

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13637

研究課題名（和文）地震の個性や不均質を記述する確率微分方程式論的断層モデル

研究課題名（英文）SDE modeling for diversity and heterogeneity of earthquake ruptures

研究代表者

平野 史朗（Hirano, Shiro）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：60726199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000 円

研究成果の概要（和文）：地震時の断層滑りがどのような履歴を辿るかを、数理モデルによって確率的に表現する方法を提案した。断層滑りの履歴は地震ごとに大きく異なり多様であることが知られているため、従来の方法論とは異なり、確率的にしかモデル化できないであろうという立場から、本研究は出発している。したがって本モデルは、個々の地震の振る舞いを説明するものではない。それでも本研究では、多数の観測事例から滑り履歴について知られる複数の経験則を、本モデルが統計的に再現することを示した。更にその物理的背景について、予察的ではあるものの、断層面上の摩擦挙動と本モデルの確率過程が対応付け可能であろうということを提唱した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震が複雑な現象であることは広く知られているが、その複雑さを定量化する方法が確立しているわけではない。本研究は、その道筋のひとつを見つけたものと言える。複雑さの定量化は、震源過程の物理を理解する上で極めて重要な情報をもたらす。また波及効果として、震源から放射される地震波による強震動をシミュレーションする際、震源過程にどの程度の多様さ・不確かさを仮定すればよいかという判断にも寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：We proposed a stochastic model to represent a time series of earthquake faulting processes. The time series, called Source Time Functions (STFs), have diversity among earthquakes, and our basic concept is that such diversity can be modeled in a stochastic framework rather than conventional methods; thus, our model is not for individual earthquake events. Still, our model could statistically reproduce multiple empirical laws on STFs based on many observational studies. Furthermore, we speculated a relationship between an on-fault frictional behavior and the stochastic process employed in our model.

研究分野：地震学

キーワード：震源物理学 断層運動 確率微分方程式 モーメントレート関数 震源時間関数

1. 研究開始当初の背景

地震時の断層滑りの時刻歴を震源時間関数と呼ぶ。震源時間関数は複雑かつ多様であることが知られていたが、その複雑さ・多様さを定量化したり、理論モデルによって再現することは容易ではなかった。また個々の地震について、断層における形状や物性の不均質など個別の条件を知ることは、地下における現象であることから、発生前はもちろん、発生後においても限界がある。したがって、知り得ない条件によってもたらされる震源時間関数の複雑さをモデル化する必要があり、その方法としては確率論的アプローチが有効であろうと考えられた。実際、スロー地震については、確率微分方程式を用いて、震源時間関数について複数の経験則を再現するモデルが提唱されていた。一方で通常の地震については、研究開始当初までにそのような確率論的アプローチも少数ながら存在したが、それらは通常地震の震源時間関数について知られる経験則を複数満たすものではなかったため、より包括的に観測を再現する確率モデルが必要とされた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、通常地震の震源時間関数の複雑さ・多様性・統計的経験則を説明しうる確率モデルを提唱し、その説明能力や物理的背景を検証することである。

3. 研究の方法

観測によって知られる通常地震の震源時間関数についての複数の経験則に適合するような関数を生成するために、どのような確率過程を用いればよいかを考えた。特に説明すべき経験則として、以下の4つを挙げた：

- ・(経験則1) 非負値であり、有限な継続時間を持ち、過半数は単峰的である
- ・(経験則2) Fourier 振幅スペクトルが、高周波側で周波数の -2 乗に比例する (ω^{-2} モデル)
- ・(経験則3) 時間積分すると、経過時間の3乗に比例して増大する関数を得る (自己相似則)
- ・(経験則4) 継続時間の頻度分布がべき分布に従う (Gutenberg-Richter 則)

広く用いられる確率微分方程式の解は、その駆動力として白色雑音を含むため、本質的に Brown 運動に近いふるまいを示す。Brown 運動の Fourier 振幅スペクトルは周波数の -1 乗に比例するため、スロー地震の震源時間関数についてはこれで良いが、通常地震の上記経験則2が満たされることはない。しかし、そのような関数同士を畳み込み積分すれば経験則2を満たすことが考えられたため、より具体的にどのような確率微分方程式の解同士を畳み込めば、他の経験則(1,3,4)をも満たすことができるかを考察した。

