

3. 3. 1 3 断層の準静的モデルの構築と歪蓄積過程に関する研究

3. 3. 1 3. 1 活断層の準静的モデル

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：活断層の準静的モデル

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
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
高知大学理学部	教授	田部井隆雄	tabei@cc.kochi.ac.jp

(c) 業務の目的

明治以来蓄積されてきた測量データ及び最近の GPS 連続観測データ等測地学的データやテクトニクス観点に基づいて、活断層の固着領域や深部形状、さらにはすべり（欠損）速度等、動的断層パラメータ推定の元となる静的断層パラメータの推定を行う。

(d) 5 年の年次実施計画

- 1) 平成 14 年度：四国東部、山崎断層、紀伊半島などの既存の GPS 観測データを収集・整理し、均質媒質モデルを用いて、静的断層パラメータ推定のための preliminary な解析を行った。あわせて、測地データの新しいインバージョン解析手法の導入を行った。
- 2) 平成 15 年度：既存の GPS 観測データ（四国東部・西部、山崎断層、花折断層、紀伊半島、近畿地方 GEONET）の収集・整理および解析、新インバージョン手法の改良、不均質構造モデルによる予備的解析
- 3) 平成 16 年度：既存の GPS 観測データ（四国東部・西部、山崎断層、花折断層、紀伊半島、近畿地方 GEONET）の収集・整理および解析、新インバージョン手法の改良と既存データへの適用、不均質構造モデルによる予備的解析
- 4) 平成 17 年度：既存の GPS 観測データ（四国東部・西部、山崎断層、花折断層、紀伊半島、近畿地方 GEONET）の収集・整理および解析、新インバージョン手法の改良と既存データへの適用、不均質構造モデルの改良とこれによる解析
- 5) 平成 18 年度：既存の GPS 観測データ（四国東部・西部、山崎断層、花折断層、紀伊半島、近畿地方 GEONET）の収集・整理および解析、新インバージョン手法の改良と既存データへの適用、不均質構造モデルの改良とこれによる解析

(e) 平成17年度業務目的

平成17年度においては、近畿地方を中心とする西日本の測地測量データ、特にGPS連続観測データを整理し、最近の経年的な地殻変動の詳細な分布の特徴を調べる。さらに、この結果と合わせて、西日本の活断層分布や地震活動などテクトニクスを説明する運動学的モデルを提案する。また、不均質構造を考慮した計算の準備として、三次元地殻・上部マントル構造をモデル化し、これを用いた予備的な解析を行う。平行して、新しく開発した測地データのインバージョン手法の改良を行う。

(2) 平成 17 年度の成果

(2-1) 新しい地殻構造調査結果に基づく南海トラフ沿いにおけるプレート間カップリングの推定

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

近年、紀伊半島・四国及びその海域において地震波構造探査が精力的に行われ、プレート境界面の様子が明らかにされつつある。これまでの南海トラフ沿いのプレート間カップリングに関する研究では、スラブ内地震の震源の深さを基にプレート境界面を設定してカップリング率が推定されており、最近の調査で得られつつある新しいプレート境界面による再評価が求められる。そこで本研究では、新しい地殻構造調査結果を基にしてプレート境界面を再設定し、西南日本における GEONET データを用いて南海トラフ沿いのプレート間カップリングの空間分布を推定した。その結果、南海地震の想定震源域ではほぼ 100% のカップリング率が、東南海地震の想定震源域では 50~90% のカップリング率が推定された。さらに注目すべきは、過去の東南海・南海地震の震源域の境界領域であり、また 1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震の破壊開始領域でもある紀伊半島先端部沖でのカップリング率が 35% と推定され、その周囲より有意に固着が弱いことが示唆されることである。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ沿いのプレート間カップリングを評価するために、国土地理院が公開する GPS 連続観測データ (GEONET) から得られる水平速度を用いて、先験情報つきインヴァージョン手法によりプレート境界面上のすべり欠損速度を求めた。詳しい解析方法は以下の通りである。まず、西南日本に設置された各 GEONET 観測点 (131.0~138.5° E、32.8~35.8° N) の水平速度を求めた。本研究では、東海地方および豊後水道でのスローイベントの影響を避けるため、解析期間を 1998 年 1 月から 2000 年 5 月までの約 2 年間とした。この期間における n 番目の GEONET 観測局の成分 i の日座標値 $x(t)$ を次のようにモデル化することにより水平速度を推定した。

