

瀬戸内海への津波伝播に及ぼす紀淡・鳴門・豊予海峡の影響

吉田和郎*・村上仁士**・上月康則***
大谷 寛****・宮本大輔*****

南海地震によって津波災害が危惧される瀬戸内海の津波の挙動は、その東西の入口となる紀淡・鳴門・豊予海峡から入る津波の特性により規定されることが考えられ、この影響を、各海峡部における津波の流入・流出特性、海峡部通過時における津波エネルギーの逸散特性から考察した。その結果、両水道に進入した津波の水量を、紀淡・鳴門海峡では約 43～97%、豊予海峡では約 20%低減すること、これら東西の海峡は、津波の卓越する周期成分波に対して優れたエネルギー低減効果を有し、瀬戸内海の津波高の抑制に寄与していること、東西全ての海峡では約 8～9 時間まで流入傾向を示し、瀬戸内海はこの時間までは水位の高い状態が続くことを示した。

1. 緒 言

瀬戸内海沿岸の歴史津波による被害状況に関する史料は少なく、瀬戸内海の津波の特性についてはほとんど未知といっても過言ではない。2003 年 12 月の中央防災会議において、瀬戸内海沿岸には次の南海地震津波時に浸水深が 2 m 以上にもなる地域があると予想され、多くの瀬戸内海沿岸地域が「東南海・南海地震防災対策推進地域」に指定された。著者ら (2003) は、これまで瀬戸内海沿岸域の津波高や津波到達時間に及ぼす島の影響、特に津波高については、図-1 に示すように島や岬によって地形的に多くの閉鎖水域が作られ、それらの複雑な固有振動が津波高に影響を及ぼすことを指摘してきた。

本研究では、瀬戸内海の津波の挙動は、その東西の入口となる東の紀淡・鳴門海峡ならびに西の豊予海峡から進入する津波の特性により規定されることが考えられるため、既に得られた知見を考慮しながら、これら東西の海峡が瀬戸内海の津波の諸特性に及ぼす影響を考察する。そして、ここでは特に、(1) 各海峡部における津波の流入・流出特性、(2) 海峡通過時における津波エネルギーの逸散特性について考察し、瀬戸内海へ進入する津波のメカニズム解明の一助とするものである。

まず、瀬戸内海における津波高、到達時間、最大流速の空間分布を津波伝播計算により求めた。そして、外洋から瀬戸内海へ流入・流出する各海峡における水塊の受け渡し特性を明らかにするために、海峡部における流入・流出量の変化について考察した。さらに、各海峡における入射波と透過波について津波のスペクトルを求め、その変化から海峡部でのエネルギー逸散特性を考察

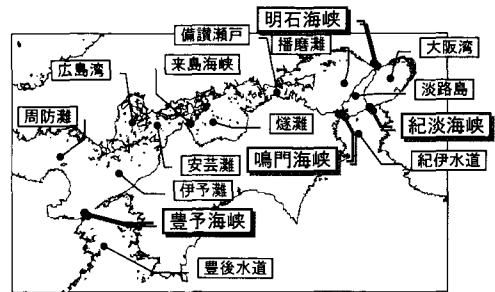


図-1 瀬戸内海全容図

した。

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、津波の規模、波源の違いを考慮して、宝永 (M 8.4, 1707 年)、安政 (M 8.4, 1854 年)、昭和 (M 8.0, 1946 年) の 3 つの南海地震津波を取り上げた。それは、四国の太平洋沿岸域ではこれらの津波の数値計算の妥当性は既に検証されているが、瀬戸内海では過去の史料の少なさから、数値計算の検証ができないためである。また、津波の規模や波源の違いによる影響についても考察するためでもある。計算条件は、陸域を完全反射とし、計算格子間隔 1,350 m, 450 m, 150 m, 50

