

巨大地震発生域周辺の地震活動に見られる 静穏期から活動期への移り変わり

堀 高 峰*

Transition from Quiet to Active Period of Seismicity Around Source Regions of Great Interplate Earthquakes

Takane HORI *

Abstract

We introduce a criterion for an active period of seismicity around the source region of a great interplate earthquake. It is based on stress change caused by the great earthquake. We test this criterion by applying it to the seismicity in southwest Japan before and after the 1944 Tonankai and 1946 Nankai earthquakes. We then apply it to more recent seismicity in southwest Japan and in the San Francisco Bay area. The results show that the seismicity in southwest Japan is now in transition from a quiet to active period and that the San Francisco Bay area is still in a quiet period. In other words, the probability of large earthquakes in southwest Japan is higher than it was in the preceding quiet period. Although the seismicity in the San Francisco Bay area was active in the 1980's, the probability of a large earthquake occurring is low.

Key words: stress shadow, stress change, seismic cycle, quiet period, active period, Southwest Japan, Nankai trough, San Francisco Bay, San Andreas fault

キーワード: ストレスシャドウ, 応力場変化, 静穏期, 活動期, 地震サイクル, 西南日本, 南海トラフ, サンフランシスコ湾, サンアンドレアス断層

I. はじめに

南海トラフ沿いやサンアンドレアス断層沿いのようにプレート境界巨大地震がくり返し発生する地域では, その地震の発生後から次の地震の発生前までの1サイクル中に, 周辺の地震活動度が低い静穏期から地震活動の活発な活動期へと変化していくことが以前から指摘されてきた(図1: Ellsworth *et al.*, 1981; Mogi, 1981)。実際西南日本では, その付近でくり返し発生する巨大地震

である南海地震の前数十年から後十年程度の間は, 地震活動が活発な活動期であり, それ以外の期間は非常に地震活動度の低い静穏期であることが知られている(図2)(宇津, 1974; Hori and Oike, 1996など)。つまり, 南海地震後10年程度経つと西南日本は地震活動が静穏化し, その後次の南海地震の数十年前になると活動期に入るといえる。またサンアンドレアス断層沿いのサンフランシスコ湾地域では, 1906年サンフランシスコ地震を境に地震発生頻度が大きく異なることが知られて

* 海洋科学技術センター 固体地球統合フロンティア研究システム

* Institute for Frontier Research on Earth Evolution, Japan Marine Science and Technology Center

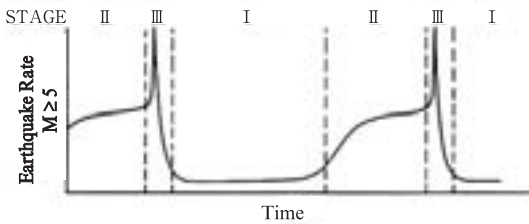


図 1 大地震サイクルにおける周辺での地震発生頻度変化の模式図 (Ellsworth *et al.*, 1981).
 : 静穏期, : 活動期, : 巨大地震やその前震および余震の発生時期.

Fig. 1 Schematic behavior of earthquake rate of the seismic cycle (after Ellsworth *et al.*, 1981).
 : quiet periods, : active periods and : periods of main shocks, foreshocks and aftershocks.

いる (Ellsworth *et al.*, 1981 など)。この大地震の前 75 年間には、マグニチュード (以下では M と書く) 6 以上の地震が少なくとも 14 回発生しているのに対し、後 75 年間にはわずか 1 回しか発生しておらず (図 3: Stein, 1999), 西南日本と同じように巨大地震の前に活動期、後に静穏期を示している。ただしサンフランシスコ湾地域の場合、日本に比べて歴史資料が限られているため、サンフランシスコ大地震のくり返しやそれに伴う地震活動度変化などを調べることは困難である。

