南海トラフ沈み込み帯前弧陸域での応力場変遷：熊野市井内浦および紀北町海山観測点コアをきる断層面を用いて

Stress history in the forearc region of the Nankai trough subduction zone: paleostress analysis based on faults in core samples from the Kumano Ichiura and Kihoku Miyama sites, Kii Peninsula, SW Japan

Abstract

大坪 誠* 重松紀生** 北川有一**
小泉尚嗣**

Makoto Otsubo*, Norio Shigematsu**,
Yuichi Kitagawa** and Naoji Koizumi**

2008年3月17日受付.

2009年3月5日受理.

* 産業技術総合研究所地質情報研究部門
AIST/GSJ, Institute of Geology and Geoinformation,
Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi,
Tsukuba, Ibaraki, 305-8567, Japan

** 現所属：産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

present address; AIST/GSJ, Active Fault and Earthquake Research Center, Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567, Japan

Corresponding author; M. Otsubo,
otsubo-m@aist.go.jp

We determined the stress history in the forearc region of the Nankai trough subduction zone by examining boreholes at the Miyama and Ichiura observation wells, located on the northern and southern margins of the northern unit of the Kumano Acidic Rocks, respectively, eastern Kii Peninsula, SW Japan. To estimate paleostress, the multiple inverse method was applied to fault planes identified within the core samples; to estimate the present-day stress, the borehole breakout method was used. The results obtained using the multiple inverse method indicate that the two observation wells have similar stress histories, involving E-W compressive stress followed by NE-SW extensional stress and finally N-S compressive stress. The present-day maximum horizontal compressive stress (σ_{hmax}) at the Miyama observation well trends E-W, consistent with the present-day regional stress in SW Japan and different from the final stage of stress determined by the multiple inverse method. The present-day σ_{hmax} at the Ichiura observation well trends NNE-SSW, similar the final stage of stress determined by the multiple inverse method. These findings indicate that the boundary between the areas of E-W compressive stress (characteristic of SW Japan) and N-S compressive stress (influenced by subduction of the Philippine Sea Plate) has gradually migrated southward over time.

Keywords: stress, fault, stress inversion, borehole core, earthquake, Miocene, Kumano Acidic Rocks, Kii Peninsula, SW Japan

はじめに

西南日本の南海トラフ沈み込み帯 (Fig. 1) では、沈み込むフィリピン海プレートとその上盤側のユーラシアプレートの間で、マグニチュード8規模の巨大地震 (南海・東南海地震) が繰り返し発生している (例えば, Ando, 1982; Hyndman et al., 1995). 将来の発生が予測されている巨大地震の発生メカニズムを考える際には、東南海・南海トラフ近傍の前弧陸域での詳細な応力場の理解は有用である。

現在の日本列島ではE-W方向の圧縮場が支配的であり、東北日本では逆断層、中部～西南日本では横ずれ断層、九州では横ずれ断層と正断層が活動している (活断層研究会編, 1991). 南海トラフでは海溝付加体が成長しつつあり、水平圧縮変形ないしトランスプレッションの変形が進行している (Fig. 1, Tokuyama et al., 1999; Park et al., 2002). GPSなどの地殻変動観測から、プレート収束に平行な方向の短縮歪み場が報告され (例えば, Sagiya et al., 2000), フィリピン海スラブは上盤側と強くカップリングしていると考えられている (Le Pichon et al., 2002).

しかし、プレート上盤側の応力場は単純ではない。東海沖

Fig. 1. Map showing the forearc region of southwest Japan (modified from Sugiyama, 1994). The motion of the Philippine Sea plate with respect to Eurasia is indicated by arrows. MTL is the Median Tectonic Line.

から志摩半島沖にかけて広がる大陸棚に注目すると、前弧海盆堆積物が正断層群に切られているなど、南海～東海地域にかけての前弧陸棚部での伸張場の存在が分ってきた (猪間・佐々木, 1979; Park et al., 2002). 東海地域陸域においても、

掛川層群を切る小断層から、2 Ma 以降のトランステーションの応力場の存在が報告されている (Yamaji et al., 2003). 彼らは、地質学的時間スケールで見れば沈み込みプレートの上盤側の前弧域 (前弧ウェッジ) では容易に応力場が変化する可能性があるとして述べている。

南海・東南海地震発生域に近い熊野沖南海トラフ沈み込み帯前弧陸域では、前弧ウェッジは地質学的時間スケールにおいてどのように挙動しているのだろうか？しかし、熊野沖に近い紀伊半島南東地域には、地質図規模の活構造は存在しない (例えば、活断層研究会編, 1991). また、現在と同様のプレート配置となった後期中新世以降の応力状態を記録していると期待される鮮新統および第四系がこの地域では欠如している。

産業技術総合研究所は、東南海・南海地震の予測を目的とした地下水等観測点の整備掘削工事を西南日本の前弧域において 2006 年度から行っている。この中で、中新統熊野酸性火成岩類北岩体 (荒牧・羽田, 1965) の 2 箇所から、小断層の多数発達したボーリングコアが得られた (Fig. 2). ボーリングコアは地表まで上昇して来る際の応力変化をこうむっていないため、地下の応力変化のみを記録している可能性がある (例えば, Martin and Bergerat, 1996; Villaescusa et al., 2002; Yamada and Yamaji, 2002).

本研究では、南海トラフ沈み込み帯前弧域における 15 Ma 頃から現在にかけての応力場変遷を調べるため、熊野酸性火成岩類の北岩体 2 箇所を得られたコアを切る断層面から取得した断層スリップデータに応力テンソルインバージョンの 1 つである多重逆解法 (Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006) を適用し、不均一な断層データ群から複数の応力場を抽出した。また、同一断層面上の複数の条線の重複関係を用い、各応力場の新旧関係を決定した。さらに、これらの結果をボアホールブレイクアウトから求められた現在の応力場と比較した。

地 質 概 説

熊野酸性火成岩類 (以下熊野酸性岩類) は、体積が約 300 km³ に達する大規模な珪長質火山—深成複合岩類である (Fig. 2, 荒牧・羽田, 1965). 荒牧・羽田 (1965) により広域的な地質が明らかにされ、これ以降多数の研究者により調査研究が行われている (Miura, 1999; 星ほか, 2004; 川上・星, 2007 など). 熊野酸性岩類は、中新統四万十累層群 (付加体), 下部～中部中新統熊野層群 (棚井・水野, 1954), および尾鷲層群 (Araki, 1958; Honda, 1992) の上位に分布し、下位から神ノ木流紋岩, 流紋岩質凝灰岩類, 花崗斑岩の 3 相からなり、分布面積の約 85 % を花崗斑岩が占める (荒牧・羽田, 1965). 主岩相の花崗斑岩は、尾鷲市～熊野市にかけて分布する北岩体と、新宮市周辺に分布する南岩体に大別される (荒牧・羽田, 1965).