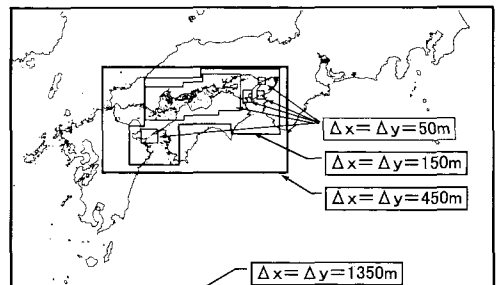


図-2 計算領域と計算格子配置図

- * 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 博(工) 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 修(工) 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

m, 計算時間 20 時間, 計算時間間隔 0.6 秒, 計算潮位 T.P.±0.0 m とした。また, 各地震の断層モデルは, 相田 (1981) のモデル (宝永: No. 29, 安政南海: No. 20', 昭和南海: No. 19) を採用し, Mansinha-Smylie (1971) の解析解で求めた地盤変位分布を初期水位分布として与えた。

3. 瀬戸内海沿岸部における津波高・津波到達時間の分布特性

(1) 歴史津波の再現

宝永, 安政, 昭和の 3 つの南海地震津波について再現計算を実施した。再現性評価の方法としては, 相田によって提案されている評価指標 K (対数幾何平均) と κ (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震による地盤の鉛直変位量を補正した。この際, 計算値と比較する痕跡値は, 値の信頼性と瀬戸内海に進入する津波特性を考慮して, 紀淡・鳴門海峡と豊予海峡に近い紀伊水道と豊後水道の東西両沿岸の痕跡値を採用した。瀬戸内海における歴史津波による推定値としては, 羽鳥 (1988) の研究があるが, 津波来襲時の瀬戸内海は満潮であったとして推定値を設定しており, やや不明瞭な点もあることから今回は対象としなかった。また, 宝永の場合, κ を 1.6 以下に納めると K が 0.9 程度となり, 痕跡値, さらに安政よりも小さめの値となったため, 宝永と安政の痕跡値の大きさの関係, 津波高のオーダーを合わせることに重きをおき, κ は 1.6 を若干上回ったが, K を安政と同等の 1.0 に近づけることを優先させた。

(2) 地震の規模・波源位置の違いによる津波高の分布

地震の規模, 波源が異なる宝永, 安政, 昭和の 3 つの南海地震津波における瀬戸内海沿岸の最高津波高を図-3 に示す。

本研究では, 瀬戸内海沿岸の津波高は, 多くのところで安政津波の方が宝永津波よりも大きくなり, その値は約 T.P.+0.5~1.5 m 程度となった。この値に瀬戸内海の満潮位約 1~2 m を加算すれば, 羽鳥 (1988) の推定値とほぼ同等の値となる。また, 津波高の「西低東高」という傾向は, 羽鳥 (1988) の結果と同じであったが, 「安政>宝永」という傾向については, 逆の結果となった。

紀伊・豊後水道沿岸においても安政の方が宝永よりも大きくなることがあり, これは, 津波の周期と水道, さらに各地の固有振動周期との応答関係が大きく影響しているものと思われる。瀬戸内海においても周期特性等が異なる津波に対してその入口にある海峡が影響を及ぼしていると考えられる。

