年 5 月 22 日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).

川村光・植田祐史, Burridge-Knopoff モデルによるスロースリップの数値シミュレーション, 日本地震学会秋季大会, 2015 年 10 月 27 日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市).

勝俣啓, 日本付近の地震活動長期静穏化と巨大地震, 日本地震学会, 2015 年 10 月 27

日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市).

勝俣啓, 千島海溝沿い巨大地震に先行した地震活動の長期静穏化, 日本地球惑星科学連合, 2015 年 5 月 26 日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).

吉村高志・川村光, 速度・状態依存摩擦則に従う 2 次元バネ-ブロックモデルによる地震の数値シミュレーション, 日本物理学会年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学(東京都・新宿区).

勝俣啓, 2005 年から始まった関東地方の地震活動活発化, 日本地震学会秋季大会, 2014 年 11 月 24 日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市).

Kawamura, H., Statistical physical model of earthquakes, Waseda Symposium New Challenges in Complex Systems Science, 2014 年 10 月 24 日, Waseda University(東京都・新宿区).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 尚之 (KATO, Naoyuki)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 6 0 2 2 4 5 2 3

### (2) 研究分担者

川村 光 (KAWAMURA, Hikaru)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 3 0 1 5 3 0 1 8

勝俣 啓 (KATSUMATA, Kei)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号: 1 0 2 6 1 2 8 1