ここ数年、西南日本では $M6 \sim 7$ の地震がいくつか発生しており、この地域が活動期に入った可能性が指摘されている (尾池, 1995)。1995 年兵庫県南部地震 ($M7.3$) 以来このような指摘がなされてきたが、2000 年鳥取県西部地震 ($M7.3$) と 2001 年芸予地震 ($M6.4$) が発生したことで、活発化は進んでいるようにも見える。またサンフランシスコ湾地域では、1950 年代から $M5$ クラスの地震の発生頻度が高まり、Ellsworth *et al.* (1981) はこの地域が活動期に入った可能性を指摘していた。そして、1980 年代に入ると $M6$ クラスの地震が発生し、1989 年にはロマプリアタ地震 ($M6.9$) が発生した。以上のような地震活動が、これら 2 つの地域が活動期に入ったことを示すのであれば、過去のデータから考えて、 $M7$ あるい

は 6 クラス以上の地震発生確率がこれまでの数十年間に比べて数倍以上になることが予想され、被害を引き起こす地震の発生頻度も高くなると考えられる。

そこで本研究では、ある時期の地震活動が、静穏期にあるのか、活動期に入ったことを示しているのかを判断する基準を設け、その基準を現在の西南日本およびサンフランシスコ湾地域に適用することで、両地域が活動期に入っているかどうかを調べる。

II. 静穏期と活動期とを区別する基準

もともと静穏期や活動期という言葉は、地震発生頻度が高いかどうかに基づいて定性的に用いられてきた。しかしながら、大地震後に周辺の地震活動が静穏化し、その後活発化するメカニズムは後で述べるようにすでに明らかになっているので、そのメカニズムに基づいて静穏期と活動期とを区別する基準を設ける。

巨大地震発生後の周辺の地震活動に、静穏期から活動期へという地震活動度の変化が見られるのは、以下のようなメカニズムによると考えられている (Shimazaki, 1976; Simpson and Reasenberg, 1994; Hori and Oike, 1999)。巨大地震が発生すると、その周辺では応力場の変化が生じる。この応力変化によって、周辺に存在する断層では、その断層で地震が生じる場合のすべりの向きの剪断応力が増加したり減少したりする。増加する場合は地震が発生し易くなる。余震や誘発地震はそのような断層で発生すると考えられる (地震の起こり易さの変化は、法線応力変化の影響も考慮した CFF で議論されることが最近が多い (Harris, 1998) が、ここで扱う地域では法線応力の影響は小さい (Reasenberg and Simpson, 1992; Hori and Oike, 1999) ので、以下では剪断応力のみで議論する)。一方、大地震によって周辺の断層で剪断応力が減少する場合は、それらの断層が stress shadow に入るといい (Harris and Simpson, 1996), その断層に働くテクトニックな応力の蓄積等によって減少分が回復するまでは、少なくともその断層を震源断層とするよ