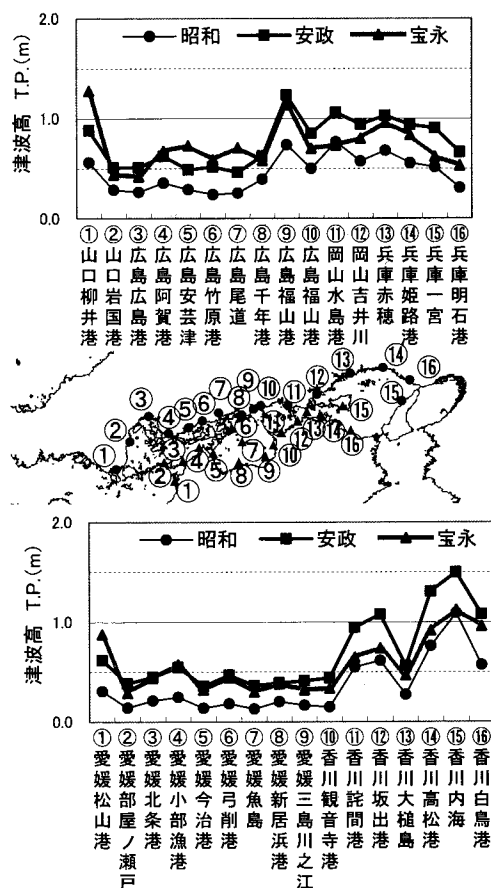


図-3 津波の違いによる瀬戸内海沿岸部における最高津波高

(3) 津波の規模・波源位置の違いによる津波到達時間の分布

本研究では水面が 20 cm 上昇した時間を津波到達時間として整理した。

津波到達時間については, 地震の規模, 波源位置の異なる 3 つの南海地震津波による変化はなかった。そして, 瀬戸内海沿岸には, 早いところで地震発生から約 90 分, 遅くとも約 260 分で津波の第一波が到達する。

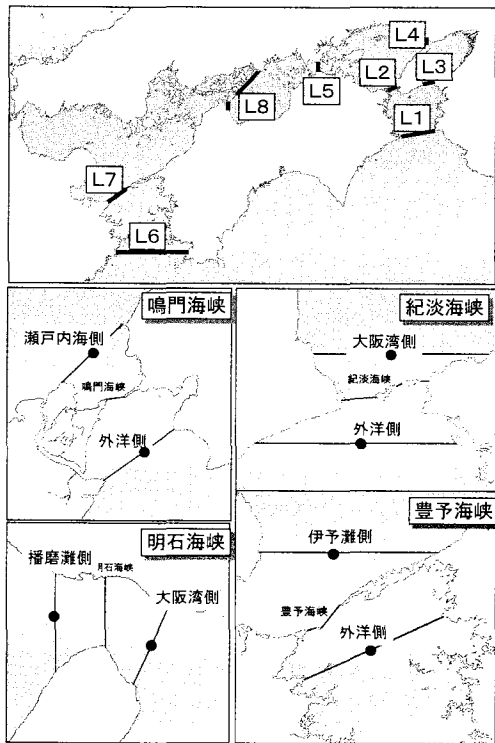
4. 海峡部における流入・流出量の変化とそれに及ぼす海峡の影響

(1) 計算方法

紀淡・鳴門・明石ならびに豊予海峡に, 図-4 に示すような評価ラインを設け, この評価ラインにおける流入量の累積, いわゆる総流入・流出量 Q を (1) 式より求めた。

$$Q = \int_0^t Q(t) \times \Delta s \times dt \dots \dots \dots (1)$$

ここで, $Q(t)$ は各評価ライン上の任意点での単位幅・



図—4 各海峡における流入・流出量評価ライン位置と津波波形成出力地点位置

単位時間あたりの流量 ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$), Δs は任意点間距離 (ここでは最小計算格子間隔: 50 m), t は計算時間 (0.6 s) である。また、「流入」を評価ラインから瀬戸内海方向の流れとして符号を「正 (+)」とし、「流出」をその逆の太平洋方向の流れとして符号を「負 (-)」とした。

