

スロー地震：地震研究の新しい一側面



研究ノート

波多野 恭 弘*

New Perspective of Earthquake Science
from the Viewpoint of Nonequilibrium Physics

Key Words : Slow earthquakes, Friction, Tides, Slip nucleation

はじめに：「地震」という言葉

地震とは断層がすべることによって地震波を放出する自然現象であり、理学的な文脈（特に地震学）では「断層がすべる現象」が地震であると定義されている。この定義は「地震」という字面とは合致しないので少し注意が必要である。これに従えば、「地面が揺れない地震」があってもよいし、たとえ地面が揺れてもそれが断層のすべりに起因しなければ「地震」とは呼ばないことになる。その典型例は地下核実験、波浪、群集の足踏みなどである。他方、断層がすべっても地面が揺れない（地震波が出ない）現象、すなわち「地面が揺れない地震」の例が近年発見され研究が急速に進展している「スロー地震」である。

スロー地震とは何か

スロー地震とは、地震波をほとんど（あるいは全く）出さない断層のすべりを総称している。「断層がすべるのになぜ地震波が出ないのか？」という問いは、「(通常の)地震ではなぜ断層から地震波が出るのか？」という問いと表裏一体である。そこで、まず通常の地震から考えよう。

固体に強い剪断応力がかかると、自発的に面が形成され、その面を境界にして変形する、つまりすべる。この面が断層である。断層ですべりが発生する

際、その速さ（すべる速度とすべりが断層面を伝わる速度）が大きいと、すべり面から周囲へ弾性波が発せられる¹⁾。

断層から出る弾性波の振幅はすべりの急激さと共に増大する。つまり、強い地震波を出す地震とは「すべりが急激に発生する地震」である。逆に言えば、「断層がすべってもそれがゆっくりならば地震波はほとんど出ない」ことになる。これがスロー地震である。

つまり「地震波を出す・出さない」あるいは「速くすべる・遅くすべる」という違いがスロー地震と通常の地震を分ける最大の特徴なのであるが、その他にも重要な違いがいくつかある。以下ではそれら違いを簡単に紹介し、それぞれの物理的機構の解明へ向けた研究の概略を紹介する。ただしスロー地震と通常の地震の発生機構を統一的に理解することは現状できておらず、まだ多くの未解決問題がある。

地震と応力

断層がすべると、その結果として周囲の剪断応力は低下する。その低下幅は「応力降下量」と呼ばれるが、通常の地震では概ね数 MPa（メガパスカル）程度である。大気圧が約 0.1MPa なので、地震で低下する剪断応力は大気圧の数十倍程度でしかない。また、「大きな地震ほど応力が大きく低下するのでは」と思うかもしれないが、実は応力降下量は地震の規模（マグニチュード）とはほぼ無関係である。

マグニチュードは断層面積とすべり距離の大きさの対数関数であるが、応力降下量はひずみに比例する量である。そしてひずみは「断層の長さ÷すべり距離」に比例する。大きい地震では断層の長さもすべり距離も大きくなるが、二つの量がともに比例して大きくなるので、その比はほぼ一定になる。これが応力降下量はマグニチュードに依らない理由で



* Takahiro HATANO

1972年8月生まれ
東京大学大学院総合文化研究科広域科学
専攻 博士課程修了（2001年）
現在、大阪大学大学院理学研究科 宇宙
地球科学専攻 教授 博士(学術)
E-mail : hatano@ess.sci.osaka-u.ac.jp

ある。

スロー地震も断層のすべりであるから剪断応力が低下するのだが、その降下量は通常の地震よりもだいぶ小さい。スロー地震の種類にもよるのだが、応力降下量は概ね数十 kPa (キロパスカル) から数百 kPa 程度で、通常の地震よりも一桁から二桁程度小さい。それどころか、大気圧と同程度の応力変化しかないことは驚きに値する。

例えば水中では深さ 10m ごとに 1 気圧 (0.1MPa) ずつ圧力が上昇する。同じ理由から、地下では 10m ごとに 0.2 から 0.3MPa ずつ上昇するはずで、地震発生場の深さ (大抵 10~30km 程度) では 250 から 750MPa 程度の圧力になっているはずである。しかし地震による応力の低下はその 1% 程度しかなく、スロー地震に至っては 0.1% 以下ということになる。この原因として以下二つの可能性が考えられる: A) 地震では断層にかかっている応力のごく一部しか解放されない。B) もともと断層には深さから推定される圧力よりもはるかに小さい圧力しかかかっていない。

