

3. 3. 7. 2 歪蓄積過程についてのモデル研究

(1) 業務内容

(a) 業務題目：歪蓄積過程のモデル研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
名古屋大学大学院環境学研究科	教授	平原和朗	hirahara@eps.nagoya-u.ac.jp
	日本学術振興会特別研究員	伊藤武男	take@seis.nagoya-u.ac.jp
	大学院生	光井能麻	mitsui@eps.nagoya-u.ac.jp
京都大学防災研究所 地震予知研究センター	教授	橋本学	hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
	教授	川崎一朗	kawasaki@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
	助教授	飯尾能久	iio@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
金沢大学大学院自然科学研究科 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター	教授	古本宗充	furumoto@hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp
	博士研究員	工藤健	kudou.takeshi@jnc.go.jp
地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所	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カ年の年次実施計画

- 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
- 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）
- 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）
- 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）
- 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 15 年度業務目的

平成 15 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 15 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サイクルシミュレーション（定式化）

平原和朗（名古屋大学大学院環境学研究科）

hirahara@eps.nagoya-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

現在、地球シミュレータを用いた超並列大型計算により、南海トラフ沿いに発生する巨大地震の発生サイクルシミュレーションが行われようとしている。それは、南海トラフ沿いに 3 次元的に複雑な形状で沈み込むフィリピン海プレートを含む西南日本の 3 次元不均質粘弾性有限要素モデルを構築し、プレート境界に摩擦パラメータ分布を与え、すべり速度と状態に依存する摩擦則に従い、プレート運動により駆動されるプレート境界でのすべりの発展を追い、南海トラフ巨大地震サイクルのシミュレーションを行うものである。しかしながら、連続体モデルとして計算を行うにはプレート境界を 1km x 1km のセルに分割しての非線形計算で膨大な計算を必要とする。従って、過去の南海トラフ巨大地震サイクルを再現する摩擦パラメータをサーチするには、他の簡便な手法で効率的に摩擦パラメータを探索する必要がある。

本研究では、バネブロックモデルを用いた、Mitsui and Hirahara(2004)¹⁾の手法を発展させ、フィリピン海プレート境界を単純セルモデルに分割し、すべり速度と状態に依存する摩擦則に従う、南海トラフ巨大地震発生サイクルシミュレーション手法の定式化を試みた。また、内陸活断層にも同じセルモデルを用い、南海トラフ巨大地震と内陸地震の相互作用を扱える手法へと拡張した。内陸地震は東西圧縮応力場で発生しているが、他の研究課題（橋本・西村）で得られている GPS 観測から得られた、各活断層セルにおけるすべり速度を駆動力として内陸地震の発生サイクルシミュレーションを行う手法を提案した。この定式化は、Hashimoto(2001)²⁾による断層間力学相互作用を考慮した地震活動シミュレーションに摩擦構成則を導入したものと捉えることもできる。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ巨大地震と内陸地震の発生には関連がある（例えば、Hori and Oike, 1996, 1999）^{3,4)}。

Mitsui and Hirahara (2004)¹⁾ のバネブロックモデルによる南海トラフ巨大地震発生サイクルシミュレーションの手法を拡張して、プレート境界および内陸活断層におけるすべりの発展を単純セルモデルにより追跡し、プレート境界および内陸活断層における応力蓄積を見積もる手法を開発する。その際、プレート境界や内陸活断層での3次元セル位置を考慮して、弾性および粘弾性媒質中でのすべり応答関数を精度良く計算する。

(c) 業務の成果

以下に示すように、単純セルモデルによる南海トラフ巨大地震サイクルシミュレーションの定式化を行った。

海溝型—内陸地震を含む3次元セルモデルシミュレーション

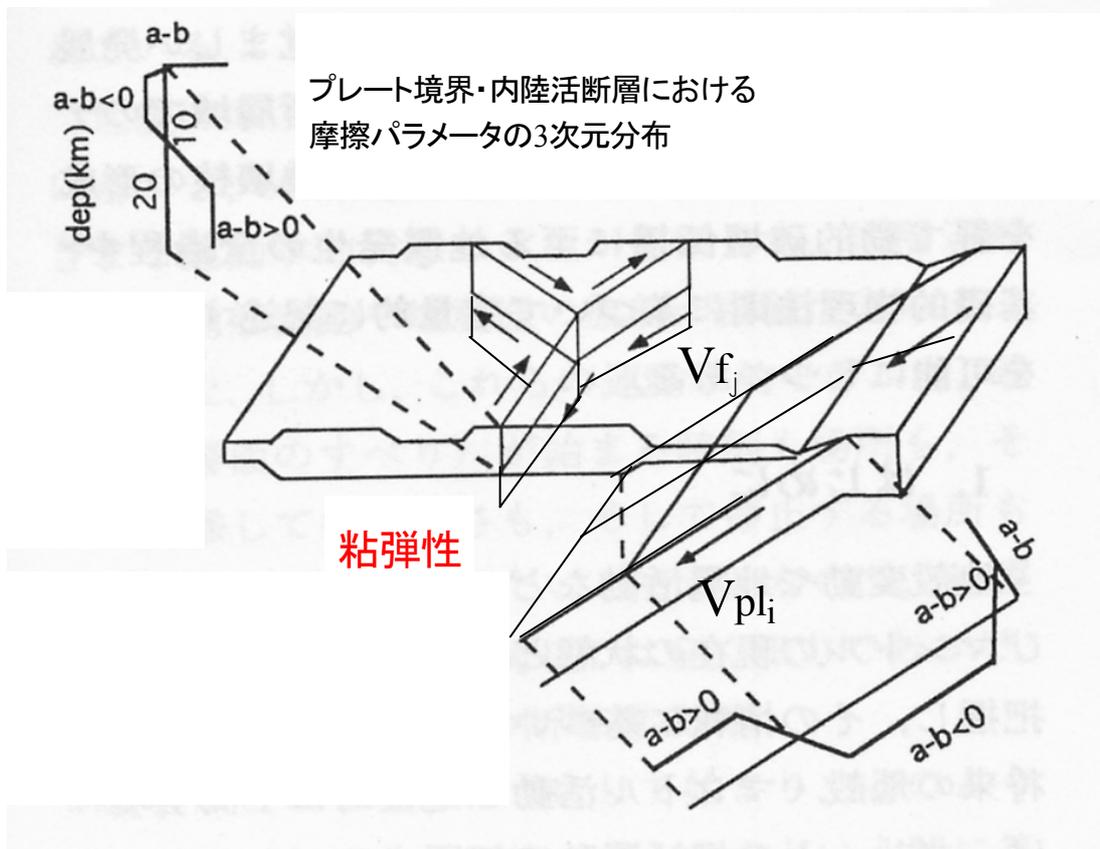


図1 プレート境界および内陸活断層のセル分割

図1にあるように、沈み込むフィリピン海プレートの境界および内陸活断層をある大きさのセルで近似する。プレート境界セル*i*におけるすべり速度を V_i 、プレート収束速度を V_{pl_i} 、内陸活断層セル*i*における定常すべり速度を V_{f_i} とすると、時刻 t における、セル*i*での剪断応力 τ_i は、準静的に

$$\tau_i(t) = \sum_j \int K_{ij}(t-t') (V_{pl_j} - V_j(t')) dt' + \sum_k \int K_{ik}(t-t') (V_{f_k} - V_k(t')) dt' + \eta V_i \quad (1)$$

と表せる。また、法線応力は σ_i は、

$$\sigma_i(t) = \sum_j \int K_{ij}(t-t') (V_{plj} - V_j(t')) dt' + \sum_k \int K_{ik}(t-t') (V_{fk} - V_k(t')) dt' \quad (2)$$

と表せる。ここで、 ηV_i は地震波放射を近似的に表す放射ダンピング項 (Rice, 1993) ⁵⁾である。

また、 K_{ij} および K_{ik} は、セル j に単位すべりを与えたときの、セル i における粘弾性剪断応力および法線応力の変化を表す。このすべり応答関数は、例えば西南日本の粘弾性 FEM モデルを構築し、GeoFEM (Iizuka et al., 2002) ⁶⁾を用いて計算される。この剪断応力 τ_i は以下の摩擦力とつりあう。

$$\tau_i(t) = \mu_i(t) \sigma_i(t) \quad (3)$$

ここで、摩擦係数は以下のすべり速度と状態に依存する摩擦則 (Ruina, 1983⁵⁾; Dieterich, 1979⁷⁾)、

$$\mu_i(t) = \mu_o + a_i \ln(V_i/V_o) + b_i \ln(\theta_i V_o/Dc_i) \quad (4)$$

に従うとする。ここで μ_o は定常速度 V_o における摩擦係数とする。また、 θ は状態変数と呼ばれる変数で、接触面の状態を表すと考えられ、以下の発展方程式 (Slowness law) に従うとする。

$$d\theta_i(t)/dt = 1 - \theta_i V_i/Dc_i \quad (5)$$

ここで、 a_i 、 b_i は摩擦係数の速度変化に対する直接的な効果を表す係数およびヒーリングに関する係数である。また、 Dc_i は特徴的距離と呼ばれる摩擦パラメータである。発展方程式には、slip law、composite law といった3種のものがあるが、とりあえず、(5)の slowness law を用いることとする。

プレート境界では、深さ 0-10km および 30km 以深では、 $a-b > 0$ の安定すべりセルとし、深さ 10-30km までのセルでは、 $a-b < 0$ の固着—すべりを起こす、すなわち震源域となりうるセルとする。また、内陸活断層では、深さ 0-15km または 20km を地震発生領域とし、この深さのセルでは、 $a-b < 0$ とする。それ以深では、深部定常すべりが発生しているとし、 $a-b > 0$ とする。プレート境界および内陸活断層におけるセル分割 (傾斜角を含むプレートおよび断層形状) は、例えば、他の研究課題 (橋本・西村) で用いられるものが考えられる。その際、各セルにおける V_{pl} と V_f の値は GPS 観測データから得られたものを用いることになる。

(d) 結論ならびに今後の課題

単純セルモデルを用いた、南海トラフ巨大地震および西南日本内陸活断層における地震発生サイクルシミュレーションの定式化を行い、計算コードの開発を行った。その際、すべり応答関数の評価が問題となった。まずは Okada(1992)⁸⁾の定式化により均質半無限媒質中でのすべり応答関数を計算して、プレート境界のみを用いての地震発生サイクルシミュレーションを行っているが、Mistui and Hirahara(2004)¹⁾の相互作用バネ定数に対応するすべり応答関数の大きさを得るには、セル内の単純な応力の平均を取るのではなく、近接したセル領域での応力に重みをつける必要があることが分かった。

今後は、内陸活断層を含め、他の課題研究の成果 (橋本・西村) を利用して、セルの設定および V_{pl} および V_f を各セルに設定し、弾性問題でシミュレーションを行う。最終的には、3次元粘弾性不均質・西南日本 FEM モデルを構築し、粘弾性すべり応答関数を GeoFEM を用いて計算し、弾性および粘弾性

