

四国における津波越波の危険度に関する考察

徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻*
株式会社 四国総合研究所**

佐藤広章*, 村上仁士*, 上月康則*, 倉田健悟*, 山本尚明**, 西川幸治*

Consideration on tsunami risk for wave overtopping in Shikoku Island

Hiroaki Sato*, Hitoshi Murakami*, Yasunori Kozuki*, Kengo Kurata*
Naoaki Yamamoto** and Kouji Nishikawa*

Department of Ecosystem Engineering, University of Tokushima
2-1 Minami-Josanjima, Tokushima 770-8506, Japan*
Shikoku Research Institute Inc.
2109-8 Yashimanishi-Machi, Takamatsu, Kagawa 761-0192 Japan**

In this study, tsunami risk in the coastal villages of Shikoku Island was considered by tsunami arrival time, tsunami height and wave overtopping height obtained using the combination of a wave source model with a fault one.

1. 緒言

四国の沿岸集落では、南海トラフ沿いで発生する M8.0 クラス以上の巨大地震に伴う津波により幾度となく甚大な被害を受けてきた。江戸時代以降、慶長(1605)、宝永(1707)、安政(1854)、昭和(1946)と四度の大津波に見舞われている。南海地震は 100~150 年間隔で周期的に起き、次の南海地震の発生時期は 21 世紀の前半ともいわれ、そのため早急な津波防災対策が必要とされる。

具体的に津波防災対策を立てるには、まず対象とする地域の津波危険度を把握しておかなければならない。歴史史料をもとにした実測より求められる南海津波の津波高は、津波来襲の痕跡を示すものであり、それら自身、当該地域の津

波の危険度を表す有効な一つの指標となる。

最近では、過去の南海地震の破壊過程は画一的ではないと考えられており、さらに地震の発生場所が変われば予想される津波高も変わることから、各集落でこれまで記録されている津波の痕跡値が、今後起こりうる最大の津波高を表しているとはいえない。すなわちこれまでの歴史地震による津波高の評価のみならず、それ以外の発生機構、発生位置で起きる地震による津波高も予測し、それらも含めて防災対策に取り入れることが重要といえる。

津波の危険度の予測には、津波数値シミュレーションが一般に用いられる。この方法は、得られた計算結果の妥当性の

検証が不可欠であり、その精度は古文書などの史料やそれに基づく現地調査による津波高の資料をどれだけ取得できるかに依存している。これまで、羽鳥(1978, 1980)や都司(1981)らの精力的な研究をもとに、村上・他(1996a)も四国沿岸における歴史津波の津波高を再評価する調査を行ってきた。また村上・他(1996b)は四国の各沿岸域に対し、既存断層モデルの適用性の検討も行ってきた。このように数値シミュレーションの妥当性が検証されれば、まだ史料が発掘されていない地域の津波高の推定もでき、その値をもとにその地域の新たな津波史料を現地にて再発掘することも可能となるかもしれない。

地震の規模や波源域が変われば、来襲する津波高も変わることから、あらかじめ地震発生位置(断層の大きさ、波源域)を数多く想定し、考え得る最大の危険度を推定しておくことが、未来の津波に対する最も理想的な予測手段となるはずである。村上・他(1995)は、波源域モデルを、河田・小池(1995)、村上・他(1996c)は、断層モデルを人為的に動かし、任意の位置を発生源にもつ地震に対する沿岸集落での津波の危険度評価をすでに行っている。しかし、後述するように各方法にも一長一短がある。

本研究では、これらの評価方法を参考にしつつ、新たな津波波源移動手法を提案する。この手法にも多くの制約はあるが、津波到達時間、最大津波高、堤防を越流する水位(以下、越波高)を求め、四国沿岸集落における津波危険度を考察する。

2. 津波数値計算

2.1 断層モデル

2.1.1 計算条件および計算方法

計算領域は図-1 に示したように、瀬戸内を除く四国沿岸と紀伊半島沿岸を含む $515\text{km} \times 263\text{km}$ とする。計算格子間隔は全領域で 1.25km 、計算時間は3時間、計算時間間隔は1秒とし、陸上での津波の遡上は考えない。また、初期水位は T. P. +0m とする。

