

紀伊水道および豊後水道における津波の伝播・応答特性

吉田和郎* ・村上仁士** ・島田富美男***
上月康則****・倉田健悟*****・一 島 洋*

今世紀半ばには高い確率で南海地震津波の発生が指摘されている。瀬戸内海に進入する津波の高さは大きくないが、水粒子速度や移動距離を考えれば、決して津波に対して安全な海域ではない。この瀬戸内海の津波危険度を評価するために、まず、津波の進入路となる紀伊水道と豊後水道への津波の進入特性を波向線追跡法で検討し、さらに、水道内の津波の応答特性を周期応答特性から検討した。その結果、両水道入口付近の海底谷や大陸棚と波源との位置関係によって両水道への津波伝播特性が影響を受けること、紀伊水道と豊後水道はともに、50 分と 22~25 分という特定の共振周期をもっていること、紀伊水道は入射波の周期にかかわらず増幅しやすいことを示した。

1. 緒 言

次の南海地震についての今後 30 年以内に起きる確率は 40%、50 年以内では 80%、規模も既往最大規模の M 8.4 という見解が国から示され、太平洋沿岸では地震対策に加えて津波の被害想定や対策検討が急務となっている。この南海道沿岸における歴史地震津波については、これまでに羽鳥 (1978, 1980, 1981) や相田 (1981), 都司 (1981), 村上他 (1996a) らによる調査研究がなされている。さらに、地震規模や津波の波源域が変われば、沿岸各地への津波の来襲特性も変わるという観点から、村上他 (1995) は波源域を、河田・小池 (1995), 村上他 (1996c), 山本他 (1999) は断層モデルを、それぞれ人為的に動かし、太平洋沿岸における津波の来襲特性を検討するとともに、沿岸集落の津波危険度を明らかにしている。これまでの調査研究の多くが、主として太平洋沿岸を対象としたものである。その一方で、歴史津波の研究では津波被害が報告されているものの、1946 年の南海地震津波では大きな被害を受けていない瀬戸内海沿岸では、津波に対する関心が薄い。しかしながら、図-1 から見られるように、津波が進入しにくい大阪湾や瀬戸内海沿岸においても、津波の水粒子速度やその移動距離は大きく、それらによって養殖筏や小型船舶等の係留施設に大きな被害が生じる可能性があり、津波に対する防災対策を講ずる必要がある。

本研究は、瀬戸内海沿岸における津波の伝播特性と津波危険度を明らかにする第一段階として、まず、その入口に位置する紀伊水道と豊後水道への津波の進入特性を検討するとともに、両水道内における津波の応答特性を

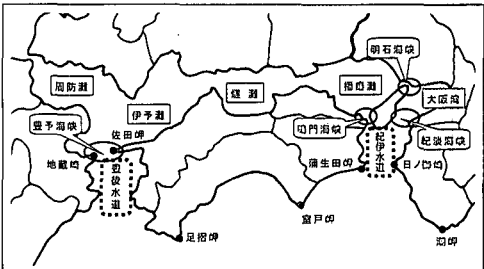


図-1 四国周辺地図

周期応答特性から考察するものである。

2. 紀伊水道および豊後水道における津波の伝播特性

2.1 津波数値計算の方法

津波の波源域から波峰線・波向線方程式を解き (村上ら, 1995), 波向線を追跡し、津波の集中、発散の空間分布により沿岸への津波の伝播特性を考察した。次の南海地震津波の波源は、これまでの歴史地震津波の波源と同じになるとは限らないし、地震規模や断層面の位置、さらに波源域が変われば沿岸に来襲する津波特性も変わるはずである。そこで、図-2 に示すように、波源域を南海トラフに沿って動かし、津波の両水道への進入過程を追跡する。ここでは、現在南海道沿岸の多くで計画津波とされている既往最大規模の 1854 年の安政南海地震津波 (M 8.4) を対象とした。安政南海地震津波の波源域モデルとしては、羽鳥 (1974) による波源域を基に、長径 126 km, 短径 70 km の楕円を仮定した。そして、波向線の先端が海岸線に到達した時点で計算を終了することにした。計算領域は、図-2 に示す瀬戸内海を除く四国沿岸と、紀伊半島沿岸を含む 515 km×263 km とし、計算格子間隔は全領域 1.25 km, 計算時間間隔は 1 秒とした。

