

島弧における帯状構造の屈曲とプレートの斜め沈み込み 第1部 —西南日本外帯沖の屈曲構造とプレート境界地震—

杉山 雄 —*

SUGIYAMA, Y. (1989) Bend of the zonal structure of island arcs and oblique subduction as the cause of the bending. Part 1—Bending structures off the outer zone of Southwest Japan and “plate boundary” earthquakes—. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 40 (10), p. 533-541.

Abstract: On the Pacific side of Southwest Japan, five promontories exist at almost regular intervals of 120 to 150 kilometers. Along these promontories, there are meridional upheavals whose axes are extended to the south and bend clockwise from N-S to E-W direction and change into E-W-trending anticlinal or anticlinorium axes in the outer ridge zones. Based on these geological and geomorphic features, the Pacific side of Southwest Japan is divided into five equivalent regions (structural units).

Detailed geological structures of the structural units have been revealed by the seismic profilings conducted by GSJ in the area off Muroto zaki (Muroto Promontory in Shikoku). Along the meridional upheaval at the unit boundary, there are both a nose structure protruding northward, and meridional faults indicating relative uplifts of the western blocks. N-S-trending folds formed by E-W compression exist in the western part of the unit. Megakink folds showing clockwise and counterclockwise rotations are developed respectively in the western and eastern halves of the unit.

Along the Nankai Trough off Southwest Japan, there have occurred so-called “plate boundary” earthquakes with a magnitude over 7.5 at intervals of a hundred or more years. The inferred source regions of these earthquakes coincide, in both dimension and location, with the structural units. Furthermore, the patterns of crustal movements associated with these earthquakes and the pattern of compressive deformation inferred from fault models of the earthquakes coincide with the above-mentioned characteristics of the structural units.

From these facts, it is concluded that the bending structures have been formed by accumulation of coseismic compressive deformations as a result of recurrent earthquakes at the same source regions (structural units).

On the basis of these data and considerations, I present a generalized model of bending of the structures parallel to the trench axes in relation to the oblique subduction. As an important result of the modeling, it is inferred that if the strain-release domains were fixed to form structural units in the underthrusting accretionary prisms and oceanic plate beneath the fault of “plate boundary” earthquakes, a nose structure protruding oceanwards with downwarping is formed at the boundary of structural units.

1. はじめに

西南日本の太平洋沿岸には、西から足摺岬、室戸岬、潮岬、大王岬及び御前岬からなる5つの南方に突出する岬が存在する。これらの岬については、ほぼ等しい間隔で存在すること、この部分に南北性の隆起軸が存在すること、海成段丘面が周囲より高い位置に存在すること、などの興味深い特徴があることが古くから指摘されている(OTUKA, 1932; TSUCHI, 1961など)。しかしながら、こ

のような顕著な地形及び地質構造の形成メカニズムについては、プレート境界地震との関連性が指摘されているものの(例えば、藤田・太田, 1977など)、今日に至るまで十分な説明がなされないままであった。

杉山・栗田(1989)及び栗田・杉山(1989)は、地震発生機構の地域的特性に関する研究の一環として、海域を含めた西南日本外帯の地形及び地質構造とプレート境界地震に伴う地震性地殻変動との関係を検討した。その結果、南北性隆起軸などの岬付近の地形・地質学的特徴は、プレート境界地震に伴う右斜めずれ断層運動によって形成されたとの結論に達した。

* 環境地質部

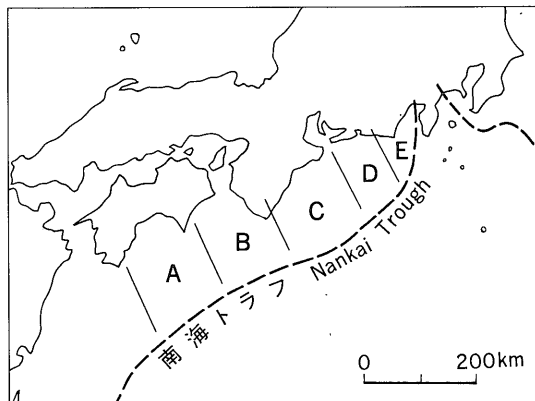
筆者は更に、プレート境界地震の震源域境界部の地質構造を詳細に検討した。その結果、震源域境界部の地質構造は、最近、西南日本各地から報告されている帯状構造の屈曲(杉山, 1981; 寺岡ほか, 1981; 柳井, 1986など)と基本的な特徴が一致することが判明した。また、これらの屈曲構造の幾何学的特徴から、屈曲構造形成当時のプレート間相対運動の横ずれセンスを特定できることが明らかになった。

