

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340091

研究課題名(和文) 岩石破壊実験から探る地震活動の統計性と力学量の関係

研究課題名(英文) Relation between statistical parameters of seismicity and mechanical quantities as probed by numerical models

研究代表者

波多野 恭弘 (Hatano, Takahiro)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：20360414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：地震は複雑な自然現象だが、その発生頻度に関しては簡潔で普遍的な統計法則が成立する。これら統計法則に含まれるパラメータは時間空間に関してある程度のゆらぎを示し、例えば大地震の前にある特定のパラメータが低下することもある。しかし現時点でそのような現象に必然性は認められておらず、異常性を判定する定量的な指針なども無い。この揺らぎが一般的に何を意味しているのか、物理的な説明が必要である。本研究では、簡単な地震発生モデルのダイナミクスから統計則を構成することによって、断層帯での物理過程と統計則パラメータの間に成り立つ論理的・定量的関係を部分的・半定量的にはあるが解明することができた。

研究成果の概要(英文)：Although earthquake is a complex phenomenon with apparent diversity, their statistical laws are sometimes very simple and universal. Parameters for these statistical laws exhibit spatio-temporal fluctuations. Most interestingly, it has been well known that certain parameters may change prior to a major earthquake. However, there is no reason to believe that such precursory phenomena are universal or necessary. In addition, there is no quantitative criterion to judge "anomaly" in such fluctuations. To understand the necessity of these fluctuations of parameters, we construct some "forward models" that can reproduce statistical seismicity and obtain quantitative expressions for parameters in terms of mechanical properties of earthquake faults. Comparison with observations and other results on similar models are still semi-quantitative, but promising in some aspects, for example the shear stress dependence of the c-value in the Omori-Utsu law.

研究分野：統計物理、非線形地殻物理

キーワード：大森則 ゲーテンベルク・リヒター則

1. 研究開始当初の背景

個別の地震における破壊伝播ダイナミクスは地殻の様々な不均一性、とくに物質科学的・構造地質学的な不均一性の影響を強く受け、非常に豊かなバリエーションを有する。その一方で、地震の発生回数に関する統計的性質は(不思議なことに)しばしば非常にシンプルな法則によって記述される。その中でもっとも重要なものは、グーテンベルク・リヒター則と大森・宇津則である。グーテンベルク・リヒター則は「マグニチュード M の地震の回数が $10^{(-bM)}$ に比例する」といふ数は本震からの経過時間 τ に対して $(\tau + c)$ に反比例して減少していく」というものである。ここで b , c , p はいずれも正のパラメータである。 b と p は 1 程度の無次元数で、 c は数分から 100 分程度の時定数であるが、地域や時期によってある程度の揺らぎを示す。これらパラメータの揺らぎは地震活動を特徴づける重要な指標と見なされ、少なからぬ興味を持って研究されてきた。とくに大地震の発生前に b 値が低下することがあることはよく知られている。ただしその物理的根拠については何ら定量化された理論があるわけではなく、経験則の域を出ていない。したがって b 値の低下を実際に観測したときに、それが地震発生の先行現象なのか、それとも単なる揺らぎなのかを判別できない。また、 b 値だけでなく c 値などの変動も併せて考えればより多くの情報を得られるはずであるが、 c 値などの変動と地震発生の関係に関してはこれまでほとんど分かっていない。しかし、ごく最近になってこれらパラメータの物理的意味に関してきわめて重要な示唆を与える研究が現れた。それは、 b 値と c 値が地震のメカニズム解に有意に依存するというものである。この結果から(いくつかの簡単な仮定のもとで)「 b 値と c 値は地震発生場における差応力に依存し、差応力が大きいと b 値と c 値は減少する」という言明も可能である [D. Schorlemmer et al. (2005) Nature; C. Narteau et al. (2009) Nature]。この命題が真であれば、 b 値と c 値の変動から地殻内部(地震発生場)における応力の変動が分かることになる。しかしこれらの研究では応力を直接測定してはいないため、応力依存性に関してはあくまで示唆の域を出ない。何らかの手段による検証が必要とされている。また、提唱されている b 値・ c 値と差応力の関係は未だ定性的なものである。これを定量的な関係式まで高度化できれば、地震活動の観測から地殻内応力の絶対値が推定できることになり、固体地球惑星科学全般へのインパクトは計り知れない。