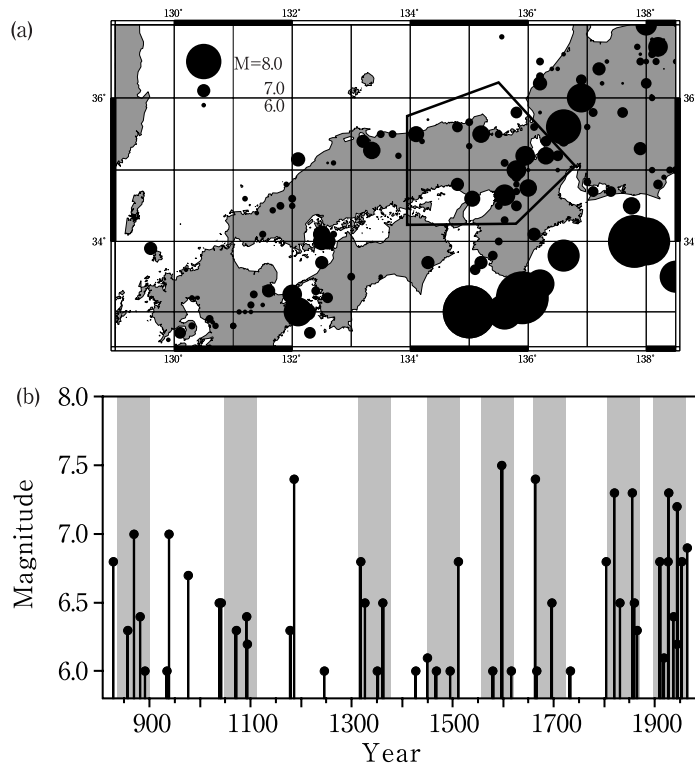


図 2 (a) 868 年から 2000 年における西南日本での被害地震の震央分布．太線内のデータを (b) で用いた．
 (b) (a) で示した枠内で発生した被害地震の時系列 (Hori and Oike, 1996)．グレーの範囲は、南海トラフ沿いの地震の発生前 50 年から発生效后 10 年までを示している．

Fig. 2 (a) Epicenter distribution of disastrous earthquakes from 868 to 2000 in Southwest Japan. The data in a polygon are used in (b).
 (b) Time Series of disastrous earthquakes in the polygon in (a) (Hori and Oike, 1996). Shaded periods indicate 50 years before to 10 years after the great interplate earthquakes along the Nankai trough.

うな地震は発生しないと考えられる(図4)。このようなことがある地域の主要な断層の多くに生じると、その地域は静穏期となる。そして応力の減少分が回復すると、それらの断層でも地震が発生し得るようになり、地震活動が活発になる。すなわち活動期に移り変わることになる。

以上のことから、巨大地震によって stress shadow に入っていた地域の断層で地震が発生するようになれば、その地域が活動期に入ったと判

断する。ただし、テクトニック応力の蓄積率が周辺に比べて非常に高い断層で地震が発生した場合(例えば、Hori and Kaneda, 2001)には、その地域全体としてはまだ静穏期にあると判断することになる。また、ある程度規模の大きい地震が複数発生したとしても、それらが巨大地震によって地震が起こり易くなる断層で発生したものであれば(つまり stress shadow の外であれば)、静穏期はまだ続いていると判断することになる。つま

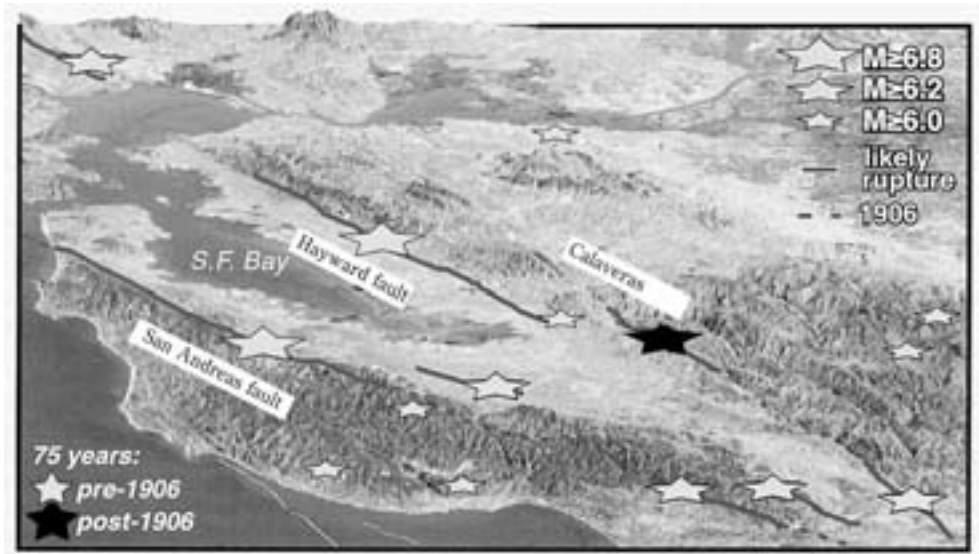


図 3 1906 年サンフランシスコ地震前後各 75 年間にサンフランシスコ湾地域に発生した $M6$ 以上の地震の震央分布 (Stain, 1999 を一部改変)。
白抜き星印が地震前、黒の星印が地震後を示す。

Fig. 3 Epicentral distribution of earthquakes whose M is 6 and above in the San Francisco Bay area 75 years before and after the 1906 San Francisco earthquake (modified from Stain, 1999).
White and Black stars indicate before and after the San Francisco earthquake, respectively.

