

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01811

研究課題名(和文)地震発生頻度の応力摂動に対する鋭敏性：理論と実験

研究課題名(英文)Sensitivity of earthquakes to stress perturbation: theory and experiment

研究代表者

波多野 恭弘 (Hatano, Takahiro)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20360414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生率と規模別頻度分布の潮汐応答性に関して力学的モデル研究を行った。得られる結果は仮定された摩擦法則に大きく依存することを発見した。岩石摩擦実験で確認される速度・状態依存摩擦法則を仮定するとクーロン応力変化に対して指数関数的に地震発生率が増大し、その特性応力は法線応力に比例する。他方、単純な静止摩擦・動摩擦モデルにおいてはクーロン応力変化に対して線形に地震発生率が増大する。規模別頻度分布については法線応力の摂動も大きな影響力をもち、わずかな法線応力の低下も規模別頻度分布を変化させることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の発生機構に関する科学的理解は、日本のみならず地震発生帯に位置する国々にとっての重要課題である。本研究は地震の発生機構解明に関する基礎研究として位置付けられる。本研究のテーマである、わずかな応力変化が地震発生率や規模別頻度分布に影響を及ぼす現象は防災・減災にとっても大きな意義を持っている。本研究の成果をさらに発展させることで、応力摂動への応答に関する観測データから断層に働く摩擦力の性質を(ある程度)拘束できるようになる。地震発生過程に関する謎の多くは断層に働く摩擦力が分からないことに起因しているので、ここから地震の発生機構に関する科学的理解がさらに進むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Tidal response of earthquakes is studied based on the nucleation and rupture dynamics of some theoretical models. In particular, the effects of stress perturbation on the occurrence rate and the size-frequency distribution are discussed. It is found that the results are highly dependent on the assumed friction law. Assuming the rate- and state-dependent friction law, which has been confirmed by rock friction experiments, the seismicity increases exponentially with the Coulomb stress change, and the characteristic stress is proportional to the normal stress. On the other hand, in a simple friction law with static and dynamic friction, the seismicity increases linearly with the Coulomb stress change. The perturbation of the normal stress also has a large influence on the size-frequency distribution, and even a slight decrease in the normal stress is found to change the size-frequency distribution.

研究分野：非平衡物理学

キーワード：地震 潮汐 地震発生率 規模別頻度分布

## 1. 研究開始当初の背景

「地震発生頻度はいつ・どのように高まるのか?」「地震発生頻度が高まると大地震も発生しやすいのか?」などの問いは人類にとっての重要課題である。近年の高精度の地震観測と地殻変動観測により、地震発生頻度が極めて微小な応力摂動に影響されることが明らかになってきており、上記問いに新しい切り口が見えてきた。例えば、ヒマラヤ地方では地震発生確率に有意な季節差があり、夏季よりも冬季に多くの地震が発生する [1]。その原因は積雪荷重による微小な地殻変動とされているが、同様に、日本海沿岸地域においても積雪荷重に起因する微小な地殻変動が観測されており、地震発生頻度との相関が議論されてきた [2]。ダム水位の季節変動と地震発生頻度が相関する例も知られているが、これもダム水位の変動による当該地域への荷重変化が原因と考えられている [3]。

これらはいずれも約1年周期の応力変動であるが、自然界には他にも様々な周期の応力摂動が存在する。例えば潮汐は約半日周期の海面水位変動であるが、これも地震発生頻度に影響を及ぼすことが知られている [4]。さらに短周期の応力摂動としては遠方からの地震波が挙げられる。その卓越周期は数秒から数十秒程度であり、潮汐より何桁も短い。遠方から地震波が到来すると、その後2~3時間の間は地震発生頻度が高まることが統計的に確立されている [5]。

驚くべきことに、これらの応力摂動はいずれもその振幅が数kPa程度(大気圧の数%)であり、岩石の破壊強度の10万分の1程度しかない。このように、極めて微弱な応力変動が様々な周波数帯を通して地震発生頻度に影響することが明らかになってきているのである。

一般的には系が何らかの臨界状態に近ければ摂動に対し鋭敏になるので、微小応力摂動による地震発生頻度の変化はさほど不思議ではない。すなわち、ある地域の背景応力レベル(無摂動状態での応力値)が臨界値に十分近ければ摂動に対し鋭敏になるはずである。これを裏付けるように、スマトラ地震(2004年)や東北太平洋沖地震(2011年)などマグニチュード9クラスの巨大地震発生前には、地震発生頻度の潮汐相関が6~7年間にわたって高まっていたという報告もある [6]。これは何らかの原因(非地震性の地殻変動や地殻内流体の移動)によって当該地域における背景応力レベルが高まり臨界値に近づいたためと考えられている。しかし、ある地域における「背景応力レベル」と「地震発生頻度の応力摂動への感受性」の関係は、現時点で確かなことは何も分かっていない。従って、「地震発生頻度の応力摂動への感受性は、地震発生地域の背景応力レベルとどう関係するのか?」、あるいはもう少し一般的に、「地震発生頻度の応力摂動への感受性を決める物理的要因は何か?」という問いは様々な文脈から重要である。

[1] P. Bettinelli *et al.* *Earth Planet. Sci. Lett.* **266**, 332–344 (2008).

