総 合 報 告

南関東地域のサイスモテクトニクス

国立防災科学技術センター第2研究部* 岡 田 義 光

Seismotectonics in the Southern Kanto District, Central Japan

Yoshimitsu OKADA

Second Research Division, National Research Center for Disaster Prevention,
Tennodai 3-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, Japan

(Received February 8, 1990; Accepted March 6, 1990)

The southern Kanto district, central Japan, is characterized with its quite complex tectonic environment. Both of the Pacific and the Philippine Sea plates are subducting beneath this area and interfering each other. Adjoining this area, there exists the Izu Peninsula to the west as a collision zone between the Pacific and the Eurasian plates, while there exists trench-trench-trench triple junction of the Pacific, Philippine Sea and the Eurasian plates to the east.

Several models of the plate configuration in this area have been proposed based on the hypo-central distribution of microearthquakes, the focal mechanism solutions, the three-dimensional velocity structure, the fault model of major earthquakes, the geomorphological and geological evidences, and so on. Comparing these models, considerable varieties are seen in the iso-depth contours of the Philippine Sea plate, whereas those of the Pacific plate are more or less similar. These varieties came from the differences in the data source, the strike of the cross sections which were mainly used for delineation of the contour lines, and referenced data on which each researcher put different stresses.

Based on these tectonic models, some explanations are given to the paired earthquake phenomenon and synchronized seismic activation among the adjacent regions. Also, several candidates for forthcoming earthquakes of M7 class are proposed as a consequence of these tectonic backgrounds.

Key words: Kanto district, seismotectonics, plate model.

§ 1. はじめに

首都圏を擁する南関東地域の地震活動をテクトニクス的に正しく理解することはなかなかの難事業である。関東地方は厚い堆積層に覆われている上、人工的雑音が非常に大きいため、精密な地震観測が困難であるという技術的制約に加えて、当地域がきわめて複雑で特異なテクトニクス環境下に置かれているためである。南関東地域の下には太平洋プレートとフィリピン海プレートの双方が沈み込んで相互に干渉し合っており、また、西側はフィリピン海プレートの衝突する伊豆半島に、東側は世

界に稀な海溝三重点である房総半島沖にと、いずれも第一級の難問題地域を境界条件として抱え込んでいる。おまけに、南関東地域自体が、これまではユーラシアプレートの一部とされていたのが、最近では北米プレートまたは東北日本マイクロプレートに属するとの考えが提出され、議論はさらに複雑な展開を見せている。

翻って、南関東地域においては、これまでに1923年関東地震を筆頭として、1855年(安政)江戸地震、1894年(明治)東京地震等の被害地震が幾度も発生している。我が国のあらゆる中枢機構が集中する首都圏を地震災害から守る上で、当地域のサイスモテクトニクス環境を明らかにし、そこでの地震発生様式を解明することは、非

* 〒305 茨城県つくば市天王台 3-1

Fig. 1. Epicentral distribution in the southern Kanto district in recent 10 years detected by Natl. Res. Cent. Disas. Prev. (NRCDP). (a) shows the hypocenters shallower than 30 km together with the distribution of active faults, while (b) shows the ones of 30~100 km depth. In (a), only the data in nighttime (19h~07 h) are plotted to avoid the mixing of quarry blasts.

常に重要かつ急務であると考えられる。

本稿では、この南関東地域におけるサイスモテクトニクスについて、とくにフィリピン海プレートのモデル化に関する議論を中心としつつ、現在考えられている当地域での地震発生様式ならびに今後に残された課題等を整理する。なお、この問題に関しては、すでに垣見・鈴木 (1974), 垣見・他 (1977), NAKAMURA *et al.* (1984), 瀬野 (1985a) 等のレビューがあり、最近では, ISHIBASHI and ISHIDA (1989) や笠原 (1989) によるまとめがなされている。

§ 2. 南関東地域のサイスモテクトニクスを考察する材料

南関東地域のサイスモテクトニクスを考察する上で基本的な材料となるものは、同地域における震源分布、発震機構、地震波速度や減衰等の三次元構造、過去の地震の断層モデル、地殻変動および地殻応力等であり、また、周辺地域やより広域のテクトニクスに関する知見も重要な参考材料となる。勿論、これらはお互いに関連し合っており独立ではあり得ないが、以下に、上記の各項目に関する簡単なレビューを行う。なお、首都圏周辺における地震、地殻変動、地質構造、地球電磁気、地球化学等の代表的資料をとりまとめた報告が、ごく最近、国土地理院 (1989) により刊行されている。

(1) 震源分布

南関東地域では、1872 年東京において世界で初めて

地震の器械観測が始められ、東京気象台-中央気象台-気象庁は、1875 年以来業務として大量の地震観測データを蓄積している [宇佐美・浜松 (1967)]。また、1955 年には筑波での ASADA (1957) による微小地震の発見、1960 年代後半には東京大学地震研究所による我が国初の地震テレメータの導入 [宮村 (1967)] がなされる等、常に先導的な地震観測が行われてきた。この結果、首都圏周辺における地震密集域の存在や深発地震の配列などは古くより知られ、宇佐美・渡辺 (1977) は関東地方に 21 個の地震の巣を定義している。また、津村 (1973) は、関東地方下において深発地震面の二層構造が見られることを初めて明らかにした。

しかしながら、当地域における震源分布の更なる詳細については、それがあまりにも複雑である上、首都圏周辺での高精度・高感度観測の困難性に災いされて、その解明は他地域に比してむしろ立ち遅れていたと言ってよい。このような状況を克服するべく、国立防災科学技術センター (以下、防災センター) は深さ 3,000 m 級の深層地震観測施設 [高橋 (1982)] を完成させ、また高密度の微小地震観測網の整備 [浜田・他 (1982)] を行うことによって、関東地域の地震検知能力および震源決定精度を格段に向上させた。これによって、精密なプレートの形態やテクトニクスに関する議論を行う上で最も基礎となる、高信頼度の震源分布データが得られるようになった。

関東南部における震源分布に関しては多くの研究がな

Fig. 2. Historical change of the hypocenter determinations compared for the 50 km width EW cross section at south of 36°N in the Kanto district. JMA: Japan Meteorol. Agency, ERI: Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, NRCDP: Natl. Res. Cent. Disas. Prev. (a) KANBAYASHI and KATSUMATA (1975), (b) TSUMURA (1973), (c) TAKAHASHI and KASHARA (1980), (d) NRCDP.

されているが、1970年代始めまでの成果については津村(1973)によるまとめがあり、また1970年代および1980年代の代表的震源分布が東京大学地震研究所・国立防災科学技術センター(1980, 1989)により提出されている。

Fig. 1は、最近10年間における南関東地域の30 km以浅及び30~100 kmの深さの地震の震央分布を示したものである。前者については、人工地震の混入を防ぐため夜間(19時~07時)のみの震源をプロットし、また、活断層研究会(1980)による同地域の活断層分布も同時に示してある。後者については、茨城県南西部から千葉県中部にかけての震源密集が顕著であり、このうち茨城県南西部については、西側の北北西-南南東に帯状に分布する深さ40~50 kmの部分(鬼怒川側と呼ばれる)と、東側で塊状をなす深さ60~70 kmの部分(筑波側と呼ばれる)とが分離して存在する。

この図に見られるように、南関東地域での震源分布は大変に複雑であり、その特色としては、太平洋プレートとフィリピン海プレート双方の沈み込みに対応する地震

群が重なり合って存在すること、茨城県南西部から千葉県中部にかけて地殻下地震の激しい活動が島状に見られること、マントルウェッジ内にも地震活動が見られること等を挙げることができる。また、M6級の低角逆断層型の地震が60~80 kmの深さまで発生していることは、関東地方特有の現象である[笠原(1985b)]。なお、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震活動は、伊豆半島から北方ないし北西方向へは追跡できないことが知られている。

Fig. 2は、震源決定精度の変遷を示すため、各時代における北緯36度線の南側50 km幅における震源分布の東西断面図を比較したものである[笠原(1989)による]。津村(1973)は、同図(b)の西下がりの地震群について、二重面全体を太平洋スラブ内に含ませる解釈と二重面の下側の配列を太平洋スラブ上面とする解釈の二通りを提示し、海溝との位置関係から見て後者の方がより正しかろうとの見解を示した。しかしこれは、現在の知識からすると、銚子市付近以東の震源が系統的に浅く決定されていたための誤った解釈とみなされよう。

Fig. 3. Schematic SW-NE cross sections for various models of the Pacific (PAC) and the Philippine Sea (PHS) plates beneath the Kanto district.

ルーチ的な地震観測データの蓄積に並行して、より高精度の震源分布を求める努力も多く研究者によりなされている。ISHIDA and ASANO (1979) は、人工地震のデータを用いた観測点補正を導入して震源の深さの決定精度を高め、従来知られていなかった東京直下の極浅発地震の存在を明らかにした。MAKI (1981a) は、Pn 走時残差を補正して気象庁データの震源再決定を行い、より密集度の高い震源分布を得ている。また、HASEMI and ISHIDA (1987), ISHIDA and HASEMI (1988) は、関東・東海地域の三次元速度構造を考慮した震源再決定を行い、1983～1985 年の 3 年間における微小地震約 11,000 個の精密震源分布図を提出している。

(2) 発震機構

南関東地域に発生する地震の発震機構に関しては、従来より ICHIKAWA (1962, 1971), MIKUMO (1962) 等の先駆的な研究によって、その複雑な地域性が指摘されている。

MAKI *et al.* (1980) は、茨城県南西部鬼怒川側の地震群の発震機構が北西への低角逆断層型でこれは震源分布とも一致することから、これらを太平洋スラブ上面に沿

う地震であると解釈する一方、千葉県中部から茨城県南西部筑波側にかけての地震群は東西圧縮型あるいは西側が落込む垂直縦ずれ型であることを示し、これらはフィリピン海スラブ北東端が太平洋スラブに衝突している影響を受け、太平洋スラブ内で発生する地震であると解釈した。牧 (1981b) は以上の解釈を Fig. 3(a) のように模式化しているが、これはスラブの位置および形態の面で、現在多くの研究者の提出している関東地方下のプレートモデルとはかなり異なっている。牧 (1981b) 自身、フィリピン海プレートが東（または北東）側にもぐり込むと考える根拠は見出されないと述べており、MAKI (1984) では、より広域にわたる多数の地震の震源配列や発震機構を調査して、茨城から千葉にかけての震源密集と発震機構の多様性は、東北日本弧と伊豆小笠原弧のスラブの接合に伴う地震面の北西への湾曲による高歪力が原因であろうとの別解釈を提示している。しかし、いずれにせよ、北西-南東の主圧力軸で特徴づけられる茨城県南西部鬼怒川側の地震群を、太平洋プレートとユーラシアプレートの境界に考えることは無理であろう。

笠原 (1980, 1985ab) は、この鬼怒川側における北西への低角逆断層型の発震機構はフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの相対運動を示すと考え、また茨城県南西部筑波側から千葉県中部にかけての発震機構は西下がり低角逆断層型が優勢であって、これは太平洋プレートとフィリピン海プレートとの相対運動を示すと解釈した。一方、中村・島崎 (1981) もユーラシアプレートと太平洋プレートにはさまれたフィリピン海スラブの存在を考え、その上端 (鬼怒川側) と下端 (筑波側) での活動が当地での発震機構を支配しているとの解釈を与えた。

井元 (1984, 1985) は笠原 (1980) のモデルを考慮して、フィリピン海スラブ内部に相当する関東南部の深さ 40~80 km の地震についてその P 軸・T 軸の空間分布を求め、P 軸は概ね北西-南東方向卓越であるが T 軸の方向は場所により連続的に変化していることを見出した。さらに、この様な応力場の形成を説明するため、フィリピン海スラブに加わるユーラシアプレート及び太平洋プレートからの外力を単純化して、簡単なモデル化を試みている。一方、望月・他 (1985) は、1979~1983 年の 5 年間に関東・東海地域で発生した M4 程度までの大中地震約 300 個について P 軸・T 軸分布の平面図及び断面図を作成し、関東南部については、茨城県南西部並びに埼玉県~神奈川県の高さ 50 km 程度の地震、千葉県北部の深さ 40 km 程度の地震、及び房総半島東岸の深さ 30 km 程度の地震の発震機構が、笠原 (1980) や中村・島崎 (1981) の指摘するフィリピン海プレートの沈み込みに調和的であると述べている。

鈴木 (1989) は、関東・中部地域に発生した約 450 個の小規模地震の発震機構解を求め、それらが大きな地震のものと整合的であることを確かめた上、P 軸・T 軸方位の類似性や活断層・活構造の位置等に留意した応力区の違いを行って、各応力区の特徴を詳細に調べている。その中で、山梨県東部から神奈川県西部にかけての地殻応力場の変化はフィリピン海プレートの衝突域から沈み込み域への遷移に関連している可能性が示され、また、神奈川県東部~東京都~埼玉県に沿った複雑な発震機構の移り変りは、フィリピン海スラブの沈み込む角度の変化により説明がなされている。