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + \sum_{k=1}^m c_n^i H(t - t_0^k) + d_n^i \sin(2\pi t/365.25 + \phi_n) \quad (1)$$

ここで、 a は定数項、 b は直線トレンドの係数、 c はアンテナ交換による人為的ステップ量、 d 及び ϕ は年周変動の振幅と位相、 $H(t)$ はヘビサイド関数、 $E(t)$ はモデル化できない誤差である。上記で設定した期間に、解析に影響を与えるような地震は起きなかったことから、本研究では地震によるコサイスマミックな変動は補正しなかった。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 を定常的な速度として求めた。インヴァージョンの際には、上記の方法で推定された水平速度を、Prawirodirdjo and

Bock (2004) ¹⁾によって推定された ITRF2000 系に対するアムールプレートの相対運動速度を利用してアムールプレート準拠に変換したものをを用いた。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 をを用いた。

すべり及びすべり欠損は、推定された各 GEONET 観測点の水平速度とプレート境界面上のすべりを結びつける観測方程式を最小二乗法により解くことで推定した。しかし本研究のように、プレート境界面が海域にも設置されるために解くべきモデルパラメータが観測網の外に存在し、かつパラメータ数も多い場合、一般的にインヴァージョンによる解は不安定になる。そこでこの不安定性を避けすべりが境界面上で滑らかになるように、本研究では先験情報つきインヴァージョンを行った。この際、次のような目的関数を最小化することにより、各断層面のすべりを求めることになる。

$$\mathbf{O} = (\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{m})^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{m}) + K^2 (\mathbf{p} - \mathbf{m})^T \mathbf{W}_a (\mathbf{p} - \mathbf{m}) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{m} 、 \mathbf{d} 、 \mathbf{p} 、 \mathbf{G} はそれぞれ、各断層面上のすべりベクトル、観測データベクトル、先験データベクトル、Okada(1985) ²⁾を基にしたグリーン関数マトリクスである。 \mathbf{W}_d 及び \mathbf{W}_a はそれぞれ観測データ及び先験データの共分散行列の逆行列であり、それぞれのデータにおける重み付けの役割を担う。 K はその重み付けの割合を決める係数であり、 K を決定するために我々は ABIC をを用いた (Akaike, 1980³⁾)。本研究において、ABIC は次のように定義される。

$$\text{ABIC} = M \log \mathbf{O}(K) - M \log K^2 + \log |\mathbf{G}^T \mathbf{W}_d \mathbf{G} + K^2 \mathbf{W}_a| + C \quad (3)$$

ここで N と M はそれぞれデータ及びモデルパラメータの数である。 C は K に独立な定数である。解析的に K を一意に決定することはできないので、数値的な繰り返し計算により ABIC が最小となる K を最適な値とした。

フィリピン海プレートとユーラシアプレート間のプレート境界面として、本研究では四国西部から東海にかけて 38 枚の矩形断層を設定した (図 1)。三好・石橋(2004) ⁴⁾は、気象庁一元化震源リストを用いて、沈み込むフィリピン海スラブの形状を推定したが、その際にスラブ内地震の震源分布の上面から約 5 km 浅い位置をフィリピン海プレートの上面としている。しかし、近年の紀伊半島及び四国における構造探査では、スラブ内地震の震源分布の上面より約 10 km 浅い位置に明瞭な境界面が確認され、この境界がフィリピン海プレートの上面と考えられている (梅田・他、2005⁵⁾; 伊藤・他、2005⁶⁾; 蔵下・他、2002⁷⁾)。そこで本研究では、三好・石橋(2004) ⁴⁾で得られたフィリピン海プレートの上面の深さをさらに 5 km 浅くしたモデルを参考にして、新たなプレート境界面の設定を行った。本研究で使用した各断層面の位置、走向、傾斜角は表 1 に示される。