仮説 A の原因としては、断層の不均質性が挙げられる。例えば断層面は複雑な凹凸構造をしていることが知られているが、そのような立体構造によってすべりの「引っかかり」が生じ応力が一部しか解放されないことは十分考えられる²⁾。他方、仮説 B の原因としては、断層面に存在する流体の影響が考えられる。つまり、流体が圧力の大部分を支えることで、断層面の岩石どうしの接触部にかかる圧力が低減される可能性がある³⁾。

ただしいずれの仮説も単独で応力降下量の小ささを説明することは難しい。仮説 A と B は両立するので、両者をあわせ考えると応力降下量が定量的に説明できる可能性はある。流体圧と不均一性の両方を考慮した地震発生過程の物理的モデルは難しいので研究はそれほど進んでいないが、今後の進展が期待される。

地震と潮汐

スロー地震の顕著な特性の一つとして、潮汐にตอบสนองして発生頻度が変わることが挙げられる。特に、スロー地震の一種である「微動」と呼ばれる現象ではその傾向が詳しく調べられている。

海洋潮汐の場合、満潮時は増加した海水の重みの

分だけ断層にかかる法線荷重が増すので摩擦力が増すことになる。そうするとすべりは抑制されるので微動の発生率も低くなる。逆に干潮の時は摩擦力が低下するのですべりやすくなり、微動の発生率が上昇する。こう書くと当たり前に思われるかもしれないが、潮汐による応力変化は数 kPa 程度しかなく、その程度の応力の違いによって微動の発生頻度に大きな違いが出るのは理解しがたい。

微動は自発的に起こっているのではなく、もっと遅いスロー地震である Slow Slip Event (SSE) に付随して発生しているという見方が現在では主流であるが、そうだとすると SSE のすべり速度が潮汐応力によって振動すると考えると微動の潮汐応答性は自然に説明できる。しかしなぜ SSE のすべり速度が潮汐にตอบสนองするのかを説明しようとする、断層上の実効的な法線応力が数百 kPa 程度 (数気圧程度) であることが必要になる。そんな低い応力が地下 20km で本当に実現されているのか、「流体がほとんど全ての圧力を支えている」という以外の説明はないのが現状である。

通常の地震に関しては潮汐応答性は普通見られないので、潮汐への鋭敏性はスロー地震の顕著な特徴と言える。ただし、マグニチュード 9 クラスの巨大地震発生前にはすべり開始地点付近の領域で発生した小地震の潮汐応答性が増していたという研究もある。「巨大地震の準備過程としてまず遅いすべりが始まり、それによって小地震が誘発されていた」と考えると、この現象も結局は遅いすべりの潮汐応答性の説明に帰着される。「自発的に始まった遅いすべりが応力の微小摂動にどう応答するか」という視点で微動と巨大地震の前の小地震の両者を統一的に説明できれば面白い。

すべり核生成過程、前震、スロー地震

実験室での摩擦現象で不安定なすべりが始まる前には、まず局所的に遅いすべりが始まり、それが徐々に加速していくことが知られている。このようなすべりの加速過程は「すべり核形成過程」と呼ばれており、次節で述べるような数理モデル (方程式) でも再現できるのだが、残念なことに実際の地震では観測されたことがない。

大地震の前には小さい地震が頻発することが稀にあるが、これは前震と呼ばれる。前震の発生機構に

ついて確立された理解があるわけではないが、すべり核形成過程に引きずられる形で周囲の小領域がすべる結果発生する可能性はある。そうだとすると微動とスロー地震の関係によく似ており、両者の違いを理論・観測の両面から考えてみるのは一つのヒントになるだろう。例えば前震の潮汐応答性と微動の潮汐応答性にはどのような違い・類似性があるだろうか？

断層すべりの方程式

地震のダイナミクスが定量的にどう記述されるか考えよう。断層面における位置を二次元座標 (x, y) で表し、位置 (x, y) でのすべり量 u が時間 t とともにどう発展するか分かれば断層すべり（すなわち地震）の様子が分かったことになる。そのためには、 $u(x, y, t)$ の従う偏微分方程式を構成できればよい。