一方、鶴川・井元 (1982) は、関東地方の二重深発地震面内に発生する地震の発震機構を調査し、太平洋プレートの走向 (ほぼ南北) に平行な方向を主応力軸として、上面が伸張応力場、下面が圧縮応力場にあることを見出し、これを太平洋スラブの南北のたわみで説明した。また、笠原 (1986) は、銚子市付近の深さ 80~100 km に見られる正断層型の地震を、太平洋プレートの折れ曲り

によると解釈している。

(3) 地震波速度・減衰の三次元構造

前節までに述べた震源分布と発震機構のデータが、南関東地域直下のプレートに関する幾何学と力学に関する情報を与えるとすれば、地震波速度や減衰等の三次元構造は物性の違いに基づくプレート認識の手段を与えてくれる。

HORIE and AKI (1982) は、1976~1978 年に関東地方で発生した 50 個の地震と 27 の観測点を用いた P 波初動のインバージョン解析によって P 波速度の三次元構造を求め、深さ 32~65 km の層で高速度領域と震源分布との一致を見出して、これらを沈み込んだ太平洋スラブ及びフィリピン海スラブであると認識した。また、千葉県北東部下に見出された低速度領域については、津村・唐鎌 (1981) に示された太平洋スラブの下方への折れ曲りに起因するものと考えた。次いで、ISHIDA (1984)、ISHIDA and HASEMI (1988) は、対象領域を関東・東海地域に広げ、さらに多くの地震と観測点 (後者では 91 地震と 61 観測点) を用いたインバージョン解析を行って、精密な三次元速度構造を求めた。その結果、フィリピン海プレートの沈み込みに対応する約 30 km の厚さの高速度領域と震源配列との明確な一致を得たほか、東京湾周辺の厚い堆積盆地や伊豆半島北方の地震活動不活発域が低速度領域に対応していること、浅層の地震波速度分布が萩原 (1984) の示す短波長ブーゲー異常と良い相関を示すこと等を明らかにした。また、ASHIYA *et al.* (1987) は、観測点補正值や震源座標と同時にコンラッド面とモホ面の深さ分布を求めるインバージョン法を開発して関東・東海地域に適用し、コンラッド面は東京・神奈川県境付近に、モホ面は千葉・茨城県境付近に、それぞれ鞍部を有する等深線を得ている。

一方、NAKANISHI and HORIE (1980) は、1949~1978 年の間に関東地方下に発生した大きな地震の震度分布を詳細に比較調査して、千葉県中部の深さ 60~80 km の地震に対しては網代や大島で異常に高い震度が観測されることを見出し、これは相模トラフから北東へ傾くフィリピン海スラブ内を地震波が減衰せずに伝わるためであると解釈した。なお、HASHIDA (1987) は震度データのインバージョンにより日本全体の三次元減衰構造を求め、また、関口 (1989) は地震波の P 波、S 波のパワースペクトル比のインバージョンによって関東・東海地域の三次元 Q 構造を求めている。

以上に述べた地震波速度や減衰のブロックインバージョン解析では、広い領域の全体的特徴を把握することができものの、ブロックの大きさが 25 km 及至 30 km であるため、沈み込んだスラブの形状を高精度で定

める決め手とはなりにくい。これとは別に、狭い範囲に限られるが、反射波や変換波の相を用いて不連続面としてのプレート境界を正確に求めようとする試みが最近盛んに行われている。

本田(1984), 飯高・他(1989)はPS変換波を用いて、また堀(1988)はSP変換波を用いて、それぞれ関東地方下の太平洋スラブの位置を推定し、また、OBARA and SATO (1988), OBARA (1989)は、S反射波を用いて同じく太平洋スラブの位置と反射面の広がり求めている。これらの結果によれば、反射点や変換点は二重深発地震面の上面の深さ50~100 kmの範囲にほぼ一致し、境界面の厚さは数kmと予想されている。また、溝上・他(1989)のように、後続P波を用いて二重面の下面での反射波を検出しようとする試みもある。

一方、フィリピン海プレートに関しては、溝上・他(1981), 神定(1987)により、相模トラフ東縁から北東に60°の角度で20 kmの深さにまで傾き下がる速度不連続面でのSP変換波が発見され、溝上・他(1988)はこれをフィリピン海スラブ上面と解釈した。さらに、東京大学地震研究所(1989)は、微小地震の震源分布からは視認できない山梨県中部でのプレート上面におけるSP変換波を捉えたとの報告を行い、また、涌井・北村(1989)も山梨県北部に同種の変換面が存在する可能性を指摘した。これに対し、東北大学理学部(1989)は、山梨県東部での精密震源分布と沈み込んだプレート先端部からのSP反射波の発見に基づき、同地点がフィリピン海プレート衝突の先端部であり、その付近にはS波速度の異常に遅い領域が存在しているとの推定を行っている。

以上に述べた自然地震を用いる不連続面の推定とは別に、マルチチャンネル反射法等による構造探査も、地殻浅部に限られるものの、プレートの沈み込み開始に関する情報を直接的に示すものとして重要である。たとえば、加藤・他(1983)による相模湾を西南西-東北東に横切る測線でのマルチチャンネル音波探査結果は、伊豆半島の基盤が関東地方下に傾き下がっていく様子をよく捕えている。

(4) 過去の地震の断層モデル

南関東地域で過去に発生した大きな地震の地震像は、当地域におけるサイスモテクトニクスを考察する上で貴重な資料である。とくに1923年関東地震は、計測学的資料が整ってから発生した唯一の巨大地震であり、このような地学的大事件は当地域の基本的テクトニクスを一挙に明らかにしてくれる。以下に、これまで南関東に発生した地震のうち、断層モデルに関する研究のなされたものを発生年代順に示す。

① 1605年(慶長)関東地震: 相田(1981)は、古記

録から推定した沿岸津波波高分布を津波数値実験結果と比較することにより、房総半島東方の相模トラフから30°で北北東に傾く右横ずれ逆断層を想定した。

② 1703年(元禄)関東地震: 笠原・他(1973)は、ANDO (1971b)の1923年関東地震のモデルに房総半島鴨川沖で北西に高角で落ち込む逆断層を加えたモデルを提出し、一方、MATSUDA *et al.* (1978)は、1923年関東地震の断層面の南側半分と上記の鴨川スラスト、及び房総半島東方の相模トラフから北東に傾く逆断層の3枚の面よりなるモデルを提出している。これに対し、石橋(1977b)は元禄地震時の相模湾内の断層は湾奥まで及んだと反論しており、また、笠原(1985bc)は房総半島南端より南に延びる西下がりの逆断層面を考え、これと1923年関東地震の北西部分(神奈川県西部)が元禄地震時の主要な活動域であったとの考えを示している。

③ 1921年竜ヶ崎地震: 石橋(1973)により、霞ヶ浦西端の深さ60 kmあたりより南南東に延びる長さ30 km程度の地震断層が想像されている。

④ 1923年関東地震: この地震については、KANAMORI (1971), ANDO (1971b)を始めとして多くのモデルが提出されている。Table 1はこれまでに提出された各モデルの断層面の傾斜方向・傾斜角および下盤のスリップの地表投影方位をまとめたものであり、参考までにSENO (1985b)によるプレートの相対運動方位も添えられている。この表の中で、MATSU'URA *et al.* (1980)のモデルⅢは神奈川県西部と相模湾内の2枚の断層面よりなっており、破壊開始点を発震機構解とも調和する前者の面に考えることによって、地震学的データと地殻変動データの双方の調和を図っている。また、ISHIBASHI (1985a)の第3の面は、他のモデルでは説明できない小田原から熱海にかけての大きな地殻隆起をモデル化するために設定した西相模湾スラスト[石橋(1977a)]沿いの断層面である。その後、石橋(1988a)は、西相模湾断裂の概念に沿って関東地震の新しいモデルを提案している。一方、TADA and SAKATA (1977)は、同じ地殻隆起を説明するために「熱海-沼津構造線」を提唱し、相模湾からこの構造線につながる逆S字型の断層運動を想定している。また、SCHOLZ and KATO (1978)は、地震前後の地殻変動パターンの特徴を精査し、本震断層面(傾斜角30°)の延長が地表を切る(仮想)小田原断層の他に、傾斜角45°及び60°の派生断層を考えて、その地表への現われが国府津-松田断層および伊勢原断層であるとした。その位置と面の傾きとから、溝上・他(1981)等の見出したSP変換面はこの派生断層である可能性も考えられる。

1923年関東地震のテクトニクスの解釈として、KANAMORI

Table 1. Models of the 1923 Kanto earthquake comparing dip directions and dip angles of the fault surface, as well as slip directions of the foot wall side. Relative plate motion directions are also compared, where the first figures are calculated from the model by SENO (1977b), while the second are from SENO (1977b) for the Philippine Sea (PHS) plate and from RM-2 model by MINSTER and JORDAN (1978) for the Eurasian (EUR) and the North American (NA) plates.

Author	Dip-dir. (N°E)	Dip (°)	Slip-dir. (N°E)	Remarks
KANAMORI (1971)	20	34	305	
ANDO (1971b)	45	45	334	
ANDO (1974)	45	30	338	
MATSU'URA <i>et al.</i> (1980) model II	24	25	330	
MATSU'URA <i>et al.</i> (1980) model III	15	26	314	West Kanagawa Sagami Bay
	26	23	334	
MATSU'URA and IWASAKI (1983)	23	26	327	
ISHIBASHI (1985a)	55	45	339	Central Kanagawa
	55	35	341	Sagami Bay
	(285)	(30)	(326)	(West Sagami Bay)
SENO (1985b)			303, 315 327, 328	PHS-EUR PHS-NA

MORI (1971) 及び ANDO (1971b) はこの地震が相模トラフを境とする二つの地塊のずれであるとの考えを示し、また、ANDO (1974) も相模トラフをトランスフォーム断層とするなど、当初はフィリピン海プレートの沈み込みという概念はなかったようである。1980年代に入ると、多くの研究者が、相模トラフから関東地方下へ傾斜する地震帯＝関東地震の断層面＝沈み込んだフィリピン海プレート上面との図式を描くようになった [SOMERVILLE (1980), 笠原 (1980), NAKANISHI and HORIE (1980), MAKI *et al.* (1980) 等]。しかしながら、Table 1 に示される通り、この地震のモデルは研究者により様々であって、断層モデルからフィリピン海スラブ上面の位置をユニークに規定することは困難である。HYEONGPYO・他 (1989) は、逆に、微小地震の震源分布から推定されたフィリピン海スラブ上面に沿って迂りの分布を与えることにより、この地震のモデル化を試みている。

⑤ 1931年西埼玉地震：ABE (1974) によれば、埼玉県西部のごく浅い場所で発生したほぼ垂直の左横ずれ断層型地震であり、中央構造線の東側延長部に発生したとの地学的解釈が与えられている。

⑥ 1953年房総沖地震：安藤 (1971a) は、房総沖海溝三重点の深さ 50 km あたりで南西へ高角で傾く正断層モデルを提出し、これはリソスフェアに縦に入った割れ目に対応するとの解釈を行っている。

⑦ 1968年埼玉県中部地震：ABE (1975) により、埼玉県中部の深さ 50 km でほぼ北に 30° で傾く面上の右横ずれ逆断層モデルが提出されている。同論文の第 5 図

Fig. 4. Schematic local structure at the eastern wing of the Philippine Sea plate as derived from the study of the 1987 eastern off Chiba earthquake [after OKADA and KASAHARA (1990)].

