

## 地震の理解へ向けた理論的アプローチ：スケール依存性の理解へ向けて

波多野恭弘（東大地震研）

スロー地震まで含めた、地震発生過程を物理的に理解するための鍵は何だろうか？物理科学的アプローチの常道は、「複雑な問題は（より簡単な）サブ問題に分割せよ」であるから、系を構成要素に分けてステップバイステップで理解していけばよかる。地震の場合は、「地震発生場の各種（地震学的・地質的・電磁氣的）構造と物性（摩擦・透水率など）の理解」がサブ問題にあたるだろう。では、分割して理解できたサブ問題から実際の地震をどう理解すべきだろうか？

「構造」と「物性」は密接にリンクしているが、まずは摩擦や透水率などの物性について考えよう。これらの性質は基本的に岩石やコア試料の室内実験によって求められる。室内実験の試料は数cm~数十cmである一方、実際の地震での断層滑りはマグニチュード8なら数百km四方に及ぶので、実験試料と地震では空間スケールが約6~7桁も違うことになる。プレート境界面が2次元だと思えば、実験試料が $10^{12}$ ~ $10^{14}$ 個集まった面として地震発生場を考えていくことになる。これはアボガド数とまでは行かないが、およそ10ミクロン立方の物質内部にある分子数と同程度である。分子スケールの現象と10ミクロンスケールの現象とは基本的に別物だが、室内実験で分かる物性とマグニチュード8クラスの地震も別物と考えた方がよいのだろうか？もしそうだとすると、我々は地震をどのように理解すればよいのだろうか？

室内実験から分かっているように、摩擦などの岩石物性は温度・圧力・岩石種などの詳細に敏感に依存するので、プレート境界全域にわたって均一であるはずはなく、不均一に分布しているはずである。単純に考えれば、このような不均一構造を実験試料サイズ程度である10cmの解像度で与えて滑りのシミュレーションをすれば、プレート境界の滑り挙動は完全に理解できるはずである。そのような超微細構造を持つ不均一場での滑り挙動がどのようなものになるか興味深いだが、問題が二つある。：1) マグニチュード8クラスの地震を考える際には、プレート境界上に $10^{12}$ ~ $10^{14}$ 個のメッシュを与えることになるが、そのような計算は負荷が高すぎて計算できない。2) 実際のプレート境界の物性を10cm程度の解像度で知ることが無理である。これら2点の困難はいずれも現時点での話であり、将来は解決されるのかもしれないが、そう近い将来でもないだろうから、我々は別の手段を考えなくてはならないだろう。

すぐに思いつくのは以下のような指針である。プレート境界を実験室スケールのメッシュに切るのが不可能なら、観測の解像度程度のメッシュに切るのが現実的であろう。例えばこのサイズを数kmとすると、数km程度の空間スケールでの摩擦法則をシミュレーションに与えればよいことになる。現状では、この数kmのメッシュに実験室スケールでの摩擦法則を与えることが多いが、10cmの試料で成り立つ摩擦法則が(それよりも4桁大きい)数kmの岩盤でも成り立つ保証は全くない。先に述べたように、実験試料とそれが $10^{14}$ 個敷き詰められた系の性質は異なると考えるのが自然であろう。したがって、我々の仕事は、何とかして数kmスケールで成り立つ摩擦法則を探すことになる。これは実験は不可能なので、理論的に探していくことになる。例えば10cm程度の波長で分布する不均一性を与えた際に、系に働く実効的な摩擦力を求めるという指針があり得るだろう。ここでの問題は、10cm程度の不均一性をどう与えるかという点にある。これは観測からは決まらない情報なので一層難しい。

この素朴なアプローチで予想されるもう一つの困難は、力学的不安定性(カオス)である。ここでのカオスとは、「系の挙動は決定論的で、初期条件と境界条件を与えれば一意的に決まるが、初期条件と境界条件がほんのわずかだけ異なる二つの系を比較すると、その挙動は時間の経過とともに全く異なってしまう」という現象である。地震の動的破壊がカオスであることを示した研究は(知る限りでは)まだ無いが、もしカオスだとすると、シミュレーションによる大地震発生予測には深

刻な問題が生じる。つまり、プレート境界の不均一物性や応力場をどんなに詳細に与えたとしても、観測誤差の範囲内で分布させたパラメタセットで実現する地震の様子が毎回大きく異なってしまう、ということが起こりうる(例えばほとんど同じパラメタセットを与えたシミュレーションでもマグニチュード6の地震になったり9の地震になったり、あるいはスロー地震になるなど)。これは力学的不安定性の度合いと、初期条件・境界条件の不確定性の度合いの兼ね合いから定量的に決まるので、ケースバイケースの具体的な研究が今後必要である。

以上論じたように、初期条件・境界条件の不確定性と、(もし存在すれば)力学的不安定性から、ある特定の場所で起こる地震の規模と滑りの様相を決定論的に予測することは非常に困難であることが予測される。つまり、「いつ」も予測できないし「規模」も予測できないというわけである。このような場合に我々はどうすればよいのだろうか？

一つの指導原理は、「知り得ないことについては無バイアスで推定し、結果については統計的に述べる」ということである。これは例えば統計力学において等重率の原理を仮定し(無バイアス推定)、知りたい物理量はその確率分布について統計的に求めていることと対応するだろう。地震についても、地震発生場について知り得ないこと(短波長の不均一性や応力場など)については統計的分布を考え、知りたいこと(発生する地震の挙動)はその分布について統計的に論じる、ということになる。このようなやり方でも、例えば「現時点でマグニチュード8以上の地震が起こる確率」などは論じることができるので、全く役立たずというわけではない。ただし、そのためには上述したような大スケールでの(粗視化された)摩擦法則が必要になるし、断層の動的破壊過程における力学的不安定性の度合いについて定量的な知見を深めることも必要である。それらの理論的根拠が揃って初めて、高精度の観測データを用いた地震災害の確率的予測へ進むことができるのだろうと考えている。