

3. 3. 1 3. 2 歪蓄積過程についてのモデル研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：歪蓄積過程についてのモデル研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学大学院理学研究科	教授	平原和朗	hirahara@kugi.kyoto-u.ac.jp
名古屋大学大学院環境学 研究科	研究員	光井能麻	mitsui@eps.nagoya-u.ac.jp
京都大学防災研究所	助教授	飯尾能久	iio@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
京都大学防災研究所	教授	橋本学	hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
京都大学防災研究所	産学官連携 研究員	小林知勝	tkoba@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
立命館大学理工学部	助教授	川方裕則	kawakata@se.ritsumei.ac.jp
京都大学防災研究所	大学院生	豊田暁来	toyoda@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
名古屋大学大学院環境学 研究科	教授	古本宗充	furumoto@eps.nagoya-u.ac.jp
中部大学工学部	助教授	工藤健	kudo@isc.chubu.ac.jp
地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所	副主任研究 員	田中俊行	tanaka@tries.go.jp

(c) 業務の目的

推定された静的断層モデルを利用して、深部断層構造や地殻構造にもとづいた不均質構造モデルにより、活断層などへの歪蓄積過程についてのモデル研究を行う。加えて、断層面上の摩擦特性を探るため、歪・傾斜観測データ等から非地震性すべり検出を試みる。

(d) 5ヵ年の年次実施計画

- 1) 平成14年度：西南日本三次元有限要素モデルの構築と予備的計算、プレスリップおよびサイレント・アースクエイクのモデル化および過去の事例の収集・整理
- 2) 平成15年度：西南日本三次元有限要素モデルによるシミュレーション、プレスリップおよびサイレント・アースクエイクのモデル化、日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形に関する研究（地形・重力データに基づく解析）
- 3) 平成16年度：西南日本三次元有限要素モデルによるシミュレーション、プレスリップおよびサイレント・アースクエイクのモデル化、日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形に関する研究（単純化モデルによる力学的シミュレーション）
- 4) 平成17年度：構造データを取り入れた西南日本三次元有限要素モデルの構築とこれ

によるシミュレーション、プレスリップおよびサイレント・アースクエイクのモデル化、日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形に関する研究（力学的シミュレーション）

- 5) 平成18年度：構造データを取り入れた西南日本三次元有限要素モデルの構築とこれ西南日本三次元有限要素モデルによるシミュレーション、プレスリップおよびサイレント・アースクエイクのモデル化、日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形に関する研究（力学的シミュレーション）

(e) 平成17年度業務目的

平成17年度においては、内陸活断層およびプレート境界断層への歪エネルギー蓄積過程のモデル化を目標として、西南日本三次元有限要素モデルによるシミュレーション、プレスリップおよびサイレント・アースクエイクのモデル化を実施する。合わせて、今年度より特定課題共同研究として加わる日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形に関する研究（地形・重力データに基づく解析）をすすめ、地震・地殻変動にとどまらず各種地球物理データの活用を図る。

(2) 平成 17 年度の成果

(2-1) 単純セルモデルによる南海トラフ巨大地震発生シミュレーション

平原和朗（京都大学大学院理学研究科）

hirahara@kugi.kyoto-u.ac.jp

光井能麻（名古屋大学大学院環境学研究科）

mitsui@eps.nagoya-u.ac.jp

(a) 業務の要約

西南日本の南海トラフ沿いにはフィリピン海プレートが沈み込み、巨大地震を繰り返し発生させ、西南日本の内陸活断層の応力場に大きな影響を及ぼしている。本業務では、この影響を見積もるため、これまで、岩石実験から得られたすべり速度と状態に依存する摩擦則に基づいて、プレートの沈み込み形状および破壊セグメントを単純なセルでモデル化し、以下のように、南海トラフ巨大地震発生サイクルの数値シミュレーションを行ってきた。すなわち、深さ方向に、固着域・遷移域・安定すべり域といった 3 枚のセルを、東海地方から四国沖まで南海トラフに沿って 5 セル、計 15 セルを配置し、各セルに摩擦パラメータを分布させ、さらに東海地方の 2cm/年から四国地方で 6cm/年と増加するプレートの沈み込み速度を与えて、固着域における巨大地震のみならず、深部での余効すべり、地震間に発生するスロースリップの発生まで含めた巨大地震発生サイクルのシミュレーションを行ってきた。

