

# 瀬戸内海における津波の波動特性とその危険度の時空間解析

## Spatiotemporal analysis of Tsunami wave property and hazardous sea area in Seto Inland Sea

山中亮一<sup>1</sup>・上月康則<sup>2</sup>・田邊 晋<sup>3</sup>・井若和久<sup>4</sup>・村上仁士<sup>5</sup>

Ryoichi YAMANAKA, Yasunori KOZUKI, Shin TANABE

Kazuhisa IWAKA and Hitoshi MURAKAMI

Tsunami disaster prevention of Seto Inland Sea is slow to take action for lack of knowledge of generation mechanism of Tsunami damages. According to previous research papers, there is a possibility of appearance of sudden water level raising and long-term water level fluctuation in sympathetic vibration with characteristic vibration in some bay. Therefore, this study focuses on period characteristics and hazardous sea area. As a result of numerical analysis, temporal period characteristics of each sea area, distribution of largest tsunami heights and time of occurrence, distribution of maximum tsunami velocity and time of occurrence and a map of hazardous sea area are clarified. Moreover, generation mechanisms of Tsunami damages are examined.

### 1. 緒言

今世紀前半に発生すると予測されている南海地震津波に対する防災は、太平洋側においては現存する歴史資料や津波碑による伝承、数値予測などにに基づき対策が進められている。一方、瀬戸内海においては、狭い海峡を介してのみ外海と接続する地形特性(図-1参照)や、被害を伝える歴史資料が限られているため、津波による大きな被害は生じないと認識され、太平洋側のような総合的な対策は講じられていない。しかし、この瀬戸内海における南海地震津波のこれまでの研究事例をみると、吉田ら(2002, 2003, 2004)は、周期特性に着目し、豊後水道、紀伊水道、播磨灘などで固有振動との共振現象が生じると指摘しており、宮本ら(2006)は、その共振現象は入射波の周期が50~70分の場合に顕著になると指摘している。さらに、久保ら(2007)は、瀬戸内海に流入した津波は、津波発生後20時間を経過しても水位変動が継続し、津波発生直後だけでなく突発的な水位上昇や急流などが生じる可能性を指摘している。また、津波による被害については、河田ら(2002)は、潮汐の条件によっては養殖施設への影響が懸念されると指摘している。このように、瀬戸内海において、津波影響の突発的な発生やその長期化が生じることが学術的な知見に基づき明らかとなりつつある。

そこで本研究では、これらの研究成果を踏まえ、瀬戸

内海特有の津波影響の発生メカニズムとそれが及ぶ海域分布の詳細を把握するため、解析対象時間を長く設定し、空間分解能を向上させた数値解析により、(1)周期特性の時空間変動の視点から津波影響の長期化のメカニズム解明を、(2)津波高と流速の視点から津波影響を顕著に受ける海域の把握を行うことを目的とする。

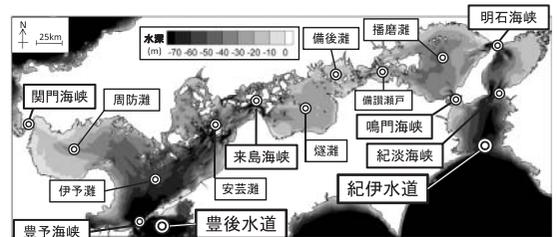


図-1 瀬戸内海における海域名と水深

### 2. 数値計算の概要

#### (1) 数値モデルおよび計算条件

表-1に示す計算条件において、非線形長波方程式をスタッガード・リーブフログ差分法により計算した。対象とした津波は、今世紀前半の発生が予測されている南海地震(M8.4以上)と規模が類似している1854年の安政南海地震津波(M8.4)とし、相田(1981)の断層モデル(No.20')を基にManshinha-Smaylie(1971)の解析解で求めた地盤変位分布を初期水位として与えた。計算領域は、図-2に示すような千葉県以西の西日本を含む領域No.1(計算格子間隔1350m)、四国周辺海域を含む領域No.2(計算格子間隔450m)、瀬戸内海全域を含む領域No.3(計算格子間隔150m)、豊後水道・鳴門海峡・紀淡海峡・明石海峡を含む領域No.4(計算格子間隔50m)を設定した。