り、従来のように地震発生頻度を基準にして活動期に入ったと判断される場合の中には、活動期の生じる物理的なメカニズムとは無関係に、偶発的に地震活動度が高まった場合が含まれる可能性があるが、その場合を取り除くことができる。以下では、最近の地震活動に上記の判断基準を適用する前に、1944 年東南海・1946 年南海地震前後の西南日本の地震活動に対して適用した場合に、その静穏期と活動期がどのように区別されるのかを確認する。

III . 東南海・南海地震前後における地震活動度の評価

ここでは、内陸地震にターゲットを絞りを、糸魚川 静岡構造線以西、中央構造線以北である西南日本内帯の地震に着目する。その地震活動度を代表するものとして、1885 年以降の $M7$ 以上の地震を取り上げる。こうすることで、古い地震でも震

源断層が地表に達している場合、地表断層との対応付けで地震のメカニズムを推定することができ、上記の剪断応力成分の計算が可能となる。南海地震を含む各地震のメカニズムは Hori and Oike (1999) を参照した。ここで、1944 年東南海地震以前に発生した地震の評価をするためには、1854 年東海・南海地震による応力変化を調べる必要があることに注意する。応力変化の値は、南海地震を 3 次元半無限均質弾性体中のディスロケーションで表わし、それに伴う内帯の各断層面上での歪み変化の平均値から推定した (Okada, 1992)。

表 1 に結果を示す。対象となる地震の数は非常に限られるが、1891 年濃尾地震を除けば、その後から 1944 年東南海地震以前に発生した地震はすべて、1854 年東海・南海地震の stress shadow に入っていた断層で発生していたことがわかる。また逆に、1946 年南海地震以後 20 年間に発生した地震は、1944 年東南海・1946 年南海地震によっ

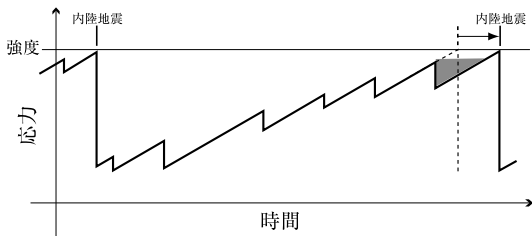


図 4 大地震震源域の周辺の断層での応力変化の模式図(南海トラフの地震によって剪断応力が減少する場合 .Shimazaki, 1978 を一部変更)。
 応力が強度に達すれば、この断層で地震が発生する。強度に近付いたところで南海地震が発生したことで、点線で示した時点で起こるべき地震の発生が遅れる様子を示している。この際、南海地震後に減少した応力が回復するまでの期間(図の灰色の部分)には少なくとも地震が起こらない。

Fig. 4 Schematic diagram of stress change on a fault around a source region of great earthquakes (a case that shear stress is decreased by Nankai earthquakes, modified from Shimazaki, 1978).
 An earthquake occurs on the fault when the stress reaches its strength. In this figure, the stress is decreased by a Nankai earthquake just before the stress reaches the strength and so the occurrence of an earthquake is delayed as shown by an arrow. No earthquake can occur until the decreased stress is recovered (the shaded portion indicates that stress is not recovered).

