

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540385

研究課題名（和文） 摩擦不安定性としての地震現象の統計物理学的研究

研究課題名（英文） Statistical physical study of earthquakes as a frictional instability

研究代表者

川村 光 (Kawamura Hikaru)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30153018

研究成果の概要（和文）：本基盤研究では、地震の統計・物性物理学の構築に向け、長年統計物理分野で地震現象の標準的モデルとして研究されてきた**バネ-ブロックモデル**に、現地震学分野で広く用いられている、摩擦力が滑り面での「状態」にも依るとする所謂「**滑り速度-状態依存摩擦則**（Dietrich-Ruina 摩擦則）」を組み合わせたモデルに基づき、数値シミュレーションを主体とした地震現象の統計物理的な研究を展開した。その結果、モデルは摩擦不安定性が強い場合と弱い場合とで定性的に異なった振る舞いを示すこと等を明らかにすることに成功した。

研究成果の概要（英文）：In this project, toward the construction of statistical physics of earthquakes, we studied the properties of earthquakes based on the spring-block model obeying the rate-and-state dependent friction law now widely used in seismology where the friction depends on the “state” of the sliding interface. We then found that the model exhibits qualitative distinct behaviors depending on whether the frictional instability is either weak or strong.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数学系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：地震・非線形物理学・摩擦構成則

1. 研究開始当初の背景

我が国は地震国であり、しばしば大きな地震に見舞われる。**地震**は、第1義的には、地殻の弱面である断層がプレートの運動により駆動されることで急激に滑る「**固着-滑り (stick-slip) 不安定性**」であり、そのダイナミクスは、**摩擦の物理法則——摩擦構成則——**によって支配されている。地震は**開放駆動系の示す動的不安定現象**であることから、**統計物理学・物性物理学的なアプローチ**は有効なものになり得る。過去、「**自己組織臨界性**」の概念に基づいた P. Bak 等の研究や**バネ-ブロックモデル** (Burridge-Knopoff モデル) に基づいた Carlson-Langer 等の統計力学的研究が 1990 年代に活発に展開された。また、地震が本質的に固着-滑り現象であることから、地震現象の理解には摩擦物性の知見が極めて重要になり、この点において物性物理ともクロスオーバーする。ただし、2000 年代以降は、地震研究に際し、統計物理分野と地震学分野の交流はあまり活発であったとは言えず、その間地震学分野で標準化した「**速度状態依存摩擦則**」や「**アスペリティ**」概念は、統計物理分野における地震へのアプローチには、必ずしも反映されていない状況であった。研究代表者 (川村) は、このような状況下で、バネ-ブロックモデルに基づいた統計物理的アプローチを展開してきたが、地震学分野で標準化している速度状態依存摩擦則を統計物理的モデルに取り入れること、そして地震の前駆過程としての破壊核形成過程の探究を進める必要性を、痛感するにいたった。

2. 研究の目的

本基盤研究では、地震の統計・物性物理学の構築に向けた新たな展開を目指して、地震学分野で広く用いられている、摩擦力が滑り面

での「状態」にも依るとする所謂「滑り速度-状態依存摩擦則 (Dietrich-Ruina 摩擦則)」を用いたバネ-ブロックモデルの研究を展開した。この摩擦構成則は、状態変数を通して複雑な履歴現象を生むばかりでなく、特徴的な距離スケールを内包しており、「**破壊核形成**」等の最近話題になっている**地震先行現象**を実現していると考えられる。破壊核というのは、大地震に先行してゆっくりした微小破壊に限られた領域でまず起き、そこを種として大規模な地震破壊がある時一挙に進行するという現象である。もしそのような破壊核が大地震に先立って形成されるなら、破壊核を事前に見出しモニターすることによって大地震の予知が可能になるのではないかと期待される。本基盤研究は、上記の滑り速度-状態依存摩擦則をバネ-ブロックモデルと組み合わせたモデルに基づいた大規模数値シミュレーションを行うことによって、地震の性質に関する以下の2つの知見を得ることを目標に、スタートした。

- (i) 地震の統計的諸性質を、特にその構成則パラメータ依存性に着目して解析・探査する。
- (ii) 地震先行現象としての破壊核形成過程に着目し、とりわけ破壊核形成過程時の物理プロセスとその構成則パラメータ依存性を明らかにする。

