

## 研究の今後の方向性に関するメモ

波多野恭弘（東京大学地震研究所）

注意：以下の記述は私個人の研究の興味であり、大学院生がこれに従う義務は何もありません。とくに、私の目を開かせてくれるような新しい問題を提示してくれる学生を歓迎します。

### 1. 地震学の根本問題への新しいアプローチ

地震発生の本質は剪断変形の不安定化にある。一旦不安定化した剪断変形は高速で伝播し地震波を放出しながらどこかで停止する。不安定化・高速化するメカニズムが地震発生時刻を決め、その停止メカニズムが地震のマグニチュードを決める。地震の「発生時期」と「大きさ」は実際の興味で最も重要だが、それらを決める物理過程は「不安定化と加速過程」「停止過程」である。従って地震学の根本問題は上記2つの過程に分解されると言うてよからう。

上記2つの過程に共通して鍵となる物理は、摩擦力である。短時間スケールでは地殻を弾性体とみなせるので、断層面に働く摩擦力と初期条件・境界条件さえ与えれば、原理的には地震の全過程を連続体の問題として解くことができる。

「不安定化と加速過程」は理論的にはある程度解明されており、平面断層上で適当な摩擦法則を設定すれば、滑りが不安定化し指数関数的に加速していく臨界波長 $R_c$ が求まる。これよりも短波長の不均一性は指数関数的に減衰するので、 $R_c$ が「最小の地震」の断層サイズを定義する。同時に、滑りの加速過程も直径 $R_c$ 程度のパッチ状領域で起こることが分かっている（「前駆滑り」と呼ばれる）。このサイズ $R_c$ は、ある程度現実的と思われるパラメタを使って計算すると100m程度になるが、これはだいたいMw2くらいの断層に対応する。しかし実際にはMw2よりも小さい地震は無数に発生しているし、このようなパッチ状領域での加速過程もこれまで一度も観測されたことはない。しかしその一方で、室内実験で観察される滑りの時空発展はこのような理論と完全に一致するので、これは地震発生過程におけるパラドクスである。

このパラドクスを止揚する一つの可能性は断層の内部構造にある。断層は実験室やシミュレーションで仮定されるような平面ではなく、フラクタル的な凸凹構造を持っている。このような凸凹は滑りとともに破壊され、断層面のみならず面外でもエネルギー損失が発生する。したがって凸凹の適切なモデル化こそが地震発生理論の要石となるかもしれない。

我々は以上の現状認識に基づき、室内実験・分子動力学・第一原理シミュレーションなどから解明される実験室スケールでの摩擦法則から出発して、断層スケールまで徐々にスケールアップしていくことで地震の発生過程を理解していく。その際には断層の凸凹のような地質学的フラクタル構造を考慮することが必要である。現時点での試みとしては、凸凹の断層における不安定化・加速過程のシミュレーション研究がある（投稿中）。他方、実験室スケールでの摩擦研究では材料科学分野との共同研究を重視する。例えば、岩石摩擦の原子論的な基礎について第一原理分子動力学法・古典分子動力学法による共同研究が既に進展中である。

地震（高速破壊）の停止過程については、不均一媒質中の高速破壊なので数値的にも様々な不安定性の問題があり、シミュレーションで何か現象を再現してもその妥当性を保証するのが難しい。このような強い不安定性がある現象は、むしろカオスにより実質的には確率過程とみなせると考えるほうが自然である。これは不可知なランダムネスが潜む地下の問題ではなおさらである。これは発想の逆転かもしれないが、このように地震の高速破壊伝播を確率過程とみなしてしまえば、確率過程に基づく最近の非平衡統計力学の様々な成果を意外な形で応用できる可能性もあり、この方向は個人的にはとても面白いと思っている。

## 2. 微弱応答に対する鋭敏性

固体地球分野と統計物理の境界には、既存理論の拡張でなんとかなりそうな問題ばかりではなく、むしろ現象論の構築から開始しなくてはならないフロンティアの方が圧倒的に多い。ここではその中でも、「微弱摂動に対する応答の鋭敏性」という地球科学・統計力学双方の観点から興味深い研究課題について述べる。

一つの具体例は微小摂動による地震の誘発である。地震断層は潮汐程度の微弱な応力摂動に対して鋭敏になりうるということが知られている。とくに、スロー地震の一種である「微動」の発生頻度は潮汐とよく相関する。普通の地震では、ヒマラヤ地域における地震発生数が有意な季節変動を示すことも知られている。潮汐による応力変化は岩石の破壊応力の10万分の1程度であるから、このような相関は極めて不思議である。