本稿(第1部)では、これら一連の研究成果のうち、震源域境界部の地質構造(屈曲構造)の特徴とその一般化した形成モデルについて報告する。また、次稿(第2部)では、このモデルによる西南日本各地の屈曲構造の解析とその解析結果に基づくプレート間相互運動の変遷について報告する。

2. 西南日本前縁の構造单元

西南日本の前縁部は、第1図に示すように、逆L字状のトレスを持つ隆起軸とその背後(島弧側)の前弧海盆をセットとする、東西幅120-150 kmの5つの地域(構造单元)に区分される(杉山・栗田, 1989)。これら5つの構造单元は、規模及び配置の点で、南海トラフ沿いのプレート境界地震の震源域(第2図)と一致する。また、構造单元を特徴づける地形及び地質構造(①逆L字状のトレスを持つ隆起軸、②その背後の前弧海盆、並びに③隆起軸北端に位置する岬付近の段丘面の島弧側及び西方への傾動)は、プレート境界地震に伴う垂直変動のパターン(第3図下段)と調和的である。

このことから、構造单元A-Dとプレート境界地震の震源域A-Dとは1対1に対応しており、構造单元を特徴付ける地形・地質構造は、プレート境界地震が同じ領



第2図 西南日本前縁部におけるプレート境界地震の震源域(A-E領域) 宇津(1984)による。

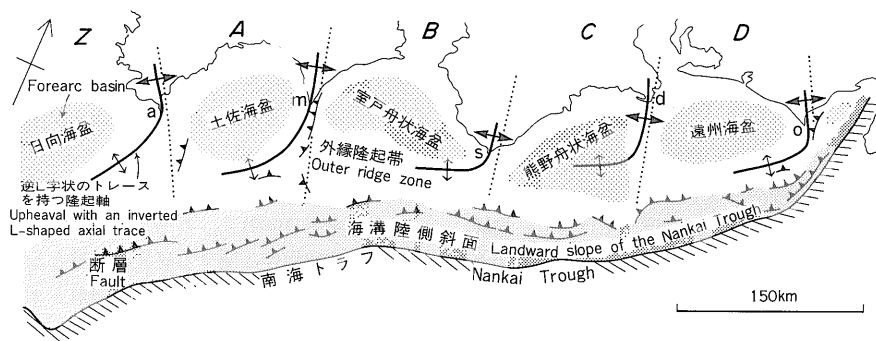
Fig. 2 Source regions of "plate boundary" earthquakes in Southwest Japan. After UTSU (1984). A-E sections are source regions of recurrent "plate-boundary" earthquakes.

域を震源域として繰り返し発生した結果、地震時地殻変動の一部が永久変形として累積して形成されたと考えられる(杉山・栗田, 1989; 栗田・杉山, 1989)。

3. 構造单元境界部の地質構造(屈曲構造)

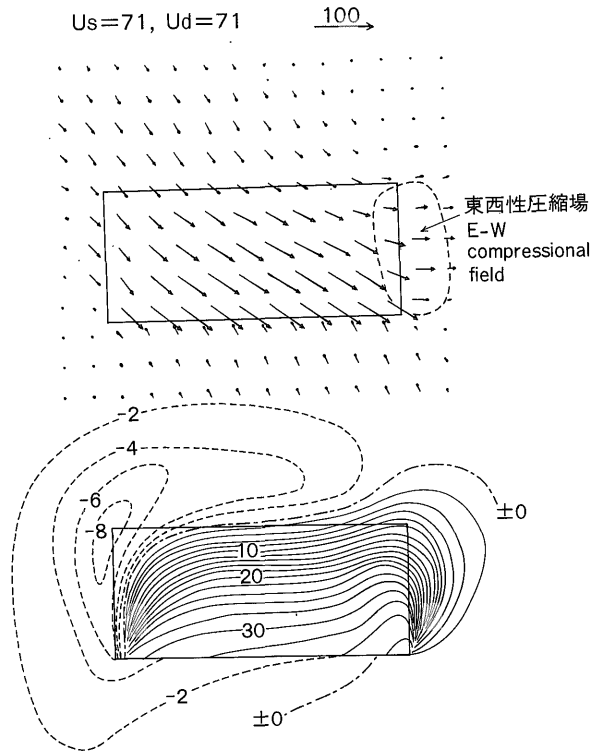
構造单元AとBの境界に当たる室戸岬沖の地質構造は、岡村・上嶋(1986)によって詳細に調査されている。彼らの20万分の1室戸岬沖海底地質図及び同説明書第7図によると、逆L字状のトレスを持つ隆起軸は複背斜構造からなる。複背斜構造は、褶曲軸と並走し、西側ブロックの相対的隆起を示す断層(第4図c)を伴う。