インヴァージョンの際の先験情報として、Miyazaki and Heki (2001) ⁸⁾によるアムールプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動速度 6.5 cm/yr (N55° W) をを用いた。ただし、温度構造を考慮して、深さ 25 km までの断層面にはプレート速度の 100%、深さ 25-35 km には 50%、それより深部ではカップリング無しとした先験情報をそれぞれの断層面に与えた。

(c) 業務の成果

推定されたすべり欠損速度を図 1 に示す。緑の矢印が推定されたすべりで、海へ向かっているものはすべり欠損を示す。陸域の赤と青矢印は、それぞれ観測及び計算水平速度で

ある。誤差楕円は 1σ である。推定されたすべり欠損速度は以下の通りである。四国沖(断層番号: 19~22)では、すべり欠損速度は 4.8~6.2cm/yr と推定される。図 2 は、Miyazaki

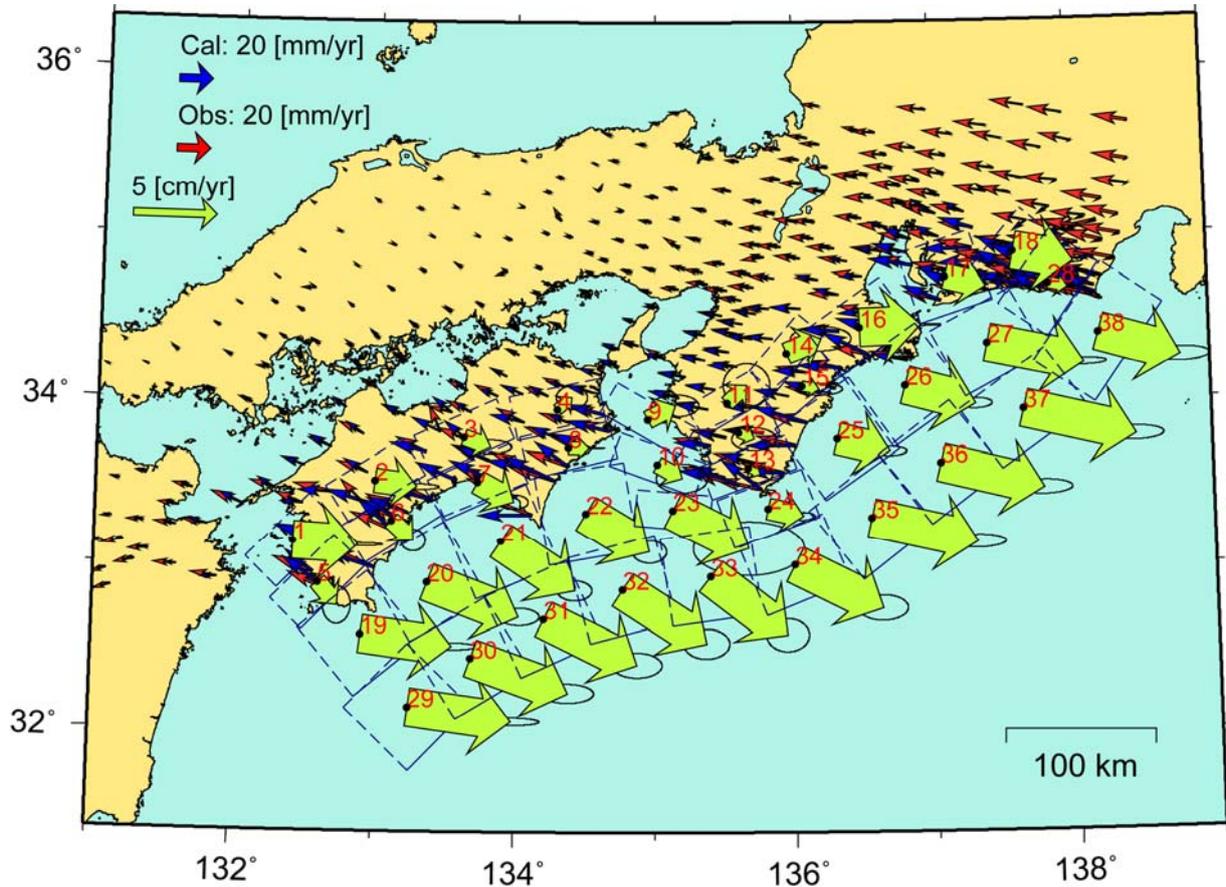


図 1 GEONET データから推定されるすべり欠損速度 (緑矢印) と観測 (赤矢印) 及び計算水平速度 (青矢印)。ただし、すべり欠損をプレートの沈み込み方向と逆向きに表現するため、推定されたすべり角とは 180° 反対方向に矢印を描いてある。破線の矩形は、プレート境界面上に仮定した矩形小断層を示す。破線矩形内の数字は小断層の番号。誤差楕円は 1σ 。

and Heki (2001)⁸⁾によるアムールプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動速度 6.5cm/yrを用いて計算した、プレート境界面上のカップリング率である。寒色系はカップリング率が強いことを示す。南海地震の想定震源域に相当する四国沖では 75~95%のカップリング率となり強い固着が示唆される。四国沿岸部直下のプレート境界面(断層番号: 5~8)では、1.3~2.6cm/yrのすべり欠損が推定され、カップリング率は 20~40%と固着は半分以下に弱まる。一方、東南海地震の想定震源域である、紀伊半島南東部沖(断層番号: 25、26、27)では 3.3~6.0cm/yrのすべり欠損速度が見積もられ、東側のセグメントほどその速度は大きい。渥美半島沖のセグメント(断層番号: 27)では、93%と強い固着が示唆されるが、紀伊半島南東部沖(断層番号: 25、26)では、カップリング率が 50~70%となり、南海地震の予想震源域よりその固着は弱いことが示唆される。紀伊半島直下のセグメントのうち、深さ 20~35kmの断層面(12、13、15)では、すべり欠損速度が 1cm/yr前後に見積もられる一方で、深部まで伸びるセグメントでは 2cm/yrとやや大きく、その向き

表1 設定した断層パラメータと推定されたすべり量及びそのすべり角。断層の位置は、各矩形小断層の中心の位置を表す。

Fault Number	Latitude [°]	Longitude [°]	Depth [km]	Strike [°]	Dip [°]	Rake [°]	Slip [cm/yr]
1	33.15	132.42	29.0	224	12.0	310.5	4.0
