

南海トラフ沈み込み帯近傍の陸域においてボーリングコアを切る断層面を用いて応力場変遷を明らかにする試み

大坪 誠¹⁾・重松 紀生²⁾・北川 有一²⁾・小泉 尚嗣²⁾

1. はじめに

西南日本の南海トラフ沈み込み帯では、沈み込み帯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ます(例えば, Ando, 1982). 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、南海トラフ近傍の陸域での詳細な応力場の理解は有用です。

産総研で実施された「東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備」プロジェクトの中で、中新統熊野酸性火成岩類北岩体(荒牧・羽田, 1965)の2箇所(井内浦観測点・海山観測点)から、部分的に小断層の多数発達したボーリングコアが得られました(第1図)。ボーリングコアは地表まで上昇してく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ります(例えば, Yamada and Yamaji, 2002)。大坪ほか(印刷中)は、



第1図 ボーリング掘削で得られたコア試料(花崗斑岩)の一例。コア試料に認められる亀裂の大部分は断層です。

南海トラフ沈み込み帯前弧域における約1,500万年前から現在にかけての応力場変遷を調べるためにこれらのコアを切る断層面を用いた応力解析を行いました。

本稿では、大坪ほか(印刷中)の結果を紹介しながら、ボーリングコアを切る断層面を用いた応力解析を紹介します。特に、どのような手順でコアを切る断層面のデータを取るか、コアが経験している過去の複数の応力場をどのように検出するかに焦点をあてて説明します。

2. ボーリング掘削地点の地質について

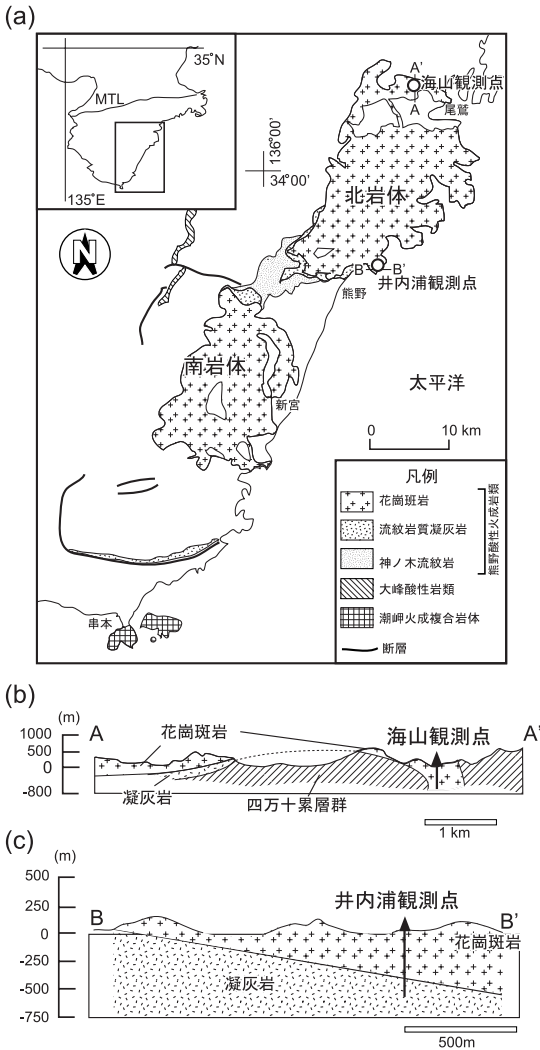
ボーリングは、三重県熊野市磯崎井内浦農村公園(井内浦観測点, 表紙のN4)、および北牟婁郡紀北町海山区小山浦(海山観測点, 表紙のN3)の2箇所で行われました(第2図)。両観測点とも、熊野酸性火成岩類を掘削しました。熊野酸性火成岩類(以下熊野酸性岩類)は、体積が約300km³に達する大規模な珪長質火山-深成複合岩類であり(第2図; 荒牧・羽田, 1965)、中新世のカルデラ形成を伴う大規模な珪長質火成活動により形成されました(Miura, 1999; Kawakami *et al.*, 2007)。主岩相は花崗斑岩からなり、尾鷲市~熊野市にかけて分布する北岩体と、新宮市周辺に分布する南岩体に大別されます(荒牧・羽田, 1965)。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、1,500~1,300万年前の年代が得られています(角井ほか, 1998; 岩野ほか, 2007)。