熊野酸性岩類は中新世のカルデラ形成を伴う大規模な珪長質火成活動により形成され (Miura, 1999; Kawakami et al., 2007), 地殻応力場とカルデラ形成との関係も論じられている (三浦, 2000; Miura, 2005; Miura and Wada, 2007; 三浦・

Fig. 2. (a) Geologic map of Miocene igneous rocks of the south-eastern Kii Peninsula, compiled from Aramaki and Hada (1965), Ministry of International Trade and Industry (1989), Tokuoka et al. (1982), Miura (1999), and Kawakami and Hoshi (2007). The study sites (Miyama and Ichiura) are marked by open circles. (b) Geologic cross section around the Miyama site after Hoshi et al. (2004) and Kawakami and Hoshi (2007), and (c) that around the Ichiura site modified from Aramaki and Hada (1965).

和田, 2007). 北岩体のカルデラ北縁の外壁に沿っては、幅 1～3 km の花崗斑岩の環状岩脈が発達する。ここから噴出した火砕流堆積物が南側のカルデラ内部を埋めた後、火砕流堆積物で埋積されたカルデラ内部に向かってマグマがシート状に貫入し、花崗斑岩の主体部を構成したものと考えられている (Kawakami et al., 2007; 川上・星, 2007). なお、熊野酸性火成岩類の K-Ar 年代測定およびフィッション・トラック年代測定により、15–13 Ma の年代が得られている (角井ほか, 1998; 岩野ほか, 2007).

熊野地域の古地磁気方位については田上 (1982), 星

Fig. 3. Photographs of striations on fault planes in borehole cores. (a) Fracture step, (b) Comet mark, (c) Accretion step “slicken fiber” of calcite vein and (d) Overlap of striation. Arrows indicate the slip direction.

(2002), および星ほか (2004) が報告している. 田上 (1982) によると, 熊野酸性岩類の最下部神ノ木流紋岩は正帯磁で, 約 60° の東偏した古地磁気を持つ. Otofujii et al. (1985) は, 田上 (1982) が示した古地磁気方位を用い, 日本海の拡大による西南日本の時計回りの回転を示した. このことは, 熊野酸性岩の形成が日本海の主要拡大の前であることを示唆する. 他方, 星 (2002) および星ほか (2004) は, 熊野酸性岩類の東偏した古地磁気の原因を西南日本の回転運動に求めず, 冷却していく熊野酸性岩類が地磁気逆転またはエクスカージョンの一部を記録したものと解釈した. このように, 東偏方位の成因については現在も議論が行われているため, 本研究では鉛直軸周りの回転を無視し, 取得した断層データに対する偏角補正を行わない.

ボーリングは, 三重県熊野市磯崎井内浦農村公園 (井内浦観測点), および北牟婁郡紀北町海山区小山浦 (海山観測点) の2箇所で行われた (Fig. 2). 両観測点サイトとも, 3本の井戸を掘削し, そのうちの深度 600 m の井戸において断層データを取得した. 井内浦観測点の 600 m の坑井は, 熊野酸性岩類北岩体のうち, カルデラ内部を掘削した. 地表付近ではシート状に貫入した花崗斑岩体中を掘削し, 深度 464.3 m でその貫入境界を掘り抜き, それ以深ではカルデラ内の火砕流堆積物中を掘削した (Fig. 2). 他方, 海山観測点の 600 m の坑井は, カルデラ北縁の外壁に沿った花崗斑岩の環状岩脈を掘削した. 全深度にわたり, 均質で硬質な花崗

斑岩～花崗岩で構成される (Fig. 2). コアは HQ 径 (コア径 63 mm) により掘削され, ワイヤライン法により採取された. これらのコアの岩石学的記載については, 産業技術総合研究所で別途論文を準備中である. また, コアリング終了後に物理検層を実施し, ポアホールテレビュア (BHTV) 検層により, 掘削後の坑壁状態を確認した. ポアホールテレビュア (BHTV) 検層では, 泥水で満たされた坑壁に音波を走査し, 受信した反射波が反射波強度と反射波到達時間の2種類の画像として表される.

断層スリップデータ

小断層の断層擦痕 (Fig. 3) の方向を, 海山観測点のコアでは, 深度 568.8 ~ 395.1 m にかけての花崗斑岩～花崗岩から 51 条, 井内浦観測点のコアでは, 深度 479.4 ~ 76.7 m にかけての凝灰岩・花崗斑岩から 36 条を測定した. まず, コアを水平の台の上に寝かせて固定し, 断層面の走向・傾斜のほか, 条線方向を測定し, 運動センスを判断した. 次に, 断層面を BHTV による検層データと対比し, 地下での姿勢に復元した. 断層面上には断層間物質が確認できた. 厚さ 1 mm 程度の断層ガウジが付着していて, それらは灰色または灰緑色を呈し, 緑帘石, 方解石や黄鉄鉱が認められた.

断層面上での運動センスの判断には, 破断ステップ (Petit, 1987) と付加ステップ (Durney and Ramsay, 1973) などの断層面上の非対称構造を用いた (Fig. 3.a, b and c).

Fig. 4. Lower-hemisphere, equal-angle projections showing the attitudes of fault planes (great circles) and their slip directions (open circles with arrows) obtained from (a) the Miyama and (b) Ichiura sites. Solid and dotted great circles represent normal or oblique normal and reverse or oblique reverse faults, respectively. Arrows attached to the open circles show the sense of shear. Arrows pointing to the center of stereonet and those pointing to the opposite direction represent reverse and normal senses of shear, respectively. Paired arrows attached to the open circles indicate sinistral or dextral sense of shear.

これらについては、狩野・村田 (1998) に詳しく記述されている。さらに、小玉 (1968) が利用したような、引きずられる微小な硬い粒子が断層面につけた傷も用いた。一つの断層面に複数の断層条線が重複していることがあり、それらの新旧関係を応力状態の新旧関係の判定に利用した (Fig. 3.d)。

Fig. 4 に 2 箇所のコアから得られた断層スリップデータを下半球等角投影で示した。投影図内の大円は断層面、その面上の白抜き丸は観察された条線の方向を示す。白抜き丸に付された矢印はスリップセンスを示し、単一矢印ならば上盤側の運動方向を表し、矢印が基円の外側を向いていれば正断層、内側を向いているなら逆断層を意味する。2 本の矢印がついている場合は、横ずれ成分の大きい断層である。断層面の姿勢はばらつきが大きいものの、両データセット共に N-S から NE-SW 方向および E-W から NW-SE 方向のものが多く、しかし、条線と変位センスから推定した変位ベクトルの方向は、走向が N-S から NE-SW 方向に近いものであっても傾斜すべり逆断層のほか、両センスの斜めすべり断層や横ずれ断層と多様性に富み、単一の応力下でこれらすべての断層が活動したとは考えにくい。