一般的に臨界状態に近い系は摂動に敏感であるから、このような潮汐応答は多くの断層において応力が臨界値に近づいていることを想像させる。実際に大地震の発生前に震源域で海洋潮汐と地震発生率の相関が増すことが観測から示唆されており、大地震の予兆という観点からもきわめて興味深い。この問題に対して、室内実験から現象論を積み上げて背後にある物理を解明する試みを開始している。実験は、パリ・Ecole Normale Supérieureの研究グループとの共同研究として開始している。理論的には、地震発生率は滑りの不安定化・加速過程から決まるので、滑りの不安定化・加速過程に対する応力摂動の影響を考えることになる。こちらは数学的には「ランダム力学系」と呼ばれる分野と関係があり、この方向への展開も興味深い。

同様の現象として地震と火山の相互作用が挙げられる。歴史上、火山噴火は大地震に引き続いて起こることが多い。2011年のM9東北地震の後、今また日本列島において火山活動が活性化していることは報道でも知る通りである。しかし「なぜ地震によって火山活動が活性化するのか？」という根本的な問いに地球科学はまだ答えられていない。一つの作業仮説は「マグマが地震波に揺すられることによって粘性が低下する」という物質科学的な問題である。マグマは熔融した岩石であり液体であるが、火山近くのconduit中では温度低下により核形成と結晶化が部分的に進行しており、それら結晶粒子間の相互作用によってマグマ全体が降伏応力を持つという描像が室内実験などから支持されている。このような結晶粒子のサスペンション系が外部からの振動に対し脆弱であることは（粉体系の液状化などから）容易に予想される。このようなマグマのレオロジーへの摂動と応答をシミュレーションや理論の面から攻めたいと考えている。

## 3. レオロジーの観点から固体地球現象全体を見渡す

これまでいくつかの具体的課題について論じてきたが、いずれもレオロジーの問題と見なせることに注意されたい。多くの固体地球惑星科学的現象では「変形／流動／破壊」という（広い意味での）レオロジーの理解が鍵である：地震発生／火山噴火／下部地殻の塑性流動／マントル対流／コア対流と地磁気など、全てレオロジーの問題と言っても過言ではない。

他方、地表近傍から最深部に至るまで、温度は300Kから6,000Kまで、圧力は1気圧から100万気圧まで変化し、物質とレオロジーの多様性を生み出している。現象の時間スケールも、地震などの1~100秒程度の現象から、造山運動／マントル対流などの百万年スケールまで、実に10桁以上のスペクトルがある。空間スケールについても同様で、例えばマントル流動においては原子分子スケールのダイナミクスが問題となる一方で、地震発生や火山噴火は主にキロメートルスケールの現象である。

このように同じ学問分野にも関わらず、扱う時空スケールは10桁以上におよび、異なるスケールの法則どうしの関係を理解する必要に常に迫られる。狭い意味の統計力学は原子分子からアヴォ

ガドリ数の現象をつなぐことを主眼にしていたが、より広い意味での統計力学は、異なるマクロ階層の法則どうしをつなぐ学問であるべきで、地球惑星科学はまさにそのような問題の宝庫と言える。

#### 4. 地震学の教育のあり方について

地下深くは宇宙の遠くと同様に精密観測が最も難しい領域の一つである。従って観測手法の多様化と精密化が地震学の中心課題であることは論を俟たない。実際、日本の地震学は世界最高レベルの観測網と観測技術を誇り、その結果として世界をリードする存在になっている。しかしその一方、物理学の観点から日本地震学の現状を見るといくつかの不満を感じないでもない。観測があまりに各論的で網羅的になり過ぎている印象を受けるのである。これは観測データが増えたことからやむを得ない面もあるのだが、要は「大事なものと瑣末なものを峻別する」ことができていることに起因すると考えている。ここでの「大事か瑣末か」は「再現性の有無」と言い換えても良い。（自然科学は実験の繰り返しと再現性をもとに発展してきたことを考えればこれはそんなに的外れな基準でもないだろう）。例えばある内陸断層で起きた地震に関して、断層破壊過程の時空発展の細部をつつき回すことにあまり実りがあるとは思えない。何かその断層に限定した理論モデルを作って詳細を説明しても、次に同じ断層で地震が起こるのは数百～数千年後であり、モデルの有用性は検証不可能だからである。ゆえに、「様々な断層で起こる地震に対して共通する性質とそうでない性質は何か？」という基準から観測データを整理し、それらに共通する普遍的性質に的を絞って理論・モデルを構築しなければならない。日本の地震学でこのような意識を明示的に持っている人々はさほど多くないと考えるが、このような観点から学生を教育していかなければ、日本の地震学は「欧米に質の良いデータを提供してくれる便利な人たち」で終わってしまうと危惧している。