さらに、図-3 および図-4 に示すように、各水道の入口付近に仮想波源を設定し、両水道に対して影響の大きな波源位置ならびに津波の伝播特性を考察する。

ここでは、過去豊後水道沖で発生し、四国沿岸に津波

* 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
** 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 建設システム工学専攻
**** 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
***** 正 会 員 理博 徳島大学助手 大学院工学研究科エコシステム工学専攻

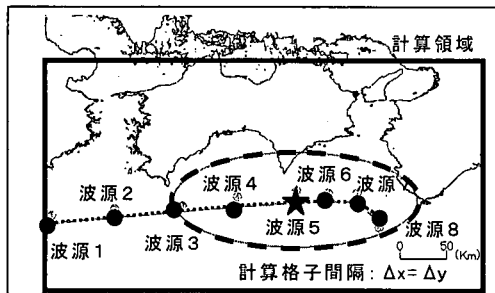


図-2 計算領域と8つの安政南海地震津波の波源域モデル

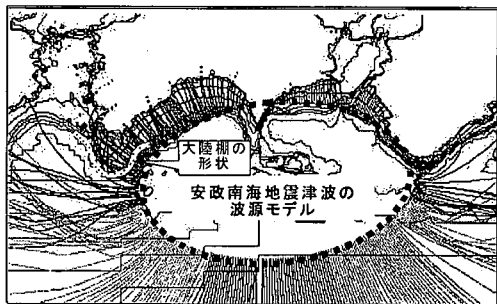


図-5 安政南海地震津波の波向線分布

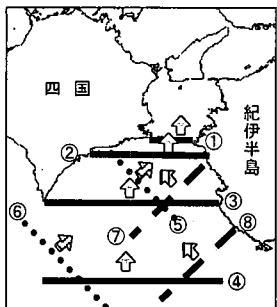


図-3 仮想波源ライン (紀伊水道)

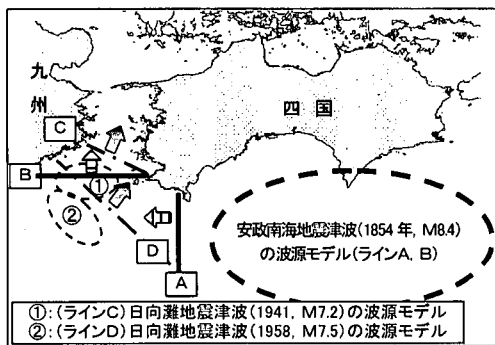


図-4 仮想波源ライン (豊後水道)

災害をもたらした日向灘地震津波にも着目し、その波源もモデル化した。

2.2 安政南海地震津波規模の津波の進入特性

図-5は、安政南海地震津波の波源域 (波源 No. 5) から発生する津波の波向線の分布を示したものである。

紀伊水道に向かう波向線は、室戸岬～蒲生田岬と潮岬～日ノ御崎の2つの沿岸に分岐して両沿岸を襲うという特徴が見てとれる。そのため、紀伊水道内へは津波のエネルギーが分散して広がることがわかる。

豊後水道については、波源の西端が豊後水道に達しておらず、波向線はほとんど土佐清水市の足摺岬から宿毛市の沖ノ島にかけての沿岸に屈折して集中し、豊後水道

へは津波のエネルギーが進入しにくいことがわかる。これは、図-4のライン A から発した波向線の分布からも確認できているが、足摺岬沖に発達した大陸棚の影響によるものと考えられる。

しかしながら、波向線をよくみると、和歌山県の日ノ御崎以北の由良や湯浅、高知県の宿毛などの両水道内の特定の集落にも津波が到達しており、これら地域が安政南海地震津波時に津波被害を受けた理由もこうした解析から説明できる。