隆起軸周辺の地質構造に注目すると、隆起軸の東西で



第1図 西南日本前縁部の大地形及び地質構造 主として井上・本座(1982)による。A-D及びZは構造单元(本文参照)。a: 足摺岬, m: 室戸岬, s: 潮岬, d: 大玉崎, o: 御前崎。

Fig. 1 Topographic and structural outlines of the forearc side of Southwest Japan. Mainly after INOUE and HONZA (1982). A-D and Z are structural units. a: Ashizuri misaki, m: Muroto Zaki, s: Shiono misaki, d: daio zaki, o: Omae zaki.



第3図 右横ずれ逆断層運動による地表の水平変位(上段)と垂直変位(下段) 安藤(1985)に加筆。横ずれ成分：縦ずれ成分=1:1, 断層面(図中の四角形)の傾斜 30° , その上端(四角形の下辺)が地表に達している場合。便宜上, 断層面の走向を東西, 傾斜の方向(島弧側)を北と見なす。

Fig. 3 Horizontal (top) and vertical (bottom) displacements at the ground surface by right-lateral reverse faulting. Retouched after ANDO (1985). The ratio of lateral displacement to vertical one is 1 to 1. Inclination of the fault plane (quadrangle in the figure) is 30° and the upper edge of the fault plane (bottom side of the quadrangle) reaches the ground surface. For convenience' sake, the strike and dip of the fault plane are assumed to be E-W and north respectively.

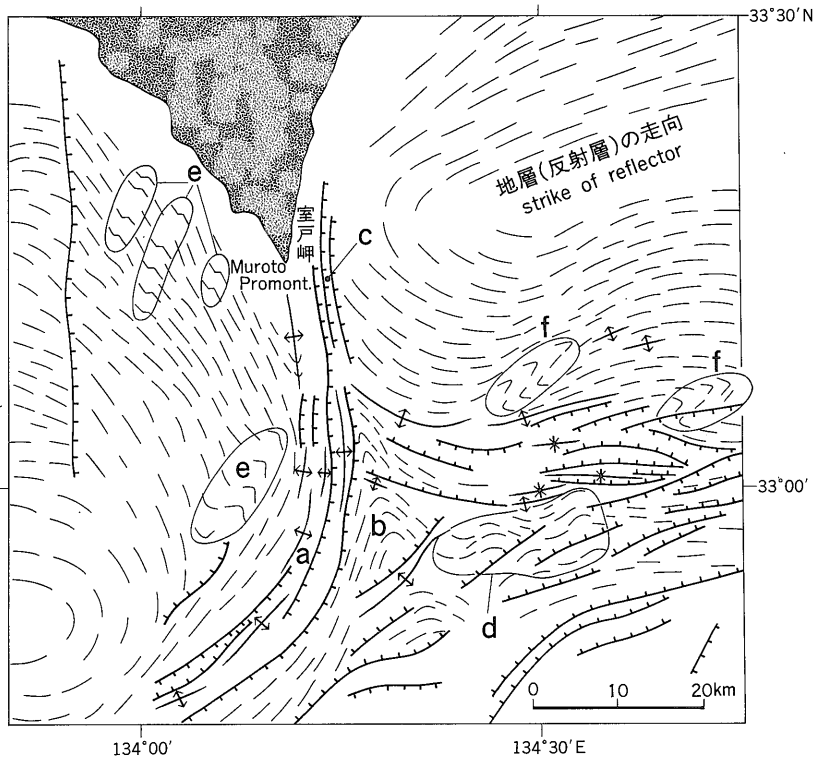
地層の変形パターン及び変形強度に差異が認められる。即ち、隆起軸の西側では、褶曲や断層が少なく、地層の走向変化のパターンは比較的単純である。この部分に特徴的な構造として、左回転メガキック褶曲(Powell *et al.*, 1985; 柳井, 1986)が存在する(第4図e)。これに対して、隆起軸の東側では、東西性の断層が多数存在するほか、地層の走向に複雑な屈曲が認められる。これらは屈曲のパターンから、島弧側へ突出するノーズ状構造(第4図b), 南北方向の軸を持つ褶曲(同d), 右回転メガキック褶曲(同f)などから構成される。

また、構造单元ZとAの境界に当たる足褶岬沖の地質構造は、岡村ほか(1987)によって精査されている。彼らによると、足褶岬沖の隆起軸も複背斜構造からなり、東側落ち及び西側落ちの南北性断層を伴う。また、複背斜構造の東側には幅約40 kmに亘って、南北方向の軸を持つ波長数 km-10 km 程度の褶曲群が発達する。