解析に用いる基礎方程式は、水深が 50m 以上の海域では、線形長波方程式を、それ以浅の海域では、摩擦項と移流項を考慮した非線形長波方程式を用いた。

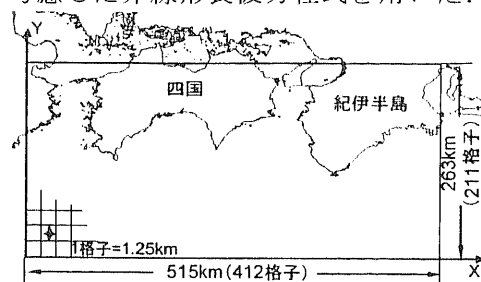


図-1 計算領域

Fig.1 Region of calculation

2.1.2 既存断層モデルの移動の問題点

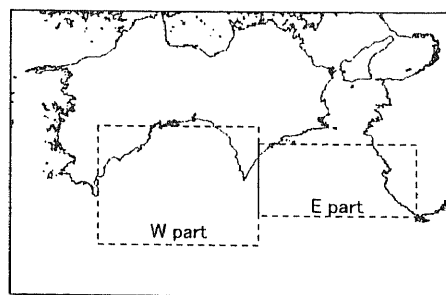


図-2 断層モデル

Fig.2 Fault Model

図-2 のように、数値計算に用いる断層モデルは、過去に各地で記録された津波の水位を再現しうるように地震の断層を簡易的にモデル化したものである。断層モデルを用いて計算された津波高

の誤差を補正するために、相田(1977)の対数幾何平均K値, 対数幾何標準偏差値 κ 値が使われてきた。これらは津波高の計算値と現地観測値の比より得られるため、既存の断層モデルを移動させた場合には、津波高の補正ができない。

また、発生する津波の高さは海底地盤の鉛直方向変位に大きく左右されることから、数値計算上試行錯誤的に想定された断層モデルを海底地形の異なる場所へと移動させること自体、地震学上の問題がある。河田・小池(1995)、村上・他(1996c)は、南海トラフ沿いで断層モデルを移動させているが、この点で必ずしも十分ではないと考えられる。

2.2 波源域モデル

2.2.1 計算条件および計算方法

図-3 は、地震の余震域を津波波源として楕円形で表した津波の波源域(以下、波源域モデル)から、波向線・波峰線方程式を用いて求められた波向線の一例を示したものである。本報では、計算領域および計算格子間隔は、断層モデル計算と同じにとり、計算は波向線の先端が陸岸にとどいた時点で打ち切ることにした。

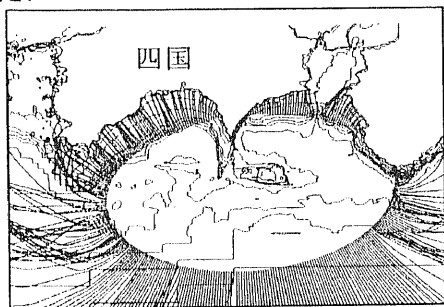


図-3 波向線
Fig.3 Wave rays

2.2.2 波源域モデル計算の特性

図-4 に本報で用いた安政南海津波の波源域とその移動基準を示す。図中の破線は、南海トラフに沿う過去の歴史津波の震源を結ぶ線であり、線上の番号は波源を8通り変える場合の各波源の中心位置を示す。つまり、線上の5の位置を中心座標に持つ波源をラインに沿って5の位置から西に4, 3, 2, 1, 東に, 6, 7, 8と移動させ、波源の移動にともなう領域ごとの津波波高(津波波高は津波の全振幅であり、津波高は平均海面上の津波の高さであることに注意)を求めた。

波源域モデルは、断層モデルを用いる場合と異なり自由に波源を移動させることができ、波向線の集中・発散の空間分布より陸域に入射する津波の波高が容易に計算できる。その反面、陸域での津波の反射や砕波した場合の計算ができないため、陸岸での津波高や陸上での詳しい津波水理量を求めることができない。

