

CS-27

地震エネルギーのべき乗則分布における 地殻粘性の影響の計算

日本大学短期大学部 正員 吉野 隆

1. はじめに

地震のエネルギーの頻度分布には Gutenberg-Richter (GR) 則と呼ばれる経験則が成立することが知られている。これは、

$$N(E) = CE^{-(B+1)} \quad (1)$$

といった「べき乗」の分布の形を示している。べき乗の関係を示していることは、系が「特徴的な大きさを持っていない」という性質を持つことを意味しており、この特徴のために、地震の頻度分布は物理学の対象にもなっている。最近の研究から、この頻度分布は地震の発生する深さによって異なることがわかってきた。震源の深さを浅部・中間部・深部の3つに分けると、これらの頻度分布の性質は次のようにまとめられる。1) 小さなエネルギー領域にある地震の場合には GR 則が成立する。2) 大きなエネルギー領域側での GR 則の成立範囲は上の3つのタイプに依存し、震源が深くなるにつれ GR 則の成立する範囲が短くなる。3) 係数 C は3つのタイプで異なる。本研究では、この現象が地殻を構成する物質である岩石の粘弾性の影響によるものであることを示す。そのために導入したモデルとその計算結果について以下で説明する。

2. モデル

この粘性の影響を推定するために、断層の運動の基本的なモデルとされている Burridge-Knopoff (BK) モデルを用いた。BK モデルは、「摩擦力が底面に働いているブロックが一定速度で駆動されているときの運動」を考察するものである。ブロックは多数存在し、個々のブロックは周囲のブロックとバネで連結されている。ブロックの運動が断層の運動に相当する。すなわち、静止していたブロックに生じる急激な変位が地震である。本研究で使用したモデルは、BK モデルを拡張し、粘弾性バネ (Maxwell バネ) を使用している。Maxwell バネは地殻を構成する岩石の物性を近似的に表現するものである。岩石は短い時間スケールで弾性物質、長い時間スケールで粘性流体として振舞うため、Maxwell バネは完全ではないものの岩石の力学的性質を良く説明している。ここでは $L \times L$ の2次元正方格子状のブロックの組を考える。モデルの模式図を図1に示す。この系で成立する運動方程式は、

$$m\ddot{x}_{i,j} = F_{i,j}(t) + f + f_d. \quad (2)$$

ここで、 m と $x_{i,j}$ は、それぞれ、 (i, j) 番目のブロックの質量と位置、 $F_{i,j}(t)$ は (i, j) 番目のブロックにかかる力である。また、 f と f_d は摩擦力と駆動力である。 $F_{i,j}(t)$ は Maxwell バネの構成方程式によって決定され、

$$\frac{1}{k}\dot{F}_{i,j}(t) + \frac{1}{\eta}F_{i,j}(t) = (2\dot{x}_{i,j} - \dot{x}_{i,j-1} - \dot{x}_{i,j+1}) + (2\dot{x}_{i,j} - \dot{x}_{i-1,j} - \dot{x}_{i+1,j}), \quad (3)$$

である。 k と η は弾性係数と粘性係数である。

3. 計算の手法

実際には、上述の方程式の直接の数値計算は行わず、Olami-Feder-Christensen によって2次元 BK モデルに適用された、連続値セルオートマトンを用いる。この手続きは、1) ブロックの定常的な移動と2) ブロックにかかる力の再配分の二つの手続きによって構成されている。

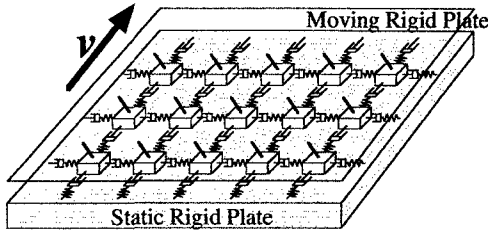


図1 粘弾性バネ-ブロックモデルの模式図

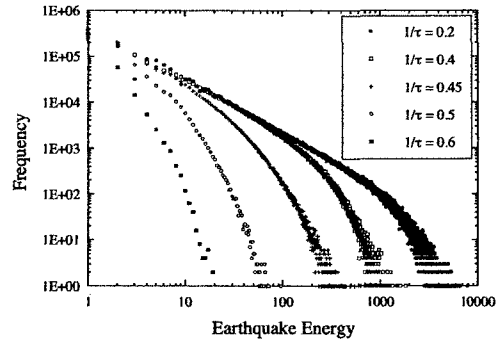


図2 様々な $1/\tau$ の場合についての地震エネルギーの頻度分布

具体的には、各時刻 $t (= k\Delta t, k = 0, 1, 2, \dots)$ でブロック (i, j) をランダムに選び、

$$F_{i,j}(t) \rightarrow F_{i,j}(t) + 1, \quad (4)$$

という操作を行う。これは、ブロックに対して単位時間あたり一定の変位が与えられていることを意味している。すなわち、マントル対流によるプレートの運動である。これを繰り返し、 $F_{i,j}(t) \geq F^{th}$ が満たされたときには以下の二つの手続きを行う。

$$F_{i,j}(t) \rightarrow 0. \quad (5)$$

$$F_{i,j}^{NN}(t) \rightarrow \frac{1}{4} F_{i,j}^{NN}(t). \quad (6)$$

これは、ブロックにかかる力が静摩擦力を越えたために、この力を周囲に分配させることに相当する。すなわち、地震の発生である。分配された力によって、新たに条件 $F_{i,j}(t) \geq F^{th}$ を満たすブロックができた場合には、再び分配の操作を行い、静摩擦力の条件を満たすブロックが無くなるまで、繰り返す。これが終了したら、時刻を1増加させて、再びブロックをランダムに選択する操作を行ってゆく。地震エネルギーは「同一時刻においてブロックを戻した力の総和」として定義される。粘性散逸の影響は、

$$F_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^n F_{i,j}^k(t_k) \exp\{-(t-t_k)/\tau\}, \quad (7)$$

という指数関数型の緩和を導入することで得られる。ここで、 t_k は k 番目の力が与えられた時刻、 $F_{i,j}^k(t_k)$ は時刻 t_k でブロックに与えられた力である。 τ は Maxwell バネの緩和時間であり、 $\tau = \eta/k$ である。式(7)の形からもわかるように、 $1/\tau$ は粘性の影響を示す度合いとなる。 $1/\tau$ が大きい程粘性の影響が強い。すなわち、力の散逸の度合いが大きい。

4. 結果

地震エネルギーの頻度分布は τ に依存する(図2)。比較的小さな $1/\tau$ の場合(ここでは弾性が卓越している)地震のエネルギーの分布は GR 則を示し、大地震の領域で GR 則からずれることがわかった。GR 則からの分離点は $1/\tau$ に依存し、粘性が大きくなるに従って GR 則の成立範囲が小さくなる。大きな $1/\tau$ では、分布関数は GR 則を示さなかった。 $1/\tau$ が更に大きな場合では地震は発生しない。これは岩石の粘性流れを意味している。以上の結果は観測データから得られた結果である、1) および 2) を満足させるものである。3) は、本研究のシミュレーションでは観察されなかった。これは定常的に加えている力の大きさ ($k\Delta x=1$) が深さに依存しているためと考えられる。