でこの断層面の延長が東京近くで地表に現われている通り、この地震は大局的に関東地震の断層面の下方延長部で生じたものと推察される [SOMERVILLE (1980), 笠原 (1985ab) 等]。

⑧ 1980年伊豆半島東方沖地震：IRIKURA (1983), FUKUYAMA and IRIKURA (1989) 等により、ほぼ南北走

向の左横ずれ垂直断層のモデルが提唱されている。

⑨ 1987年千葉県東方沖地震: OKADA and KASHARA (1990) により、深さ約 50 km でほぼ南北走向を持った右横ずれ垂直断層のモデルが提出されている。余震分布の特徴や周辺の地震活動との関連性などから、この地震は沈み込んだフィリピン海スラブ東端近くで発生したプレート内地震であるとの解釈がなされ、Fig. 4 のような局所プレート構造の提案がなされている。

(5) 地殻変動および地殻応力

南関東地域で現在進行している地殻変動の様子および地殻応力の状態は、当地域の力学的状態を論じるための重要な基礎資料である。

日本列島全体の最近 70 年間における平常時の総括的な地殻上下変動については壇原 (1971) によるまとめがなされており、南関東地域については、三浦半島および房総半島南部で隆起、内陸では沈降というパターンが得られている。一方、全国の地殻水平歪に関しては原田・葛西 (1971)、中根 (1973)、国土地理院 (1987) 等によるまとめがあり、とくに関東・東海地域については中根、藤井による一連の研究がある。藤井・中根 (1982) は、1923 年関東地震の地震時及び地震後における南関東地域の主歪線図を作成し、フィリピン海プレートの北北西進に伴う関東地方の圧縮・沈降と、それへの反発としての関東地震タイプの地震の発生が、南関東地域の地殻変動の基本的様相であると述べている。また最近では、橋本 (1990) が日本列島の地震間の平均的な水平歪速度を算出し、関東地方については、南部に南北から北北西-南南東方向の大きな圧縮が見られるのに対し、北部での歪速度は著しく小さいことから、フィリピン海プレートの沈み込みによる圧縮力はプレート境界から 100 km 以上離れた地域にまでは伝わっていないと結論している。

中村・島崎 (1981) は、測地測量から求められた地殻変動がフィリピン海、太平洋両プレートの運動により概ね説明できることを示した。また、瀬野 (1980b) は、南関東沖合いのプレート境界に N 50° W 方向の変位を与えて二次元の有限要素法による計算を行うことによって、現在の歪場がほぼ再現できることを示すと同時に、応力場は関東地震のような巨大地震の生起サイクルで変化し、その積算が地質時代を通しての平均的応力場と見えることに注意を促している。さらに、SATO (1988) は、三次元の有限要素法を適用して関東地域の応力場を論じている。

一方、地中での応力状態を推定するには、発震機構の解析や上記の測地測量または地殻変動連続観測による歪場の観測のほか、水圧破壊法や応力解放法による実測 [塚原・他 (1981)、小出 (1980) 等]、活断層分布からの

推定 [松田 (1967) 等]、岩脈方位や単成火山群・側火口群配列等の火山構造からの推定 [NAKAMURA (1977) 等] といった手段がある。塚原・池田 (1983)、TSUKAHARA and IKEDA (1987) は、これらのデータを集積して関東・東海地域の地殻応力分布をまとめ、応力区の分けを試みている。データが少ないため、南関東地域については三浦-房総中部のみがはっきりした応力区として定義されているが、そこでの最大水平圧縮応力の方位はフィリピン海プレートの運動の影響を強く受けた N 35° W と求められている。この方位は現在進行中の地殻変動の最大短縮方位がほぼ南北であること [藤井・中根 (1982)] と有意に食い違うため、この地殻変動による差応力の蓄積は大変に効率が悪く、このことは房総半島において現在浅い微小地震活動が非常に不活発であることと調和するとの見解を示している。

(6) 周辺および広域のテクトニクス

南関東地域のサイスマテクトニクスを考える際には、当然のことながら、隣接する地域のテクトニクスとの連続性を考慮せねばならない。

当地域の西側はフィリピン海プレートが日本列島と衝突するとされる伊豆半島に連なっているが、伊豆半島周辺はその特異なテクトニクスと最近の異常な地殻活動の高まりから数多くの研究者の注目を集め、そのサイスマテクトニクスに関しても非常に多彩な議論がなされている [瀬野 (1980a)、石橋 (1980) 等に総論がある]。

杉村 (1972) はフィリピン海プレート北縁が伊豆半島をとり囲むように上陸して衝突境界となっていることを指摘し、貝塚 (1972, 1974) は北進する「伊豆バー」の概念を提唱した。また、MATSUDA (1978) も、様々の地質学的データに基づき、伊豆半島周辺におけるフィリピン海プレートの運動が過去にはより北向きであったことを主張している。プレート境界に関しては、この他にも、石廊崎から北西に駿河湾を横断する駿豆断層の役割を重視する茂木 (1977) の考えや、熱海-沼津構造線を境界とする多田 (1977) の説が提出され、また、石橋 (1977a, 1980) は、伊豆東方線-西相模湾スラストを強調したプレート境界の二重構造説を唱えて伊豆トランスフォームベルトの概念を導入した。藤井 (1977) も伊豆東方線の重要性を指摘している。その後、石橋 (1986, 1987a, 1988cd) は考えを進めて、フィリピン海プレートの伊豆北部における多重衝突や、同プレート内の高角の裂け目としての西相模湾断層の存在 (Fig. 5) を提唱し、さらに、浜田 (1986) により再決定された関東地震の震源の深さや山崎 (1985) による足柄平野の第四紀地殻変動などを参考にしつつ、関東地震や小田原地震の見直しを進めている [石橋 (1988abcd)]。但し、微小地震の震源分布図

Fig. 5. Iso-depth chart of the upper plane of the Philippine Sea plate around the West Sagami Bay fault [modified from ISHIBASHI (1987a)].

や、江口・他(1989)による最近の相模トラフ北西部における海底地震観測結果には、このような断層を示唆する震源分布は見当たらない。

一方、伊豆半島の変形と応力場の特殊性に関しても多くの議論があり、これまでに衝突の影響 [安藤・他(1973), 鶴川(1987, 1988)], ずり変形 [石橋(1977a), SOMERVILLE(1978), 藤井(1979)], 剛体回転 [高柳・山川(1976)], プレーートの曲り [中村(1979, 1980)] など、数多くの説明がなされている。

次に当地域の東側、房総半島沖に目を転じると、ここには世界にも稀な海溝三重点が存在している [McKENZIE and MORGAN(1969)]。この特異点の近傍におけるプレートの形態及びその発達史に関しては従来より様々な角度からの推察がなされてきたが、とくに近年は、日仏 KAICO 計画や水路部による調査 [加藤・他(1987)] など海洋調査の進展に基づき、より詳細な議論が可能となった [たとえば瀬野(1986)]。SENO and TAKANO(1989)は、三重点から房総半島東岸にかけての海域で発生した地震の震源の深さと発震機構解を再決定することにより各地震の性格を吟味し、沈み込んだフィリピン海プレートの北縁は銚子市付近と三重点北方 50 km あたりの点を結ぶ線上に達していると推論した。一方、HAMANO(1987)は、三重点における 3 つのプレートの存在形態に関する幾何学的考察から、上記の見積りより更に東の海溝寄りまでフィリピン海スラブが存在し得ることを示している。また、新妻(1982)は、三重点近くにおけるフィリピン海プレート東端の位置を、プレートの厚さの配慮から伊豆小笠原海溝の西方約 50 km に考

Fig. 6. Schematic diagram of the three-dimensional structure of the triple junction off the Boso Peninsula. PAC, PHS and EUR denote the Pacific, Philippine Sea and Eurasian plate, respectively [after HUCHON and LABAUME (1989)].

えている。

海溝三重点そのものの構造に関しては、SENO *et al.* (1989) が、海底地形、重力、反射法地震探査等のデータに基づき、プレートの相互運動と地史に関する幾つかのモデルを詳しく比較考察しているが、HUCHON and LABAUME (1989) も、三重点近傍におけるプレートの形態とその発達史に関する議論を行って、太平洋プレートと陸側プレートに挟まれた狭い空間に入り込むフィリピン海プレートの姿を大胆に想像している (Fig. 6)。

この他、南関東地域を含むより広域の場合については、青木(1977)により伊豆東方線、銭州海嶺付近等を含めた多重スラスト構造の提唱がなされ、また、江口(1985)は伊豆小笠原弧全体を眺めて、火山フロントの役割を重視したフィリピン海プレート東縁のテクトニクスを論じている。一方、小林(1983)、中村(1983)による日本海東縁プレート境界説以来、南関東地域はユーラシアプレートに属するとの従来の概念を超えて、北米プレート或いは東北日本マイクロプレートに属しているとの考えが盛んに議論されるようになり、当地域のテクトニクスに関しては、新たな再点検が迫られている [石橋(1984), SENO(1985b)等]。中村・島崎(1981)は、フィリピン海プレートの運動方向が過去に北向きから北西方向に変化した可能性を指摘しているが、瀬野(1985a)は、この変化が 1.5 Ma 前であり、また 0.5 Ma 前には、東北日本の北米プレート変換によって再びプレート間の相互作用が変化したと推定している。なお、瀬野・他(1988)は、フィリピン海プレートの絶対運動を 4 Ma 前にまで遡って復元を試みている。

§ 3. 南関東地域下のプレートモデル

南関東地域のサイスモテクトニクスを論じる基本的枠組みとして、まず関東地方下のプレート構造が明らかに

される必要がある。この作業には前章で述べた種々の材料が用いられるわけであるが、各研究者によって素材材料の組合せ方、重視の仕方、解釈の仕方などが相違するため、幾つものプレートモデルが提出されているのが現状である。ここでは、フィリピン海プレートと太平洋プレートの各々について、現在提案されているモデルを概観し、その相互比較を行う。

(1) フィリピン海プレート

関東地方下のフィリピン海プレートの存在に関連して、川崎・勝又(1975)は関東地方のやや深い地震の発震機構が急変する東京湾北部周辺をフィリピン海プレートの東北端であると推測し、また、安芸(1979)は茨城県南西部の地震がフィリピン海プレート先端の活動を示す可能性を指摘している。その後、関東地方下へフィリピン海プレートが沈み込んでいるとの考えは、1980年代初頭に SOMERVILLE (1980), NAKANISHI and HORIE (1980), MAKI *et al.* (1980), 瀬野(1980a), 安藤(1980)等により次々と提出されたが、それらはいずれも断片的なものであり、プレートの全体像を提示したものとしては、笠原(1980, 1981, 1985ab)が最初である。大竹(1980), 浜田・笠原(1981)はこのモデルについての解説を行っているが、Fig. 7に、提示されたモデルの概念図を示す。当モデルにおいては、フィリピン海プレートが伊豆半島で東翼部(関東地方下)、中央部(山梨県東部)、西翼部(東海地方下)に分断され、その境界は一本の構造線ではなく幅を持つ遷移帯(断層群)によって隔てられるとしている。笠原(1985c)は、MATSU'URA *et al.* (1980)による1923年関東地震の断層モデルⅢの2枚の断層面が、上記のフィリピン海プレート東翼部及び中央部の上面に対応すると述べている。笠原(1985ab)は、このモデルに基づいて、関東地方下に沈み込んだフィリピン海スラブが、その上面では北西への低角逆断層型、下面では北西への低角正断層型、そして太平洋プレートと接触する東縁では西への低角逆断層型の地震をそれぞれ発生させると考え、関東地方における地震発生様式の基本的枠組みを説明した。また、関東地方下のQ構造や、火山フロント及びアサシスミックフロントの西遷に関する考察を行うと同時に、1923年関東地震や関東地方の歴史地震の性格、関東地方における地震活動・地殻変動の移動現象、関東造盆地運動など、関東地方の様々な地学現象の統一的説明を試みている。

Fig. 7において物議をかもししたのは、フィリピン海プレートが房総半島はるか南方沖にまで沈んだままで描かれていた事である。大竹(1980)によれば、これは茨城県南西部や千葉県中部の地震多発帯が八丈島東方まで続いていることとの表現ともとれるが、その場合はフィリピン

Fig. 7. A plate model to interpret the tectonics in the Kanto and Tokai district [after KASAHARA (1981, 1985b)].

ン海プレート下面と太平洋プレートとの接触部が南方に延びていさえすればよい。浜田・笠原(1981)では、伊豆小笠原弧西方の帯状地域がどこのプレートに所属するか不明のように描かれており、笠原(1985b)自身、相模トラフの房総半島東方部分を明確な海溝とは認めていない。笠原(1985a)は、1972年八丈島東方沖地震の余震分布が70 kmの深さにまで達していることと、フィリピン海プレートの厚さを30 kmとすることによる帰結との説明を行っているが、これに対し瀬野(1985a)は、震源の深さの精度に対する疑念と同時に、フィリピン海プレート東端の厚さが50~60 km以上あってよい[瀬野(1987)]との反論を行っている。

沈み込んだフィリピン海プレートの形状を等深線の形で提出したのは、中村・島崎(1981), SHIMAZAKI *et al.* (1982)が最初であり、Fig. 8(a)に、彼等の提示したフィリピン海スラブ上面の等深線モデルを示す。その後、NAKAMURA *et al.* (1984)は茨城県南西部近辺の等深線を小修正している。この等深線は、東京大学地震研究所の関東観測網による1977年から約3年間における約10,000個の地震の震源分布をベースとして、当地域の地震の発震機構を参考にしつつ、①プレートは物質境界から沈み込む、②プレートの厚さは30 km(先端は薄くなっている)、③50~60 km以深ではスラブ内部でのみ地震が発生する、という仮定の下に作成されたものである。このモデルの特徴は、東京湾北部以北で太平洋スラブと接触あるいは衝突したフィリピン海スラブが東へ押上げられる形をしている(模式断面図をFig. 3(d)に示す)ことと、房総半島中部でスラブ上面が南東に傾斜し、フィリピン海プレートの運動によってここでは北西-南東張力の正断層型地震の発生を期待している点である。

Fig. 8. Iso-depth contour models of the upper planes of the Pacific (thin lines) and the Philippine Sea (thick lines) plates. Only (i) shows the lower plane of the Philippine Sea plate. Hatched line in (f) shows a vertical offset of the plate, while hatched regions in (j) denote shear zones.