遅れによる南海トラフ巨大地震と内陸地震の相互作用を考慮した地震発生サイクルシミュレーションを実行したい。前年度行ったように、南海トラフ巨大地震の1サイクルの中でどの内陸活断層において最も地震が発生し易くなるかは原理的には予測可能であり、困難といわれる内陸地震の発生時期についての予測を行うシステムを構築したい。

(d) 引用文献

- 1) Mitsui, N. and Hirahara, K.: 2004, Simple spring-mass model simulation of earthquake cycle along the Nankai trough in southwest Japan, Pure Appl. Geophys. (in press).
- 2) Hashimoto, M.: 2001, Complexity in the recurrence of large earthquakes in southwest Japan: A simulation with an interacting fault system model, Earth Planets Space, 52, 249-259.
- 3) Hori, T. and Oike, K.: 1996, A statistical model of temporal variation of seismicity in the Inner Zone of Southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai trough, J. Phys. Earth, 44, 349-356.
- 4) Hori, T. and Oike, K.: 1999, A physical mechanism for temporal variation in seismicity in the Inner Zone of Southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai trough, Tectonophysics, 308, 83-98.
- 5) Rice, J.R.: 1993, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, J. Geophys. Res., 98, 9885-9907.
- 6) Iizuka, M, Sekita, D., Suito, H., Hyodo, M., Hirahara, K., Place, D., Mora, P., Hazama, O. and Okuda, H.: 2002, Parallel simulation system for earthquake generation: fault analysis modules and parallel coupling analysis, Concurrency Computat: Pract. Exper., 14, 499-519.
- 7) Dieterich, J.H.: 1979, Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations, J. Geophys. Res., 84, 2161-2168.
- 8) Okada, Y.: 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
Hyodo, M. and Hirahara, K.	A viscoelastic model of interseismic strain accumulation in Niigata-Kobe Tectonic Zone of central Japan	Earth Planets Space, 55, 667-675	2003年11 月

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし	なし		

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

(2-2) 粘弾性媒質を仮定した西日本の測地データのインバージョンによるプレート境界におけるすべり／すべり欠損の時間変化の推定

伊藤武男 (名古屋大学大学院環境学研究科)

take@seis.nagoya-u.ac.jp

橋本学 (京都大学防災研究所)

hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

100年間の三角・三辺測量や水準測量および潮位データを用いて、南海トラフ沿いのプレート境界面上のすべりおよびすべり欠損を粘弾性媒質の仮定のもとで推定し、南海地震後20年を越える深部余効すべりの継続、プレート境界面浅部における固着の早い回復、地震後20年以降の定常的なすべり欠損の蓄積等を明らかにした。また、南海地震後に蓄積しつつあるすべり欠損を見積もり、50年後の現在では四国沖で約3.3m、紀伊半島沖で約2mのすべり欠損が蓄積していることを示した。

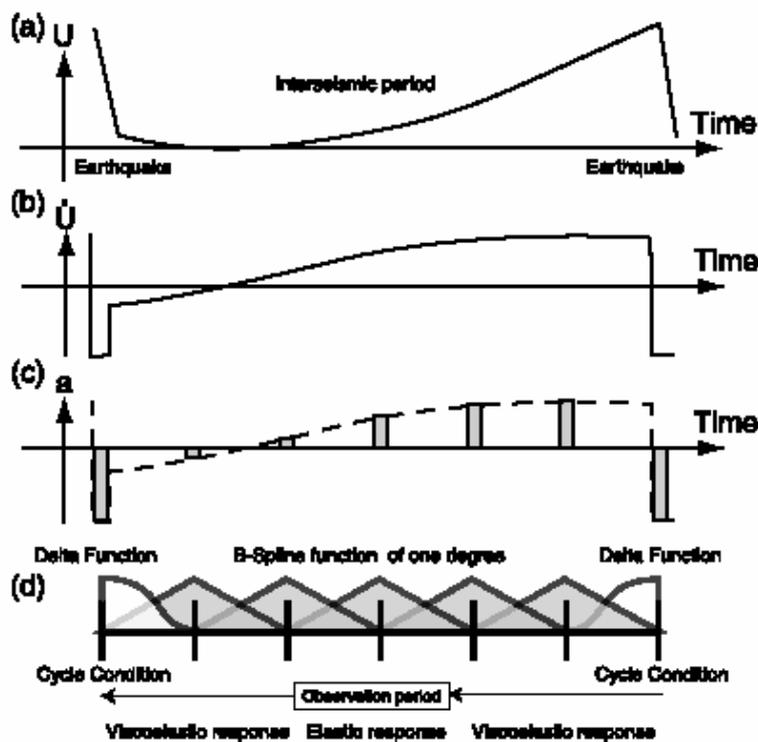


図1. すべりの時間関数の離散化の模式図。(a)推定したいすべり蓄積量の時間変化、および、(b)その変化率。(b)の変化率を、地震時についてはデルタ関数、それ以外の時点についてはB-スプライン関数で近似する。(c)の縦棒が近似関数の評価する時点、(d)は近似関数の形状を示す。

(b) 業務の実施方法

媒質の粘弾性を考慮したインバージョンは、次の定式化に基づく。すなわち、地表のある点 \vec{x} における時刻 t の観測変位を $W_i(\vec{x}, t)$ とすると、

$$W_i(\vec{x}, t) = \sum_{j=1}^2 \iint_{-\infty\Sigma} G_{i,j}^V(\vec{x}, t; \vec{\xi}, \tau) \dot{u}_j(\vec{\xi}, \tau) d\vec{\xi} d\tau = \sum_{j=1}^2 \iint_{-\infty\Sigma} G_{i,j}^V(\vec{x}, t - \tau; \vec{\xi}, 0) \dot{u}_j(\vec{\xi}, \tau) d\vec{\xi} d\tau$$

で表される。ここで、 $G_{i,j}^V(\vec{x}, t; \vec{\xi}, \tau)$ は Matsu'ura et al.(1981)¹⁾と Iwasaki et al.(1982)²⁾による粘弾性層を含む成層構造の Green 関数である。また、 $u_j(\vec{\xi}, \tau)$ は断層面上のすべりである。この式は、粘弾性媒質の“記憶”効果により、 $-\infty$ から時刻 t までのすべてのレスポンスを積分した結果として変位が得られることを示す。実際のインバージョンでは、Yabuki and Matsu'ura(1992)³⁾と同様に、断層面上のすべりを双三次 B-スプライン関数により離散化した。すべりの時間変化の近似としては、一次の B-スプライン関数を用いた。ただし、地震時の変動が大きく、この関数を用いると地震後のすべりに大きな影響を残す。そこで、地震時のすべりの時間関数としてはデルタ関数を用いて、それ以外の時期については離散 B-スプラインを用いて、これらの振幅をパラメータとして推定することとした(図 1)。しかし、過去の地震発生の歴史が十分わかっていない上に、測地データがそもそも存在しないことから、無限の時間を積分することは不可能である。そこで、同様な地殻変動と地震が繰り返すとする仮定を導入して、測地データを地震サイクル内に満遍なく存在するようにモデル化した。すなわち、地震の再来時間を 92 年として、1946 年の地震発生から 92 年後の次の地震までの間の地殻変動をモデル化することを考える。そして、1946 年以前の測地データは、次の地震の前のデータとして扱う。すなわち、1920 年のデータは、1946 年の地震発生から 66 年後の 2012 年の観測値として計算にするのである。後述のように、今回考慮した粘性率では、システムとしての緩和時間が 50 年程度となるので、過去の地震の影響はほとんどないものと考えられる。

これらの観測方程式に加えて、時空間的なすべり分布が滑らかであること、すべり方向がプレート相対運動と大きく異ならないこと、解像度の劣る沖合いの断層面上のすべりを津波のインバージョン結果(ここでは、Tanioka and Satake(2001)⁴⁾を使用)に整合させること、などの先験的情報を加味した Bayes 型インバージョンにより推定した。

地殻を弾性層、マントルを粘弾性層とする、2層あるいは3層の成層構造モデルを仮定した。3層モデルでは、マントル下層も弾性体とした。地殻の厚さは 35km、3層モデルの場合のマントル上層は 90km とした。マントルの粘性率は 5×10^{18} Pas としたが、これにより系としての緩和時間が 50 年程度になる。すべり/すべり欠損を評価する断層として、図 2 に示す中村・他(1997)⁵⁾によるプレート境界面をモデル化した。空間的には深さ方向 230km × トラフの走向方向 500km の領域を 6×12 の領域に分割し、ここに 9×15 の双二次 B-スプライン関数を分布させた。時間的には 4 年ごとに 21 の 1 次 B-スプライン関数を仮定した。結果として、推定するモデル・パラメータは、 (6×12) (空間のスプライン関数の係数) × $(21+1)$ (時間のスプライン関数の係数+地震時のデルタ関数の係数) × 2 (すべり 2 成分) = 3168 となる。

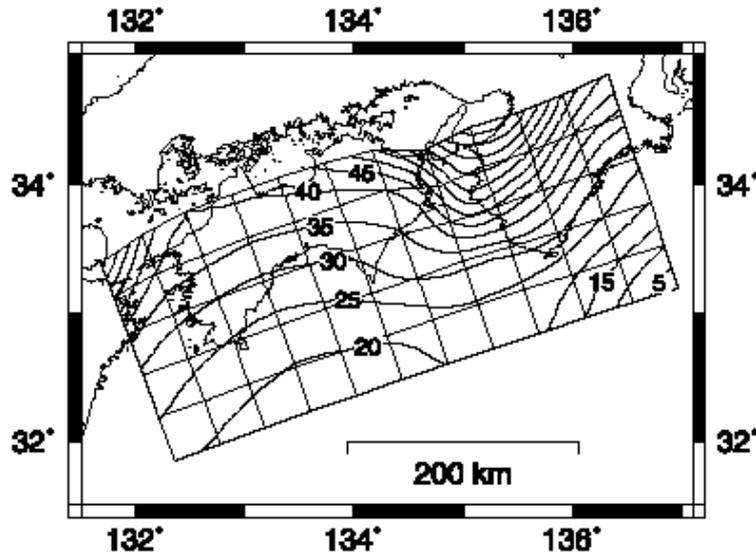


図2. モデル化したフィリピン海プレート上面。コンターは、中村・他(1997)⁹⁾を使用。

観測データは、明治以降の西日本の三角・三辺測量、水準測量・検潮およびGPS連続観測のデータを用いた(図3)。地震の20~30年前の期間を除いて、ほぼ均一に分布している。水準測量については、点間距離が約3km間隔になるようにサンプリングした。三角/三辺測量データは、橋本(1990)⁶⁾および石川・橋本(1999)⁷⁾の平均座標から一等三角点間の距離を計算し、その変化を用いた。潮位データとしては、紀伊半島と四国周辺の18の検潮所の年平均潮位を用いた。GPS連続観測データについては、Miyazaki and Heki(2001)の結果を用いて、アムール・プレート準拠の座標に変換し、さらにこれに線形項と年周変化のフィッティングを行い、平均的な速度を推定した。この速度を用いて、1996年4月から2001年12月までの変位を求め、これをデータとした。上下成分については、さらに中国地方日本海沿岸の26点の観測点の変動が、ほぼ0になるように補正したもの(-0.347cm/年)を使用した。データ数は、水準測量が2177、三角/三辺測量が544、潮位が845、およびGPSが429である。なお、潮位については、使用した18の検潮所のデータに含まれる海域に共通な成分も同時に推定した。海域を3つに分け、それぞれの海域の最長の観測期間の年数分のパラメータが、167となる。したがって、最終的に3995のデータから、3335のパラメータを推定することとなる。

