

## (15) 質点バネモデルによる地殻内地震のシミュレーション

埼玉大学工学部 谷山 尚 東大地震研 宮武 隆

はじめに

strike-slip の断層では、深さ十数km より浅いところでは地震が起きているが、それより深いところでは地震が起こらなくなるのが観察されている。これは浅いところでは、岩石が弾性的に振舞い断層面に摩擦が働いていて地震が起きているが、深いところでは高温と高圧のために岩石が流動し地震が起こらなくなるのだと考えられている (例えば Sibson, 1982)。そこで、本研究では岩石の流動を含んだモデルを考え、そのモデルを用いて地殻内地震のシミュレーションを試みた。モデルとしては1次元、平面とし、この様な簡単なモデルを用いて流動の影響を抜き出す事を試みた。またシミュレーションは断層の浅い部分 (2 km以浅) で断層クリープをし、それより深い部分ではロックしている条件で行った。この様に断層の浅い部分でだけクリープしている断層としては Hayward 断層がある。Hayward 断層は、サンフランシスコの東に位置する断層で、過去 M7 程度の地震が起きているにも関わらず Prescottらにより、クリープが観測されている。

摩擦法則

繰り返し地震が起こる様子をシミュレートすることを考え、断層面上に働く摩擦を表す法則として rate- and state- dependent friction law を用いた。この法則は Dieterich(1979) によって始められた、速度依存性を調べる岩石の摩擦実験の結果を Ruina(1983)が定式化したもので、摩擦力は岩石の相対速度  $V$  と状態変数  $\theta$  によって下式のように表される。

$$\tau = \sigma (M_0 + \theta + A \ln(V/V_c)) \quad (1)$$

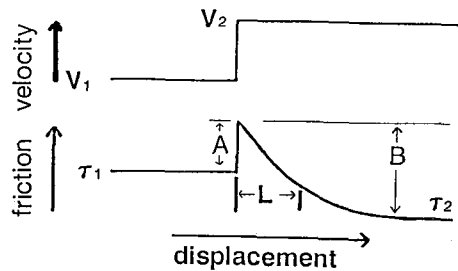
$$d\theta/dt = -V/L(\theta + B \ln(V/V_c)) \quad (2)$$

上式において  $V_c$  は相対速度  $V$  を規格化するための定数であり、 $M_0, A, B, L$  は摩擦の定数である。今、ある瞬間に相対速度が  $V_1$  から  $V_2$  になった場合を考える (図1)。状態変数  $\theta$  は (2) 式のように緩和時間  $V/L$  で時間変化するので瞬間的な変化には応じられない。従って瞬間的な摩擦力の変化は (1) の  $V$  が  $V_1$  から  $V_2$  に変化することによって表され、定数  $A$  で特徴づけられることになる。やがて時間の経過と共に岩石が距離  $L$  進むにつれて  $\theta$  は (2) 式のように変化する。最終的な定常状態では  $d\theta/dt = 0$  即ち  $\theta = -B \ln(V/V_c)$  となり、時間とともに変化する摩擦力は  $B$  で特徴づけられる。従って最初の摩擦力と最終的な摩擦力の差は  $A-B$  で特徴づけられる。

岩石の流動則

岩石の流動を表す法則としては下式のように差応力  $\sigma_1 - \sigma_3$  のべき乗で表される流動則を用いた。

$$d\varepsilon/dt = A' (\sigma_1 - \sigma_3)^n \exp(-Q/RT) \quad (3)$$



上式において  $d\epsilon/dt$  は歪速度、 $R$  は気体定数、 $T$  は絶対温度を表し、 $A', n, Q$  は定数である。つりあいの式のばあい、上式の差応力  $\delta_1 - \delta_3$  は摩擦力の2倍に等しくなる。