本年度は、内陸活断層で応力蓄積過程と南海トラフ巨大地震との相互作用を見るための準備として、簡単な内陸活断層セルを南海トラフセルに加え、地震発生シミュレーションを行った。内陸活断層における応力蓄積の起源ははっきりしていないので、ここでは GPS データのインバージョン解析によるすべり欠損レートを駆動力として与えた。

(b) 業務の実施方法

岩石実験から導かれたすべり速度と状態に依存する摩擦構成則（Dieterich, 1979¹⁾；Ruina, 1983²⁾）に基づく、プレート沈み込みに伴う海溝型巨大地震の地震発生サイクルシミュレーションが行われるようになった（例えば、Hori et al., 2004³⁾、堀・他、2005⁴⁾）。プレート運動を与えて、プレート境界面を微小なセルに分割し、各微小セルでのすべりの発展を追って、地震サイクルをシミュレーションしており、これは詳細モデルと呼ばれる。これに対し、同じ計算式を用い、大きなセルサイズを用いて、海溝型巨大地震の発生サイクルをシミュレーションする枠組みを開発した。これは、バネブロックを用いたシミュレーション（Mitsui and Hirahara, 2004⁵⁾）の発展形（Mitsui and Hirahara, 2006⁶⁾）と言える。

南海トラフに沈み込むフィリピン海プレートの 3 次元形状および断層破壊セグメントに対応して、深さ方には固着域、遷移域、安定すべり域の 3 枚のセルを、駿河トラフから四国までの南海トラフに沿って 5 枚のセルに分割し、図 1 に示すように、計 15 枚のセルでプレート境界を単純セルで表した。各セルでは以下式（1）の準静的力の釣り合いを仮定して、プレート運動によりプレート境界ではすべり速度と状態に依存する摩擦則（式（2））

に従い、すべりが発展し、地震発生サイクルのシミュレーションを実行している。

$$\mu_i \sigma_i = \sum K_{ij} (V_{pi} t - u_j) - \frac{G}{2c} V_i \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sum J_{ij} (V_{pi} t - u_j) \quad (2)$$

$$\mu_i = \mu_0 + a_i \ln(V_i/V_0) + b_i \ln(\theta_i V_0/L_i) \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = 1 - \frac{\theta_i V_i}{L_i} \quad (4)$$

$$\frac{du_i}{dt} = V_i \quad (5)$$

ここで、 μ_i 、 σ_i 、 V_i 、 u_i 、 θ_i は、それぞれセル*i*における摩擦係数、法線応力、すべり速度、すべり、状態変数を表す。また、 G 、 c 、 t は剛性率、 S は速度、時間を表す。 K_{ij} および J_{ij} は、セル*j*での単位すべりに対するセル*i*でのせん断力変化、法線応力変化（すべり応答関数）を表し、半無限均質弾性体を仮定しOkada(1992)⁷⁾によりその値を見積もる。式(1)はせん断方向、(2)は法線方向の力の釣り合いを表している。 a_i 、 b_i 、 L_i はセル*i*に与える速度と状態に依存する摩擦構成則における摩擦係数ならびに特徴的長さである。 V_{pi} セル*i*でのプレート収束速度でHeki and Miyazaki(2001)⁸⁾に従って与えた。

また、近畿地方に内陸断層を2つ(16・18、17・19)設けて、内陸断層セルにおける地震発生サイクルを追加して、シミュレーションを実行した。内陸断層では、地震を発生する上部地殻の固着域($a-b < 0$) (セル16,17)と安定すべりを起こしている下部地殻(セル18,19)を与え、上の式の V_p のかわりに、GPS観測から得られたローディング速度を V (セル16・18、17・19にそれぞれ、0.8cm/yr、0.6cm/yr)を与えている。

シミュレーションでは各セルにおける変数の時間発展を計算するため、式(1)-(4)を、タイムステップが可変のルンゲクッタ法(Press et al., 1993⁹⁾)を用いて積分した。

(c) 業務の成果

図2に、南海トラフセル3、8、13および、内陸セル16、17、18、19のすべり速度の時間変化を示す。まず、南海トラフ巨大地震のすべりは、セル3(赤)で表され、発生間隔は実際のものに近い平均110年である。これに対し、内陸断層セル16(ピンク)では、約460年、セル17(水色)では、約700年である。内陸断層セルの単独での繰り返し間隔は、セル16、17では、それぞれ425年、570年であるので、セル17ではかなり繰り返し間隔が延びていることがわかるが、これはフィリピン海プレートの沈み込みを考えない隣接した2つの断層セルを置いただけでもセル17の繰り返し間隔が延びることからも分かるように、断層配置の関係で生じているようであり、活断層配置の重要性を物語っている。