(2) 紀伊水道側の海峡における流入・流出量の変化

紀伊水道側の紀淡・鳴門・明石海峡さらに備讃瀬戸を津波が通過することによる総流入・流出量の変化を図—5に示す。なお、ここでは安政南海地震津波の場合を取り

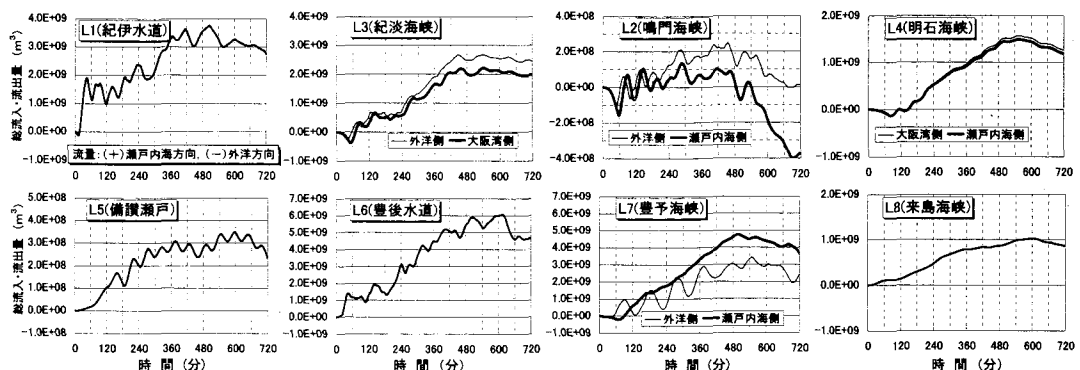
上げた。

紀伊水道には、最大で約 $3.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が日ノ御碕と蒲生田岬とを結んだ L1 ラインから流入する。そして、紀伊水道の最奥となる紀淡海峡と鳴門海峡の入口にそれぞれ、約 $2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ と約 $0.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が到達する。この紀淡・鳴門海峡に到達する水量は、紀伊水道入口に進入する水量の約 80% に相当する。この津波が紀淡・鳴門海峡を通過すると、その流入量はそれぞれ、約 $2.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ と約 $0.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ になり、通過前の流入量の約 20~60% が低減されたことになる。さらに、明石海峡には約 $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が到達し、そのうちの約 90% に相当する約 $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ が播磨灘に流入する。播磨灘には明石・鳴門海峡と合わせて約 $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が流入するが、備讃瀬戸から燧灘には、その約 20% に相当する約 $0.35 \times 10^9 \text{ m}^3$ しか流入しない。この残りの海水は、図—5 にも見られるように鳴門海峡から外洋側に流出している。これらのことを整理すると、紀伊水道に進入した津波は、そのほとんどが紀淡海峡から明石海峡を経由して播磨灘に流れ込み、そして鳴門海峡から外洋に流出するといった反時計回りの大きな流れが形成されていることがわかった。また、海峡では、形状損失、いわゆる水路の急縮によって流入量が抑制され、特に水路幅と水深の浅い鳴門海峡で大きな抑制効果が見られる。このことから、海峡における流入量の抑制効果は、水路幅と水深が大きく影響しているといえる。

(3) 豊後水道側の海峡における流入・流出量の変化

豊後水道側の豊予・来島海峡を津波が通過することによる総流入・流出量の変化も図—5に示す。

豊後水道には、紀伊水道の約 1.6 倍の最大約 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が流入する。そして、豊後水道の最奥となる豊予海峡の入口にはその約 60% に相当する約 $3.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が到達する。豊予海峡の外洋側のラインでは、約 70~90 分の周期で流入、流出を繰り返しているのに対して、豊予海峡を通過した後の伊予灘側のラインでは 8 時



図—5 流入量評価ラインにおける総流入・流出量

間までは常に流入傾向を示し、豊後水道に流入する海水量の約20%に相当する最大約 $4.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ の海水が流入する。これは、豊予海峡の外洋側では佐田岬によって津波が反射され、その影響を受けているものと考えられる。それに対して、豊予海峡を一度通過してしまうと、伊予灘や周防灘といった瀬戸内海側の大きな海域に吸収されてしまい、豊予海峡を挟んで外洋に戻るような水面勾配(伊予灘側の水位>豊後水道側の水位)に達しないためである。また、紀伊水道では紀淡海峡と鳴門海峡といった流入・流出の役目を分担する2つの海峡があるのに対して、豊後水道には出入口を共有する豊予海峡一つしかないことも流出を妨げる要因の一つになっている。

東西の全ての海峡において、約8~9時間まで流入傾向が強いが、それ以降は逆に流出傾向に移行する。いわゆる、瀬戸内海は8~9時間ぐらいいまでは水位の高い状態が続くといえる。

5. 海峡を通過することによる津波の周期成分波の変化とパワースペクトルの変化

(1) 紀淡・鳴門・明石海峡における津波の周期成分波の変化とパワースペクトルの変化

図-4に示す海峡を挟んで設置した津波波形出力点における津波波形をスペクトル解析し、紀伊水道側の紀淡・鳴門・明石海峡を津波が通過することによる津波の周期成分波のパワースペクトルの変化を図-6に示した。なお、ここでも安政南海地震津波の場合を取り上げた。