3. 研究の方法

本基盤研究の主要な手法は、モデル系に対する数値シミュレーションである。主として研究室設置の計算機クラスターによりシミュレーションを実行したが、相補的に東大物性研の共同利用スーパーコンピュータ等も使用した。シミュレーション計算とデータ解析は、研究代表者 (川村) と M2 の学生 1 名により行った。

4. 研究成果

地震現象の本性については、今なお十分には理解されていない一見相反する2面性が存在する。即ち、地震現象には臨界現象的なベキ則によって支配される部分（固有のエネルギーや時間のスケールを持たない）がある一方で、非臨界的性質（固有のエネルギーや時間のスケールを持つ）もあり、双方の側面が共存するように見える。前者の性質としては、地震のサイズ（エネルギー）分布が**ベキ乗則**に従うことを表す **Gutenberg-Richter 則** が著名である。後者の性質としては、地震が一定の周期で繰り返すとする「**固有地震**」の観点や、地震を引き起こす強く固着した一定の空間領域が存在とする「**アスペリティ**」の観点がある。このように、地震現象の本性に関して**臨界性と固有性**がどのように関係し共存しているのか、統計・物性物理的観点からも極めて興味深い問題である。他方、物性物理的観点に立つと、これら地震の性質は、摩擦構成則や弾性的性質といった「**マイクロ**」な物性パラメータで決定されているはずであり、「**マクロ**」な地震現象を「**マイクロ**」な観点から明らかにすることは、地震の物理学に課された課題の1つである。また、地震については、常にその予知が大きな社会的課題となるため、地震先行現象が特別の興味の対象となる。様々な先行現象が報告されているが、本基盤研究では、その中でも破壊核形成過程に着目し、滑り速度-状態依存摩擦則（Dietrich-Ruina 摩擦則）を用いたバネ-ブロックモデルに基づいて、集中的な研究を展開した。

数値シミュレーションは、まず最も単純な、1次元の最近接相互作用を持つモデルを対象とした。摩擦不安定性が強い場合には、本基盤研究発足以前に我々のグループにより

既にある程度の計算が行われていたが、今回、計算を摩擦不安定性が弱い一般的な場合にも拡張した。その結果、摩擦不安定性の強弱に伴い、各地震イベントが先行現象としての破壊核形成を伴う（摩擦不安定性が弱い）、ないしは伴わない（摩擦不安定性が強い）ことを新たに見出した。また、2つの対比的な振る舞いの境界を決めるパラメータ条件を見出すとともに、弾性スティフネスと摩擦弱化度の大小から、その理論的基礎付けを得ることに成功した。さらに、この性質は、より現実的な最近接相互作用を持つ2次元のモデルについても共通に見られることも、確認した。

地震の統計的性質については、まず、1次元の最近接相互作用を持つモデルについて、地震イベントのマグニチュード分布、再帰時間分布等の統計的諸量を、十分な統計精度を確保しつつ、摩擦不安定性が強い場合・弱い場合双方について計算した。過去、摩擦不安定性が強い場合に既に見出されていたように、マグニチュード分布や再帰時間分布の振る舞いは、ベキ則から大幅にずれる。特に、今回新たに計算した摩擦不安定性が弱いパラメータ領域においては、分布はむしろ固有地震的になり、特徴的なエネルギーや時間スケールを有するようになる。加えて、今回の解析より、モデルの大地震は2つの異なったタイプに分けられることが判明した（タイプ1とタイプ2）。前者（タイプ1）は過去の地震の破壊域の境界付近を震源とする地震で片側地震性が強いのに対し、後者（タイプ2）は過去の地震の破壊域の内部を震源とする地震で両側性が強い（破壊が震源から両側へと進行する）。特に、タイプ2の地震は、同じ震源位置で類似の地震を繰り返す傾向があり、アスペリティ的性格を色濃く持つ。

タイプ2地震においてアスペリティ的振る舞いが実現する機構についても、定性的に理解することが出来た。

次に、より現実的な2次元モデルについて、統計的諸性質の計算を行った。その際、当然のことながら、2次元モデルは1次元モデルに比して必要な計算量が格段に増大する。これには、計算を高速化させるべく、アルゴリズム上の幾多の工夫を行うことにより対処した。その結果、2次元モデルにおいては、対応する1次元モデルに比べて固有的性格が多少弱まるものの、とりわけ摩擦不安適性が弱い場合には、やはり固有性を色濃く示すことが判明した。一方、摩擦不安適性が非常に強い2次元モデルの場合には、そのマグニチュード分布は、完全なベキ則ではないものの比較的ベキ則（Gutenberg-Richter 則）に近い振る舞いを示すことも判明した。