以上の法則を用いて断層運動のシミュレーションを行った。使用したパラメータの値を表1に示す。

一質点モデル

深さが変わると圧力と温度が変わる。圧力が変わると(1)より摩擦が変わり、(3)より歪み速度も変わる。また温度が変わると(3)より歪速度が変わる。従って、深さが変わると断層面上での挙動が変化する。そこで、断層運動のシミュレーションを行うに当たり、まず、図2のように、ある特定の深さだけを抜き出した一質点モデルを用いてその深さの特徴を調べた。周囲の媒質の性質として、瞬間的な力に対しては弾性体として振舞い、長期的な力に対しては(3)式に従って歪む性質を持たせるために板バネと(3)式に従うダッシュポットを直列につないだ素子で媒質を表す。素子の一端には質量  $m$  のブロックが繋がっている。このブロックと断層面の間には(1),(2)式で表される摩擦力が働いており、ブロックの運動は断層面上での相対運動を表す。断層面からある程度離れるとプレート運動によって常に一定の速度で動いていると考えられることから、素子の另一端を一定速度  $V_r$  で引張る。この距離としては、3 kmを仮定し、 $V_r$ としては、35mm/yrとした。そしてこのときのブロックの運動が深さと共にどう変化するかを調べ、深さ毎の特徴を調べた。計算は加速度が十分小さい ( $10^{-3} \text{cm/sec}^2$  以下) ときはつりあいの式を解き、大きいときは運動方程式を解くようし、staticとdynamicのどちらの場合も計算するようにした。

結果

深さ2 km以浅ではブロックは一定の速度でずる動く、安定滑りを起こす(図3)。安定滑りは断層クリープに対応している。2 kmから12 kmの間では、ある時は殆ど静止してある瞬間に急激に滑る不安定滑りを起こす。不安定滑りは地震に対応している。深さと不安定滑りの周期の関係を示したのが図3である。不安定滑りの周期は10 km位までは直線的に長くなっている。

- $A = 0.012$
- $B = 0.015$
- $V_c = V_r = 3.5 \text{cm/yr}$
- $L = 1.1 \text{cm}$
- $\rho = 2.8 \text{g/cm}^3$
- $V_s = 3.5 \text{km/sec}$
- $k = \rho V_s^2$
- $\mu_0 = 0.6$
- $dT/dz = 25 \text{ }^\circ\text{C/km}$
- $d\sigma/dz = 180 \text{bar/km}$

表 1

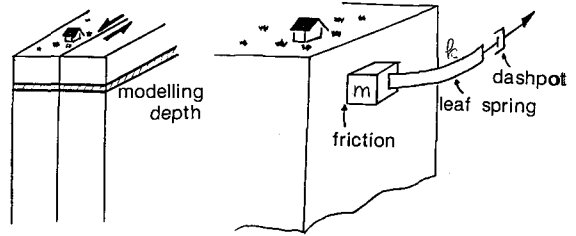


図 2

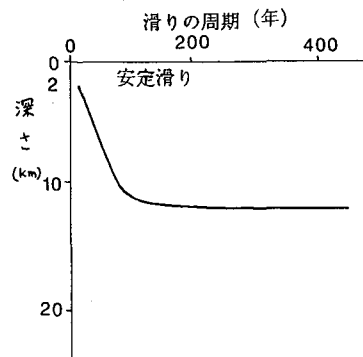


図 3

これは、この深さでは岩石は弾性的に振舞っているが、深さと共に圧力が増加するために、滑り時のストレスドロップが増加し、再び滑りを起こす状態になるまでに時間が掛かることによる。深さ10 kmから12 kmでは、滑りの周期は指数関数的に長くなる。これは深さ10 km位から岩石が流動し始め、そのために加えられているテクニクなストレスが流動によって消費されてしまい、ストレスが断層面に伝わりにくくなるためである。そして12 kmより深いところでは、すべて流動によって消費されるために不安定滑りが起きなくなる。

**結論**

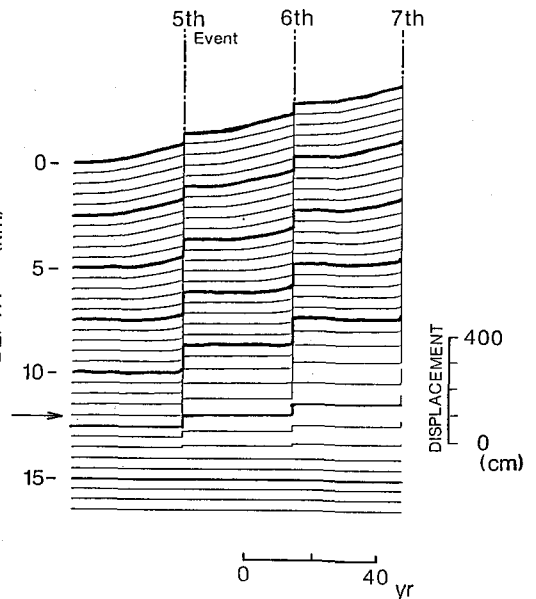
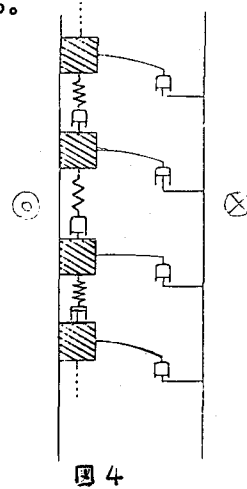
今回用いたパラメータでは深さ2 km以浅では断層クリープを起こす。2 kmから12 kmでは不安定滑りを起こし、その周期は、10 km迄は直線的に、10 kmから12 kmまでは指数関数的に長くなり、12 kmで不安定滑りは起こらなくなる。これらの深さはパラメータの値に依存するが、実際に深さ十数 kmで地震が起こらなくなることと対応している。