断層面には摩擦力と、変位を元に戻そうとする弾性力が働く。弾性力は線形弾性論でよいとすると、問題は摩擦力である。岩石に働く摩擦力は実験で調べることができ、その結果は「速度・状態依存摩擦則」という経験則としてまとめられている。そのようにして断層のすべりダイナミクスを数理的に・数値的に調べることができる。摩擦力はすべり速度 $\dot{u}(x, y, t)$ などについて非線形な依存性を持つので、断層すべりの方程式は非線形偏微分方程式になり、解析的な扱いはもちろん数値的な扱いもなかなか難しい。しかし簡単な状況を考え適切な簡素化を行うと非線形常微分方程式に帰着できて、その解の挙動は分岐理論と呼ばれる非線形力学の理論を用いて解析ができる⁴⁾。例えば、安定状態（地震が全く起こらない状態）と振動状態（地震が一定間隔で繰り返す状態）が切り替わる条件などを定量的に求めることができる。また、分岐理論を用いて非線形偏微分方程式系を簡素化する試みもある。この路線の研究は地震学だけではなく非平衡物理学分野の研究者まで含めた学際的な研究チームによって研究が進められている⁵⁾。

より複雑な場合へ

断層のすべりに影響する要因は摩擦力と弾性力だけとは限らない。先に述べたように、断層の凸凹形状や不均質性（岩石種や摩擦特性の空間不均一性）、さらに流体の存在が地震とスロー地震の発生にどの

程度まで影響するのか、数理モデルによる定量的な解析が必要である。

断層の粗さ（凸凹）構造を明示的にモデル化し、大規模シミュレーションによって断層すべりの様子を調べた最近の研究によれば、断層の凸凹は摩擦力とはまた異なる新たな抵抗力をもたらし、断層運動に対するブレーキとして働く。その結果、通常地震が発生する代わりにスロー地震のような遅いすべりが発生しうることが分かってきた。

断層に存在する流体とその圧力変動に関してもさまざまなシミュレーション研究が進んできている。この場合も、流体の圧力などが時空間依存する変数として追加され、やはり非線形偏微分方程式系として定式化される。変数が増えるのでややこしくはなるが、シミュレーションによって方程式の挙動が詳しく調べられ、スロー地震によく似た現象が再現されている。

ただし潮汐応答性に関してはこのような数理モデルで満足のいく説明は未だなされておらず、「流体の圧力が99%以上を占める」という強引な仮定を越えられていない。すべりが始まったことによる動的に不安定な効果で鋭敏性が増すことは十分考えられるが、今後の定量的なモデル研究が待たれる。

断層すべりの方程式：課題

摩擦力と弾性力を考慮して断層を数理モデル化する研究は地震発生の物理過程解明のために強力なアプローチではあるが、まだいくつかの原理的問題を含んでいる。特に、仮定している摩擦法則が実験室スケールの試料片について成り立つ経験則に過ぎず、それよりもはるかに大きな断層に（経験を超えて）適用できる保証はないことは重要である。摩擦法則が系のスケールを大きくしていった際にどう変換されるか・されないのかという視点からの研究には基礎物理学的な視点（粗視化・くりこみ）が必要であり、ここでもやはり学際的な研究が地震現象の原理的理解のために必要となってきた。

参考文献

- 1) 地震学の標準的な教科書を参照。例えば大学2、3年以上には、K. Aki & P. G. Richards, *Quantitative Seismology, 2nd ed.* (Cambridge University Press, 2002)、高校生以下には「絵

- でわかる地震の科学」井出哲（講談社）が勧められる。
- 2) よい成書が思いつかないので、先駆的な原著論文として以下を挙げる。J. H. Dieterich & D. F. Smith, *Pure Appl. Geophys.* 166, 1799 (2009)
 - 3) T. Yamashita & A. Tsutsumi, *Involvement of Fluids in Earthquake Ruptures* (Springer, 2018)
 - 4) 非線形動力学の良い入門書（訳書）として以下を挙げる。「非線形動力学とカオス」ストロガッツ（丸善、2015）
 - 5) 例えば「スロー地震学」プロジェクトの成果の一部が以下 URL で公開されている。
<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/sloweq/newsletters/>