井内浦および海山の両観測点で、3本の井戸を掘削し、そのうちの深度600mの井戸において断層面を観察しました。井内浦観測点の600mの井戸は、熊野酸性岩類北岩体のうち、カルデラ内部を掘削しまし

1) 産総研 地質情報研究部門

2) 産総研 活断層・地震研究センター

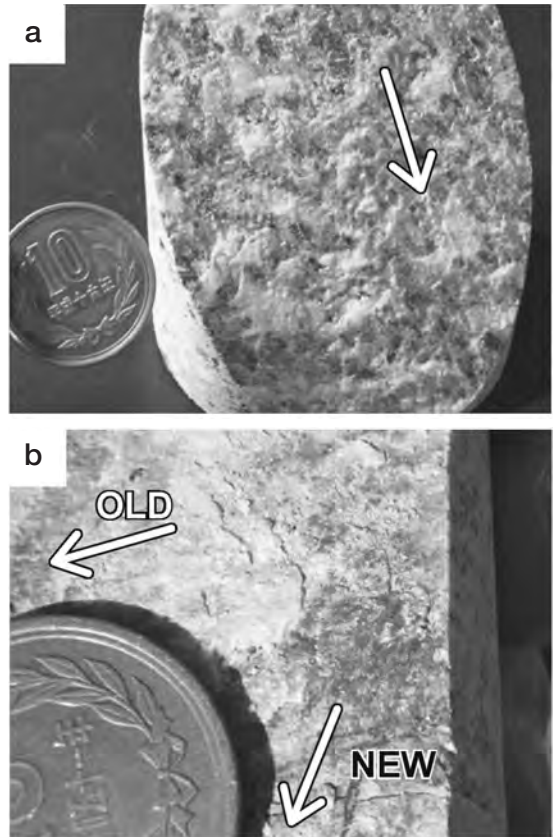
キーワード: 南海トラフ, 沈み込み帯, ボーリングコア, 逆解析, 応力, ヒンジライン



第2図 (a) 紀伊半島南東域の中新世火成岩の地質図(荒牧・羽田, 1965を一部改変)。(b) 海山観測点周辺の地質断面図(星ほか, 2004; 川上・星, 2007を一部改変)。(c) 井内浦観測点周辺の地質断面図(荒牧・羽田, 1965を一部改変)。

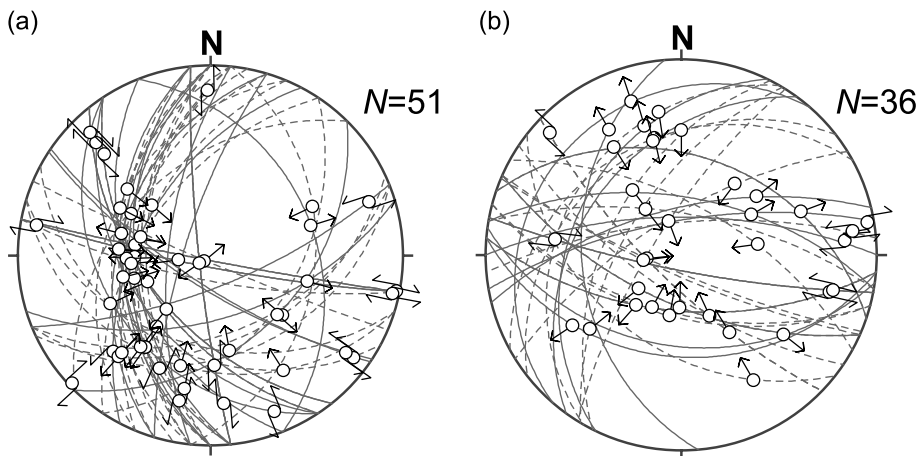
た、地表付近ではシート状に貫入した花崗斑岩体中を掘削し、深度464.3mでその貫入境界を掘り抜き、それ以深ではカルデラ内の火砕流堆積物中を掘削しました(第2図)。他方、海山観測点の600mの井戸は、カルデラ北縁の外壁に沿った花崗斑岩の環状岩脈を掘削しました。全深度にわたり、均質で硬質な花崗斑岩～花崗岩で構成されます(第2図)。