応力テンソルインバージョンによる主応力軸の検出

1. 多重逆解法と k -means クラスタリング

本研究で得た断層スリップデータから多重逆解法 (Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006) を用いて検出した応力を Fig. 5 に示した。解析の手法とその表示法は Yamaji (2000) と同じである。与えられた断層スリップデータ N 個から k_f 条を任意に選び出して部分集合を作る。全部で ${}_NC_{k_f}$

個の部分集合を作ることができ、それぞれの部分集合に対してインバージョン (例えば, Angelier, 1979) を適用して ${}_NC_{k_f}$ 個の最適応力解 (規格化応力テンソル) を得る。その結果をステレオネット上で表現し、応力テンソルのクラスターを有意な解とする。Fig. 5.a および 5.b には四角と短い線分からなるシンボルが多数プロットされた下半球等積投影図が 2 つ示されており、各シンボルの一つ一つがインバージョンで求めた主応力の状態 (規格化応力テンソル) を表す。Fig. 5.a および 5.b の左側の投影図の四角のシンボルは σ_1 軸の方向を、四角から出ている線分の方角は σ_3 の方位を、線分の長さは σ_3 の伏角をそれぞれ表す。他方、Fig. 5.a および 5.b の右側の投影図では σ_1 軸と σ_3 軸の表現が逆になっていて、 σ_3 軸の方向を表す。なお、これらの図でクラスターの収束に関係する断層組み合わせ数、 k_f の値 (Yamaji, 2000) は 5 としている。Fig. 5.a および 5.b のシンボルの色は式: $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ によって定義される応力比を表し、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ であるので、 Φ は 0 と 1 の間の値をとる。 $\Phi = 0$ ならば $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ という一軸性圧縮応力を、 $\Phi = 1$ ならば $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ という一軸性伸張応力を、それらの間であれば三軸応力を表す。

応力テンソルのクラスターの読み取りには k -means 法による応力テンソルのクラスタリング (Otsubo et al., 2006) を用い、結果を Fig. 5.c および 5.d に示した。 k -means 法は、以下の手順で行われる。(1) 全ての応力テンソルをパラメータ空間上のデータ点とする。ここでのパラメータ空間は、Sato and Yamaji (2006) を用いる。それぞれのデータ点に対して、 k_c 個のクラスター中心を与え、クラスター中心と各

Fig. 5. (a, b) Lower-hemisphere equal-area projections showing results of the multiple inverse method (Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006) applied to data from the Miyama and Ichiura sites, and (c, d) those of the *k*-means clustering technique (Otsubo et al., 2006) applied to data from the two sites. The left and right stereograms in each subfigure indicate the result of σ_1 and σ_3 axes, respectively. The gray scale of the symbols represent the stress ratio $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ where σ_1 , σ_2 and σ_3 are the maximum, intermediate and minimum principal stress magnitudes, compression being positive. The multiple inverse method was applied with the combination number $k_f = 5$ and the enhance factor $e = 8$. See Yamaji (2000) for the details of these parameters. In (a) and (b), tadpole symbols indicate the directions of σ_1 and σ_3 axes. In the left stereograms of (a) and (b), the head of the symbol indicates the direction of σ_1 axis, whereas its tail indicates that of σ_3 axis. The azimuth and plunge of σ_3 axis is indicated by the direction and length of the tail, respectively. The length of tail is drawn proportional to the remainder (90° -plunge). The steeper the σ_3 axis, the shorter the tail is. The role of head and tail is inverted in the right stereograms. In (c) and (d), members belonging to the same cluster (smaller symbols) and its representative orientations (larger symbols) are indicated by the same symbols, i.e., circles, triangles, squares, pentagons and hexagons.

データ点との距離を計算し最も近いクラスターにデータ点を割り当てる。(2) 次に、クラスターに配分されたデータ点の重心から、そのクラスターの新たな中心値を計算する。(3) 上記の2つのステップを、全てのデータ点に対して、中心の位置と個々のデータ点の割り当てが収束するまで繰り返す。ここでもとめたクラスター中心を最適応力とする。クラスター数を2から6まで変えながら、その都度クラスタリングを行った。

その後、各断層データに対して、どの応力解で断層運動を説明できるのかを検証するため、各応力解での断層に対する理論的な最大剪断すべり方向と観測すべり方向を比較した。ここで、クラスター数を増やしても説明できる断層数が増えなければ、増やす前のクラスター数を採用する。ステレオネット内の大きいシンボルがクラスタリングによって求めたクラスター中心である。シンボルの色はクラスター中心の応力

比を表す。

2. 解析結果

海山観測点コアでは5つの応力が検出できた (Fig. 5.c, Table 1). それぞれ応力 MYa, MYb, MYc, MYd, および MYe とする。応力 MYa は、 σ_1 軸が水平で NNW-SSE 方向で σ_3 軸が WSW 方向に 31° 傾斜し、Anderson (1951) の横ずれ断層応力場である (応力比: 0.53)。応力 MYb は、 σ_1 軸が NW 方向に 20° 傾斜で σ_3 軸が SW 方向に 32° 傾斜している横ずれ断層応力場である (応力比: 0.77)。応力 MYc は、 σ_1 軸が水平で NW-SE 方向で σ_3 軸が WSW 方向に 54° 傾斜している横ずれ断層応力場に近い逆断層応力場である (応力比: 0.84)。応力 MYd は、 σ_1 軸が WNW-ESE 方向で ESE 方向に 12° 傾斜し、 σ_3 軸が SW 方向に 71° 傾斜している逆断層応力場である (応力比: 0.26)。応力 MYe は、 σ_1 軸が水平 N-S 方向であり、 σ_3 軸が水平 E-W 方向

Table 1. Azimuths and plunges of the stresses determined by the multiple inverse method in the Miyama and Ichiura sites.

		Sigma 1		Sigma 3		Φ
		azimuth	plunge	azimuth	plunge	
Miyama	MYa	340.09	02.11	248.81	31.04	0.53
	MYb	321.30	20.13	217.60	32.87	0.77
	MYc	149.18	07.47	249.39	53.51	0.84
	MYd	103.28	11.54	230.88	71.49	0.26
	MYe	355.07	02.26	085.13	01.55	0.39
Iuchiura	IUa	213.82	04.50	111.70	69.46	0.67
	IUb	214.44	05.08	121.09	33.29	0.70
	IUc	112.82	04.89	017.20	48.84	0.68
	IUd	174.73	12.84	278.54	46.34	0.28
	IUe	335.83	62.19	213.02	15.96	0.42