2	33.52	133.00	29.0	237	12.0	318.2	2.6
3	33.79	133.63	29.0	245	12.0	311.3	1.8
4	33.96	134.30	29.0	258	12.0	33.5	1.2
5	32.90	132.60	22.5	224	12.0	259.4	2.1
6	33.28	133.12	22.5	237	12.0	279.5	2.0
7	33.52	133.73	22.5	245	12.0	301.6	2.6
8	33.73	134.38	22.5	256	12.0	344.8	1.3
9	33.90	134.95	30.0	300	23.5	61.6	2.0
10	33.63	135.02	21.0	290	18.5	345.7	1.8
11	34.00	135.52	42.0	240	25.0	17.6	1.8
12	33.82	135.60	31.0	245	25.0	308.3	1.1
13	34.30	135.95	41.5	220	25.0	336.8	2.3
14	34.10	136.06	30.5	230	25.0	306.3	1.1
15	34.45	136.48	30.0	235	12.0	327.3	3.7
16	34.75	137.10	22.5	252	8.0	324.9	2.6
17	34.90	137.60	21.0	220	10.0	296.7	3.7
18	33.61	135.67	22.0	250	17.5	306.0	0.9
19	32.59	132.91	16.0	230	6.0	311.3	5.7
20	32.91	133.38	16.0	240	6.0	305.8	6.2
21	33.16	133.90	16.0	247	6.0	298.4	5.8
22	33.33	134.51	16.0	260	6.0	314.1	4.8
23	33.35	135.13	15.0	275	9.0	333.6	5.4
24	33.36	135.81	15.5	250	9.0	325.1	2.2
25	33.78	136.31	20.0	235	10.0	308.3	3.3
26	34.10	136.80	20.0	235	9.0	306.5	4.5
27	34.35	137.40	16.0	242	8.0	317.0	6.0
28	34.70	137.85	15.5	215	9.0	290.1	1.2
29	32.15	133.25	10.0	224	6.0	305.1	6.5
30	32.45	133.69	10.0	238	6.0	305.0	6.6
31	32.69	134.21	10.0	245	6.0	304.6	6.7
32	32.87	134.77	10.0	255	6.0	307.2	6.6
33	32.95	135.40	9.0	262	7.0	309.2	6.4
34	33.02	136.00	9.0	248	9.0	306.8	6.3
35	33.30	136.55	10.0	232	10.0	306.2	6.8
36	33.63	137.05	10.0	233	10.0	306.0	6.6
37	33.95	137.65	9.0	235	9.0	308.2	7.1
38	34.40	138.20	8.0	215	11.0	284.8	5.3