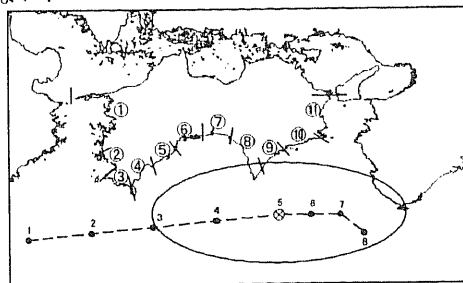


図-4 波源域モデルの移動

Fig.4 The transfer of the wave source model

3. 断層モデルと波源域モデルの組み合わせによる津波高の予測法

断層モデル、波源域モデルともに、単一モデルの移動による数値計算には一長一短があることから、本報では、各地域の津波の水理量は断層モデルを用いた計算で求め、波源の移動は波源域モデルの移動より求まる領域ごとの波高変化率で考慮する。

ここで図-5 を用い、波源域モデルを 5 から 4 に移動させたときの領域⑦(四国沿岸を図-4 のように①～⑪領域に分割したその一つ)における波高変化率について説明する。

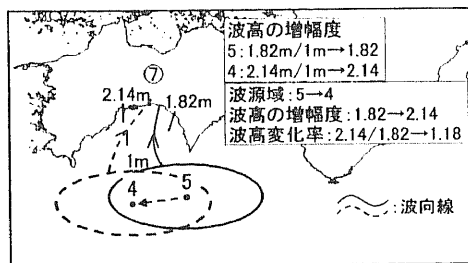


図-5 領域⑦における波高変化率

Fig.5 The rate of change in wave height for region 7

波源域モデル周上から発せられた直後の波向線の波高(初期波高)は単位高さ 1m で与えられており、沿岸の領域⑦に入射する直前の波高を初期波高で除せば、陸域直前で波高の増幅度が得られる。図では、波源が 5 の場合、波高の増幅度は 1.82、波源が 4 の場合は 2.14 となる。この結果から、津波波源の 5 から 4 への移動により領域⑦へ入射してくる波高が 1.18 倍になると解釈し、これを波高変化率 1.18 とする。

まとめると、まず安政南海地震の相田の断層モデル No. 20 (相田, 1981) を用いて津波の再現計算を行い、K 値で補正した津波高を地域ごとに求める。次いで

求めた補正津波高に前述の波高変化率を乗じ、波源移動後の津波高とするものである。この際注意すべきことは、図-6 のように断層モデル計算による海底地盤変動域と波源域モデル No. 5 による津波波源の位置関係に整合性がなければならないということである。

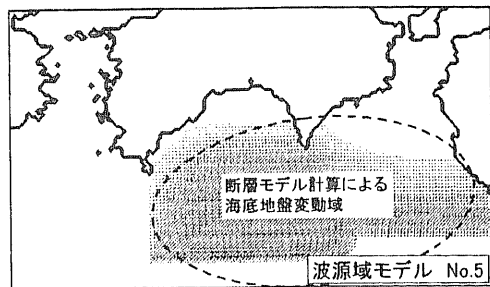


図-6 断層モデル計算による海底地盤変動域と波源域モデル No. 5

Fig.6 Distribution of the submarine crustal deformation accompanied by the Ansei fault model and the wave source model No.5

以上が、津波高に関する組み合わせの方法であるが、津波到達時間に関しても同じ方法を用いている。なお、図-7 が今回対象とした安政南海地震の断層モデルとそのパラメータ、表-1 が断層モデル計算より得られた領域ごとの K 値、 κ 値、表-2、3 が波源モデル移動による領域ごとの波高変化率および到達時間変化率である。

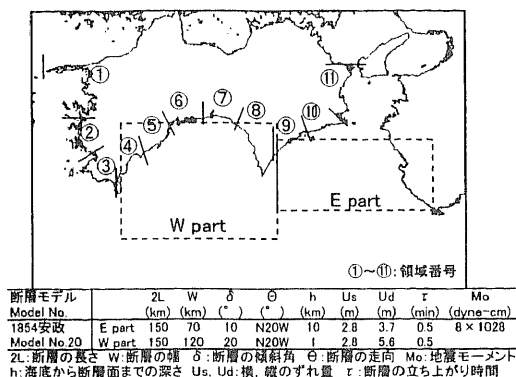


図-7 安政南海地震の断層モデルとパラメータ

Fig.7 Fault model and parameters of the Ansei Nankai Earthquake

表-1 津波高の補正值

Table1 Correction values of tsunami height

	対数幾何平均(K)	幾何標準偏差(K)
領域①	2.65	1.44
領域②	2.00	1.44
領域③	1.32	1.43
領域④	0.81	1.44
領域⑤	2.03	1.27
領域⑥	0.92	1.23
領域⑦	0.88	1.24
領域⑧	1.04	1.00
領域⑨	1.39	1.20
領域⑩	1.68	1.56
領域⑪	0.57	1.17