の横ずれ断層応力場である（応力比: 0.39）。

井内浦観測点コアでは5つの応力が検出できた（Fig. 5.d, Table 1）。それぞれ応力 IUa, IUb, IUc, IUd, および IUe とする。応力 IUa は、 σ_1 軸が水平で NE-SW 方向で σ_3 軸が SE 方向に 69° 傾斜している逆断層応力場である（応力比: 0.67）。応力 IUb は、 σ_1 軸が水平で NE-SW 方向で σ_3 軸が SE 方向に 33° 傾斜している横ずれ断層応力場である（応力比: 0.70）。応力 IUc は、 σ_1 軸が水平 WNW-ESE 方向で σ_3 軸が NNE 方向に 49° 傾斜している逆断層応力場（応力比: 0.68）である。応力 IUd は、 σ_1 軸が水平 N-S 方向で σ_3 軸が WNW 方向に 46° 傾斜している横ずれ断層応力場（応力比: 0.28）である。応力 IUe は、 σ_1 軸が NW 方向に 62° 傾斜で σ_3 軸が水平に近く、NE-SW 方向の正断層応力場である（応力比: 0.42）。

3. 検出された解の妥当性

次に、検出された解（応力）の妥当性を検討する。本研究で用いた多重逆解法や Angelier 法（Angelier, 1979）などをはじめとする近年の応力逆解析法は、断層が最大剪断応力方向と平行方向にすべるという Wallace-Bott 仮説（Wallace, 1951; Bott, 1959）に基づく。この仮説に基づく応力逆解析法は解（応力）の候補を出すのみであることに注意が必要である（Yamaji et al., 2006）。そのため、検出された応力が真に存在するかどうかについて、各応力を断層データに立ち戻って確認する必要がある。各断層面において、検出された応力で活動する理論的なスリップ方向と観察により得られた実際のスリップ方向との角度差（misfit 角）を比較する（Fig. 6）。ここでは、角度差 30° 以下であれば、その応力との整合性が高いと判断した。剪断面において黒色の矢印が 30° 以下のもので、灰色のものが 30° 以上のものである。

両観測点でのすべての解（応力）についてその妥当性を確認したところ、海山観測点に関しては51条中45条が説明することができ、井内浦観測点に関しては36個中30個が説明できた。海山観測点の6条および井内浦観測点での6条

の断層に関しては検出した応力では説明できなかった。また、井内浦観測点コアでは、検出された5つの応力のうち、応力 IUa で説明可能な断層は他の応力ですべて説明可能であったことから、応力 IUa をのぞく4つの応力（IUb, IUc, IUd, および IUe）を真の応力として採用した。この応力 IUa は、観測データの特性によって現れた見かけ上の associated solution（Yamaji, 2000）と考えられる。海山観測点ではすべての応力が必要なことから、検出された5つの応力全て（MYa, MYb, MYc, MYd および MYe）を採用した。

4. 検出された応力状態の新旧関係

断層面上の断層擦痕の重複関係を用い、応力の新旧関係を決定する。同一断層上での断層擦痕の重ね合わせは、同一断層面における断層の再活動を示す。断層擦痕の重複関係と検出された応力の対応関係から、応力の新旧関係を検討する。

井内浦観測点では、同一断層面上の断層擦痕の重複関係が5組認められた。Fig. 7に深度359.5 m および358.4 m での検討結果を示す。深度359.5 m では（Fig. 7.a）、断層面は E-W 走向で SW 方向に 58° 傾斜しており、傾斜すべり成分の大きい正断層センスの断層擦痕（スリップ a）が斜めすべり成分の強い横ずれセンスの断層擦痕（スリップ b）をかき消すように付着していた。これはスリップ a が新しく、スリップ b が古いことを示す。この断層面においては応力 IUc および IUe の2つの応力が説明可能である。そこで2つの応力で計算される理論すべり方向とスリップ a および b の方向それぞれとの角度差（misfit 角）を比較した。その結果、応力 IUc での理論すべり方向とスリップ a および b それぞれとの misfit 角は 27.3° と 79.2° であり、応力 IUe とスリップ a および b それぞれとの misfit 角は 122.1° と 5.6° である（Fig. 7.a）。よって、応力 IUe が新しく応力 IUc が古いと判断した。他方、深度358.4 m では（Fig. 7.b）、WNW-ESE 走向で S 方向に 81° 傾斜している断層面において、左横ずれのセンスの断層擦痕（スリップ c）が右横ずれのセンスの断層擦痕（スリップ d）をかき消すように付着している。この断層面においては、応力 IUe および IUb の2つの応力が説明可能である。応力 IUe での理論すべり方向とスリップ c および d それぞれとの misfit 角は 150.8° と 27.9° であり、応力 IUb とスリップ c および d それぞれとの misfit 角は 8.3° と 104.6° である（Fig. 7）。よって、応力 IUb が新しく応力 IUe が古いと判断した。

Fig. 8に井内浦観測点、および海山観測点で検出した応力の新旧関係を示す。井内浦観測点コアの5組の断層面から検出された応力の新旧関係をまとめると、応力 IUe よりも応力 IUc が新しく、応力 IUe よりも応力 IUb が新しい。応力 IUd は応力 IUe よりも新しいが、応力 IUb との新旧関係については判定できなかった。よって、古い方から応力 IUc → 応力 IUe → 応力 IUb および応力 IUd となった（Fig. 8）。一方、海山観測点において5組の断層面を用いて応力の新旧関係を確認したところ、応力 MYd → 応力 MYb → 応力 MYe → 応力 MYa および応力 MYc の順序である（Fig. 8）。応力 MYa と応力 MYc との新旧関係は判定できなかった。

(a) Miyama

(b) Ichiura

Fig. 6. Tangent-lineation diagrams (Twiss and Moores, 1992) showing the fault-slip data in (a) the Miyama and (b) Ichiura sites and theoretical slip directions (shaded thin arrows) for the stresses detected by the multiple inverse method (Fig. 5.c and 5.d). For each fault, an arrow is plotted on a lower-hemisphere, equal-angle projection; the arrow points to the slip direction of the footwall. The theoretical slip directions diverge from σ_1 direction and converge to σ_3 direction (Twiss and Moores, 1992). Thick arrows indicate the obtained fault-slip data (Fig. 4). The data with angular misfit angle $\leq 30^\circ$ are denoted by thick black arrows. Those with angular misfit angle $> 30^\circ$ are shown by thick dark gray arrows. An open arrow in (a) is a fault plane associated with epidote.

Fig. 7. Relationship between the stress axes detected by the multiple inverse method and the measured slip directions on the fault planes at (a) 359.5 m and (b) 358.4 m of the Ichiura site. Two sets of striations were found on these fault planes, and the relative age relationships of the striations were identified based on the overprinting. Solid circles with arrows indicate the direction of older striations and open circles with arrows indicate the direction of newer striations. Open squares represent theoretical slip directions for the stresses detected by the multiple inverse method.