(c) 業務の成果

媒質の粘弾性を考慮した測地データのインバージョンにより、西南日本に沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレート境界面上のすべりあるいはすべり欠損を推定した。図4に3層モデルにより推定されたすべり/すべり欠損速度の時間変化を示す。地震から10~20年間は、四国直下に海に向かうすべりが推定されており、地震断層深部での余効すべりが20年程度継続することを示している。一方、断層浅部では10年後にはすでに最大80mm/yrほどのすべり欠損速度が認められ、カップリングが回復していると考えられる。以後は、室戸沖で最大65mm/yrのほぼ同様なすべり欠損速度の分布が見られ、定常的に歪蓄積が継続していることを示している。

この計算結果では、30km以浅のプレート境界面上に固着域が認められる。これより深いところでは、ほとんど固着がないと推定される。

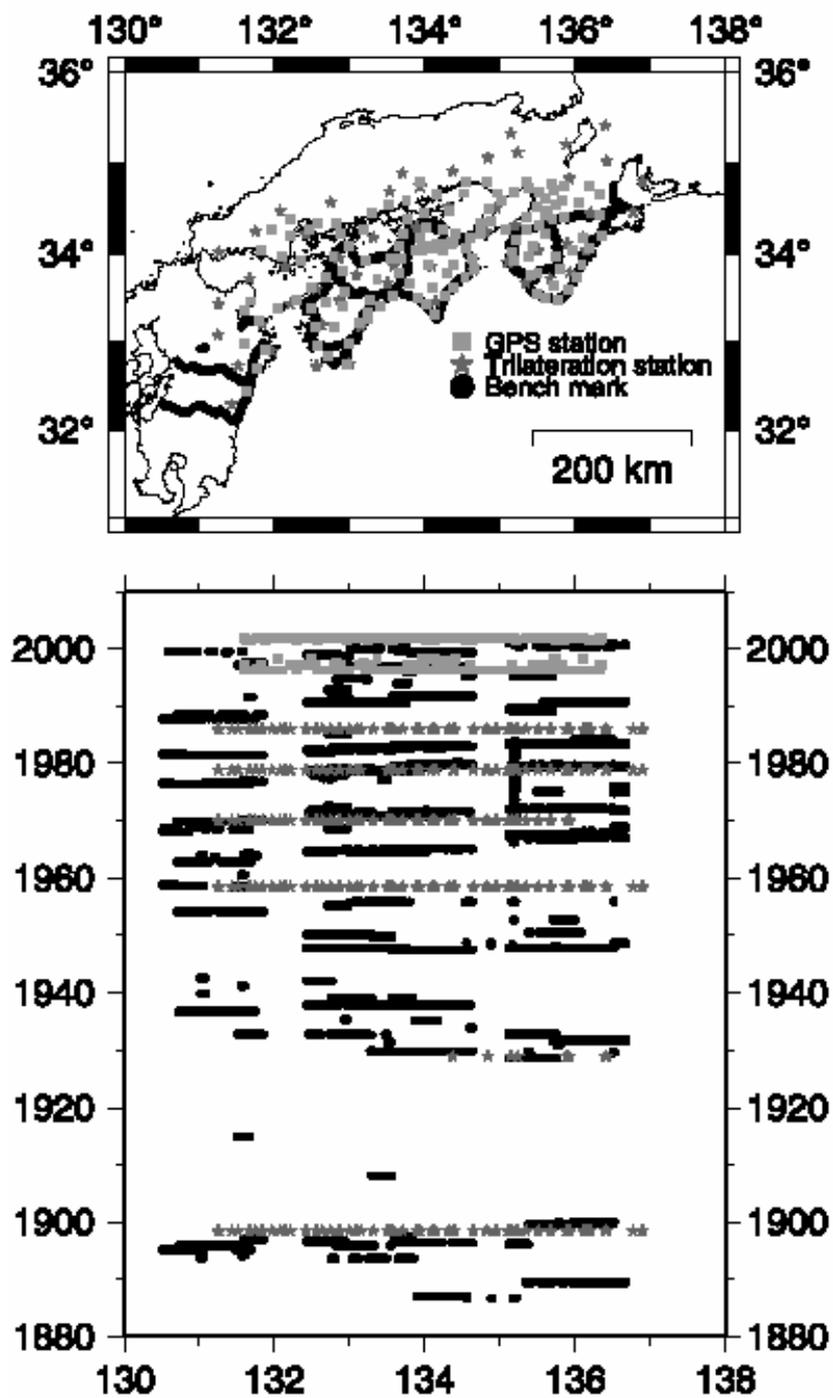


図3. (上) 観測地点の分布。(下) 観測データの取得時期。縦軸は年(西暦)、横軸は経度を示す。
 ●は水準測量、★は三角/三辺測量、■はGPS連続観測を示す。

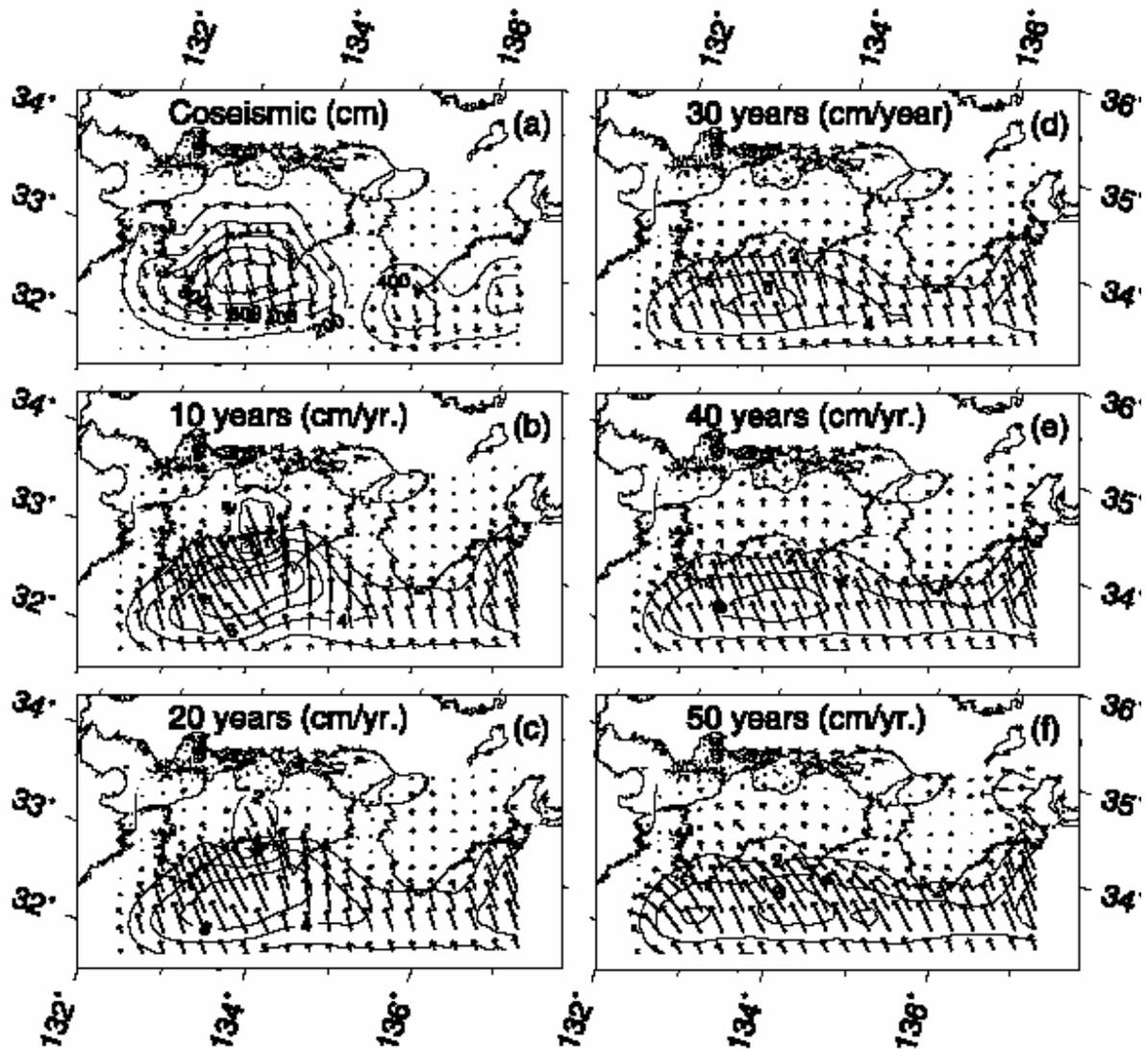


図 4. 媒質の粘弾性を仮定した測地データのインバージョンにより得られたフィリピン海プレートと陸側プレート境界面上のすべり/すべり欠損の時間変化

図 5 は、水準測量により得られた上下変動の観測値と観測値と計算値の差を示す。地震前と地震間の紀伊半島と四国の南端での沈降、これらの地域での地震時の隆起、地震後の四国などで見られる隆起、などの変動が良く再現されている。

図 6 は、南海地震後 50 年経過した時点での、蓄積したすべり欠損の総量である。四国沖で最大 3.3m、紀伊半島沖でも 2m に達している。

(d) 結論ならびに今後の課題

100 年間の三角・三辺測量や水準測量および潮位データを用いて、南海トラフ沿いのプレート境界面上のすべりおよびすべり欠損を粘弾性媒質の仮定のもとで推定し、南海地震後 20 年を越える深部余効すべりの継続、プレート境界面浅部における固着の早い回復、地震後 20 年以降の定常的なすべり欠損の蓄積等を明らかにした。また、南海地震後に蓄積しつつあるすべり欠損を見積もり、50 年後の現在では四国沖で約 3.3m、紀伊半島沖で約 2m のすべり欠損が蓄積していることを示した。

今回の計算は、成層構造モデルを仮定しており、沈み込んだフィリピン海スラブなどの傾斜した不均

質構造を考慮していない。平成 14 年度に作成した有限要素法による三次元構造モデルなどのモデルを用いて、不均質構造による影響を評価することが課題である。そのほか、地震サイクルを 92 年と仮定したことや、東海地方につながる東側の境界付近に見かけ上大きなすべりが生じることなど、時空間における境界条件の与え方、領域の取り方等検討すべき課題も残されている。