図3に、各セルにおける摩擦係数の時間変化、図4に、図5にせん断応力、法線応力の時間変化を示す。図5から分かるように、フィリピン海プレートの沈み込みと南海トラフ巨大地震による法線応力変化は、セル16(ピンク)の方がセル17(水色)より大きい。せん断応力は、これに図4の摩擦係数をかけたものになるので、直接法線応力の変化がせん断応力に反映されるわけではないが、間接的に関連している。

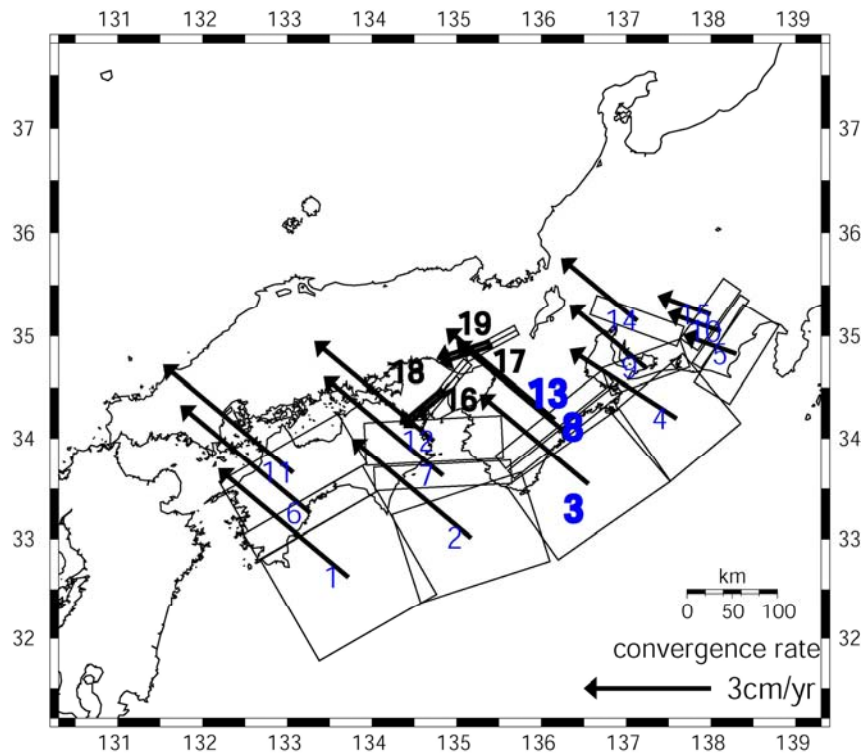


図1 セル配置と与えたプレート収束速度・ローディング速度

セル1-5、は固着域($a-b < 0$) (深さ 5-25km)、6-10は遷移域(深さ 25-30km)、11-15は安定すべり域($a-b > 0$) (深さ 30-40km)に対応する。また、内陸セル16,17は固着($a-b < 0$)し地震を発生する上部地殻、18,19は下部地殻の安定すべり域($a-b > 0$)を示す。

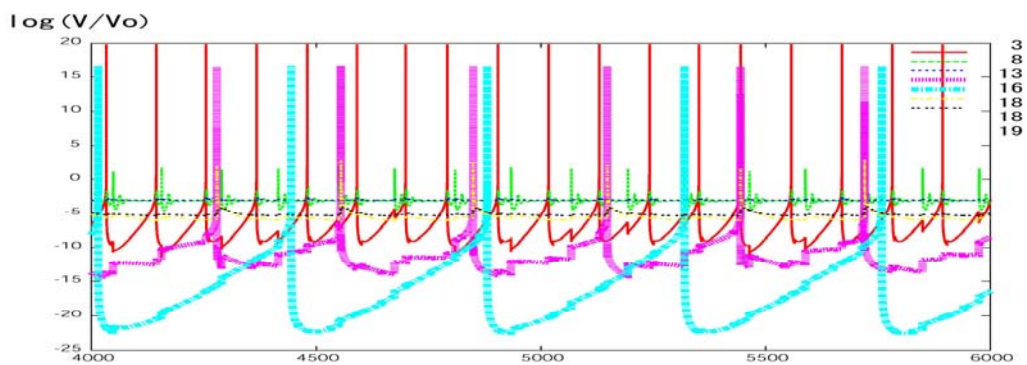


図2 各セルにおけるすべり速度の時間変化:セル3 (赤)、セル8 (黄緑)、セル13 (青)、セル16 (ピンク)、セル17 (水色)、セル18 (黄)、セル19 (黒)
時間単位は年。