ボアホールブレイクアウトによる現在の応力状態の推定

坑井を用いた現在の地下応力状態の推定方法の一つにブレイクアウト (例えば, Zoback et al., 1985) が知られている。ブレイクアウトから最小または最大水平圧縮応力軸方向を求めることができる。ある応力状態にある地層内に鉛直方向に穴がけられたとき、坑壁周りに生じる応力集中により、最大水平応力と直交する側に圧縮応力が働く。その応力が坑壁周りの岩石の圧縮強度に勝るときに剪断破壊が生じ、坑壁の180°対をなす方向が崩れ始める現象がブレイクアウトである。ブレイクアウトの方向は最小水平圧縮応力軸の方向に対応し、それから水平に90°水平に回転した方向が最大水平圧縮軸方向である。

Fig. 9は海山観測点の490 mから499 mまで、井内浦観測点470から480 mについて、BHTV検層による坑壁展開図である。坑壁により反射される音波のエネルギーは、坑壁の表面状態により左右されるため、坑壁展開図でブレイクアウトが発生した方向は、反射波強度が小さく、反射波到達時間が長くなる (Fig. 9の白矢印)。ブレイクアウトは海山観測点ではほぼN-S方向に、井内浦観測点では海山観測点と比べ顕著ではないもののNW-SE方向に認められる。従って最大水平圧縮方向は、両観測点ともに深度によって変らず、

海山観測点ではE-W方向、井内浦観測点ではNE-SW方向である。

議 論

1. 2つの観測点での応力履歴の整合性

本研究では、熊野酸性岩類を貫く2地点のボーリングコアから断層データを取得し、多重逆解法を用いて複数の応力場を判別した。解の妥当性を検討し、海山観測点からは5つの応力を、井内浦観測点からは4つの応力を採用した。

検出された応力の中で最も古いものは、海山観測点では応力MYd、井内浦観測点では応力IUCである。応力MYdの応力比は0.26であり、 σ_2 軸と σ_3 軸の違いが小さい一軸性圧縮応力に近く、 σ_1 軸はWNW-ESE方向である。他方、応力IUCの応力比は0.68と大きい、 σ_1 軸の方向はWNW-ESE方向であり、応力MYdの σ_1 との差は10°程度と小さい。よって、応力MYdと応力IUCはともにWNW-ESE方向の圧縮場であるという点において類似している。

二番目に被った応力は、海山観測点では応力MYb、井内浦観測点では応力IUEである。応力MYbの応力比は0.77であり、 σ_1 軸と σ_2 軸の違いが小さい一軸性伸張応力に近く、 σ_3 軸はSW方向に32°傾斜している。他方、応力IUEの応力比は0.42と小さいものの σ_3 軸の方向がNE-SW方向

Fig. 8. Stress history in the Miyama and Ichiura sites. Three paleostress stages (1, 2, and 3) were identified by the multiple inverse method. Directions of σ_1 and σ_3 axes of representative orientations of the clusters shown in Fig. 5.c and d are indicated on lower-hemisphere, equal-area projection. Stress ratios are also indicated. The present state of stress, estimated by stress-induced borehole breakouts (see Fig. 9), is depicted by hatched arrows.

であり、応力 MYb と応力 IUe はともに NE-SW 方向の伸張場であるという点において類似している。

海山観測点において応力 MYb の後で被った応力 MYe、応力 MYa および応力 MYc の3つの応力場は、 σ_1 軸が水平に近く、N-S 方向から NNW-SSE 方向であるという共通点を持つ。ただし、これらの応力の応力比は 0.39 ~ 0.77 と幅を持ち、応力 MYe は応力 MYa と応力 MYc より古い。井内浦観測点において、応力 IUe の後で被ったものは、応力 IUb および IUd である。これらの σ_1 軸もほぼ水平で、N-S 方向に近いという類似性を持つ。

以上をまとめると、海山観測点と井内浦観測点はともに E-W 方向の圧縮（ステージ1）→ NE-SW 方向の伸張（ステージ2）→ N-S 方向の圧縮（ステージ3）（Fig. 8）というように、応力履歴が互いに類似している。このことは本研究により得られた両観測点の応力履歴が、熊野沖南海トラフ沈み込み帯前弧陸域における比較的広域の応力変化を反映したものであることを示している。

2. 紀伊半島前弧域における現在の応力場への変遷

多重逆解析法の結果は過去の応力場を示すのに対し、海山観測点と井内浦観測点におけるボアホールブレイクアウト、および井内浦観測点より南側に位置する和歌山県新宮市での水圧破壊応力測定（池田ほか, 2001）の結果は、紀伊半島南

東部における現在の広域応力場を反映している（Fig. 10）。海山観測点の最大水平圧縮応力（以下 σ_{hmax} とする）は E-W 方向（Fig. 9.a）、井内浦観測点の σ_{hmax} は NNE-SSW 方向（Fig. 9.b）、和歌山県新宮市での σ_{hmax} は N-S 方向であり北から南に σ_{hmax} の方向が変化する。

活断層の運動方向、火山の配置・岩脈の貫入方向から、第四紀以降現在に至るまでの西南日本の σ_1 の方向は、大局的には E-W 方向と考えられている（Sugimura and Matsuda, 1965; 岡田・安藤, 1979; 安藤, 1979; Huzita, 1980; 活断層研究会編, 1991）。海山観測点のボアホールブレイクアウトが示す現在の応力状態は、西南日本で支配的な広域応力場に近い。これに対し、井内浦観測点とその南の新宮市での σ_{hmax} は南北方向に近く、西南日本で支配的な最大水平圧縮応力軸は直交する。

紀伊半島から四国にかけての南海トラフ沈み込み帯前弧域には、地震性地殻変動のヒンジラインと呼ばれる境界が知られている（吉川, 1968; Yoshikawa, 1970）。ヒンジラインの南側は、海溝側に向かって高まる傾動が特徴的であるのに対し、北側は定常的に隆起する山地を形成していて、このライン上で隆起量が最も小さい（米倉, 1968; 太田・成瀬, 1977; 松田ほか, 1991）。1944 年東南海地震と 1946 年南海道地震による地殻変動の隆起・沈降の境界（Miyabe, 1955）は、このヒ

Fig. 9. Borehole televiewer records at (a) the depth 490–499 m of the Miyama site and (b) the depth 470–480 m of the Ichiura site. Left and right images represent the travel time and amplitude of ultrasonic waves, respectively. Stress-induced borehole breakouts (open arrows) are characterized by vertical zones of long travel time and small amplitude. Solid triangle in (a) points out a shear plane. Breakouts dominate in N–S direction in the Miyama site and in NW–SE direction in the Ichiura site.

ンジラインにほぼ一致する。紀伊半島におけるヒンジラインは、和歌山県すさみ町周参見から新宮市を結ぶ線とされており、本研究の海山観測点と井内浦観測点の間を通過している (Fig. 10)。

ヒンジラインを境に発震機構のパターンが異なる。マグニチュード 1.5 以上の浅発地震 (深さ 0–15 km) の P-軸は、ヒンジラインの北側では E–W 方向が卓越する (中村ほか, 1992)。これに対し、ヒンジラインの南側では、N–S 方向、あるいは N–S から時計・反時計回りに若干回転した P-軸を示す (Fig. 10, 中村ほか, 1992; 池田ほか, 2001)。これは井内浦観測点より南側で観測された N–S 方向に近い圧縮方向と調和的である。

ヒンジラインは、プレート境界浅部の地震発生領域とより

Fig. 10. Map showing present stress states in the southeastern part of Kii peninsula. Oppositely-oriented arrows represent the directions of the σ_{max} . The data from Shingu is after Ikeda et al. (2001). Dotted area indicates the extent where N–S σ_{max} is estimated by focal mechanisms (Nakamura et al., 1992). The depth and temperature of the upper surface of the subducting Philippine Sea plate are also represented (after Hyndman et al., 1995). H and K indicate the Hongu Mikoshi and Kushimoto Tsuga sites, respectively.