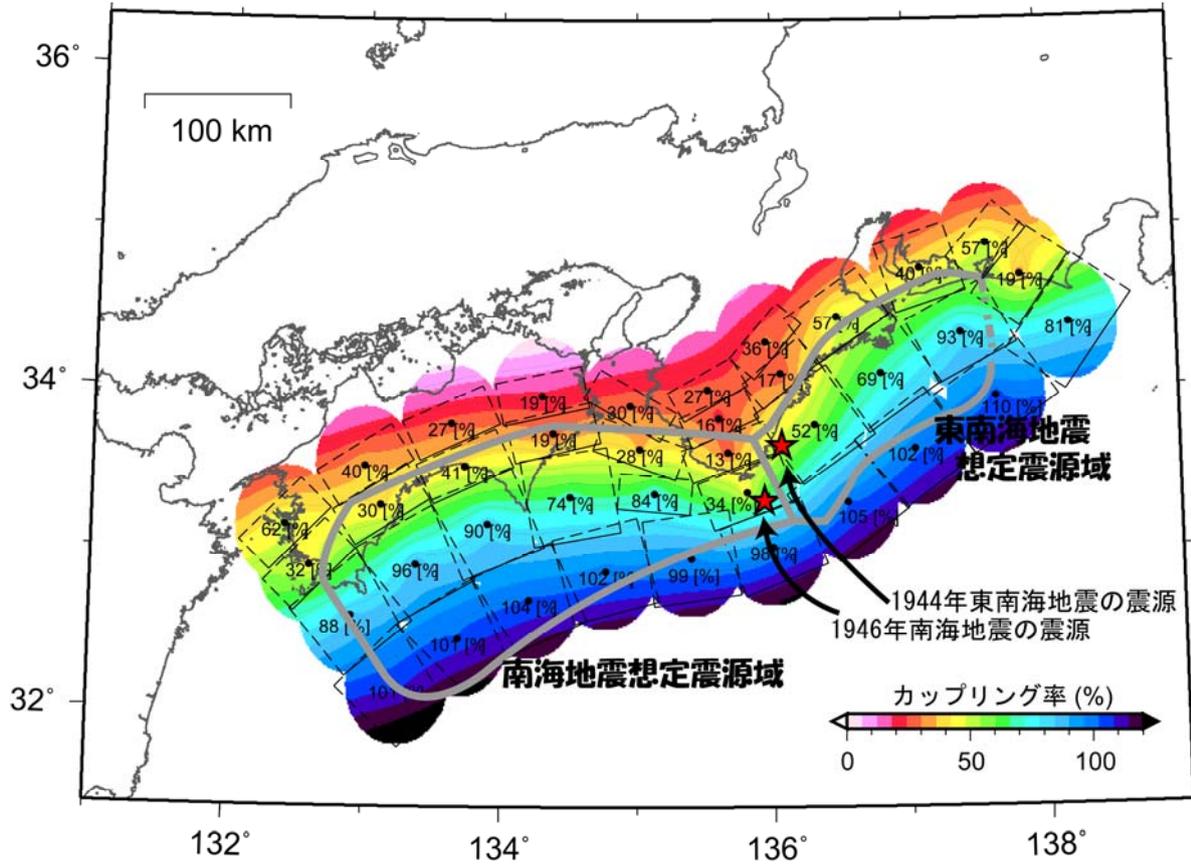


図2 プレート境界面上のカップリング率の空間分布。灰色の枠線で囲まれた領域は、東南海/南海地震の想定震源域を示す。星印は 1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震の震源を示す。