2.3 紀伊水道への津波の進入特性

波源域が安政南海地震津波よりも東になる波源 No. 7 の波向線の分布を図-6に示す。

この場合、No. 5 の波源楕円の頂点 (楕円の短軸側の上端) よりも波源の頂点が紀伊水道入口に近づくと、波向線は紀伊水道の奥の紀淡海峡付近にまで到達する。このことから、紀伊水道に波向線が進入するかどうかは、紀伊水道の入口付近にある紀伊海底谷・日高海底谷・富田海底谷と呼ばれる3つのV字型海底地形 (以下、「3海底谷」と呼ぶ) の存在が大きな要因となりそうである。

図-7は、そのことを検証するために、仮想波源による波向線図を示したものである。

図から、3海底谷よりも南の波源 (Line ③) では波向線が紀伊水道には進入せず、それよりも北の波源 (Line ②) では紀伊水道にそれが進入することがわかる。しか

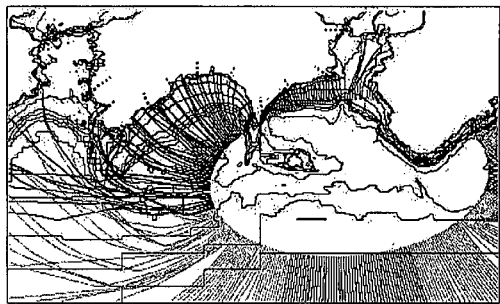


図-6 紀伊水道側に移動させたとき (波源 No. 7) の波向線

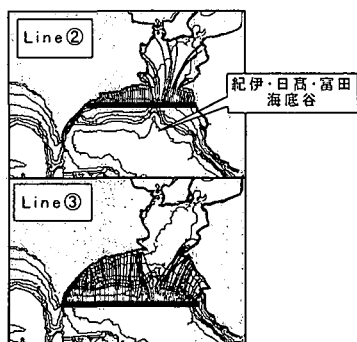


図-7 紀伊水道における仮想波源からの津波の進入特性

も、水道に進入した津波は特定の沿岸域に向かって進行する。すなわち、紀伊水道沿岸域の津波特性は、波源が3海底谷の北にあるかどうかということが重要な要因になるといえる。

2.4 豊後水道への津波の進入特性

波源域が安政南海地震津波よりも西になる波源 No. 2 の波向線の分布を図-8 に示す。

この場合には、波向線は豊後水道に容易に進入し、豊後水道の奥の佐田岬半島にまで到達している。これは、紀伊水道と異なり、海底地形の変化が比較的単調であることから、沿岸部を除いて津波は極端に屈折することなく、豊後水道の奥へと伝播できるからである。

さらに、図-9 は、豊後水道入口付近に設けた仮想波源からの波向線を示したものである。

津波が北方向に進むライン B では、図-8 でも見られたように津波が佐田岬半島に向かって直進し、豊後水道内の四国西沿岸と九州東沿岸にはほとんど向かうことはない。また、日向灘地震津波のように北東方向に進むライン C では、津波が北東方向の四国西沿岸に向かって直進し、九州東沿岸にはほとんど波向線が進行していない。

これは、紀伊水道と大きく異なる海底地形に起因する。

なお、本計算では、波向線が沿岸の大小の島に到達した段階で計算を終了しているため、豊後水道内の四国西沿岸や九州東沿岸にまで波向線が到達していない。しか

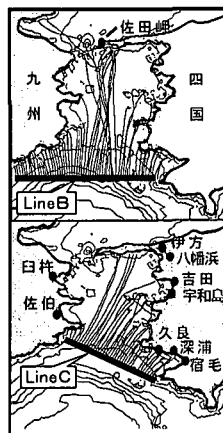


図-9 豊後水道における仮想波源からの津波の進入特性

しながら、実際には周期の長い津波は、容易に小さな島や半島を回り込み、その奥へと伝播していく。愛媛県の宇和島や伊方、三崎、高知県の宿毛等で津波被害の記録として残っているのはこのためである。