コア試料からコアを切る断層面のような姿勢デー



第3図 ボーリングコア中に認められる断層面の写真。(a)断層面上に見られるステップ状の構造。この非対称性から断層運動のセンスを判定します。(b)断層擦痕の重複関係。白抜き矢印は上盤側の運動方向を示します。

タを扱う場合、その地層の古地磁気の偏角(磁北と真北とのズレの角度)に注意が必要です。熊野地域の古地磁気方位については、熊野酸性岩類の最下部の神ノ木流紋岩は、現在よりも約 60° の東偏した(東へずれた)古地磁気を持つことが報告されています(田上, 1982)。東偏した古地磁気を持つ成因については、日本海の拡大による西南日本の時計回りの回転が原因であるという説(例えば, Otofujii *et al.*, 1985)と、西南日本の回転運動に求めないで冷却していく熊野酸性岩類が、その途中で発生した地磁気逆転(N極とS極が反転する現象)などを記録したものであるという説(例えば, 星, 2002)があって、現在も議論が行われています。

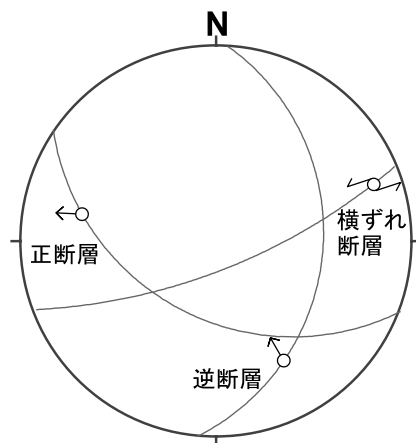


第4図
コアから得られた断層スリップデータ。(a) 海山観測点および(b) 井内浦観測点。下半球等角投影。実線は正断層を示し、点線は逆断層を示します。

3. 断層スリップデータの取得について

大坪ほか(印刷中)は小断層の断層擦痕(割れ目)に沿って生じたすべりによる引っかき傷(第3図)の方向を測定しています。海山観測点のコアでは、深度568.8~395.1m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479.4~76.7mにかけての凝灰岩・花崗斑岩から36条を測定しました。応力解析に必要な以下のデータ、断層の走向・傾斜、断層擦痕の方向と断層をはさんだ岩盤同士の相対的運動方向(これを断層運動センスと呼びます)の情報をまとめて「断層スリップデータ」と呼びます。断層スリップデータの取得の手続きは次の通りです。