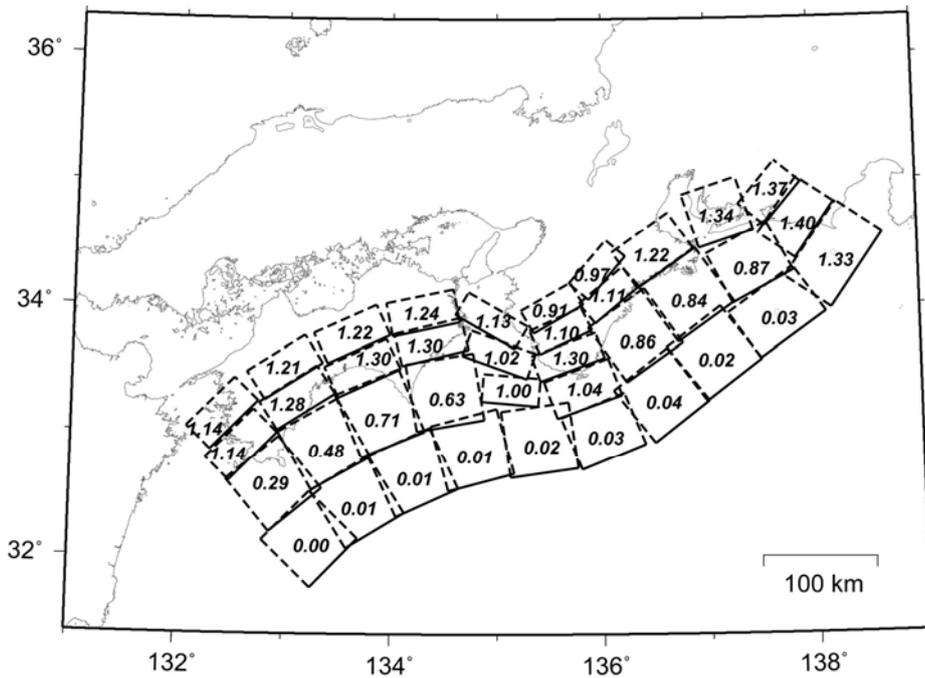


図3 各プレート境界面の解像度。断層面上の数字は解像度を示す。

もプレートの沈み込む方向と約 90° 異なる。高温の深部での強いカップリングは期待しにくいことから (Hydnman et al., 1995⁹⁾)、橋本・他 (2005)¹⁰⁾が指摘するようにプレート間カップリング以外の要素、例えば西日本外弧の剛体運動の影響などが考えられる。

さらにすべり欠損の空間分布で注目すべき点は、紀伊半島先端部沖ですべり欠損速度がその周囲より低く推定されることである。四国沖及び紀伊半島沖においては、 $3.3\sim 6.2\text{cm/yr}$ のすべり欠損速度が求められる中、両隣のセグメントと同程度の深さである潮岬沖のセグメント (断層番号: 24) では 2.2cm/yr という低い速度が推定される。そのカップリング率は 35%となり、プレート間の固着が周囲より弱いことが示唆される。図 3 は、本インバージョン解析における各断層面の解像度を示したものである。ここに示す解像度は、解像度行列の対角成分から得られる各断層面の slip 方向と dip 方向の解像度の二乗和の平方根と定義した。推定された潮岬沖の小断層番号 24 の解像度は 1.0 と周囲の解像度と比べても低くはなく、推定されたすべり欠損速度は有意な情報を持つと考えられる。

このように紀伊半島先端部直下においてすべり欠損が相対的に小さく推定されることは、先行研究の結果でも見られる。例えば、解析手法や観測データの期間がほぼ同じ Miyazaki and Heki (2001)⁸⁾においても同様に、南海・東南海地震の予想震源域ではフィリピン海プレートの速度とほぼ同じすべり欠損速度 $6\sim 7\text{cm/yr}$ が得られている一方で、紀伊半島先端沖では $4\sim 5\text{cm/yr}$ と相対的に小さく見積もられている。粘弾性媒質を考慮した Ito and Hashimoto (2004)¹¹⁾においても、紀伊半島先端でその東西両隣の領域よりも相対的に小さいすべり欠損が得られている。橋本・他 (2005)¹⁰⁾では、2001~2004 年に紀伊半島に展開された稠密 GPS 観測データを加えて半島下のすべり欠損速度を推定したが、本研究とはデータ期間が異なる場合においても同様に潮岬沖及びその直下のセグメントでは相対的に小さなすべり欠損速度が得られている。

