

論文の内容の要旨

論文題目 3-D Physical Modelling of Earthquake Generation Cycles and
Evolution of Fault Constitutive Properties
(地震発生サイクルの三次元物理モデリングと断層構成関係の発展)

氏名 橋本千尋

プレート境界では大地震が繰り返し発生することが知られている。大地震の発生サイクルは、プレートの相対運動に伴うテクトニック応力の蓄積、準静的破壊核の形成、動的破壊の開始・伝播・停止、及びその後のアセノスフェアの粘性緩和と断層強度の回復の諸過程から成る。これらの諸過程を個別に記述するモデルは、1980年代後半以降、それぞれの時間スケールに特化した形で発展してきた。しかしながら、地震破壊に伴って解放される応力はそれ以前のテクトニックな過程を通して蓄積されたものであり、また地震時に低下した断層強度の回復なしには次の地震は起こり得ないことから、これらの諸過程を一連のものとしてモデル化することは本質的に重要である。本研究では、横ずれ型プレート境界に於ける大地震の発生サイクルを統一的に理解するための三次元物理モデルを構築し、それを用いた数値シミュレーションを通して、地震発生サイクルの全過程の詳細とそれに伴う断層構成関係の時間発展を明らかにした。

地震発生サイクルの全過程は、適切な構造モデル上で定義されたすべり応答関数と断層構成則及び系の駆動力としてのプレート相対運動をカップルさせた方程式系によって完全に記述される。本研究では、弾性的リソスフェアとマックスウェル粘弾性を持つアセノスフェアとから成る半無限二層構造モデルを設定し、すべりに対する応力応答として新たに定式化した粘弾性応答関数、断層構成則として Aochi and Matsu'ura (1999) のすべりと時間に依存する構成則を用い、これらをカップルさせた系に駆動力としてのプレート相対運動を与え、横ずれ型プレート境界に於ける大地震の発生サイクルモデルを構築した。

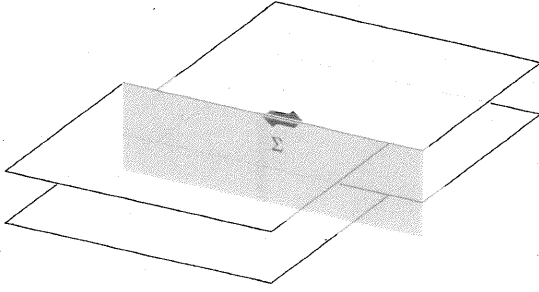


図1：設定した弾性-粘弾性二層構造モデル。影を付けた部分はプレート境界面を表す。矢印はプレート相対運動ベクトルを示す。

具体的には、図1に示すような弾性的リソスフェアと粘弾性的アセノスフェアとから成る半無限二層構造モデルに、無限に長い垂直横ずれ型のプレート境界面 Σ を設定する。そして、プレート境界面上のすべりを w とし、プレート相対運動速度 v_{pl} の定常的なすべりとそこからの変化分 u_s とに分離する。

$$w(\mathbf{x}, t) = v_{pl}t + u_s(\mathbf{x}, t)$$

このとき、すべり w によって生ずる応力変化は、Hashimoto and Matsu'ura (2000)による粘弾性応答関数 $H(\mathbf{x}, t; \xi, \tau)$ を用いた履歴積分により、

$$\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma_0(\mathbf{x}) + \iint_{\Sigma} \frac{\partial u_s(\xi, \tau)}{\partial \tau} H(\mathbf{x}, t - \tau; \xi, 0) d\xi d\tau$$

と表される。ここで、右辺第一項は定常的なすべりによって実現される定応力状態に、また第二項はこの定常状態からのすべり遅れに起因する応力変化に対応している。一方、プレート境界面 Σ 上のすべり w と剪断応力 σ との関係を規定する境界条件は、後述の構成則によって定義される断層強度 σ_{strg} を用いて、

$$\begin{cases} \sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma_{strg}[w(\mathbf{x}, t), t; \mathbf{x}] & (dw/dt > 0) \\ \sigma(\mathbf{x}, t) \leq \sigma_{strg}[w(\mathbf{x}, t), t; \mathbf{x}] & (dw/dt = 0) \end{cases}$$

と設定する。これらの式をカップルさせることにより地震発生サイクル過程を支配する閉じた方程式系が得られる。

断層強度 σ_{strg} を定義するすべりと時間に依存する構成則は、各瞬間の断層面形状 ($|Y|$ は断層面の凸凹のフーリエ振幅を表す) で決まる断層強度

$$\sigma_{strg}(w, t) = \sigma_0 + c \left[\int_0^{\infty} k^2 |Y(k; w, t)|^2 dk \right]^{1/2}$$

とその断層面形状がすべりと共に磨耗し時間と共に回復する過程を規定する微分方程式

$$d|Y(k; w, t)| = -\alpha k |Y(k; w, t)| dw + \beta k^2 \left[\bar{Y}(k) - |Y(k; w, t)| \right] dt$$

によって記述される。ここで、 $|\bar{Y}|$ は、断層表面形状が回復し得る最大値を表し、ここでは広い波数 (k) 領域で $|\bar{Y}| \propto k^{-3/2}$ のフラクタル的の性質を持つものと仮定する。また、磨耗レート α 及び固着レート β は場所に依存するパラメータであり、断層の物理的性質を表す。この構成則で重要な点は、断層構成関係を規定する最大剪断強度 σ_p 及び臨界変位量 D_c は予め設定されているのではなく、断層面のすべりに依存して変化してゆくことである。

本研究では、以上の非線型方程式系を安定に解くための新たなアルゴリズムを開発することにより、地震発生サイクル過程の三次元数値シミュレーションモデルを完成させた。図2に横ずれ型プレート境界面上の長さ60 kmの地震発生領域での応力蓄積・解放過程を示す。プレート相対運動速度を5 cm/yrとしたとき、地震発生領域では応力蓄積・解放がおおよそ26年の周期で繰り返される。地震時の平均応力降下量はおおよそ1.8 MPaである。

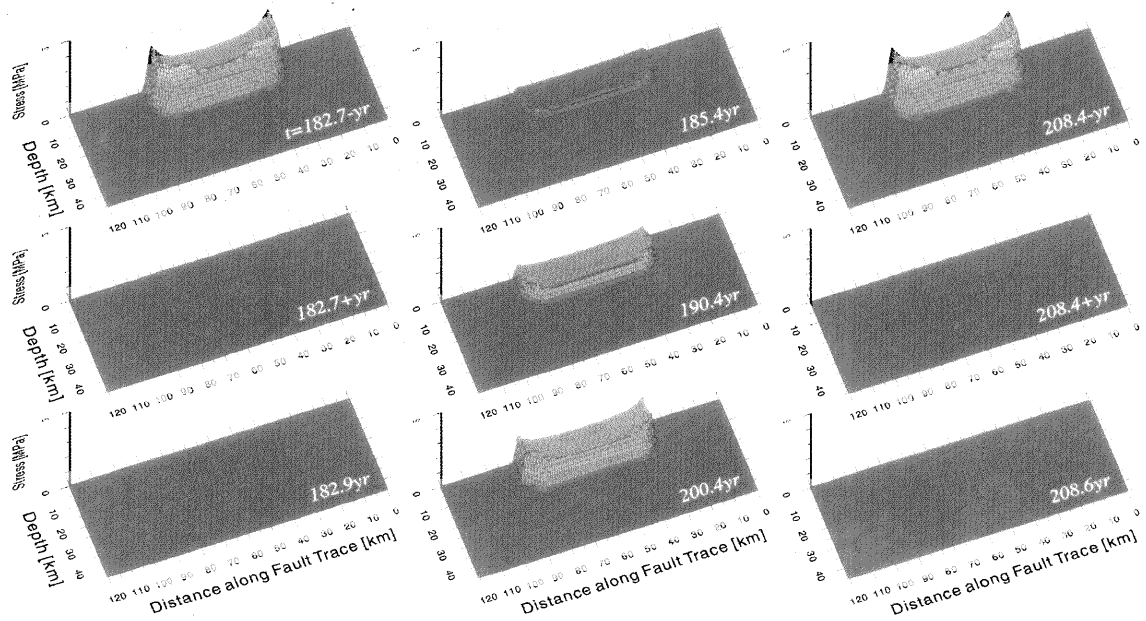


図2：地震発生領域に於ける応力蓄積・解放過程。

この図に示すように、断層強度は大地震の発生と共に一気に低下するが、地震後の断層の固着により徐々に強度を回復してゆく。その様子を示したのが図3である。この図から最大剪断強度 σ_p が地震破壊直後に急速に回復するのに対して、臨界変位量 D_c は時間と共に徐々に回復してゆくことがわかる。断層構成関係のこのような発展は、図4に示す示すように、地震時のすべりによって磨耗した断層面形状 $Y(k)$ が固着によりフラクタル的性質を回復してゆく過程に対応している。

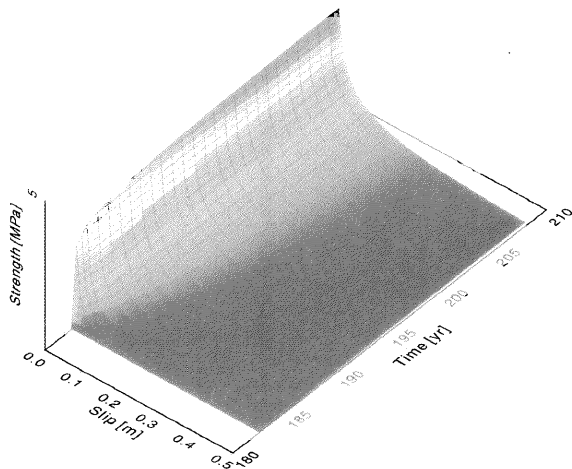


図3：地震破壊直後から次の地震発生直前までの間の断層構成関係の発展。最大剪断強度 σ_p は地震破壊直後に急速に回復するが、臨界変位量 D_c は時間と共に徐々に回復してゆく。

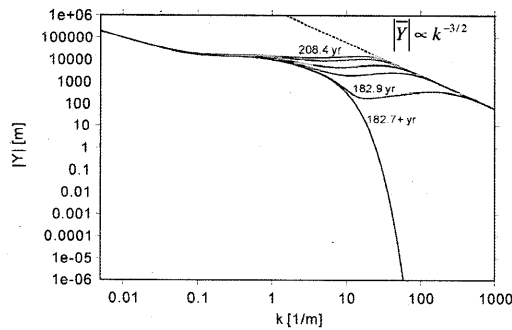


図4：断層面形状 $|Y(k)|$ の回復過程。地震破壊直後から次の地震発生直前までの間に断層面形状 $|Y(k)|$ が固着によりフラクタル的性質を回復してゆく様子を示す。 k_c はフラクタル領域の限界波数を示す。

図4のシミュレーション結果は $|Y(k)|$ が波長の小さい（波数 k の大きい）方から順に徐々にフラクタル構造を回復してゆくことを示している。Matsu'ura et al. (1992)や Ohnaka (1996)に拠れば、臨界変位量 D_c は断層面形状のフラクタル限界を表す臨界波長（ $\lambda_c = 2\pi/k_c$ ）に比例する。つまり、地震後の臨界変位量 D_c の回復は、断層の固着により $|Y(k)|$ が波長の小さい方から順にフラクタル構造を回復してゆく過程の現れであると理解することができる。

以上のような孤立地震断層の場合のシミュレーション結果を踏まえ、次に大小二つの断層セグメントから成る断層系での地震サイクルのシミュレーションを行った。断層セグメントは強度回復レートの大きい領域、その間のクリープ領域は強度回復レートの小さい領域として表現する。図5に幅10 kmのクリープ領域を挟む長さ30 kmと50 kmのセグメントから成る複合断層系でのシミュレーション結果を示す。プレートの相対運動により各断層セグメントに応力が蓄積し、先ず小さいセグメントが不安定破壊（地震）を起こす。このイベントによる弾性的な応力変化とそれに続く粘弾性的な応力再配分により、大きいセグメントの応力蓄積過程は加速され、およそ2年後に不安定破壊を起こす。このような弾性-粘弾性的断層間相互作用は、トルコの北アナトリア断層や西南日本の南海トラフでしばしば観測される、数年の時間差で連発する大地震の発生過程を理解する上で重要である。

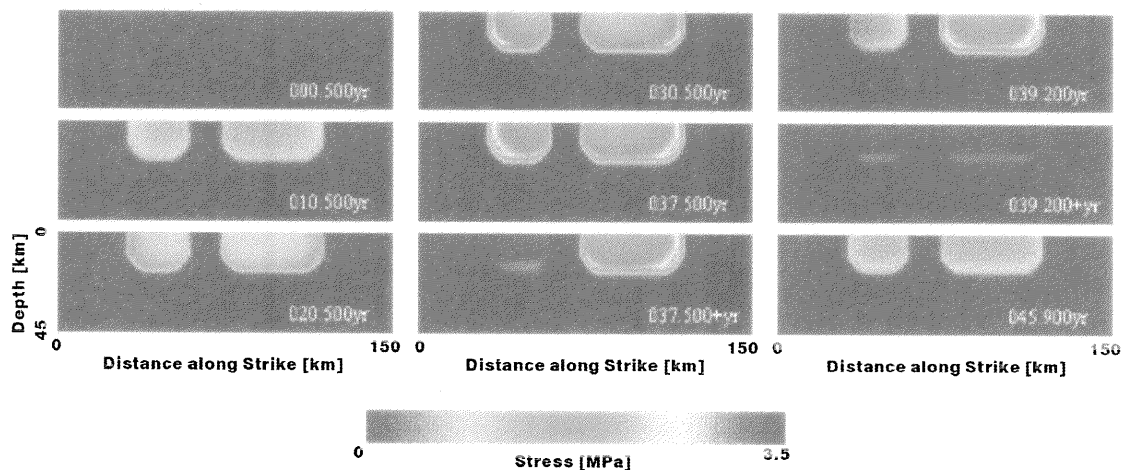


図5：大小二つのセグメントから成る断層系での応力蓄積・解放過程。