

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

吉田 和郎* ・村上 仁士** ・島田富美男***
上月 康則**** ・大宅 祥弘***** ・大谷 寛*****

東海・東南海・南海地震津波によって瀬戸内海沿岸でも津波災害の発生が示唆されている。瀬戸内海における津波高や津波到達時間、流速特性には海峡と諸島群が大きく影響しており、この影響を、津波の伝播状況、個々の海域における振動特性、海峡部における流入・流出量の変化から考察した。その結果、伊予灘、広島湾、安芸灘、燧灘での津波来襲特性には諸島群が大きく影響し、津波防波堤の役割をしていること、播磨灘は固有振動周期と津波周期との共振による影響が顕著であること、諸島群周辺の狭窄水路では1 m/s以上の流速が発生し、係留施設等は注意を要すること、瀬戸内海は諸島群と海峡の影響により津波が一度進入すると出にくく、長時間にわたって水位の高い状態が継続することを示した。

1. 緒 言

次の東海・東南海・南海地震津波に関する新たな断層モデルの提案、沿岸域での予想津波高が中央防災会議により公表された。それによれば、瀬戸内海でも3 m前後の津波が来襲すると予測されており、津波防災対策に関心の低い瀬戸内海沿岸域でも津波に対する早急な検討が必要である。この瀬戸内海における歴史津波に関する研究は極めて少なく、一部の地域の歴史津波をまとめた羽鳥 (1988) や小林 (2000) らの調査研究や、津波高と流速分布から津波危険の高い海域と水産被害について検討した高橋ら (2000) や河田ら (2002) の研究にみられる程度であり、個々の海域における津波高や津波到達時間、流速特性を考察した系統的な研究はなされていない。瀬戸内海における津波高や津波の伝播・流れ特性には、図-1に示すように、海峡部からの流入・流出量と、諸島群が形成する複雑な地形と狭窄水路による津波低減効果、小さく仕切られた海域の振動特性が大きく影響すると考えられる。

本研究は、瀬戸内海における津波特性を明らかにする第1段階として、津波高や津波到達時間、流速特性といった津波の基本特性に及ぼす海峡と諸島群の影響を考察するものである。

まず、瀬戸内海における津波の基本特性を把握するために、津波伝播計算を行い、瀬戸内海沿岸部の最大津波高、津波到達時間、流速分布を求めた。そして、この津波の基本特性に与える諸島群の影響を検討するために、諸島群によって仕切られた各海域における振動特性に関

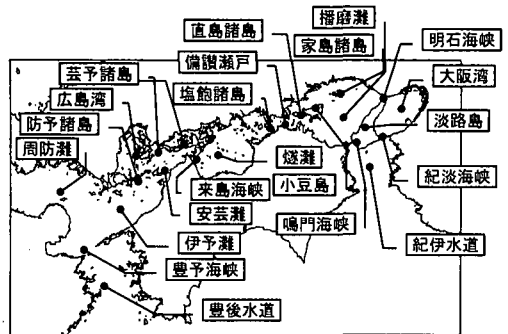


図-1 瀬戸内海全容図

する考察、ならびに諸島群がないとした場合との比較を行った。さらに、瀬戸内海の入口にあたる各海峡部での流入・流出量の変化を求め、これらが津波の基本特性に及ぼす影響についても考察を行った。

2. 津波伝播計算の方法

図-2に示すような計算領域において、非線形長波方程式をスタッガード・リーブフロッグ差分法により解析した。対象とした津波は、次の南海地震津波の規模を想定して、1854年の安政南海地震津波 (M8.4) とした。計算条件は、陸域を完全反射とし、計算格子間隔3,600 m, 1,800 m, 600 m, 計算時間20時間, 計算時間間隔0.6秒, 断層モデルは相田 (1981) モデル (Model. 20') とし、Mansinha-Smaylie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。なお、ここでの計算潮位は、T.P.±0.0 mとした。諸島群がないとした場合の計算では、淡路島と小豆島以外の島を対象として削除し、島周辺海域の平均水深を求め、その水深で島部分の水深を置き換えた。