[2] K. Heki, *Earth Planet. Sci. Lett.* **207**, 159–164 (2003).

[3] T. Matcharashvili *et al.*, *Nonlinear Dyn.* **51**, 399 (2008).

[4] Y. Tanaka *et al.*, *Earth, Planets and Space* **67**, 141 (2015).

[5] N. J. Van Der Elst & E. E. Brodsky, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **115**, B07311 (2010).

[6] S. Tanaka, *J. Geophys. Res.* **39**, L00G26 (2012).

## 2. 研究の目的

応力摂動はその振幅と周期・スペクトルなどで特徴付けられる。従って「応力摂動の振幅やスペクトルの関数として地震発生頻度を表現する」ことが本研究の目的となる。しかし自然界における応力摂動の振幅と周期は極めて限定されているので、実際の地震データだけから何か定量的なことを言うのは難しい。加えて、背景応力レベルなどの重要な物理量も実際の断層では直接測定できない。したがって理論と数値シミュレーションに基づいた新しいアプローチが必要である。

これらのことを踏まえ、本研究計画では以下のことを目的とする。断層すべり過程についての理論モデル解析と数値シミュレーションを行い、時間一定の背景応力に微小な応力摂動を加えた際の地震発生(破壊発生)頻度を計算する。その際、背景応力レベル・摂動振幅・周期の三つの要因に対する依存性を幅広い範囲で調べる。地震発生頻度が応力摂動に対して鋭敏になる定量的条件を、背景応力への依存性に注目して求め、感受率増大の原因となる物理過程を明らかにする。理論モデルで得られた結果を取りまとめて岩石実験データや実際の地震データと比較し、背後の物理過程を地球科学的な文脈で解釈する。

## 3. 研究の方法

地震断層の力学モデルにおけるすべり過程(断層すべりの加速過程)を解析し、地震発生頻度に対する応力摂動の影響を定式化する。ただし地震断層のモデルには完全に正しいと思われているものではなく、様々な観点からの簡略化に対応した様々なモデルが存在する。本研究では、その中でも代表的な二つの異なるモデルを考え、モデルによる応答の違いも論じる。

【連続体モデル】無限弾性体中に埋め込まれた断層をモデル化する。媒質に関しては線形弾性論を仮定し、断層に働く摩擦力は岩石摩擦実験で経験的に知られている速度・状態依存摩擦法則を用いる。この系は摩擦力と弾性力が一定の条件を満たすと滑りが不安定化し加速していくこ

とがよく知られているが、ここではこの系に応力摂動を加えた上で加速過程を解析する。上述した通り、「滑り速度が閾値を越えるまでの時間」が分かれば地震発生頻度が求まるので、この系においても断層の滑りが不安定化・加速して「滑り速度が閾値を越えるまでの時間」に注目して解析を行う。この量が、摂動の振幅・周期やスペクトルに依存してどう変化するか解明する。加えて、変動応力の方位依存性も重要である。ここでは剪断応力だけでなく法線応力が変動する場合も分けて考え、その影響を議論する。そのために法線応力変動の効果も摩擦構成則に取り入れる (Linker-Dieterich 1992)。

【離散的モデル】 実際の地震断層は平面からは程遠く、様々な波長での凹凸が自己アフィンの含まれる粗い複雑な形状をしている。このようなフラクタル的構造を連続体として取り扱うことは非常に難しいため、しばしばその最短波長構造を単位とした離散的な面としてモデル化される。本研究では二つの代表的な離散モデルにおける応力摂動の影響を調べる。

i) Burridge-Knopoff (BK) モデル ここでは剪断応力が閾値を超えた場所ですべりが始まり、動摩擦に切り替わる。動摩擦については速度弱化型の摩擦法則を仮定する。

ii) Olami-Feder-Christensen (OFC) モデル 剪断応力が閾値を超えた場所ですべりが始まることは上の BK モデルと同様だが、ここではすべりの加減速のダイナミクスは考えず、動摩擦も考慮しない。すべった箇所は瞬間的に応力が降下するという簡素なモデルである。

