

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開始されたばかりであるが、一つの手がかりは「統計法則に含まれるパラメーターの物理的意味」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ー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ーと地震発生場の剪断応力の間で成立する定量的関係式の確立」を目的とする。

具体的な戦略は以下である：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、その変形と破壊過程が示す統計的性質を解析的・計算的手法で求める。その過程を通じて、各種統計パラメーターの物理量依存性を明らかにする。

さて、その際、地震発生場をどのようにモデル化するかという問題が本質的である。地震は km スケールの現象ではあるが、それはあくまで最終的なサイズである。破壊の基礎理論であるグリフィス理論に従えば、亀裂はある臨界サイズをもち、その臨界亀裂サイズを超えると破壊は不安定に進行する（それよりも小さいサイズでは熱的活性化過程で安定的に進行する）。したがって不安定破壊のモデル化には臨界亀裂サイズ程度の長さスケールに注目すればよい。「地殻の剪断破壊」である地震にも臨界亀裂サイズが存在すると考えられるが、そのサイズは実は未だよく分かっていない。もちろん、「半無限弾性体中の平面断層」という極端に理想化された状況では解析的結果が存在するが、そのサイズはだいたい 1mm~1m 以下程度である。そのスケールでは断層の内部構造（厚み）が無視できずもはや数学的な面とはみなせないで、最初に設定したモデル自体が破綻することになる。また、不安定破壊開始から破壊停止までのダイナミクスは 1mm オーダーから 10km オーダーまで実に 8 桁の空間スケールが関わるので、単一のモデルで扱うのはほとんど不可能である。それぞれのスケールごとに適切なモデルを設定してそれらを接続するのが現実的な路線だろう。

その中でも「臨界核サイズ以下のスケール」と「破壊が停止するスケール」という二つのエンドメンバーが統計的性質を決定するので最も重要である。まず、地震の発生率は「臨界核サイズを越えるレート」に等しい。したがって、臨界核サイズ以下のダイナミクスが重要

になる。他方、地震の大きさ（マグニチュード）ごと発生頻度は、一度発生した地震がどの程度の大きさまで成長するかで決まるので、巨大スケールまで進展した亀裂がどこで停止するかという問題になる。

我々は前年度においては前者（微小スケールでの破壊核形成過程）の問題に焦点を絞り、破壊の発生頻度に関する応力依存性に対して定量的表現を与えた（5）。そこで2015年度においては、後者（巨大スケールでの破壊停止ダイナミクス）に焦点を絞り、断層の応力不均一性の時空発展をモデル化した単純な系を用いて、巨大スケールでの破壊停止ダイナミクスを研究した。その結果、破壊の規模別頻度分布を特徴付ける指標が断層上の応力不均一性を特徴付ける指標と直接に対応することを示した。さらに、大きな破壊の前に規模別頻度分布を特徴付ける指標が低下することを確認し、それが大破壊準備過程として必然的であることを定性的に説明した。その結果として、大きな破壊の前に小さな破壊のレートが減少することも見出した（6）。これらの現象はいずれも実際の地震でも観察されているが、モデルの単純さから現実との対応は自明ではない。モデルの詳細を変えた場合にもこのような現象が生き残るかどうかなどという研究が現在も進んでいる。

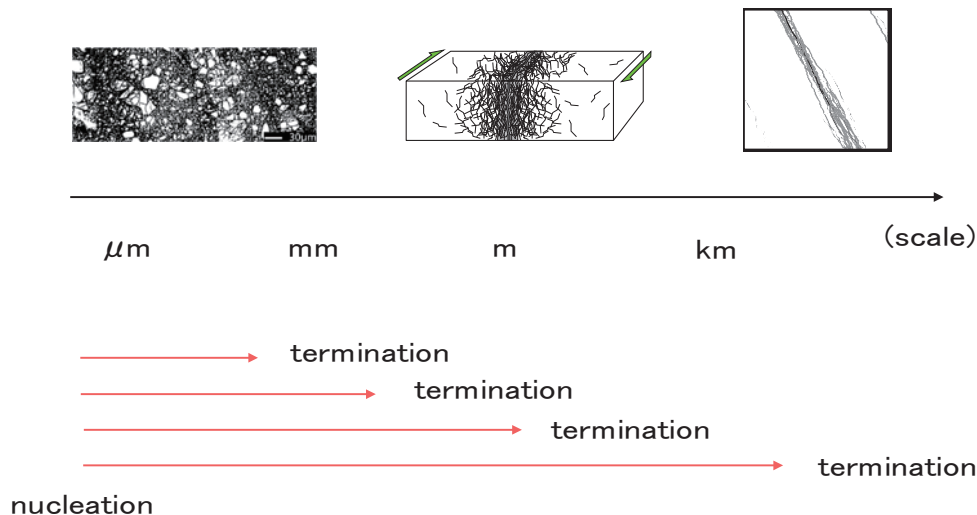


図1. 地震発生場の構造：マイクロスケールではつぶつぶ、中間スケールでは有限幅をもつ剪断帯の周囲は微小亀裂が多数分布している。さらに大スケールではフラクタル的に折れ曲がった面として見なせる。

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).
- (5) T. Hatano, C. Narteau, and P. Shebalin, *Scientific Reports* **5**, 12280 (2015).
- (6) T. Mitsudo, T. Hatano, and N. Kato, arXiv:1512.05188 (2015).