なお、上記の東へ押し上げられた形状は現在のプレート運動では説明できず、それとは異なる過去の運動を反映したものであるとの考えを示している。

笠原 (1985b) は、笠原 (1980, 1981) のモデルを具象化するために、フィリピン海スラブ上面の等深線を Fig. 8(b) のように作成した。用いた震源データは、防災センターと地震研究所による 1978 年 4 月からの 1 年分と、防災センターの 1979 年 7 月からの 2 年分を合わせた計約 20,000 個の地震である。観測点数が 5 点以上、O-C が 1 秒以下、深さの誤差が 20 km 以下の震源による深さ別の震央分布図や幅 25 km の東西・南北断面図を主として用い、さらに発震機構解を求めて各プレートの係わり合いに留意しながら等深線は引かれており、1968 年埼玉県中部地震の決め直した震源位置 (深さ 45 km) を上面の通過条件としている。また、プレート境界を定めるにあたっては、東京湾北部 (深さ 20~30 km) から茨城県南西部 (深さ 40 km) を結ぶ活動が、関東地震の断層面と滑らかに連続し、かつ、発震機構も北西方向のスリップベクトルという点で共通性を持つことを重要視している。このモデルの特徴は、関東山地東縁の八王子構造線あたりを境として等深線を不連続にしていることと、関東地方下で北にやや張り出した単純な形状を与えていることであり、また、相模トラフからの沈み込みには特にこだわっていない。太平洋プレートとの衝突部分については、Fig. 3(e) の模式断面図に示すように、フィリピン海プレートが削られるイメージを抱いている。

一方、野口 (1985) は、防災センターの新しい震源計算プログラム [鶴川・他 (1984)] に基づく 1982 年 5 月から 1984 年 7 月までの約 2 年間の震源データのうち、観測点数が 5 点以上で震源決定精度の高いものについて、東西・南北その他いろいろな方向の 20~30 km 幅の鉛直断面図を作り、まず太平洋スラブの上面を定めたのちに、①プレートは相模トラフの物質境界 [中村・島崎 (1981)] から沈み込む、②プレートの厚さは先端部を除いて約 35 km、③ 50~60 km 以深の地震はスラブ内に含まれる、という条件の下に、Fig. 8(c) のようなフィリピン海スラブ上面の等深線を与えた。この際、房総半島東部の太東崎周辺では深さ 20~30 km とその下の 60 km 前後に地震が分布し、前者は北西-南東、後者は東西の主圧力軸を有する地震が多く見られることから、ここでのフィリピン海スラブ上面及び下面の位置をそれぞれ上記の深さに制約している。このモデルの特徴は、スラブの先端部を円くしていること (Fig. 3(f) の模式断面図参照)、東京湾北部から茨城県南部にかけてほぼ平坦または一部凹の形状を与えていること、そして、茨城県南西部から北西方向へは高角度でもぐり込み、群馬県中部

の深さ 110 km にまでスラブが達していることである。

次に、石田 (1986) は、防災センターの 1983 年と 1984 年の 2 年間の震源データのうち、観測点数が 7 点以上で震源決定精度の高いもの約 9,000 個を用いて、主として北東-南西方向の断面、及び伊豆半島から放射状にとった各方向の断面における幅 20 km の震源分布図を作成し、①プレートはトラフ軸から沈み込む、②プレートの厚さは 30 km、③地震多発領域の先端より 10 km 上方をスラブ上面とする (但し、多数の地震がスラブの下側に出る場合には調節する)、④沈み込む面の傾斜角および傾斜方向は急変しない、との仮定において、Fig. 8(d) のようなフィリピン海スラブ上面の等深線を与えた。上記③の仮定は、トラフ軸近辺の地震が約 10 km の深さに存在するために設けられた制約であるが、このため、このモデルは他のモデルに比して全体的に上面が浅く決められている点がひとつの特徴である。もうひとつの大きな特徴は、東京湾あたりを境界として等深線に大きな不連続が存在し、房総半島側へは急傾斜での沈み込みを与えている点である。この不連続は、ISHIBASHI (1985a) による 1923 年関東地震の断層モデルが相模トラフ内で 2 つの断層面に分けられている位置と符合しているが、同モデルの断層面の傾斜角は北側で 45°、南側で 30° であり、この等深線の傾きの違いとは逆傾向になっている。なお、岡田 (1988) は、1987 年に相模湾北部で発生した特異な微小地震活動を、この等深線の不連続に関連させて報告している。

石田 (1986) は、上述の等深線モデルと同時に、より滑らかな Fig. 8(e) のようなモデルも、別の可能性として提出している。これは、主として銚子市付近の深さ 30 km 程度の地震群をフィリピン海スラブ内に含めるか否かによって、断面図におけるプレート境界の引き方が 2 通り考えられるためである。石田 (1986) 自身は、震源分布のみに基づいてモデルの当否は結論できないとしながらも、東海地方でフィリピン海スラブ上面の等深線に不連続の見られる例 [山崎・大井田 (1985)] があることや、補足的な垂直断面図を加えての再検討の結果、Fig. 8(d) の等深線の方がより妥当であろうと判断している。

続いて、石田 (1989ab, 1990a), ISHIDA (1990b) は、防災センターの 1980 年から 1988 年 8 月までの 8 年半のデータを用いて三次元速度構造による震源再決定を行い、さらに、M4 程度以上で発震機構解の求められた地震約 300 個のメカニズム分布を参考として、フィリピン海スラブ上面の等深線の見直しを行った。この際、沈み込んだフィリピン海スラブの形状を正しく認識するためには、そのユーラシアプレートに対する運動方向での震源断面図に依拠すべきであるとの思想に基づいて、北西

一南東方向の幅 20 km 程度の断面図を主として用い、さらに、①プレートはトラフ軸から沈み込む、②沈み込む面の傾斜角および傾斜方向は急変しない、との仮定をおいて、Fig. 8(f) のような等深線を提出した。このモデルの特徴は、全体として北西方向に凹部が連なる単純な形状であり相模トラフや伊豆小笠原海溝にスムーズにつながることで、相模湾西部で相模トラフに沿った断裂構造を与えている点である。前者については、フィリピン海プレートの東端が日本海溝から沈み込んだ太平洋プレートと接触するために西下がりとなり、西端では伊豆半島を乗せた部分が沈み込めないために西上がりの形状をとるためと説明している。また、後者については、相模トラフに直交する方向での断面図に震源分布の段差が認められることをその理由としている。

以上に述べたモデルの他に、溝上(1985)は、微小地震の震源分布に基づいて、フィリピン海スラブ下面の等深線を Fig. 8(i) のように提出している。また、笠原(1989)は、1987 年千葉県東方沖地震の発生に伴うモデルの見直しや、相模湾内のマルチチャンネル音波探査結果および伊豆半島周辺の地殻構造探査結果などを加味したモデルの再検討を行って、Fig. 8(j) のように笠原(1985b)を小修正したモデルを提出している。このモデルは同図(b)と基本的には変るところがないが、沈み込んだフィリピン海プレートの東縁部にも伊豆半島と同じく変形を担うシアゾーンを考えたことと、霞ヶ浦付近にスラブ上面の島状の高まりを付け加えた点が新しい。前者は、OKADA and KASAHARA (1990) による 1987 年千葉県東方沖地震の調査で、フィリピン海スラブ東端部に平行する南北性の弱線構造 (Fig. 4) が見出されたことをその根拠としている。また、後者は、霞ヶ浦付近の深さ 30 km の地震や銚子市付近の深さ 50 km の地震の発生様式が、1987 年千葉県東方沖地震の震源域の東側部分 (Fig. 4) と同じ状況にあることから、ここをフィリピン海プレートのかたわれとみなし、当地では太平洋プレートが東西に尾根状の高まりを見せていることと関連させている。なお、Fig. 8(j) には深さ 0 km の等深線が示されていないが、笠原(1989)は、相模湾内のマルチチャンネル反射法結果に見られる伊豆半島の基盤がフィリピン海プレートに滑らかに接続すると述べ、暗に伊豆半島東方沖付近からの沈み込みを示唆している。

以上見てきたように、関東地方下におけるフィリピン海プレートの形状は、研究者によってかなりまちまちである。この違いは、用いたデータの出所、どのような断面図で見えるかの相違、プレート境界を定める上での基準設定の違い、発震機構解等の参考材料の解釈の仕方や重視の仕方の相違などによっている。Fig. 8 を全体として

眺めると、東京湾付近ではモデル (b) と (e)、(c) と (f) に若干のパターン類似性が見られるものの、細部におけるモデル間の相違は、とくに太平洋プレートと接触する茨城県南西部あたりから房総半島にかけての範囲で顕著である。断面図におけるモデル間の違いを見るため、Fig. 3(d)~(i) に、伊豆半島北部から茨城県南西部へ向かう方向での、各モデルによるプレート構造の模式的断面図を示した。同図 (a) は牧(1981b)によるフィリピン海スラブ衝突の概念図であるが、SOMERVILLE (1980) も、これと同じか又はより積極的に太平洋スラブへの貫入を考えている。また、新妻(1982)は、同図 (c) のようにフィリピン海スラブが横臥褶曲様の形態をとると予想している。

一方、Fig. 9 には、首都圏を北西-南東に横切る断面 (同図の挿入図参照) における、各モデルのフィリピン海スラブ上面の位置が示されている。同図は、防災センターの 1980~1989 年の 10 年間ににおける幅 20 km の範囲の震源分布断面図上に描かれているが、各モデルの開きをもっとも大きく現われるのは東京湾北部付近であり、そこでのスラブ上面の深さは 15 km から 45 km の範囲に分布している。東京湾北部に発生する極浅発地震活動をどう認識するかは、スラブの形状を定める一つの重要な鍵であろう。また、この深さの違いは、単に学問的興味にとどまらず、防災面でも東京直下のプレート境界型地震を考える上で重大な意味を有するものと考えられる。

(2) 太平洋プレート

日本列島下への太平洋プレートの沈み込みに対応する深発地震面の存在は、プレートテクトニクス理論が生まれる以前より知られており、100 km 間隔程度のプレート等深線モデルは多くの研究者により与えられている [たとえば、SUGIMURA (1960)、宇津(1974a)、吉井(1979)]。しかし、関東地方下で、より細かな 20 km 間隔程度の等深線が引かれるようになったのは、微小地震観測網の整備が進んだ後である。

津村・唐鎌(1981)は、地震研究所の関東観測網により 1971 年 6 月から約 9 年間の間に検知された微小地震約 20,000 個の震源を用いて、太平洋スラブ上面及び下面の等深線を与えた。Fig. 8(g) はその上面のモデルであるが、銚子市付近でやや凹の形状を与えているのが特徴である。

MAKI (1984)、牧(1985)は、1963~1980 年に関東地方下で発生した地震の気象庁データに Pn 走時残差の観測点補正を加えた震源再決定を行い、深さ 20 km 毎の震央分布図の西縁がかなりシャープであると判断して、これらを連ねることにより太平洋スラブ上面の形状を

Fig. 9. Models of the upper plane of the Philippine Sea plate in the NW-SE cross section passing through the northern Tokyo Bay. Also shown is the hypocentral distribution in 20 km width of the same cross section in recent 10 years detected by NRCDP. Shadowed area corresponds to the Pacific plate. NS: NAKAMURA and SHIMAZAKI (1981), K: KASAHARA (1985b, 1989), N: NOGUCHI (1985), 186: ISHIDA (1986), 189: ISHIDA (1989b).

Fig. 8(h)のように定めた。また、JHD法による高精度震源分布を求め、これから二重深発地震面の上面と下面の間隔を30 kmと見積っている。このモデルの特徴は銚子市付近から西北西方向に鋭い凸状構造を与えている点であり、これと似た例としては、Aoki (1974)による東北日本弧と伊豆小笠原弧のスラブ重畳と火山フロントへの平行性を考慮したモデルがあるが、これほど極端ではない。

前節に挙げた中村・島崎(1981)、笠原(1985b)、野口(1985)、石田(1986, 1989ab)、溝上(1985)は、それぞれ、フィリピン海スラブの形状を与えると同時に太平洋スラブ上面の推定も行っており、それらは既にFig. 8に細線で記入されている。これらのうち、中村・島崎(1981)は水深補正を施したISCデータに依っているが、その他はすべて微小地震の震源分布に基づいた等深線である。なお、モデル作成にあたって、笠原(1985ab)は1972年の八丈島東方沖地震の余震分布等を参考にしており、また、野口(1985)は、①プレートはトラフ軸から滑らかに沈み込む、②50~60 km以深の地震はスラブ内に含まれる、との条件を与えている。石田(1986)も、上記①に加えて、②プレートの厚さは70 km、③70~80 km以浅では地震多発領域の上端を、それ以深では地震多発領域の10 km上方をスラブ上面とする、との仮

定を設けた上で等深線モデルを提出している。

太平洋プレートに関するこれらのモデルは、細かい点で微妙な違いは存在するものの、全体としては関東地方下で西へ向かって張り出した形状を呈し、フィリピン海プレートの場合ほどはモデル間に大きな相違は見られない。

§ 4. 南関東地域の地震発生様式

南関東地域に発生する地震の発生機構は、前章に述べられたプレートモデルによって、概ね分類や説明が可能となった。このようなテクニクスを背景として、個々の地震活動の特質や相互の関連性、地震発生周期、地震発生候補地等に関する議論が種々なされている。

(1) 地震活動の関連性

大竹・笠原(1983)、OHTAKE(1986)は、1982年7月茨城県沖地震($M7.0$)と1983年2月茨城県南部の地震($M6.0$)とが相続いて発生したことに注目し、過去にも茨城県の沖合いの区域と内陸の区域について大きな地震が対になって発生している事例が数多くあることを見出した。彼等はこれをペア地震と呼び、その力学的メカニズムとして、沈み込む太平洋プレートがユーラシアプレートとフィリピン海プレートの2箇所強くカップルしているモデルを提出した。なお、同様の考察は Mizoue *et*

al.(1983)によってもなされており、また、この1982年茨城県沖地震については、沈み込んだ海山がその発生に関与したのではないかと推測もなされている[菊地・須藤(1985)].