2. 研究の目的

地殻内応力の直接測定は資金的・技術的に大変困難であるため、実際の地震活動において上記のような関係式を確立することは一大事業である。あらかじめ室内実験や理論モ

デルを用いて、十分な説得力を持った物理的根拠とともに定量的関係式を前もって解明しておくことが必要とされよう。我々はこのような動機のもと、室内実験および数値モデルのシミュレーションにおいて b 値・ c 値と応力絶対値の間の定量的関係式を確立し、現実の地震活動における成立可能性について物理的な根拠を与えることを目指す。

3. 研究の方法

室内実験および数値実験において、モデル岩石を剪断変形させる際に発生するアコースティックエミッションを記録し、そのマグニチュード、発生時刻ともに岩石の応力状態も記録する。そのデータからグーテンベルク・リヒター則における b 値と大森則における c 値を応力の関数として整理し、定量的関係式として確立する。次に、実験で得られた関係式の物理的背景を理解するために、破壊現象を記述するあるモデルについて、解析的計算により b 値・ c 値の応力依存性を求める。モデルと実験を比較し、 b 値 c 値が決まるメカニズムとそのスケール性的性質について明らかにする。主な対象は、粒状体からなるモデル岩石や、断層セグメントあるいは岩石の粒を模擬した離散格子モデルなどである。

4. 研究成果

本研究計画の主要な成果は、地殻を模擬したいくつかの系について実験やシミュレーションを行い、地震活動とほぼ同じ統計法則(グーテンベルク・リヒター則と大森則)が成立することを示したこと、および、それらデータを用いて b 値や c 値の変動を解析し、とくに応力依存性について半定量的な関係式を得たことにある。

室内実験においては、モデル岩石の準静的剪断変形を行った。粒の再配置イベントで解放される応力降下量を測定し、微小再配置イベントの「発生時刻」「応力降下量」「イベント開始直前の応力値」をデータとして記録した。この実験データを解析し、微小再配置イベントに伴う応力降下量の規模別頻度分布についてグーテンベルク・リヒター則が成立することを示した。ただし、 b 値の応力依存性を示すほどのデータは得られなかった。これは実験で実現する応力の幅が狭いことに起因しており、 b 値の変化が十分見えるほど幅広い応力値について規模別頻度分布を再構成できなかったことが大きい。他方、統計的に有意な連続したイベント間の時間間隔分布はベキ的であり、クラスタリング的性質を持つことが明らかとなった。これは実際の地震で見られる発生時間間隔分布と半定量的に一致する。ただし、本震・余震のシーケンスを定義するためにはイベント数が不足し、大森則を定量的に同定することは極めて困難であることが明らかになった。

このような実験での統計サンプル数不足を補うために、岩石を模擬したいくつかのモデルに関して数値シミュレーションを行い、その微小破壊の示す統計性について応力依存性を調べる作業を行った。以下では各モデルについて得られた結果を列挙する。

(1) 断層セグメントモデル

このモデルは断層セグメントあるいは岩石の粒を構成要素とする離散モデルである。ここでは、ある要素の破壊に伴って負荷応力が他の要素へ分配されるが、その分配が大域的に行われる場合については、規模別頻度分布の厳密解を得ることができる。その厳密解を断層セグメントの文脈で再解釈することにより、グーテンベルク・リヒター則に対応するべき的な分布を得ることができる。しかし実はこれは真のべき則ではなく、ある特性マグニチュードでカットオフを持つ擬似的なべき則であり、これらカットオフが重ね合わされることで、ある特定の指数を持つべき則に見えるということを確認した。さらに、この指数は普遍的なものではなく、システム全体を壊す大イベントの前に顕著に減少することも厳密解から明らかにできた。この見かけのべき指数の大小は、「要素破壊強度分布の広がり」によって決まることも確認した。各要素の破壊強度自体は物質定数から決まるとすれば、その分布の広がりには主に「最大剪断応力面に対する既存の弱面の方位のばらつき」で決まる。(法線ベクトルのばらつきが大きいと破壊強度のばらつきも大きい)。この場合、ばらつきが大きいと b 値も大きくなるが、これは「複雑な形状の断層ほど b 値が大きい」という地震学における経験則と整合的である。