これら複数のモデルにおける応力摂動の影響は、主に摩擦法則の違いによって生じると考えられる。モデルの結果と観測データ、実験データを比較し、地震断層における摩擦法則についての考察も行う。

#### 4. 研究成果

速度・状態依存摩擦法則を仮定した連続体モデルにおいては、地震発生前に準備的な加速過程が存在する。「滑り速度が閾値を越えるまでの時間」の逆数が地震発生頻度に対応する。このモデルに正弦波的な応力摂動を加え、振幅・周期やスペクトルに対して地震発生頻度がどう変わるか調べるために系統的なシミュレーションを行った。単一周期の摂動については、地震発生頻度は摂動周期には依存せず、摂動振幅に対して指数関数的な応答を示すことを確認した。その際に特性応力として解釈される応力定数を評価した。この結果は複数の周期を含む場合も同様であり、地震発生率は応力摂動の周期には依存せず、摂動の振幅だけで決まることを明らかにした。さらに法線応力の時間変化に対応する摩擦法則も実装し、その影響も調べた結果、応答の位相が逆になり、摂動に対する応答が弱まることも発見した。これらシミュレーション研究と並行して、モデルを少し単純化した状況での解析解を求めることにも成功した。結果をシミュレーションと比較し、良い一致を得た。

他方、離散モデル BK モデルにおける地震発生率は応力摂動の時間変化率に比例して増減し、その幅は摂動の周期に反比例することを解析的計算から予想し、モデルにおいてもそれらの挙動を確認した。連続体力学に基づくモデルにおいては、地震発生率の変化が応力振幅の絶対値に依存しており、ここでの結果と著しく異なるが、モデルによるこの違いを解析的に説明した。

連続体モデルにおいては同じ大きさの地震しか発生しない (系全体がすべる) のに対し、離散モデルでは様々な大きさの地震が発生する。このことを利用し、発生する地震の大きさに対する応力摂動の影響も論じた。これは破壊伝播過程における応力摂動の影響を考えることと同値である。一般には断層面の法線方向応力と剪断応力の両方が摂動によって変化しうるが、その割合は断層方位に応じて異なる。そして両者はすべりダイナミクスに対して異なる影響を与えることを指摘した。つまり、剪断応力の変化は弾性的駆動力を変化させるが、それはすべりが開始する時刻のみに影響する。他方、法線応力の変化も摩擦力に影響を与える点は剪断応力が変化する場合と同様であるが、動摩擦力も変化させるので、すべりダイナミクスにも影響がある。実際に BK モデルにおける規模別頻度について調べ、法線応力が摂動を受ける際には大地震の相対的な発生頻度が変動することを示した。(法線応力が低下する位相の時に発生する地震は大きいものの割合が大きい)。