安政南海地震によって発生した津波が紀伊水道に進入した際の卓越する周期成分波は、約25分、48分、65分の波である。紀淡海峡では紀伊水道入口から大阪湾に津波が進行するにつれて津波のエネルギーが減衰するのに対して、鳴門海峡入口付近では48分と65分の周期成分波の津波エネルギーが増大する。これは、紀淡海峡と鳴門海峡付近の海岸地形の違いと、津波の周期と各海域の固有振動周期との応答特性によるものであると考えられる。紀淡海峡付近の海岸形状は比較的直線的であるのに対して、鳴門海峡付近の海岸形状は、兵庫県南淡町潮崎と門崎、徳島県鳴門市岡崎と大毛島孫崎からなるU字形地形となっており、津波が集中しやすくなっている。また、著者ら(2002)は、この海域では50~60分程度の周期成分波が増幅しやすいことを示している。これらのことから、鳴門海峡入口付近では卓越する長周期成分波の津波エネルギーが増大するものと考えられる。

紀淡・鳴門海峡を通過した後の各周期成分波のパワーは海峡通過前と比べて大きく低減される。特に、津波の卓越周期におけるパワーは、通過前と比べて紀淡海峡では約20~55%、鳴門海峡では約70~90%程度にまで低減

され、特に鳴門海峡のエネルギー逸散効果が高いことがわかった。これは鳴門海峡の開口幅が極端に狭く、加えて水深も浅いためである。また、鳴門海峡の水路延長が他の海峡と比べて長いこと、海峡中に島が点在し、複雑な海岸形状になっていることも影響していると考えられる。明石海峡では48分の卓越周期成分波のパワーは約90%程度低減されるが、逆に58分と73分の周期成分波のパワーが海峡通過前と比べて約1.5~6倍も増大し、特に58分の増幅率が大きくなっている。著者ら(2003)は、播磨灘における南北方向の固有振動周期が約55分程度であり、安政南海地震津波と共振しやすいことを示した。このことから、明石海峡を通過した津波は播磨灘の固有振動周期との共振によって海峡通過前の大阪湾側の津波と異なる卓越周期をもつようである。