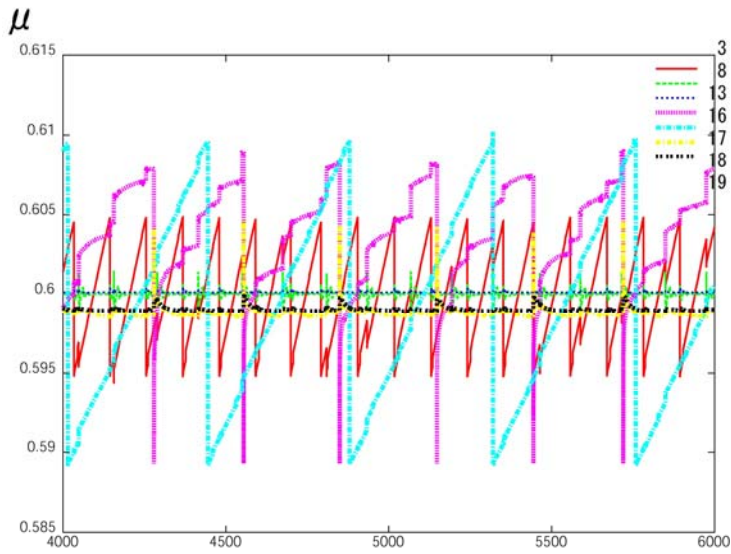


図3 各セルにおける摩擦係数の時間変化

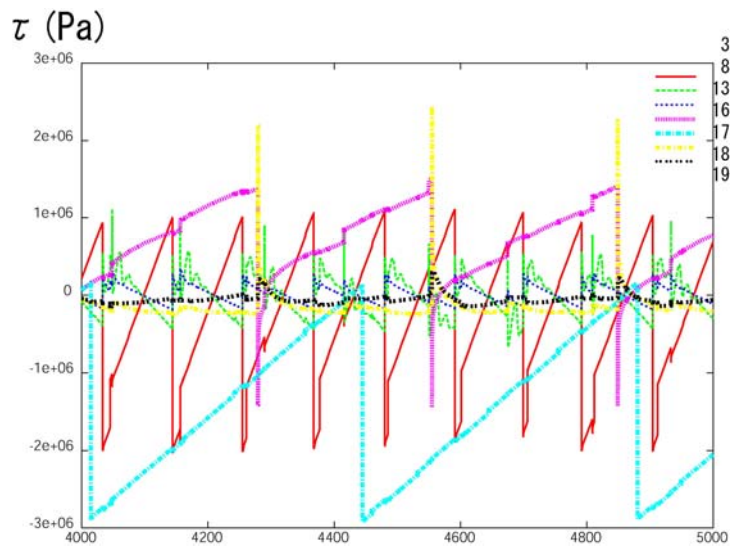


図4 各セルにおけるせん断応力の時間変化

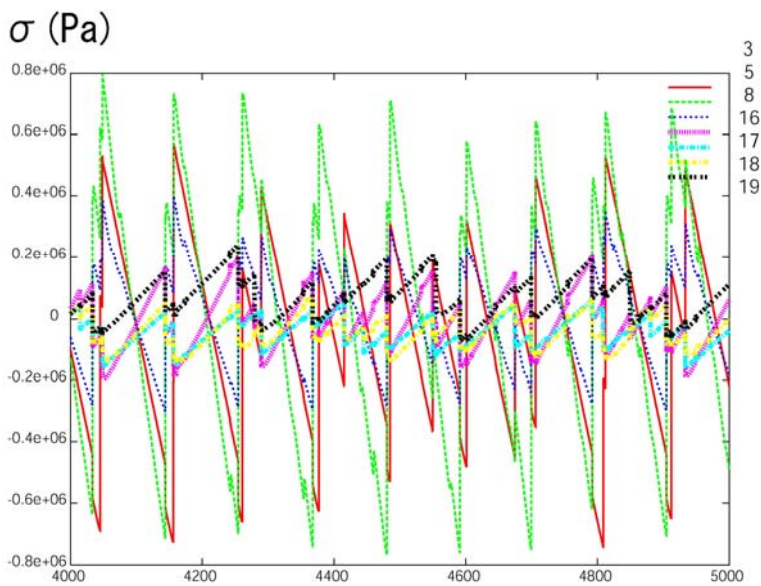


図5 各セルにおける法線応力の時間変化（圧縮を正に取っている）

(d) 結論ならびに今後の課題

すべり速度と状態依存の摩擦構成則に基づいて、単純セルモデルを用いて、南海トラフの巨大地震発生に2つの内陸断層を加えた地震発生サイクルシミュレーションを行った。まだ、内陸断層は試験的に導入した段階なので、断定的なことは言えないが、内陸活断層の配置でその発生の繰り返し間隔が色々変化する可能性が明らかになった。また、南海トラフ巨大地震との相互作用では、せん断方向の相互作用の少ない断層でも、法線応力の変化を考慮することにより、ある程度相互作用をする可能性が示された。現在では、弾性体における計算であるが、粘弾性媒質中でのすべり応答関数を計算し、粘弾性遅延も考慮に入れた地震サイクルシミュレーションを実行すれば、Hyodo and Hirahara (2004)¹⁰⁾の運動学的モデルで示されたように、1995年兵庫県南部地震が1944年東南海および1946年南海地震とフィリピン海プレートの沈み込みの両者の影響を受けて発生した可能性が高いことが、この地震発生サイクルシミュレーションで明らかにされると期待される。このように、粘弾性およびより現実的な活断層配置を考慮した、南海トラフ巨大地震と内陸地震の相互作用を表す、単純セルモデルを用いたシミュレーションシステムを構築する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Dieterich, J. H.: Modeling of rock friction, 1, Experimental results and constitutive equations, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, pp.2161-2168, 1979.
- 2) Ruina, A. L.: Slip instability and state variable friction laws, *Journal of Geophysical Research*, Vol.88, pp.10359-10370, 1983.
- 3) Hori, T., Kato, N., Hirahara, K., Baba, T., and Kaneda, Y.: A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai trough, southwest Japan: Lateral variation in frictional property due to the slab geometry controls the nucleation position, *Earth Planets Science Letter*, Vol.228, pp.215-226, 2004.
- 4) 堀高峰, 兵藤守, 平原和朗: 3次元不均質粘弾性媒質中の断層系における大規模サイクルシミュレーション実現に向けて, *物理探査*, Vol.57, pp.639-649, 2005.
- 5) Mitsui, N., and Hirahara, K.: Simple spring-mass model simulation cycle along the Nankai trough, southwest Japan, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.161, pp.2433-2450, 2004.
- 6) Mitsui, N., and Hirahara, K.: Slow slip events controlled by the slab dip and its lateral change along a trench, *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press, 2006.
- 7) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of Seismological Society of America.*, Vol.82, pp.1018-1040, 1992.
- 8) Heki, K. and Miyazaki, S.: Plate convergence and long-term crustal deformation in central Japan, *Geophysical Research Letter*, Vol.28, pp.2313-2316, 2001.
- 9) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P.: *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2nd ed. 1993.
- 10) Hyodo, M. and Hirahara, K.: GeoFEM kinematic earthquake cycle simulation in

southwest Japan, Pure Appl. Geophys., Vol.161, pp.2069-2090, 2004.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Mitsui, N., and Hirahara, K.	Slow slip events controlled by the slab dip and its lateral change along a trench	Earth Planet. Sci. Lett.	平成 18 年 掲載決定
光井能麻, 平原和朗	プレートの形状に支配されるス ロースリップイベント	地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会 S044-004	平成 17 年 5 月 23 日
平原和朗, 光井能麻	プレートの形状と境界面の摩擦 則に支配される南海トラフ地震 発生サイクル	日本地震学会予稿集、2005 年度秋季大会, C053	平成 17 年 10 月 20 日
光井能麻, 堀高峰,平 原和朗	三角要素モデルによるプレート 境界面の形状を考慮した地震発 生サイクルの検証	日本地震学会予稿集、2005 年度秋季大会 P120	平成 17 年 10 月 20 日

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし