

### 3.3.12.2 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
名古屋大学大学院 環境学研究科 京都大学防災研究所 地震予知研究センター	教授	平原和朗	hirahara@eps.nagoya-u.ac.jp
	大学院生	光井能麻	mitsui@eps.nagoya-u.ac.jp
	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
	産学官連携 研究員	小林知勝	tkoba@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 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所	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
	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

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16年度業務目的

平成16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16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(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

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、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、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ない、摩擦パラメータ分布に加えプレートの形状が複雑な地震発生サイクルを作り出していることを示した。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、東海地方から日向灘まで南海トラフに沿って7セル、計21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特徴を再現することに成功した。

(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(1979)<sup>1)</sup>、Ruina(1983)<sup>2)</sup>]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.(2004)<sup>3)</sup>、堀・他(2005)<sup>4)</sup>]。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いるが、通常の摩擦パラメータ範囲では、数値計算上連続体とみなせるようにするにはセルを1kmサイズにする必要があり、南海トラフ巨大地震サイクルを再現するには、超大型計算となり、地球シミュレータ等の並列スーパーコンピュータを必要とする。

そこで、まったく大型計算と計算式は変えず、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(2004)<sup>5)</sup>]の発展形と言える。

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、駿河トラフから日向灘までの南海トラフに沿って7枚のセルに分割し、図1に示すように、計21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。

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

$$\mu_i = \mu_0 + a_i \ln(V_i/V_0) + b_i \ln(\theta_i V_0/L_i) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = 1 - \frac{\theta_i V_i}{L_i} \quad (3)$$

$$\frac{du_i}{dt} = V_i \quad (4)$$

ここで、 $\mu_i$ 、 $\sigma_i$ 、 $V_i$ 、 $u_i$ 、 $\theta_i$ 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。 $K_{ij}$ はセル*j*の単位すべりに対するセル*i*でのせん断力変化(すべり応答関数)で表し、半無限均質弾性体を仮定しOkada(1992)<sup>6)</sup>によりその値を見積もる。 $a_i$ 、 $b_i$ 、 $L_i$ 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)<sup>7)</sup>に従って与えた。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.(1993)<sup>8)</sup>]を用いて積分した。

### (c) 業務の成果

表1に与えた摩擦パラメータを各セルに与えて、地震サイクルを再現した。固着域は $a_i \cdot b_i < 0$ でかつ式(1)のすべり応答関数 $K_{ii} < k_{ic}$  ( $k_{ic} = \sigma_i (b_i \cdot a_i) / L_i$ )となる不安定すべりの条件を与え、巨大地震の発生間隔が100年程度になるように与えた。セル3, 4には海嶺が沈み込んでいるので、大きな $L=15\text{cm}$ を与えた。

遷移域でも $a_i \cdot b_i < 0$ ではあるが、式(1)の $K_{ii} > k_{ic}$ となる条件付不安定すべり条件を与えて、 $K_{ii} \sim k_{ic}$ になると、他のセルの地震すべりによりすべりの加速と減速を繰り返す振動現象をしめすことを利用してスロースリップを生じさせた[Yoshida and Kato(2003)<sup>9)</sup>]。ただし、摩擦パラメータは遷移層で同じなので、 $k_{ic}$ は遷移層となるが、プレートの傾斜角度が小さいセル9では遷移層の幅が広くなり $K_{ii}$ が小さくなるため、 $K_{ii} \sim k_{ic}$ に近づきス

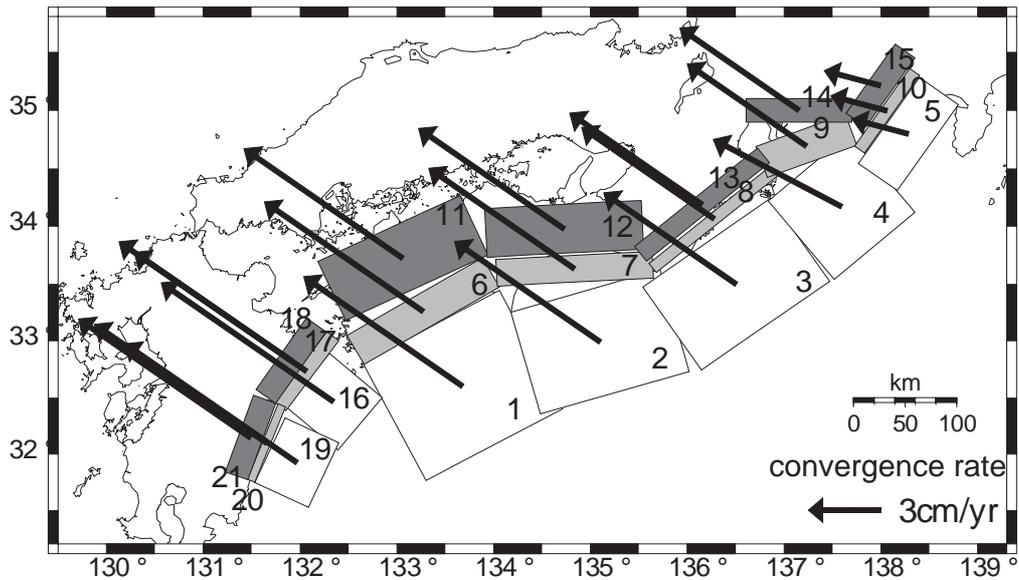


図1 セル配置と与えたプレート収束速度

セル1-5、16、19は固着域(深さ5-25km)、6-10、17、20は遷移域(深さ25-30km)、11-15、18、20は安定すべり域(深さ30-40km)に対応する。

ロースリップイベント(SSE)が大きくなり、東海スロースリップがこの限られた領域で観測されていることをうまく説明できる。このモデルでは、1944年東南海地震によって現在の東海SSEが生じていることになる(図2)。また、セル6、12でも低角度だが、同じ角度の低角のセルが2つ並ぶとお互いに抑制してSSEが小さくなるので観測にかかっていないと思われる。セル17でも豊後水道SSEが発生しているが、これはセル19、16の地震により引き起こされている。

深部の安定すべり域では、 $a-b > 0$ のすべり速度強化の安定すべり条件を与えた。セル11で1946年南海地震の後20年くらい余効すべりが続いたことが報告されている[Ito and Hashimoto(2004)<sup>10)</sup>]。安定すべり域では低角であると余効すべりが大きくなるので、セル11で余効すべりが観測されたのは、沈み込む角度が低角であることが効いていると思われる。また、大きな余効すべりは遷移域のSSEを抑制する働きもあり、四国地方で大きなSSEが観測されていないのは、低角のセルが2つ並ぶのと大きな余効すべりが発生している2つの要素が効いている。

これらのパラメータを用いて、以下の余効すべりおよびSSEまで含めた南海トラフにおける地震発生の特徴を再現することにほぼ成功した。

1. 地震の繰り返し間隔は約90年から150年とばらつきがある
2. 紀伊半島より東側で発生する東南海地震が、西側で発生する南海地震よりも先に起こる傾向にある
3. 東南海地震よりもさらに東側の遠州灘域の東海地震は1944年東南海地震時のように発生しない時もある
4. 紀伊半島沖が常に東南海地震、南海地震の震源となる可能性が高い

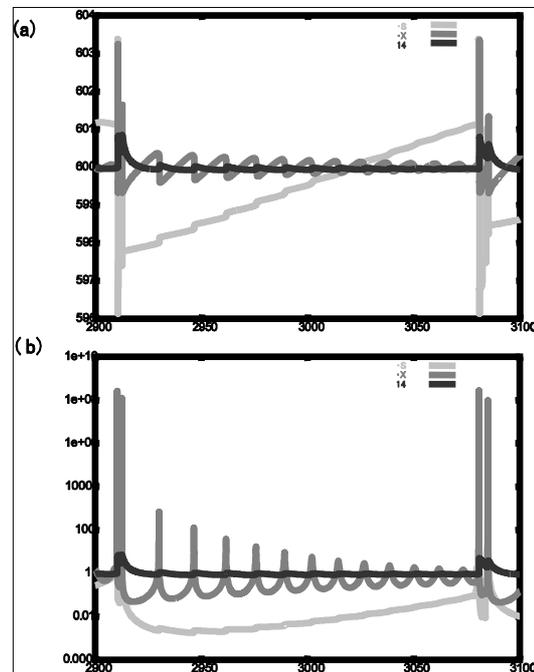
5. 紀伊半島沖は他の領域に比べて短時間ですべる (rise time が短い) 傾向にある
6. 東海域および豊後水道といった限られた領域で SSE が観測されている。
7. 四国深部地域で 1946 年南海地震後 20 年間にわたる余効すべりが観測されている。

	表す現象	深さ (k m)		a-b(x10 <sup>-4</sup> )	L(cm)
		四国以東	九州		
固着域	地震	5-25	15-30	-2.0~-2.2	0.1~15
遷移域	SSE	25-30	30-35	-0.2	1
安定域	余効すべり	30-40	35-55	4.0	4

表 1 各領域におけるセルパラメータ

図 2 セル 4 (赤)、9 (緑)、14 (青) における摩擦係数 (a) とすべり速度 (b) のセル 4 の 1 地震サイクルにおける時間変化

セル 4 の地震により、セル 9 で SSE が励起され繰り返し発生する。また、セル 4 の地震によってセル 14 に余効すべりが発生するが、セル 11 のものほど大きくはない。



#### (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たシミュレーションにより、余効すべりおよびスロースリップまで含めた南海トラフの巨大地震発生サイクルの特徴を再現することに成功した。地球シミュレータを用いた大規模計算による南海トラフの巨大地震発生サイクルシミュレーション研究が始まっているが、未だ現実的なプレートの 3 次元形状の効果を取り入れた研究は少なく、本業務で得られた成果は、大規模計算に先んじるもので、摩擦パラメータ分布に加え、沈み込むフィリピン海プレートの 3 次元形状が地震サイクル (巨大地震発生、地震後の余効すべり、地震間のスロースリップ) に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。

ただし、本業務の目的は、内陸活断層における応力蓄積過程をモデル化することであり、

その外力としての南海トラフ巨大地震発生サイクルのシミュレーションが完成した段階であり、昨年度定式化したように、今後は内陸活断層もシミュレーションに組み込み、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*, 84, pp.2161-2168, 1979.
- 2) Ruina, A. L.: Slip instability and state variable friction laws, *Journal of Geophysical Research*, 88, pp.10,359-10,370, 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*, 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*、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*, 161, pp.2433-2450, 2004.
- 6) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of Seismological Society of America.*, 82, pp.1018-1040, 1992.
- 7) Heki, K. and Miyazaki, S.: Plate convergence and long-term crustal deformation in central Japan, *Geophysical Research Letter*, 28, pp.2313-2316, 2001.
- 8) 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.
- 9) Yoshida, S., and Kato, N.: Episodic Aseismic slip in a two-degree-of-freedom block-spring model, *Geophysical Research Letter*, 30, pp.1681-1684, 2003.
- 10) Ito, T., and Hashimoto, M.: Spatiotemporal distribution of interplate coupling in southwest Japan from inversion of geodetic data, *Journal of Geophysical Research*, 109, B02315, 10.1029/2002JB002358, 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
Hyodo, M. and K. Hirahara	GeoFEM kinematic earthquake cycle simulation in southwest Japan	<i>Pure and Applied Geophysics</i> , 161, pp.2069-2090, 2004	平成15年10月
Mitsui, N. and K. Hirahara	Simple spring-mass model simulation cycle along the Nankai trough, southwest Japan	<i>Pure and Applied Geophysics</i> , 161, pp.2433-2450, 2004	平成15年10月
平原和朗・光井能麻・西村宋・橋	単純セルモデルによる南海トラフ巨大地震および内陸地震の発生シミュレーションー半無限均	日本地震学会予稿集、2004年度秋季大会,A014	平成15年10月9日

本学	質弾性体一		
光井能麻・ 平原和朗	スロースリップイベントとプレート形状の関係	日本地震学会予稿集、2004 年度秋季大会 P012	平成15年10 月9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

(2-2) 活断層の活動履歴から推定される四国から近畿中部の内陸地震の発生過程

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

地震調査委員会によって公表された活断層の評価結果を活用することにより、兵庫県南部地震の発生過程に深く関係する以下の推定が行われた。1596年に四国の中央構造線が動いたときに、六甲・淡路・大阪湾断層系は、十分に応力蓄積していなかった可能性がある。六甲・淡路・大阪湾断層系が応力蓄積していなかった理由は、約千年前に、大阪湾断層が、四国の中央構造線が動く前に、独自の応力蓄積過程により活動してしまったためであると考えられる。十分に応力蓄積していなかった断層が、隣接領域の断層のすべりによりトリガーされて活動したため、断層深部にすべり残りが生じ、兵庫県南部地震の原因となった可能性がある。

(b) 業務の実施方法

はじめに

兵庫県南部地震の発生原因を明らかにするため、昨年度は、兵庫県南部地震を起こした地震断層とその周辺の活断層の活動履歴を調べ、以下のような推定を行った。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。

この推定のように、周辺の断層で大地震が発生した場合は、その活断層の応力状態は、それらの大地震による応力変化の影響を大きく受け、大地震の発生間隔を不規則なものにする可能性がある。今年度は、新たに公表されたデータを追加して、四国から近畿地方中南部における活断層の相互作用を調べて、昨年度の推定を詳しく検証した。

地震調査委員会による主要活断層の調査結果が公表され、近畿地方の活断層の活動履歴が明らかになりつつある。これにより、個々の活断層毎の活動履歴だけでなく、近畿地方における内陸大地震の活動の推移をこれまで以上に詳しく推定することが可能となった。これらのデータは、内陸地震の断層への応力蓄積過程を解明する上で大変重要なものである。内陸地震の断層への応力蓄積過程としては、断層の下部地殻内の延長部におけるゆっくりすべりによる応力蓄積（例えば、飯尾・小林，1997<sup>1)</sup>）と、周辺の断層の大地震による応力変化が想定される。本研究では、地震調査委員会による四国から近畿地方中南部の主要活断層の調査結果をコンパイルし（地震調査委員会，2000<sup>2)</sup>，2003～2005<sup>3)</sup>，<sup>4)</sup>，<sup>5)</sup>，<sup>6)</sup>，<sup>7)</sup>，<sup>8)</sup>）、四国の中央構造線の活動と、隣接領域である近畿地方中部の活断層の活動との関係を調べた。

## これまでの研究

昨年度は、兵庫県南部地震の発生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変化の効果を、 $\Delta CFS$ により検討し、以下の可能性を指摘した。四国の中央構造線の最新の活動は、通常なら約千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（から六甲・淡路断層帯）は、四国の中央構造線の活動を待ちきれずに、約千年前にすべってしまった。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（から六甲・淡路断層帯）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。そのため、兵庫県南部地震の断層付近にすべり残りが生じたために、地震が発生した。昨年度、六甲・淡路断層帯に関する評価はまだ公表されていなかったため、約千年前の活動に関する推定は、データの裏付けが無かった。今年度は、新たに公表されたデータを用いて、この可能性を詳しく検討した。

## 解析方法

解析手法は、昨年と同様に、四国から近畿地方の中南部の活断層において発生した大地震による応力集中の効果を、 $\Delta CFS$ により検討するというものである。用いるデータは、地震調査委員会による活断層評価が結果である（地震調査委員会，2000<sup>2)</sup>，2003～2005<sup>3)</sup>，<sup>4)</sup>，<sup>5)</sup>，<sup>6)</sup>，<sup>7)</sup>，<sup>8)</sup>）。

### (c) 業務の成果

#### 解析結果と考察

本研究の対象とする断層を図1に示す。四国の中央構造線および、その東・北東側の延長部とその周辺に位置する活断層について活動履歴を調べた。

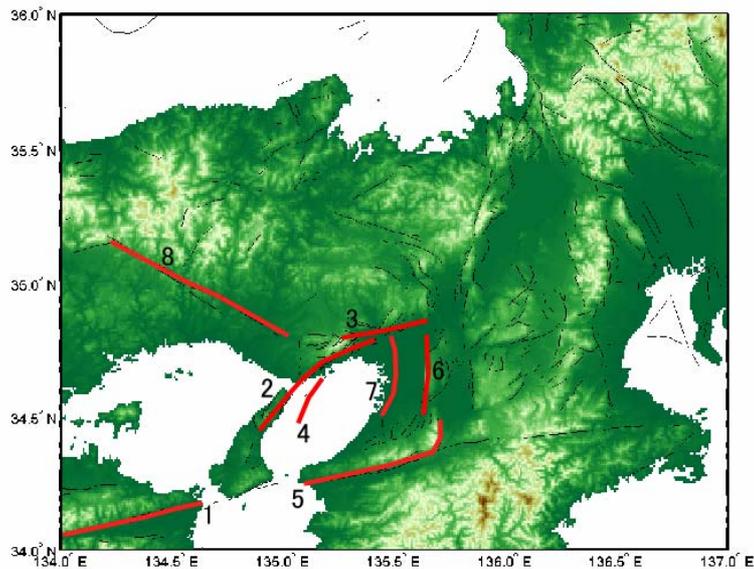


図1 四国の中央構造線の活動との関連を調べた近畿地方中部の活断層の概略位置図。  
1, 5: 中央構造線 (MTL), 2: 六甲 (Rokko) 淡路 (Awaji) 断層帯, 3: 有馬高槻断層帯 (ATL), 4: 大阪湾断層帯, 6: 生駒断層帯, 7: 上町断層帯, 8: 山崎断層帯. 地震調査委員会 (2003)<sup>4)</sup>による図に加筆

図2に、これらの活断層の活動の履歴を示す(地震調査委員会, 2000<sup>2)</sup>, 2003~2005<sup>3), 4), 5), 6), 7), 8)</sup>)。地震調査委員会による活断層評価結果においては、個々の断層(ストランド)毎に精細な評価結果が公表されているが、この図は、断層帯全体が一度に動いたと仮定して、それらを概略的にまとめたものである。ただし、中央構造線は、長大なもので、四国の東部・西部・紀伊半島の3つに分けて示した。以下、頻繁に繰り返しとなるので、地震調査委員会による活断層評価結果については引用を省略する。

1596年に、別府湾から四国西部で始まった一連の地震により(後藤・他, 2001<sup>9)</sup>; 千田・他, 2003<sup>10)</sup>)、四国の中央構造線、六甲・淡路断層帯、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ことは昨年の報告書で述べたが、同様の活動が、約3千年前頃にも存在したと考えられる。一方、約千年前頃に、有馬高槻断層帯と大阪湾断層帯は、四国の中央構造線の活動と関係なく、地震を起こしている。大阪湾断層帯の評価結果では、活動は約千年前以降とされているが、ここでは、約千年前に活動があったと仮定した。また、山崎断層帯もこの頃に活動していることがわかる。約2千年前頃には、四国の中央構造線、紀伊半島の中央構造線、生駒断層帯、上町断層帯という活動があったと考えられる。四国の中央構造線で始まった活動が、淡路から六甲へ伝播せずに、紀伊半島の中央構造線から生駒断層帯へ伝わったと考えられる。

大阪湾断層帯は、淡路や六甲の断層帯と平行かつ近接して走っており、この地域に蓄積された歪み・応力の収支や、この地域の地震テクトニクスを考える上では、同じグループに属するものと考えられる。これらの断層帯を総称して、六甲・淡路・大阪湾断層系と呼ぶことにする。大阪湾断層帯と、六甲・淡路断層帯の活動は相補的であり、一方が活動すれば他方は活動しないと考えられる。

昨年度の報告書においては、その時点で評価結果が公表されていた四国の中央構造線と有馬高槻断層帯、あるいは紀伊半島の中央構造線の連動性を議論した。その後結果が公表された六甲・淡路断層帯など隣接する活断層も含めて、昨年度に指摘されたように、活断層の活動が連動する場合がほとんどであることが分かった。以下に議論するように、約千年前頃の活動は単独の活動である可能性が考えられる。

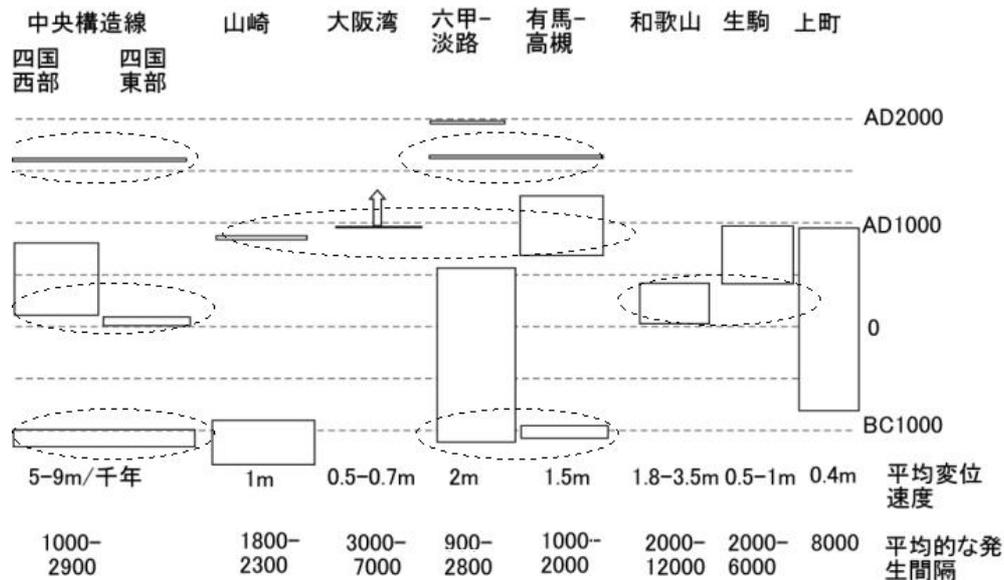


図2 図1に示した断層帯の活動履歴。地震調査委員会(2000<sup>2)</sup>, 2003~2005<sup>3), 4), 5), 6), 7), 8)</sup>による調査結果を概略的にまとめた。活動したと推定される範囲を四角で示す。大阪湾の矢印は、それ以降現在までに活動があったことを示す

これらの活断層の連動性を $\Delta CFS$ 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(Shikoku))、淡路断層帯(Awaji)、六甲断層帯(Rokko)がこの順番で活動するときの、次に活動する断層の geometry による $\Delta CFS$ の分布をa-cに図示した。図3cには、有馬高槻断層帯(ATL)の geometry による $\Delta CFS$ の分布を示した。 $\mu$ は0.4とした。図4には、四国の中央構造線(MTL(Shikoku))、紀伊半島の中央構造線(MTL(Kii))、生駒断層帯(Ikoma)について同様の図を示した。上町断層帯は活動時期の推定範囲が広いので、 $\Delta CFS$ の解析の対象としなかった。

断層のパラメータは表1に示した。それぞれの断層の位置は、公表された活断層の地表トレースを参考にして、隣接する断層の間が空かないように仮定した。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、 $\Delta CFS$ 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)<sup>11)</sup>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。

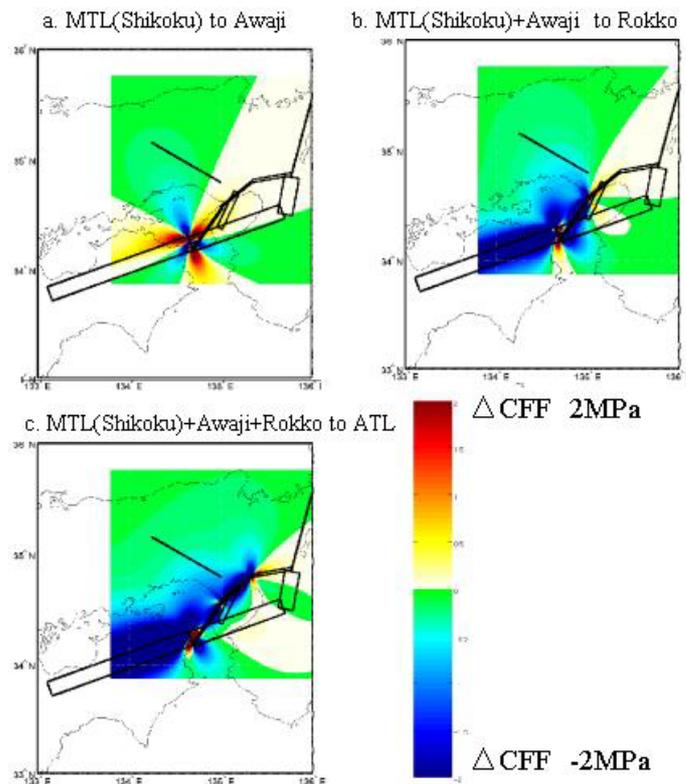


図 3 四国の中央構造線(MTL(Shikoku)), 淡路断層帯(Awaji), 六甲断層帯(Rokko)、有馬高槻断層帯(ATL)がこの順番で活動するときの、次に活動する断層の geometry による  $\Delta CFS$  の分布. 四角は表 1 の各断層を地表に投影したもの

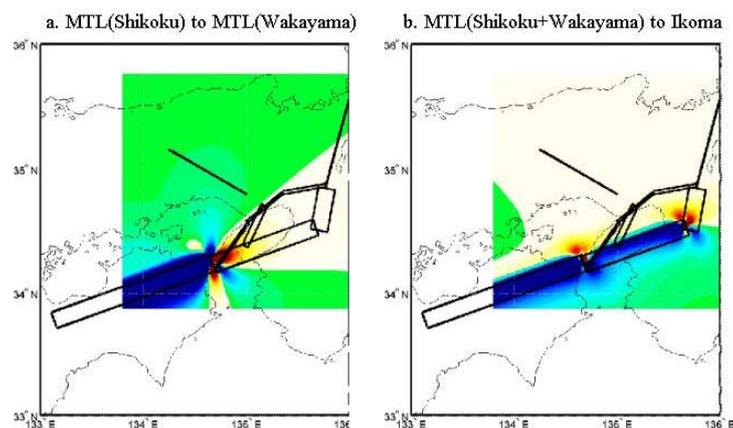


図 4 四国の中央構造線(MTL), 紀伊半島の中央構造線, 生駒断層系がこの順番で活動するときの、次に活動する断層の geometry による  $\Delta CFS$  の分布. 以下の図のカラースケールは図 3 と同じ

一方、図 5 には、山崎断層帯と有馬高槻断層帯の相互作用を  $\Delta CFS$  により検討した。これ

ら2つの断層帯は、お互いの断層帯の活動を促進するような geometry になっていないことが分かる。また、四国の中央構造線と淡路断層帯が活動した場合も、山崎断層帯の活動を促進しないことを図6に示した。実際に、図2に示した活動履歴において、約千年頃前の山崎断層帯と有馬高槻断層帯の活動は、四国の中央構造線の活動と連動していない。これらの活動は、隣接領域の活動により引き起こされたのではなく、独自の応力蓄積過程により発生した可能性が高いと考えられる。

山崎断層帯は、図5、6に示されたように、隣接領域の活動の影響を受けにくい geometry を持っている。山崎断層帯は、他の断層帯に比べて、規則正しい発生間隔を持つと考えられる。

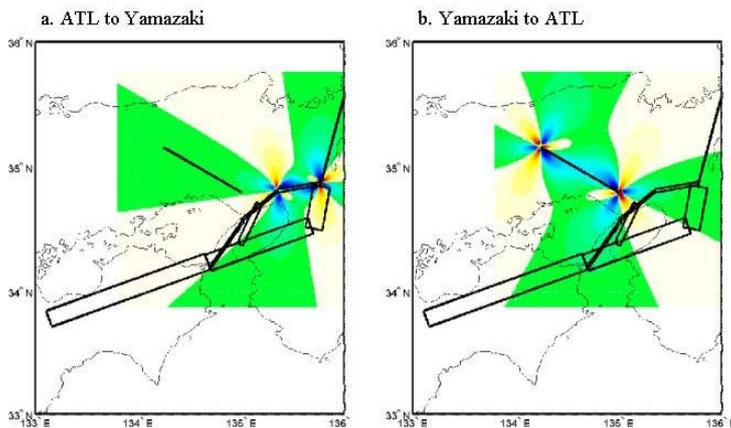


図5 山崎断層帯と有馬高槻断層帯の相互作用

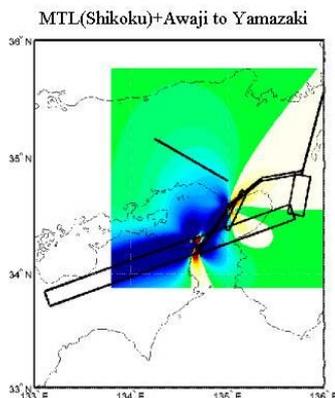


図6 四国の中央構造線(MTL)と淡路島断層帯がこの順番で活動したときの、山崎断層帯の geometry による  $\Delta CFS$  の分布

以上の結果は以下のようにまとめることができる。約千年頃前の有馬高槻断層帯と六甲・淡路・大阪湾断層系(実際にすべったのは大阪湾断層帯)の活動は独自の応力蓄積過程により発生した。それから約600年後の1596年に四国の中央構造線が動いたときに、六甲・淡路・大阪湾断層系(実際にすべったのは六甲・淡路断層帯)は、十分に応力蓄積していないにもかかわらず、再び動かされてしまった。隣接領域の断層運動により「横」から応力集中が生じたので、強度の弱い浅い部分ほどすべりやすいが、強度の大きい深部はすべり残しができた可能性がある。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。

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(Shikoku)	34.18	134.7	150	21.2	10	250	45	180
Awaji	34.8	135.35	40	15.1	3	231	84	180
Rokko	34.56	135.02	50	15.1	1	215	84	180
Osakawan	34.7	135.2	40	16.0	1	205	70	180
ATL	34.86	135.77	42.5	15.2	1	260	80	180
MTL(Kii)	34.47	135.7	97	21.2	1	250	45	180
Ikoma	34.52	135.625	38	21.2	1	10	45	90
Yamazaki	34.86	135.77	80	15	1	15	90	180

#### (d) 結論ならびに今後の課題

地震調査委員会によって新たに公表された活断層の評価結果を活用することにより、以下のように、昨年度の推定が妥当なものであることがわかった。約千年頃前、大阪湾断層帯は独自の応力蓄積過程により活動したため、約 600 年前に 1596 年に四国の中央構造線が動いたときに、六甲・淡路・大阪湾断層系は、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。そのため、強度の大きい深部にすべり残しが生じ。兵庫県南部地震が発生したというものである。

地震調査委員会による主要活断層の調査結果が公表され、近畿地方においても、活断層の活動履歴が明らかになりつつある。図 2 に、四国の中央構造線とその東・北東側の延長部に位置する活断層について活動履歴を示したが、個々の活断層毎に見ると、活動間隔は不規則であり、内陸大地震は一見でたために起こっているように見える。しかし、個々の活断層にとらわれず、全体の活動の推移を見ると、四国の中央構造線の活動と連動する特徴的なパターンが見られる。一方、そのような「横」方向のトリガーと関係なく、独自の応力蓄積過程により発生したと考えられる活動も見られる。つまり、内陸地震の断層への応力蓄積過程には、その断層に特有の(個別の)応力蓄積過程に加えて、隣接する断層のすべりによる(他からの)ものという 2 つの要因があるため、その活動が一見したところ不規則に見える場合があると解釈できる。

今後は、活断層の活動履歴を物理的に解釈することが重要である。誤差や見逃しなどがあるとしても、活断層の活動履歴の調査結果は大変貴重なデータである。これらのデータを活用することは、内陸大地震の断層への応力蓄積過程を解明する上で大変重要である。

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: 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, pp.99-116, 1997.
- 2) 地震調査委員会: 有馬-高槻断層帯の評価, 2000.
- 3) 地震調査委員会: 生駒断層帯の評価, 2000.
- 4) 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.
- 5) 地震調査委員会: 山崎断層帯の長期評価について, 2003.
- 6) 地震調査委員会: 上町断層帯の長期評価について, 2004.
- 7) 地震調査委員会: 大阪湾断層帯の長期評価について, 2005.
- 8) 地震調査委員会: 六甲・淡路島断層帯の長期評価について, 2005.
- 9) 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, pp.205-219, 2001.
- 10) 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, pp.93-108, 2003.
- 11) Kanamori, H and Andetson, D.L.: Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull.Seism.Soc.Amer., 65, pp.1073-1095, 1975.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等  
なし

(g) 特許出願, ソフトウェア、仕様・標準等の策定  
なし

(2-3) GEONET データより推定される 1996 年から 2004 年までの近畿地方の歪速度場の変化

小林知勝 (京都大学防災研究所)  
tkoba@rcep.dpri.kyoto-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

近畿地方では近年、2003 年 1 月頃から丹波山地での地震発生レートが明瞭に鈍化し始めるなど地震活動や地殻変動に変化が見られることが報告されている。こうした中、我々は国土地理院が展開する GPS 連続観測網 (GEONET) における近畿地方のデータを調べた。その結果、2003 年 1 月頃から各観測点で水平変動の向きに変化が現れることが認められた。さらに 2000 年 7~9 月にかけては時定数の長いイベントが確認でき、それを境にして変動の向きが変化していることを見つけた。近畿地方で見られるこれらの変化は、東に位置する観測点ほど顕著であり、東海地方で観測されるスロースリップの発生と時期

を同じにしている。そこで我々は、近畿地方及びその周辺の歪速度場を推定し、その変化を調べた。その結果、地震活動度の低下が注目される丹波山地では、面積歪速度が 2000 年以降減少し続けていることがわかった。さらに、柳ヶ瀬、養老、根尾谷断層を含む琵琶湖東部では歪速度の減少や主圧縮軸の向きの著しい変化が起こっていることがわかった。

## (b) 業務の実施方法

近畿地方の歪速度場を推定するため、まず始めに各 GEONET 観測点の水平速度を推定した。 $i$  番目の GEONET 観測局の成分  $n$  の日座標値  $x(t)$  を式 (1) のようにモデル化し、地震などの変動を除去して定常的な速度場を推定した。

$$x^{i_n}(t) = a^{i_n} + b^{i_n}t + \sum_{k=1}^m c^{i_n} H(t - t_0^k) + \sum_{k=1}^m d^{i_n} (1 - \exp(-(t - t_0^k)/\tau_k)) + \sum_{j=1}^M m^{i_n} H(t - t_0^j) + s^{i_n} \sin(2\pi t/365.25 + \phi_i) + E(t) \quad (1)$$

ここで、 $a$  は定数項、 $b$  は直線トレンドの係数、 $c$  は発震時  $t_0^k$  の地震によるコサイスマミックな変動、 $d$  は発震時  $t_0^k$  の地震の余効変動、 $s$  及び  $\phi$  は年周変動の振幅と位相、 $H(t)$  はヘビサイド関数である。本研究では 2001 年芸予地震のみ補正した。また、2002 年以降に行われたアンテナ交換などによる人為的ステップをヘビサイド関数で補正し、そのステップ量を  $m$  とする。 $E(t)$  はモデル化できない誤差である。全観測点の各成分に対して (1) 式をあてはめ、最小二乗法により各係数を推定して、 $b$  を平均的な定常速度として求めた。これらの推定には、国土地理院より公表されている GEONET の最終解析解 F2 を用いた。

歪速度の推定には Shen et al. (1996)<sup>1)</sup> で用いられた方法を適用した。この手法では、二次元平面上の任意の点とその周囲の観測点の水平速度 ( $U, V$ ) とを結ぶ観測方程式 (式(2)) を解くことで、計算点における水平速度 ( $u, v$ )、歪速度 ( $\dot{\epsilon}_{xx}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{xy}$ )、回転成分 ( $\omega$ ) を推定することができる。

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & 0 & \Delta y_i \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & -\Delta x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{xy} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon^{i_x} \\ \epsilon^{i_y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  は観測点と計算点との距離である。このとき式(3)で表されるような、計算点と観測点との距離に応じて観測データに距離減衰定数  $D$  というパラメータを用い、近傍の観測点ほど重みが大きくなるように調整できるガウス型の重みを与える。この定数により歪速度分布の平滑化の程度を調整することができる。

$$\dot{\epsilon}_{x,y} = \sigma^{i_{x,y}} \exp(\Delta R^2_i / 2D^2) \quad (3)$$

ここで  $\sigma$  は各観測点で推定された速度の誤差である。我々は今回、近畿地方に  $0.05^\circ$  間隔の計算点を配置し、距離減衰定数  $D$  を 25km とし、各計算点の歪速度を推定した。

本研究では、1996年3月～2000年6月(Prd I)、2001年1月～2002年9月(Prd II)、2003年4月～2004年8月(Prd III)の3期間を設定して、それぞれの期間の歪速度を推定して、その比較を行った。

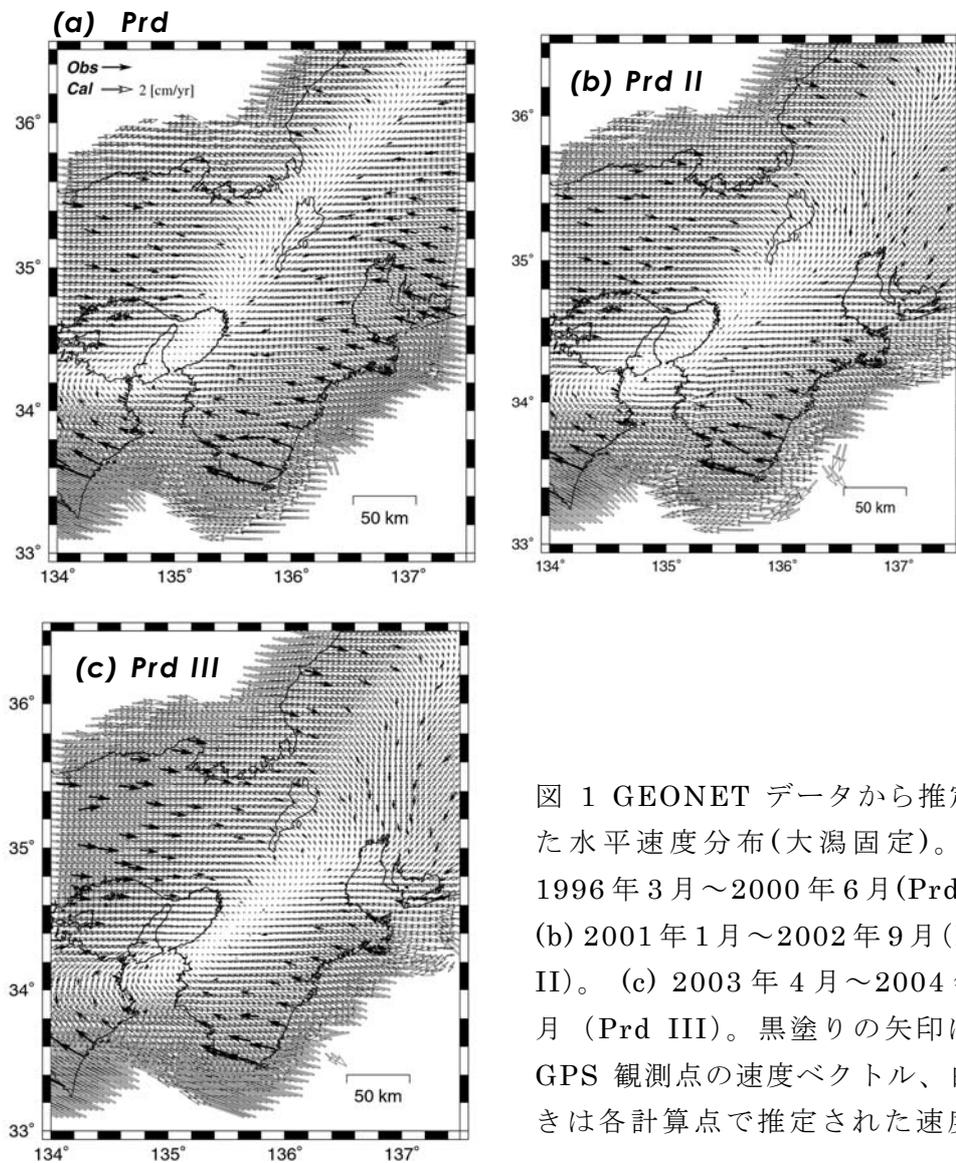


図 1 GEONET データから推定した水平速度分布(大潟固定)。(a) 1996年3月～2000年6月(Prd I)。(b) 2001年1月～2002年9月(Prd II)。(c) 2003年4月～2004年8月(Prd III)。黒塗りの矢印は各GPS観測点の速度ベクトル、白抜きは各計算点で推定された速度ベ

(c) 業務の成果

Prd I, II, IIIの各期間で推定された水平速度をそれぞれ図1(a), (b), (c)に示す。ここでは、新潟県大潟(950241)の観測点を固定点とした。いわゆる定常的な速度場と考えられるPrd Iの期間では、中部地方～敦賀～琵琶湖～有馬・高槻構造線～大阪湾にかけて、水平速度が終息する地帯が延びている。これらは、Sagiya et al. (2000)<sup>2)</sup>などで指摘される歪集中帯に相当するものであろうが、Prd IIではその速度の終息帯が南にシフトしていることがわかる。Prd IIIではさらに南にシフトし、その終息帯は中部地方～名古屋～琵琶湖南部～和歌山に位置するようになる。このような速度場の変化に対応して、面積歪速度、主歪速度、最大剪断歪速度場のそれぞれにどのような変化が起きたのかを以下に記す。

面積歪速度：Prd I, II, III の各期間で推定された面積歪速度をそれぞれ図 2 (a), (b), (c) に示す。近畿地方の面積歪速度は全域にわたり圧縮性の変化を示すが、Prd I から II にか

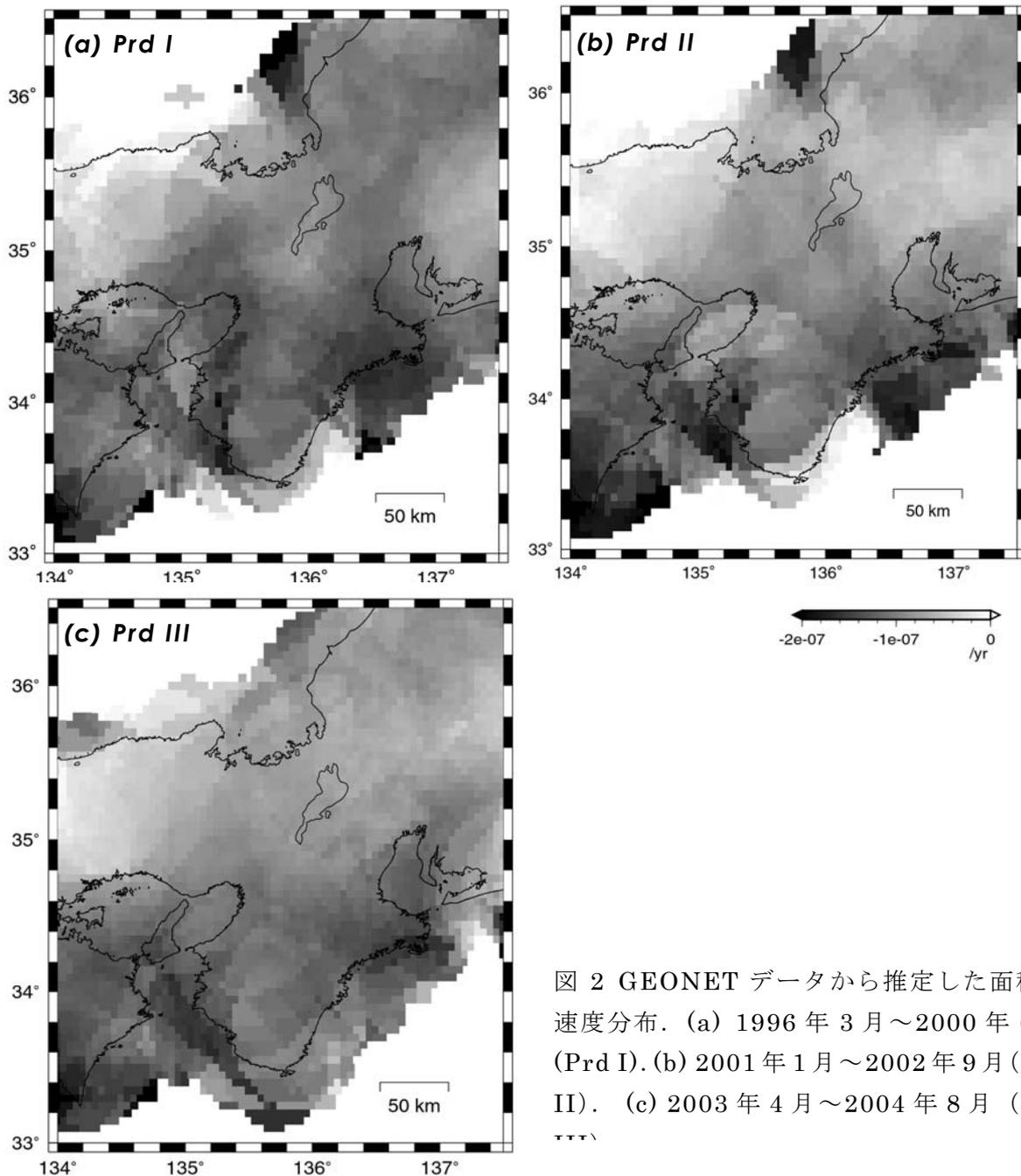


図 2 GEONET データから推定した面積歪速度分布. (a) 1996 年 3 月～2000 年 6 月 (Prd I). (b) 2001 年 1 月～2002 年 9 月 (Prd II). (c) 2003 年 4 月～2004 年 8 月 (Prd III)

けて近畿のほぼ全域にわたりその速度が数 10%減少し、圧縮性の変形が緩和していることが示唆される。変化量は Prd I から II に比べ小さいが、II から III にかけて琵琶湖東部などで歪速度がやや増加するのに対して、丹波山地では減少し、引き続き圧縮性の変形の緩和が継続することが示唆される。

主歪速度：Prd I, II, III の各期間で推定された主歪速度をそれぞれ図 3 (a), (b), (c) に示す。近畿地方の主歪速度は全域にわたり圧縮が卓越するが、面積歪速度同様、Prd I から II にかけて近畿のほぼ全域にわたり圧縮成分の速度が数 10% 減少する。特に柳ヶ瀬、養老、根尾谷断層を含む琵琶湖東部の減少が顕著である。さらに根尾谷断層付近では、北西-南東方向であった圧縮軸が東西方向に大きく向きを変えることも特徴である。また、名古屋周辺では、Prd I で北西-南東方向であった圧縮軸が Prd III では北東-南西方向

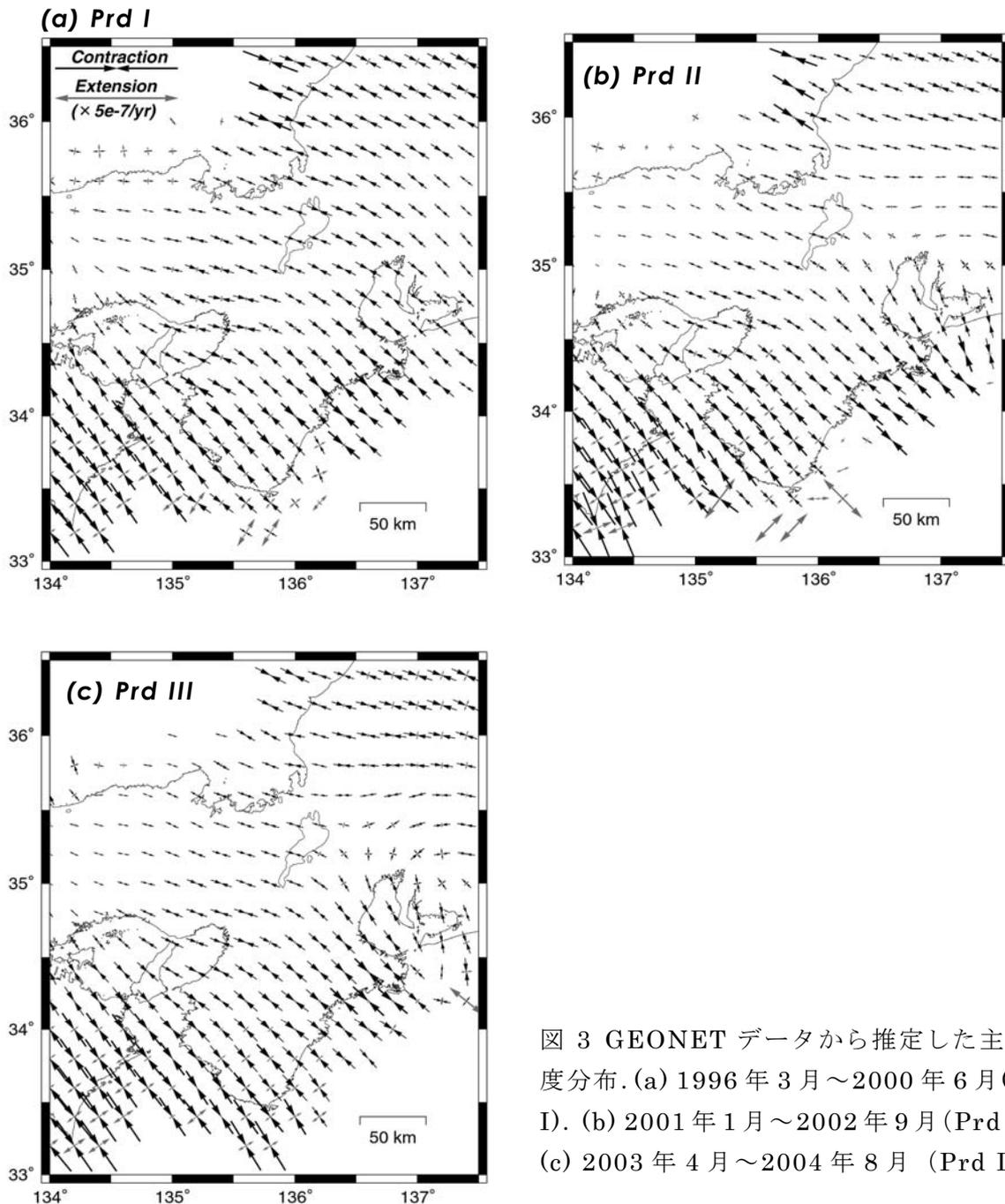


図 3 GEONET データから推定した主歪速度分布. (a) 1996 年 3 月～2000 年 6 月 (Prd I). (b) 2001 年 1 月～2002 年 9 月 (Prd II). (c) 2003 年 4 月～2004 年 8 月 (Prd III).

へと大きくその向きを変える。一方、紀伊半島南部では Prd I に比べて伸張成分が目立つようになる。Prd II から III にかけて丹波山地ではその速度が若干減少する。

最大剪断歪速度: Prd I, II, III の各期間で推定された最大剪断歪速度をそれぞれ図 4 (a), (b), (c)に示す。Prd I から II にかけて、神戸・姫路及び紀伊半島南西部ではやや増加を示すが、丹波山地を含む他の地域では減少を示す。特に琵琶湖東部から名古屋周辺の減少が顕著である。

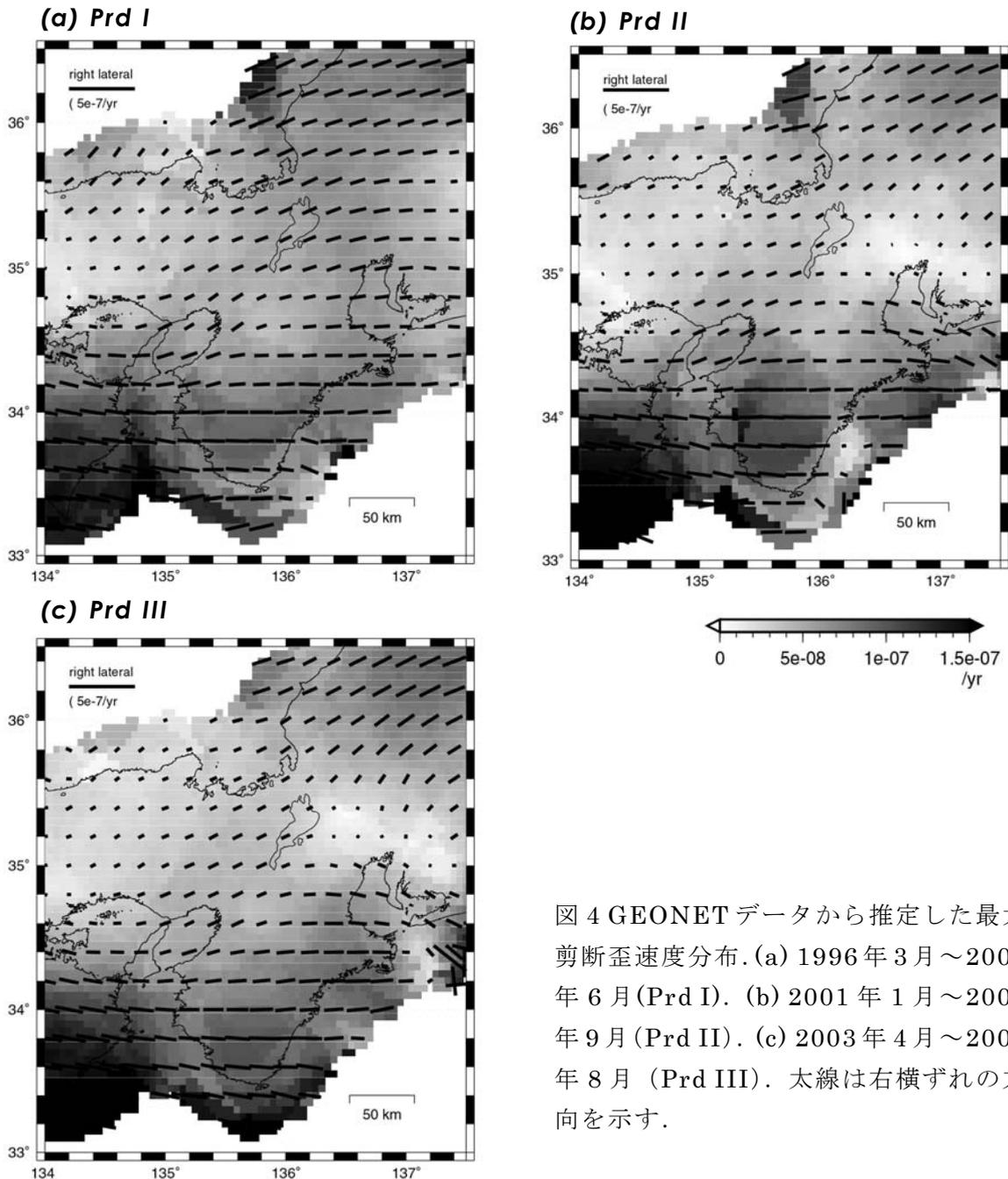


図 4 GEONET データから推定した最大剪断歪速度分布. (a) 1996 年 3 月～2000 年 6 月 (Prd I). (b) 2001 年 1 月～2002 年 9 月 (Prd II). (c) 2003 年 4 月～2004 年 8 月 (Prd III). 太線は右横ずれの方向を示す。

(d) 結論ならびに今後の課題

1996 年から 2004 年までの GEONET データを用いて、2000 年夏、2003 年初頭を境とする各 3 期間の近畿地方における歪速度場を推定した。その結果、地震活動度の低下が注目される丹波山地では 2000 年から歪速度が減少し、特に面積歪速度は 2003 年以降も減少し続けていることが確認できた。さらに、柳ヶ瀬、養老、根尾谷断層を含む琵琶湖東

部での歪速度の減少が著しいことも注目すべき点である。東海地方のスロースリップが近畿地方にまで影響し、歪速度場を大きく変化させている可能性があることが GEONET データの解析により示唆される。

東海地方では現在も非定常な変動が継続している。また、丹波山地での地震発生レートの低下現象も依然継続中である。今後の研究では、さらにデータを追加し、最近の歪速度場の変化や他の地域での地震発生レートを調べることなどによって、近畿地方及びその周辺の歪速度場の変化と東海地方のスロースリップとの関連をより詳細に調べていく予定である。

(e) 引用文献

- 1) Shen, Z., Jackson, D. D., and Ge, B. X.: Crustal Deformation Across and Beyond the Los Angeles Basin from Geodetic Measurements, J. Geophys. Res. Vol. 101, pp. 27,951-27,980, 1996.
- 2) Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T.: Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, PAGEOH, Vol. 157, pp. 2303-2322, 2000.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 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

時間スケール「分」から「時」のスロー地震を見いだすために、IRIS/IDA のグローバルな広帯域地震計記録に、長周期のバンドパスフィルターをかけ、世界中の観測点に1時間以内の時間差で共通に現れる同時異常を探したが、日本列島周辺のスロー地震は見出せなかった。しかし、思わぬ副産物が見つかった。広帯域地震計が、長周期側では周期 5000 秒まで、地球磁場の変化を忠実に捕らえていることが分かった。

(b) 業務の実施方法

過去 10 年間、様々な空間スケールのスロー地震が発見された。しかし、今までに発見されている限りでは、それらの時間スケールは、「日」、「月」、「年」のみで、「時」から「10分」の事件は無い。この問題は、沈み込み帯ダイナミクス理解にとっても、強震動予測

にとっても重要と思われる。ただし、このような事件によるシグナルは、基本的に、S-P時間が震源時間より長い、あるいは表面波が十分に発達する遠方の観測点でないと識別しにくい。そこで、IRIS/IDAのグローバルな広帯域地震計記録に長周期のバンドパスフィルターをかけ、世界中の観測点に1時間以内の時間差で共通に現れる同時異常を探した。

その結果、日本列島周辺のスロー地震は見出せなかったが、副産物として、太平洋南極海嶺に、1999年3月22日のMw5.8相当と、8月29日Mw5.7相当のスロー地震が見つかった。これらは、USGSなどの実体波による地震カタログには含まれるがHARVARDのCMTカタログにはない。

見いだされた同時異常の中に、2000年8月13日に、極めて理解しがたいものが存在した。その特徴は、卓越周期500秒程度の数サイクルの単純な波形で世界中で波形が互いによく似ていることと、世界中の観測点に10分以内にほぼ同時に出現することである。

もし地球内部の事件とすると、走時を説明するためには、震源は内核としか考えられない。そこで、内核のみに振動エネルギーを持つ2S2(1046-1065s)などのコアモードが励起されているかどうかを入念にチェックしたが、励起されていないと結論せざるをえなかった。CMBストーンレーモードも同様に見出せなかった。

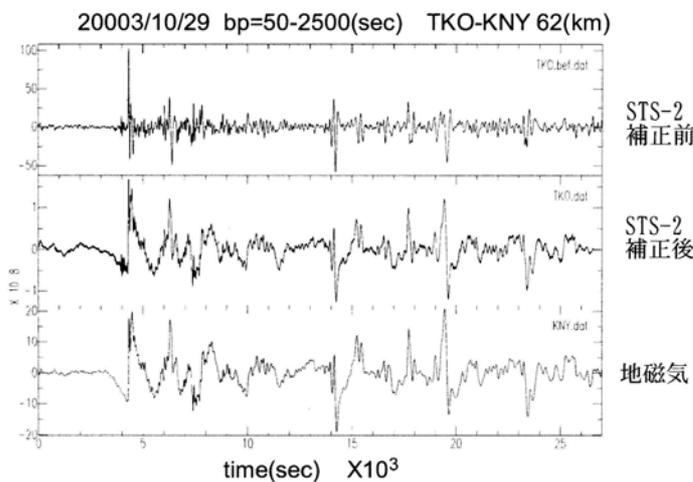


図1 TKOの記録について地震計の特性補正前(上段)と後(中央)の比較。下段はKNYの地磁気記録

地球深部から来るのでなければ、頭上から来ると考えるほかはない。世界中で、広帯域地震計が置かれた観測点と地球磁場観測点が近くにある、カナダのAlert、気象庁の柿岡(KAK、茨城県)とフリージアの足尾(ASI、栃木県)などの記録にバンドパスをかけて比較したところ、100秒から1000秒の周期帯で、互いにそっくりであった。地震記録と地磁気記録の類似性は、長周期側では5000秒にまで及ぶ。例えば、2003年10月29日の磁気嵐の場合、高岡(TKO、鹿児島県)の地震計はSTS-2であるが、地震計の特性をデコン

ボリューションして、2つの記録を比較したところ、図1のように非常によく似ていた。

そのほか、大地震前数ヶ月から数年の地球固体潮汐の主要分潮の振幅変化の検討も行った。その結果、地殻変動連続観測そのものに有意な変化が無くとも、主要分潮の振幅はシステマティックに変化しており、震源断層面での前兆滑りは無くとも、「場」の変化が起きていることが示唆された(Hirose et al., 2004)。

### (c) 業務の成果

日本列島周辺のスロー地震は見出せなかったが、副産物として、太平洋南極海嶺のM6クラスのスロー地震が見つかった。また、思わぬ副産物が見つかった。広帯域地震計が、長周期側では周期5000秒まで、地球磁場の変化を忠実に捕らえていることが分かった。

### (d) 結論、並びに今後の課題

- 1) 今年度のやり方では、沈み込み境界で発生しているかも知れないM6クラスのスロー地震は検出困難であることが分かった。
- 2) プレスリップは無くとも「場」の変化が生じている可能性が示された。今後は、電磁気学的変化を取り込む方法論を開発する必要がある。
- 3) 広帯域地震計が、周期5,000秒までの地球磁場変化を記録していることが分かった。観測点数の少ない地球磁場観測点を広帯域地震計で補う可能性が開けた。2)の目的のためには有利な状況である。

(e) 引用文献  
特になし。

(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
井戸悠・川崎 一朗・見野和 夫・小笠原宏	IRIS ネットワークの長周期地震計記録を用いたスロースリップイベントの検出の試み	地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会、主催：地球惑星科学合同大会運営機構	2004 年 5 月 11 日
丹保繁和・西 村宗・川方裕 則・川崎一朗	GEONET の GPS 水平成分と上下成分を用いた西南日本のすべり欠損分布	地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会、主催：地球惑星科学合同大会運営機構	2004 年 5 月 12 日
Hirose, I. and I. Kawasaki	Temporal Variations of Major Tidal Constituents Prior to Large Earthquakes	2004 Western Pacific Geophysics Meeting, 主催：アメリカ地球物理連合	2004 年 8 月 19 日
白玲・川崎一 朗・石川有三	DD 法と JMA カタログによる西南日本の地震の震源再決定	日本地震学会講演予稿集秋季大会、主催：地震学会	2004 年 10 月 24 日

(g) 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.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、に関して、昨年度に引き続き解析した。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。4)また今年度は新たな試み

として、重力時間変化による歪蓄積過程および地殻強度の空間分布の研究に着手した。

## (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、活断層、および重力時間変化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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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)<sup>3)</sup>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)<sup>4)</sup>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。そこで昨年度は、この手法を北米大陸西部のグレート・ベーズン地域に適用(解析領域: 500×500 km)の解析範囲しながら手法の検証及び開発を行い、(1)この地域の  $T_e$  は、方向によって6 km～11 kmの間を変化し、最も薄く求まる(強度の弱い)方向“最薄軸”は、過去(第三紀)に被った伸張運動の方向にほぼ一致、地域一帯に分布する正断層群の走行方向と直行する。(2)この地域の結果は、リソスフェアの曲げ剛性にして方向により最大6～7倍の違いを示唆する。等が明らかになった。

本年度はこれらの手法を日本列島における精査に応用する目的で検証を行った。解析領域(150×150 km)を移動することにより、結果がどう変化するかを検証を試みた。東北日本における予察的結果の例を図1に示す。

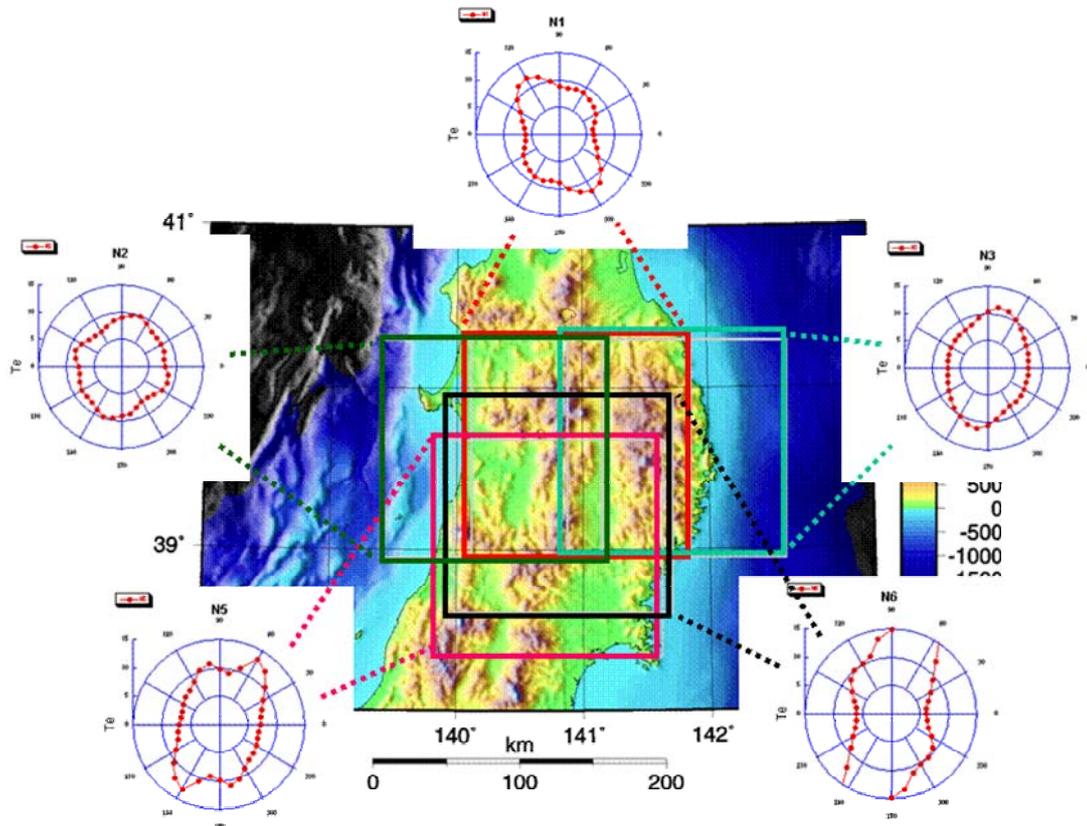


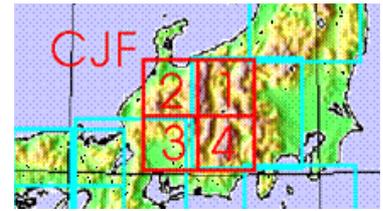
図1 東北日本における、有効弾性厚の異方性を示す極グラフ  
(単位 km、予察的解析例)。

この図は、方位による有効弾性厚の変化を、解析領域ごとに極グラフに表現したものである。東北日本は、大局的には南北方向に強度の高い軸が存在するように見えるが、西半部に異方性の弱い地域も見られる。このように、対象とする空間スケールを小さくすると、地域ごとに異なる特性が認められる可能性があるが、本解析は空間領域の長波長成分を用いた手法であるため、現時点ではこれ以上小さなスケールにおける検討は出来なかった。これまで本手法の水平分解能向上を試みてきたが、本件については今後の課題として残された。

#### 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)<sup>5)</sup>等による、MEM 法を用いた  $T_e$  推定法がある。昨年度よりこの手法を導入し、従来の手法との整合性を検討中である。図 2 に MEM 法を中部地方において試行した結果を示す。GPS 観測による新潟・神戸歪集中帯を含む解析区間では（図 2 の解析エリア 2）、周囲より強度が低い（より短波長側で coherence の立ち上がりが見られる）可能性が示唆された。

Area C JF(200 x 200 km)  
1-4(100 x 100 km)



Topography - Bouguer anomaly

Topography - SRBA

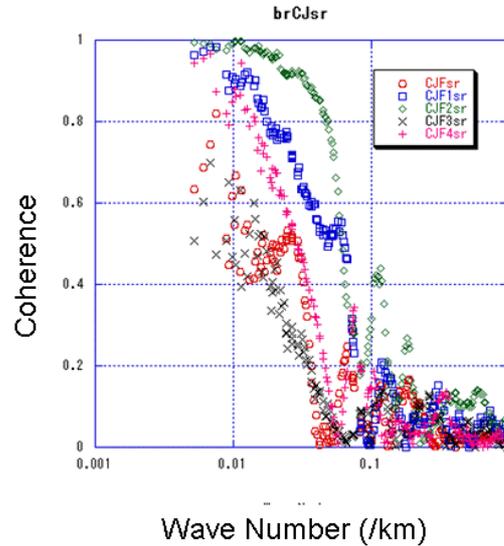
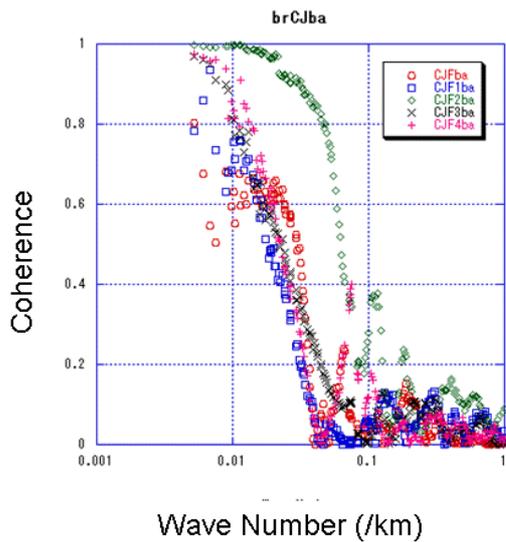


図2 MEM 法による coherence 分布。中部地方の予察的解析例 (□: 右上図の解析エリア 1、◇: 同 2、×: 同 3、+: 同 4、○: 1~4 全範囲の結果。)。 (左)ブーゲ異常と地形、(右)沈み込むプレートの重力効果(Furuse and Kono, 2003<sup>6)</sup>) を差し引いた重力異常と地形の coherence 分布。

## 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。

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<sup>7)</sup>と西南日本重力研究グループによるデータベース<sup>8)</sup>に収められている重力データを併せて使用した。さらに、参照する重力異常分布に関しても、いくつかの波長成分に分割して、それぞれの波長領域における roughness の変化を精査した。図 3（左上）に、西南日本における重力異常標準偏差の例を示す。

地震の規模  $M$  とその発生頻度  $n(M)$ には経験的に、

$$\text{Log } n(M) = a - bM$$

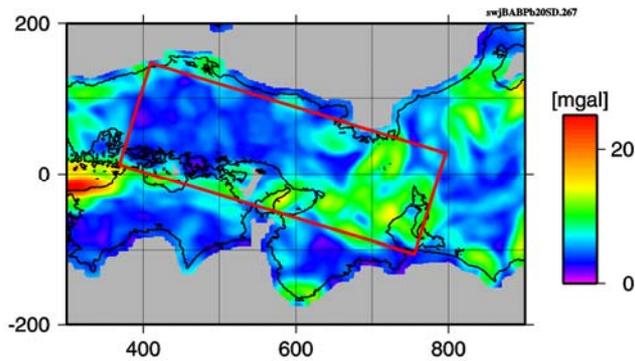
の関係がある（Gutenberg & Richter 式）。この式の  $b$  値は、（ある時空間範囲内に起こる地震の中で）より規模の大きな地震の発生頻度が高いほど低い値を示し、地域性が認められる。本研究では、過去に地殻変動による破壊を被った、ダメージの大きい地殻ほど、規模の大きい地震を起こしにくい（すなわち  $b$  値が大）と予測した。西南日本の上部地殻の  $b$  値の分布を図 2（左下）に示す。一方で、そのようなダメージの大きい地殻内の密度分布は不均質化され、重力異常 Roughness（例えば図 2（左上））が大きくなる傾向があると予測した。もし両者の予測が妥当かつ検出可能であれば、双方の値の空間分布は互いにある程度の相関を持つはずである。

双方の比較の結果、フィリピン海プレートと日本列島の地殻が接している前弧側（四国、紀伊半島など）を除くと、おおまかな関連が見られた。この結果によって、過去に地殻が被った破壊の度合いと今後起こりうる地震の規模との関係解明において、新しい視点が導入できると期待される。

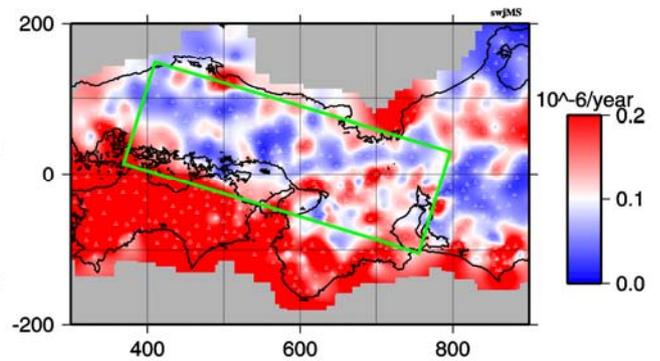
図 3 に、Nishimura and Hashimoto (2004)<sup>9)</sup>による最新の GPS 観測データに基づく最大せん断歪速度(右上)と Dilatation 速度(右下)の分布を示す。前節と同様、前弧側（四国、紀伊半島など）はフィリピン海プレートと日本列島の地殻が直接接して圧縮力を受けるため比較が困難であるが、近畿地方や能登半島の付け根～飛騨地方にも強い歪が観測されており、これらと重力異常標準偏差の高い部分に対応しているように見える。これらの対応は、過去に地殻が破壊・変形を受けた部分に現在も歪が蓄積されている可能性を示唆している。

### Bouguer anomaly standard deviation

(search radius: 20 km; high-pass WL: 150 km)

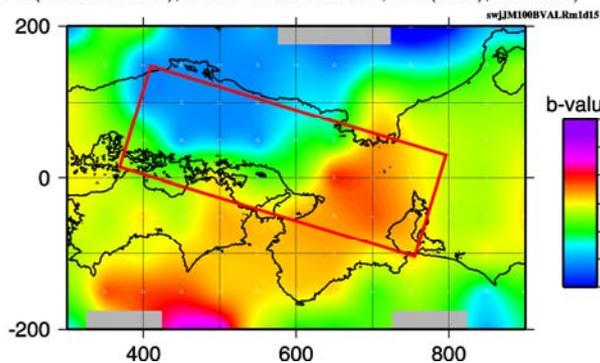


### Maximum shear strain rate



### b value

(JMA(2000.10-2003); search radius: 100 km;  $M \geq 1(0.95)$ ;  $D \leq 15$  km)



### Dilatation rate

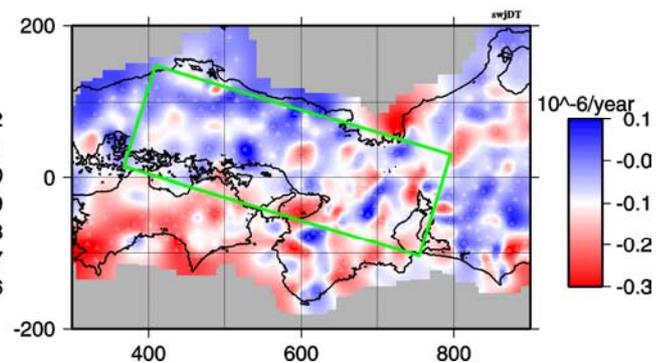


図3. 左上：重力異常標準偏差分布。左下：地殻内地震（気象庁震源カタログ 2000年10月～2003年、深さ15km以浅、マグニチュード1以上）のb値(最尤推定値)の分布。右上・右下：GPS観測データ（Nishimura and Hashimoto, 2004<sup>9)</sup>による最大せん断歪速度分布と、Dilatation速度分布。

昨年度の解析から、重力異常 Roughness と活断層・地形リニアメント（数十万年スケール）との対応が明らかになった。これにより、地形リニアメントに関連する地表の被破壊過程の議論を、地下方向、あるいは地表における証拠隠滅（風化、新規堆積物、火山噴出物などによる）が進んでいる地域へ広げるための一指標として、重力異常 Roughness が有効であることが示された。さらに GPS 歪データとの関連から、重力異常 Roughness が、数十年スケールの地殻変動に関与する地下の特性を間接的に捉えている可能性が示唆された。

### 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。東北日本の約1万千~5千年前の時期には、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。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。今回得られた断層頻度増加期は、世界的に約100mほどの海面上昇が起きた時期と一致している。よってその原因として海面上昇による地殻の応力変化を想定される。本研究ではその妥当性について検証を進めている。

#### 4) 重力時間変化による歪蓄積過程および地殻強度の空間分布推定に向けて

重力はその時間変化にも地殻の歪み具合や物性についての情報を含んでいる。地震に関連した地殻の変形はGPSにより数多く捕えられている。しかし、重力は地表面の上下変動に加えて、地下の密度変化にも応答する。密度変化の原因の1つが地震発生に伴う歪蓄積（または解放）過程である。それを捕えるには絶対重力測定を繰り返し行う事である（相対重力測定では、データの連続性失われた場合、不確定性が大きい）。しかしながら、地下水量変化に起因する重力効果の評価が一般には困難である。そこで、超深地層研究所用地に設置された多段式間隙水圧計の近くで重力観測を行い、間隙水圧変化と重力変化の関係を明らかにした。

地殻は潮汐により絶えず変形を受けている。重力を連続観測（この目的には相対重力計が適している）すれば、潮汐変化（重力潮汐）が記録される。しかし、観測値と理論値の間に差があり、それはローカルな地殻の弾性的性質を反映していると考えられる。Shukowsky et al. (1999)<sup>10)</sup>はこの差（彼らはM2分潮に特化したこれをTidal Gravity Anomalyと呼んだ）と有効弾性厚（重力異常と地形のコヒーレンス法）にリニアな関係を見出した。これに倣えば、日本のような領域の狭い範囲でもピンポイントで有効弾性厚を知る事ができ、Kudo et al. (2001)<sup>4)</sup>の分解能を上げる事が可能になる。今年度は文献調査のみを行った。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

本年度は昨年度に引き続き各小項目について、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、4) 重力変化と地殻の歪蓄積過程および地殻強度の空間分布を軸に研究を進める。

1)においては手法そのものの妥当性を再検証する（例えば、McKenzie, 2003<sup>11)</sup>）研究報告も提示されている。本研究においても日本列島に適用する上での問題点の整理、考察の再構築など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。

4)の変形過程では地下水量を重力変化でモニターする事が可能になった。今後長期的なデータの蓄積と独立した測位データとの比較により、地殻深部の密度変化検出が課題である。重力潮汐と有効弾性厚の関係については、重力連続観測データの取得に務め、解析手法の確立と既往文献との比較を行う。

最終的な課題は、上記1)、2)、3)および4)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合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: 100万分の1日本列島重力異常図, 東京大学出版会, pp.88, 1989.
- 2) 国土地理院: 数値地図 250mメッシュ(標高) CD-ROM版, 国土地理院, 1997.
- 3) Forsyth D. W.: Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 90, pp.12623-12632, 1985.
- 4) Kudo, T., Yamaji, A., Furumoto, M. and Nagao, T.: Effective elastic thickness of island arc lithosphere under Japan. *The Island Arc*, 10: pp.135-144, 2001.
- 5) Lowry, A. R. and Smith, R. B.: Flexural rigidity of the Basin and Range – Colorado Plateau – Rocky Mountain transition from coherence analysis of gravity and topography, *Journal of Geophysical Research*, 99, pp.20123-20140, 1994.
- 6) Furuse, N. and Kono, Y.: Slab residual gravity anomaly: gravity reduction due to subducting plates beneath the Japanese Islands, *Journal of Geodynamics*, 36, pp.497-514, 2003.
- 7) 地質調査所(編): 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査所, 2000.
- 8) Gravity Research Group in Southwest Japan (Representatives: Ryuichi Shichi and Akihiko Yamamoto): Gravity measurements and database in southwest Japan, Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9, 2001.
- 9) Nishimura, S. and Hashimoto M.: Strain Rate Field in and around the Kinki District Derived from the Continuous GPS Observation. submitted to *Earth Planets Space.*, 2004.
- 10) Shukowsky, W., Mantovani, M.S.M.: Spatial variability of tidal gravity anomalies and its correlation with the effective elastic thickness of the lithosphere, *Phys. Earth Planet. Inter.* pp.81-90, 1999.
- 11) McKenzie, D.: Estimating  $T_e$  in the presence of internal loads, *Journal of Geophysical Research*, 108(B9), 2438, doi:10.1029/2002JB001766, 2003.

(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 山本明彦 古本宗充 志知龍一	西南～中部日本における重力異常 Roughness の地域変化	地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会	平成 16 年 5 月
古本宗充	後氷期の海水準変動にともな った断層活動の活発化	地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会	平成 16 年 5 月
T. Kudo A. Yamamoto T. Nohara H. Kinoshita R. Shichi	Variations of gravity anomaly roughness in Chugoku District, Japan: Relationship with distributions of topographic lineaments.	Earth, Planets and Space, 56, e5-e8	平成 16 年 6 月
T. Tanaka H. Aoki	Absolute Gravity Measurement in Mizunami, Central Japan - Installation and Mysterious Gravity Change-	Western Pacific Geophysics Meeting	平成 16 年 8 月
T. Tanaka W. Salden Y. Asai Y. Fujita H. Aoki	The relationship between absolute gravity and pore water pressure variations at the Mizunami Underground Research Institute construction site, central Japan.	投稿中	平成 17 年 2 月

(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
重力異常 roughness 検出・表示システム	重力異常分布を入力し、解析範囲における分布の複雑さに関する諸指標の水平変化を表示し、結果の数値データを出力する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 17 年度業務計画案

平成 16 年度は、南海トラフ巨大地震発生サイクルの単純セルモデルの構築を行った。そこで平成 17 年度では、いよいよ内陸活断層と南海トラフ巨大地震の相互作用まで含めた単純セルモデルの構築に取り組みたい。このシステムは H15 年度に定式化を行って、H16 年度に均質半無限弾性体を仮定した簡単なセルモデルで、小数の内陸活断層で予備的な計算を試みている。H17 年度は、これを発展させ、GPS 観測から得られたブロックモデル変位速度場とフィリピン海プレート運動を駆動力として、南海トラフ巨大地震と内陸活断層での地震発生サイクルの単純セルモデルの弾性体バージョンを完成させ、両断層間相互作用を見積もる。

近畿地方の内陸地震の発生過程を明らかにするために、有限要素法により、歪蓄積過程をモデル化する。特に、下部地殻に存在すると考えられている、断層の深部延長とそれら

が集まって形成される **Weak zone** の変形に着目する。

時定数「10分」から「時」のスロー地震を検出する試みを継続すると共に、傾斜計記録も併用して、バックスリップ分布の分解能をあげる試みを行う。

sP など、depth phase を用いた南海トラフの地震の震源再決定を行い、**Kamiya and Kobayashi(2005)**などのトモグラフィのポアソン比の分布と比較検討し、アスペリティの物性について検討する。

平成16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、4)重力時間変化による地殻歪蓄積過程および地殻強度の空間分布の4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。