このように大きな地震が対になって発生した例としては、1980年6月伊豆半島東方沖地震(M6.7)と同年9月の千葉県中部の地震(M6.1)との組合せがある。笠原(1985b)は、この連鎖発生メカニズムを、関東地方下へ沈み込むフィリピン海プレートの西端における南北走向左横ずれ断層運動によって同プレートが関東平野下に送り込まれ、その結果として首都圏直下の太平洋スラブとの衝突域に応力集中が生じたためと解釈した。この経験に基づいて、笠原・他(1988)は、フィリピン海プレート東端における南北走向右横ずれ断層運動である1987年千葉県東方沖地震(M6.7)の発生が、1980年の場合と類似の現象を引き起こすであろうかとの問題提起を行ったが、1988年3月に東京都東部の地震(M6.0)が発生し、この予測は的中した。

OKADA and KASAHARA (1990)は、最近15年間に首都圏で発生したM6以上の地震と周辺地域におけるM7級地震との関連性を組織的に調査し、前者については、上述の3例の他に1985年10月の千葉・茨城県境の地震(M6.1)があるのみであることを確認した。この地震に関しては、堀(1986)が横ずれ断層型、古川・井元(1989)が垂直縦ずれ断層型と、全く異なる見解を提出しているが、いずれにしても、震源の深さ・発震機構・余震配列等から見て、太平洋プレート内の地震であることは確かである。とすると、ここ最近首都圏に発生したM6級のやや深いプレート境界型地震には、すべて周辺でのM7級地震が先行したことになる。これとは逆に、周辺でM7級地震が発生したにも拘らず首都圏のM6級地震がトリガーされなかった例が2件あり、それらは1974年伊豆半島沖地震(M6.9)及び1978年伊豆大島近海地震(M7.0)である。これについてOKADA and KASAHARA (1990)は、これらが東西及至北西-南東の横ずれ断層型だったため、フィリピン海プレートの関東地方下への沈み込みの加速には寄与しなかったであろうと解釈している。

以上に述べた個別の地震同士の関連のほか、複数の領域及至広域の地震活動が同期的に或いは相補的に活発化したり、または移動する等の現象も数多く報告されている。たとえば茂木(1989)は、過去約100年間の関東地方周辺地域におけるM6以上の地震活動の推移を調べ、1972年以降は広域にわたって地震活動が活発化していることを指摘している。また、松村(1987)は、伊豆諸島沿いに発生する群発性の地震活動が顕著な同期性を有す

ることを指摘し、簡単な統計的検定から、これは偶然の現象とは考えにくいことを示した。震源移動に関しては、1923年関東地震後の伊豆北部より北北東への浅発地震活動の移動[MOGI (1969), YOSHIDA (1987, 1988)等]、伊豆半島から伊豆諸島にかけての領域での1960年以降の震源北上[力武(1980), 茂木(1981), 吉田(1982), 岡田・他(1984)等]がよく知られている。

最近では、このような現象に対してもテクトニクスの解釈が付与されるようになった。たとえば、東京湾北部では、フィリピン海プレートに関連を持つ比較的大きな地震の発生に先立って前駆的な極浅発地震が群発する例のあることが知られているが[高橋(1990)]、これについて笠原(1985b)は、東京湾北部がフィリピン海スラブとユーラシアプレートの接触する場所にあっており、同地域での応力の高まりがここでの地震活動の活発化を促すのであろうと推測している。また、笠原・岡田(1989)は、茨城県南西部と鉾田市付近の地震活動が呼応して発生する傾向のあることを指摘し、これを、太平洋プレートが屈曲して沈み込んでいく尾根構造による両地域のカップリングで説明しようとしている。

溝上(1984, 1985)は、茨城県沖に発生する地震が伊豆諸島海域の地震・噴火活動と密接な関連性を有することを指摘し、これは茨城県沖におけるM7級地震の発生がフィリピン海プレートへの圧縮力の増加を促し、同プレート内での応力増大と伊豆諸島周辺部への応力集中を生じさせるためと解釈している。この背景には、フィリピン海プレート北端部の受ける曲げ変形が、主張力軸の分布から見て、太平洋プレートによる東西方向の圧縮力に起因している可能性が高いとの考えがある。

一方、野口(1985)は、1895年前後および1923年関東地震に先立つ数年間に関東地域でM6.7級の顕著な地震が頻発し、それらは系統的に南西から北東への移動傾向を示したことから、この時期には関東地域が北東-南西方向の圧縮応力場にあったと推察し、石橋(1975)による関東地震前の起震応力変化の考えを支持した。また、関東地震発生以降は顕著な地震活動が短期間に広域的に発生するパターンを示すようになったと指摘し、これらがプレートの相対運動方向や応力場の変動に依存している可能性を述べている。

(2) サイスミックカップリングと地震発生周期

地震の発生率はプレート間のカップリングの強さに支配される。竹本・川崎(1983), 川崎・松田(1987)は、茨城県南西部から千葉県中部にかけての地震密集域および鉾田市付近の計6つの地震の巣のそれぞれにおいて、最近約20年間に発生したM5以上の地震の地震モーメント累積量を見積り、プレート間相対運動のすべてが地震

Table 2. Recurrence intervals of Kanto earthquake (in years) estimated from various studies.

Source		1923 type	1703 type
Geodetic & Geomorph.	SUGIMURA (1964)	110	
	FUJII (1972)	180	
	KANAMORI (1973)	260~ 320	
	MATSUDA <i>et al.</i> (1974)		700~1200
	MATSUDA <i>et al.</i> (1978)		800~1500
	SENO (1977a)	180~ 400	950~2500
	MATSUDA (1977)	375~1000	~1500
	SCHOLZ and KATO (1978)	200~ 300	
	MATSUDA (1985)	400~1200	2000
	SENO (1977b)	220 (± 30)	
Plate motion Hist. earthq.	ISHIBASHI (1977a, 1985a)	~ 220	
	KASAHARA (1985bc)	~ 200	

として解放される時に期待される量との比(サイスミックカップリング)を算出し、0.1~0.2 という値を得た。これは、KANAMORI (1977) が千島~北海道地域や南海トラフ地域で推定している 1/4 という値とほぼ同程度の大きさである。一方、茨城県沖では歴史上大地震は知られておらず [たとえば UTSU (1974b)], 隣接する海域で $M7.5$ 以上の大地震が発生しているのと際立った対比を見せている。藤井・他 (1985) は、茨城県沖で仮に 500 年間に 1 回 $M7.5$ 相当の地震活動があったとしても、その地震性スリップ量はプレート運動量の 4% にしかすぎず、ここでの太平洋プレート沈み込みは大部分非地震的に行われていて、これは茨城県北部の地殻変動や微小地震活動の低調さに符合するとしている。

これらの評価とは別に、地震発生の時系列や地殻変動サイクル、地質・地形データ等に基づいて地震発生周期を論じる仕事が数多くなされている。たとえば、茨城県沖では約 20 年の周期で $M7$ 前後の地震の発生が認められ [岡田・他 (1982), 溝上 (1985) 等], また、神奈川県西部の小田原市付近では 17 世紀以降約 70 年間隔での $M7$ 級地震の規則的繰返しが指摘されている [石橋 (1977a, 1985b, 1988c), ISHIBASHI (1985a), 笠原 (1985c) 等]。河角 (1970) は関東南部の強震発生について 69 年周期説を唱えているが、数値的にはこれに近いものである。

相模湾における大地震の再来周期については、1703 年元禄関東地震 ($M8.2$) をどう見るかによって様々の説が提出されており、Table 2 にそのまとめを示す。これらの大部分は、測地学・地形学的な地殻上下変動の速度に基づく見積りである。松田・他 (1974), MATSUDA *et al.* (1978) は、大正関東地震と元禄関東地震の 2 つのタイプの大地震がセットとなって起ると考えその繰返し周期を見積っているが、瀬野 (1977a) 及び松田 (1977,

1985) は、大正型と元禄型が組になる必然性はないとして、各々の再来周期を独立に求めている。なお、松田 (1977, 1985) は、湘南付近の隆起地形の調査に基づいて、大正型でも元禄型でもない第 3 の「大礫型地震」を導入し、その再来周期をおよそ 100~200 年と見積っているが、山崎 (1985) は、この大礫型地震の繰返し周期を約 1,000 年と推定している。なお、同表中の SENO (1977b) による再来周期の値は、1923 年関東地震の断層変位量をフィリピン海プレートのユーラシアプレートに対する相対速度で割って算出したものであり、暗黙に 100% のサイスミックカップリングを仮定していることになるが、この場合、茨城県南西部での 10~20% という値との関連が問題になろう。

一方、石橋 (1977a), ISHIBASHI (1985a) は、相模湾・伊豆半島・駿河湾地域の地震活動の相互関連における西相模湾断層の役割を強調し、ここでの地震活動の基本周期 T (ほぼ 70 年) を単位として、東海地震タイプは $2T$ 、関東地震タイプは $3T$ の繰返し周期を持って同期的に活動するとの仮説を提出した。さらに、石橋 (1987c) は、これに伊豆大島噴火と首都圏直下の地震活動の盛衰とを関連させ、これらの地学現象を結びつけるテクニクスの解釈を論じている。それによれば、南関東周辺地域のシナリオは次のようである。1986 年伊豆大島噴火によるフィリピン海プレート湾曲の増大 [石橋 (1987b)] → 1990 年代にも神奈川県西部地震の発生 → 連鎖的な東海地震の発生 → 関東地方下での応力増大による首都圏直下の地震活動の活発化 → 次の関東地震の発生 → 首都圏直下の地震活動の静穏化。

(3) 地震発生の候補地

1923 年関東地震のような $M8$ 級地震は、前節に述べたように、200~300 年の周期をもって相模湾を舞台に繰返されることが予想されている。これより規模の小さ

い M7 級地震となるとその発生場所の予測は困難であるが、現在の地震活動の特徴やテクトニクスを背景とした考察に基づき、次のように幾つかの候補地が推定されている。

UTSU (1974b) は、南関東地域において、房総半島南東沖及び伊豆大島・三宅島間を地震活動の空白域と認めている。また、牧 (1983) は、震央分布図、活断層図から栃木・埼玉県西部～山梨県東部～伊豆半島東部～伊豆大島と連なる浅発地震の「139° 線活動域」の存在を提唱し、その空白域としての栃木県南西部、東京・埼玉・山梨県境部、神奈川・静岡県境部および新島北西沖を、被害地震発生候補地として挙げている。

川崎・松田 (1987) は、1923 年関東地震の震源域と茨城県南西部の地震多発帯との中間に位置する埼玉県東部のフィリピン海プレート上面を地震発生能力のある空白域と認定し、ここを断層面とした場合の理論地震地動と地殻変動を計算している。また、OKADA and KASAHARA (1990) は、1987 年千葉県東方沖地震と 1921 年竜ヶ崎地震の震源像の類似性その他から、沈み込んだフィリピン海スラブ東縁に平行する弱線構造の存在を推定し、この東端に沿う線上で現在地震空白域と見られる千葉県北東部及び房総半島勝浦沖を、類似の地震が発生する候補地と考えている。

一方、近い将来の発生が唱えられている神奈川県西部の地震に関しては、石橋 (1977a, 1985b), ISHIBASHI (1985a) により西相模湾スラスト上の低角左横ずれ逆断層モデルが提案され、その後、石橋 (1988bcd) は西相模湾断層に沿った高角左横ずれ逆断層モデルへの修正を行っている。これに対し笠原 (1985bc) は、MATSU'URA *et al.* (1980) による 1923 年関東地震の断層モデルⅢの 2 枚の断層面のうち、神奈川県西部における北北東下がりの低角逆断層面を、予想される地震の発生場所とする考えを示した。さらに、過去の活動はこの断層面上で 3 つの異なる型が 200 年毎に繰返されており、来るべき地震は内陸側 (丹沢西部) が活動する型であろうと予測している。また、松田 (1977, 1985) は、国府津-松田断層が活動する「大磯型地震」を小田原付近の地震の候補とする見解を示している。なお、藤井・中根 (1983) は西相模湾における地殻歪の蓄積が極めて大きいと報告しており、また、笠原 (1985c) は神奈川・静岡県境に微小地震活動の空白域の存在を指摘している。