3. 紀伊水道および豊後水道における津波の応答特性

3.1 津波数値計算の方法

両水道に進入した津波は、水道内の地形に応じた振動特性を示す。そこで、水道内に進入する津波の周期応答特性について考察する。

図-10 に示す評価点での津波波形を数値計算により求めた。その津波波形についてスペクトル解析を行い、各水道の奥に位置する紀淡・鳴門海峡あるいは豊予海峡付近と波源のスペクトルの比から増幅率を求め、各周期成分波の応答特性を考察する。ここで与えた津波波形は、10 分から 60 分までの 5 分間隔の周期成分をもつ振幅 1 m、波高 2 m の正弦波 (計 11 ケース) とし、図-10 に示す波源ラインから与えた。津波伝播計算は、陸域を完全反射として Leap-Frog 差分法を用い、計算格子間隔 600 m、計算時間 6 時間、計算時間間隔 1 秒とした。

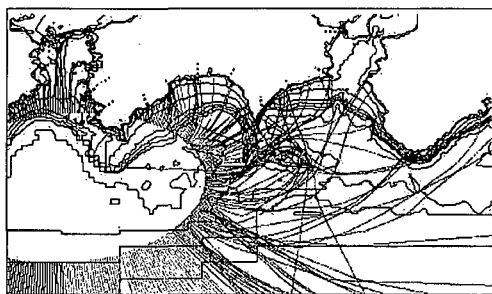


図-8 豊後水道側に移動させたとき (波源 No. 2) の波向線

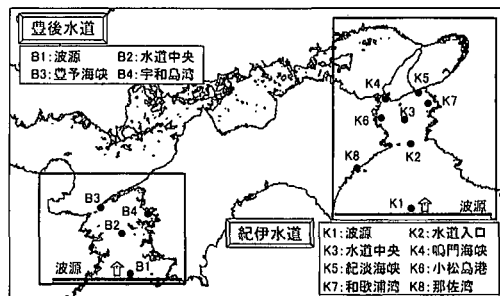


図-10 計算領域と津波評価点位置図

3.2 紀伊水道における津波の応答特性

図-11 に紀伊水道内における各周期成分波の増幅率の分布を示す。

この図から紀伊水道入口 K2, 湾奥部にあたる鳴門海峡 K4, 紀淡海峡 K3 とともに, 25 分と 50 分のピークをもち, これらが紀伊水道の固有振動周期であることがわかる。また, 水道入口 K2 では, 25 分の場合が 50 分よりも増幅率が大きくなるのに対して, 湾奥部でしかも紀淡海峡よりも開口幅の狭い鳴門海峡では, 50 分の場合が 25 分と比べて増幅率が大きくなるようである。

村上・高谷 (1977) は, 図-10 における K8 の那佐湾で観測されたカムチャッカ地震津波の観測記録から, スペクトル解析を行い, 那佐湾の共振周期が 21 分と 11 分程度という結果を得ている。この結果は, 水道入口 K2 よりも外洋側では 20~25 分周期の成分波が増幅されるという上記の傾向を裏づけるものと考えられる。

また, 紀伊水道沿岸の津波の応答特性を検証するために, 小松島港 K6 と和歌浦湾 K7 を例にとり, 各湾における各周期成分波の増幅率を, 図-12 に示す。

小松島港 K6 ならびに和歌浦湾 K7 の増幅特性は, 鳴門海峡や紀淡海峡の増幅特性と類似している。ここで, 10~25 分の周期成分波の増幅率が鳴門海峡や紀淡海峡の増幅率の 2 倍程度大きくになっている。村上・島田 (1979) は, 小松島港における副振動のスペクトル解析を行って, 小松島港の固有振動周期は 14 分程度という結果

