

南海トラフで発生する地震による四国南部沿岸での津波継続特性

Tsunami Duration on the South Coast of Shikoku from Large Earthquakes along the Nankai Trough

今井健太郎¹・佐竹健治²・古村孝志³

Kentaro IMAI, Kenji SATAKE and Takashi FURUMURA

Sea level fluctuation over 12 hours was recorded on tide gauge in Tosashimizu Bay at the time of the 1944 Showa Tonankai Earthquake tsunami. To clarify the characteristics of tsunami duration on the south coast of Shikoku from Nankai trough earthquakes (which consists of four segments: Tokai, Tonankai, and two Nankai segments), numerical tsunami simulations were carried out. The results showed that two phenomena are responsible for the long duration: shelf seiche of Tosa Bay and edge wave repeatedly propagating between Kitanada Bay and Cape Muroto. Tsunami from Tokai segment generates shelf seiche only, while tsunami from Tonankai and Nankai segments generate both shelf seiche and edge wave.

1. はじめに

南海トラフではM8クラスの巨大地震が90～150年程度の間隔で繰り返し発生し、地震動や津波による大きな被害をもたらしてきた。1707年宝永地震の際には、高知県沿岸部は震度6を超える強震動による震害が発生し、その後に8mにおよぶ津波が来襲したことにより、2770人もの死者・行方不明者数となった(宇佐美, 2003)。このような、強震動と大津波による被害は、1854年安政東海・南海地震, 1944年昭和東南海地震, 1946年昭和東海地震においても高知沿岸部で繰り返し起きている。

高知県南西部の土佐清水港の検潮所では、1944年の昭和東南海津波の際、振幅0.3mを越える津波が12時間以上に渡って長く継続し、最大波が地震発生から4時間後に生じた。1946年昭和南海地震の際には、津波の来襲によって記録が振り切れたため津波到達直後の記録はないものの、やはり12時間以上に渡り長く継続する津波が記録されていた。このように、地震によらず、津波が長く続く原因として、土佐湾周辺における海底地形の影響が強く示唆される。土佐清水沖の土佐湾は円弧状の海岸形状を有し、大陸棚、大陸斜面による特徴的な海底地形と相まって、ひとたび津波が入射すると長時間に渡って湾内に津波が閉じ込められることが考えられる。

今後30年以内の南海トラフの地震の発生確率には50～70%という高い数値が見積もられている(地震調査研究推進本部, 2009)。巨大地震の発生により、高知県沿岸部では震害により県内外との陸上交通が寸断される可

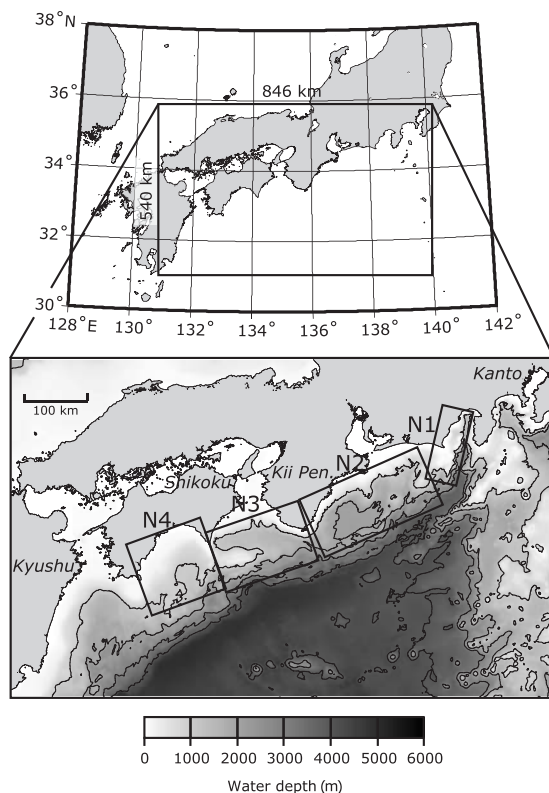


図-1 計算領域と計算領域と南海トラフ沿いで発生する地震の各震源モデルの位置

表-1 各震源モデルの断層パラメータ

Seg. No.	Fault location Lat. (N) Lon. (E)	L (km)	W (km)	D (km)	Strike Dip Rake	Slip (m)
N1	35.120° 138.706°	120	50	6.4	193° 20° 71°	1.0
N2	33.823° 138.235°	205	100	4.1	246° 10° 113°	1.0
N3	33.006° 136.074°	155	100	7.8	251° 12° 113°	1.0
N4	32.614° 134.481°	125	120	10.1	250° 8° 113°	1.0