§ 5. おわりに

以上、南関東地域におけるプレート構造のモデル化と、テクトニクスより予想される地震発生様式を中心として、最近の研究を概観した。フィリピン海プレートの

形状のモデル化に関しては、概ね東京湾以西でモデル間の一致があるものの、その東側では研究者間の見解の差が著しい。松村 (1984), PAPANASTASSIOU and MATSUMURA (1987) は、防災センターの地震検知能力が東京湾から房総半島にかけては大幅に劣っていることを指摘している。1987 年千葉県東方沖地震のようなイベントはプレートモデルの構築に有力な手掛かりを与えてくれるが、このようなイベントを待つのみでなく、より基本的には東京湾以東の地震観測を更に強化することが必要であろう。また、フィリピン海プレート東端近辺の姿をはっきりさせるためには、千葉県勝浦沖の常時海底地震観測システムの貢献が期待されるが、同様のシステムは銚子沖にも欲しいところである。さらに将来的には、笠原 (1989) が提案するように、房総半島南部での 15 km 級ボーリングによる沈み込んだプレートの直接確認も重要であろう。

現状の観測体制でも出来ることとしては、発震機構のより詳細な調査、反射波や変換波を用いたプレート境界面の組織的探索、より分解能の高い 3 次元速度構造や減衰構造の決定等が挙げられる。

関東地方下におけるフィリピン海プレートの形状については色々議論があるものの、どのモデルも、海溝から沈み込んだ距離は、東海地方と同じく、ほぼ 200 km に及んでいる。NORSU *et al.* (1985) は、フィリピン海プレートが赤城山の下にまで延びているとすると、火成岩中のストロンチウム同位体比を説明するのに都合がよいことを述べているが、このような地球化学的方法もプレート存在の確認に使えるであろう。

伊豆半島の北側で等深線が急に追えなくなることも、各モデルに共通している。野口・他 (1985) は長野県東部の深さ 70 km に孤立した地震群を見出しているが、これを除けば、伊豆半島の北から北西にかけて、プレートの沈み込みを地震活動から確認することはできない。多くの研究者は、火山フロントの影響または自分自身の高温のために地震発生能力を失ったフィリピン海スラブが、ここにも存在すると考えているが [中村・島崎 (1981), 瀬野 (1985a) 等], 石橋 (1986, 1988 cd) は、多重衝突の考えを採用し、実際にもスラブが存在しないとする立場をとっている。最近の反射波や変換波による観測では、§ 2 (3) に述べた通り、対立する結果が出されており、より詳細な調査が待たれる。

これまでに提出された等深線モデルで見える限り、太平洋プレートに較べてフィリピン海プレートの形状は起伏が大きく、また、局所的には断層や皺寄りが予想されるなど、厚さが一定で非変形の剛体プレートという概念は、もはやこのようなローカルスケールでは成り立って

いないように見える。さらに、Fig. 3 の模式断面図に見られる通り、フィリピン海スラブと太平洋スラブとの衝突部では、前者が後者に貫入するとの考えから、前者が後者に削り取られるとする考えまで、プレートの「硬さ」に関するイメージも様々である。内部変形を考慮に入れ、弾性・塑性・強度等の現実的性質を織り込んだプレート理論の発展も、望まれるところである。島崎(1988)、橋本・多田(1988)、多田・橋本(1989)、岡田・山本(1990)等は、近年の伊豆半島から伊豆大島にかけての地殻活動を岩脈貫入で説明しようとしているが、たとえばこのような現象は、局地的にせよ、フィリピン海プレートの運動に北東向きの寄与を与えているのではなかろうか。

一方、1923 年関東地震以前に首都圏を襲った被害地震である 1855 年(安政)江戸地震や 1894 年(明治)東京地震の性格については、まだ不明なことが多い。後者については、東京での S-P 時間が 7 秒程度と報告されているので、震源は比較的深いと想像され、須藤(1977)は、震央を東京付近とすれば正断層型の発震機構が考えられるとしている。一方、安政江戸地震の方は、萩原(1972)による震度分布の違いや被害の局地性から、より浅い地震であったことは確実である。笠原(1985b)は、この地震がユーラシアプレートに属する地殻内(活断層)の地震か、又はフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に発生した地震のいずれかであるかを、早急に解明すべきであると進言している。

本稿では、活断層について言及しなかった。加藤(1984)による東京湾北部断層の発見等の例はあるが、一般に関東地方中心部は厚い堆積層に覆われ、活断層の発見そのものが容易ではない。また、すでに知られている活断層についても、発震機構の調和する地震が散見される[牧(1983)、笠原(1985b)等]程度であり、対応する微小地震活動が確認されている例はない。

安政江戸地震より更に以前の被害地震については、宇佐美(1976)によるまとめがなされており、東京湾西岸に沿った東京から横浜にかけての震源集中が目される。しかし、NAKANISHI and HORIE (1980)、SOMERVILLE (1980)が注意を喚起しているように、これらの震源位置推定の根拠とされる震度分布は、人口の偏りと地盤の問題に加えて、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う異常震域現象により、強いバイアスを受けている恐れがある。従って、これらの被害地震の大部分は、千葉県中部等の現在知られている震源密集域に発生した地震である可能性も高い。南関東地域のサイスマテクトニクスを明らかにすることは、このような首都圏の地震予知の諸問題の解明にも大きく貢献するであろう。

文 献

- ABE, K., 1974, Seismic displacement and ground motion near a fault: The Saitama earthquake of September 21, 1931, *J. Geophys. Res.*, **79**, 4393-4399.
- ABE, K., 1975, Static and dynamic fault parameters of the Saitama earthquake of July 1, 1968, *Tectonophys.*, **27**, 223-238.
- 相田 勇, 1981, 東海道沖におこった歴史津波の数値実験, *地震研究所彙報*, **56**, 367-390.
- 安芸敬一, 1979, 地震予知研究の方向, *科学*, **49**, 308-313.
- 安藤雅孝, 1971a, 房総沖地震(1953)の断層モデル, *地震学会講演予稿集*, no. 2, 49.
- ANDO, M., 1971b, A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **49**, 19-32.
- ANDO, M., 1974, Seismo-tectonics of the 1923 Kanto earthquake, *J. Phys. Earth*, **22**, 263-277.
- 安藤雅孝, 1980, 伊豆半島の衝突と地殻構造, *月刊地球*, **2**, 128-131.
- 安藤雅孝・松田時彦・阿部勝征, 1973, 日本列島上部地殻の応力場, *地震学会講演予稿集*, no. 1, 166.
- AOKI, H., 1974, Plate tectonics of arc-junction at central Japan, *J. Phys. Earth*, **22**, 141-161.
- 青木治三, 1977, 東海地方における大地震の可能性, *地震予知研究シンポジウム* (1976), 56-68.
- ASADA, T., 1957, Observations of near-by microearthquakes with ultra sensitive seismometers, *J. Phys. Earth*, **5**, 83-113.
- ASHIYA, K., S. ASANO, T. YOSHII, M. ISHIDA and T. NISHIKI, 1987, Simultaneous determination of the three-dimensional crustal structure and hypocenters beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *Tectonophys.*, **140**, 13-27.
- 壇原毅, 1971, 日本における最近 70 年間の総括的上下変動, *測地学会誌*, **17**, 100-108.
- 江口孝雄, 1985, 伊豆小笠原弧周辺の地震活動とその背景, *月刊地球*, **7**, 646-651.
- 江口孝雄・鶴川元雄・藤縄幸雄, 1989, 相模トラフ北西部における海底地震観測の結果, *地震予知連絡学会報*, **42**, 121-129.
- 藤井陽一郎, 1972, 二宮付近の地殻上下変動と相模湾大地震のくりかえし周期, *神奈川地学*, **5**, 125-128.
- 藤井陽一郎, 1977, 1930 年および 1976 年前後の伊豆東方線の活動, *地震*, **2**, 90, 389-400.
- 藤井陽一郎, 1979, 南関東・東海地方の地殻活動の相互関連: フィリピン海プレート北縁の最近の地殻ダイナミクス, *地震*, **2**, 32, 75-88.
- 藤井陽一郎・宮下芳・北沢幸人, 1985, 茨城及び周辺の地殻変動・地震活動, *月刊地球*, **7**, 79-84.
- 藤井陽一郎・中根勝見, 1982, 関東・東海地方の地殻水平変動(VIII)一定常的地殻歪について一, *測地学会誌*, **28**, 220-229.
- 藤井陽一郎・中根勝見, 1983, 関東・東海地方の地殻水

- 平変動 (IX) — 伊豆半島およびその周辺における地殻歪速度と最近の地震活動一, 測地学会誌, **29**, 37-47.
- FUKUYAMA, E. and K. IRIKURA, 1989, Heterogeneity of the 1980 Izu-Hanto-Toho-Oki earthquake rupture process, *Geophys. J. Int.*, **99**, 711-722.
- 萩原尊礼, 1972, 明治 27 年東京地震, 安政 2 年江戸地震, 元禄 16 年関東地震の震度分布, 地震予知連絡会会報, **7**, 27-31.
- 浜田和郎・笠原敬司, 1981, 関東・東海地域のテクトニクスを統一的に説明するモデル, 地震予知連絡会会報, **25**, 51-58.
- 浜田和郎・大竹政和・岡田義光・松村正三・山水史生・佐藤春夫・井元政二郎・立川真理子・大久保正・山本英二・石田瑞穂・笠原敬司・勝山ヨン子・高橋 博, 1982, 関東・東海地域地殻活動観測網—国立防災科学技術センター, 地震 **2**, 35, 401-426.
- 浜田信生, 1986, 関東地震の震源の深さについて, 験震時報, **50**, 1-6.
- HAMANO, Y., 1987, Realizability and stability of TTT triple junction, *Tectonics*, **6**, 47-51.
- 原田健久・葛西篤男, 1971, 最近 60 年間における日本の地殻の水平歪, 測地学会誌, **17**, 4-7.
- HASEMI, A. and M. ISHIDA, 1987, Travel times and hypocenter determinations by using the three dimensional velocity model of the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Phys. Earth*, **35**, 255-271.
- 萩原幸男, 1984, 2 次元フィルター法による重力ゾーニング, 測地学会誌, **30**, 1-16.
- HASHIDA, T., 1987, Determination of three-dimensional attenuation structure and source acceleration by inversion of seismic intensity data: Japanese Islands, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **62**, 247-288.
- 橋本 学, 1990, 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I): 本州・四国・九州, 地震 **2**, **43**, 13-26.
- 橋本 学・多田 亮, 1988, 1986 年伊豆大島噴火前後の地殻変動, 火山 **2**, **33**, S136-S144.
- 本田 勉, 1984, 北関東の太平洋プレート上面における PS 変換波の走時解析, 千葉大学卒業論文.
- 堀 貞喜, 1986, 1985 年 10 月 4 日千葉・茨城県境付近に発生した地震の発生メカニズムとその構造的意義について, 地震 **2**, **39**, 457-468.
- 堀 貞喜, 1988, 関東地方下のやや深発地震に見られる後続相, 地震学会講演予稿集, no. 2, 86.
- HORIE, A. and K. AKI, 1982, Three-dimensional velocity structure beneath the Kanto district, Japan, *J. Phys. Earth*, **30**, 255-281.
- HUCHON, P. and P. LABAUME, 1989, Central Japan triple junction: a three-dimensional compression model, *Tectonophysics*, **160**, 117-133.
- 古川信雄・井元政二郎, 1989, 太平洋・フィリピン海プレート衝突域のテクトニクス, 地震学会講演予稿集, no. 2, 53.
- HYEONGPYO, K.・矢吹哲一朗・松浦充宏, 1989, 1923 年関東地震に伴うプレート境界面上でのひずり分布, 地震学会講演予稿集, no. 2, 51.
- ICHIKAWA, M., 1962, Statistical investigation of earthquake mechanism in Kwanto district, *Geophys. Mag.*, **31**, 243-256.
- ICHIKAWA, M., 1971, Reanalyses of mechanism of earthquakes which occurred in and near Japan, and statistical studies on the nodal plane solutions obtained 1926-1968, *Geophys. Mag.*, **35**, 208-256.
- 飯高 隆・中村 功・溝上 恵, 1989, PS 変換波から推定された関東地方下の太平洋プレート上面について, 地震研究所集報, **64**, 37-50.
- 井元政二郎, 1984, 関東・東海地域における起震応力場, 国立防災科学技術センター研究速報, **66**, 76 pp.
- 井元政二郎, 1985, 関東南部におけるフィリピン海プレート内の応力場, 月刊地球, **7**, 93-96.
- IRIKURA, K., 1983, Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, **33**, 63-104.
- 石橋克彦, 1973, 大正 10 年竜ヶ崎地震の震源位置について—アーツ 1 号が発見した「線」との関連—(速報), 地震 **2**, **26**, 362-367.
- 石橋克彦, 1975, 関東大地震直前の関東内陸の起震応力—相模トラフ大地震発生の指標—, 地震学会講演予稿集, no. 1, 69.
- 石橋克彦, 1977a, 「西相模湾断層」の可能性と東海地震との関連—相模湾・伊豆半島・駿河湾地域のサイスモテクトニクス試論—, 地震予知連絡会東海部会資料, 53-68.
- 石橋克彦, 1977b, 1703 年元禄関東地震の震源域と相模湾における大地震の再来周期 (第 1 報), 地震 **2**, **30**, 369-374.
- 石橋克彦, 1980, 伊豆半島をめぐる現在のテクトニクス, 月刊地球, **2**, 110-119.
- 石橋克彦, 1984, 南部フォッサマグナ地域のプレート運動—日本海沈み込み説の適用—, 月刊地球, **6**, 61-67.
- ISHIBASHI, K., 1985a, Possibility of a large earthquake near Odawara, central Japan, preceding the Tokai earthquake, *Earthq. Pred. Res.*, **3**, 319-344.
- 石橋克彦, 1985b, 小田原付近の地震発生の可能性, 月刊地球, **7**, 420-426.
- 石橋克彦, 1986, 南部フォッサマグナのプレート運動史 (試論), 月刊地球, **8**, 591-597.
- 石橋克彦, 1987a, 相模トラフ北部～伊豆地域から沈み込むフィリピン海プレートの形状, 地震学会講演予稿集, no. 1, 96.
- 石橋克彦, 1987b, 小田原地震の意義およびその tectonic precursor としての伊豆大島噴火, 地震学会講演予稿集, no. 1, 97.
- 石橋克彦, 1987c, 大地震が「世界都市東京」を直撃する, 中央論, 9 月号, 124-138.
- 石橋克彦, 1988a, 1923 年関東地震の震源断層モデルの問題点—とくに西相模湾断層に関連して—, 地震学会講演予稿集, no. 1, 119.
- 石橋克彦, 1988b, 「西相模湾断層」の繰り返しスベリとしての「小田原地震」, 地震学会講演予稿集, no. 2, 44.
- 石橋克彦, 1988c, 「神奈川県西部地震」と地震予知 I, 科学, **58**, 537-547.