で地震が起こり易くなる断層で発生している。そして、この後 1995 年に至るまで $M7$ クラスの地震は発生していない。

以上のことから、1891 年濃尾地震の発生は西南日本内帯の活動期の開始を示すものではないが、少なくとも 1927 年には西南日本内帯は活動期に入っていたと考えられる。また、1946 年以降少なくとも 1995 年までは静穏期であったといえる。

IV . 最近の地震活動度の評価

1) 西南日本内帯

ここでは 1995 年兵庫県南部地震以降現在まで

表 1 1944 年東南海・1946 年南海地震の前後に西南日本内帯に発生した $M7$ 以上の地震のリスト。
 南海トラフ沿いの地震との前後関係(濃尾地震については、1854 年東海・南海地震後の年数を () 内に示した)、および各断層面における南海トラフ沿いの地震による応力変化の符号。

Table 1 List of earthquakes, whose M is 7 and above, that occurred before and after the 1944 Tonankai and 1946 Nankai earthquakes.
 It is also shown that how many years before or after the Nankai trough earthquakes they occurred. We show in () that the 1891 Nobi earthquake occurred how many years after the 1854 Tokai and Nankai earthquakes. The last column shows the sign of stress changes on each fault caused by the Nankai trough earthquakes.

発生年	地震名	前後関係 [年]	応力変化
1891 年	濃尾地震	- 53 (+ 37)	+
1927 年	北丹後地震	- 17	-
1943 年	鳥取地震	- 1	-
1948 年	福井地震	+ 2	+
1961 年	北美濃地震	+ 15	+

の地震活動度を評価する。 $M7$ クラスの地震としては、この地震以外に 2000 年鳥取県西部地震がこの地域で発生している。ここで採用した上記 2 つの内陸地震の震源メカニズムは表 2 の通り。
 1944 年東南海・1946 年南海地震の震源断層モデルとしては、地殻変動データを用いた最新の成果である Sagiya and Thatcher (1999) を採用した。

表 2 に示したように、stress shadow に入っている断層とそうでない断層とで起こっていたことがわかる。stress shadow に入っていた 1995 年兵庫県南部地震の断層については、東南海・南海地震の震源モデルとして Hori and Oike (1999) で用いたモデルを採用すると、stress shadow に入るかどうかが変わってしまう。これは、この断層が応力変化の符号が変化するあたりに位置しているためであり、確かに活動期に入ったと判断するのは難しい。また 2000 年鳥取県西部地震については、モデルに依存することなく東南海・南海

表 2 西南日本内帯で最近発生した地震のメカニズムと南海トラフ沿いの地震による応力変化。

Table 2 Focal mechanisms of recent earthquakes in the Inner Zone of Southwest Japan and stress changes caused by the Nankai trough earthquakes.

地震名	strike	dip	rake	M_{jms}	応力変化
M7 クラス					
1995 年兵庫県南部地震*	233	86	167	7.3	-
2000 年鳥取県西部地震*	152	88	- 3	7.3	+
M5 クラス					
2001 年兵庫県北部地震†	90	89	172	5.4	-
2001 年京都府南部地震†	331	26	29	5.3	-

* EIC 地震学ノート, † 防災科学技術研究所 Freesia Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果。

地震によって応力が増加する断層で起こっている。つまりこの断層では、東南海・南海地震によって地震が起こり難い状態にはなっておらず、ここで定義した静穏期・活動期とは関係がない。以上のことから、兵庫県南部地震の発生が活動期に入ったことを示すかどうかは明確ではなく、鳥取県西部地震の発生後もその状況は変わっていない。この他に、内陸ではなく沈み込むフィリピン海プレート内で 2001 年に芸予地震 ($M6.7$) が発生しているが、この地震も鳥取県西部地震と同様に東南海・南海地震によって応力が増加する断層で起こったものであり、ここでの議論には影響しない。

ただし、2001 年に入ってから同地域では $M5$ クラスの地震が大地震の余震以外に 2 つ発生しており (表 2)、これらの震源メカニズムを用いて同様に応力変化を計算すると、いずれも stress shadow に入っていたことがわかる。しかも、これらの結果は東南海・南海地震のモデルには依存しない。このことは stress shadow から抜け出す断層が徐々に増えつつあることを示しており、西南日本が活動期へ移行しつつあると考えられる。