深部の非地震性領域の境界を地表に投影した線にも位置する (例えば、池田ほか, 2001)。Fig. 10 に Hyndman et al. (1995) による、震源分布から推定されたフィリピン海プレートの上境界深度と地殻熱流量データから計算されたフィリピン海プレート上境界の温度分布を示す。ヒンジライン直下のプレート境界面は、フィリピン海プレート上面の約 30 km の等深度線、温度約 350 °C の等温線にほぼ一致する (池田ほか, 2001)。それより浅いプレート境界は地震性の挙動を示すのに対し、より深部では低周波微動の発生 (Obara, 2002) から示唆されるように準延性的なすべりが起こっていると考えられる。この準延性的すべりによってフィリピン海プレートの沈み込みによる圧縮応力が緩和し、太平洋プレートからの圧縮応力が相対的に大きくなるため、ヒンジラインより北側での P-軸は E–W 方向に向くものと考えられる。

ところで、2つの観測点の多重逆解法による最終ステージの応力状態は、ともにフィリピン海プレートからの圧縮によると考えられる N–S 方向の圧縮である。すなわち、2つの観測点のうち北側に位置する海山観測点では、N–S 方向の圧縮から現在の西南日本に特徴的な E–W 方向の圧縮へと変化する。他方、南側に位置する井内浦観測点の現在の応力場の σ_{hmax} の方向と、多重逆解法による最終ステージの応力場との間には、大きな変化はない。これらの事実は、ヒンジライン (E–W 方向の圧縮と N–S 方向の圧縮の境界線) は、南に移動していることを示唆する。

海山観測点での多重逆解法による結果には、現在の E–W 方向圧縮の応力場は現れていない。このことは、応力場の境界線の南下後、海山観測点のコアは断層面の摩擦強度を超え

るような剪断応力を被っていないことを示唆し、応力場境界線の移動は比較的最近に起きたのかもしれない。

3. 今後の課題

本研究により、海山観測点の北側にあったヒンジラインに対応する応力場境界線が、応力場変遷のステージ3から現在にかけて、井内浦観測点のすぐ北まで南下したという現象が明らかになった。この現象が紀伊半島東南部での広域的な現象なのか、海山・井内浦両観測点付近の局所的な現象なのかは分らない。産業技術総合研究所は、和歌山県田辺市本宮町三越みこしと同県串本町津荷つなにおいても地下水等観測点の整備掘削を行っている。これらは海山・井内浦同様にヒンジライン近傍にあると期待される (Fig. 10)。本宮町および串本町の観測点においても、海山・井内浦両観測点と同様の解析を行うことにより、応力場境界線の南下が紀伊半島東南部での広域的な現象なのかどうかを検証できよう。

前述の通り、海山・井内浦観測点では最初にE-W方向の圧縮応力 (応力 MYd および IUc)、その後にNE-SW方向の伸張応力 (応力 MYb および IUe) を被っていたと考えられる。これらの応力場の時代が正確には分っていないため、テクトニックな意味づけを行うことは現段階では困難である。断層岩の年代測定 (例えば, Lyons and Snellenburg, 1971; 安川ほか, 1971; Ikeya et al., 1982) や鉱物脈の熱履歴調査 (例えば, 笹田, 1988) によって、新たな展開が期待できる。

海山観測点のコアでは緑簾石が付着していた断層面が1条観察された。この断層条線は (Fig. 6の白抜き矢印)、海山観測点で検出された最も古い応力 MYd のみで活動可能である。緑簾石は火成岩の固結の後期に斜長石の分解物として生じることがある (黒田・諏訪, 1983)。紀伊半島南東域で現在地表に露出している深度レベルでは、熊野酸性岩の定置以降に緑簾石が晶出する条件まで加熱されるようなイベントは広域には発生していない。断層活動と緑簾石の晶出がほぼ同時期であると仮定すると、熊野酸性岩類の周辺部で先に固まった花崗斑岩がより深部の花崗斑岩によって熱変成を受けた、あるいは熱水変質を受けて緑簾石が晶出するような条件の下で剪断破壊したものと考えられる。これらの条件は、応力 MYd が多重逆解法の結果の中で最も古いことと調和的であり、このことは断層岩の年代測定や鉱物の熱履歴調査などによって実証できるだろう。

ま と め

熊野酸性火成岩類北岩体で掘削された2つの観測点 (海山観測点および井内浦観測点) のコアを切る断層面から取得した断層スリップデータおよび、ボアホールブレイクアウトを用いた応力解析により、以下のことが明らかとなった。

- (1) コアを切る断層面から得た断層スリップデータに多重逆解法を適用した結果、それぞれの観測点から複数の応力場を検出した。解の妥当性の検証から、海山観測点からは5つの応力状態を、井内浦観測点からは4つの応力状態を抽出した。
- (2) 断層面上の断層条線の重複関係を用いて応力状態の新旧

関係を決定した。海山観測点および井内浦観測点ともに、E-W方向の圧縮→NE-SW方向の伸張→N-S方向の圧縮という類似した応力履歴を持つ。このことから、両観測点の結果は比較的広域の応力変化を反映していると考えられる。

- (3) ボアホールブレイクアウトやこれまで行われた水圧破壊応力測定から、海山観測点での σ_{hmax} が現在の西南日本に特徴的なE-W方向であるのに対し、井内浦観測点とそれより南の和歌山県新宮市での σ_{hmax} はほぼN-S方向である。
- (4) 現在の応力場と多重逆解法による結果の比較から、海山観測点では σ_{hmax} の方向がほぼN-S方向の圧縮から、ほぼE-W方向の圧縮に変化したのに対し、井内浦観測点では多重逆解法による最終ステージの応力場と現在の応力場がともにほぼN-S方向の圧縮である。このことは、西南日本に特徴的なE-W方向の圧縮応力場とフィリピン海プレートからの圧縮によると考えられるN-S方向の圧縮応力場の境界が南下したことを示す。

謝 辞

本研究の内容の一部は、日本地質学会構造地質部会2006年度例会において発表したものである。東北大学大学院理学研究科大槻憲四郎教授、京都大学大学院工学研究科山田泰広博士および編集委員の星 博幸博士には、査読を通じて論文の改善に役立つ貴重なご意見をいただきました。産業技術総合研究所中島 隆博士ならびに下司信夫博士には、熊野酸性岩類の性状や熊野カルデラ形成についてご教示頂きました。また三重県紀北町の株式会社塩谷組にはコア解析および、海山観測点の掘削について便宜を図っていただきました。以上の方々に心から感謝申し上げます。