- 1 正会員 博士(工学) 東京大学特任研究員大学院情報学環 / 地震研究所
2 理学博士 東京大学教授地震研究所
3 博士(理学) 東京大学教授大学院情報学環 / 地震研究所

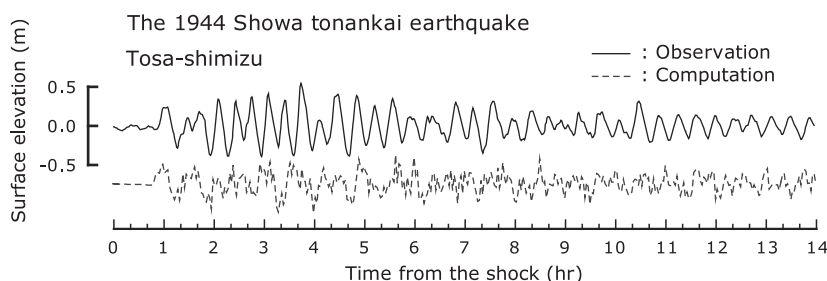


図-2 昭和東南海地震での土佐清水港における津波観測波形とN2モデルからの計算波形

能性があり、救援経路として海路の安全確保は重要な課題である。海路が支障なく運行可能となる時刻の目安を示すためには四国南部沿岸における津波の継続特性を明らかにする必要がある。このことは津波防災・減災に留まらず、救援・復旧活動に関しても重要な課題の一つといえる。

本研究は南海トラフ沿いで発生する地震による津波の数値解析を行い、四国南部沿岸における津波の継続特性とその減衰過程についての詳細な検討を目的としている。

2. 津波数値解析法

津波の数値解析は線形長波理論に基づき、後藤・小川(1982)の staggered leap frog 法により計算を行った。計算領域は相模灘から日向灘を含む、北緯約31度から36度、東経約131度から140度とした。

南海トラフ沿いで発生する地震モデルは東海 (N1)、東南海 (N2)、南海 (N3, N4) の4枚のセグメントから構成される安中ら (2003) の断層モデルを用いた (図-1)。断層パラメータを表-1に示す。過去の南海トラフ沿いで発生した巨大地震の各断層セグメントN1~N4の滑り量は地震によって異なるが、地殻変動・津波伝播ともに線形計算による個々の津波の重ね合わせの原理が適用できることから、本研究では単位滑り量 (1.0m) に対する地殻変動と津波伝播を計算から求め、個々の必要な滑り量に対するこれらの量は、後で補正した。津波の初期波源については、Mansinha・Smylie (1971) の方法により表-1の断層パラメータを用いて計算した地殻変動分布を用いた。津波伝播の数値計算における空間格子間隔は270m、時間間隔は0.5秒、継続時間は12時間、打ち切り水深は10mとした。

3. 1944年昭和東南海地震による土佐清水港の津波観測波形

1944年東南海地震における土佐清水港の津波観測波形と数値解析による波形の比較を行った。震源域は図-1のN2のみとし、断層の滑り量は安中ら (2003) の研究に基づき4.25mとした。また、本研究に用いた水深データの

