神奈川県西部に想定される地震の断層破断様式と発生確率

大 竹 政 和*

Faulting Mode and Occurrence Probability of the Impending Western Kanagawa, Central Japan Earthquake

Masakazu OHTAKE*

I. はじめに

石橋 (1977) は、相模湾北西部から陸域にかけてマグニチュード (以下 M と略称) 7 級の地震が約70年間隔で規則的に繰り返していることを見出し、今世紀末ないし来世紀初頭には次の地震の発生が避けられないだろうと予測した。爾来、相模湾北西部海域を含む神奈川県西部地域一帯は、地震テクトニクス研究、地震予知、地震災害軽減の立場から 特別の 関心を集め、現在では、想定される地震に対して「神奈川県西部地震」または「小田原地震」という呼称が一般に用いられている。一方、伊豆半島東岸においては、1974年伊豆半島沖地震 (M 6.9) 以来の地震活動の北上 (茂木, 1981; Rikitake, 1982; 吉田, 1982) が、最近北緯35°付近で停止状態にある。対照的に、その北方では地震活動が長期にわたって著しく低くなっており、相模湾北西部沿岸の地震活動の推移が注視されている。

神奈川県西部地震は、当初、伊豆半島東方に新生沈み込み境界が生まれつつあるとの考えにもとづいて、これに沿う低角逆断層型の地震 (石橋, 1977) と想定された。この説は、その後、浮揚性の伊豆内弧と関東地方の地下に沈み込む外弧との構造境界に起きる高角逆断層型の地震説 (石橋, 1988) に修正されたが、このほかにも、地形・地質、プレート構造、地震活動等の知見にもとづいて多種多様なモデルが提唱されている。岡田

(1993) のレビューによれば、これまでに提唱された神奈川県西部地震のモデルないしイメージは4カテゴリ12種類に及ぶ。来るべき地震の地震像については、未だ研究者間の十分な合意をみるに至っていない。

一方、地震予知体制の面でも、観測体制は依然として手薄な状態にあり、常時観測の抜本的強化が望まれている。このような状況の下で、神奈川県西部地震を的確に予知することは現段階ではきわめて困難と言わざるを得ない。実際、わが国で地震予知が可能とされているのは、現在のところ、 $M8$ 級のプレート境界地震である想定東海地震のみである。しかし、最近数年の間に、科学技術研究振興調整費による「マグニチュード7級の内陸地震の予知に関する研究」等を通じて、神奈川県西部地震に関連する数々の新しい知見がもたらされた。本稿では、これらの成果を踏まえつつ、プレート相対運動の見地から神奈川県西部地震の地震像の絞りこみを試みる。また、この地震の予知戦略、事前対策に資するため、統計理論にもとづいて地震発生確率の予測を行なう。

II. プレート運動からの要請

神奈川県西部は、フィリピン海プレート (以下 PHS と略称) と陸のプレート (北米プレートまたはユーラシアプレート) の境界帯に位置する。最新のプレート相対運動モデル NUVEL-1 (DeMets *et al.*, 1990) に準拠した Seno *et al.*

* 東北大学理学部地球物理学教室

* Geophysical Institute, Faculty of Science, Tohoku University

(1993) のモデルによれば、PHS の相対運動は、小田原付近 (35.2°N , 139.2°E) で北米プレートに対して $\text{N}35^{\circ}\text{W}$ 方向、 $3.1\text{cm}/\text{年}$ 、ユーラシアプレートに対して $\text{N}50^{\circ}\text{W}$ 方向、 $3.8\text{cm}/\text{年}$ となる。大局的には、PHS は本州弧に対して年間 $3\sim 4\text{cm}$ で北北西ないし北西進しており、70年分の相対運動量は $2\sim 3\text{m}$ となる。一方、日本の浅発内陸地震に対する松田 (1975) の関係式から、 $M=7$ の地震の断層変位量は 1.6m 程度と推定される。従って、神奈川県西部で $M7$ 級の地震が約70年間隔で繰り返し発生しているならば、この一連の地震はプレート相対運動の過半を担っていることになる。プレート内部変形の効果を考慮に加えれば、地震による断層変位量とプレート相対運動量の比 $50\sim 80\%$ はこの地震の地震効率 (seismic efficiency) の下限を与える。いずれにしても神奈川県西部地震は、 $M7$ 級とはいえ、プレートの相対運動を直接表現する基本的な地震にほかならない。