- 石橋克彦, 1988d, “神奈川県西部地震”と地震予知Ⅱ, 科学, 58, 771-780.
- ISHIBASHI, K. and M. ISHIDA, 1989, Seismic activity in the south Fossa Magna, central Japan, *Modern Geology*, 14, 19-33.
- ISHIDA, M., 1984, The spatial distribution of earthquake hypocenters and the three-dimensional velocity structure in the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Phys. Earth*, 32, 399-422.
- 石田瑞穂, 1986, 関東・東海地域の震源分布から推定したフィリピン海及び太平洋プレートの等深線, 国立防災科学技術センター研究報告, 36, 1-19.
- 石田瑞穂, 1989a, 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, 地震学会講演予稿集, no. 1, 46.
- 石田瑞穂, 1989b, 沈み込むフィリピン海プレートの形状, 火山とプレートテクトニクス (中村一明著), 257-264.
- 石田瑞穂, 1990a, 南部フォッサマグナ・フィリピン海プレート北縁の地震活動の特徴, 地学雑誌, 99, 43-60.
- ISHIDA, M., 1990b, Present-day subduction along the northern tip of the Philippine Sea plate, (in preparation).
- ISHIDA, M. and S. ASANO, 1979, A new seismicity map in the Kanto district, Japan, *J. Phys. Earth*, 27, 435-453.
- ISHIDA, M. and A. H. HASEMI, 1988, Three-dimensional fine velocity structure and hypocentral distribution of earthquakes beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 93, 2076-2094.
- 貝塚爽平, 1972, 島弧系の大地震とプレートテクトニクス, 科学, 42, 573-581.
- 貝塚爽平, 1974, 関東地方の島弧における位置と第四紀地殻変動, 関東地方の地震と地殻変動 (垣見俊弘・鈴木尉元編), ラテイス, 99-118.
- 垣見俊弘・佐藤裕・津村建四朗・石田瑞穂, 1977, 関東における地震, 地殻活動と地震予知, 地震予知研究シンポジウム (1976), 21-45.
- 垣見俊弘・鈴木尉元, 1974, 関東地方の地震と地殻変動, ラテイス, 279 pp.
- KANAMORI, H., 1971, Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 49, 13-18.
- KANAMORI, H., 1973, Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1, 213-239.
- KANAMORI, H., 1977, Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications, *Island arcs, Deep sea trenches and Back-arc basins*, ed. by M. Talwani and W. C. Pitman, 163-174.
- 神林幸夫・勝又 護, 1975, 関東地方の最近の地震活動, 東京直下地震に関する調査研究 (その3) - 地震活動状況に関する考察一, 東京都防災会議, 14-17.
- 神定健二, 1987, SP 変換波から推定した相模湾地域地震波速度不連続面の形状, 験震時報, 50, 61-64.
- 笠原慶一・山田重平・安藤雅孝, 1973, 南関東の地殻変動—展望と作業仮説一, 関東大地震 50 周年論文集, 103-116.
- 笠原敬司, 1980, 関東地方の地震発生様式について, 地震学会講演予稿集, no. 2, 66.
- 笠原敬司, 1981, 直下型地震とプレートテクトニクス, 関東・東海地域の太平洋プレートとフィリピン海プレートの立体構造, *Security*, 21, 13-17.
- 笠原敬司, 1985a, 関東地方の地震活動とプレートテクトニクス, 月刊地球, 7, 105-111.
- 笠原敬司, 1985b, プレートが三重会合する関東・東海地方の地殻活動様式, 国立防災科学技術センター研究報告, 35, 33-137.
- 笠原敬司, 1985c, 関東南部における大地震再来周期について, 月刊地球, 7, 440-445.
- 笠原敬司, 1986, プレートの衝突と関東造盆地運動, 月刊地球, 8, 252-257.
- 笠原敬司, 1989, 沈み込み機構の直接説明: 静岡・神奈川・千葉の 15 km 級ボーリング, 陸上学術ボーリング候補地集Ⅲ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 23-48.
- 笠原敬司・岡田義光, 1989, 茨城県南西部から銚子市付近にかけての最近の地震活動, 地震予知連絡会会報, 42, 90-96.
- 笠原敬司・岡田義光・大竹政和・沢田義博, 1988, 1987 年 12 月に発生した千葉県東方沖地震 ($M6.7$) のテクトニクス的意味, 地震学会講演予稿集, no. 1, 64.
- 加藤 茂, 1984, 東京湾におけるマルチチャンネル反射法音波探査, 水路部研究報告, 19, 1-57.
- 加藤 茂・佐藤任弘・桜井操, 1983, 南海・駿河・相模トラフのマルチチャンネル反射法音波探査, 水路部研究報告, 18, 1-23.
- 加藤 茂・富安義昭・土岐嘉孝, 1987, 相模トラフのマルチチャンネル反射法音波探査, 水路部研究報告, 22, 95-111.
- 活断層研究会, 1980, 日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会, 363 pp.
- 川崎一朗・勝又 護, 1975, 関東南部のやや深いところの広域応力場, 地震学会講演予稿集, no. 1, 124.
- 川崎一朗・松田恵子, 1987, 南関東におけるプレート間サイスミックカップリングと仮想東京直下地震, 地震, 40, 7-18.
- 河角 広, 1970, 関東南部地震 69 年周期の証明とその発生の緊迫度ならびに対策の緊急性と問題点, 地学雑誌, 79, 115-138.
- 菊地正幸・須藤研, 1985, 1982 年 7 月 23 日茨城県沖地震の震源過程—海山沈没と Asperity—, 月刊地球, 7, 72-78.
- 小林洋二, 1983, プレート“沈み込み”の始まり, 月刊地球, 3, 510-518.
- 国土地理院, 1987, 日本の地殻水平歪, 1985 年—1883 年, 国土地理院技術資料, 133 pp.
- 国土地理院, 1989, 首都及びその周辺の地震予知 (その2), 地震予知連絡会地域部会報告, 3, 170 pp.
- 小出 仁, 1980, 地震予知のための応力測定の問題点, 月刊地球, 2, 578-585.
- MAKI, T., 1981a, Regional variation of Pn residuals and its application to relocation of earthquakes in

- and around the Kanto district, Bull. Earthq. Res. Inst., **56**, 309-346.
- 牧 正, 1981b, 関東地方の地震メカニズム, 地質学論集, **20**, 259-266.
- 牧 正, 1983, 関東地方における浅発地震の活動域と発震機構, 自然災害科学, **2**, 16-32.
- MAKI, T., 1984, Focal mechanisms and spatial distribution of intermediate-depth earthquakes beneath the Kanto district and vicinity with relation to the double seismic planes, Bull. Earthq. Res. Inst., **59**, 1-51.
- 牧 正, 1985, 茨城県南西部地震活動域の震源分布とメカニズム, 月刊地球, **7**, 112-121.
- MAKI, T., I. KAWASAKI and A. HORIE, 1980, Earthquake mechanisms associated with the conjunction of the sinking plates beneath the Kanto district, central Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., **55**, 577-600.
- 松田時彦, 1967, 地震の地質学, 地震 **2**, **20** (20周年特集号), 230-235.
- 松田時彦, 1977, 相模トラフで起る大地震の発生頻度, 地震予知連絡会東海部会資料, 15-24.
- MATSUDA, T., 1978, Collision of the Izu-Bonin arc with central Honshu: Cenozoic tectonics of Fossa Magna, Japan, J. Phys. Earth, **26**, S409-S421.
- 松田時彦, 1985, 大礫型地震について, 月刊地球, **7**, 472-477.
- 松田時彦・太田陽子・安藤雅孝・米倉伸之, 1974, 元禄関東地震(1703年)の地学的研究, 関東地方の地震と地殻変動(垣見俊弘・鈴木尉元編), ラテイス, 175-192.
- MATSUDA, T., Y. OTA, M. ANDO and N. YONEKURA, 1978, Fault mechanism and recurrence time of major earthquakes in southern Kanto district, Japan, as deduced from coastal terrace data, Geol. Soc. Am. Bull., **89**, 1610-1618.
- 松村正三, 1984, 微小地震観測網の検知能力の評価について—国立防災科学技術センター関東・東海地殻活動観測網—, 地震 **2**, **37**, 475-489.
- 松村正三, 1987, 伊豆諸島沿いの地震群発生の同期性について, 地震 **2**, **40**, 267-269.
- MATSU'URA, M. and T. IWASAKI, 1983, Study on co-seismic and postseismic crustal movements associated with the 1923 Kanto earthquake, Tectonophys., **97**, 201-215.
- MATSU'URA, M., T. IWASAKI, Y. SUZUKI and R. SATO, 1980, Static and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake, J. Phys. Earth, **28**, 119-143.
- McKENZIE, D. P. and W. J. MORGAN, 1969, Evolution of triple junctions, Nature, **224**, 125-133.
- MIKUMO, T., 1962, Mechanism of local earthquakes in Kwanto region, Japan, derived from the amplitude relation of P and S waves, Bull. Earthq. Res. Inst., **40**, 399-424.
- MINSTER, J. B. and T. H. JORDAN, 1978, Present day plate motions, J. Geophys. Res., **83**, 5331-5354.
- 宮村攝三, 1967, 群列方式地震観測へのあゆみ, 地震 **2**, **20** (20周年特集号), 107-115.
- 溝上 恵, 1984, 三宅島噴火と広域地震活動, 月刊地球, **6**, 725-732.
- 溝上 恵, 1985, 茨城県地震と広域地震活動との関連性について, 月刊地球, **7**, 85-92.
- 溝上 恵・中村 功・千葉平八郎・吉田 満・萩原弘子・横田 崇, 1981, 伊豆半島東方沖の群発地震による相模湾, 伊豆半島及び駿河湾地域の地殻上部構造の推定, 地震研究所彙報, **56**, 139-160.
- MIZOUE, M., I. NAKAMURA, H. CHIBA, M. YOSHIDA, H. HAGIWARA and T. YOKOTA, 1983, Westward movement of the seismic activity associated with the earthquake of July 23, 1982 off Ibaraki Prefecture, northeastern Honshu, Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., **58**, 25-63.
- 溝上 恵・中村 功・飯高 隆・岩瀬良一・神定健二, 1988, 伊豆半島周辺, プレート境界近傍におけるS-P変換波について, 地震学会講演予稿集, no. 1, 98.
- 溝上 恵・中村 功・飯高 隆, 1989, 関東地方における二重深発地震面の下面での反射波について, 地震学会講演予稿集, no. 1, 48.
- 望月英志・佐久間喜代志・井元政二郎, 1985, 関東・東海地方の地震の発震機構解(1979~1983), 地震 **2**, **38**, 411-422.
- Mogi, K., 1969, Some features of recent seismic activity in and around Japan (2). Activity before and after great earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, 395-417.
- 茂木清夫, 1977, 伊豆・東海地域の地殻活動の一解釈, 地震研究所彙報, **52**, 315-332.
- 茂木清夫, 1981, 東北日本西岸沖—フォッサマグナ—東海・伊豆の活動帯と近年の伊豆地方における地震活動について, 地震研究所彙報, **56**, 691-711.
- 茂木清夫, 1989, 首都及びその周辺の地震予知(その2), 地震予知連絡会地域部会報告, **3**, 21-22.
- NAKAMURA, K., 1977, Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation—Principle and proposal, J. Volcanol. Geotherm. Res., **2**, 1-16.
- 中村一明, 1979, 駿河トラフ東方の主応力線—プレートの曲り, 地震 **2**, **32**, 370-372.
- 中村一明, 1980, 伊豆のテクトニクスとプレートの曲り, 月刊地球, **2**, 94-102.
- 中村一明, 1983, 日本海東縁新生海溝の可能性, 地震研究所彙報, **58**, 711-722.
- 中村一明・島崎邦彦, 1981, 相模・駿河トラフとプレートの沈み込み, 科学, **51**, 490-498.
- NAKAMURA, K., K. SHIMAZAKI and N. YONEKURA, 1984, Subduction, bending and eduction. Present and Quaternary tectonics of the northern border of the Philippine Sea plate, Bull. Soc. geol. France, **26**, 221-243.
- 中根勝見, 1973, 日本における定常的な水平地殻歪(I)(II), 測地学会誌, **19**, 190-199, 200-208.
- NAKANISHI, I. and A. HORIE, 1980, Anomalous distributions of seismic intensities due to the descending Philippine Sea plate beneath the southern