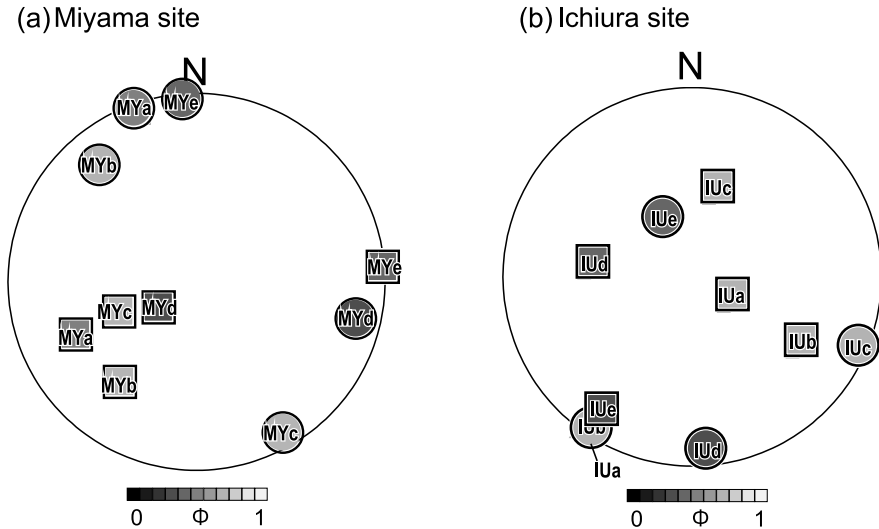
- (1) まずコア中にある断層面の姿勢と断層擦痕の方向を測定します。この時の測定の基準はコアに対して定義したもので、地理学的方位とは関係ありません。またコア中の割れ目が断層であるかどうかは、断層擦痕の有無で判定します。
- (2) 断層運動のセンスを判定します。この時、断層活動に伴って断層面上に生成される非対称のステップ状構造など(第3図)が手がかりになる(例えば、狩野・村田, 1998, p.117)。
- (3) 取得した断層面の走向・傾斜データをボアホールテレビュア(BHTV, 超音波を用いて坑壁の画像データを取得する手法)による坑壁展開図と対比し、これにより地下での断層や断層擦痕などの真の姿勢が求まります。



第5図 ステレオネットに示された正断層、逆断層および横ずれ断層の例。

一つの断層面上に複数の断層擦痕が重複していることがあります。これは同じ面で何度も断層活動した証拠です。断層擦痕が重なっている部分で、新しい断層擦痕は古いそれを消しますから、断層擦痕の重複関係は断層活動の新旧関係を示します。これを利用することによって応力状態の新旧関係を判定することができます(第3図b)。

第4図に2箇所のコアから得られた断層スリップデータをステレオネットで示します。ステレオネット内の大円は断層面、その面上の白抜き丸は観察された断層擦痕の方向を示します。第5図に正断層・逆断層・横ずれ断層の例を示します。白抜き丸が付された矢印は断層運動のセンスを示します。矢印が一つ



第6図 多重逆解法(Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006)による解析結果. (a) 海山観測点および(b) 井内浦観測点. 丸のシンボルが σ_1 軸の方向を, 四角のシンボルが σ_3 軸の方向を示します. シンボルの色は応力比 Φ を示し, $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ によって定義されます. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ であるので, Φ は0と1の間の値をとります. $\Phi = 0$ ならば $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ という一軸性圧縮応力を, $\Phi = 1$ なら $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 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します.

ならば上盤側の運動方向を表し, 矢印が外向きであれば正断層, 内向きであれば逆断層を意味します. 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す. 断層面の姿勢はばらつきが大きいですが, 第4図(a)の海山観測点ではN-SからNE-SW方向に, 第4図(b)の井内浦観測点ではE-WからNW-SE方向のものが多く認められます. しかし, 断層擦痕と断層の運動センスから推定した変位方向は, 走向がN-SからNE-SW方向に近いものであっても断層面の傾斜方向にすべる逆断層のほか, 断層面の傾斜に対して斜めにすべる正断層, 逆断層や横ずれ断層と様々です. このことから, 一つの応力によってこれらすべての断層が活動したとは考えにくいのです. このようなデータセットを「不均一な断層スリップデータ」と呼びます.