もう一つの離散モデル (OFC モデル) においては動的なすべりが瞬間的に終わるので、動摩擦に相当する量はモデルに存在しない。従って応力摂動に関しては法線応力と剪断応力の違いはなく、応力摂動の効果は地震発生率のみに現れる (規模別頻度分布は影響されない) と予想された。つまり、地震発生率は応力摂動の時間変化率に比例して増減し、その幅は摂動の周期に反比例することを解析的計算から予想し、モデルにおいてもそれらの挙動を確認した。連続体モデルにおいては地震発生率の変化が応力振幅の絶対値に依存しており、ここでの結果と著しく異なるが、モデルによるこの違いを解析的に説明した。ただし規模別頻度については当初の予想とはやや異なり、わずかではあるが摂動の位相に依存して平均の地震規模が変化する (静止摩擦が上がると大きな地震が増える) ことを示した。これはすべり時に近隣のセルへ分配する応力がより大きくなるためと理解される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 5件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Chanard K., Nicolas A., Hatano T., Petrelis F., Latour S., Vinciguerra S., Schubnel A.   | 4. 巻<br>46                |
| 2. 論文標題<br>Sensitivity of Acoustic Emission Triggering to Small Pore Pressure Cycling Perturbations During Brittle Creep                                   | 5. 発行年<br>2019年           |
| 3. 雑誌名<br>Geophysical Research Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>7414 ~ 7423 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2019gl082093   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Ootani Yusuke, Xu Jingxiang, Takahashi Naoki, Akagami Kenta, Sakaki Satoshi, Wang Yang, Ozawa Nobuki, Hatano Takahiro, Adachi Koshi, Kubo Momoji | 4. 巻<br>124               |
| 2. 論文標題<br>Self-Formed Double Tribolayers Play Collaborative Roles in Achieving Superlow Friction in an Aqueous Environment                                | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>The Journal of Physical Chemistry C  | 6. 最初と最後の頁<br>8295 ~ 8303 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acs.jpcc.0c02068   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Roy Subhadeep, Hatano Takahiro   | 4. 巻<br>2                 |
| 2. 論文標題<br>Creep failure in a threshold-activated dynamics: Role of temperature during a subcritical loading   | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Research   | 6. 最初と最後の頁<br>23104       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/physrevresearch.2.023104   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Sato Yuji, Shinzato Shuhei, Ohmura Takahito, Hatano Takahiro, Ogata Shigenobu  | 4. 巻<br>11                |
| 2. 論文標題<br>Unique universal scaling in nanoindentation pop-ins   | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications  | 6. 最初と最後の頁<br>4177        |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-020-17918-7   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Yamaguchi Yuta, Biswas Soumyajyoti, Hatano Takahiro, Goehring Lucas | 4. 巻<br>102         |
| 2. 論文標題<br>Failure processes of cemented granular materials                   | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review E   | 6. 最初と最後の頁<br>52903 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/physreve.102.052903                       | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Petrelis Francois, Chanard Kristel, Schubnel Alexandre, Hatano Takahiro | 4. 巻<br>2021                  |
| 2. 論文標題<br>Earthquake sensitivity to tides and seasons: theoretical studies       | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment                 | 6. 最初と最後の頁<br>023404 ~ 023404 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1742-5468/abda29                              | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Kundu Sumanta, Opris Anca, Yukutake Yohei, Hatano Takahiro                         | 4. 巻<br>9            |
| 2. 論文標題<br>Extracting Correlations in Earthquake Time Series Using Visibility Graph Analysis | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>656310 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3389/fphy.2021.656310   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Levy dit Vehel Victor, Hatano Takahiro, Vanel Loic, Maloy Knut Jorgen, Ramos Osvanny | 4. 巻<br>249                 |
| 2. 論文標題<br>Dilation as a precursor in a continuous granular fault                              | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>EPJ Web of Conferences   | 6. 最初と最後の頁<br>15006 ~ 15006 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1051/epjconf/202124915006                                       | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Mizushima Ryo, Hatano Takahiro   | 4. 巻<br>229             |
| 2. 論文標題<br>Slow periodic oscillation without radiation damping: new evolution laws for rate and state friction | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Geophysical Journal International  | 6. 最初と最後の頁<br>274 ~ 285 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/gji/ggab471  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Fukuda Kota, Hatano Takahiro, Mochizuki Kimihiro  | 4. 巻<br>105         |
| 2. 論文標題<br>Model for tectonic tremors: Enduring events, moment rate spectrum, and moment-duration scaling | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review E   | 6. 最初と最後の頁<br>14124 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/physreve.105.014124   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Roy Subhadeep, Hatano Takahiro                     | 4. 巻<br>4           |
| 2. 論文標題<br>Model for creep failure with healing              | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Research                           | 6. 最初と最後の頁<br>23110 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/physrevresearch.4.023110 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Roy Subhadeep, Hatano Takahiro, Ray Purusattam   | 4. 巻<br>105         |
| 2. 論文標題<br>Modeling crack propagation in heterogeneous materials: Griffith's law, intrinsic crack resistance, and avalanches | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review E  | 6. 最初と最後の頁<br>55003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevE.105.055003  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Sumino Yutaka, Saito Takuya, Hatano Takahiro, Yamaguchi Tetsuo, Ide Satoshi                        | 4. 巻<br>4           |
| 2. 論文標題<br>Spatiotemporal chaos of a one-dimensional thin elastic layer with the rate-and-state friction law | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Research   | 6. 最初と最後の頁<br>43115 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/physrevresearch.4.043115   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Petrelis Francois, Chanard Kristel, Schubnel Alexandre, Hatano Takahiro                | 4. 巻<br>107         |
| 2. 論文標題<br>Earthquake magnitude distribution and aftershocks: A statistical geometry explanation | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review E  | 6. 最初と最後の頁<br>34132 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevE.107.034132  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>波多野恭弘                    |
| 2. 発表標題<br>地震誘発の物理：破壊準備過程における応力摂動効果 |
| 3. 学会等名<br>地球惑星科学連合大会 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                     |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>波多野恭弘                    |
| 2. 発表標題<br>滑りの不安定化における普遍的加速過程       |
| 3. 学会等名<br>地球惑星科学連合大会 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>波多野恭弘  |
| 2. 発表標題<br>Complexity of earthquake time series as probed by visibility graph |
| 3. 学会等名<br>FRACMEET (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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                             |  |  |  |
|---------|-------------------------------------|--|--|--|
| フランス    | Ecole Normale Supérieure            |  |  |  |
| フランス    | University Claude Bernard<br>Lyon 1 |  |  |  |