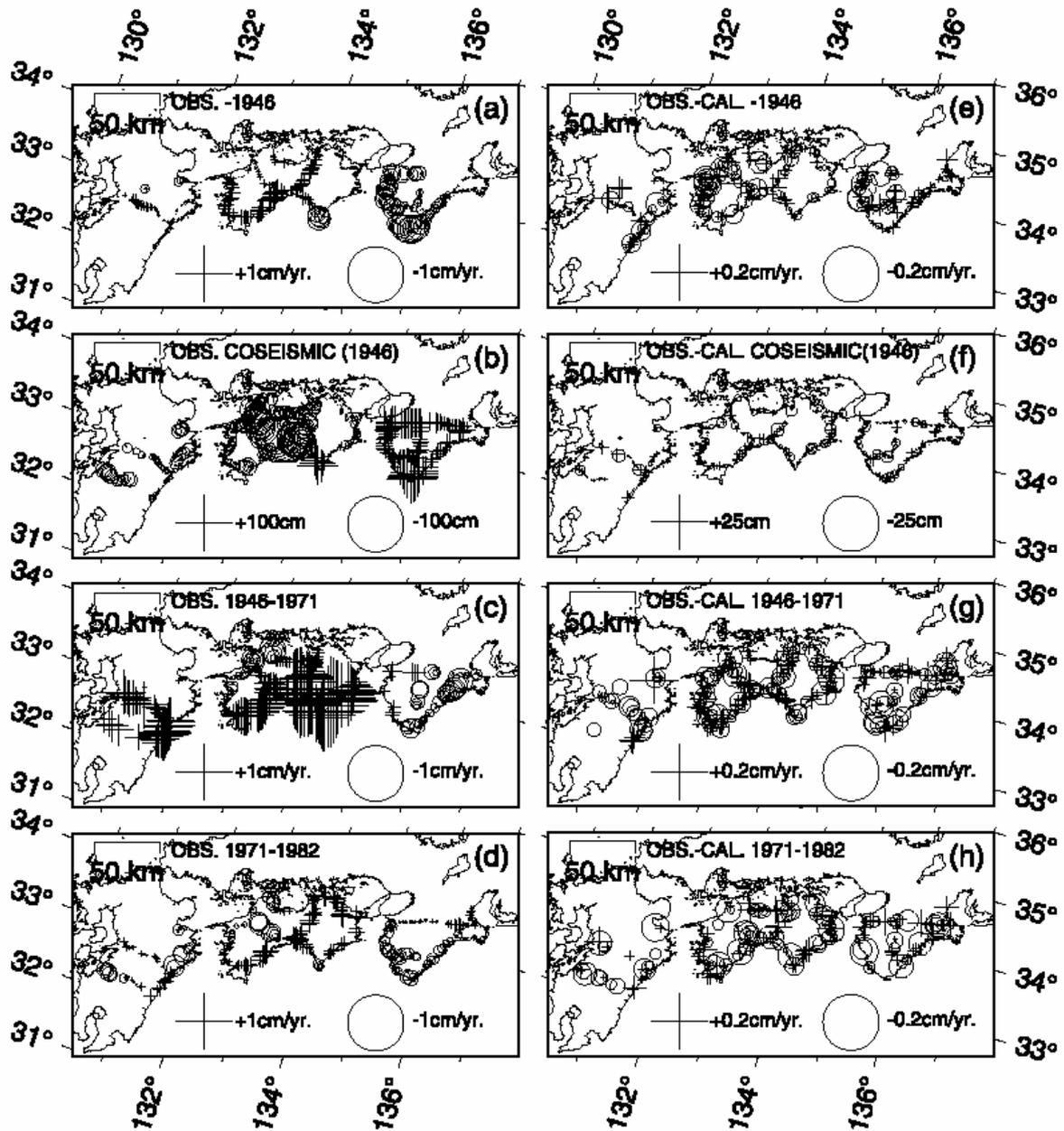


図 5. 水準測量による上下変動。(左) 観測値、(右) 観測値とモデルによる計算値の差。上から、地震前、地震時、地震後、および地震間の変動。

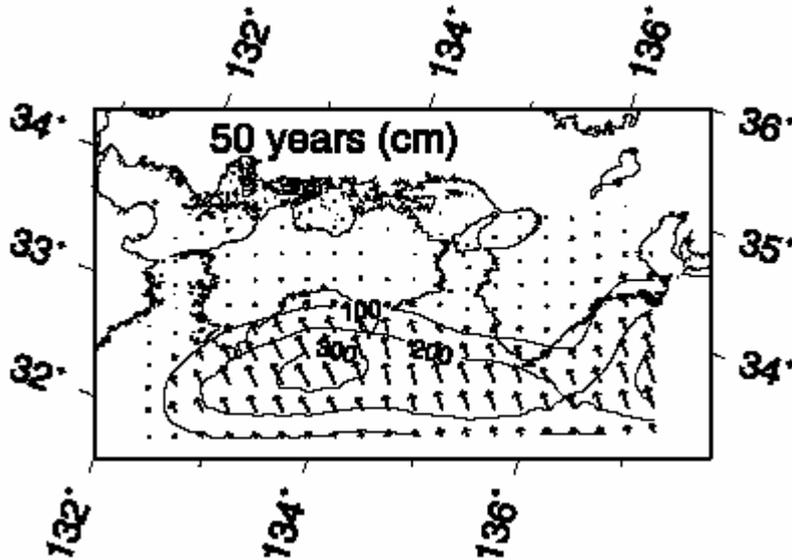


図 6. 南海地震後 50 年間に蓄積したすべり欠損量の見積もり

(e) 引用文献

- 1) Matsu'ura, M., Tanimoto, T., and Iwasaki, T. : Quasi-static displacements due to faulting in layered half-space with an intervenient viscoelastic layer, *J. Phys. Earth*, 29, 23-54, 1981.
- 2) Iwasaki, T., and Matsu'ura, M.: Quasi-static crustal deformations due to a surface load: Rheological structure of the Earth's crust and upper mantle, *Geophys. J. Int.*, 30, 469-508, 1982.
- 3) Yabuki, T., and Matsu'ura, M.: Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spacial distribution of fault slip, *Geophys. J. Int.*, 109, 363-375, 1992.
- 4) Tanioka, Y., and Satake, K.: Coseismic slip distribution of the 1946 Nankai earthquake and aseismic slips caused by the earthquake, *Earth Planets Space*, 53, 235-241, 2001.
- 5) 中村正夫, 渡部晃, 許斐直, 木村昌三 : 三浦勝美, 西南日本外帯における地殻下地震の活動特性, 京都大学防災研究所年報, 第 40 号, B-1, 1997.
- 6) 橋本学 : 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I) : 本州・四国・九州, *地震*, 43, 13-26, 1990.
- 7) 石川典彦, 橋本学 : 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度 (II), *地震*, 52, 299-315, 1999.
- 8) Miyazaki, S., and Heki, K.: Crustal velocity field of southwest Japan: subduction and arc-arc collision, *J. Geophys. Res.*, 106, 4305-4326, 2001.

(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
Ito, T. and Hashimoto, M.	Spatiotemporal distribution of interplate coupling in southwest Japan from inversion of geodetic data	<i>Journal of Geophysical Research</i> , Vol.109, B02315, doi:10.1029/2002JB002358	平成 16 年 2 月 10 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

(2-3) プレスリップのモデル化：兵庫県南部地震の発生に関する考察

飯尾能久（京都大学防災研究所）

iio@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

兵庫県南部地震は、1596年慶長伏見地震のすべり残しがすべった地震である可能性がある。1596年慶長伏見地震ですべり残りが出た理由は、前回の地震から600年程度しか経っておらず、断層面上の応力が十分に蓄積されていないときに、四国の中央構造線の巨大地震により、横から無理やり最活動させられたためである可能性が考えられる。

(b) 業務の実施方法

はじめに

兵庫県南部地震がなぜ起こったかという問題に答えることは、地震調査研究の重要な課題の一つであると考えられるが、現在のところ、我々はまだ、この問題に明快な答えを返すことはできない。それは、そもそも、日本列島の内陸に発生する地震の発生の仕組みが、十分に解明されていないためである(例えば、飯尾・小林,2003¹⁾)。

近年、内陸の活断層の下部地殻内の延長部におけるゆっくりすべりが、内陸地震の発生過程を規定する重要なプロセスであることが指摘されている(例えば、飯尾・小林, 1997²⁾)。この考えは、地殻内の不均質構造における非弾性変形により活断層に応力蓄積が行われるという、より一般的な考えを具体化した一つの有力なモデルである。兵庫県南部地震についても、有馬・高槻・六甲断層系の北側の下部地殻内に存在するデタッチメント断層による応力集中が地震を引き起こした可能性が指摘されている(飯尾,1996³⁾)。

上記の飯尾・小林によるモデルは、不均質構造として、下部地殻内に存在する局所化した変形ゾーンを採用している。異なった不均質構造を仮定することにより、別のモデルもあり得る。上部地殻内の不均質構造による非弾性変形がもう一つの有力なモデルであり、周囲の地震発生による応力集中もこの範疇に分類される。以下においては、兵庫県南部地震の発生過程におけるこの可能性を検討する。

これまでの研究

大地震の発生による周辺における応力変化は、クーロン破壊応力の変化(以下 ΔCFS と呼ぶ)で表現されることが多い(例えば、橋本,1997⁴⁾)。 ΔCFS は、

$$\Delta CFS = \tau - \mu \sigma_n$$

で表される。ここで、 τ と σ_n は、地震発生によるせん断応力と法線応力の変化分である。 μ は摩擦係数であり、0.2-0.4 程度の値が取られることが多い。 ΔCFS が脚光を浴びたのは、1992年に南カリフォルニアで発生したランダース地震 (M7.3) の後で、 ΔCFS の増加した領域に、(広義の) 最大余震であるビッグベア地震 (M6.4) を初め余震のほとんどが起こったことによる (Stein et al., 1992⁵⁾; Harris & Simpson, 1992⁶⁾など)。その後、長期的な大地震の続発性についても ΔCFS によって説明されている。

解析方法

兵庫県南部地震に関して、それ以前にその断層の延長部において発生した大地震による応力集中の効果を、 ΔCFS により表してみた。

兵庫県南部地震の発生に関する最大の問題の一つは、同じ地域で発生したと考えられる一つ前の大地震、1596年慶長伏見地震後約400年という短い間隔で発生したことである。日本の内陸に発生する大地震の再来間隔は、一般的には千年以上であり(活断層研究会, 1991⁷⁾)、約400年という間隔は異常に短い。この事実をどのように説明するかが、問題を解く鍵であると考えられる。