引 用 文 献

- Anderson, E.M., 1951, *The Dynamics of Faulting* (2nd ed.), Oliver and Boyd, London, 206p.
- 安藤雅孝 (Ando, M.), 1979, 日本列島の最近50万の応力場。月刊地球 (*Chikyū Monthly*), **1**, 541-546.
- Ando, M., 1982, A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from Tsunami data. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **28**, 326-336.
- Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, **56**, T17-T26.
- Araki, Y., 1958, Notes on the Cenozoic deposits in Owase City, Mie Prefecture, Japan. *Bull. Fac. Agric., Mie Univ.*, **16**, 191-200.
- 荒牧重雄・羽田 忍 (Aramaki, S. and Hada, S.), 1965, 熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質。地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **71**, 494-512.
- Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, **96**, 109-117.
- Durney, D.W. and Ramsay, J.G., 1973, Incremental strains measured by syntectonic crystal growths. In De Jong, K.A. and Scholten, R. eds., *Gravity and tectonics*, Jon Wiley and Sons, New York, 67-96.
- Honda, Y., 1992, A Miocene molluscan fauna from the Owase Group, Kii Peninsula, Southwest Honshu. *Bull. Mizunami Fossil Museum*, **19**, 413-426.
- 星 博幸 (Hoshi, H.), 2002, 熊野酸性火成岩類の古地磁気方位。地調研報 (*Bull. Geol. Surv. Japan*), **53**, 43-50.
- 星 博幸・三輪健治・川上 裕 (Hoshi, H., Miwa, K. and Kawakami, Y.), 2004, 古地磁気方位の比較からみた熊野酸性岩類北部と南部

- 及び室生火砕流堆積物の時間関係. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **110**, 103-118.
- Huzita, K., 1980, Role of the Median Tectonic Line in the Quaternary tectonics of Japanese Islands. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no.18, 129-153.
- Hyndman, R.D., Wang, K. and Yamano, M., 1995, Thermal constraints on the seismogenic portion of the southwestern Japan subduction thrust. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 15373-15392.
- 池田隆司・小村健太郎・飯尾能久・石井 紘・小林洋二・西上欽也・山内常生 (Ikeda, R., Komura, K., Iio, Y., Ishii, H., Kobayashi, Y., Nishigami, K. and Yamauchi, T.), 2001, 南海トラフ地震に向けた陸域での地殻応力歪測定. 地学雑 (Jour. Geography), **110**, 544-555.
- Ikeya, M., Miki, T. and Tanaka, K., 1982, Dating of a fault by electron spin resonance on intrafault materials. *Science*, **215**, 1392-1393.
- 猪間明俊・佐々木栄一 (Inoma, A. and Sasaki, E.), 1979, 東海沖の堆積盆地の分布と性格. 石技誌 (Jour., Japan., Assoc., Petrol., Technol.), **44**, 272-278.
- 岩野英樹・檀原 徹・星 博幸・川上 裕・角井朝昭・新正裕尚・和田穰隆 (Iwano, H., Danbara, T., Hoshi, H., Kawakami, Y., Sumii, T., Shinjoe, H. and Wada, Y.), 2007, ジルコンのフィッシュン・トラック年代と特徴からみた室生火砕流堆積物と熊野酸性岩類の同時性と類似性. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **113**, 326-339.
- 狩野謙一・村田明広 (Kano, K. and Murata, A.), 1998, 構造地質学 [Structural Geology]*. 朝倉書店 (Asakura Shoten), 298p.
- 活断層研究会編 (The Research Group for Active Faults, ed.), 1991, 新編日本の活断層 [Active Faults in Japan, New Edition-distribution map and the related materials]*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 448p.
- 川上 裕・星 博幸 (Kawakami, Y. and Hoshi, H.), 2007, 火山—深成複合岩体にみられる環状岩脈とシート状貫入岩: 紀伊半島, 尾鷲—熊野地域の熊野酸性火成岩類の地質. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **113**, 296-309.
- Kawakami, Y., Hoshi, H. and Yamaguchi, Y., 2007, Mechanism of caldera collapse and resurgence: observations from the northern part of the Kumano acidic rocks, Kii peninsula, southwest Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 263-281.
- 小玉喜三郎 (Kodama, K.), 1968, 城ヶ島における小断層解析. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **74**, 265-278.
- 黒田吉益・諏訪兼位 (Kuroda, Y. and Suwa, K.), 1983, 偏光顕微鏡と岩石鉱物第2版 [Polarising Microscopes and Rock Minerals (2nd printing)]*. 共立出版 (Kyoritsu Shuppan), 390p.
- Le Pichon, X., Mazzotti, S., Henry, P. and Hashimoto, M., 2002, Deformation of the Japanese Islands and seismic coupling: an interpretation based on GSI permanent GPS observations. *Geophys. Jour. Int.*, **134**, 501-514.
- Lyons, J. B. and Snellenburg, J., 1971, Dating faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, 1749-1752.
- Martin, P. and Bergerat, F., 1996, Palaeo-stresses inferred from macro- and microfractures in the Balazuc-1 borehole (GPF programme). Contribution to the tectonic evolution of the Cévennes border of the SE Basin of France. *Jour. Struct. Geol.*, **13**, 671-684.
- 松田時彦・中村一明・杉村 新 (Matsuda, T., Nakamura, K. and Sugimura, A.), 1991, 活断層とネオテクトニクス—地殻変動の累積—. 笠原慶一・杉村 新 (編), 変動する地球—現在および第四紀— [Hendosuru chikyu: genzai oyobi dai 4-ki]*. 岩波書店 (Iwanami Shoten), 89-157.
- Miura, D., 1999, Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **92**, 271-294.
- 三浦大助 (Miura, D.), 2000, 応力比からみた陥没カルデラ構造と応力場. 火山 (Bull. Volcanol. Soc. Japan), **45**, 197-207.
- Miura, D., 2005, Effects of changing stress states on the development of caldera-bounding faults: Geological evidence from Kumano caldera, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **144**, 89-103.
- Miura, D., and Wada, Y., 2007, Effects of stress in the evolution of large silicic magmatic systems: an example from the Miocene felsic volcanic field at Kii Peninsula, SW Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 300-319.
- 三浦大助・和田穰隆 (Miura, D. and Wada, Y.), 2007, 西南日本弧前縁の圧縮テクトニクスと中期中新世カルデラ火山. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **113**, 283-295.
- Miyabe, N., 1955, Vertical earth movement in Nankai district. *Bull. Geogr. Survey Inst.*, **4**, 1-14.
- 中村正夫・瀬戸憲彦・田上貴代子・北浦泰子・溝上 恵 (Nakamura, M., Seto, N., Tagami, K., Kitaura, Y. and Mizokami, K.), 1992, 紀伊半島および周辺部に発生する地震のメカニズム解と震源分布の関係 (1982-1991). 日本地震学会講演予稿集 (Programme and Abstracts, The Seismol. Soc. Japan), **2**, 169.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296**, 1679-1681.
- 岡田篤正・安藤雅孝 (Okada, A. and Ando, M.), 1979, 日本の活断層と地震. 科学 (Kagaku), **49**, 158-169.
- 太田陽子・成瀬 洋 (Ota, Y. and Naruse, H.), 1977, 日本の海成段丘—環太平洋地域の海面変化・地殻変動の中での位置づけ—. 科学 (Kagaku), **47**, 281-292.
- Otofuji, Y., Matsuda T. and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism, *Nature*, **317**, 603-604.
- Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2006, Computerized identification of stress tensors determined from heterogeneous fault-slip data by combining the multiple inverse method and k-means clustering. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 991-997.
- Otsubo, M. and Yamaji, A., 2006, Improved resolution of the multiple inverse method by eliminating erroneous solutions. *Comput. Geosci.*, **32**, 1221-1227.
- Park, J.O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P.R., and Kaneda, Y., 2002, Splay fault branching along the Nankai subduction zone. *Science*, **297**, 1157-1160.
- Petit, J.P., 1987, Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Jour. Struct. Geol.*, **9**, 597-608.
- Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T., 2000, Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322.
- 笹田政克 (Sasada, M.), 1988, 流体包有物マイクロサーモメトリーの基礎 (1). 地熱エネルギー (Geothermal Energy), **13**, 295-311.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2006, Embedding stress difference in parameter space for stress tensor inversion. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 957-971.
- Sugimura, A. and Matsuda, T., 1965, Atera fault and its displacement vectors. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **76**, 509-522.
- Sugiyama, Y., 1994, Neotectonics of southwest Japan due to the right-oblique subduction of the Philippine Sea plate. *Geofisica Int.*, **33**, 53-76.
- 角井朝昭・内海 茂・新正裕尚・下田 玄 (Sumii, T., Utsumi, S., Shinjoe, H. and Shimoda, G.), 1998, K-Ar 法による熊野酸性火成岩類の年代の再検討. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **104**, 387-394.
- 田上高広 (Tagami, T.), 1982, 熊野酸性岩類の古地磁気とフィッシュン・トラック年代. 大阪微化石研究会機関誌 (News of Osaka Micropaleontologist), no.9, 23-32.
- 棚井敏雅・水野篤行 (Tanai, T. and Mizuno, A.), 1954, 紀伊半島東南, 熊野炭田附近の地質構造について: 紀伊半島南部の地史学的研究その1. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **60**, 28-39.
- 徳岡隆夫・原田哲朗・鈴木博之・八尾 昭 (Tokuoka, T., Harada, T., Suzuki, H. and Yao, A.), 1982, 20 万分の1 地質図「田辺」[1: 200000 geologic quadrangle map "Tanabe"]*. 地質調査所 (Geological survey of Japan).
- Tokuyama, H., Ashi, J., Soh, W., Kuramoto, S. and Ikeda, Y., 1999, Active Submarine Faults off Tokai-Results from the Japan-France KAIKO-Tokai Project. University of Tokyo Press, 174p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (Ministry of International Trade and Industry), 1989, 昭和 63 年度広域地質構造調査報告書那智地域 [Report of regional geological structure survey "Nachi area"]*, 164p.
- Twiss, R. and Moores, E., 1992, Structural Geology. Freeman, New York, 532p.
- Villaescusa, E., Seto, M. and Baird, G., 2002, Stress measurements from oriented core. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, **39**, 603-615.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Jour. Geol.*, **59**, 118-130.
- Yamada, Y. and Yamaji, A., 2002, Determination of paleo-stresses from mesoscale shear fractures in core samples using the multi-inverse