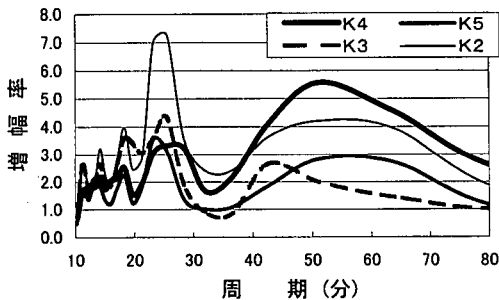


図-11 紀伊水道における各周期成分波の応答特性

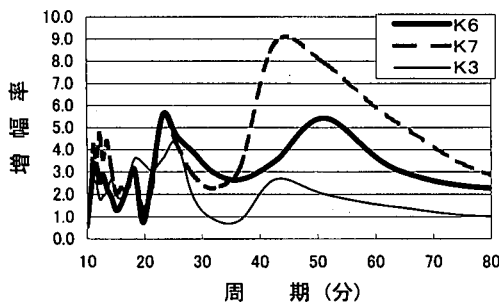


図-12 紀伊水道内の代表湾における各周期成分波の応答特性

を得ており, この周期で共振していることがわかる。そして, それ以上に, 紀伊水道の固有振動周期 50 分で共振し, 増幅率は大きくなっている。平石ら (1997) は, 著者らと同様に紀伊水道沖から周期を変えた波高 1 m の規則波を与え, 小松島と湯浅広での周期別の増幅率を求め, 42~46 分でも増幅が大きくなることを示しており, 本研究でもこの結果と同等の結果を得た。

これらのことから, 紀伊水道沿岸の個々の湾でも, 紀伊水道中央や海峡部と同じく, 25 分と 50 分付近の周期成分波の増幅が顕著であるという特性は変わらないことがわかる。すなわち, 紀伊水道の固有振動周期 50 分の方が, 湾の固有振動周期よりも増幅率が大きく, 湾の固有振動周期よりも紀伊水道全体としての共振の方が津波高さの増幅に影響を与えているということの意味している。そして, 蒲生田岬と日ノ御崎を境に, 外洋側と紀伊水道側とで増幅特性が異なり, 外洋では 25 分の固有振動周期が卓越し, 紀伊水道内では湾の固有振動周期や紀伊水道の短い固有周期 25 分でも増幅するものの, それ以上に紀伊水道の長い固有振動周期 50 分の増幅が卓越し, それぞれの沿岸の津波高さに影響を与えていることが明らかとなった。

また, 特筆すべきは, 紀伊水道に津波が進入すると水道内では共振周期以外でも増幅率が 1 以上となることである。これは, 紀伊水道内に津波が進入すると, 増幅し津波高さが大きくなることを意味している。

3.3 豊後水道における津波の応答特性

図-13 に豊後水道内における各周期成分波の増幅率の分布を示す。同図には, 湾地形の影響を見るために, 宇和島湾 B4 を例にとり, そこでの増幅率の変化も併記した。

湾奥部にあたる豊予海峡 B3 における振動特性を見ると, 25 分および 50 分で増幅率は極値をもつが, その値は, 最大でも入射波と同程度であり, その他の周期成分はむしろ減衰している。しかしながら, 湾奥部に近い宇和島湾 B4 では 50 分の周期で極値をもち, さらに, 22 分あたりにも極値をもつことから, これらが豊後水道の固

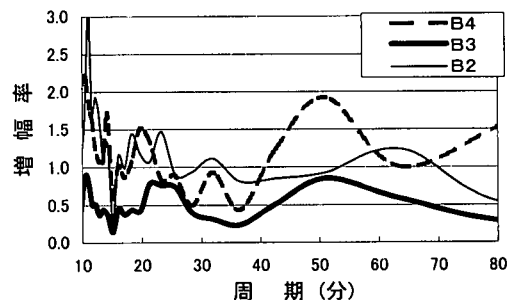


図-13 豊後水道における各周期成分波の応答特性

有振動周期といえそうである。

これらに現象についてすこし考察してみたい。豊予海峡は紀淡海峡や鳴門海峡と比べて開口幅が広く、津波エネルギーが瀬戸内海に伝播しやすいとも考えられ、これらの影響を受けているかもしれない。また、宇和島湾の固有振動周期を単純化した Merian 周期で求めると、55 分、19 分という結果が得られる。この周期は図-13 でみられた豊後水道の固有振動周期とほぼ同じであり、今後、より詳細な振動モードの解析を行う必要がある。