- |        |      |                          |
|--------|------|--------------------------|
| 1 正会員  | 博(工) | 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師  |
| 2 正会員  | 博(工) | 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授  |
| 3 正会員  | 修(工) | 国際航業株式会社                 |
| 4 学生会員 | 修(工) | 徳島大学大学院先端技術科学教育部環境創生工学専攻 |
| 5 フェロー | 工博   | 徳島大学環境防災研究センター客員教授       |

表-1 計算条件

断層モデル	安政南海地震 (相田モデルNo. 20')
地盤変動量	Manshinha-Smaylie の解析解
計算時間	30 時間
計算時間間隔	0.5 秒
粗度係数	$n=0.025(s/m^{1/3})$
計算潮位	T.P. $\pm 0.0(m)$
境界条件	海域自由透過, 陸域完全反射
計算格子間隔	1350m, 450m, 150m, 50m

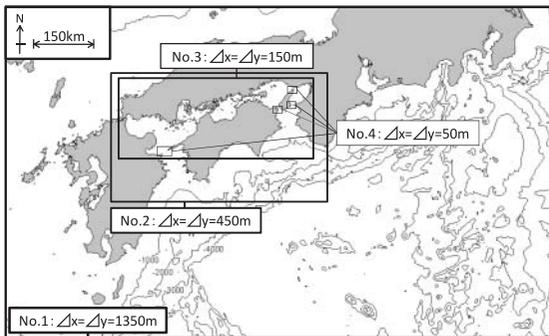


図-2 計算領域と計算格子間隔

(2) 再現性の検証

(1) で構築したモデルの再現性を検討した。再現性の評価の方法としては、相田 (1977) によって提案された評価指標である K (対数幾何平均) と  $\kappa$  (対数幾何分散) を用いて、それぞれ  $0.8 \leq K \leq 1.2$ ,  $\kappa < 1.6$  の範囲に収まるように地盤の鉛直変位量を補正した。

瀬戸内海における過去の南海地震津波の痕跡値は、羽鳥 (1988) や村上ら (2002) による研究例があるが、測量値は数地点であったため本研究では用いず、太平洋沿岸部における津波の挙動を評価対象とすることにし、羽鳥 (1978, 1980, 1981, 1991), 村上ら (1996), 渡辺 (1985) の痕跡値を用いた。なお、同地点において痕跡値が複数ある場合は最大値を採用し、本研究では遡上計算を行わないため、その地点の汀線付近の計算結果を痕跡値と比較した。結果、断層のすべり量 1.75 倍の補正を施したとき、 $K=1.04$ ,  $\kappa=1.52$  という良好な再現性を得られた。

3. 津波とそれが励起する波動の周期特性

(1) 解析方法

毎分の津波高分布を基に、図-3に示した瀬戸内海の都市近傍 45 地点を対象にウェーブレット変換による時系列波形の解析を行い周期成分の経時変化を算出した。ウェーブレット変換は、周波数解析の一つで、得られるスペ

クトルに時間依存性を持たせ、各時刻において卓越する周期を時間平面上の強度として表すことができる。ここで、マザーウェーブレット関数は Morlet を用いた。

(2) 各海域の周期特性

発生した津波は紀伊水道と豊後水道の両方から瀬戸内海に進入した。その後、狭い海峡 (豊予海峡, 鳴門海峡, 紀淡海峡) を通過し、津波発生から約 200 分後に燧灘で合流した。津波の伝播に従い浅海域において周期性の波動が励起されている様子が見られ、複雑な水位変動を示していた。瀬戸内海への進入前における周期特性を把握するため、一例として図-4に足摺岬沖のウェーブレット変換の結果を示す。横軸が津波発生からの経過時間、縦軸が周期であり、図中の等値面の色の濃い場所がその時刻に卓越する周期成分を表している。これを見ると足摺岬沖において、発生後約 500 分までに約 50 分と約 100 分の周期を持つ津波が通過したことが分かる。

ウェーブレット変換の結果を灘ごとにみると、周防灘では周期約 50 分の成分がみられたのは図-3の 3~7 番地点と 43 番地点であり、津波発生から 150~1500 分の間に生じていた。特に図-5 (a) に示す山口港 (3 番地点) では周辺より振幅が大きい津波高変動が持続し、このときの周期約 50 分の成分が計算終了時まで卓越していた。このような周期特性は周辺の地点でも見られ、いずれも同位相で振幅していたことから、山口港では固有振動との共振により振幅が増幅したものと考えた。安芸灘では、全域で周期約 50 分の成分が津波発生から約 150~1500 分の間に顕著であった。この他の周期成分としては、9~13

