

平成 30 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03698

研究課題名(和文) 岩石のクリープ破壊実験における「余震」と大森則のメカニズム

研究課題名(英文) Aftershocks and Omori law in creep experiment on rocks

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) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：複合材料の微小破壊や地震の統計性においてはグーテンベルク・リヒター(GR)則と大森則が普遍的に成立するが、GR則のb値と大森則のc値は材料や断層の物理的状態、とくに応力状態を反映すると考えられている。我々はこの仮説に注目し、それを具体的に二つの系で検証した。剪断される粉体系では、b値とc値ともに応力に対し負の依存性を示し、c値に関しては指数関数依存性を持つことを発見した。岩石を模擬したファイバーバンドルモデルにおいては大森則のみならず逆大森則の成立も確認し、その原因がサドルノード分岐であることを発見した。ここでのc値は応力よりはむしろ系の不均一性に依存することが分かった。

研究成果の概要(英文)：Two power laws are ubiquitously observed for the statistics of materials failure and earthquakes: the Gutenberg-Richter (GR) law and the Omori law. Interestingly, some parameters in these power laws may reflect the physical state of specimens or earthquake faults such as the stress level. Here we investigated the b-value in the GR law and the c-value in the Omori law focusing on their stress dependence in two distinct systems: granular matter and the bundle of fibers. In sheared granular matter, both the b-value and the c-value exhibit negative stress dependences. Particularly, we found the exponential dependence of the c-value on stress. In the fiber bundle model, we confirmed the Omori law and the inverse Omori law. An analytical solution is obtained for a mean-field model, which reveals slow down due to the saddle-node bifurcation. The c-value here depends on the degree of heterogeneity in the system rather than the stress.

研究分野：非平衡物理学

キーワード：余震 大森則 逆大森則

1. 研究開始当初の背景

地震は超巨大スケールの破壊現象であり、そのダイナミクスは極めて複雑かつ多様である。とくに地殻における物性的/構造地質学的な不均一性は、破壊伝播および地震波生成に大きな影響を与え、自然現象としての地震に多様性を与えている。

対照的に、地震の「発生頻度」に関する統計的性質は非常にシンプルである。とくに「グーテンベルク・リヒター則」と「大森・宇津則」と呼ばれる二つの法則は、世界の任意地域の地震について成立し、その意味できわめて普遍的である。グーテンベルク・リヒター則は、「マグニチュード M の地震の発生頻度が 10^{-bM} に比例する」というもので、大森・宇津則は「余震の発生頻度が本震からの経過時間 τ に対して $(\tau + c)^{-p}$ に比例して減少していく」というものである。ここで、 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の統計性を特徴づける重要な指標と見なされている。とくに、大地震の発生前には b 値が低下することがしばしば観測されている。ただし、そのような現象について、背後にある物理過程に基づいた説明や理論があるわけではない。しかも、大地震はレアイベントであり十分なサンプル数がないので、統計学的検証も困難である。したがって b 値の低下を実際に観測したときに、それが大地震の先行現象なのか、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、そのような系統的・総合的な研究はこれまでなされてはいない。

これらパラメータの物理的意味に関して重要な仮説が提出されたのは比較的最近である:「ある地域における b 値と c 値はその地域の断層にかかる剪断応力に依存し、応力が上昇すると b 値と c 値は低下する」 [D. Schorlemmer et al. (2005) Nature; C. Narteau et al. (2009) Nature]. この仮説が真であれば、 b 値と c 値の変動から、ある地域の断層にかかっている剪断応力の変動が分かることになる。しかし断層にかかる応力の測定は事実上不可能であり、この仮説を直接検証する方法はない。したがって研究者にできる唯一の仕事は、何らかのモデルを用いてその仮説を検証することである。加えて、先行研究において提案されている b 値及び c 値と剪断応力の関係は未だ定性的なものであるが、これを定量的な関係式まで高度化できれば、地震の観測から地殻内応力の絶対値が推定できることになる。