それでは、この基本的な地震はどこでどのような破断様式で発生するのだろうか。図1は、神奈川県西部付近のプレート構造の骨格を、南西方向から見おろした透視図によって模式的に示したものである。この地域では、PHS は伊豆半島北方で本州弧と衝突し (伊豆ブロック)、その東側は関東地方の下に沈み込んでいる (関東スラブ)。図の K-T 部分は、両者の相対運動から必然的に

図1 神奈川県西部付近におけるプレートのジオメトリと基本地震 (E1, E2)

要請されるプレート内の断裂で、石橋 (1988) の「西相模湾断裂」はその具体的なイメージを与えるものである。

このようなテクトニクス環境下で起こり得る地震のうち、もっとも基本的なものとして次の2タイプを想定することができる (図1参照)。

E1: 関東スラブと伊豆ブロックの境界に発生する逆断層成分をもつ横ずれ断層型の地震

E2: 関東スラブの上面と大陸プレートの境界に発生する低角逆断層型の地震

これら以外にも、PHS の局所的な内部破壊による地震、活断層による陸のプレート内部の地震等が想定されるが、プレート相対運動の見地からは2次的な破壊とみなせる。

2つの基本地震のうち E2 については、1923年関東地震の際にすでに破断を起こしており (Matsu'ura *et al.*, 1980; Ishibashi, 1985)、当面の地震候補からは除いてもよさそうにみえる。しかし、Matsu'ura *et al.* (1980) の MODEL-III によれば、その断層スリップ量は関東地震断層主部の60%程度に過ぎず、近年中に再び破断する可能性は否定しきれない。とくに、Ishibashi (1985) による関東地震断層モデルの F1 と F3 の間では関東地震時の水平地殻変動ベクトルに大きな差異がみられ、酒匂川流域を中心とする陸域に注意を払う必要がある。現在、これを含む $20\times 15\text{km}^2$ の領域で地震活動が著しく低下しており (吉田, 1990)、来るべき神奈川県西部地震の有力候補地のひとつと考えねばならない。吉田 (1990) は、1988年頃からとくに小田原周辺で地震活動の低下が著しいと指摘している。

III. プレート内断裂による地震

基本地震 E1 を引き起こすプレート内断裂については、「西相模湾断裂」(石橋, 1988), 「道志—小田原サイスマック・ゾーン」西縁 (吉田, 1990) の2つのモデルが提出されている。以下、これらを WSB, DOS と略称する。WSB は高角西落ちの傾斜をもち、その上端の地表投影は、伊豆半島川奈崎沖 (図1の K) から北上し、小田原市街地 (図1の O) の西部を経て丹沢山地南部に至る

とされている。全長約50km, 平均走向は N15°W 程度である。現在のところ, WSB の存在を示す確実な証拠は見出されていない(地震予知総合研究振興会, 1992)。DOS は, 小田原市西方から山梨県東部に至る全長30km 弱, 走向N10°W の地震活動境界で, WSB の数 km 西をほぼ並走している。これらのモデルを念頭に置きつつ, プレート相対運動の立場から E1 の破断様式について検討する。

関東スラブ (K) と伊豆ブロック (I) を境するプレート内断裂面を基準として, 図1のように x, y, z 軸を定める。 y 軸は下記の ϕ 方向にとっている。断裂面は傾斜角 δ で西側に傾き下がつているものとし, その北向き走向を ϕ , 断裂面上端の走向を ϕ' とする(方位はいずれも北から反時計廻りに正)。東側のKは傾斜角 α で ϕ 方向に沈み込み, 西側のIはさしあたり陸のプレートに固定されているものとしておく。沈み込み開始以前におけるKのIに対する相対運動ベクトルを v (大きさ v , 方位 ϕ_0) とすれば, この固定条件の下では, v は PHS の陸のプレートに対する相対運動に一致する。傾斜角 α で沈み込むKにおいては, v は次式によって s :

$$\left. \begin{aligned} s_x &= v \sin(\phi_0 - \phi), \\ s_y &= v \cos(\phi_0 - \phi) \cos \alpha, \\ s_z &= v \cos(\phi_0 - \phi) \sin \alpha \end{aligned} \right\} (1)$$

に変換される。この相対運動が K, I の内部変形を伴わずに断裂面上で解消されるためには, 幾何学的条件:

$$\left. \begin{aligned} s_x/s_z &= \tan \delta, \\ \tan(\phi' - \phi) &= \tan \alpha \cot \delta \end{aligned} \right\} (2)$$

を満たす必要がある。また, K, I 間の相対運動を担う地震が断裂面上に発生すれば, そのスリップベクトルの水平面からの傾斜角 (λ) は,

$$\tan \lambda = \tan \alpha / \sin \delta \quad (3)$$

で与えられる。 $\lambda=0^\circ$, $\lambda=90^\circ$ はそれぞれ, 単純な strike-slip 型, dip-slip 型の地震に対応する。 $\phi_0, \phi, \phi', \alpha, \delta$ のうち3つの値がわかっているれば, (1), (2) 式から残る2つのパラメーターが決まり, さらに (3) 式から λ が定まる。

DOS については, 吉田 (1990) に従って $\phi' =$

10° , $\alpha=30^\circ$, $\delta=90^\circ$ とすれば, $\phi_0=10^\circ$, $\phi=10^\circ$, $\lambda=30^\circ$ となる。ここで用いた α, δ の値は DOS 全体の平均値であって必ずしも小田原付近のジオメトリを代表するものではないが, DOS が高角の断裂である限り, $\phi_0 \approx \phi \approx \phi'$ の関係は保たれる。WSB については, 石橋 (1988) の図から小田原付近で $\phi=15^\circ$ と読み取れるが, δ は不明である。Ishida (1992), Ishida and Kikuchi (1992) の震源分布断面図から $\alpha=10^\circ$, DOS の結果から $\phi=10^\circ$ とすれば, $\phi_0=15^\circ$, $\delta=64^\circ$, $\lambda=11^\circ$ を得る。なお, 図1では関東スラブの最大傾斜方向を ϕ 方向としているが, これを ϕ' 方向にとっても結果はほとんど変わらない。

以上の考察からわかるように, 伊豆ブロックと関東スラブの境界として WSB, DOS のどちらを採用しても, プレート相対運動の見地からは互いに大きな矛盾は生じない。言い替えば, 両者はひとつながりの断裂を異なる側面からみている可能性が高い。 ϕ_0 と ϕ を固定すれば $\tan \delta \propto \sin \alpha$ だから, スラブの沈み込み傾斜角 α が大きい北方ほど断裂の傾斜 δ がより高角となって当然である。それぞれの研究者が主な拠り所としたデータからみて, WSB と DOS は, それぞれ小田原付近とそれ以南, 小田原以北を代表するモデルと考えるのが妥当であろう。小田原付近に発生する E1 タイプの地震は, 石橋 (1988) が提唱したように, 横ずれが卓越し高角の逆断層成分をもつ地震となるだろう。断層面の傾斜角は, 少なくとも 60° 程度の高角と予測される。

われわれは, 伊豆ブロックに対する関東スラブの相対運動方向として $\phi_0=10^\circ \sim 15^\circ$ を得た。一方, フィリピン海プレート (PHS) の北米プレート, ユーラシアプレートに対する相対運動の方位は, Seno *et al.* (1993) のモデルによれば小田原付近で $35^\circ, 50^\circ$ となり, 上記の ϕ_0 はどちらと比較しても明らかに北寄りに偏している。従って, 伊豆ブロックは実際は陸のプレートに固定されているのではなく, 年間1cm 強 (対北米プレート) ないし2cm 強 (対ユーラシアプレート) で西方に運動していなければならない。従って, 想定東海地震の震源域が駿河湾の湾奥まで及ぶ (Ishiba-

図 2 神奈川県西部地震 E1 の準備期間に期待される地殻変動

shi, 1981) との主張は、プレート運動の見地からも根拠あるものと言ってよい。陸のプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動を単純に図式化すれば、伊豆半島北部周辺においては、その北向き成分は主として伊豆ブロックと関東スラブ

を境する断裂で、また、西向き成分は主として駿河トラフ北部で解消されているのではなかろうか。

石橋 (1988) は、西相模湾断裂面上の小田原直下付近に破壊強度の大きい部分が存在し、その中核的アスペリティの破壊が神奈川県西部地震をもたらすとした。この考えに従えば、地震の準備過程においては、関東スラブの沈み込み運動は小田原直下部分で阻止され、その周囲でのみ進行することになる。その結果、地表では図 2 のようなパターンの地殻変動が期待される。