4. 結 言

本研究では、近い将来発生する南海地震津波について波源を各種変え、紀伊水道および豊後水道への津波の伝播特性および両水道内の津波の周期応答特性について考察した。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- 1) 安政南海地震津波を再現し、紀伊水道と豊後水道ともに、その入口にある海底谷や大陸棚の影響を受け、蒲生田岬以南と日ノ御崎以南の沿岸と足摺岬～宿毛にわたる沿岸にそれぞれ津波が集中し、両水道内に津波の波向線が進入しにくいメカニズムを示した。
- 2) 紀伊水道への津波の進入には、紀伊水道入口付近の紀伊・日高・富田海底谷が影響しており、波源がこの海底谷の北にある場合に津波の波向線が進入しやすくなることを示した。
- 3) 豊後水道は、津波波源の中心が足摺岬よりも西になるとき、あるいは日向灘地震のような波源で津波が発生した場合、容易に津波の波向線が豊後水道内に進入する。そして、単調な海底地形の影響から進入波は、屈折変形を受けることなく直進し、そのまま沿岸部に到達することを示した。
- 4) 紀伊水道は、入射波の周期にかかわらず増幅しやすく、さらに、25 分と 50 分の共振周期をもっている。また、紀伊水道沿岸における津波高さは、湾の固有振動周期よりも紀伊水道の 50 分の固有振動周期の影響を強く受けることがわかった。
- 5) 豊後水道では、紀伊水道のように全周期において増幅するのではなく、22 分、50 分の特定の周期で共振しやすいことがわかった。

以上のような結果を得たが、今後はさらに両水道内の卓越振動モード解析や海峡部の津波の挙動についても詳細な現象の解明が必要である。

最後に、本研究を行うにあたり、元徳島大学大学院の

西川幸治氏（現（株）フジタ建設コンサルタント）、元学部学生の伊藤暢規氏（現 日本道路㈱）、井上忠氏（現ニタコンサルタント（株））の協力を得た。ここに記して謝意を表する。また、本研究は科学研究費基礎研究 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、謝意を表する。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1981): 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所彙報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 河田恵昭・小池信昭 (1995): 危機管理と津波避難マニュアル, 京都大学防災研究所年報, 第 38 号, B-2, pp. 1-55.
- 島田富美男・森 泰宏・酒井哲郎 (1984): 大阪湾における津波変形の数値計算モデルの開発, 第 38 回年次学術講演会講演概要集, pp. 351-352.
- 都司嘉宣 (1981): 高知県地震津波史料, 防災科学技術研究資料 第 57 号, 科学技術庁 国立防災科学技術センター, 253 pp.
- 羽鳥徳太郎 (1974): 東海・南海道沖における大津波の波源, 地震, 第 2 輯, 第 27 巻, pp. 10-24.
- 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.
- 平石哲也・柴木秀之・原崎恵太郎 (1997): 想定南海地震津波における共振周期特性の重要性について, 海岸工学論文集 第 44 巻, pp. 286-290.
- 村上仁士・伊藤禎彦・山本尚明・佐藤広章 (1995): 四国沿岸域の津波危険度に関する一考察, 海岸工学論文集 第 42 巻, pp. 361-365.
- 村上仁士・伊藤禎彦・山本尚明・佐藤広章 (1996c): 紀伊半島・四国沿岸域における津波危険度に関する考察, 海岸工学論文集 第 43 巻, pp. 316-320.
- 村上仁士・上月康則・倉田健吾・杉本卓司・吉田和郎 (2001): 紀伊水道・豊後水道における安政南海地震津波の進入特性, 歴史地震, 第 17 号, pp. 110-116.
- 村上仁士・島田富美男 (1979): 現地資料および実測に基づく副振動の特性に関する考察, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 129-133.
- 村上仁士・島田富美男・伊藤禎彦・山本尚明・石塚純一 (1996a): 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, 15-1, pp. 39-52.
- 村上仁士・高谷博文 (1977): 那佐湾の湾水振動特性, 第 32 回年次学術講演会講演概要集 (第 2 部), pp. 63-64.
- 山本尚明・村上仁士・島田富美男・上月康則・佐藤広章 (1999): 沿岸域集落の津波危険度に関する簡便的評価法, 海岸工学論文集 第 46 巻, pp. 371-375.