表-2 領域ごとの波高変化率

Table.2 The rates of change in wave height for each region

	波源3	波源4	波源5	波源6	波源7
領域①			1.00		
領域②	0.40	0.36	1.00	0.08	0.20
領域③		0.70	1.00	0.56	0.30
領域④		0.51	1.00	0.77	0.64
領域⑤	0.55	0.53	1.00	0.96	0.73
領域⑥	1.07	0.72	1.00	1.17	1.07
領域⑦	0.94	1.11	1.00	0.83	1.06
領域⑧	2.20	1.20	1.00	1.40	1.80
領域⑨	0.42	1.54	1.00	1.08	1.04
領域⑩	0.43	0.74	1.00	1.13	1.65
領域⑪		0.94	1.00	1.17	1.72

表-3 領域ごとの到達時間変化率

Table.3 The rates of change in tsunami arrival time for each region

	波源3	波源4	波源5	波源6	波源7
領域①			1.00		
領域②	0.24	0.67	1.00	1.30	1.67
領域③		0.19	1.00	1.34	1.59
領域④		0.29	1.00	1.34	1.51
領域⑤	0.39	0.45	1.00	1.27	1.49
領域⑥	0.92	0.79	1.00	1.17	1.31
領域⑦	1.16	0.95	1.00	1.15	1.38
領域⑧	1.24	0.91	1.00	1.19	0.85
領域⑨	4.23	1.83	1.00	1.21	1.72
領域⑩	2.68	1.51	1.00	0.99	1.12
領域⑪		1.47	1.00	1.09	1.45

4. 沿岸集落における津波危険度に関する考察

図-8, 9, 10 は、それぞれ到達時間分布、最大津波高分布、越波高分布を示したもので、上図は波源域モデルの移動を考慮して得られた本手法によるもの、下図は、断層モデルを移動させて得られたこれまでの手法に基づくものである。なお断層モデルの移動は、本報の波源域モデルの移動基準と相対的な位置関係を保つように行い、移動後の津波高はK値で補正している。

本手法では、波源域を移動させても豊後水道に波向線が入射しないことから、愛媛沿岸領域（領域①）は、再現計算（安政南海地震発生位置での断層モデル計算）結果のみの表示となっている。また、図中の黒点は各沿岸集落を、点線は県境を表している。波源域モデルは8通りの波源位置を想定し、各モデル位置における波高変化率、到達時間変化率を求めたが、四国沿岸域の津波危険度が高くなる波源の位置は破線ライン3～7の位置であると考えられるため、以下にはこれら5地点における結果を載せた。