関東スラブの引きずり込みによる陸のプレートの変位 (図の矢印) は、小田原付近で小さく、その北側では南北方向の伸びが、南側では縮みが生ずる。このため、地域的な歪場 (概ね北西-南東縮み) が乱され、北側では縮み成分の減少と縮み軸の反時計廻り回転が、南側では増大と時計廻り回転が期待される。図の円で囲んだ線分は、最大水平主歪 (縮み) の大きさとその軸の方位を概念的に示したものである。実際、最近数十年の地殻水平歪 (図 3) からは、神奈川県中部から西部にかけて最大縮み軸の回転がみられ、小田原付近で

図 3 神奈川県西部付近の地殻水平歪 (国土地理院, 1992a による) と、小田原直下に想定されるアスペリティ (西相模湾断裂を示す破線の実線部分)

は縮みがきわめて小さいことがわかる。海域の状況は不明であるが、地殻水平歪のパターンはアスペリティの存在を強く示唆している。

伊豆ブロック側においては、非地震性のすべりを考慮すれば、とくにアスペリティの南西側で関東スラブの押しによる地殻隆起が期待される。小田原市街地西部から熱海にかけて経年的な隆起が進行していること（国土地理院，1992b）はこの考えとよく調和する。E1 地震に先行してアスペリティ内にプレスリップが発生すれば、地殻水平歪，上下変動のパターンは逆転するであろう。

1990年8月には、小田原直下のスラブ内に M 5.1の地震が発生した。これが高ストレスドロップ地震（Ishida and Kikuchi, 1992）であるならば、関東スラブと伊豆ブロックが小田原直下付近で固着し、その周辺が現在高応力状態にあることを示している可能性がある。

石橋（1988）は、専ら過去の地震の震源域にもとづいて小田原直下付近を神奈川県西部地震の中核領域としたが、最近の諸観測結果はこの考えと整合している。今後の観測においては、想定されるアスペリティとその周辺の挙動に特段の注意を払う必要がある。

IV. 神奈川県西部地震の発生確率

Hagiwara (1974), Rikitake (1975) は、工業製品の品質管理等で用いられる Weibull 分布にもとづいて、地震の発生確率を統計的に予測することを試みた。この方法を用いて、過去の地震繰り返し間隔から神奈川県西部地震の発生確率を見積ることにする。方法の概要は以下の通りである。

地震の繰り返し間隔 τ の確率密度は、Weibull 分布：

$$f(\tau) = \alpha \beta \tau^{\beta-1} \exp(-\alpha \tau^{\beta}) \quad (4)$$

に従うものと仮定する。ここで、 α , β は正の定数で、 $\beta=1$ のときには $f(\tau)$ は指数分布となる。

(4) 式に従う τ の平均値，分散は

$$\left. \begin{aligned} E(\tau) &= \alpha^{-1/\beta} \Gamma(1+1/\beta), \\ V(\tau) &= \alpha^{-2/\beta} [\Gamma(1+2/\beta) - \{\Gamma(1+1/\beta)\}^2] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

で与えられる（例えば、鈴木，1987）。 $f(\tau)$ の

集積確率は

$$F(\tau) = \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau = 1 - \exp(-\alpha \tau^{\beta}) \quad (6)$$

である。また、時刻 t までに地震が発生しなかったという条件の下で $t \sim t + \Delta t$ の間に地震が発生する条件付き確率は

$$p(t) = \{F(t + \Delta t) - F(t)\} / \{1 - F(t)\} \quad (7)$$

で与えられ、 Δt が十分小さいときには $p(t)/\Delta t$ は「瞬間故障率」

$$R(t) = f(t) / \{1 - F(t)\} \quad (8)$$

に漸近する。

従って、実際の地震の発生間隔からその平均値と分散を求めれば、(5) 式から α と β が定まり、これを用いて (6), (7) 式から任意の時刻における $F(t)$, $p(t)$ を計算することができる。 $F(t)$ は過去直近の地震から計ってある時間 t 以内に地震が発生する集積確率、 $p(t)$ は t までに地震が起これば引き続く Δt 以内に地震が発生する条件付き確率である。以下では、 $\Delta t = 1$ 年として、 $p(t)$ を地震発生「1年確率」と呼ぶことにする。