潮岬沖(構造单元BとCの境界)及び大王崎沖(同CとDの境界)については、詳細な地質構造調査が行われていない。しかし、井上・本座(1982)の海底地質図によると、单元境界の西側に逆L字状、東側にL字状のトレスを有する背斜軸が存在し、单元境界に沿って島弧側へ突出するノーズ状構造の存在が示唆される。更に、海上保安庁水路部(1980)によると、構造单元Dの東端に位置する御前岬沖の隆起軸(御前崎海脚)周辺には、室戸岬沖と同様に西側ブロックの相対的隆起を示す顕著な南北性の断層が存在する。

4. 屈曲構造と右斜めずれ断層運動に伴う地表変位との整合性

前章に示した各構造单元境界部の変形構造(屈曲構造)は、右斜めずれ変位を有する震源断層の活動に伴う地表変位(第3図)と調和的である。すなわち、单元境界の東



第4図 室戸岬沖の地質構造 岡村・上嶋(1986)の第7図を簡略化。a: 逆L字状のトレースを持つ隆起軸, b: ノーズ状構造, c: 西側ブロックの相対的隆起を示す南北性断層, d: 南北方向の軸を有する褶曲, e: 左回転メガキック褶曲, f: 右回転メガキック褶曲。

Fig. 4 Detailed geologic structures off Muroto zaki (Muroto Promontory). Simplified after OKAMURA and JOSHIMA (1986). a: upheaval with an inverted L-shaped axial trace, b: nose structure, c: N-S-trending faults showing relative uplift of the western blocks, d: folds with N-S-trending axes, e & f: megakink folds showing counterclockwise and clockwise rotations respectively.

側に発達する南北方向の軸を持つ褶曲(第4図d)は、震源断層東端部から東隣の構造单元西端部にかけて、東西性の圧縮場(短縮場)が形成されることと調和的である。また、島弧側へ突出するノーズ状構造(第4図b)、並びにこれに付随する左回転メガキック褶曲(第4図e)と右回転メガキック褶曲(同図f)のペアは、单元境界付近における東西方向の短縮(締め付け)が島弧側へ向かって減少することを反映した構造と考えられ、震源断層東端部における水平変位の分布パターン(島弧側へ向かって東西短縮量が減少する)と一致する。

また、西側ブロックの相対的隆起を示す南北性の断層(第4図c)は、震源断層の上盤東端部における南東-東斜め上方を向く地震時変位を反映していると解され、基本的には逆断層と考えられる。

以上の事実及び推論から、構造单元の境界部に存在する屈曲構造は、プレート境界地震に伴う地震性地殻変動の一形態と考えられる。この結論は、屈曲構造を構成す

る各変形要素(ノーズ状構造やメガキック褶曲など)が定常的な造構応力場で形成されたものではなく、プレート境界地震に伴って、100-200年程度の間隔で“パルス的”に生成される応力場の産物であることを意味する。