なお、バネ-ブロックモデルにはブロックサイズに対応した短波長カットオフ長さが存在するため、ブロックサイズ $\rightarrow 0$ の連続極限でどのような振る舞いが実現されるかは、自明ではない。実は、連続極限は、元のパラメータの如何に依らず、摩擦不安適性が弱い場合に対応していることを示すことができる。この意味で、**速度状態依存摩擦則に従う一様均質な断層系が示す地震は、本来、固有的な（非臨界的な）振る舞いをする**ことが、本研究から示されたことになる。これは、地震の性格を理解する上で、大変重要な知見と言えよう。もちろん、実際の断層系には必ず不均一性が存在するし、真の摩擦構成則が標準的な速度状態依存摩擦則で十分かどうかは、非自明であるが。なお、今回の結果は、バネ-ブロックモデルで観測される臨界的な振る舞いはカットオフ長さを十分小さくし

た連続極限では消失するのではないかと、という過去の Rice の批判 [J. M. Rice, JGR 98, 9885 (1993)] と調和的な結果である。

摩擦不安適性が弱い場合に観測された**破壊核形成**についても、特に1次元モデルを中心に、研究を進めた。過去、Ohnaka & Matsuura により、破壊核形成過程には可逆的な「**初期フェーズ**」と非可逆的な「**加速フェーズ**」が存在することが提案されていたが、今回のシミュレーションではその振る舞いを確認するとともに、ブロック速度や状態変数の動的振る舞いを定量的に探査した。一般には、初期フェーズから加速フェーズに移行する時点では、滑り速度はプレートの駆動速度と同じオーダーで極めて遅いことが判り、GPS等の手法で検知するのは極めて困難と思われる。他方、加速フェーズに入ってから滑り速度は加速的に増大するので、検知の可能性は出てくるが、今度は本破壊までが時間的に切迫してくる。

今後は、今回の基盤研究の成果に立脚しつつ、加速フェーズにおける滑りの時間発展の詳細と検知可能性、対応する2次元モデルの破壊核形成過程について、さらなる研究を進めていく必要がある。

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3件)

1. "Statistical Physics of Fracture, Friction and Earthquakes" 査読有
H. Kawamura, T. Hatano, N. Kato, S. Biswas and B. K. Chakrabarti, Rev. Mod. Phys. **84**, 839 (2012)
2. "Simulation study of the inhomogenous Olami-Feder-Christensen model of earthquakes" 査読有
T. Yamamoto, H. Yoshino and H. Kawamura, Eur. Phys. J. B **77**, 559 (2010)
3. "Asperity characteristics of the Olami-Feder-Christensen model of earthquakes" 査読有
H. Kawamura, T. Yamamoto, T. Kotani and H. Yoshino, Phys. Rev. E **81**, 031119 (2010)

[学会発表] (計5件)

1. 川村 光: 日本物理学会第67回年次大会 (シンポジウム講演) 領域11, 領域12合同シンポジウム「室内実験とシミュレーションから地震の複雑性にどこまで迫れるか?」"地震の統計モデル、その臨界性と固有性" 2012年3月25日、関西学院大学
2. 角井心悟、川村 光: 日本物理学会第67回年次大会 "速度状態依存摩擦則を用いたバネブロックモデルにおける破壊核形成過程" 2012年3月24日、関西学院大学
3. 角井心悟、川村 光: 日本物理学会 2011年 2011年秋季大会 "速度状態依存摩擦則を用いた2次元バネブロックモデルの統計的性質の無限サイズ極限" 2011年9月22日、富山大学

4. 角井心悟、川村 光: 日本物理学会 2011年 年次大会 "速度状態依存摩擦則を用いた2次元バネブロックモデルの数値シミュレーション2" 2011年3月28日、新潟大学
5. 角井心悟、川村 光: 日本物理学会 2010年 年秋季大会 "速度状態依存摩擦則を用いた2次元バネブロックモデルの数値シミュレーション" 2010年9月24日、大阪府立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 光 (Kawamura Hikaru)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 30153018

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: