

A01 地震および破壊の統計における新しい定量的関係式

東京大学地震研究所 波多野恭弘
名古屋大学環境学研究科 桂木洋光

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・多様である。しかし、地震の「発生頻度」に話を限定すると、非常にシンプルで普遍的な統計法則が成立する(1)。驚くべきことに、実験室において岩石を破壊したり粉体をゆっくり変形する際の微小破壊イベントについても、その発生頻度に関しては全く同様の統計法則が成立する(2)。このようなスケールを越えた普遍的統計法則の背後にはロバストな統計力学的構造の存在が期待されるが、地震や破壊の統計法則を記述する非平衡統計力学はどのようなものであろうか？我々は地震や実験室での破壊の統計法則に対して、微視的ダイナミクスと巨視的現象論をつなぐロジックと数理を抜き出したい。これは地震研究における統計力学的アプローチとも言うべきものであるが、その結果見出だされる「統計力学」は、揺らぎの定理に代表される通常の非平衡統計力学と何が共通して何が共通でないのか？この問いに向けた努力はまだ始まったばかりであるが、一つの手がかりは「統計法則に含まれるパラメータの物理的意味」である。ここで注目するのは、ある統計法則に含まれる二つのパラメータが地震発生場の剪断応力と相関をもつという地震学における最近の仮説である(3, 4)。本研究ではこの仮説を一步進めて、「地震の統計パラメータと地震発生場の剪断応力の間に成立する定量的関係式の確立」を目的とする。

より具体的には、地震発生場の地質学的不均一性をランダム媒質としてモデル化し、その変形・破壊過程をシミュレーションと実験で研究する。ここでは粉体の準静的変形を主なモデルとして取り上げている。粉体は断層のマイクロなモデルとしてもしばしば用いられるが、複雑なエネルギーランドスケープを持った非熱的ランダム系のミニマルモデルという側面ももつ。その結果として、粉体の変形過程におけるゆらぎは地震や破壊と同じ法則に従うと考えられる。

初年度である 2014 年度においては、研究代表者の波多野が単純剪断シミュレーションを行い、連携研究者の桂木は粉体層への剛体の押し込みや引き抜きの実験を行った。

粉体系を準静的変形すると、定常状態においても応力とエネルギーは激しく揺らぐ。いずれの値も、外部からの駆動によるゆっくりとした上昇ののち急激に減少するということを不規則に繰り返す。これは微視的にはエネルギー極小値を与える粒子配置の不連続的な変化に対応しているが、これを一回の「イベント」として定義する。その際の急激なエネルギー減少幅は一回のイベントで解放されるエネルギーである。これの対数をとったものは地震におけるマグニチュードの類似量であるので、ここでもマグニチュードと呼ぶことにする。マグニチュードごとイベント頻度分布は地震と同様の Gutenberg-Richter 則(1)に従うことはよく知られている。

我々は、摩擦なし粒子系のシミュレーションにおいて、ジャミング密度近傍においてのみ Gutenberg-Richter 則が成立することを発見した。摩擦なし粉体系でのジャミング密度においては、力の釣り合い的に安定な粒子配置は(系の自由度によらず)一つしか存在しないが、

この事実が Gutenberg-Richter 則の成立とどのように関係するのか、より簡潔な玩具モデルによる理解を現在試みている。さらに、イベント開始直前の剪断応力の値によって規模別頻度分布をフィルタリングすると、統計パラメータの値が剪断応力の減少関数であることが明らかになった。これは、地震学における仮説を粉体モデルにおいて実証したものと位置付けられる。

この単純な粉体モデルにおいても、比較的大きな規模のイベントの後に「余震」的イベントが多数発生することがある。「本震」を適切に定義することによって「余震」を定義し、その発生頻度を本震からの経過時間の関数として表すと、それが地震と同様の大森則に従うことを発見した。大森則には時定数が一つ含まれるが、この時定数が本震発生前の剪断応力値の減少関数であることを発見した。また、その依存性は指数関数でよく記述されることを発見した。これらパラメータの剪断応力依存性を説明する簡潔な数理モデルの構築が現在進行中である。

実験においては、粉体層に剛体を押し込んだ際のイベント発生時間分布を解析した。その結果、イベント発生間隔は（イベントサイズ頻度分布と同様に）常にベキ分布を示すことが分かった。一方、余震発生の大森則に相当する統計性を再現するためには実験パラメータを適切に調整する必要があることも明らかとなった。これらの結果により、室内実験と天然の地震活動を比較するために注意すべき実験パラメータ等の情報が明確となった。

上記の実験とは別に、粉体層の摩擦挙動解明のための実験も行った。粉体層中に針金を垂直に埋め込み、マイクロメーター毎秒程度で引き抜く際の摩擦挙動を計測した。その結果、この系における粉体の摩擦挙動が、粒子サイズと引き抜く針金の直径の比に強く依存することが明らかとなった。これまで摩擦構成則が速度や待機時間に依存することは様々な角度から研究されてきたが、このようなジオメトリ依存性についてはそれほど注目されてこなかった。すなわち、本研究の結果、普遍性の高い粉体摩擦構成則を確立するためにはジオメトリの影響を考慮することも必要となることを明らかにできたと言える。

参考文献:

- (1) Y. Y. Kagan, *Earthquakes: Models, Statistics, Testable Forecasts*. (American Geophysical Union, 2014).
- (2) *Statistical Models for the Fracture of Disordered Media*. eds. H. J. Hermann and S. Roux (North Holland, 1990).
- (3) D. Schorlemmer, S. Wiemer, and M. Wyss, *Nature* **437**, 539 (2005).
- (4) C. Narteau, S. Byrdina, P. Shebalin, and D. Schorlemmer, *Nature* **462**, 642 (2009).