- Kanto district, Japan, *J. Phys. Earth*, **28**, 333-360.
- 新妻信明, 1982, プレートテクトニクスの試金石—南部フォッサマグナ, 月刊地球, **4**, 326-333.
- 野口伸一, 1985, フィリピン海プレートの形状と茨城地震活動の特徴, 月刊地球, **7**, 97-104.
- 野口伸一・笠原敬司・柏原静雄, 1985, 長野県東部深さ70 kmの地震について, 地震学会講演予稿集, no. 1, 150.
- NOTSU, K., I. KITA and T. YAMAGUCHI, 1985, Mantle contamination under Akagi volcano, Japan, as inferred from combined Sr-O isotope relationships, *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 365-368.
- OBARA, K., 1989, Regional extent of the S wave reflector beneath the Kanto district, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 839-842.
- OBARA, K. and H. SATO, 1988, Existence of an S wave reflector near the upper plane of the double seismic zone beneath the southern Kanto district, Japan, *J. Geophys. Res.*, **93**, 15037-15045.
- 大竹政和, 1980, 関東・東海地域のテクトニクスの統一モデルと南関東直下の地震の発生メカニズム, 防災科学技術, **41**, 1-7.
- OHTAKE, M., 1986, Synchronized occurrence of offshore and inland earthquakes in the Ibaraki region, central Japan, *Earthq. Pred. Res.*, **4**, 165-173.
- 大竹政和・笠原敬司, 1983, 茨城県地域に見られるベア地震現象, 地震 **2**, **36**, 643-653.
- 岡田義光, 1988, 相模湾北部の最近の地震活動, 地震予知連絡会会報, **39**, 107-112.
- OKADA, Y. and K. KASAHARA, 1990, Earthquake of 1987, off Chiba, central Japan and possible triggering of eastern Tokyo earthquake of 1988, *Tectonophysics*, **172**, 351-364.
- 岡田義光・野口伸一・鶴川元雄・井元政二郎・大竹政和, 1982, 茨城県沖の地震(1982年7月23日)概報, 国立防災科学技術センター研究速報, **46**, 14 pp.
- 岡田義光・佐藤春夫・木下繁夫・鶴川元雄・野口伸一, 1984, 1983年10月三宅島噴火前後の地殻活動, 国立防災科学技術センター研究速報, **51**, 3-18.
- 岡田義光・山本英二, 1990, 1989年伊東沖群発地震・火山活動の一解釈, 地震予知連絡会会報, **43**, 200-208.
- PAPANASTASSIOU, D. and S. MATSUMURA, 1987, Examination of the NRCDP's (The National Research Center for Disaster Prevention) seismic observational network as regards I. Detectability—locality, II. Accuracy of the determination of earthquake source parameters, *Rep. Natl. Res. Cent. Disas. Prev.*, **39**, 37-65.
- 力武常次, 1980, 前震の震央は本震の震央めざして移動するか?, 地震学会講演予稿集, no. 2, 78.
- SATO, K., 1988, Stress and displacement fields in the northeastern Japan Island arc as evaluated with three-dimensional finite element method and their tectonic interpretations, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Ser. 5, **31**, 57-99.
- SCHOLZ, C. H. and T. KATO, 1978, The behavior of a convergent plate boundary: Crustal deformation in the south Kanto district, Japan, *J. Geophys. Res.*, **83**, 783-797.
- 関口渉次, 1989, 3D ブロックインバージョンによる関東東海地域の上部マントルQ構造(2), 地震学会講演予稿集, no. 2, 84.
- 瀬野徹三, 1977a, 地殻上下変動より推定された相模トラフ巨大地震の再来周期, 地震 **2**, **30**, 253-264.
- SENO, T., 1977b, The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate, *Tectonophysics*, **42**, 209-226.
- 瀬野徹三, 1980a, 概論: 伊豆半島のテクトニクス, 月刊地球, **2**, 81-86.
- 瀬野徹三, 1980b, 変化する広域応力場—南関東を例として—, 月刊地球, **2**, 146-154.
- 瀬野徹三, 1985 a, 概論: 関東平野下のプレート—その形態と運動—, 月刊地球, **7**, 66-72.
- SENO, T., 1985 b, Is Northern Honshuu a microplate?, *Tectonophysics*, **115**, 177-196.
- 瀬野徹三, 1986, 相模トラフ—三重点のテクトニクス—, 月刊地球, **8**, 206-212.
- 瀬野徹三, 1987, 1971年1月3日銭州海嶺付近の地震(M=5.5)の発生機構と深さ—伊豆海嶺西縁でのフィリピン海プレートの厚さについて—, 地震 **2**, **40**, 629-632.
- SENO, T., Y. OGAWA, H. TOKUYAMA, E. NISHIYAMA and A. TAIRA, 1989, Tectonic evolution of the triple junction off central Honshu for the past 1 million years, *Tectonophysics*, **160**, 91-116.
- SENO, T. and T. TAKANO, 1989, Seismotectonics at the trench-trench-trench triple junction off central Honshu, *Pure Appl. Geophys.*, **129**, 27-40.
- 瀬野徹三・関口渉次・吉田明夫, 1988, フィリピン海プレートの運動の4 Maまでの復元—2 Ma頃に運動は変化したか?—, 月刊地球, **10**, 646-654.
- 島崎邦彦, 1988, 伊豆東方沖の岩脈貫入仮説, 地震学会講演予稿集, no. 1, 330.
- SHIMAZAKI, K., K. NAKAMURA and T. YOSHII, 1982, Complicated pattern of the seismicity beneath the metropolitan area of Japan: Proposed explanation by the interactions among the superficial Eurasian plate and the subducted Philippine Sea and Pacific slabs, Abstract paper presented at Intern. Conf. Mathem. Geophys., Chateau de Bonas, France, 20-26 June 1982, *Terra Cognita*, **2**, 403.
- SOMERVILLE, P., 1978, The accommodation of plate collision by deformation in the Izu block, Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **53**, 629-648.
- SOMERVILLE, P., 1980, Earthquake mechanisms at the head of the Philippine Sea plate beneath the southern Kanto district, Japan, *J. Phys. Earth*, **28**, 293-308.
- 須藤 研, 1977, 東京地震(明治27年6月)の断層模型, 地震学会講演予稿集, no. 1, 144.
- SUGIMURA, A., 1960, Zonal arrangement of some geophysical and petrological features in Japan and its environs, *J. Fac. Sci., Tokyo Univ.*, **12**, 133-153.

- SUGIMURA, A., 1964, Tilted terraces, especially in the southern Kanto district, Proc. U.S. Japan Conf. Res. relat. Earthq. Pred. Probl., 91-94.
- 杉村 新, 1972, 日本付近におけるプレートの境界, 科学, 42, 192-202.
- 鈴木宏芳, 1989, 関東・中部地域の地殻内地震の発震機構と地殻応力場, 国立防災科学技術センター研究報告, 43, 1-125.
- 多田 堯, 1977, 熱海—沼津構造線の提唱, 地震 2, 30, 374-377.
- 多田 堯・橋本 学, 1989, 伊豆半島北東部異常地殻活動の原因について (3)—開口割れ目モデルと 1988 年夏の活動一, 地震学会講演予稿集, no. 1, 41.
- TADA, T. and S. SAKATA, 1977, On a fault model of the 1923 great Kanto earthquake and its geotectonic implication, Bull. Geograph. Surv. Inst., 22, 103-121.
- 高橋 博, 1982, 深層観測井によって明らかにされた関東地方の微小地震活動の特性について, 国立防災科学技術センター研究報告, 28, 1-104.
- 高橋 博・笠原敬司, 1980, 深層地震観測による微小地震震源決定の改善について, 地震学会講演予稿集, no. 1, 14.
- 高橋末雄, 1990, 東京湾北部で発生する前駆的群発地震, 国立防災科学技術センター研究報告, 45, 53-109.
- 竹本 浩・川崎一朗, 1983, 茨城県南西部鬼怒川側におけるフィリピン海プレートとユーラシアプレートのサイスミックカップリング, 地震 2, 36, 531-539.
- 高柳明夫・山川宜男, 1976, 伊豆半島周辺のテクトニクス, 地震学会講演予稿集, no. 2, 28.
- 東北大学理学部, 1989, 山梨県東部における地震活動とフィリピン海プレート先端部からの反射波について, 地震予知連絡会会報, 42, 196-198.
- 東京大学地震研究所, 1989, 山梨県とその周辺部におけるフィリピン海プレート上面での SP 変換波, 地震予知連絡会会報, 42, 199-202.
- 東京大学地震研究所・国立防災科学技術センター, 1980, 首都及びその周辺の地震予知, 地震予知連絡会地域部会報告, 2, 28-36.
- 東京大学地震研究所・国立防災科学技術センター, 1989, 首都及びその周辺の地震予知 (その 2), 地震予知連絡会地域部会報告, 3, 24-47.
- 塚原弘昭・池田隆司, 1983, 関東・東海地域の地殻応力, 地震 2, 36, 571-586.
- TSUKAHARA, H. and R. IKEDA, 1987, Hydraulic fracturing stress measurements and in-situ stress field in the Kanto-Tokai area, Japan, Tectonophys., 135, 329-345.
- 塚原弘昭・池田隆司・佐竹 洋・高橋 博, 1981, 銚子市犬吠埼における水圧破壊法による地殻応力測定, 地震 2, 34, 13-20.
- 津村建四朗, 1973, 関東地方の微小地震活動, 関東大地震 50 周年論文集, 67-87.
- 津村建四朗・唐鎌郁夫, 1981, 関東地方の深発地震面について, 地震学会講演予稿集, no. 2, 8.
- 鶴川元雄, 1987, 伊豆半島周辺の圧縮応力場と衝突テクトニクス, 地震学会講演予稿集, no. 2, 184.
- 鶴川元雄, 1988, 伊豆半島周辺の応力場と衝突テクトニクス—有限要素法による解析, 地震学会講演予稿集, no. 1, 140.
- 鶴川元雄・井元政二郎, 1982, 関東地方の 2 重深発地震面の発震機構, 地震学会講演予稿集, no. 2, 33.
- 鶴川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司, 1984, 関東・東海地域地震観測網による震源決定方法について, 国立防災科学技術センター研究速報, 53, 88 pp.
- 宇佐美龍夫, 1976, 江戸地震被害史, 地震研究所彙報, 51, 231-250.
- 宇佐美龍夫・浜松音蔵, 1967, 日本の地震および地震学の歴史, 地震 2, 20 (20 周年特集号), 1-34.
- 宇佐美龍夫・渡辺唯夫, 1977, 関東地方の地震の果一定義と性質一, 地震研究所彙報, 52, 379-406.
- 宇津徳治, 1974a, 日本周辺の震源分布, 科学, 44, 739-746.
- Ursu, T., 1974b, Space-time pattern of large earthquakes occurring off the Pacific coast of the Japanese islands, J. Phys. Earth, 22, 325-342.
- 湧井仙一郎・北村良江, 1989, 山梨・神奈川県境付近の地震にみられる顕著な位相, 地震学会講演予稿集, no. 1, 70.
- 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, 38, 193-201.
- 山崎晴雄, 1985, 足柄平野の地質と地殻変動, 月刊地球, 7, 466-472.
- 吉田明夫, 1982, 伊豆半島周辺域の最近の地震活動とその特徴, 地震 2, 35, 142-144.
- YOSHIDA, A., 1987, Characteristic patterns in the space-time distribution of large shallow earthquakes in the Japanese Islands, Tectonophys., 136, 283-297.
- YOSHIDA, A., 1988, Migration of seismic activity along intraplate seismic belts in the Japanese islands, Tectonophys., 145, 87-99.
- 吉井敏尙, 1979, 日本列島付近の地球物理データのコンパイル (I), 地震研究所彙報, 54, 75-117.