石橋（1985）は、神奈川県西部地震の系列に属する過去の地震として、西暦1633.2年，1704.0年，1782.6年，1853.2年，1923.7年の5地震をリストアップしている（図4a参照）。このデータから、地震発生間隔の平均値は $E(\tau) = 72.6$ 年，分散は $V(\tau) = 15.9$ 年² となり、Weibull 分布のパラメーターとして $\ln \alpha = -98.3$, $\beta = 22.8$ が得られる。これらの値を用いて計算した $F(t)$ および $p(t)$ の経時変化を図5に示す。

図から読み取れるように、1993年初頭現在で、神奈川県西部地震発生の集積確率 $F(t)$ は18%，1年確率 $p(t)$ は6%である。今世紀末には、これらの値は、それぞれ83%，42%に達する。また、両確率とも今後10年の間に急速に上昇し、1996年中には集積確率が50%を超えることがわかる。

小田原付近以外にも、ほぼ周期的に地震が繰り返す事例が報告されている。Bakun and McEvilly (1984) は、米国カリフォルニア州中部の Parkfield で M6 級の地震が約20年間隔で起きて

図 4 準周期的に発生する地震系列
(a) 小田原付近
(b) カリフォルニア州 Parkfield
(c) ハワイ島 Kaoiki

図 6 地震発生の 1 年確率 $p(t)$ と集積確率 $F(t)$ の経年変化
(a) Parkfield 地震系列
(b) Kaoiki 地震系列

いるとして、1857年から1966年までの6個の地震を示した(図4b)。また、Wyss (1986) は、ハワイの Kaoiki 地域で、 $M6$ 級の地震が1930年以来約10年間隔で規則的に繰り返して発生していることを見出した(図4c)。直近の地震は1983年の $M6.6$ である。

これら2つの事例について、神奈川県西部地震と同様の方法で次の地震発生の集積確率と1年確率を計算し、その結果を図6に示す。Bakun and McEvilly (1984) は次の Parkfield 地震が 1988.0 ± 4.3 年の間に起きるものと予測したが、1993年3月末現在まだ発生していない。昨年10月16日にはここに $M4.7$ の地震が発生し、あらかじめ定められていた判断基準に従って、今後3日以内に $M6$ 級の地震が起きる確率37%との公式の警報が発せられた(Finn, 1992)。実際には地震は発生しなかったが、図6から、Weibull モデルによる集積確率はその時点で70%強に達していたことがわかる。

小田原地震の場合には、地震発生の確率レベルはより低く、1993年現在、集積確率で Parkfield

図 5 神奈川県西部地震の発生 1 年確率 $p(t)$ と集積確率 $F(t)$ の経年変化

の4分の1, 1年確率で3分の1程度である。しかし, 上で述べたように, 今後十数年のうちに発生確率が急速に上昇することに注意しなければならない。

地震発生時期の予測は, 地震先行現象の捕捉によって確率論のレベルから半決定論のレベルに進むことができる。世界中の地震先行現象事例にもとづく経験則(力武, 1986)によれば, $M7$ の地震に対してはその4~5年前から第1種地震先行現象が現われることになる。神奈川県西部地震に関しては, 前章で検討したように, 監視を集中すべき場所はほぼ明らかになっている。この地震の予知に向けて, 観測体制の早急な強化が望まれる。

V. おわりに

本論の冒頭で明らかにしたように, 来るべき神奈川県西部地震はプレートの相対運動を担う基本的な地震である。そのような基本的地震は, $E1$, $E2$ の2つに絞られる。第1の地震は, 伊豆ブロックと関東スラブの境界をなすフィリピン海プレート内の断層面上に発生するもので, 傾斜角 60° 程度の高角西傾斜断層に沿う, 逆断層成分をもち左横ずれ成分が卓越した断層破断様式を示すものと予測される。第2は, 関東スラブ上面と陸のプレートの境界を破壊する低角逆断層型の地震で, その震源域は酒匂川流域~小田原の間と想定される。

第1の地震を引き起こすプレート内断層については「西相模湾断層」, 「道志~小田原サイスミック・ゾーン」のふたつの考えが出されているが, 両者は同じ南北性断層の中・南部, 北部をそれぞれ代表するモデルである可能性が高い。両者の位置は小田原付近で数 km 東西に隔たっているが, むしろ, 異なるデータから推定された断層がこれほどよい一致を示すのは驚くべきことである。その真の位置については, さまざまな手法による今後の地下構造探査に期待したい。一方, 最近数十年の地殻変動のパターンは, 石橋(1988)が想定した小田原直下の中核的アスペリティの存在を裏づけるようにみえる。