2) サンフランシスコ湾地域

ここでは、1980 年代以降のこの地域における $M6$ 以上の地震活動を評価する。はじめに述べたように、1906 年サンフランシスコ地震から 1970 年代までは、 $M6$ クラスの地震はわずか 1 回しか発生していない。それに比べて表 3 に示したように、

1980 年代には 2 回の $M6$ クラスの地震が発生しており、それに先立つ 1950 年代からの $M5$ クラスの地震活動度の上昇を合わせて考えると、この地域がすでに次のサンフランシスコ地震に向けた活動期に入っている可能性が十分考えられる。

$M6$ クラスの 2 つの地震の震源断層パラメータは表 3 に示した通りである。1906 年サンフランシスコ地震の断層モデルとして Thatcher *et al.* (1997) を用いて、2 つの地震の震源断層上での応力変化を計算したところ、表 3 に示したような結果が得られた。これによれば、1984 年モーガンヒル地震は 1906 年サンフランシスコ地震の stress shadow に入っている。しかしながら Hori and Kaneda (2001) が示したように、この断層ではテクトニック応力の蓄積率が非常に高く、すでに 1911 年に stress shadow から抜け出して $M6$ クラスの地震が発生しており、1984 年の地震は同じ断層セグメントでの地震の再来と考えられる。従ってこの地震の発生は、サンフランシスコ湾地域が活動期に入ったことを示すものではないといえる。一方、1989 年ロマプリエタ地震は stress shadow の外で起こったものであり、活動期とは関係がない。以上のことから、サンフランシスコ湾地域では 70 年間以上の静穏期を経て 1980 年代に $M6$ クラスの地震が立て続けに発生したが、これはこの地域が活動期に入ったことを示すものではなく、1906 年以来の静穏期は現在も続いてい

表 3 サンフランシスコ湾地域で最近発生した地震のメカニズムと
1906 年サンフランシスコ地震による応力変化。

Table 3 Focal mechanisms of recent earthquakes in the San
Francisco Bay area and stress changes caused by the
1906 San Francisco earthquake.

地震名	strike	dip	rake	M_w	応力変化
1984 年モーガンヒル地震*	330	80	190	6.2	-
1989 年ロマプリエタ地震†	132.4	75.8	138.5	6.9	+

*Oppenheimer *et al*(1990), †Arnadottir and Segal(1994)

ると考えられる。このことは、1990 年代に入ってからこの地域で目立った地震活動がないことも調和的である。

V. ま と め

プレート境界大地震の周辺における地震活動度が、その地震サイクルに伴って静穏期から活動期に移り変わる現象については、これまで地震発生頻度に基づいて議論されてきただけであった。本研究では、活動期への移り変わりは、大地震によって stress shadow に入っていた断層で地震が発生しはじめることで判断できると考えた。この基準を 1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の前後数十年間に西南日本内帯で発生した $M7$ クラスの地震に適用すると、1891 年濃尾地震は活動期の始まりを示すものではないが、少なくとも 1927 年以降には活動期に入っており、南海地震後の静穏期は少なくとも 1995 年兵庫県南部地震より前まで続いていたと考えられる。同じ基準を最近の地震に適用すると、西南日本では $M7$ クラスで見ることが活動期に入ったという確証は得られない。しかし 2001 年になって発生した $M5$ クラスの地震は、この地域が活動期に入りつつあることを示唆している。一方 1980 年代以降のサンフランシスコ湾地域の地震にこの基準を適用すると、1984 年と 1989 年に起こった $M6$ クラスの地震はいずれも活動期に入ったことを示すものではなく、現在も 1906 年サンフランシスコ地震以来の静穏期が続いていると考えられる。

以上のことから、西南日本については、今後本格的に活動期に入り、 $M6$ あるいは 7 クラスの地

震の発生危険度が高くなる可能性がある。サンフランシスコ湾地域については、1980 年代の地震活動の活発化に基づいて、今後活動期が続くと考えて $M6$ クラス以上の地震の発生危険度を予測すべきではない。いずれにしても、今後発生する地震に対して順次今回の基準を適用して、活動期に入ったかどうかを調べ、その結果に基づいてその後の発生危険度を検討する必要がある。