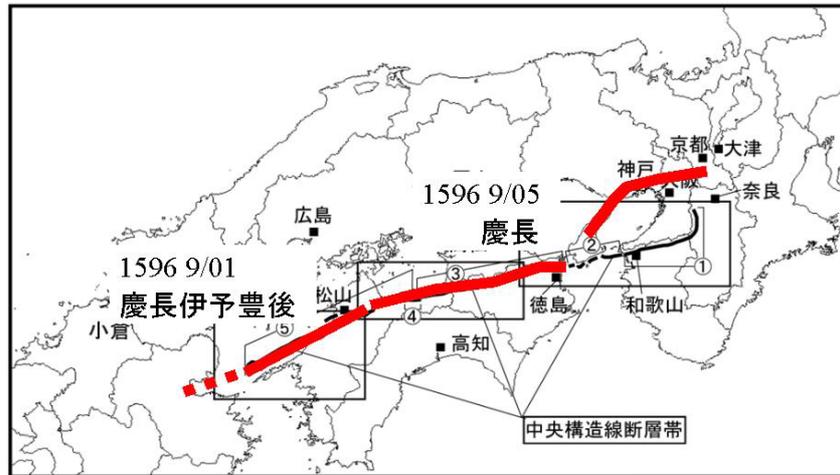
(c) 業務の成果

解析結果と考察

1596年慶長伏見地震は、伏見城の石垣がくずれたことで有名であるが、最近、四国の中央構造線においても、3-7m という大きな地表変位があったことが明らかになってきた(後藤・他,2001⁸⁾)。これは、日本の内陸に起こる地震のすべり量としては最大級であり。それによる周辺への応力集中も大きいことが容易に想像される。さらに、図1に示すように、その地震の4日前に、別府湾から四国西部にかけて別の大地震が発生したことも分かってきた(千田・他,2003⁹⁾)。よって、1596年には、おそらく、別府湾から四国西部で始まった一連の地震により、四国の中央構造線、淡路-六甲の断層系、有馬高槻断層帯と、四国部から近畿地方までの長大な地域において、断層すべりが発生したと推定される。

地震調査研究推進本部の活断層調査により上記の断層の活動履歴も明らかになりつつある。注目すべきことは、有馬高槻断層帯の一つ前の活動が、およそ千年前(約700-1300年前)と認められていることである(地震調査委員会、2000¹⁰⁾)。したがって、慶長伏見地震までの活動間隔は、およそ600年(約300-900年)と、兵庫県南部地震と1596年慶長伏見地震の間隔と同様に大変短い。一方、中央構造線については、1000-2000年程度の活動間隔であることが報告されている(地震調査委員会, 2003¹¹⁾)。

図2に、両者の活動の履歴を示す。四国の中央構造線は、全体が一度にすべる(一括放出型)と仮定すると、図2のデータから、ほぼ1000年に一度全体が動いていると解釈される。約3000年前の活動では、四国の中央構造線と有馬高槻断層帯が同時期に動いている。一方、約2000年前の活動では、四国と紀伊半島の中央構造線が同時期に動いているように見える。有馬高槻断層帯の次の活動は、上記の今から約千年前のイベントであるが、それに対応する四国の中央構造線の活動は無い。四国西部で同定されているイベントは、上記の仮定の下では、四国東部と一緒に、およそ2000年前に動いていると見なされるからである。約600年後の1596年に、四国の中央構造線は再び活動するが、その時、有馬高槻断層



(長方形は図2-1~図2-3の範囲)

- ①: 金剛山地東縁-和泉山脈南縁
- ②: 紀淡海峡-鳴門海峡
- ③: 讃岐山脈南縁-石鎚山脈北縁東部
- ④: 石鎚山脈北縁
- ⑤: 石鎚山脈北縁西部-伊予灘

図1 四国の中央構造線(MTL), 淡路-六甲(Rokko)の断層系, 有馬高槻断層帯(ATL)の位置. 地震調査委員会(2003)¹¹⁾による図に加筆.

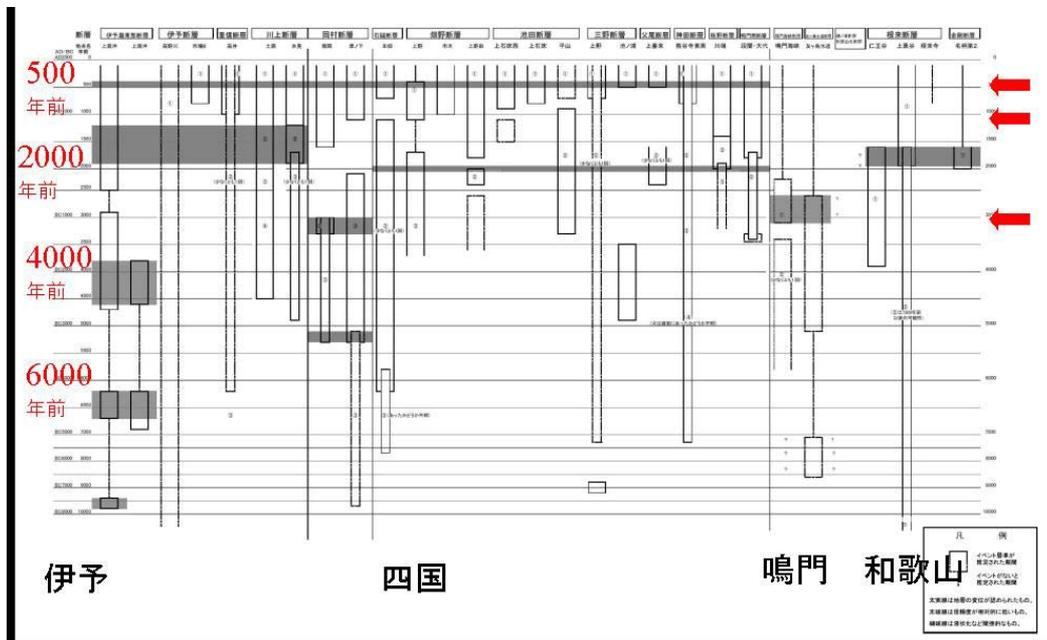


図2 四国の中央構造線および有馬高槻断層帯の活動履歴. 地震調査委員会(2003)¹¹⁾による図に加筆. 矢印で有馬高槻断層帯における活動を示す.

帯は再び動いたのである。

これらの活動は、以下のように解釈可能である。四国の中央構造線は、約千年に一度ずつ活動する。その東側では、活断層はいくつかに別れており、一つは、淡路島を縦断して有馬高槻断層帯へと延びる。もう一つは、淡路島を横断して紀伊半島の中央構造線へと延びる。四国の中央構造線が約千年に一度活動するのに対して、これらの断層は、それ上の応力状態に応じて、より長い再来間隔で活動する。近畿地方では、変形はいくつかの断層帯に分割して受け持たれている訳である。

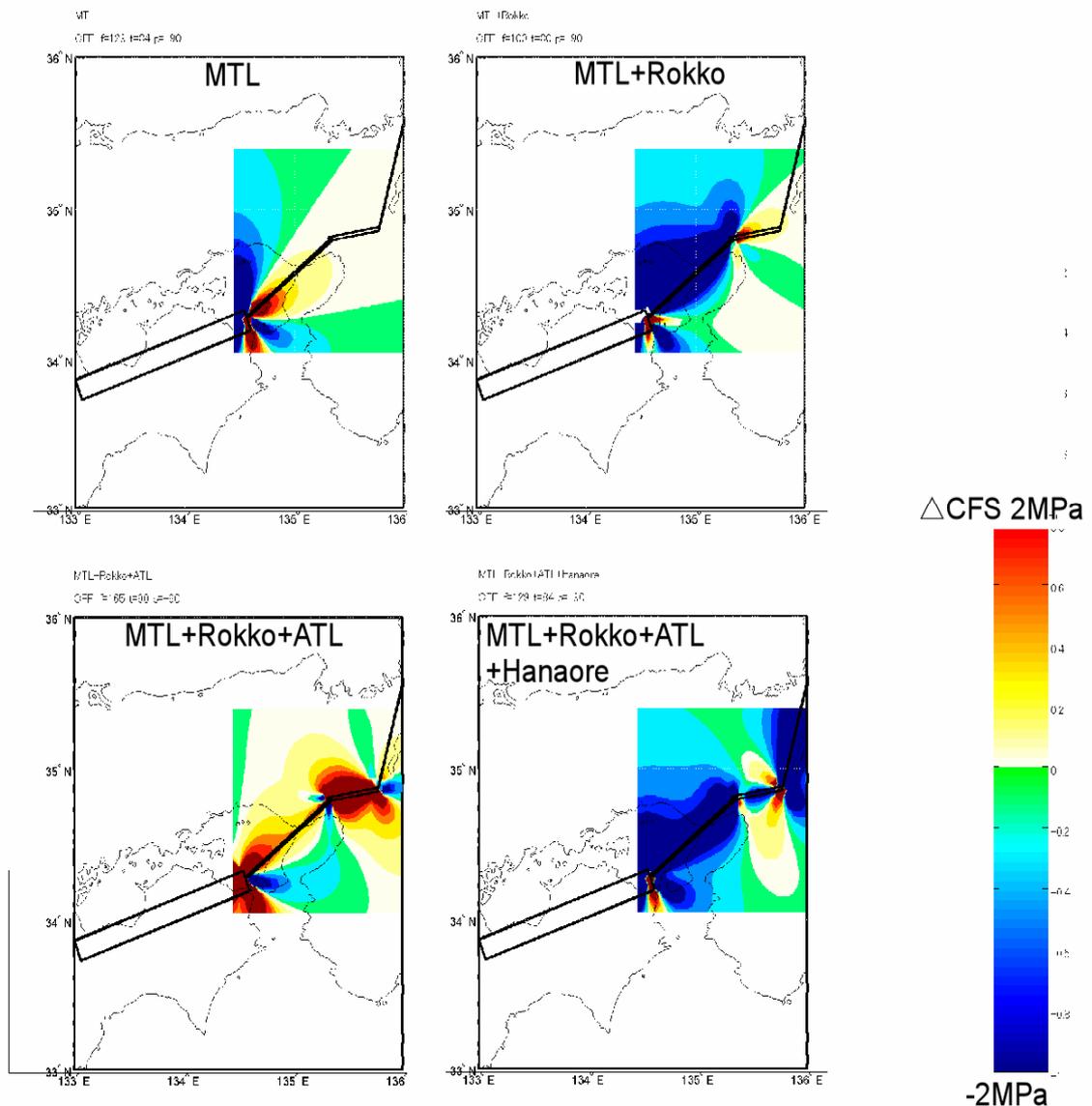


図3 四国の中央構造線(MTL)，淡路-六甲(Rokko)の断層系，有馬高槻断層帯(ATL)，花折断層(Hanaore)の地震すべりによる Δ CFS（白地で囲まれた色の濃い部分が増加域）。

ところで、四国の中央構造線の最新の活動は、通常なら約1000年前に起こるはずが、どういう訳か、およそ600年ほど遅延してしまった。有馬高槻断層帯は、四国の中央構造線の活動を待ちきれずに、通常通り、約2000年の間隔ですべてしまった。それから約600年後に四国の中央構造線がようやくすべったとき、有馬高槻断層帯は、十分に応力蓄積していないにもかかわらず、無理やり動かされてしま