4.1 津波到達時間

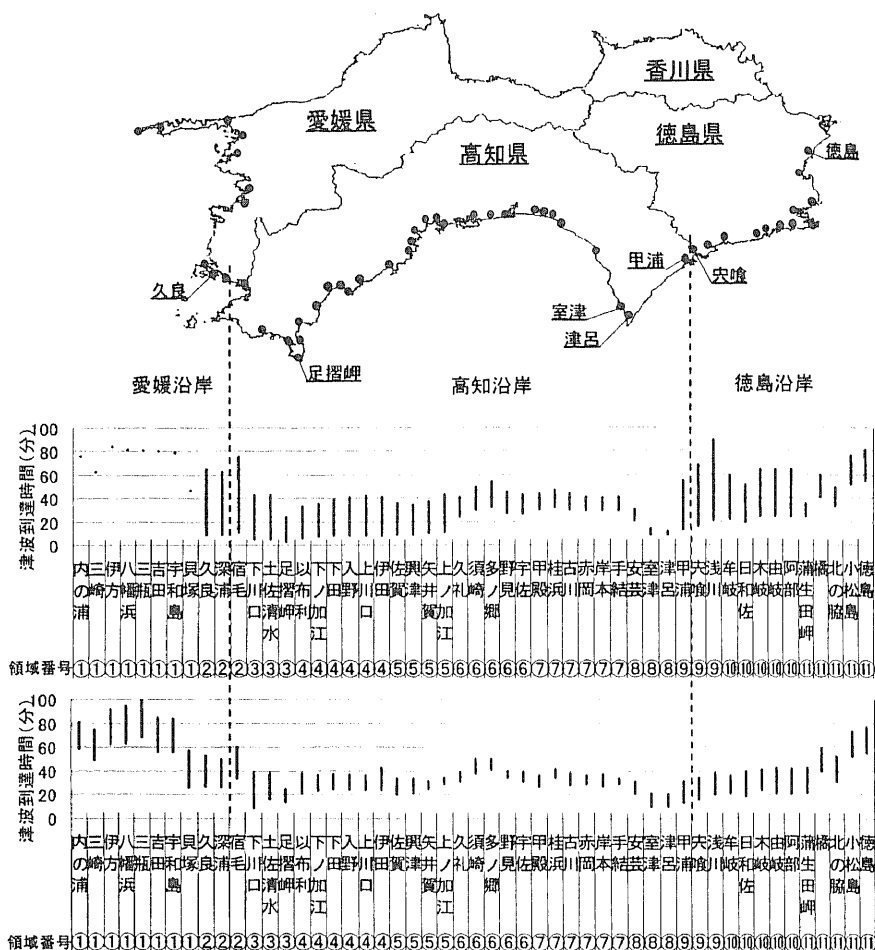


図-8 沿岸集落における波源移動後の津波到達時間分布
Fig.8 Distribution of tsunami arrival times for the coastal villages

本手法とこれまでの手法を比較すると、高知沿岸の室津から徳島沿岸の徳島までは、津波の最短到達時間がほぼ一致し、室津、津呂は地震の位置に関係なく震後 10 分前後、徳島南岸集落は 20 分前後で津波が到達する。また、高知沿岸集落の到達時間の分布はともに似た傾向を示すが、愛媛沿岸の久良～高知沿岸の上ノ加江までは本手法の方が早く、より危険側を示している。特に足摺岬周辺の集落では地震直後に津波が到達する。

全体的な津波の到達時間は、本手法、これまでの手法ともに似た分布を示すことから、本手法でより危険側をとる久良～下川口集落に注意すれば、どちらの方法を用いて予測をしても大きな違いはないと考えられる。ただし本手法では、愛媛沿岸集落の結果が得られないことから、この周辺の危険度予測は、現況では断層モデルを移動させる手法を用いざるをえない。

4.2 最大津波高

図-9 は、沿岸集落の最大津波高を示したものである。本手法とこれまでの手法を比較すると、高知沿岸集落の宇佐、多ノ郷、須崎においてどちらの手法も最大津波高が8~10mに達しており、特に津波高が高い集落であることがわかる。ただし、本手法の方が、安芸~津呂間において最大津波高は高くなり、より危険側を示している。また、徳島南岸周辺の集落は、地震源の移動により津波高が大きく変わり、場合によっては10mをはるかに越える津波高となる集落もある。