(2) 豊予海峡における津波の周期成分波の変化とパワースペクトルの変化

豊後水道側の豊予海峡を津波が通過する際の津波の周期成分波のパワースペクトルの変化を図-7に示す。

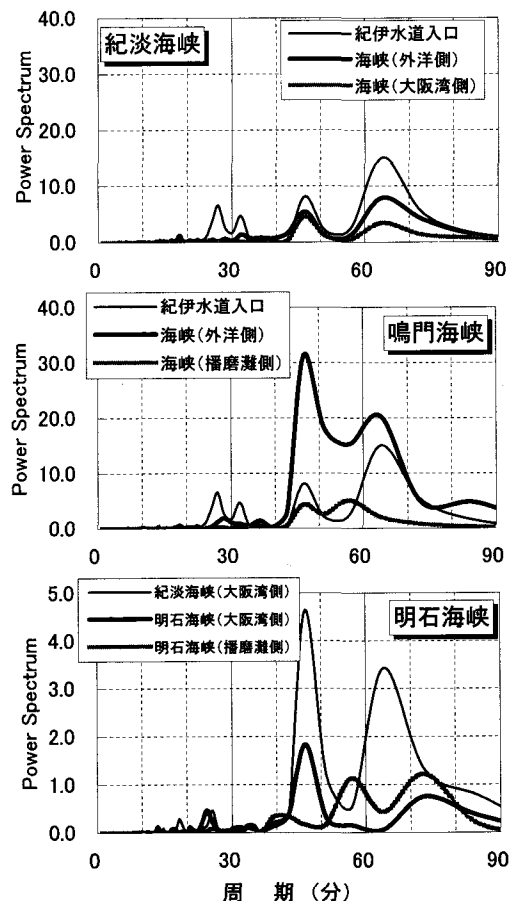


図-6 紀淡・鳴門・明石海峡を通過することによる津波の周期成分波のパワースペクトルの変化

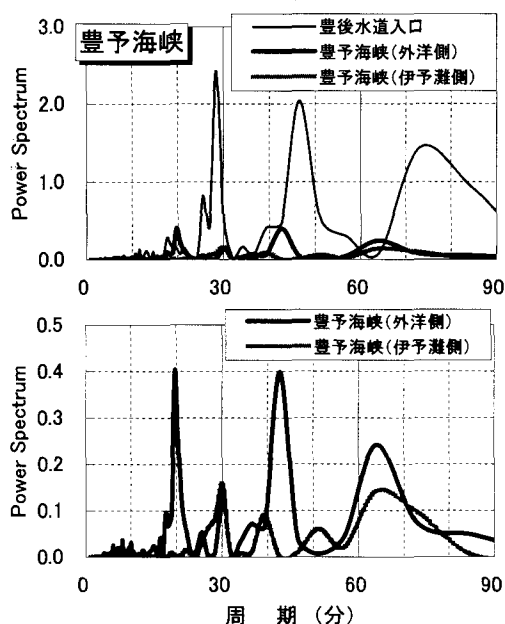


図-7 豊予海峡を通過することによる津波の周期成分波のパワースペクトルの変化

安政南海地震津波が豊後水道に進入した際の津波の卓越周期成分波は、紀伊水道側と若干異なり、約28分、48分、75分の波である。この津波が豊予海峡に到達するまでには津波のエネルギーのほとんどが逸散されている。これは、豊後水道の兩岸の複雑な海岸線と諸島群の影響により、津波が多重反射し、津波エネルギーが相殺したためと考えられる。豊予海峡の入口付近では、20分、30分、42分、65分の周期成分波のパワースペクトルが卓越するのに対して、津波が豊予海峡を通過すると最も卓越していた20分と42分の周期成分波のパワーのほとんどがカットされ、さらに次に卓越していた65分の周期成分波のパワーも約40%低減される。このように、豊予海峡は外洋側で卓越していた周期成分波のパワーを低減する効果が大きく、その結果として伊予灘沿岸部の津波高が小さくなる。

6. 結 語

本研究では、瀬戸内海に進入する津波が海峡を通過することによる流入・流出量の変化と津波エネルギーの逸散特性について考察した。以下に得られた主要な結果を要約する。

- 1) 瀬戸内海では、安政地震と同じような規模と波源域で津波が発生した場合、津波高が最も高くなる。津波到達時間については、地震規模、津波特性の異なる3つの南海地震津波による変化はなかった。

る3つの南海地震津波による変化はなかった。

- 2) 両水道に進入した津波の水量を、紀淡海峡と鳴門海峡は約43～97%、豊予海峡は約20%低減する。これは、海峡による水路の急縮と海峡部の複雑な海岸地形が影響を及ぼしている。また、海峡による効果の違いは、水路幅、水路延長、水路兩岸の地形の複雑さ、津波を受け入れることができる瀬戸内海側の海域の広さによるものであると考えられる。
- 3) 東西の海峡は、津波の全ての周期成分波のパワーを低減し、特に卓越する周期成分波に対して優れたエネルギー低減効果を有す。これにより、瀬戸内海における津波高が抑制されている。ここでも各水道、各海峡によって周期成分への作用の仕方が異なるが、これは水道の入口から海峡部に到達するまでに水道兩岸の海岸形状の影響によって変化する多重反射の程度が大きく影響しているものと考えられる。
- 4) 東西全ての海峡では約8～9時間までは流入傾向を示し、瀬戸内海はこの時間までは水位の高い状態が続くと予想され、注意を要する。

なお、各海峡におけるエネルギー逸散特性と、津波の周期と海峡の固有振動周期との振動応答特性との関係については、今後より詳細な検討が必要である。また、地震規模、波源位置の異なる3つの南海地震津波によるこれらの違いについても今後明らかにしていきたい。

最後に、本研究を行うにあたり、阿南工業高等専門学校建設システム工学科の島田富美男教授、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所の壹反田正好氏の協力を得た。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

- 相田 勇(1981): 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所集報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 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, 地震第2輯, 第41巻, 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, 海工論文集, 第49巻, pp. 296-300.
- 吉田和郎, 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, 海工論文集, 第50巻, pp. 321-325.
- Manshinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.