った。

この解釈を ΔCFS を用いて、定量的に検討してみた。図3に、四国の中央構造線(MTL)、淡路-六甲(Rokko)の断層系、有馬高槻断層帯(ATL)のすべりによる ΔCFS の分布を示した。□は0.4とした。 ΔCFS の値は、次にすべる断層の geometry について計算されている。最後の図には、花折断層のすべりも加えている。それぞれの断層のパラメーターは表に示した。四国の中央構造線のすべり量は、前の地震からの間隔が約1500年程度と通常より長かったことと、3-9m/千年という平均変位速度(地震調査委員会、2003)を考慮して、10mとした。他の断層はすべて3mとした。

引き続き活動することになる断層で、 ΔCFS の値が大きく、1-2MPaにも達することが分かる。内陸地震の応力降下量の平均値が3MPa程度である(Kanamori & Andetson,1975)¹²⁾ことを考慮すると、これらの一連の活動において、隣接する断層のすべりによる応力集中は、平均的な再来間隔で蓄積される応力の1/3から半分程度にも達する。有馬高槻断層帯の最新の活動である1596年慶長伏見地震地震が、約600年程度の短い間隔で発生したことを定量的にも説明可能である。

表1. 断層パラメータ (緯度・経度は上端の値)。

	緯度	経度	長さ(km)	幅(km)	すべり量 (m)	Azimuth	Dip	すべり方 向
MTL	34.2	134.6	300	22.1	10	250	45	180
Rokko	34.8	135.35	90	15	3	231	84	180
ATL	34.86	135.77	42.5	15	3	260	80	180
Hanaore	34.86	135.77	80	15	3	15	90	180

1662年に琵琶湖西岸から花折断層北部(Hanaore)で大地震が発生した。簡単のために、この地震は、花折断層だけの活動であると仮定して、その前後の ΔCFS の値も計算してみた。花折断層上の地震前の値は、他の地震のケースに比べて明らかに小さく、これが、1596年に、有馬高槻断層帯に続いて花折断層ですべりが生じなかった理由であると考えられる。花折断層の地震後の ΔCFS は、六甲断層系の geometry で計算されているが、断層の継ぎ目を除いて、全域で小さな値となっている。

さて、本題の兵庫県南部地震の発生について、以下に考察する。上記のように、1596年に四国の中央構造線が動いたときに、有馬高槻断層帯は、十分に応力蓄積していないにもかかわらず、無理やり動かされてしまったと述べたが、六甲断層系についても、事情は同じであると考えられる。その場合、応力集中の原因は、隣接領域の上部地殻内の断層運動であるから、「横」からの応力集中が生じた訳である。

ところで、断層の破壊強度は法線応力に依存すると考えられるので、深部ほど強度が大きい。「横」から加わった応力集中は、深さに依存しないほぼ一定の応力であるため、強度の弱い浅い部分ほどすべりが生じやすいと考えられる。1992年のランダース地震でも、断層の南側の延長部で発生した前震のため、本震の震源(破壊開始点)は、断層最深部ではなく、浅い部分であった。

六甲断層系についても、深部は強度が大きかったため、1596年の慶長伏見地震の際に十分にすべっていない可能性が考えられる。実際に、兵庫県南部地震のすべりの大きかった領域は、震源の決まった明石海峡から神戸へかけての断層の最深部と野島断層である。この領域は、1596年の地震ですべり残され、その地震時の周辺のすべりによる応力集中とその後の定常的な応力蓄積により、約400年という短い間

隔で破壊強度に達してすべった可能性が考えられる。野島断層に関しては、その南側の延長が、四国の中央構造線とどのような位置関係にあるかが重要である。もし、四国の中央構造線と淡路島の断層系が出会う地域において、淡路島の東岸の断層系の方が、四国の中央構造線の地震による応力集中を大きく受ける構造であるならば、四国の中央構造線の活動に続くのは、東岸の断層系ということになる。

(d) 結論ならびに今後の課題

兵庫県南部地震は、1596年慶長伏見地震のすべり残しがすべった地震である可能性がある。1596年慶長伏見地震ですべり残りが出た理由は、前回の地震から600年程度しか経っておらず、断層面上の応力が十分に蓄積されていないときに、四国の中央構造線の巨大地震により、横から無理やり最活動させられたためである可能性が考えられる。ただし、この考えだけでは、1596年慶長伏見地震のときに、なぜ明石海峡から神戸の地域だけにすべり残しが出たかという問題については答えることはできない。それぞれの断層の geometry と固有の定常的な応力蓄積過程、強度の深さ分布を仮定して、実際にどこでどのようなすべり残しが発生するかどうかを定量的に検討することが必要である。

謝辞 防災科学技術研究所・岡田義光氏による歪計算のプログラムを使わせていただいた。

(e) 引用文献

- 1) 飯尾能久, 小林洋二: 内陸大地震の発生の仕組み, 科学, vol.73, No.9, 1012-1019, 2003.
- 2) 飯尾能久, 小林洋二: 大地震の始まりの物理的解明に向けて, 地震予知研究シンポジウム 1997, 論文集, 99-116, 1997.
- 3) 飯尾能久: 兵庫県南部地震の発生過程—断層の固着とディタッチメントのすべり—, 地震 2, 49, 103-112, 1996.
- 4) 橋本 学: 兵庫県南部地震に伴う応力変化: 断層モデルによるクーロン破壊関数の変化の再計算. 地震, 第2輯, 50, 21-27, 1997.
- 5) Stein, R.S. et al., Science, 258, 1328, 1992.
- 6) Harris, R.A. and Simpson, R.W.: Nature, 360, 251, 1992.
- 7) 活断層研究会, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 1991.
- 8) 後藤秀昭, 中田高, 堤浩之, 奥村晃史, 今泉俊文, 中村俊夫, 渡辺トキエ: 中央構造線活断層系(四国)の最新活動時期からみた活断層系の活動集中期, 地震, 第2輯, 53, 205-219, 2001.
- 9) 千田昇, 竹村恵二, 松田時彦, 島崎邦彦, 池田安隆, 岡村眞, 水野清秀, 松山尚典, 首藤次男: 大分平野直下に伏在する府内断層の位置と最新活動時期, 活断層研究, 23, 93-108, 2003.
- 10) 地震調査委員会, 有馬—高槻断層帯の評価, 2000.
- 11) 地震調査委員会, 中央構造線断層帯(金剛山地東縁—伊予灘)の長期評価について, 2003.
- 12) Kanamori, H and Andetson, D.L.: Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull.Seism.Soc.Amer., 65, 1073-1095, 1975.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

準備中.

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

(2-4) スロー地震

川崎一朗 (京都大学防災研究所)

kawasaki@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

スロー地震の効果的な検出と、検出されたスロー地震のインバージョンによる断層面解の分解能の向上を目指して、GPS データの上下動のノイズレベルを下げる試みを行った。

(b) 業務の成果

国土地理院によって 1994 年より開始された GEONET は、日本列島のダイナミクス研究に大いに貢献してきた。しかしながら、国土地理院から提供される GPS 変位の日値時系列 (以下、原データと呼ぶ) には、現在の段階では、基準となるつくば観測点自身のノイズ (例えば、Hatanaka et al.(2003)¹⁾ や宗包・他(2003)²⁾ に由来すると思われる、全国一斉の水平動の ~ 1 cm の不自然とも思える大きな年周変化が含まれているとか、機種別のバイアスがあるとか、留意すべき点がある。

この様なノイズを避けるため、どこかの観測点を固定点に取ることが多い。安定した観測点を固定点に取ることによって、原データに含まれているノイズは大きく減る。しかし、固定点をとると、固定点の時系列に含まれる観測誤差が固定点以外の観測点の時系列に残ってしまう。

本研究では、日値時系列データを解析する一般ユーザーとして、単純な仮定のもと、単純な計算によって、この様な問題点の影響を極小化し、同時に特定の固定点を取ることによるバイアスを避け、ノイズレベルを下げることを試みた。

使用させて頂いたデータは、国土地理院から提供されている 1996 年 3 月から 2002 年 12 月までの GPS 観測点の座標の日値時系列である。これを原データと呼ぶ。

計算手順は下記の通りである。

- (1) 地震や噴火の起こった地域の観測点を除く。
- (2) 3 機種別に全国の平均時系列を求める。
- (3) 3 機種別に、(2)の平均時系列の線形トレンドを求め、平均時系列から線形トレンドを差し引いたものを仮に平均バイアスと呼ぶことにする。平均バイアスの主因は、筑波に由来するノイズと思われる。
- (4) 各観測点の時系列データから、(3)で求めた平均バイアスを差し引き、それを改めてその観測点の観測値と見なす。
- (5) 上下変位速度の全国平均は -4.3 mm/年となった。全国の観測点の上下変位に 4.3 mm/年を加え、これを改めて各観測点の上下変位とする。

こうして求めた変位速度場では、下記のことが分かった。

- (1) 水平動は、事件の起こった地域を除き、ほとんどの観測点で、互いに矛盾無く非常に安定した動きをしているように見える。
- (2) 上下動は、潮位データと 0.1 ± 0.3 mm/yr の範囲で矛盾しない。
- (3) 上下動のバラツキの標準偏差の全国平均は、原データでは 10.5 mm、仮想変位場では 7.7 mm になる。バリエーションは 43% になる。
- (4) 上下動の年周変化の全国平均は、原データでは 7.2 mm、仮想変位場では 2.4 mm と大幅に減少。
- (5) すでに村上亮(2002)³⁾などによって指摘されていることであるが、過去数 10 年の水準測量による全国の上下動のパターンと、過去 7 年の GPS による上下変位の空間的模式パターンはよく一致する。例えば、

四国の室戸岬と足摺岬、紀伊半島の潮岬、東海地方の御前崎など先端部での沈降と内陸側での隆起など。図1に、島根県三隅町観測点の原データと今回求めた変位場によるGPS変位の比較の例を示す。図2には、原データと今回求めた変位場による東西成分の全国地域別平均GPS変位をしめす。

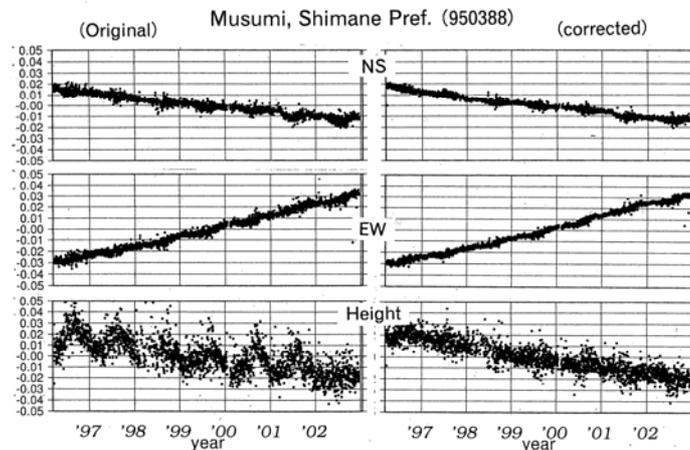


図1. (左)は島根県三隅町観測点の原データによる、(右)は今回求めた変位場によるGPS変位。

(c) 結論ならびに今後の課題

次のようなことが言える。

- (1) GPS 上下変位速度も、スロー地震の効果的な検出に役立つめどが立った。
- (2) どこかを固定点にとると、その周辺の年周変動は小さくなり、全国同じ基準での年周変動の議論が出来ないが、今回求めた変位場では可能。
- (3) 但し、今回の計算で求めたものの実体が何かは分からない。今後は、単独精密測位の研究成果なども取り入れ、その意味を考えていく必要がある。

(d) 引用文献

- 1) Hatanaka, Y., Iizuka, T., Sawada, M., Yamagiwa, A., Kikuta, Y., Johnson, J. M., and Rocken, C., 2003, Improvement of the analysis strategy of GEONET, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 49, 11-37.
- 2) 宗包浩志, 飛田幹男, 高島和宏, 松阪茂, 黒石裕樹, 真崎良光: 2003, 地下水で動く電子基準点 I, 日本測地学会第 100 回講演会要旨, 33.
- 3) 村上亮: 2002, GPS 連続観測による日本列島の上下地殻変動, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, 176-176.