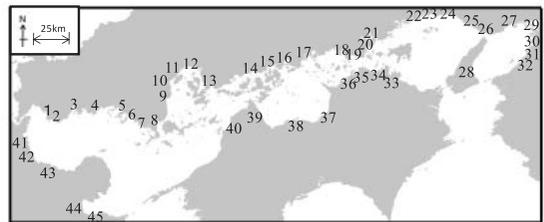


図-3 解析対象地点

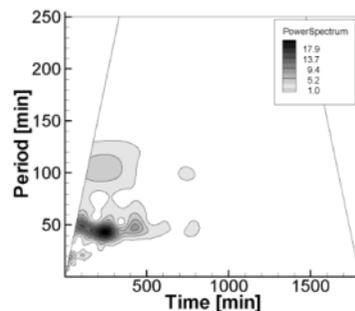


図-4 足摺岬沖における周期特性の経時変化

番地点と40番地点で周期約100分の成分が津波発生から500分後より計算終了時まで卓越していた。来島海峡から燧灘においては、すべての地点において卓越する周期が頻繁に変化する複雑な周期特性を示しており、その周期の範囲は40~150分であった。

つぎに、備後灘と備讃瀬戸をみると、備後灘にある地点18番地点と36番地点においては津波発生から150~1000分の間に周期約50分の成分が現れ、これ以降はいずれの周期成分も卓越しなかった。この地点の東西に位置する海域においては周期約100分の成分が認められることから、備後灘に周期約100分の固有振動の節が位置している可能性があると考えた。播磨灘においては、北岸の22~25番地点において、津波発生から150~700分の間に周期約50分の周期が卓越し、その後、周期約100分の周期成分が計算終了時まで存在した。一方、図-5(b)に示す南岸の志度(33番地点)では、北岸で出現していた100分前後の周期成分は現れず、津波高も津波発生後600分前後を境に急に減衰した。このような傾向は志度の西側の34, 35番地点とも異なっており、固有振動のモードが小豆島の南北で異なっている可能性を示唆している。

最後に、大阪湾は図-5(c)に示すように津波の初期流入に伴う周期約50分の成分の他に、周期約95分の成分が津波発生から100分後くらいより生じており、そのため津波発生から30時間後においても0.5mの津波高の振動成分が存在していた。図-7に95分前後の周期が特に卓越する洲本(27番地点)、大阪港(28番地点)の1800分までの津波高の経時変化を比較したものを示す。その結果、600分以降において、両地点の振動成分が逆位相になっていることがわかる。これは固有振動によるものと考え、大阪湾全体における固有振動の様相を把握するために、図-7に示す黒点で示した16地点においてウェーブレット変換を行い、周期を算出した。その結果、大阪湾の北東岸、および南岸において95分前後の周期が特に卓越しており、大阪湾の中央海域において同周期が弱い海域があることがわかった。これより、大阪湾については95分前後の1次モードの固有振動が長軸方向に存在し、周期が95分前後の固有振動が減衰せずに残り、長時間に渡り影響を及ぼし続けることが示唆された。大阪湾の固有周期については、宇野木(1959)は、1953年6月6日の台風により大阪検潮所で110分の周期が観測されたことを挙げており、概ね一致している。

以上より、津波影響の長期化は、周期100分前後の波動が津波発生から30時間後においても存在することと、海域における固有振動との共振により生じることがわかった。

#### 4. 津波影響の時空間特性

津波高と流速の経時変化を基に、最大津波高と最大流

速、およびそれらを記録した時間の分布図、津波影響が生じる可能性がある水域の分布図を作成した。

##### (1) 最大津波高と最大流速

図-8に示す計算期間1800分間における最大津波高は、太平洋に面した海域に比べて瀬戸内海は小さく、最大津波高が0.5mを越える海域は主に海岸近傍に位置していた。最大津波高は水深にも関係するため、これらの海域と図-1に示した水深分布と比較すると、概ね水深20mより浅く海岸線に囲まれた半閉鎖的な地形特性を有している海域で0.5mを越える津波高が生じていたが、燧灘の南部海域など、この条件を満たすにもかかわらず最大津波高が小さい海域もあり、このことから現象が複雑であることが分かる。これらの最大津波高を記録した時間は、太平洋側では津波発生後120分以内であるが、瀬戸内海は大阪湾を除き、概ね津波発生後360分以降に記録しており、とくに最大津波高が0.5m以上であった肥後灘では600分以降に最大津波高を記録した。これは津波伝播に伴う波動による影響が長時間に渡り継続し、突発的に局所的な津波高の上昇が生じていたことを示している。図-9に示す最大流速は備讃瀬戸と播磨灘において流速0.5m/s以上となる海域が存在するが、その発生時間は概ね津波発生後360分までであった。また、最大津波高を記録しないまでも水位変動が継続する海域を明確にするため、毎分の水位変動量(絶対値)の累積値の分布を求めた(図-10参照)。これと図-8の最大津波高の分布と比較すると、最大津波高が小さかった四国北岸においても水位変動する傾向があることが分かり、これらの海域も津波の影響を強く受けていることがわかった。

以上の結果に基づき、各海域における津波現象の特性を整理したところ、大きく3つの海域に分類できることがわかった。1つ目は備後灘以西の海域である。その特徴は最大津波高が海域部で0.5m以下、沿岸部で0.5~1.0m程度と低く、その一方湾奥で局所的に累積値が大きく、地震発生1000分後においても津波高0.5m以上となる。2つ目は備讃瀬戸および播磨灘の海域であり、備後灘以西と比べ津波高が全体的に0.5m程度高い特徴がある。3つ目は大阪湾であり、最大津波高は瀬戸内海のなかで最も高く、例えば大阪港では約2.3mになり、津波の周期とは異なる95分前後の周期が1800分間にわたり卓越した。

##### (2) 津波の長期的影響による危険度

津波の長期的影響による危険度について、津波高および流速より把握した。評価基準として、まず、津波高については、海水浴客が津波に巻き込まれる可能性を考慮して、人的被害が生じ始めるとされる津波高0.5m以上とした。流速については、チリ地震津波の事例を参考にし、養殖筏が被害を受けた流速0.5m/s以上を評価の閾値とし

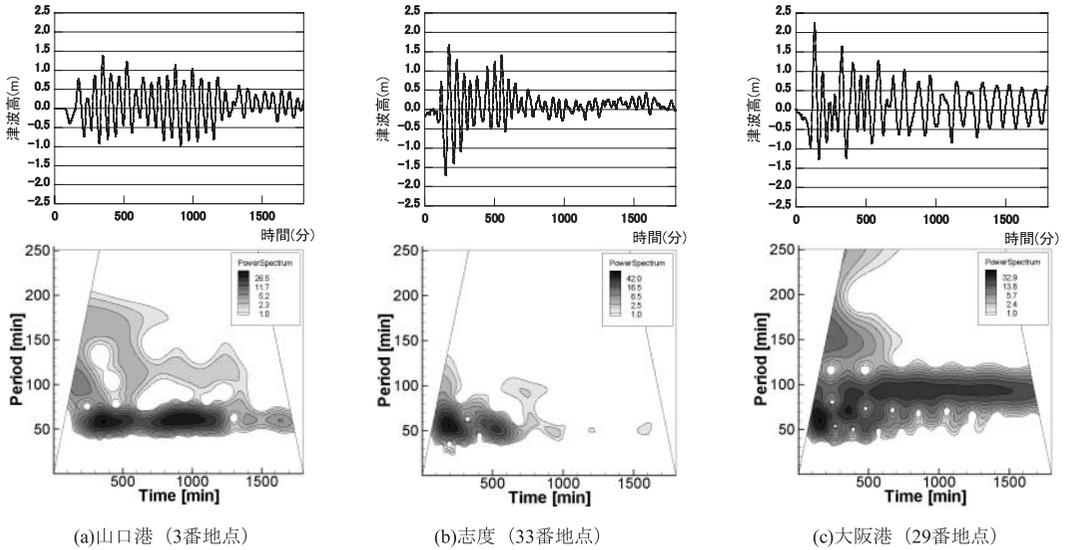


図-5 津波高の時間変化と周期特性 (上図, 色の濃いところの周期が卓越している)

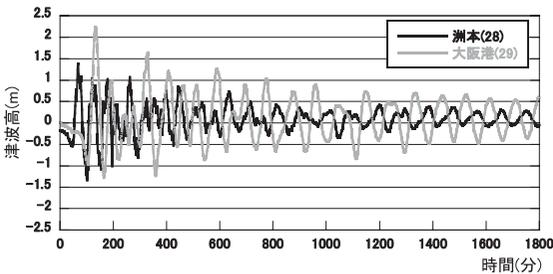


図-6 大阪湾北部と南部における津波高

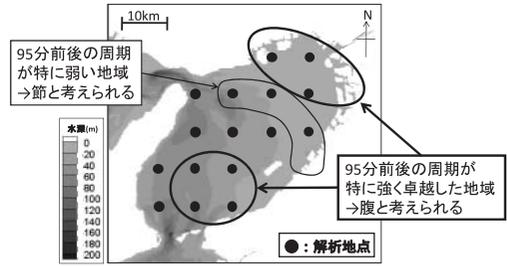


図-7 大阪湾の固有振動のモード

た。次に、瀬戸内海では長期的な影響がありウェーブレット変換より津波波動の直接的な影響は津波発生から約600分後までであったことから、地震発生から1800分までのうち、600分毎の3段階にわけ、時間毎に、津波高が一度でも0.5m以上になれば1点を加算し、流速が一度でも0.5m/s以上になれば1点を加算し、最大6点となる方法で危険度評価を行った (図-11)。その結果、大阪湾の東北岸では6点となり、瀬戸内海のなかでも特に長期的に津波が影響し危険性が高いということがわかった。また、同湾のその他の沿岸域でも3~4点、海域においても2~3点が多い。播磨灘では沿岸域が2~3点、高いところでは4~5点もみられる。備讃瀬戸では沿岸域、海域ともに2~3点と中期的に津波の影響が懸念される。備後灘においては、沿岸域で局所的に3~4点、海域で2点の分布となっている。一方、備後灘以西では、沿岸域において、局所的に2~3点の地域があり、中には5点の地域も点在するが、海域においては0点の地域がほとんどであった。

このように、危険の有無を表す単純な点数付けで示した場合、太平洋のみならず瀬戸内海においても津波に起因した危険が生じる海域が多くあることがわかった。さらに瀬戸内海では実際には無数の養殖筏が存在し、狭い海峡を船舶が多数往來していることから、これらによる被害が伝播することが考えられる。

### 5. 結言

本研究では、瀬戸内海における津波被害の発生機構に強く関わっている波動の周期特性と、現象の定量的な把握、危険性の評価を時空間変動の視点から行い、瀬戸内海における津波影響の長期化が発生する際の周期特性と津波影響による危険がある海域の分布を示した。今後は瀬戸内海における防災には、各海域特有の固有振動とそれによる津波高増幅の影響を考慮する必要がある、そのためには各海域における固有周期をさらに精度良く把握する必要があるであろう。

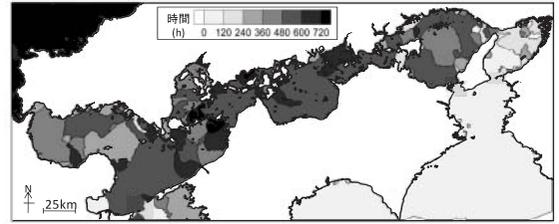
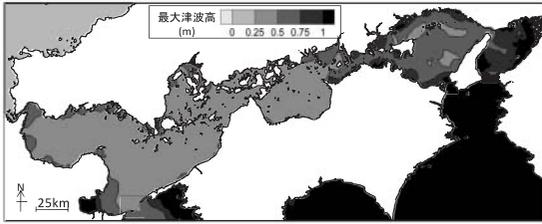


図-8 最大津波高 (左図) とその発生時間 (右図)

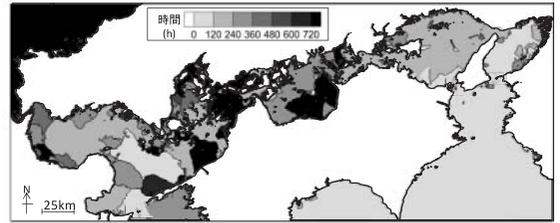
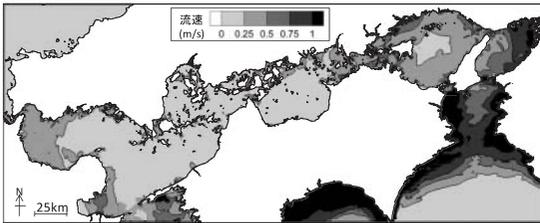


図-9 最大流速 (左図) とその発生時間 (右図)

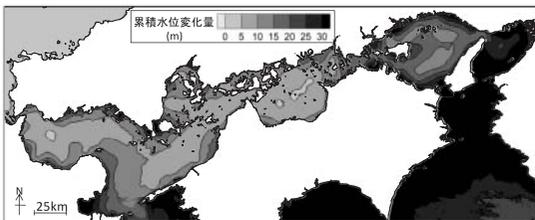


図-10 累積水位変化量

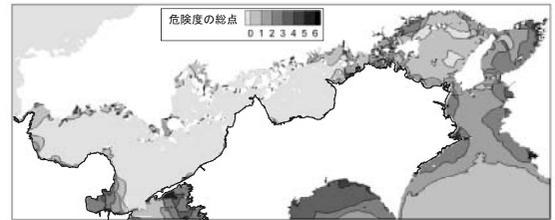


図-11 危険度の総点

参考文献

相田 勇 (1981): 南海道沖の津波の数値計算, 東大地震研究所 彙報, Vol.56, pp. 713-730.  
 相田 勇 (1977): 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東大地震研究所彙報, Vol. 52, pp. 71-101.  
 宇野木早苗 (1959): 港湾のセイシュと長周期波について, 海岸工学論文集, 第6巻, pp. 1-11.  
 河田恵昭・佐々木基充・高橋智幸・鈴木進吾 (2002): 南海地震津波による水産被害の評価手法の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 301-305.  
 久保 喬・村上仁士・上月康則 (2007): 瀬戸内海四国沿岸域における津波の周期特性について, 海岸工学論文集, 第54号, pp. 191-195.  
 羽鳥徳太郎 (1988): 瀬戸内海・豊後水道沿岸における宝永 (1707)・安政 (1854)・昭和 (1946) 南海道津波の挙動, 地震 2, Vol.41, pp. 215-221.  
 羽鳥徳太郎 (1978): 高知・徳島における慶長・宝永・安政南海道津波の記念碑 - 1946 年昭和南海道津波の挙動との比較, 地震研究所彙報, Vol. 53, pp. 423-445.  
 羽鳥徳太郎 (1980): 大阪府・和歌山県沿岸における宝永津波・安政南海道津波の調査, 地震研究所彙報, Vol.55, pp.505-534.  
 羽鳥徳太郎 (1981): 高知県南西部の宝永・安政南海道津波の調査 - 久礼・入野・土佐清水の津波の高さ, 地震研究所彙報, Vol. 56, pp. 547-570.  
 羽鳥徳太郎 (1991): 徳島県と和歌山県沿岸における津波災害の

比較, 歴史地震, 第7号, pp. 11-19.  
 宮本大輔・村上仁士・上月康則・久保 喬 (2006): 瀬戸内海における津波挙動に及ぼす潮汐および入射波高, 周期の影響, 海岸工学論文集, 第53号, pp. 261-265.  
 村上仁士・島田富美男・山本尚明・上月康則・佐藤広章 (2002): 四国沿岸域における歴史津波の浸水高評価, 月刊海洋/号外, Vol. 28, pp. 61-72.  
 村上仁士・島田富美男・伊藤禎彦・山本尚明・石塚淳一 (1996): 四国における歴史津波 (1605 慶長, 1707 宝永, 1854 安政) の津波高の再検討, 自然災害科学, Vol. 15, No.1, pp. 39-52.  
 吉田和朗・村上仁士・島田富美男・上月康則・倉田健吾・一島洋 (2002): 紀伊水道および豊後水道沿岸における津波の伝播・応答特性, 海岸工学論文集, 第49号, pp. 296-300.  
 吉田和朗・村上仁士・島田富美男・上月康則・大宅祥弘・大谷寛 (2003): 瀬戸内海における津波の流速・津波高に及ぼす海峡・島の影響に関する一考察, 海岸工学論文集, 第50号, pp. 321-325.  
 吉田和朗・村上仁士・上月康則・大谷 寛・宮本大輔 (2004): 瀬戸内海への津波伝搬に及ぼす紀淡・鳴門・豊後海峡の影響, 海岸工学論文集, 第51号, pp. 286-290.  
 渡辺偉夫 (1985): 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 99p.  
 Manshinha, L. and D. E. Smylie (1971): The Displacement of Inclined Faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp. 1443-1440.