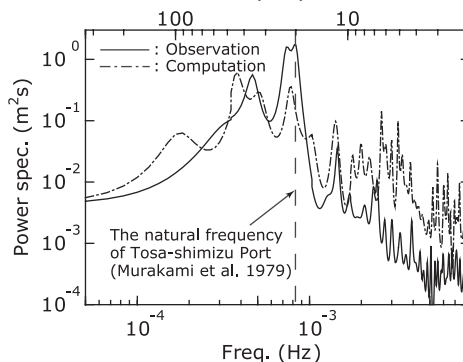


図-3 観測, 計算波形のスペクトル解析結果

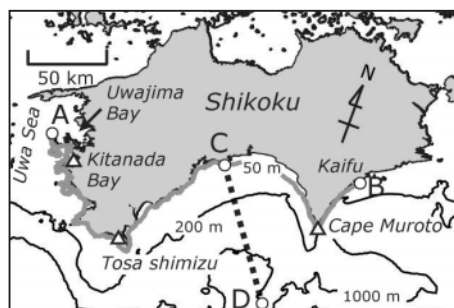


図-4 四国南部の海底地形と計算波形出力点の位置

空間格子間隔は土佐清水港の地形を十分に表現するためには粗いため、観測波形との比較を行う計算波形の出力点は土佐清水港開口部 (水深20m) とした。験潮所で記録される津波の観測波形は、実際の海面変動に験潮井戸の応答特性 (水理フィルター) の影響がかかったものであるが、その影響は周期5~10分程度以下の短周期成分におおよそ限られる (Satakeら, 1988)。土佐清水港で記録された津波の卓越周期は20分以上であり、験潮井戸の影響は小さいことから、計算波形との直接比較することができる。

図-2に昭和東南海地震での土佐清水港における津波観測波形とN2モデルからの津波計算波形を示す。図-2から、観測波形と計算波形において最大波は地震発生から数時間後に生じ、振幅0.3m程度の波が12時間以上にわたり継続していることがわかる。計算から求められたこのよ