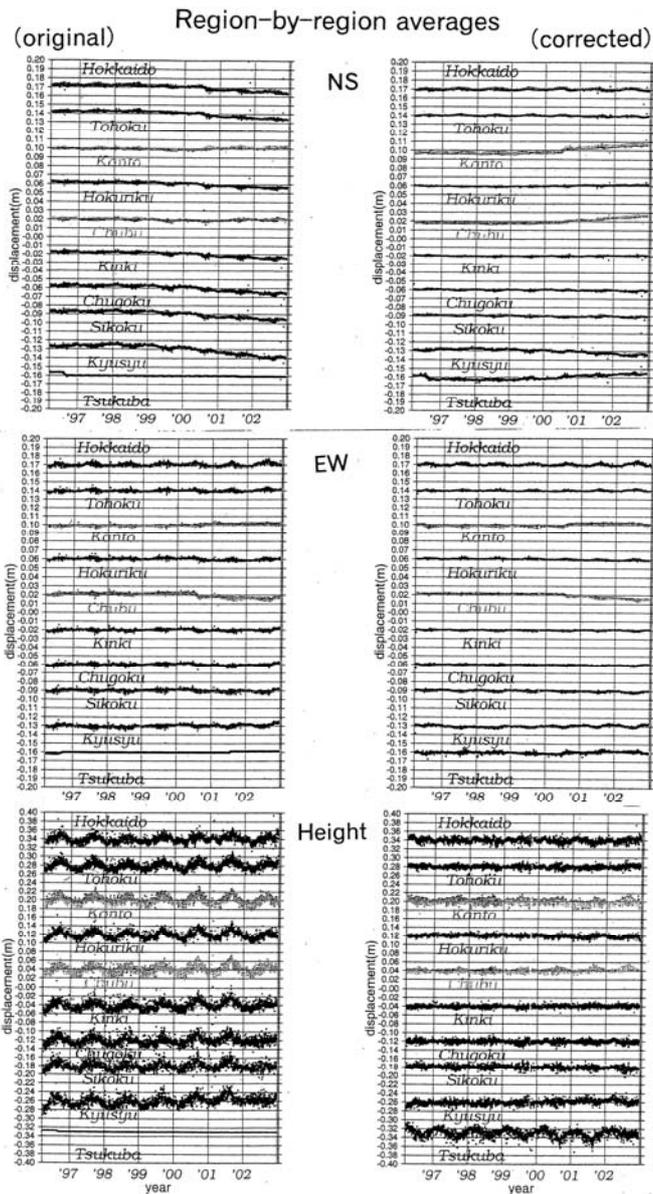


図2. (左) は原データによる、(右) は今回求めた変位場による東西成分の全国地域別平均GPS変位。

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
金城聡, 川崎一朗	GEONETデータの一般ユーザーとしてのノイズ削減策	地球惑星科学関連学会2003年合同大会 D008-005	2003年 5月29日
廣瀬一聖, 川崎一朗, 他	潮汐定数の時間変化・空間分布と地震発生	日本測地学会第100回講演会 50.	2003年 10月24日

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定
なし

(2-5) 日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形についての研究

古本宗充 (金沢大学大学院自然科学研究科)

furumoto@hakusan. s. kanazawa-u. ac. jp

工藤健 (核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター)

kudou. takeshi@jnc. go. jp

田中俊行 (地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所)

tanaka@tries. go. jp

(a) 業務の要約

「リソスフェアの粘弾性的性質が、地表で観測される歪分布にどう関与しているのか」という問題について解明を進めるため、1) 重力・地形データを用いた日本列島地殻の強度推定の試み、2) 重力異常分布の複雑さ指標からの地殻強度情報抽出の試み、3) 断層活動度の時間変化と地殻の粘弾性との関係解明、に関する解析に着手した。1)では主に、日本列島に同手法を適用する上での問題点を整理しつつ、方位による情報分離等、新知見を得るための手法の改良を進めた。2)からは地下の密度分布の複雑さの地域変化を見積もり、地表に現れた破壊・運動の痕跡との関連を調査した。3)では断層運動の時間的推移を分析した。海水準変化による海域の荷重変化と断層活動との間で、リソスフェアの粘弾性構造を介した因果関係が成り立つかどうかを解明した。

(b) 業務の成果

地形-地下構造間の荷重-変形応答に介在する粘弾性を、重力異常、地形、および活断層データを利用して抽出するため、以下の予察的研究を行った。

1) 重力・地形データを用いた日本列島地殻の強度推定の試み

重力異常・地形データの coherence 分布からリソスフェアの有効弾性厚を求める従来の手法に関して、a) スペクトル情報収集方向の分離による異方性の検出、b) スペクトル推定法の工夫などによる水平分解能の改善を試みた。重力データは、日本列島全域を均質にカバーする金沢大学理学部編集のもの¹⁾を用いた。地形データは、国土地理院(1997)数値地図に収録されている 250mメッシュ標高データ²⁾を用いた。

a) 有効弾性厚の異方性検出の試み

リソスフェアの剛性は、その有効(等価)弾性厚(effective elastic thickness, T_e)として見積られる。これが厚いほど、地形荷重の大小が(アイソスタシーではなく)リソスフェアの剛性によって支えられる。リソスフェアがたわむと地下の密度分布が変化し、その結果生じる地下構造は重力異常として捉えられる。Forsyth (1985)³⁾は、地形と重力異常分布の波長ごとの相関(coherence)を用いて、リソスフェアを均質な弾性体と近似した時の有効弾性厚推定手法を確立した。Kudo et al. (2001)⁴⁾は、この手法を日本列島に適用し、有効弾性厚分布を求めた。この手法は一般に等方的な弾性体を想定している。全方位の平均値としての coherence を波長ごとに求め、解析範囲の平均的な T_e 値を推定するものである。本研究では、coherence 分布算出の際に1方向のみの重力異常・地形の起伏情報を参照するよう手法を変更し、方位別の T_e 値の変化を求めた。

本研究の目的は、日本列島下の粘弾性構造解明にある。しかし複雑な構造運動を被った地殻をもつ日

本列島は、上記手法を検証・発展させるためのテストサイトとしては不向きである。そこで今回は、この手法を北米大陸西部のグレート・ベースン地域に適用しながら手法の検証及び開発を行った。この地域は広範囲にわたって同じ方向性（南北走行）の正断層が分布し、第三紀の大規模な東西伸長が地質学的に明らかにされている。この地域内に 500 km X 500 km の解析範囲を設け、解析方向を 10 度ずつ回転しながら T_e 値推定を繰り返した。その結果、推定された T_e は、方向によって 6 km ~ 11 km の間を変化し、最も薄く求まる方向“最薄軸”はほぼ東西方向、最も厚く求まる方向はそれに直交する方向となった。最薄軸はこの地域の地殻の伸長方向で、断層群の走行とはほぼ直交する事が明らかとなった。さらにこの結果から、この地域のリソスフェアの曲げ剛性は方向によって最大 6 ~ 7 倍の違いがある事が示唆された。地殻の伸長方向にリソスフェア強度が弱められている原因としては、東西伸長時に下部地殻に貫入したであろう南北性のダイク群とその上に出来た正断層群の関与が挙げられる。即ちこの地域の地殻が、南北方向に強度を保った細長いセグメントの集合体として、あたかも“すだれ”のように方向による強度差が生じている可能性が考えられる。

次に、本手法の日本列島への応用を試みた。結果の妥当性・精度の問題に関して現在検討中であるが、日本海拡大時に生じた正断層群の走行方向あるいは日本列島の長辺方向に、地殻強度が高い可能性が示唆された。

b) 水平分解能の改善の試み

本手法は、重力異常と地形の起伏に関する長波長側の（数 10 km 以上）スペクトル情報を必要とする。しかしながら日本列島陸域においては、十分な広さの解析範囲を確保することが困難である。一方、得られる有効弾性厚分布の水平分解能を上げるためには、解析範囲をより小さくする必要がある。より狭い解析範囲で精度よく有効弾性厚を求めようとする試みとして、Lowry and Smith (1994)⁹⁾等による、MEM 法を用いた T_e 推定法がある。本研究においてもこの手法を導入し、従来の手法との整合性を検討中である。MEM 法を中部地方において試行した結果、GPS 観測による新潟-神戸歪集中帯を含む解析区間では、周囲より強度が低い可能性が示唆された。

2) 重力異常分布の複雑さ指標からの地殻強度情報抽出の試み

上部地殻の構造は、時間の経過とともにテクトニックな変形・破壊を被り、一般に単純(均質)→複雑(不均質)へと推移する。特に強度の低い部分において破壊が繰り返されるため、地殻構造の複雑性には地域差が生じる。地殻構造が複雑化すると、その場における密度構造も複雑化し、その痕跡は重力異常分布の複雑性に反映されるはずである。不均質な地下の密度構造をもつ地域ほど複雑な重力異常分布を示し、反対に均質な地下構造を持つ地域では重力異常値の水平変化は乏しいと考えられる。一方、上部地殻が破壊を被ると、破断面の一部は地表付近に達するものもあり、断層や撓曲として検知される。以上の現象が実際に成り立っているかどうかを議論するため、重力異常の凹凸の激しさ(Roughness)の水平変化と、地表で観察(測)される変形・破壊現象の痕跡の分布との空間的対応を検証した。これらに有意な対応関係が認められれば、過去の上部地殻の被変形・被破壊(もしくは安定)度合いを議論するため重力異常 Roughness を用いる事ができる。

今回は、ある取り込み半径円内の重力異常値の a) 標準偏差、b) 歪度、および、c) 尖度を重力異常 Roughness の指標として利用し、それらの空間分布に関して議論した。実際の計算では西南~中部日本を格子点(間隔: 1km)に分割し、各格子点における上記 a) b) c) の値を求め、西南~中部日本全域におけるそれぞれの水平変化を調べた。また上述の取り込み半径は 5km~20km まで変化させ、各々のケー