3. 瀬戸内海への津波の進入特性とそれに及ぼす諸島群の影響

瀬戸内海に津波が進入し始めてから全域に伝播するまでの様子を追跡した。図-3は、紀伊水道と豊後水道の両水道からそれぞれ瀬戸内海に進入した津波が燧灘で出会

* 学生会員 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻 ((株)ニュージェック)
** フェロー 工博 徳島大学教授大学院工学研究科エコシステム工学専攻
*** 正 会 員 工博 阿南工業高等専門学校教授建設システム工学科
**** 正 会 員 工博 徳島大学助教授大学院工学研究科エコシステム工学専攻
***** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻
***** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻

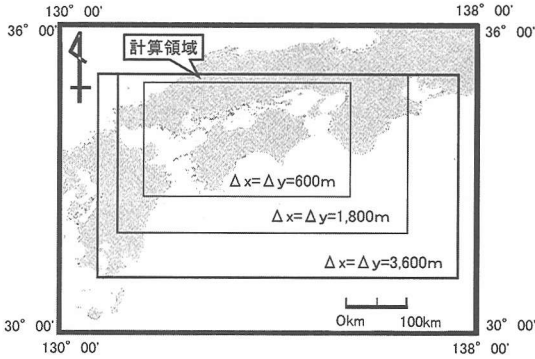


図-2 計算領域と計算格子配置図

う際の様子である。なお、以後、この「出会う」現象のことを「合流」ということにする。津波の伝播状況を整理すると以下のようである。

紀伊水道側の鳴門海峡と紀淡海峡の方が、豊後水道側の豊予海峡よりも津波が早く到達し、前者が約 40 分、後者が約 60 分と、約 20 分の差が見られる。紀伊水道側から瀬戸内海に進入する津波は、80 分後に大阪湾を経て明石海峡から進入し、鳴門海峡から進入した津波を合わせて 140 分後に燧灘の東の入口の備讃瀬戸にまで到達する。

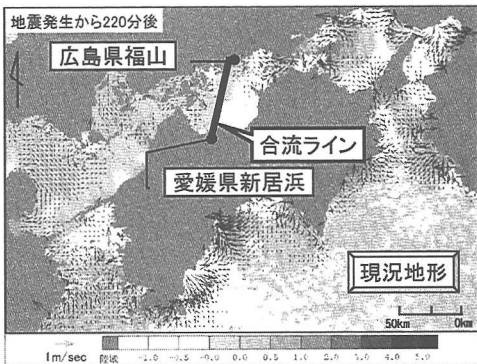


図-3 紀伊水道と豊後水道から進入した津波の合流状況



図-4 諸島群がないとした場合の津波の合流状況

そして、直島諸島や塩飽諸島によって燧灘への進入が妨げられ、160 分後に燧灘の東の入口に到達する。一方、豊後水道から進入する津波は、140 分後に防予諸島に到達するが、その防予諸島によって広島湾や安芸灘への進入を阻害される。そして、160 分後により燧灘の西の入口、来島海峡に到達する。そして、燧灘にほぼ同時に東西から進入する津波は、220 分後に広島県福山と愛媛県新居浜とを結ぶライン付近で合流する。瀬戸内海に紀伊・豊後両水道から進入する津波は、諸島群による影響を受けるはずで、この影響を検討するために、諸島群がないとした地形について計算を行い、図-4 に示した。

諸島群がないとした場合には、備讃瀬戸付近の津波到達時間の変化はあまり見られないが、伊予灘沿岸、燧灘西岸部では平均約 30 分程度早く津波が到達し、その影響から燧灘に東西からそれぞれ進入した津波は 200 分程度で合流し、しかも東に約 10 km ずれた広島県福山と愛媛県土居とを結ぶラインあたりで合流している。このように、諸島群によって広島湾、安芸灘、燧灘沿岸部は影響を受けているといえる。