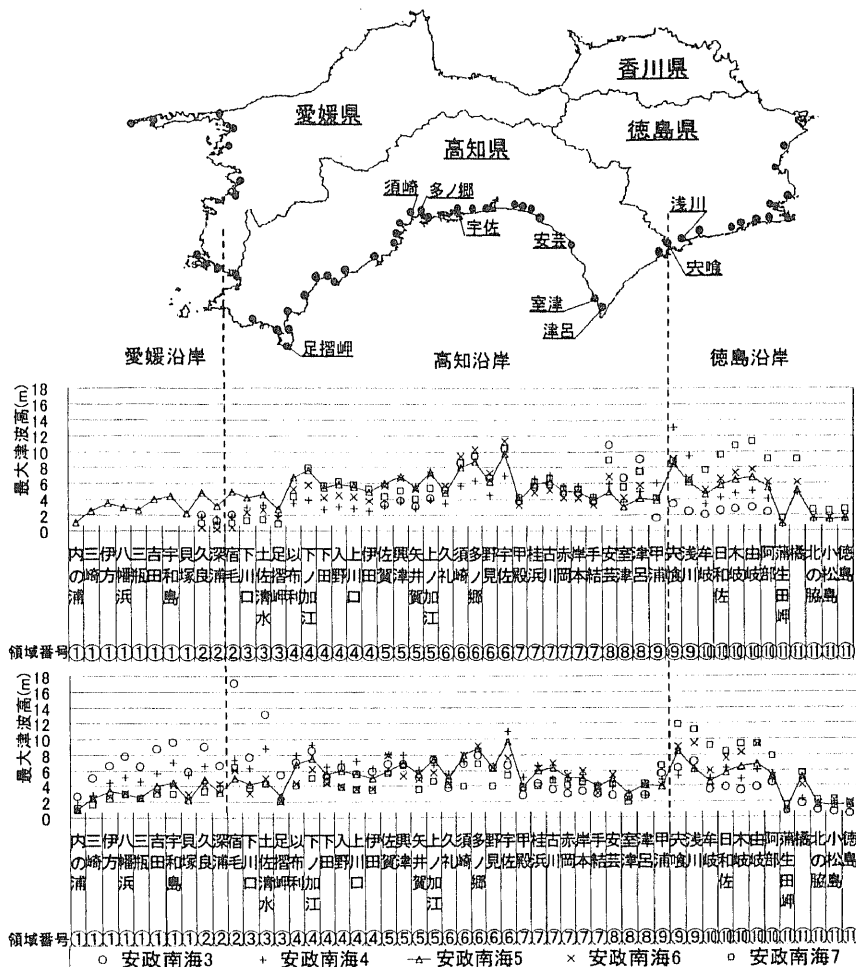


図-9 沿岸集落における最大津波高分布

Fig.9 Distribution of maximum tsunami heights for the coastal villages

本手法とこれまでの手法では、同じ集落であっても津波高が最大となる津波波源の位置は必ずしも一致していない。例えば徳島南岸の宍喰、浅川において最大津波高となる地震源の位置は、本手法では4の位置、これに対し、これまでの手法では7の位置である。ただし、想定される最大の津波高の分布は、全体的によく似た傾向を示すことから、先の津波到達時間と同様にどちらの手法を用いても良いように考えられる。なお、本手法の津波高は波高変化率に依存していることから、隣り合

った領域であっても波向線の集中しやすい領域と集中しにくい領域では、津波高が大きく異なることに注意が必要である。

4.3 越波高

図-10 に各集落の越波高を示す。本手法とこれまでの手法を比較すると、高知沿岸集落の多ノ郷、宇佐、徳島南岸の宍喰、浅川は、どちらの手法でも地震の場所にかかわらず津波が堤防を越波することがわかる。特に地震の位置によって、宇佐、多ノ郷で5~6m、宍喰、浅川で6mを越える可能性がある。また徳島南岸は、地震の位置によって越波高が大きく変わることから、予測の難しい集落といえる。

先の津波高と同様に、同じ集落であっても津波が越波する地震源の位置は、本手法とこれまでの手法において必ずしも一致していない。ただし、どちらの手法でも越波をする集落は限られ、その高さもよく似ていることから、高知、徳島沿岸に限り、越波の可能性の高い集落を限定できるのではないかと考えられる。