4. 応力テンソルインバージョンによる主応力軸の検出

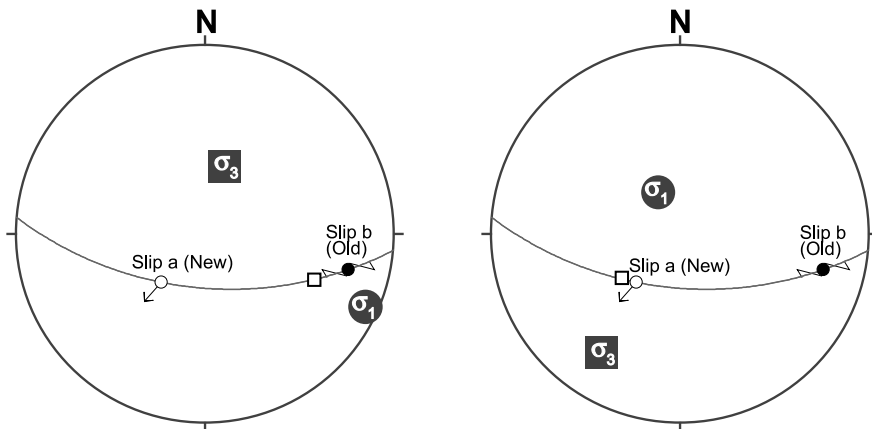
大坪ほか(印刷中)は2つのコアから得た断層スリップデータから応力テンソルインバージョンという解析方法を用いて, 断層が活動した当時の応力を検出し

ています. 応力テンソルインバージョンとは, 各々の断層データをうまく説明できるような応力状態を解析によって求めようというものです(Angelier, 1979). ここでは, 2つのコアにおける不均一なデータセットから複数の応力をうまく検出する必要があります. そのためには多重逆解法(Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006)が有効です. この解析の手法とその表示法はYamaji(2000)を参照してください.

多重逆解法による解析の結果, 海山観測点コアでは5つの応力を検出することができました(第6図). それぞれ応力MYa, MYb, MYc, MYd, およびMYeとします. 一方, 井内浦観測点コアでも5つの応力が検出されました(第6図). それぞれ応力IUa, IUb, IUc, IUd, およびIUeとします.

ここで断層面上の断層擦痕の重複関係を用いて応力の新旧関係を決定します. 同じ断層上での断層擦痕の重ね合わせは, 同じ断層面における断層の再活動を示します. 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します. ここでは, 井内浦観測点の深度359.5mでの検討結果を示します.

深度359.5mでは(第7図), E-W走向でSW方向に



第7図 井内浦観測点コアの深度359.5mで認められる断層面における検出された応力と実際のすべり方向の関係。(左図)応力IUCおよび(右図)応力IUE. 断層擦痕の新旧関係(○: Newと●: old)は重複関係に基づきます. 白抜き四角は多重逆解法によって検出された応力による理論すべり方向. IUCによる理論すべり方向(左図の□)がslip-b (old)を説明し, IUEによる理論すべり方向(右図の□)がslip-aをよく説明することが分かります.

58° 傾斜している断層面を認めることができました. この断層面には, 傾斜すべり成分の大きい正断層センスの断層擦痕が斜めすべり成分の強い横ずれセンスの断層擦痕をかき消すように付着していました. 前者の断層擦痕をスリップa, 後者のそれをスリップbと呼ぶことにします. この面で認められる断層擦痕の重複関係はスリップaがスリップbよりも新しいことを示します.

次に上記の二つのスリップと検出した応力との対応関係を考えてみます. これらのすべり方向は応力IUCおよびIUEの2つの応力によって断層活動が可能であることが分かっています(大坪ほか, 印刷中). そこで2つの応力で計算される理論的なすべり方向がスリップaおよびbの方向のどちらによく対応するかを検討しました. その結果, 応力IUCでの理論的すべり方向がスリップbとよく対応し, 応力IUEでの理論的すべり方向がスリップaとよく対応します. スリップaがスリップbよりも新しいことから, 応力IUEが応力IUCよりも新しいと判断できます.

このような手順で応力の新旧関係を調べていくと, 海山観測点および井内浦観測点ともに, (1) E-W方向の圧縮→(2) NE-SW方向の伸張→(3) N-S方向の圧縮という類似した応力履歴を持つことが明らかになり, 両観測点の結果は比較的広範囲の応力変化

を反映していることが分かりました(大坪ほか, 印刷中).