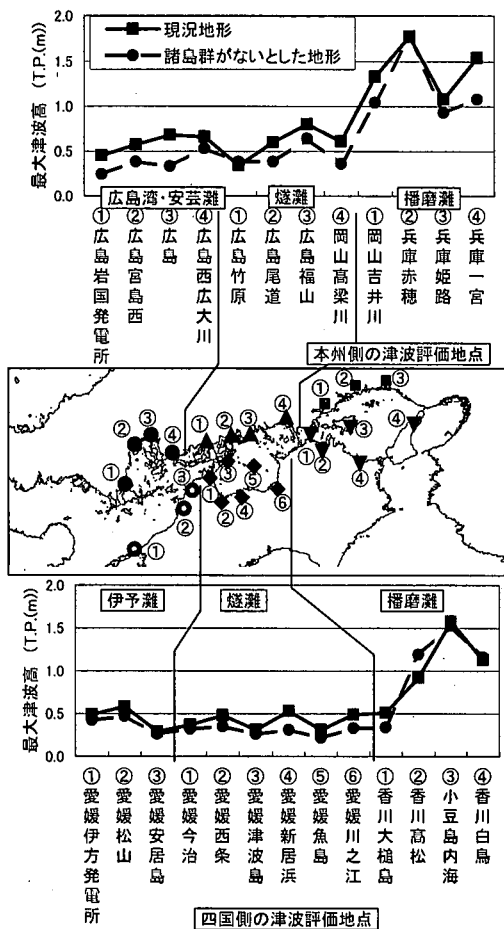
4. 各海域における津波高の分布特性とそれに及ぼす諸島群の影響

図-1 に示すように、瀬戸内海は、海峡、諸島群によって多くの閉鎖的な海域に分けられている。図-5 は、各海域の本州側と四国側の沿岸部における最大津波高の分布を求めたものである。同図には、諸島群がないとした場合の最大津波高も併記している。

M8.4 級の地震による津波が瀬戸内海に來襲すると、播磨灘以外の海域の最大津波高はたかだか T.P.上 80 cm 程度であるが、播磨灘では 180 cm 程度となる。吉田ら (2002) は、安政南海地震津波と同じ波源域で発生する津波は、豊後水道よりも紀伊水道の方が進入しやすく、進入した津波は紀伊水道内で共振し、沿岸部に大きな津波高を発生させる可能性を示唆してきた。また、波源から播磨灘までの伝播経路に障害となる諸島群がなく、津波エネルギーが減衰しにくいこともその原因と考えられる。

特に、播磨灘の兵庫県赤穂と小豆島内海では約 1.6~1.8 m と局所的に大きな津波高が発生している。そこで、この原因について考察を行った。

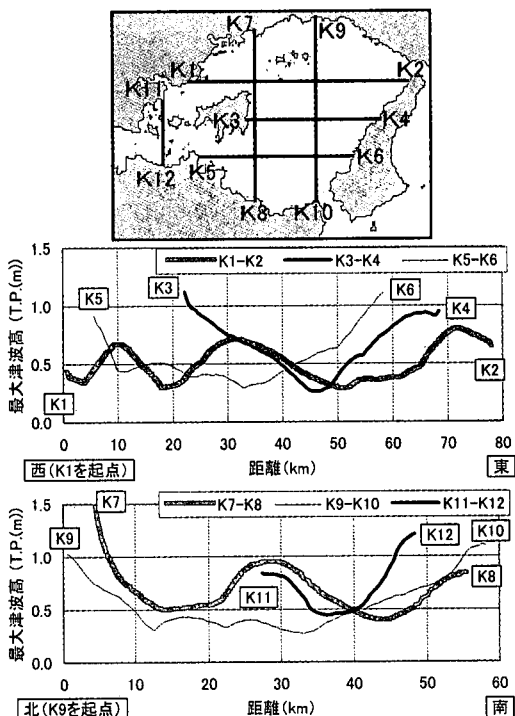
図-6 に示すように、播磨灘において南北と東西に数本のラインを設け、このライン上での最大津波高の分布を求めた。播磨灘と小豆島の沿岸部周辺の津波高は高くなるが、播磨灘の中央部の水位は低く、沿岸部が腹、中央部が節のような水面形となる。兵庫県赤穂と小豆島内海とを通る K7-K8 ラインに着目すると、小豆島がその中間点 (25 km 付近) にあり、水面形をその中間点で 2 つに