スについて考察した。ここでは地質調査所（現産総研）による日本列島重力データベース⁶⁾と西南日本重力研究グループによるデータベース⁷⁾に収められている重力データを併せて使用した。中国地方の重力異常標準偏差分布（取り込み半径 15km）の例を図1に示す。次に、活断層や空中写真判読による線状地形が精査されている地域について、これら地表に現れた被破壊の痕跡の分布と、重力異常

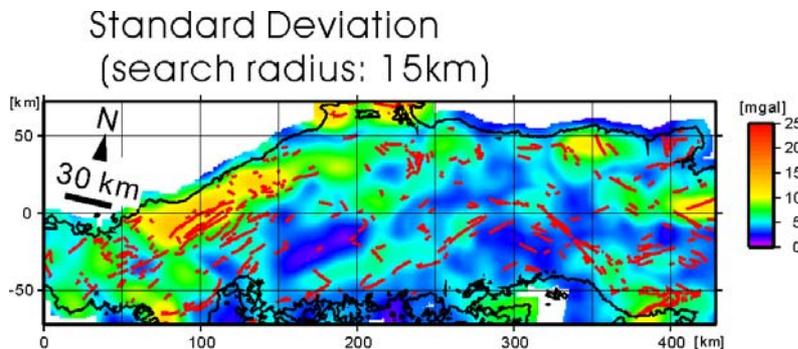


図1. 中国地方の重力異常標準偏差分布(取り込み半径 15km)の例。
赤線は高田他(2003)⁸⁾による線状地形。

Roughness の地域変化との関連を統計的に調査した。特に中国地方においては、高田他(2003)⁸⁾によって線状地形の精査が行われている(図1赤線)。抽出された線状地形分布と重力異常 Roughness 値の分布を照合した結果、Roughness の大きい地域に線状地形が集中する傾向が得られた。さらに近畿から信越地方にかけて、中田・今泉(2002)⁹⁾による

活断層の分布との照合を行った結果、同様の(重力異常分布が複雑な地帯に活断層が偏在する)傾向が得られた。

活断層や線状地形は、過去数十万年間の変動を想定している。本報告では更に短いタイムスケールの変動との関連も考慮するため、地震の震源分布、b値の空間変化、GPSによる歪分布等との対応についても照合作業を行った。特に新潟-神戸歪集中帯の分布と、長波長重力異常の急勾配帯の分布は、非常によい空間的対応が見られる。同様の傾向は、北米大陸西部における歪集中帯(Thatcher, 2003)¹⁰⁾においても認められた。

3) 断層活動度の時間変化と地殻の粘弾性との関係解明

重力異常分布に含まれる情報は、過去の構造運動の総和としての密度分布に起因するものであり、時間方向における分解能は無い。そのため、地殻の応力状態の時間変化とその粘弾性応答を解明する上で、様々な時間スケールを持った別の情報を照合しながら考察を重ねていく必要がある。そこで本研究では、日本列島各地で進められている活断層トレンチ調査の結果を総合的に編集し、活断層の活動度の時間変化について検証を開始した。

全体的傾向として、活断層トレンチ調査で確認された断層の数は、活動時期が新しいものほど多く、古いものの頻度は年代を遡るにつれて指数関数的に減少している。この現象は、断層の痕跡が時間とともに隠蔽(風化・浸食・埋没等による)され、発見されにくくなっていく事情に起因すると考えられる。本研究が着目したのは、この時間軸上での指数関数的な減少とは無関係な断層頻度増加時期の存在である。東北日本の8千~5千年前の時期には、明らかに全体の傾向とは異なる断層頻度の増加が見られる。一方西南日本の同時期に関しても、東北日本ほど明瞭ではないが、同様の頻度増加が確認された。これらの現象は、この時期に日本列島全域の地殻の応力状態に変化が起こった事を強く示唆する。その原因として海面上昇による地殻の応力変化を想定し、その妥当性について現在検証を進めている。今回得られた断層頻度増加期は、世界的に海面上昇の痕跡が認められる時代と一致している。その海面変動量として100m前後が推定されている。

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は本分担研究初年度にあたり、各小項目について、解析手法の開発と、それらを用いた予察的研究を行った。今後も 1) 重力・地形データを用いた日本列島地殻の強度推定の試み、2) 重力異常分布の複雑さ指標からの地殻強度情報抽出の試み、3) 断層活動度の時間変化と地殻の粘弾性との関係解明、を軸に研究を進める。

1)においては現在、上述の T_e 推定法に関して世界的に見直しの時期を迎えている。手法そのものの妥当性を疑問視する研究報告も提示され始めている（例えば、McKenzie, 2003¹¹⁾）。そのため本研究においても日本列島に適用する上で問題点の整理、考察の再構築などの必要に迫られており、難航も予想される。これらの問題を検討しつつ、今後は日本列島の地殻強度とその異方性の水平変化を調査し、様々なタイムスケール（地質学から測地学）における地殻変動との関連を議論する予定である。

2)では引き続き、日本列島下の密度分布の複雑さに関連する指標の空間変化を求める。上記 1)同様、過去の地殻活動に関連する多くのデータを収集、照合し、現象-指標間の関連を調査する。引力を介して得られる地下の情報の有効活用の道を探る。

3)では、計算機による力学的シミュレーションを導入しつつ仮説の検証を行う。細長く分布する島弧地殻の周囲の海域で同時に海水準変化による荷重が与えられた時、(1) 地殻内部がどのような応力変化、変形を被るか？ (2) どのような条件（粘弾性構造）のもとで、観測事実と整合的な現象が生じるか？について検討を進める。その上で、観測結果に合致する時空間スケールにおいて、島弧地殻の粘弾性構造-変形過程解明を進める。

最終的な課題は、上記 1)、2)、および 3)の結果をもとに、日本列島の地殻に加わる応力、地殻内の強度分布（粘弾性構造）、結果として現れる変形運動の総理解に貢献することである。

(d) 引用文献

- 1) 河野芳輝・古瀬慶博 (1989): 100 万分の 1 日本列島重力異常図, 東京大学出版会, 88p.
- 2) 国土地理院 (1997): 数値地図 250mメッシュ (標高) CD-ROM 版, 国土地理院.
- 3) Forsyth D. W. (1985): Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 90, 12623-12632.
- 4) Kudo, T., Yamaji, A., Furumoto, M. and Nagao, T. (2001): Effective elastic thickness of island arc lithosphere under Japan. *The Island Arc*, 10: 135-144.
- 5) Lowry, A. R. and Smith, R. B. (1994): Flexural rigidity of the Basin and Range – Colorado Plateau – Rocky Mountain transition from coherence analysis of gravity and topography, *Journal of Geophysical Research*, 99, 20123-20140.
- 6) 地質調査所(編)(2000): 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査所.
- 7) Gravity Research Group in Southwest Japan (Representatives: Ryuichi Shichi and Akihiko Yamamoto) (2001): Gravity measurements and database in southwest Japan, Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9.
- 8) 高田圭太, 中田高, 野原壯, 原口強, 池田安隆, 伊藤潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷威, 堤浩之 (2003): 震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討—中国地方を事例として—, *活断層研究*, 23, 77-91.
- 9) 中田 高, 今泉俊文編 (2002): 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 68p.
- 10) Thatcher, W. (2003): GPS constraints on the kinematics of continental deformation, *Int. Geol. Rev.*, 45, 191-212.

11) McKenzie, D. (2003): Estimating T_e in the presence of internal loads, *Journal of Geophysical Research*, 108(B9), 2438, doi:10.1029/2002JB001766.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
工藤 健, 古本宗充	リソスフェア強度の異方性について －(1)北米グレート・ベースンにおける検証－	地球惑星科学関連学会 2003 年 合同大会	平成 15 年 5 月
Kudo, T., Nohara, T. Kinoshita, H., Yamamoto, A. and Shichi, R.	Variations of standard deviation of gravity anomalies in Chugoku District, Japan: Relationship with distributions of topographic lineaments	American Geophysical Union, Fall Meeting 2003	平成 15 年 12 月
Kudo, T., Yamamoto, A., Nohara, T., Kinoshita, H. and Shichi, R.	Variations of gravity anomaly roughness in Chugoku District, Japan: Relationship with distributions of topographic lineaments.	Earth, Planets and Space 誌	平成 16 年 3 月 (投稿中)

(f) 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
地形・重力データによるリソスフェア有効弾性厚推定システム	地形・重力異常分布の coherence から、解析範囲におけるリソスフェアの有効弾性厚を推定する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 16 年度業務計画案

歪蓄積過程のシミュレーションとして、今年度定式化したセルラーオートマトン型のシミュレーションを実行するとともに、平成 14 年度に作成した三次元構造モデルによる変位・歪計算も平行して進める。

日本列島内で発生する内陸地震の発生過程のモデル化として、兵庫県南部地震を取り上げたが、平成16年度は、前述のシミュレーションとタイアップしつつ、深部の応力分布の考察などを含め、内陸活断層における応力蓄積過程のモデル化研究を進める。

スロー地震の検出については、別の視点から GPS データの上下動のノイズレベルを下げる試みを行い、スロー地震を検出すると共に、バックスリップ分布の分解能をあげる試みを行う。

日本列島下の地殻の粘弾性構造と変形についての研究においては、平成15年度に引き続き、1) 重力・地形データを用いた日本列島地殻の強度推定の試み、2) 重力異常分布の複雑さ指標からの地殻強度情報抽出の試み、3) 断層活動度の時間変化と地殻の粘弾性との関係解明、の3項目を軸とした研究を並行して行い、得られた知見を総合し、地殻変動メカニズムの理解に貢献する。

1)においては、日本列島に適用する上での問題点の整理、手法自体の検証を行う。過去に報告されている類似の複数の手法の比較などにより、日本列島においても正しく適用できているかを再検討する。これらの問題を検討しつつ、今後は日本列島の地殻強度とその異方性の水平変化を調査し、様々なタイムスケール（地質学から測地学）における地殻変動との関連を議論する予定である。

2)では引き続き、日本列島下の密度分布の複雑さに関連する指標の空間変化を求める。上記1)同様、過去の地殻活動に関連する多くのデータを収集、照合し、現象-指標間の関連を調査する。引力を介して得られる地下の情報の有効活用の道を探る。

3)では、計算機による力学的シミュレーションを導入しつつ仮説の検証を行う。細長く分布する島弧地殻の周囲の海域で同時に海水準変化による荷重が与えられた時、地殻内部がどのような応力変化、変形を被るか？あるいは、どのような条件（粘弾性構造）のもとで、観測事実と整合的な現象が生じるか？について検討を進める。その上で、観測結果に合致する時空間スケールにおいて、島弧地殻の粘弾性構造-変形過程解明を進める。

最終的には、上記1)、2)、3)の結果をもとに、日本列島の地殻に加わる応力、地殻内の強度分布（粘弾性構造）、結果として現れる変形運動の総理解に貢献することを目標とする。