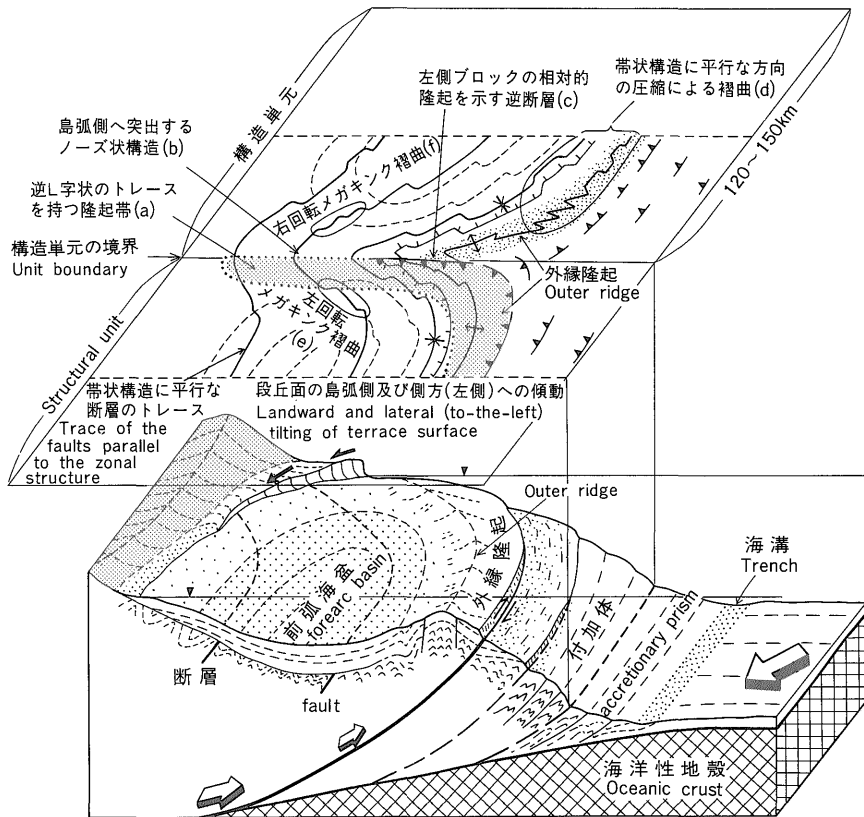
5. 屈曲構造の形成モデル

5.1 右斜め沈み込みに伴う屈曲構造の形成モデル

南海地震(1946年)の断層モデル(ANDO, 1982など)を考慮して、第4図に示した室戸岬沖の屈曲構造と室戸岬付近から南海トラフにかけての音波探査断面(井上・本座, 1982; 岡村・上嶋, 1986など)とを重ね合わせることで、第5図のような屈曲構造の形成モデルを描くことができる。

右斜め沈み込みに伴う屈曲構造の構造要素は次のようにまとめられる。

a: 構造单元の右端から海洋側の縁(震源断層の上端)に沿う、逆L字状のトレースを持つ隆起帯(構造单元



第5図 屈曲構造の形成モデル 右斜め沈み込みの場合。

Fig. 5 Generalized formation model of bending structures. In the case of right-lateral oblique subduction. a: upheaval with an inverted L-shaped axial trace, b: nose structure protruding landwards, c: reverse fault showing relative uplift of the left-handed block, d: folds formed by compression parallel to the trench axis, e & f: megakink folds showing counterclockwise and clockwise rotations respectively.

右端部では島弧側へ変位量を減じる)

- b: 单元境界に沿う、島弧側へ突出するノーズ状構造 (海溝軸に平行な帯状構造の島弧側への突出)
- c: 单元境界付近における、左側ブロックの相対的隆起を示す南北性の逆断層
- d: アコーディオン状褶曲や共役褶曲などの帯状構造に平行な方向の圧縮による褶曲構造(单元境界右側)
- e: 单元境界左側(構造单元右端部)の左回転メガキック褶曲
- f: 单元境界右側(構造单元左端部)の右回転メガキック褶曲

(左右は海洋側から構造单元を見た場合)

5.2 横ずれセンスと屈曲パターンの関係

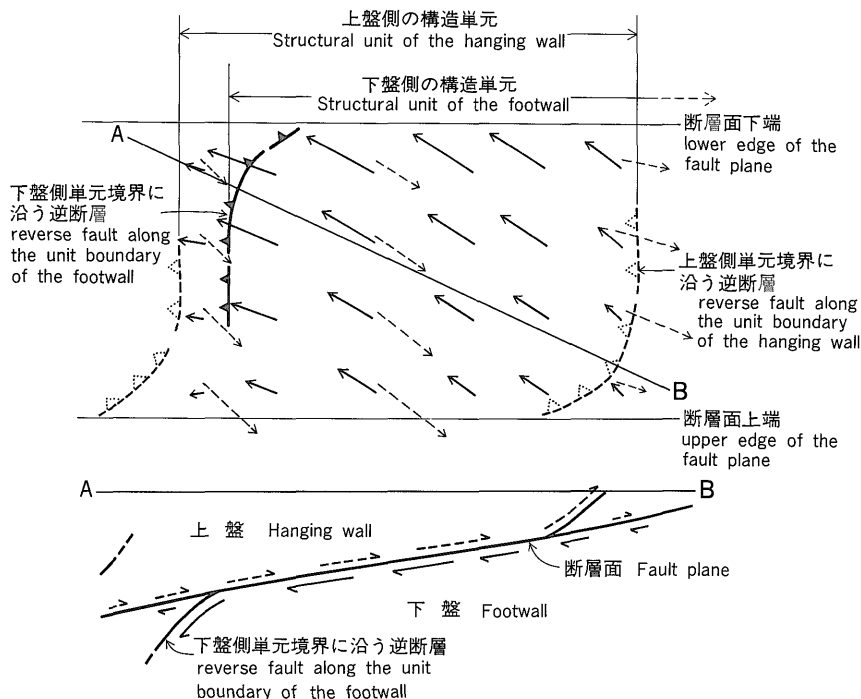
沈み込みが左横ずれ成分を持つ場合には、構造单元の左端から海洋側の縁に沿ってL字状の隆起帯が形成される。また、地震時に、帯状構造と平行な方向を主軸と