5. 検出された応力の成因について

検出された応力の成因について, 大坪ほか(印刷中)の解釈を簡単に紹介します.

2つの観測点の多重逆解法による最終ステージ(具体的な時期は不明)の応力状態は, ともにほぼ南北方向の圧縮です. 他方, 現在の応力場は, 北側に位置する海山観測点では, 現在の西南日本で一般に認められる東西方向の圧縮ですが, 南側に位置する井内浦観測点では, どちらかというとな南北方向の圧縮です(例えば, 活断層研究会, 1991; 佐藤ほか, 2009). したがって, 海山観測点では, 上述の最終ステージから現在に至るまでに応力場の主圧縮方向が, 南北から東西に90度回転したのに対し, 井内浦観測点では大きな変化がないことになります.

紀伊半島南部には, ヒンジライン(吉川, 1968)と呼ばれる地形的な境界線(過去に繰り返し発生している東南海・南海地震等の際に生じた地盤の隆起と沈降の境界線)があり, 大局的には, このヒンジラインの北側で東西圧縮, 南側で南北圧縮になることが知られています. したがって, 上述の測定結果は, 最終ス

テージには、海山観測点の北にあったヒンジラインが、現在に至るまでに南下して海山観測点と井内浦観測点の間に来たことを示唆します。

ヒンジラインの位置は東南海・南海地震の震源域と密接な関係がありますから、今後もこのような解析を行って応力場の変遷に注目していきたいと思っています。

引用文献

- 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.
- 荒牧重雄・羽田 忍 (1965) : 熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質. *地質学雑誌*, 71, 494-512.
- 星 博幸 (2002) : 熊野酸性火成岩類の古地磁気方位. *地調研報*, 53, 43-50.
- 星 博幸・三輪健治・川上 裕 (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. *地質学雑誌*, 110, 103-118.
- 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 (2007) : ジルコンのフィッション・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. *地質学雑誌*, 113, 326-339.
- 狩野謙一・村田明広 (1998) : 構造地質学. 朝倉書店, 298p.
- 活断層研究会 (1991) : 新編日本の活断層. 東京大学出版会, 448p.
- 川上 裕・星 博幸 (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. *地質学雑誌*, 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.
- Miura, D. (1999) : Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 92, 271-294.
- Otofujii, 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.
- 大坪 誠・重松紀生・北川有一・小泉尚嗣 (印刷中) : 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. *地質学雑誌*.
- 佐藤隆司・北川有一・木口 努・塚本 斉・重松紀生・板場智史・佐藤 努・関 陽児・梅田康弘・加藤春實・小泉尚嗣 (2009) : 東南海・南海地震予測のための地下水等観測点整備に伴う地殻応力測定 (速報). *地質ニュース*, 本号, 38-41.
- 角井朝昭・内海 茂・新正裕尚・下田 玄 (1998) : K-Ar法による熊野酸性火成岩類の年代の再検討. *地質学雑誌*, 104, 387-394.
- 田上高広 (1982) : 熊野酸性岩類の古地磁気とフィッション・トラック年代. *大阪微化石研究会機関誌*, no.9, 23-32.
- Yamada, Y. and Yamaji, A. (2002) : Determination of paleo-stresses from mesoscale shear fractures in core samples using the multiple 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.
- 山路 敦・大坪 誠・佐藤活志 (2008) : ボーリングコアから断層スリップデータを取得する方法. *地質学雑誌*, 114, 250-255.
- 吉川虎雄 (1968) : 西南日本外帯の地形と地震性地殻変動. *第四紀研究*, 3, 290-296.

OTSUBO Makoto, SHIGEMATSU Norio, KITAGAWA Yuichi and KOIZUMI Naoji (2009) : Paleostress analysis by using faults in the core samples from Ichiura and Miyama observatories, Kii Peninsula, SW Japan.

<受付: 2009年8月10日>