謝 辞

本研究は、西南日本については京都大学大学院理学研究科の尾池和夫博士、サンフランシスコ地域については海洋科学技術センター固体地球統合フロンティア研究システムの金田義行博士と共同で研究してきたことを基礎としています。要旨の英語は、海洋科学技術センター固体地球統合フロンティア研究システムの Dr. P. R. Cummins に添削して頂きました。また 2 名の査読者から本稿を改善するための有益なコメントを頂きました。記して感謝致します。

文 献

- Arnadottir, T. and Segall, P. (1994) The 1989 Loma Prieta earthquake imaged from inversion of geodetic data. *J. Geophys. Res.*, **99**, 21835–21855.
- Ellsworth, W.L., Lindh, A.G., Prescott, W.H. and Herd, D.G. (1981) The 1906 San Francisco earthquake and the seismic cycle. In Simpson, D.W. and Richards, P.G. eds.: *Earthquake Prediction: An International Review*. AGU, 126–140.
- Harris, R.A. (1998) Introduction to special session: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24347–24358.
- Harris, R.A. and Simpson, R.W. (1996) In the shadow of 1857 The effect of the great Ft. Tejon

- earthquake on subsequent earthquakes in southern California. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 229 232.
- Hori, T. and Kaneda, Y. (2001) A simple explanation for the occurrence of the 1911 Morgan Hill earthquake in the stress shadow of the 1906 San Francisco earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2261 2264.
- Hori, T. and Oike, K. (1996) A statistical model of temporal variation of seismicity in the Inner Zone of Southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai trough. *J. Phys. Earth*, **44**, 349 356.
- Hori, T. and Oike, K. (1999) A physical mechanism for temporal variation in seismicity in Southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai trough. *Tectonophysics*, **308**, 83 98.
- Mogi, K. (1981) Seismicity in western Japan and long-term earthquake forecasting. In Simpson, D.W. and Richards, P.G. eds.: *Earthquake Prediction: An International Review*. AGU, 43 51.
- 尾池和夫 (1995) 活動期に入った地震列島 (岩波科学ライブラリー 33). 岩波書店 .
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **82**, 1018 1040.
- Oppenheimer, D.H., Bakun, W.H. and Lindh, A.G. (1990) Slip partitioning of the Calaveras fault, California, and prospects for future earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **95**, 8483 8498.
- Reasenber, P.A. and Simpson, R.W. (1992) Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, **255**, 1687 1690.
- Sagiya, T. and Thatcher, W. (1999) Coseismic slip resolution along a plate boundary megathrust: The Nankai Trough, southwest Japan. *J. Geophys. Res.*, **104**, 1111 1129.
- Shimazaki, K. (1976) Intra-plate seismicity and inter-plate earthquakes: Historical activity in Southwest Japan. *Tectonophysics*, **33**, 33 42.
- Shimazaki, K. (1978) Correlation between intra-plate seismicity and interplate earthquakes in Tohoku, northeast Japan. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **68**, 181 192.
- Simpson, R.W. and Reasenber, P.A. (1994) Earthquake-induced static stress changes on central California faults. In Simpson, R.W. ed.: *The Loma Prieta, California Earthquake of October 17, 1989-Tectonic Processes and Models*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1550 F, F55 F89.
- Stein, R.S. (1999) The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, **402**, 605 609.
- Thatcher, W., Marshall, G. and Lisowski, M. (1997) Resolution of fault slip along the 470-km-long rupture of the great 1906 earthquake and its implications. *J. Geophys. Res.*, **102**, 5353 5367.
- 宇津徳治 (1974) 南海トラフ沿いの大地震と西日本の破壊的地震の関係 . 地震予知連絡会会報 , **12** , 120 122 .

(2001年12月5日受付, 2002年3月8日受理)