このように本研究において、新しい地殻構造調査結果に基づいてプレート境界面を再設定することで、紀伊半島先端部でのカップリング率が小さいことがより明瞭に確認することができた。紀伊半島先端部は、過去の東南海・南海地震の震源域の境界領域であり、また 1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震の破壊開始領域でもあることから (図 2)、南海トラフ沿いに起こる巨大地震の発生メカニズムを考察する上で重要な位置である。本研究の結果は、カップリングの弱いセグメントの存在が、巨大地震を引き起こす断層運動を規定している可能性を示唆しているのかもしれない。

(d) 結論ならびに今後の課題

西南日本の GEONET データによる水平速度を用いた先験情報つきインバージョン解析により、南海トラフ沿いのプレート間カップリングの推定を行った。その結果、南海地震の想定震源域ではほぼ 100%のカップリング率が、東南海地震の想定震源域では 50~90%のカップリング率が推定された。さらに注目すべきは、過去の東南海・南海地震の震源域の境界領域でありかつ 1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震の破壊開始領域である紀伊半島先端部沖で、カップリング率が 35%とその周囲より有意に低く推定されることである。この結果は、カップリングの弱いセグメントの存在が、巨大地震を引き起こす断層運動を規定している可能性を示唆しているのかもしれない。今後、GEONET データに四国及び近畿地方で行われた稠密 GPS 観測データを加えた再解析を行い、より詳細なプレ

ート間カップリングの時空間分布を把握することが課題の1つとなる。

謝辞：本解析にあたり、国土地理院の GEONET データを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

(e) 引用文献

- 1) Prawirodirdjo, L. and Bock Y.: Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observation, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, doi: 10.1029/2003JB002944, 2004.
- 2) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 3) Akaike, H.: Likelihood and bayes procedure, in *Baiesian Statistics*, edited by Bernardo, J. M., DeGroot, M. H., Lindley, D. V. and Smith, A. F. M. University Press, Valencia, Spain, 143-166 pp, 1980.
- 4) 三好崇之, 石橋克彦: 震源分布から見た伊勢湾から四国西部にかけてのフィリピン海スラブの形状, *地震*, Vol.57, pp.139-152, 2004.
- 5) 梅田康弘・他: 近畿圏大深度弾性波探査(新宮-舞鶴測線)大都市圏大震災軽減化特別プロジェクトI地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」平成16年度成果報告書, pp.19-112, 2005.
- 6) 伊藤潔・他: 新宮-舞鶴測線地殻構造探査に基づく地震波反射面とフィリピン海プレート, 日本地震学会講演予稿集2005年度秋季大会, B018, 2005.
- 7) 蔵下・他: 四国東部地域における地殻及び最上部マントルの地震波速度構造と沈み込むフィリピン海プレートの形状, *地震*, Vol.54, pp.480-505, 2002.
- 8) Miyazaki, S. and Heki K.: Crustal velocity field of southwest Japan: subduction and arc-arc collision, *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.4305-4326, 2001.
- 9) Hydmann, R. D. and Wang, K.: Thermal constraints on the seismogenic portion of the southwestern Japan subduction thrust, Vol.100, pp.15373-15392, 1995.
- 10) 橋本学, 尾上謙介, 大谷文夫, 細善信, 藤田安良, 佐藤一敏, 瀬川紘平: 紀伊半島ヒンジライン GPS 観測: プレート間カップリングと2004年紀伊半島南東沖地震, 京都大学防災研究所年報, No. 48, pp.157-166, 2005.
- 11) Ito, T. and Hashimoto, M.: Spatiotemporal distribution of interplate coupling in southwest Japan from inversion of geodetic data, *Geophys. Res.*, Vol.109, doi: 10.1029/2002JB002358, 2004.

(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