図一5 各海域における最大津波高の分布

分けると両端が腹、中央部が節となる顕著な1次モードの振動が見てとれる。岡山県吉井川と香川県高松とを結ぶK11-K12ラインでも同様に1次モードの顕著な振動が見られる。次に、東西方向のラインで見ると、小豆島と淡路島一宮とを結ぶラインに顕著な1次モードの振動が見られる。最長ラインとなるK1-K2ラインにおいて、小豆島の影響を受けない30 km付近から淡路島のK2にかけての水面形だけに着目すれば、1次モードの振動としてみる事ができる。また、水面形の節と腹の高低差を見ると、南北方向ではK7-K8ラインが他のラインよりも大きく、東西方向ではK3-K4ラインが大きくなる。いわゆるこの2つのラインが各方向における振動の主軸になっていると考えられる。

これらの水面形から読みとれる節の数をを用いて、播磨灘を閉鎖性海域として南北ならびに東西方向の固有振動周期を単純化したMerian周期として求めると、播磨灘の南北方向の固有振動周期は約45~55分程度、東西方向の固有振動周期は約100~115分と南北方向の約2倍長



図一六 播磨灘におけるライン上での最大津波高の分布

くなった。そして、兵庫県赤穂の津波波形をスペクトル解析し、卓越周期成分を求めると約45分となり、播磨灘の南北方向の固有振動周期とほぼ同じとなる。そして、兵庫県赤穂以外の播磨灘沿岸地域の津波周期も45~60分程度となる。このことから、播磨灘においては、南北方向の固有振動周期と津波周期とがほぼ同じとなり、共振を起こしていると考えられる。その結果として、特に南北方向の1次モードの振動が顕著に現れるK7-K8ライン、K11-K12ライン上の兵庫県赤穂、小豆島内海、岡山県吉野川、香川県高松で津波高が高くなっていると考えられる。ここで、同様の解析を燧灘と広島湾、伊予灘の他の海域でも行ったが、播磨灘のような顕著な振動モードは見られなかった。

次に、諸島群がないとした場合をみると、広島湾、安芸灘、燧灘沿岸部で津波高は高くなった。これは、諸島群による遮蔽効果によるものであり、諸島群が津波防波堤の役割を果たしているといえる。播磨灘では、備讃瀬戸付近の諸島群がなくなったため、燧灘側に抜けやすくなり、平均的に津波高は小さくなっている。しかしながら、播磨灘の共振モードに影響するような諸島群はないため、兵庫県赤穂や姫路、小豆島内海における津波高は諸島群の有無に関係なく高い値となる。

以上のことから、伊予灘、広島湾、安芸灘、燧灘は諸島群による遮蔽効果によって津波高はさほど大きくなり

ないが、播磨灘は海域の固有振動周期と津波の周期がほぼ同じとなり、特に南北方向で共振するため兵庫県赤穂等の局所的な地域で津波高が大きくなると考えられる。

また、図-3と図-4に示したように、紀伊・豊後両水道から進入した津波が、それぞれ地震発生後約220分と200分で燧灘のほぼ中間で合流する。この合流地点付近の津波波形をみても合流時の津波波形の変化はなく、2つの津波が重なり合って異常な津波高になることはないようである。

5. 津波到達時間の分布特性とそれに及ぼす諸島群の影響

各海域の本州側と四国側の沿岸部における津波到達時間の分布を図-7に示した。ただし、第1波のピーク発生時間を津波到達時間とした。また、同図には、諸島群がないとした場合についても併記している。

津波到達時間が一番遅いのは広島県尾道で地震発生後266分後である。このことから、地震発生後約4時間半で津波は瀬戸内海全域に到達することがわかる。また、各海域の本州側・四国側における第1波ピークの到達時間を比較すると、伊予灘では本州側、燧灘では四国側、播磨灘では本州側でそれぞれ遅くなっている。これは、津波の進入口となる諸島間の狭窄水路の位置と沿岸地域との位置関係が影響しているものと考えられる。

諸島群がないとした場合は、既に述べたように、伊予

灘、広島湾、安芸灘沿岸部で平均約30分早く津波が到達する。その一方で、播磨灘ではほとんど差がみられない。いわゆる、津波の到達時間に対しては、伊予灘、広島湾、安芸灘では諸島群の影響が大きく、播磨灘ではその影響はほとんどないといえる。

6. 流れの分布特性とそれに及ぼす諸島群の影響

図-3でもみられるように、諸島群の狭窄部の流速は、1 m/sを越えるところが多く、こうした諸島近傍の産殖筏や他の係留施設の被害には注意を要する。また、紀伊水道側の流速は、諸島群の有無に関係なく豊後水道側よりも速い。これは、鳴門海峡や明石海峡からの勢いの強さが播磨灘、備讃瀬戸にまで及んでいること、播磨灘と比べて伊予灘、周防灘の方が広い海域面積と深い水深となっているため、流速が緩和されるためである。

7. 海峡部における流入・流出特性とそれに及ぼす諸島群の影響

(1) 紀伊水道側の津波流入・流出特性

図-8に示すように、各海峡に評価ラインを設定し、このラインにおける総流入・流出量の時間変化を示す。ここで、外洋から瀬戸内海へ流入する場合を正、逆に瀬戸内海から外洋に流出する場合を負とした。

紀伊水道入口では地震発生から1時間程度まで急激に流入量が増加するとともに、流入量の方が流出量を大きく上回る。そして、その後は流入量と流出量の差は小さくなる。この津波が紀伊水道を北上すると、紀淡海峡と明石海峡、さらには備讃瀬戸では2～4時間程度の遅れで同様の傾向を示す。しかしながら、鳴門海峡は5時間後には流出傾向に移行する。つまり、紀伊水道側の津波の流れは、紀伊水道→紀淡海峡→大阪湾→明石海峡→備讃瀬戸→鳴門海峡→外洋というような反時計回りのサイクルが形成されるようである。これは、鳴門海峡の狭い幅と浅い水深によるものと考えられる。次に、諸島群がないとした場合をみると、5～8時間ぐらいから急激に流出量が多くなる。これは、備讃瀬戸付近の諸島群がなくなることにより、燧灘側からの流出が円滑に行われたためである。つまり、紀伊水道側の海域は、一度津波が進入すると出ていきにくく、しかもそれが長時間にわたって継続する海域であるといえる。そして、備讃瀬戸付近の諸島群が燧灘から播磨灘に流出させようとする流れを阻害していることがわかった。

(2) 豊後水道側の津波流入・流出特性

紀伊水道側と異なり、豊後水道を北上する津波は、伊予水道→伊予灘→燧灘→伊予灘→豊後水道の順に伝播していく。流入量と流出量の増減傾向は、紀伊水道と変わ

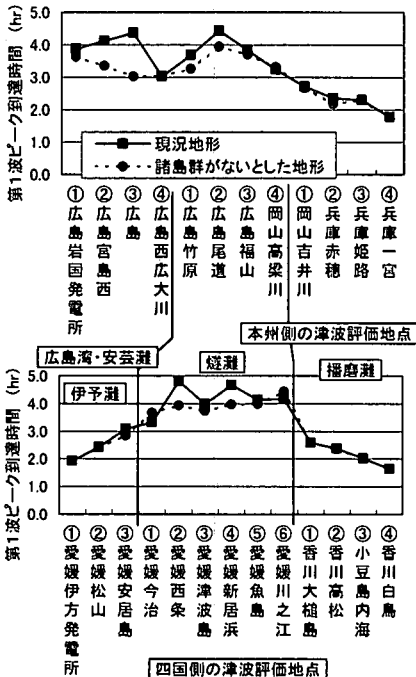
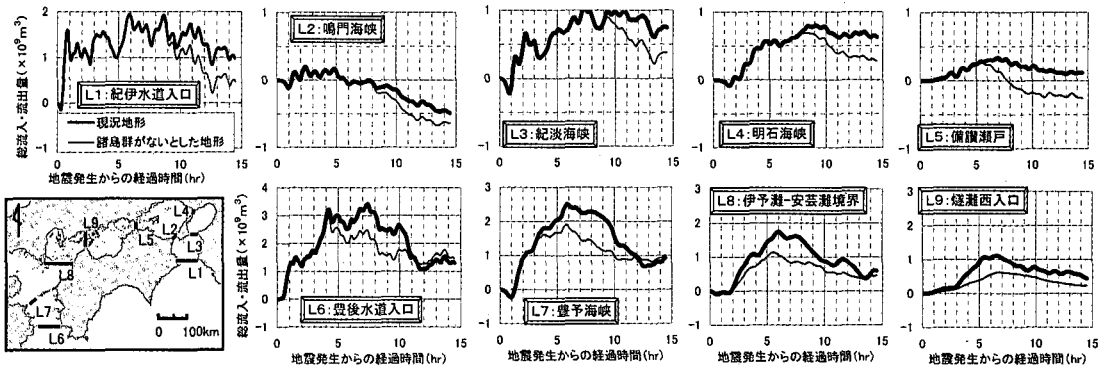


図-7 各海域における津波到達時間の分布



図—8 各海峡における総流入・流出量の時系列変化

らないが、水ボリュームは紀伊水道よりも多い。これは、海峡の幅と水道の平均水深がともに豊後水道の方が大きいことによる。しかしながら、豊後水道側の海域面積の方が、紀伊水道側よりも広いため、水ボリュームと津波高とが比例していない。諸島群がないとした場合では、紀伊水道よりも約5時間も早く、地震発生から2時間後程度から流出量の比率が多くなる。このことからしても、諸島群が伊予灘、広島湾、安芸灘、燧灘に与えている影響の大きさがわかる。

8. 結 言

本研究では、瀬戸内海における津波高や津波到達時間、流速特性に及ぼす海峡と諸島群の影響を考察した。以下に得られた主要な結果を要約する。

- 1) M8.4 級地震による津波が瀬戸内海に来襲すると、播磨灘は他の海域と異なり、津波高が 180 cm 程度と大きくなる。これは、伝播経路に障害となる諸島群がないこと、播磨灘の固有振動周期と入射する津波の周期との共振によるものであると考えられる。
- 2) 広島湾や安芸灘、燧灘の津波高が顕著でないのは、諸島群の遮蔽効果が大きいためである。
- 3) 紀伊水道と豊後水道から進入する津波は約 140 分後にはそれぞれ播磨灘と伊予灘沿岸部に到達するが、防予諸島、芸予諸島、および直島諸島、塩飽諸島によって津波の進行が妨げられ、160 分後に燧灘へ進入し、220 分後に燧灘の福山と新居浜を結ぶラインあたりで合流する。なお、2つの津波が出会うことによる津波高の増幅はみられない。
- 4) 諸島群の影響をみるために、諸島群がないとした場合との比較を行い、伊予灘、広島湾、安芸灘、燧灘では、津波高、津波到達時間、流速分布に諸島群が影響を与えていることがわかった。それに対して、播磨灘では、諸島群の影響よりも共振の方が大きく

影響していると考えられた。

- 5) 諸島群の狭窄部の流速は、1 m/s を越えるところが多く、こうした諸島近傍の養殖筏や他の係留施設の被害には注意を要する。また、紀伊水道側の流速は、諸島群の有無に関係なく豊後水道側よりも速い。これは、鳴門海峡や明石海峡からの勢いの強さが播磨灘、備讃瀬戸にまで及んでいること、播磨灘と比べて伊予灘、周防灘の方が広い海域面積と深い水深となっているため、流速が緩和されるためである。
- 6) 瀬戸内海は一度津波が進入すると、海峡や諸島群によって外洋に戻りにくい構造となっており、津波が滞留しやすく、海域全体の水位が長時間にわたって高くなるという特徴を持っている海域であると考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり、徳島大学大学院の杉本卓司氏、志方健仁氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。また、本研究は、科学研究費基盤研究(C) (2) 13680545 [代表者：村上仁士] による研究の一部であることを明記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 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.
- 小林修二 (2000): 四国における歴史津波の被害, 電力土木, pp. 108-112.
- 羽島徳太郎 (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, 地質 2, 41, pp. 215-221.
- 吉田和郎・村上仁士・島田富美男・上月康則・倉田健悟・一島 洋 (2002): 紀伊水道および豊後水道における津波の伝播・応答特性, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 296-300.
- Takahashi, T, M. Sakai, and Y. Kawata (2000): The damage potential of the inland sea of Japan by the nankai and tonankai earthquake tsunamis, Hazards 2000, pp. 147.