する圧縮場が構造单元右端部に形成されるため、dの褶曲構造は单元境界左側に出現する。更に、单元境界付近の逆断層は、右側ブロックの相対的隆起を示す。これに対して、左及び右回転メガキック褶曲並びにノーズ状構造は、右横ずれ成分を持つ場合と同様に形成される。

5.3 プレート境界地震の断層下盤側の変形

屈曲構造の形成モデル(第5図)に示すように、プレート境界地震の断層面上端は、外縁隆起帯と海溝陸側斜面の境界部に位置する逆断層に連続すると考えられる。従って、同断層の海洋側に位置する付加体や海溝充填堆積物(加賀美ほか, 1983のプロトスラスト帯-多重階層デホルマン帯の一部)は、プレート境界地震の断層下盤側に位置すると考えられる。

これらの断層下盤側の堆積物及び沈み込む海洋性プレート中に、断層上盤側と同様な定常的な弾性歪の解放領域(構造单元)が形成された場合には、下盤側の構造单元



第6図 プレート境界地震の断層下盤側に構造単位が形成された場合の下盤側の水平変位分布(上段)とA-Bに沿う断面図(下段) 右斜め沈み込みの場合。上段の実線矢印:下盤側の水平変位, 上段の破線矢印:上盤側の水平変位。便宜上, 断層面の走向を東西, 傾斜の方向(島弧側)を北と見なす。

Fig. 6 Distribution pattern of the horizontal displacements in the footwall of the "plate boundary" earthquake fault, in case where the structural units are formed in the footwall. The bottom figure is a cross section along A-B. Arrows of solid and broken lines in the top figure show horizontal displacements in the footwall and hanging wall respectively. For convenience' sake, the strike and dip of the fault plane are assumed to be E-W and north respectively.

境界部にも屈曲構造が形成されると考えられる。下盤側の変位ベクトルは, 水平及び垂直成分とも, 上盤側の変位ベクトルと逆の方向を持つ。また, 構造単位境界部における東西短縮量は, 上盤側とは逆に島弧側へ向かって増加する(第6図)。従って, 右斜め沈み込みに伴う断層下盤側の屈曲構造は次のような特徴を持つと考えられる(第7図)。

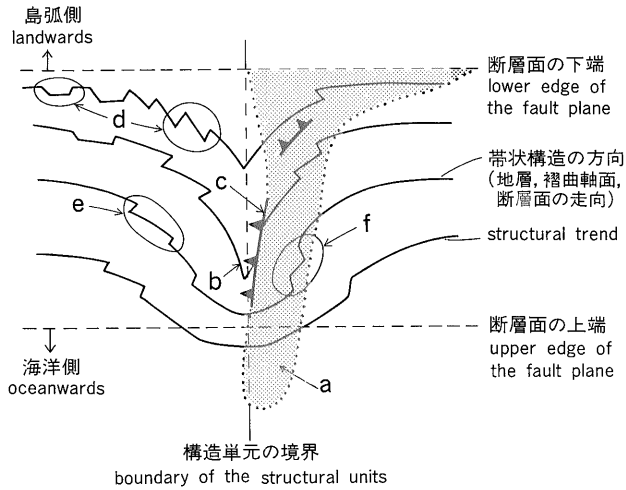
- a: 構造単位の左端から島弧側の縁(断層面の下端)に沿う沈降帯
- b: 単位境界に沿う, 海洋側へ突出するノーズ状構造(海溝軸に平行な帯状構造の海洋側への突出)
- c: 単位境界付近における, 左側ブロックの相対的隆起を示す逆断層
- d: アコーディオン状褶曲や共役褶曲などの帯状構造に平行な方向の圧縮による褶曲構造(単位境界左側)
- e: 単位境界左側の右回転メガキンク褶曲
- f: 単位境界右側の左回転メガキンク褶曲

(左右は海洋側から構造単位を見た場合)

横ずれセンスが左の場合には, 沈降帯は構造単位の右端(単位境界左側)に沿って形成され, dの褶曲構造は単位境界右側に出現する。また, 単位境界付近の逆断層は, 右側ブロックの相対的隆起を示す。b, e, fの構造は横ずれセンスの左右に関わりなく形成される。