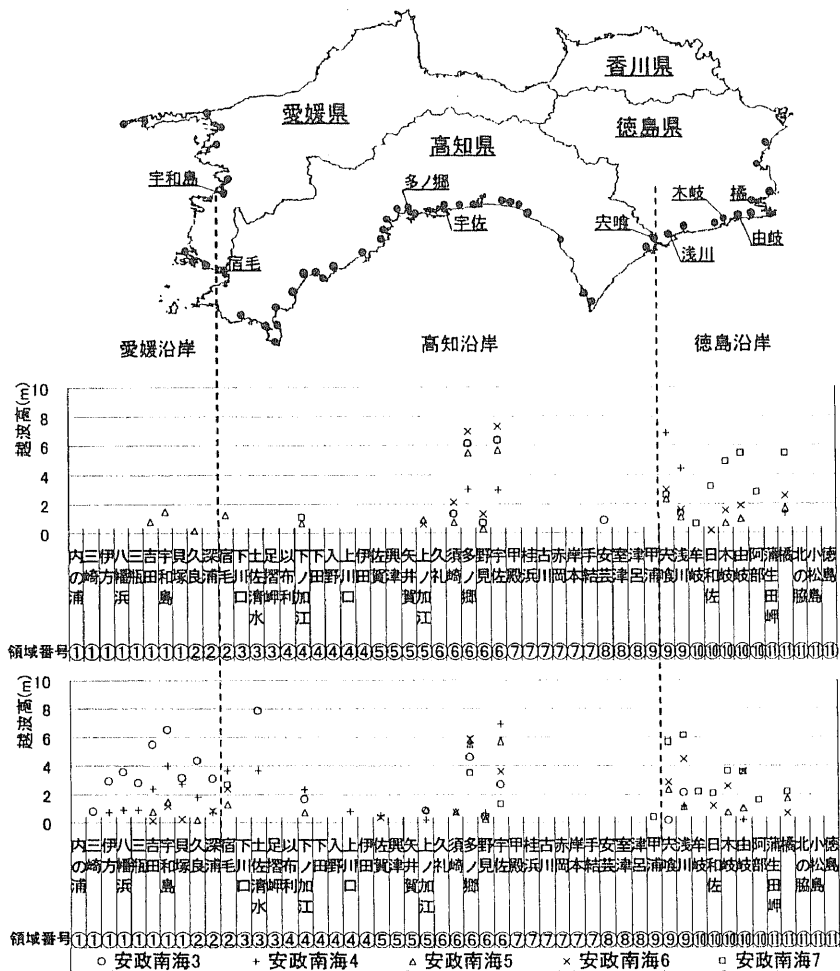


図-10 沿岸集落における越波高分布
Fig.10 Distribution of overtopping heights for the coastal villages

5. 結言

本研究は、新たに断層モデル計算と波源域モデル計算を組み合わせる手法を提案し、瀬戸内を除く四国沿岸集落の津波到達時間、最大津波高、越波高を求めた。これまでの手法と本手法の結果の比較から得られた知見を以下にまとめた。

- 1) 波源の位置に関係なく、室津、津呂は震後 10 分程度、徳島南岸は最短 20 分程度で津波が到達する。また、愛媛沿岸の久良～高知沿岸の上ノ加江間は、本手法の方が到達時間は早く、足摺岬周辺の集落では地震直後に津波が到達する。
- 2) 高知沿岸の宇佐、多ノ郷、須崎最大の津波高が 8～10m に達する。徳島南岸は、地震の位置により津波高が大きく変わり、津波高が 10m をはるかに越える場合もある。
- 3) 高知沿岸の宇佐、多ノ郷、徳島南岸の穴喰、浅川は、地震の位置により、津波が既存海岸堤防を 5m 以上、越波する可能性があることに注意を要する。なお、高知、徳島沿岸ではどちらの手法を用いても越波の可能性の高い集落を限定できると考えられる。

以上のような結果を得たが、本手法は、愛媛沿岸集落と、対象とする領域が波源域モデル内に含まれる場合に危険度の予測ができないという欠点があり、今後これらの取り扱いについて検討が必要である。

最後に、本研究は、著者ら以外の歴史津波の現地調査をされた多くの方々の成果も参考にさせていただいた。ここにそれらの功績を納められた方々に謝意を表するとともに、今後も歴史地震調査・研究が一層深められることを期待いたします。また、本研究は文部省科学研

究費基盤研究(C)(2) 10680446[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, 1977, 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 52, 71-101.
- 相田 勇, 1981, 南海道沖の津波の数値実験, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 56, 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, 1-55.
- 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.
- 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, 423-445.
- 羽鳥徳太郎, 1980, 宝永・安政津波の現地調査による波高の検討, 月刊海洋科学, Vol. 12 No. 7, 495-503.
- 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, 361-365.
- 村上仁士, 伊藤禎彦, 山本尚明, 1996b, 徳島大学工学部研究報告, 第 41 号論文別冊, 39-53.
- 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, 316-320.
- 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, J. JSNDS, 15-1, 39-52.