(2) 粒状体モデル

岩石を構成する粒を離散要素として模擬したモデルについて、準静的に変形させた時の微小破壊の統計性を調べた。粒子再配置に伴う不連続なエネルギー低下量を時系列データとして記録し、その統計性を解析した。室内実験で明らかになった十分な統計性確保の困難さを克服するために、長大な計算時間を必要としたが、計算資源を有効に活用し効率的な研究の遂行を図った結果、解析に十分なデータを得ることができた。このデータをもとにして、グーテンベルク・リヒター則の b 値および大森則の c 値それぞれに対して応力依存性を求める作業を行った。具体的にはイベント開始時の応力に応じてイベントをソートして、規模別頻度分布をエネルギー降下量とイベント開始時応力値の2変数分布関数として定義し直すことによって、 b 値の応力依存性を調べた。結果は、これまで限定的な実験で示唆されてきたような反比例関係ではなく、もっと弱い依存性を示すことが分かった。(図1)

同じデータから、本モデルにおいて余震が存在し大森則が成立することを示した。減衰の指数はおおむね1とみなせ、実際の地震で観

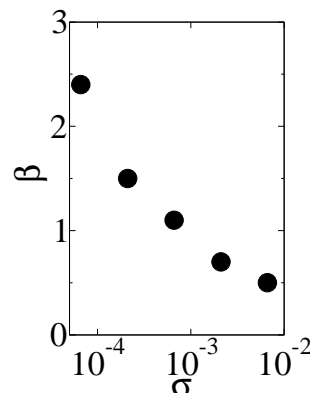


図1 b 値(ここでは $=2b/3$)とイベント開始時の応力値との関係。非常に弱い負の依存性を示す。

察されるような大きなばらつきはみられなかった。これは高次の余震などが発生しにくいことによると推測される。規模別頻度分布の場合と同様にイベント開始時の応力値でソートすることにより、 c 値の応力依存性も示すことができた。その関数形は負の指数関数でフィットされる。この依存性はダメージメカニクスなどに基づく理論的先行研究と整合的であるが、本モデルにおいてそれら先行研究の仮定がふさわしいとは言えず、別のメカニズムによって指数関数依存性が出てきていると考えられる。これを説明するために以下のモデルを考案した。

(3) 余震の非熱的活性化モデル

余震の準備過程に関する非熱的アレニウス則を仮定することによって、 c 値が応力について負の指数関数的依存性を示すことを導出した。この結果はシミュレーションモデルおよび実際の地震の観測結果と半定量的に整合する。

(4) Forest Fire モデル

断層セグメントの連鎖的破壊を簡略化したモデルである、Forest Fire モデルについての解析を行った。このモデルはグーテンベルク・リヒター則を示すことが知られているが、 b 値の変化特性についてはこれまで詳しく解析されていなかった。我々はこのモデルの大規模なシミュレーションを実行し、様々なパラメータ値におけるイベントサイズ頻度関数を求め、その b 値の振る舞いに注目した解析を行った。その結果、 b 値が巨大イベント前に減少を示すことがわかった。しかしこれは系のパラメータに依存しており、場合によっては緩やかな減少ののち再び上昇に転じた直後に大イベントが起こることも確認された。また、 b 値がほとんど時間一定で変化しないパラメータ領域があることもわかった。このような微妙な依存性はあるものの、大まかな傾向としては b 値と応力は負の相関があることがわかった。これは先行研究や我々の実験結果とも整合的である。各々の微妙な振る舞いのメカニズムは岩石実験では

見られていないが、実際の地震で見られる b 値変動の様々なケースといずれも整合する。なおこのモデルの解析は光藤哲也氏と加藤尚之氏との共同研究として行われた。

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 6件)