**一次元多質点モデル**

次に深さ方向にブロックをつないだモデル(図4)を用いて一次元の断層運動のシミュレーションを行った。ブロックは500 mごとに47個並べ、地表から深さ23 km迄をモデル化した。但し、浅い部分では媒質は弾性体として振舞い、殆ど流動しないことから7 kmまではダッシュボットの無い板バネだけでつないだ。

**結果**

2、3回地震が起きた後、同じ様な地震が繰り返して起きる定常的な状態になった。定常状態になったと思われる、4回目の地震の直前から7回目の地震の直前までの様子を示したのが図5である。図に於て、個々の線は左側に書かれた深さにおける時間と変位の関係を示す。図の上部に示したところが地震に相当し、浅い部分ではクリープする条件になっているにも関わらず、全体が滑る地震が起きているのが見られる。地震後しばらくすると浅い部分のクリープが始まり、時間がたつと共に深い部分も浅い部分に引きずられるようにクリープするようになる。クリープのために浅い部分程地震時の滑りは小さく、深い程大きくなっている。一質点の結果では、12 kmより深いところでは岩石が流動して断層面上での変位はなかったが、図より14 km位まで地震時に滑っているのがみられる。但し、流動のために断層上の変位は小さくなっており、更に深いところでは断層上での変位はない。図では変位が全くみられない16 kmより深いところは省いてある。次に地震時の様子を詳しくみるために、5回目の地震の時間ス



ケールを拡大したものを図6に示す。図6は、図5と同じ様に深さ毎に時間と変位の関係を示しているが時間スケールは図の下に示したように、図5に比べて大きく拡大してある。図より、地震は4 km 辺りの浅い部分で開始し、そこから浅い部分と深い部分の両方向へ伝播しているのが見られる。伝播速度はS波の約0.6倍と平均に比べてやや小さめの値となっている。また、変位速度も、数十cm毎秒から1.2m/s程度と比較的小さな値となっている。一般に大きな地震は深いところから始まることが多いといわれており今回の結果はそれとは異なったものになっているが、これは今回のシミュレーションは断層の浅い部分でクリープする条件になっていることが関係しているものと思われる。また、伝播速度と変位速度がやや小さめになっていることにもこの条件が関係しているものと思われる。12 kmより深い部分の変位について、図より地震時に滑っているのがみられる。

#### 結論

流動則と摩擦法則を含んだ質点バネモデルを用いて、浅い部分でクリープしている場合の断層運動のシミュレーションを行った。その結果、

- 1 浅い部分のクリープに関わらず、全体が滑るような地震が起きた。
- 2 浅い部分は地震後しばらくは殆ど止まっているが、やがてクリープを始め、徐々に深いところもクリープし始める。
- 3 地震は浅いところ（約4 km）から始まり、両方向に伝播する。
- 4 伝播速度、変位速度とも平均より小さめの値になっている。
- 5 岩石が流動している深さでも一部分は地震時に滑る。

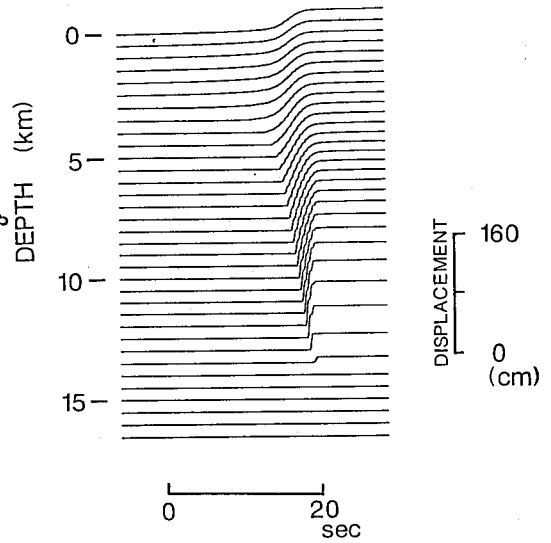


図 6