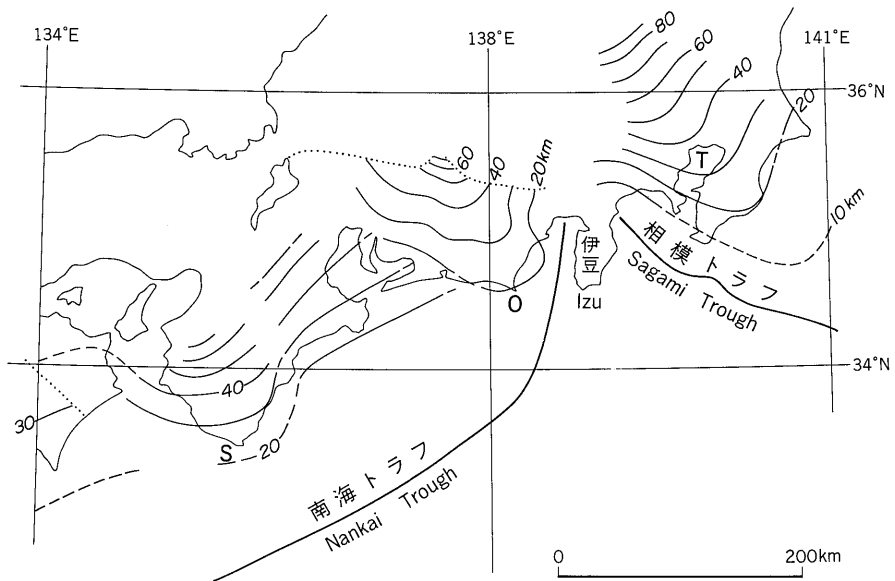
このような特徴を持つ断層下盤側の変形は, 静岡県中部に分布する前期中新世の付加体(杉山・下川(1989)の大井川衝上体)中に存在する。この付加体の構造については第2部で詳述する。

また, 現在, 西南日本弧及び関東地方下に沈み込みつつあるフィリピン海プレート上面の等深線(山崎・大井田, 1985; 石田, 1989など)には, ここで述べた断層下盤側の変形と解することが可能な, 等深線の海洋側への突出が存在する(第8図)。本稿ではこの構造について立ち入った考察を行い得ないが, その形成過程について示唆を与える2つの特徴を指摘しておく。1)等深線の海洋



第7図 プレート境界地震の断層下盤側に形成される屈曲構造 右斜め沈み込みの場合. a-fの構造要素については本文参照.

Fig. 7 Bending structures formed in the footwall of the "plate boundary" earthquake fault. In the case of right-lateral oblique subduction. a: downwarping with oceanward-decreasing displacements, b: nose structure protruding oceanwards, c: reverse fault showing relative uplift of the left-handed block, d: folds formed by compression parallel to the trench axis, e & f: megakink folds showing clockwise and counterclockwise rotations respectively.



第8図 本州中央部に沈み込むフィリピン海プレート上面(微小地震の震源上限面)の形状 中部及び近畿地方は山崎・大井田(1985), 関東地方は石田(1989)による.

Fig. 8 Shape of the inclined seismic zone in the subducting Philippine Sea Plate beneath the central part of Honshu. After YAMAZAKI and OIDA (1985) and ISHIDA (1989). The upper boundary of focal depths is shown. Contour lines protrude oceanwards near Shionomisaki (S), Omaezaki (O) and Tokyo (T). These bendings of the contours can be regarded as the bending structures formed in the footwall of the "plate boundary" earthquake fault.

側への突出は、東京、御前崎及び潮岬付近に、ほぼ等しい間隔(約200 km及び250 km)で存在すること、2)これら3つの海洋側への突出は、南海トラフの延びの方向とほぼ直交する北西-南東方向の軸を有すること。

6. ま と め

以上、本稿では西南日本前縁の地震性地殻変動区に存在する屈曲構造をプレート境界地震の地震時地殻変動との関連において捉え、考察を行った。その主な論点は次のように要約される。

1. 西南日本の前縁部は、プレート境界地震の震源域に対応する、東西幅120-150 kmの構造単元に区分される。

2. 構造単元の境界部には、室戸岬、御前崎などの南方に突出する岬に連続する逆L字状のトレスを持つ隆起帯が存在するほか、帯状構造の島弧側への突出(ノーズ状構造)、メガキンク褶曲、南北方向の軸を有する褶曲、及び南北性の断層などからなる屈曲構造が認められる。

3. これらの各屈曲構造要素の変形パターンは、右斜めずれ変位を有する震源断層の活動(プレート境界地震)に伴う、地表における変位の特徴と調和的である。

4. このことから、屈曲構造は、プレート境界地震に伴う地震性地殻変動の一形態と考えられる。すなわち、屈曲構造は定常的な造構応力場で形成されたものではなく、プレート境界地震に伴って“パルス的”に生み出される造構応力場における変形が累積したものと解される。