2. 研究の目的

本研究計画で目指すところは、岩石などのランダムな複合媒質の破壊現象において、 b 値・ c 値と剪断応力の間に成り立つ定量的関

係式を解明することである。加えて、実際の断層系への適用可能性について根拠を与えるため、これら関係式の理論的背景まで示すことを目的とする。

3. 研究の方法

上で述べた問題に対して、従来は実験室で実際に岩石を破壊する実験が行われてきた。しかし、室内実験では統計的有意性を保証する十分なデータを得ることが困難な面がある。これを克服するために、本計画ではランダム媒質一般の破壊、とくに岩石の構成要素 (grain) を模擬したモデルを用いて、解析的および計算的な研究を行う。具体的には、グーテンベルク・リヒター則と大森則の成立状況とその成立条件を確認する。その上で、 b 値と c 値の応力依存性について定量的解析を行う。

まず、岩石を構成する grain を粒子として模擬した粉体モデルを離散要素法で取り扱う。この系を準静的に変形させた際に観測される、粒子再配置に伴う不連続的なエネルギー低下イベントを時系列データとして記録し、その統計性を解析する。特に、大森則と GR 則の成立状況を確認し、 b 値と c 値の応力依存性について定量的解析を行う。

次に、粉体系の結果を踏まえてもう少し抽象的な「ファイババンドル」と呼ばれるモデルの解析を行う。このモデルでは各構成要素が外部からの巨視的負荷 (外力) を並列に支えており、各要素の破壊強度はランダムに分布している。その意味で、岩石の grain が応力を並列に支える様子をモデル化したものとみなすことができる。ある構成要素が破壊されると、それが支えていた負荷は残りの (まだ壊れていない) 要素へ再分配されるが、それは全体の力が一定に保たれるように行われる。ファイババンドル系における構成要素が岩石の grain に対応するとみなすことによって、岩石破壊の簡素なモデルとして考えることができる。強度の分布関数はこの系の挙動を規定する重要な要因であり、任意に選べるが、一般的には何らかの極値統計から採用するのが自然と考えられる。本研究では、このファイババンドルモデルにおける大森則の成立状況を確認したのち、 c 値の応力依存性について定量的解析を行う。

4. 研究成果

本研究における主要な成果は、岩石を模擬した二つのモデルについて解析的計算と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、それらのデータを用いて b 値や c 値の変動を解析し、それらの応力依存性を明らかにしたことである。とくに c 値の応力依存性については定量的な関係式を得ることができた。この結果は c 値が剪断応力について指数関数的に減少することを意味する。その後、実際の

地震観測でもほぼ似た定量的結果が発表されたことは本成果での「予言」を実証するものとして特筆される [P. Shebalin and C. Narteau, Nature Communications 8, 1317 (2017)].

(1) 粉体モデル

斥力だけが働く簡単な粉体系について、準静的剪断シミュレーションを行った。これには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、統計的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、ゲーテンベルク・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分類して、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二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。十分な量のデータを解析することで、剪断応力について二桁の範囲を調べることができた。この範囲において b 値は単調減少し、0.6 から 3 程度まで幅広い範囲の値をとることが発見された。また、ゲーテンベルク・リヒター則に関しては粒子の密度が重要なパラメータであり、粒子の弾性変形が無視できなくなるような高密度になると、ゲーテンベルク・リヒター則は成立しなくなることが明らかになった。ただし実際の地震発生環境における岩石は脆性的であるから、grain が弾性変形してゲーテンベルク・リヒター則が成立しなくなるような状況は実際には非現実的であると予想される。

さらに、同じデータを用いて、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 (図 1)。この指数関数的依存性はその後実際の地震観測でも確かめられた。 c 値の応力に対する指数関数依存性はダメージメカニクスや震源核形成過程などに基づく理論的先行研究からは説明できず、何か別のメカニズムによっていると考えられる。

(2) ファイバーバンドルモデル

このモデルでは一つの構成要素が破壊された時に残りの要素に負荷を再分配するが、その分配方法にはいくつかのバリエーションがある。ここでは、A) 負荷を均等に再分配する平均場モデルと、B) 距離 R 以内に存在する近接要素のみに再分配する局所モデル、以上二種類に焦点を絞って検討した。