4. 研究成果

確率微分方程式の分野では、Bessel 過程と呼ばれる確率モデルが考えられてきた。これは地震学とは無縁の文脈によるものだったが、本研究では Bessel 過程を表わす確率微分方程式の解2つを畳み込み積分して、理論的な震源時間関数を構成した。そしてその関数が、経験則1-4を統計的に満足することを示した。

これらの経験則を同時に満たすモデルは、本研究によって初めて提案された。更にこの数理モデルに対応する物理を考え、断層面上の応力変化速度などが Bessel 過程に従うのではないかという予察を得た。地震前にはプレート運動によって、断層面上に作用する応力が増加する。そしてその応力が短時間で解放されるのが地震という現象であると考えられる。この地震時における応力解放の速度が Bessel 過程に従うなどの仮定を導入することで、震源過程を記述する積分方程式において、本モデルで考える Bessel 過程がどのような形で現われるかが判明した。このことは、断層面上の応力、そしてそれにバランスするはずの摩擦力が、巨視的には確率に支配されていることを示唆する。

本モデルが経験則を満たすことの検証は、数学的な知見によっても得られたが、同時に数値実験によってもなされた。その途上で、統計的な性質を確かめるべく、多数の理論震源時間関数を数値的に生成するためのプログラムを開発した。その本質的な部分のコードと、それによって生成された多数の数値例を、論文公開と同時にオンラインリポジトリにて公開した。これに

よって、他研究者が類似の研究を発展させるための準備が整ったことも、成果の一つである。

さらに本研究からの派生物として、確率微分方程式を解かなくても、経験則 1-3 を満たす震源時間関数を生成するための数値アルゴリズムを考案した。例えば強震動シミュレーションなどでは、震源時間関数の大きさ（地震モーメント）や継続時間は仮定される量であり、これが経験則 4 のべき分布に従って確率的に決まるようでは使い勝手が悪い。また、確率微分方程式を数値的に精度よく解くためには、偏微分方程式を解く必要があり、コストがかかる。そこで経験則 4 を満たさず、それ以外を満たす関数を、単なる Brown 運動の組み合わせによって得る方法を確立した。これを利用することで、強震動シミュレーションにおいても入力ばらつきを持つような確率的方法論が有効になると見込まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Shiro Hirano	4. 巻 12
2. 論文標題 Source time functions of earthquakes based on a stochastic differential equation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-022-07873-2	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 平野史朗
2. 発表標題 確率論的震源時間関数の概形と地震波放射効率
3. 学会等名 日本地震学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野史朗
2. 発表標題 地震学における弾性波動論と確率過程の親和性
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野史朗
2. 発表標題 -squared モデル, モーメントの3乗則, およびGR則を満たす確率的震源時間関数
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiro Hirano
2. 発表標題 Statistics and variability of source time functions based on a stochastic differential equation
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野史朗
2. 発表標題 Slip rate of earthquake faulting modeled by a cross-correlation of two Bessel processes
3. 学会等名 日本応用数理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiro Hirano
2. 発表標題 An empirical PDE for slip along earthquake faults
3. 学会等名 The Second Russia-Japan Workshop "Mathematical analysis of fracture phenomena for elastic structures and its applications" - 20th Conference of Continuum Mechanics Focusing on Singularities (CoMFoS20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平野史朗
2. 発表標題 Bessel 過程による, 断層滑り時刻歴のトイモデル
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「ローカルな不均質性」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirano, S.
2. 発表標題 An observation-based differential equation of spatio-temporal slip distribution
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野史朗
2. 発表標題 不均質な滑り分布と地震活動モデルの整合性
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shiro Hirano
2. 発表標題 Aftershocks and the GR law due to a heterogeneous slip model
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shiro Hirano
2. 発表標題 Friction vs. damage: dynamic self-similar crack growth revisited
3. 学会等名 CoMFoS18:Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------