5. 以上の考察に基づいて、プレートの斜め沈み込みに伴う屈曲構造の形成過程を一般化した。一般化された屈曲構造の形成モデルに基づく、プレート境界地震の断層下盤側にも屈曲構造が形成され得ること、また、その場合、ノーズ状構造は海洋側へ突出することを示した。

謝 辞 本稿は、工業技術院特別研究「地震予知に関する地質学・地球化学的研究」の2. 地震発生機構の地域的特性の解明 2) 東海地域(昭和63年度)の研究成果の一部である。

本研究を進めるに当たり、環境地質部地震地質課の粟田泰夫技官には、屈曲構造の形成過程について共同研究を行って頂いた。また、同課の佃 栄吉主任研究官には、再三にわたり、筆者の考察を進める上で有意義な議論をして頂いた。小出 仁地震物性課長には断層と帯状構造の屈曲に関する貴重な示唆を頂き、海洋地質部海洋

地質課の岡村行信主任研究官には室戸岬沖の海底地質について御教示頂いた。更に、衣笠善博地震地質課長及び佃主任研究官には草稿を検討して頂いた。

ここに記して、これらの方々に深く感謝の意を表する。

文 献

- ANDO, M. (1982) A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data. *Phys. Earth Planet. Interiors*, vol. 28, p. 320-336.
- 安藤雅孝(1985) 断層モデル. 阿部勝征ほか10名著「地震予知Ⅱ 地殻変動・地震・予知計画」, 学会出版センター, p. 183-233.
- 粟田泰夫・杉山雄一(1989) 南海トラフ沿いの巨大地震に伴う右横ずれ逆断層構造. 地震2, vol. 42, p. 221-223.
- 藤田和夫・太田陽子(1977) 第四紀地殻変動. 日本第四紀学会編「日本の第四紀研究—その発展と現状」, p. 127-152.
- 井上英二・本座栄一(1982) 300万分の1日本周辺海底地質図. 日本地質アトラス, 地質調査所, p. 26-37.
- 石田端穂(1989) フィリピン海プレート北端部でのプレート沈み込み—その2. 地震学会1989年度春季大会講演予稿集, p. 46.
- 加賀美英雄・塩野清治・平 朝彦(1983) 南海トラフにおけるプレートの沈み込みと付加体の形成. 科学, vol. 53, p. 429-438.
- 海上保安庁水路部(1980) 5万分の1海の基本図「駿河湾南西部」海底地形図(第6362号⁷⁾)及び海底地質構造図(第6362号^{7-S)}), 並びに海底地形地質調査報告. 37p.
- 岡村行信・上嶋正人(1986) 20万分の1室戸岬沖海底地質図及び同説明書. 地質調査所, 31p.
- ・岸本清行・村上文敏・上嶋正人(1987) 20万分の1土佐湾海底地質図及び同説明書. 地質調査所, 32p.
- OTUKA, Y. (1932) Post Pliocene crustal movements in the outer zone of Southwest Japan and in the “Fossa Magna” (1). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, no. 10, p. 701-722.
- POWELL, C. McA., COLE, J. P. and CUDAHY, T. J. (1985) Megakinking in the Lachlan Fold Belt, Australia. *Jour. Struct. Geol.*, vol. 7, p.

281-300.

杉山雄一(1981) 静岡地域の地質構造発達史一特に、多重褶曲構造と最近の地殻変動について一。構造地質研究会誌, no. 26, p. 71-87.

———・粟田泰夫(1989) 西南日本外帯の南北性隆起軸とプレート境界地震(構造单元と断層单元の一致)。地震学会1989年度春季大会講演予稿集, p. 60.

———・下川浩一(1989) 赤石山地四万十帯における前期中新世付加体(瀬戸川帯)の形成過程。構造地質研究会誌, no. 34, p. 173-188.

寺岡易司・今井 功・奥村公男(1981) 九州外帯の屈曲構造。「中生代造構作用の研究」, no. 3, p. 87-98.

TSUCHI, R. (1961) On the Quaternary sediments and molluscs in the Tokai region, with notes on the late Cenozoic history of the Pacific coast of Southwest Japan. *Japan. Jour. Geol. & Geogr.*, vol. 32, p. 457-478.

宇津徳治(1984) 地震学 第二版。共立出版, 310 p.

山崎文人・大井田徹(1985) 中部地方におけるフィリピン海プレート沈み込みの形状。地震2, vol. 38, p. 193-201.

柳井修一(1986) 西南日本外帯における地質構造の巨大折れ曲がり帯(Megakink)とそのテクトニックな意義。地質雑, vol. 92, p. 603-606.

(受付: 1989年5月8日; 受理: 1989年6月23日)