

令和元年5月29日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13851

研究課題名（和文）地震断層のスロースリップ現象の統計物理的研究

研究課題名（英文）Statistical physical study on slow-slip phenomena of earthquake faults

研究代表者

川村 光（Kawamura, Hikaru）

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：30153018

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：地震現象の代表的な統計物理モデルとして知られるバネ-ブロックモデルを、標準的な摩擦構成則である「速度状態依存摩擦則」と組み合わせたモデルを用いて、通常の高速破壊地震のみならずスロースリップ現象を含めた地震現象の物理を、主として数値シミュレーションによって調べた。単純なバネ-ブロックモデルの範囲で少数個のモデル・パラメータを変化させることにより、通常の高速破壊地震のみならず、地震核形成過程、余効すべりやサイレント地震等のスロースリップ現象までが、統一的な枠組みの中で再現出来ることを明らかにした。このようなモデルと枠組みの同定は、今後の地震研究に対しても重要なレフェレンスを提供することであろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震はしばしば重大な災害をもたらすため、一般からの社会的関心も極めて高い自然現象である。地震は物理的観点からは多自由度が示す複雑な動的不安定性現象であるが、その基本的物理プロセスの理解に未だ欠落した部分が多々残っている。本研究は、少数個のパラメータで記述できる単純化された統計物理学的地震モデルを用いて、大規模数値シミュレーションにより、地震現象の物理的本質を明らかにしようというプロジェクトであった。研究の結果、通常の高速破壊地震のみならず、地震核形成過程、余効すべりやサイレント地震等のスロースリップ現象までを統一的な枠組みの中で再現することに成功し、多くの新たな物理的知見を得ることが出来た。

研究成果の概要（英文）：The spring-block model known as a representative statistical physical model of earthquakes combined with the rate-and-state dependent friction law is investigated by means of large-scale computer simulations in order to get physical understanding of earthquake phenomena including not only high-speed rupture of main shock, but also slow-slip phenomena such as earthquake nucleation process, afterslips and silent earthquakes. We have succeeded in reproducing a rich variety of these seismic slips by varying only a few basic parameters of such a simplified model within a single framework. Finding of such a simple unified framework capable of reproducing a variety of seismic slips even including slow slips on the same footing would provide a useful reference for future earthquakes studies.

研究分野：物性物理学

キーワード：地震 スロースリップ バネ-ブロックモデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地震はプレートの運動によって駆動された断層の示す固着-すべり (stick-slip) 不安定性である。地震研究の主舞台は固体地球科学分野であるが、地震は駆動系が示す動的な不安定現象であるため、統計物理・物性物理分野からのアプローチも有効で、これまでも統計物理的なモデルに基づいた計算機シミュレーション等の研究が行われてきた。広く使われてきた単純化された地震モデルとして、**バネ-ブロックモデル (Burridge-Knopoff (BK)モデル)**がある。これは、地震断層を弾性バネで互いに連結された離散化されたブロックの集合体とみなし、プレート運動を模した外部駆動力と摩擦力を受けつつ各ブロックが運動するとしたモデルである。申請者等は、これまで、標準的な摩擦則 — 例えば**速度状態依存摩擦則 (rate and state dependent friction law (RSF))** — に従う1次元及び2次元のBKモデルの諸性質を数値シミュレーションにより系統的に調べ、高速破壊地震の性質に関し幾多の知見を得てきた。例えば、1) 地震のサイズ分布は小地震側ではベキ則的であるが、大地震側ではベキ則からずれ固有地震的性格を帯びる、2) RSF則の摩擦不安定性が弱いときには、本震に先立って準静的な破壊核形成過程、前駆すべりが現れる、3) 完全に一樣均一なモデルにおいても、しばしば系に内在する不安定性を通して非均一性が自己生成されアスペリティ的挙動が現れる、等地震現象に関わる多彩な物理の一端を明らかにした [H. Kawamura et al., Rev. Mod. Phys. **84**, 839-884 (2012)]。近年、GPSテクノロジーの進歩により、通常の高速破壊の地震に加え、地震波を放出しないゆっくりした断層すべり現象が頻繁に起きていることが、観測的に明らかになってきた。特に地震波を伴わずに、数日から時には数年にわたってすべる**スロースリップ現象 (スロー地震、サイレント地震)**の発見 [K. Obara, Science **296**, 1679 (2002)]は、これまでの地震概念を大きく拡大する画期的なものだった。このような状況の下、通常の高速破壊型の地震に加えて、地震断層が示すスロースリップ現象をも包含するような統合的な地震すべり現象の物理的理解が待たれるところであった。