A) 平均場モデルでは、系のひずみの時間発展方程式を強度分布関数の具体形に依ら

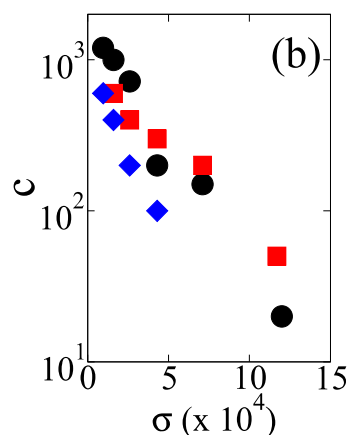


図 1 無次元化された c 値とイベント開始時の無次元応力との関係。片対数グラフでの直線は負の指数関数依存性を示している。

ず書き下すことができる。系への荷重を制御パラメータとした際に、時間発展方程式がサドルノード分岐を起こすことを解析的に示すことができた。この分岐は分布関数に関するかなり一般的な条件のもとで必ず発生する。分岐点を与える臨界応力近傍においては、系のダイナミクスが分岐に起因するスローダウンを起こす。このことにより、系のひずみ率がクリープに類似した三つのステージを示すことを示した。初期クリープでは大森則、第三クリープでは逆大森則が成立するが、それらのベキ指数はいずれも 2 であり、実験で見られる指数 (0.7 から 1.0 程度) よりは大きい。同時に、平均場モデルにおいては c 値も解析的に求められる。ここでの c 値は初期応力に対して正の依存性を示し、地震や粉体系とは反対の挙動であることも分かった。加えて、初期応力を臨界値に固定したうえで強度分布の幅 (分散) を変化させると、 c 値は強度の分散について負の依存性を示すこともわかった。これは系の不均一性が強いと c 値が小さくなることを意味する。

B) 局所モデルについては、壊れた要素が負荷を再配分する空間範囲 R が重要なパラメータであり、臨界値 R_c よりも大きい値では系の挙動は平均場と一致することが知られている。ここでは $R < R_c$ においてシミュレーションを行い、系の時間発展を調べた。その結果、局所モデルも臨界応力近傍においてクリープの三段階を示すことを確認した。初期クリープでは、平均場モデルと同様、ひずみ率の時間発展が大森則類似の挙動を示す。ただし、ベキの指数は平均場の時よりも大きくなり、その傾向は R が小さいほど著しい (図 2)。他方、 c 値は R が大きいほど小さく、強度の分散が大きいほど小さい (図 3)。後者は平均場モデルの場合と同じ挙動である。ただし第三クリープにおいてはひずみ率は加速するものの、逆大森則には従わなかった。これは平均場と局所モデルの定性的な違いを示すものとして興味深い。局所モデルの方が

平均場モデルより不安定性が強いため、構成要素が減少し系自体の不安定性が増す第三クリープにおいて両者が異なる挙動を示すことは直観的には首肯できるが、現段階ではこの違いに関する定量的な説明には至っていない。