- method. *Jour. Petrol. Geol.*, **25**, 203-218.
- Yamaji, A., 2000, The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, **22**, 441-452.
- Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K. and Okamura, Y., 2003, Unstable forearc stress in the eastern Nankai subduction zone for the last two million years. *Tectonophysics*, **369**, 103-120.
- Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, Paleostress analysis using the Hough transform for separating stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 980-990.
- 安川克巳・西村 進・一戸時雄 (Yasukawa, K., Nishimura, S. and Ichinohe, T.), 1971, 断層運動の年代測定法. 地震学会春季大会予稿集 (Programme and Abstracts, The Seismol. Soc. Japan), 161.
- 米倉伸之 (Yonekura, N.), 1968, 紀伊半島南部の海成段丘と地殻変動. 地学雑 (Jour. Geography), **77**, 1-23.
- 吉川虎雄 (Yoshikawa, T.), 1968, 西南日本外帯の地形と地震性地殻変動. 第四紀研究 (Quatern. Res.), **3**, 290-296.
- Yoshikawa, T., 1970, On the relations between Quaternary tectonic movement and seismic crustal deformation in Japan. *Bull. Dept. Geog., Univ. Tokyo*, **2**, 1-22.
- Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L., and Anderson, R. N., 1985, Well bore breakouts and in situ stress. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 5523-5530.

*English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

大坪 誠・重松紀生・北川有一・小泉尚嗣, 2009, 南海トラフ沈み込み帯前弧陸域での応力場変遷: 熊野市井内浦および紀北町海山観測点コアをきる断層面を用いて. 地質雑, **115**, 457-469. (Otsubo, M., Shigematsu, N., Kitagawa, Y. and Koizumi, N., 2009, Stress history in the forearc region of the Nankai trough subduction zone: paleostress analysis based on faults in core samples from the Kumano Ichiura and Kihoku Miyama sites, Kii Peninsula, SW Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 457-469.)

熊野酸性岩類北岩体の北端に近い海山観測点と南端に近い井内浦観測点の2箇所からのボーリングコアを解析し, 南海トラフ沈み込み帯前弧域の応力場変遷を調べた. 過去の応力はコアを切る断層面から取得したスリップデータに多重逆解法を適用し, 現在の応力場はボアホールブレイクアウトから推定した. 多重逆解法から, 海山観測点と井内浦観測点ともE-W方向の圧縮→NE-SW方向の伸張→N-S方向の圧縮という類似の応力履歴を持っていることが分かった. 他方, 現在の最大水平圧縮応力 (σ_{hmax}) は, 北側の海山観測点ではE-W方向で, 多重逆解法による最終ステージ σ_{hmax} とほぼ直交するのに対し, 南側の井内浦観測点での現在の σ_{hmax} はNNE-SSW方向で, 多重逆解法による最終ステージのものとは大きな変化がない. 本研究の結果は, 西南日本に特徴的なE-W方向の圧縮応力場と, フィリピン海プレートからの圧縮によると考えられるN-S方向の圧縮応力場との境界が, 時間とともに南下していることを示す.