2. 研究の目的

地震はプレートの運動によって駆動された断層の示す**固着-すべり不安定性**であり、統計物理・物性物理からのアプローチが有効である。本研究の目的は、過去、通常の高速破壊型の地震に対して広く用いられてきた**バネ-ブロックモデル**を、新たにスロースリップ現象にも適用し、**計算機シミュレーション**によって、通常の高速破壊地震に加え「高速破壊地震に先立つ**前駆すべり**」、「高速破壊地震に引き続く**余効すべり**」、「高速すべりを伴わない**スロースリップ (スロー地震)**」等の断層すべりを再現、これら多様なすべり現象間の相互関係と発生条件を、統一的観点から物理的に明らかにすることである。

3. 研究の方法

速度状態依存摩擦則に従う1次元バネ-ブロックモデルを、特にスロースリップに対応していると予想されるパラメータ領域を主として、その連続極限にも注目しつつ、**系統的な大規模計算機シミュレーション**により精査する。合わせて、スロースリップ現象を記述する解析的な理論計算も行う。同様のモデルをより現実的な2次元へと拡張、2次元性に由来する非自明な幾何学構造にも着目しつつ、高速破壊地震とスロースリップ現象のダイナミクスとパラメータ依存性の詳細を、計算機シミュレーションにより明らかにする。最終的には、これらの計算結果を総合して、**高速破壊地震から各種のスロースリップ現象を包含する統一的な地震、断層すべり描像**を構築、検討する。

4. 研究成果

地震現象の代表的な統計物理モデルとして知られるバネ-ブロックモデルを、標準的な摩擦構成則である「速度状態依存摩擦則」と組み合わせたモデルを用いて、通常の高速破壊地震のみならず、スロースリップ現象を含めた地震現象の物理を、主として数値シミュレーションによって調べた。3年間の本研究を通し、単純なバネ-ブロックモデルの範囲で少数個のモデル・パラメータを変化させることにより、**通常の高速破壊地震のみならず、地震核形成過程、余効すべりやサイレント地震等のスロースリップ現象までが、統一的な枠組みの中で再現出来る**ことが明らかになった。これら一連の研究成果は、3報の学術論文および10件の学会発表として公表された。

解析は、主として、最も単純な1次元モデルを対象に行われたが、1次元のみならず2次元のバネ-ブロックモデルに対しても、高速破壊からスロースリップ現象までの性質を精査した。1次元モデルに関しては、高速破壊については連続極限も含めた最も詳細な解析結果が学術論文(3)に、またスロースリップに関する解析結果が学術論文(1)に報告されている。2次元モデルの高速破壊地震に関する大規模シミュレーション結果は学術論文(2)に報告されている。

以下、それらを通して得られた知見について、簡単にまとめる。

まず1次元のバネ-ブロックモデルに対し、高速破壊地震に加え、モデルのスロースリップ現象の性質を精査した。その結果、速度状態依存摩擦則を記述する主要なパラメータである所謂 a, b パラメータの関係によってモデルの**地震性すべりが大きく異なる3つのパラメータ領域に分類される**ことを、詳細なシミュレーションにより確認した。即ち、[I] $a < b$ であれば、**通常の高速破壊地震**、[II] a が b と同程度から数倍程度までは、**通常の高速破壊地震に引き続**

くゆっくりとした余効すべり、[III] a が b の数倍程度より大きいと高速破壊地震は起きなくなり 3~4 桁程度ゆっくりすべるスロースリップのみが起きるという興味深い性質を確立した。離散モデルであるバネ-ブロックモデルの連続極限での性質には興味を持たれるところであるが、摩擦不安適性が強いパラメータ領域に加えて摩擦不安適性が弱いパラメータ領域でも計算を行い、モデルの連続極限での高速破壊地震とスロースリップ現象の性質を明らかにした。

2 次元モデルに対しても、高速破壊領域およびスロースリップ領域の双方について大規模シミュレーションを行い、結果を対応する 1 次元モデルと比較しつつ解析した。その結果、2 次元モデルでも 1 次元モデルと同様に、a, b パラメータの大小関係によってモデルの地震性すべりが大きく異なる 3 つのパラメータ領域に分類されることを確認した。また、高速破壊地震については、最も大規模な巨大地震に際しては系の 2 次元性を反映した幾何学的側面が重要になり、しばしばアスペリティ的な振る舞いが現れること等の新たな知見を得た。加えて、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も数値シミュレーションを行い、概ね 1 次元モデルと類似の性質を示すことを確認した。

以上から、速度状態依存摩擦則に従う 1 次元及び 2 次元のバネ-ブロックモデルは、少数個のパラメータで記述される極めてシンプルなモデルであるにも関わらず、地震先行現象、高速破壊から余効すべりや短期的・長期的なスロースリップまでの多様な地震性すべりを再現できることが判った。単一のモデル・枠組みの範囲で少数個のパラメータを動かすだけで、多様な地震現象を統一的に記述できることは驚きであり、今後の地震研究に対して重要な参考文献を提供することであろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) Kawamura Hikaru, Yamamoto Maho, Ueda Yushi, Slow-Slip Phenomena Represented by the One-Dimensional Burridge-Knopoff Model of Earthquakes, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有、87 巻、2018 年、53001、<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.053001>

(2) Kawamura Hikaru, Yoshimura Koji, Kakui Shingo, Nature of the high-speed rupture of the two-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 査読有、377 巻、2018 年、20170391、<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0391>

(3) Hikaru Kawamura, Yushi Ueda, Shingo Kakui, Shouji Morimoto, and Takumi Yamamoto, Statistical properties of the one-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes obeying the rate- and state-dependent friction law, Physical Review E, 査読有、95 巻、2017 年、042122 (1-14)、DOI:10.1103/PhysRevE.95.042122

[学会発表] (計 10 件)

(1) 阿久刀川潤、川村光、速度状態依存摩擦則に従う 2 次元バネ - ブロックモデルのスロースリップ現象、日本物理学会第 72 回年次大会、2018 年

(2) 羽矢純也、川村光、1 次元バネ - ブロックモデルにおけるスロースリップ現象への不均一性の効果の数値的探究、日本物理学会第 72 回年次大会、2018 年

(3) 中野真理、川村光、速度状態依存摩擦則に従う多層バネ - ブロックモデルの統計的性質、日本物理学会第 72 回年次大会、2018 年

(4) 川村光、スロースリップから高速破壊地震へー統計物理モデルによる研究、日本物理学会第 71 回年次大会、2017 年

(5) 山本真帆、川村光、沈み込み帯を模した不均一 1 次元バネ - ブロックモデルの数値シミュレーション II、日本物理学会第 71 回年次大会、2017 年

(6) Hikaru Kawamura, Slow slips and high-speed rupture of earthquakes, Plasticity and failure in disordered materials, 2017 年

(7) Hikaru Kawamura, From slow slips to high-speed rupture of earthquakes -- A statistical physical model study, Statphys Kolkata IX, 2016 年

(8) 川村光、山本真帆、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、2016 年

(9) 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

影響の数値的探求、日本物理学会秋季大会、2016年

(10) 山本真帆、川村光、沈み込み帯を模した不均一1次元バネ-ブロックモデルの数値シミュレーション、日本物理学会秋季大会、2016年

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。