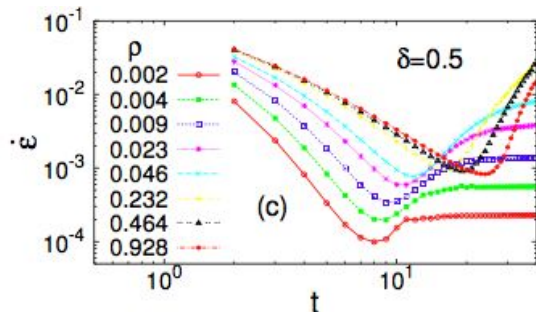


図2 局所モデルにおけるひずみ率の時間発展。
ここで $\dot{\epsilon} = R/R_c$ であり、 R が小さいほど減衰が早い。

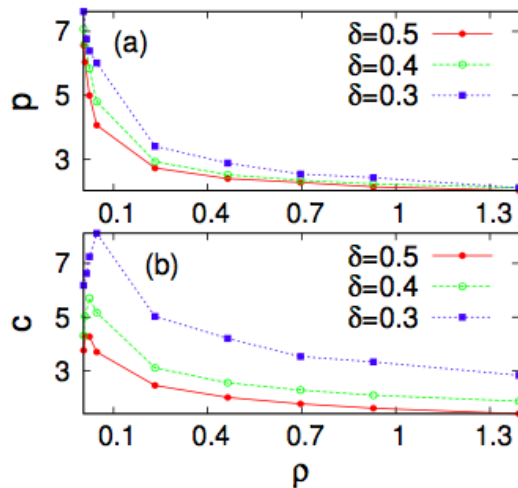


図3 局所モデルのひずみ率の時間発展で見られる初期クリープを大森則でフィットし、指数 ρ と時定数 c を相互作用の範囲 $\dot{\epsilon} = R/R_c$ の関数としてプロットしたものの。強度分布関数は一様で、その幅を ρ としている。 c 値は相互作用距離及び強度分布の幅が大きくなるにつれて減少する。

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 6件)

1. T. Hatano, Friction laws from dimensional-analysis point of view. Geophys. J. Int. 202, 2159-2162 (2015)
査読あり

2. T. Hatano, C. Narteau, and P. Shebalin, Common dependence on stress for the statistics of granular avalanches and earthquakes. Scientific Reports 5, 12280 (2015)
査読あり

3. P. Van, N. Mitsui, T. Hatano, Non-equilibrium thermodynamical framework for rate- and state-dependent friction. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59/4, 583-589 (2015)
査読あり

4. T. Hatano, The Third Law of Earthquake Statistics?, JPSJ News and Comments 14, 03 (2017)
査読なし

5. H. Tanaka and T. Hatano, Statistical properties of Olami-Feder-Christensen model on Barabasi-Albert scale-free network, Eur. Phys. J. B 90, 248 (2017)
査読あり

6. S. Roy and T. Hatano, Creep-like behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress, accepted for publication in Phys. Rev. E (2018)
査読あり

[学会発表](計 11件)

1. T. Hatano, Critical slowing down at jamming transition, CCP2015 (2015/12/4, Guwahati, インド) 招待講演

2. T. Hatano, Granular friction and earthquake faults, Plasticity 2016 (2016/1/5, Kona, HI, USA) 招待講演

3. T. Hatano, Stress dependence of aftershock statistics in granular matter, FRACMEET 2016 - Friction and Fracture: Bridging the Scales (2016/2/3, Chennai, インド) 招待講演

4. T. Hatano, Rate and State Friction Law and Its Scaling Property, Tribology - Gordon Research Conference (2016/6/29, Lewiston, ME, USA) 招待講演

5. T. Hatano, Rate and state friction law as derived from atomistic processes at asperities, ICTAM2016 (2016/8/25, Montreal, カナダ) 招待講演

6. T. Hatano, Crackling noise in sheared granular matter, STATPHYS Kolkata IX

(2016/12/15, Kolkata, インド) 招待講演

7. T. Hatano, Crackling noise in sheared granular matter, FRACMEET - Plasticity and failure in disordered materials (2017/01/6, Chennai, インド) 招待講演

8. T. Hatano, Creep rupture and Omori law in a simple deterministic model 「ジャムドマターの非ガウスゆらぎとレオロジー」 (2017/3/10, 京都大学、京都市) 招待講演

9. T. Hatano, Creep-like relaxation in athermal systems, International workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems (2017/3/23, 大阪大学中之島センター、大阪市) 招待講演

10. 波多野恭弘、速度状態依存摩擦法則における長さ定数のスケーリング特性、地球惑星科学連合大会 (2017/5/21, 幕張メッセ、千葉市) 招待講演

11. T. Hatano, Friction and earthquakes: Bridging across scales, MINI-COLLOQUE RNL 2018 : NON-LINEARITE ET TREMBLEMENTS DE TERRE (2018/3/27, Paris, France) 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：
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

()
研究者番号：

(4) 研究協力者

ロイ、シュバディーブ (ROY, Subhadeep)
東京大学・地震研究所・特任研究員

田中宏樹 (TANAKA, Hiroki)
東京大学・地震研究所・大学院生