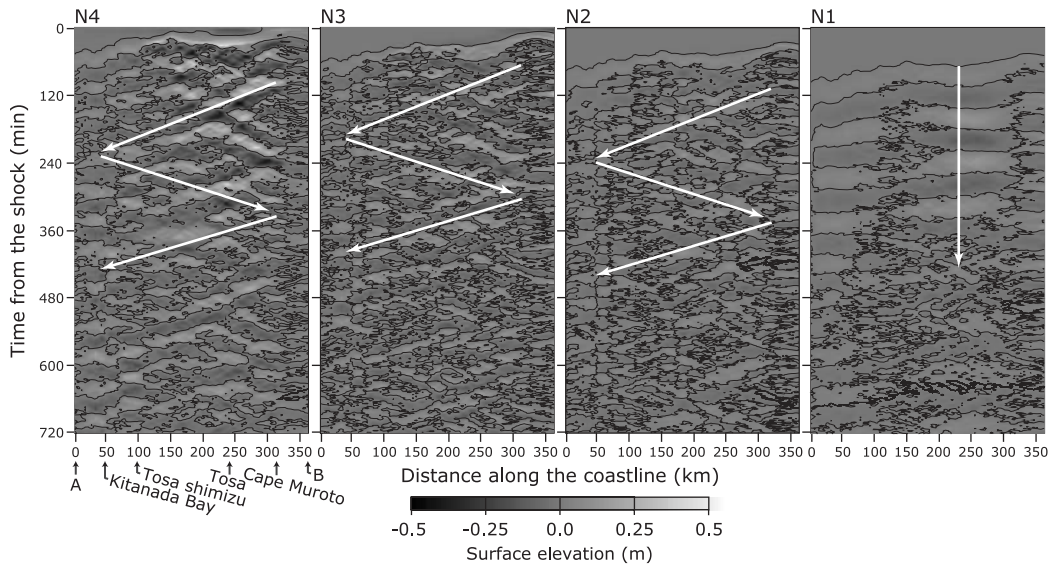


図-5 Line-ABにおける各震源モデルによる津波高の時間推移分布

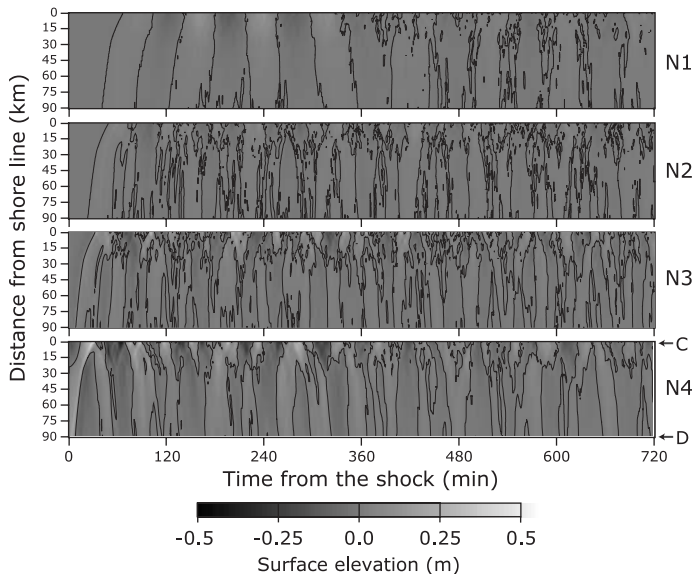


図-6 Line-CDにおける各震源モデルによる津波高の時間推移分布

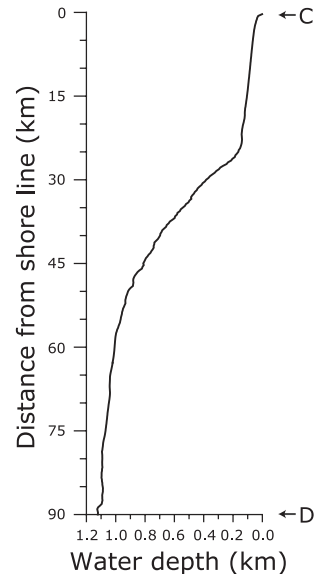


図-7 Line-CDにおける水深分布

うな津波波形は、観測波形の特徴を良く説明する。また、津波の計算波形と観測波形の包絡線は紡錘形を示しており、陸棚で捕捉されたエッジ波の特徴とよく一致する。なお、図には示していないが、1946年昭和南海地震の際にも土佐清水港において、地震発生から12時間に渡って波高0.5m程度の津波が観測されており、N3、N4からの計算波形も同様な特徴を示す。すなわち、東南海地震、南海地震ともに、計算波形は観測波形の継続時間や紡錘形といった特徴を再現している。

図-3に観測、計算波形のスペクトル解析結果を示す。図中の破線で示した周期は、土佐清水港において過去の観測記録から求められた副振動の卓越周期（村上ら、

1979）である。土佐清水港の副振動の卓越周期と、計算波形の卓越周期はほぼ一致することがわかる。なお、先に述べたように、計算波形は土佐清水港開口部での出力であるため、土佐清水港の地形に依存する副振動の影響は含まれていない。よって、土佐清水港の長く続く湾水振動は、港外のより大きなスケールを持つ構造に起因する振動であると考えられる。

4. 四国南部沿岸における津波の伝播・継続特性

四国南部沿岸の津波伝播・継続特性を検討するため、宇和島湾南部沿岸の水深50m地点（図-4、A点）から海部沿岸の水深50m地点（B点）まで、50m等深線（Line-

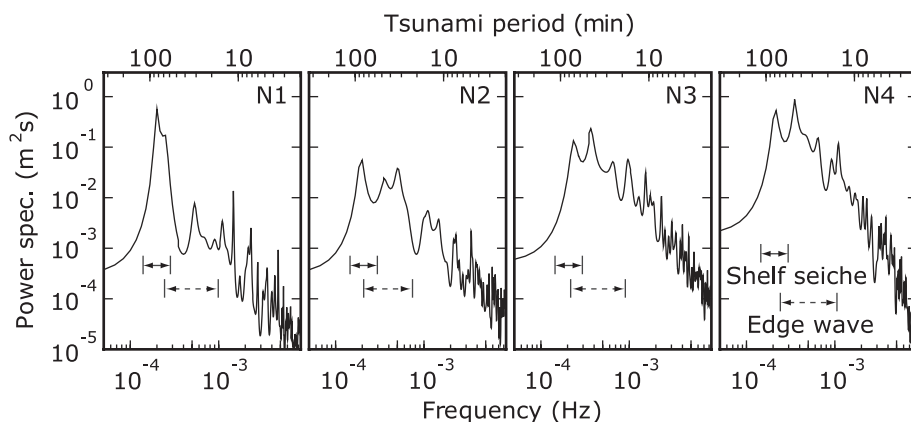


図-8 C点における各震源モデルによる津波のスペクトル解析結果

AB) に沿って約5km毎に出力点を設けて津波波形を検討した。図-4において、△は代表的な地域、○は出力点の例であり、灰色実線は宇和島湾沖から海部沖までの50m等深線を示す。破線 (Line-CD) は土佐市沿岸 (C点) と土佐湾沖90km地点 (D点) を結んだ出力線を示す。

(1) 四国南部沿岸における津波の伝播特性

図-5にLine-ABにおける各震源モデルによる津波高の時間推移分布を示す。図中、横軸はA点 (0km地点) からの距離、縦軸は地震発生からの時間を示し、土佐湾は100～320kmに位置し、土佐清水は宇和島湾沖 (A点) から約100km、土佐市沖の出力点Cは約240km、室戸岬は320kmに位置する。また、図中の矢印は津波の伝播経路の概略を示している。