ここで, 第1の地震と第2の地震は相補的では

ないことに注意する必要がある。非地震的すべりが卓越する特殊な場を考えない限り, 関東スラブの相対運動は, その上面と西側面の両方で地震によっていずれ解消されなければならない。沈み込むスラブが平衡を回復するために, 一方の地震が他方をトリガーする可能性も考慮に含めておくべきであろう。ただ, 第2の神奈川県西部地震候補 $E2$ については, 過去の発生履歴, 繰り返し間隔など未分明のことが多い。

本論の後半では, 第1の地震候補を念頭におきつつ, Weibull 分布にもとづいて地震発生確率の時間的推移を推定した。現在の確率レベルは集積確率で18%, 1年確率で6%程度であるが, これらの確率は今後10年間に急上昇する。神奈川県西部地震の予知を目指して, 早急に観測体制の整備をはかるべきときである。小田原直下に想定されるアスペリティとその周囲の挙動には, 特別に強力な監視を集中する必要がある。

文 献

- Bakun, W. H. and McEvilly, T. V. (1984): Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **89**, 3051-3058.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. and Stein, S. (1990): Current plate motions. *Geophys. J. Inter.*, **101**, 425-478.
- Finn, R. (1992): Rumblyings grow about Parkfield in wake of first earthquake prediction. *Nature*, **359**, p. 761.
- Hagiwara, Y. (1974): Probability of earthquake occurrence as obtained from Weibull distribution analysis of crustal strain. *Tectonophysics*, **23**, 313-318.
- 石橋克彦(1977): 「西相模湾地震」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.
- Ishibashi, K. (1981): Specification of soon-to-occur seismic faulting in the Tokai District, central Japan, based upon seismotectonics. Simpson, D. W. and Richards, P. G. ed.: *Maurice Ewing Series* 4. American Geophys. Union, 297-332.
- Ishibashi, K. (1985): Possibility of a large earthquake near Odawara, central Japan, preceding the Tokai earthquake. *Earthq. Predict. Res.*, **3**, 319-344.
- 石橋克彦(1985): 小田原付近の大地震発生の可能性。月刊地球, **7**, 420-426.
- 石橋克彦(1988): “神奈川県西部地震”と地震予知 I,

- II. 科学, **58**, 537-547, 771-780.
- Ishida, M. (1992): Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan. *J. Geophys. Res.*, **97**, 489-513.
- Ishida, M. and Kikuchi, M. (1992): A possible foreshock of a future large earthquake near Odawara, Central Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1695-1698.
- 地震予知総合研究振興会 (1992): 「地震テクトニクスのモデル化及び M7 級内陸地震の予知手法に関する研究成果報告書」平成 4 年 3 月. 359p.
- 国土地理院 (1992a): 関東地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **47**, 121-143.
- 国土地理院 (1992b): 関東地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **48**, 125-161.
- 松田時彦 (1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について. 地震 2, **28**, 269-283.
- Matsu'ura M., Iwasaki, T., Suzuki, Y. and Sato, R. (1980): Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake. *J. Phys. Earth*, **28**, 119-143.
- 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. 東京大学地震研究所彙報, **56**, 691-711.
- 岡田義光 (1993): 「神奈川県西部地震」の諸モデルと期待される地殻変動. 地学雑誌, **102**, 445-456.
- Rikitake, T. (1975): Statistics of ultimate strain of the earth's crust and probability of earthquake occurrence. *Tectonophysics*, **26**, 1-21.
- Rikitake, T. (1982): Do foreshock epicenters move toward the main shock epicenter? *Earthq. Predict. Res.*, **1**, 95-144.
- 力武常次 (1986): 地震前兆現象 予知のためのデータ・ベース. 東京大学出版会, 232p.
- Seno, T., Stein, S. and Gripp, A. E. (1993): A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *J. Geophys. Res.*, (in press).
- 鈴木雪夫 (1987): 新数学講座 11 統計学. 朝倉書店, 248p.
- Wyss, M. (1986): Regular intervals between Hawaiian earthquakes: Implications for predicting the next event. *Science*, **234**, 726-728.
- 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.
- 吉田明夫 (1990): 神奈川県西部の地震活動とその地学的意味. 地震 2, **43**, 205-212.
(1993年 2 月 15 日受付, 1993年 4 月 22 日受理)