1 Y. Satoh, T. Hatano, N. Nita, K. Nogiwa and H. Matsui, Simulation of Transmission Electron Microscope Images of Dislocations Pinned by Obstacles. *Materials Transactions*, 55, 413-417 (2014)
<http://doi.org/10.2320/matertrans.MD201312>

査読有

2 O. Kuwano, R. Ando, and T. Hatano, Granular friction in a wide range of shear rates. *Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, AIP Conf. Proc. 1542, pp. 32-37 (2013)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4811863>

査読有

3 O. Kuwano, R. Ando, and T. Hatano, Crossover from negative to positive shear rate dependence in granular friction. *Geophys. Res. Lett.* 40, pp. 1295-1299 (2013)

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50311/abstract>

DOI: 10.1002/grl.50311

査読有

4 T. Hatano and O. Kuwano, Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction. *Pure Appl. Geophys.* 170, pp. 3-11 (2013)

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00024-011-0409-9>

DOI: 10.1007/s00024-011-0409-9

査読有

5 波多野恭弘, 摩擦法則におけるミクロ・マクロ対応 *表面科学*, vol. 34, pp. 62-67 (2013)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssj/34/2/34_62/_pdf

査読有

6 H. Kawamura, T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, Statistical physics of fracture, friction and Earthquake. *Rev. Mod. Phys.* 84, 839 (2012)
<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.839>

.839

査読有

[学会発表](計 12件)

1 波多野恭弘, T=0 soft spheres の緩和過程における粒子の「絡まり」, 第4回ソフトマター研究会 (2015/01/06 名古屋大学、名古屋市) 招待講演

2 T. Hatano, Granular friction in a wide range of shear rates, *Granular and Granular-Fluid Flow -- Gordon Research Conference* (2014/07/23 Stonehill College, Massachusetts 州 Easton 市、USA) 招待講演

3 T. Hatano, Granular friction in a wide range of shear rates, *POWDERS AND GRAINS 2013* (2013/7/9 シドニー, オーストラリア) 招待講演

4 T. Hatano, Granular friction in a wide range of shear rates, *Physics of Granular Flows* (2013/6/27 京都大学, 京都市) 招待講演

5 T. Hatano, Granular friction in a wide range of shear rates, *KITPC Workshop: Complex Dynamics in Granular Systems* (2013/6/18 北京、中国) 招待講演

6 T. Hatano, Seismicity in Frictionless Grains under Shear, *KITPC Conference: Complex Dynamics in Granular Systems* (2013/6/6 北京、中国) 招待講演

7 T. Hatano, Micro-macro correspondence in sliding friction, *Workshop on the Open Problems of the Glass Transition and Related Topics* (2012/12/19 九州大学、福岡市) 招待講演

8 T. Hatano, Micro-macro correspondence in sliding friction, *Novel Development of Statistical Physics* (2012/12/04 東京大学、東京都文京区) 招待講演

9 波多野恭弘, 摩擦におけるミクロ・マクロ対応、第32回表面科学会学術講演会 (2012/11/20 東北大学、仙台市) 招待講演

10 波多野恭弘, 断層の摩擦法則へむけて、摩擦、レオロジー、地震の新展開 (2012/11/08 京都大学、京都市) 招待講演

11 T. Hatano, Relaxation dynamics of jamming soft spheres, *The 3rd Workshop on Computational and Statistical Physics* (2012/10/20 京都リサーチパーク、京都市) 招待講演

12 波多野恭弘, 速度強化型摩擦の原子論

的起源、地球惑星科学連合大会 (2012/05/20
幕張メッセ、千葉市) 招待講演

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/hatano/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

波多野 恭弘 (HATANO, Takahiro)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号： 20360414

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

堀 高峰 (HORI, Takane)
海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究
開発センター・グループリーダー代理
研究者番号：00359176

桑野 修 (KUWANO, Osamu)
海洋研究開発機構・数理科学先端技術研究
分野・研究員
研究者番号：30511969