図から、N1による津波は四国南部沿岸に到達した後に、岸に平行な波向を保ったまま、湾内で繰り返し振動していることから、陸棚セイシュが発生したことがわかる。これは、土佐湾の陸棚幅と水深により規定される陸棚セイシュの固有周期と、湾内に入射する津波の卓越周期とが一致したためと考えられる。N2による津波は、四国南部沿岸に到達した後 (津波発生から約100分後) に、その波向が斜行 (沿岸方向) して伝播していることがわかる。また、宇和海に位置する北灘湾周辺 (図中の50km地点) と室戸岬 (同320km地点) で津波が折り返して湾内を何度も繰り返し伝播している様子がわかる。この2地点では、海岸形状や海底地形が急変するため、岸沿いに伝播する津波が反射して、逆方向に戻っていく。こうして、土佐湾周辺では津波が長く継続する。N3、N4からの津波は、津波高は異なるもののN2からの津波と同様の伝播特性を持つ。津波は四国南部沿岸に到達した後に岸沿いに伝播を始め、北灘湾周辺と室戸岬周辺の間を何度も反射を繰り返し、長時間にわたって津波が継続することがわかる。この津波の伝播速度は約33m/sである。土佐湾内の平均的な陸棚勾配を1/110程度とし、汀線方

向の津波の波長を約60kmとすると、藤間ら (1999) による直線海岸を伝播する定常エッジ波の伝播速度 ($\approx 28.9\text{m/s}$) とおおむね一致する。

図-6にLine-CDにおける各震源域による津波空間波形の時間推移分布、図-7にLine-CDにおける水深分布を示す。図中、C、D点は各々の約0、90km地点に対応する。図-6、7から、N1による津波は水深によらずにLine-CD上でほぼ一様に振動していることがわかる。N1による長軸方向に放射された長周期の津波は外洋を伝播し、四国沖に直面した南海トラフに捕捉される。そして、土佐湾周辺に入射するため、陸棚セイシュに発達したと考えられる。N2、N3、N4から生じた津波については、汀線から30km付近で津波の振動特性が変化し、沿岸近くでは沖側に比して短周期の津波が生じていることがわかる。また、津波初動が汀線近くに到達した時の波長が陸棚幅の同程度かそれ以下の場合、土佐湾内で津波は陸棚に捕捉され、エッジ波に発達するようである。

図-8にC点における各震源モデルによる津波のスペクトル解析結果を示す。図中、陸棚幅と水深に依存した陸棚セイシュ基本モードの周期帯 (土佐湾内の平均陸棚幅を30km、水深を50～200mと仮定) と、藤間ら (1999) による直線海岸における陸棚勾配と波源スケールに依存するエッジ波の周期に関する評価式から求められた周期帯を併記した。図から、N1による津波において、1次の卓越周波数、(または卓越周期) は陸棚セイシュの基本モードの周期帯に含まれる。2次の卓越周波数はエッジ波の卓越周期帯に含まれるが、そのエネルギーは1次のそれに比して1/10以下に過ぎない。このことからN1による津波は土佐湾内で陸棚セイシュに発達したことがわかる。N2による津波において、1次の卓越周波数は陸棚セイシュの基本モードの周期帯に含まれ、2次の卓越周波数はエッジ波の周期帯に含まれる。N2による津波の土佐湾内周辺における振動特性は陸棚セイシュとエッジ波

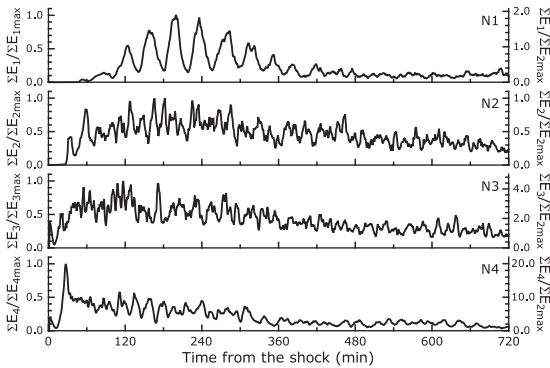


図-9 各震源モデルによる津波エネルギーの時刻

の成分を持っていることが考えられる。N3, N4による津波においては1次の卓越周波数はエッジ波の周期帯に含まれ、2次の卓越周波数は陸棚セイシュの周期帯に含まれる。以上から、N2による津波と同様に、N3, N4による津波の土佐湾周辺における振動特性は陸棚セイシュとエッジ波の成分を有することがわかる。

(2) 四国南部沿岸における津波の減衰過程

Line-ABにおける津波の減衰を検討するために、到達する津波エネルギー $E_i(t)$ を定義した。式(1)に $E_i(t)$ の定義式を示す。

$$E_i(t) = \int_0^S \frac{1}{2} \rho g \eta_i^2(s, t) ds \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 S はLine-ABに沿ったA点からB点までの距離、下添え字 i は震源モデル番号、 $\eta_i(s, t)$ は各震源モデルによるLine-AB上の s 地点における津波発生からの時刻 t での津波高である。

図-9に各震源モデルによるLine-ABに到達する津波エネルギー $E_i(t)$ の時刻歴を示す。図中、左縦軸について、 $E_i(t)$ は同一震源モデルによる最大値で規格化したスケールであり、右縦軸は $E_2(t)$ の最大値で規格化したスケールである。図から、N1, N2およびN3による四国南部沿岸における津波エネルギーは、地震発生から3～4時間後に最大となることがわかる。また、 $E_1(t)$ が最大の50%となるのに6時間程度、 $E_2(t)$ は8時間程度、 $E_3(t)$ は7時間程度、 $E_4(t)$ では4時間程度を要し、いずれも津波は長時間継続することが判る。各震源モデルの滑り量を同じとした場合のLine-ABに到達する最大津波エネルギーについて、N1による最大津波エネルギーはN2の2倍程度、N3は4倍程度、N4は20倍程度となり、N2より遠方に位置するN1による津波の方が四国南部沿岸に到達する最大津波エネルギーが大きいことは興味深い。

5. おわりに

南海トラフ沿いで発生する地震による四国南部沿岸における津波継続特性を数値解析により検討した。本研究

で得た結論は以下である。

- (1) 1944年東南海地震津波における土佐清水港の振動は港外の地点でも計算から再現されることから、港固有の振動ではなく、より大きなスケールを持つ構造に起因する振動であると考えられる。
- (2) 東海地震(N1)による津波は、土佐湾内で陸棚セイシュに発達するため、沿岸では同じような時間変化を示す。
- (3) 東南海地震(N2)、南海地震(N3, N4)による津波は土佐湾内で陸棚セイシュとエッジ波に発達する。岸沿いに伝播するエッジ波は北灘湾と室戸岬により反射され、土佐湾周辺を長時間継続して伝播する。
- (4) 四国南部沿岸における津波のエネルギーが最大値の50%に減衰するのに要する時間は東海地震では6時間程度、東南海地震による津波では8時間程度、南海地震による津波では4～7時間程度を要し、いずれも津波は長時間継続すると考えられる。

謝辞：本研究遂行にあたり、埼玉大学原田賢治助教、東京大学地震研究所(現、防災科学技術研究所)斎藤竜彦研究員、産総技術研究所行谷祐一研究員には多くの助言を賜りました。津波数値計算に用いた海底データは内閣府から提供して頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。3名の匿名査読者の方には、丁寧に原稿を読んでいただき、論文改訂のための重要な指摘を多数頂きました。なお、本研究は、H20-24年度文部科学省「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト②連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究」(研究代表者：東京大学教授 古村孝志)の一環として行われました。

参 考 文 献

- 安中 正・稲垣和男・田中寛好・柳沢 賢(2003)：津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴、土木学会地震工学論文集, CD-ROM.
- 宇佐美龍夫(2003)：日本被害地震総覧[416] - 2001, 東京大学出版会, pp.75-90.
- 地震調査研究推進本部：海溝型地震の長期評価の概要(オンライン), <http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/kaikou.htm>, 参照2009-6-30.
- 藤間功司・正村憲一・堂蘭良一・重村利幸・後藤智明(1999)：陸棚で発生した津波に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.141-151.
- 村上仁士・島田富美男(1979)：資料および実測に基づく副振動の特性に関する考察(2), 第26回海岸工学講演会論文集, pp.129-133.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971) : The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 61, No.5, pp.1433-1440.
- Satake, K., M. Okada and K. Abe (1988) : Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan, J. Mar. Res., Vol. 46, pp.557-571.