

# 南海トラフにおける津波特性

津久井 啓 介      藤 澤 康 雄

## Tsunami Characteristics in the Nankai Trough

Keisuke Tsukui      Yasuo Fujisawa

### Abstract

In tsunami countermeasures for the Nankaido coast, it is necessary to investigate the tsunami concentration degree and characteristics in details, based on fragile degree characteristics for tsunami, including the propriety of current design for past maximum tsunami. In this research, the authors examined tsunami characteristics for various locations of earthquake epicenter and seismic dislocation for the Showa Nankai seismic tsunami (1946). It is estimated that the fault width is wide for an earthquake of large magnitude; however, in this case tsunami countermeasures are not always on the safe side. It is necessary to consider the most critical fault location and fault width to decide the design tsunami for disaster prevention measures on coasts, including the past maximum tsunami height.

### 概 要

南海道沿岸の津波対策には、既往最大という従来の設計津波の考え方の妥当性を含め、津波の集中度特性および津波に対する脆弱度特性をベースとした詳細な検討が必要である。本研究では、その基礎的な検討として、1946年昭和南海地震津波に関して地震発生点や地震断層諸元が変化した場合の津波特性に関して検討した。地震マグニチュードが大きいほど断層幅が広く推定される傾向があるが、必ずしも断層幅が広い方が津波対策上で安全側であるとは言い切れなかった。防災対策を想定するための設計津波としては、既往最大を含め、対象海岸にとって最も危険側の断層位置・断層幅を考慮して定める必要がある。

### 1. はじめに

日本近海は世界有数の地震活動地帯であり、地震に伴う津波の発生件数は非常に多い。わが国に甚大な被害をもたらした津波の大部分は太平洋側で発生している。津波災害史で最初に記録された津波は、684年(天武13年)に四国沖で発生した南海道津波であった。684年から現在まで約1,300年間に、南海トラフに発生したM8以上の巨大地震は8回ほどあり、津波は九州の太平洋沿岸部から紀伊半島沿岸部にいたる広範囲に大被害をもたらした。特に、1707年(宝永4年)、1854年(安政元年)、1946年(昭和21年)の南海道津波の被害が甚大であった。このように四国、紀伊半島の南海トラフにおいては、100年から150年程度の周期で海溝型の巨大地震が起り、大津波が発生することが分かっている。したがって、今後の南海道沿岸の津波対策には、既往最大津波という従来の設計津波の考え方の妥当性を含めて、津波のエネルギー集中度および津波に対する脆弱度特性をベースとした詳細な検討が必要である。

四国・紀伊半島沿岸における津波の危険度の評価に関しては、河田・小池<sup>1)</sup>が危機管理の立場から津波減災の方法を提案し、南海トラフ沿いに津波波源を移動させた仮想津波の結果を基に津波の危険度を評価している。ま

た、村上・伊藤・山本・佐藤<sup>2)</sup>は、津波波源の位置と津波高および到達時間の相互関係より、地域津波防災を考えた堤防高や避難体制の確立を目指している。これらの研究では、津波波源の位置変化による津波の評価を行っている。また平石・柴木・原崎<sup>3)</sup>は共振周期特性に注目した研究を行っているが断層の位置変化による考察は行っていない。津波対策を考える場合、津波波源の位置および津波の周期特性の両方を考慮した津波の評価が必要であろう。

本報では、その基礎的な検討として、1707年宝永地震津波、1854年安政地震津波、1946年昭和南海地震津波を対象に、津波防災対策を想定する設計津波として既往最大津波という従来の設計津波の考え方を含め、対象沿岸域にとって最も危険側の地震断層位置および地震断層幅が変化した場合の津波の数値シミュレーションを行い、津波のエネルギー集中度特性や津波の周期特性に関して検討した結果を報告する。

### 2. 断層モデルについて

#### 2.1 断層モデル

津波の初期波源は、断層運動の海底鉛直変位を津波初期波形として与える。この断層運動はFig.1に示すように

6つの断層パラメータすなわち走向 $\theta$ 、傾斜角 $\delta$ 、すべりの方向と断層の走向方向とのなす角 $\lambda$ 、断層の長さ $L$ 、断層の幅 $W$ 、すべり量 $U$ で規定する。これら断層パラメータを決定すると断層運動による地盤の鉛直変位は弾性理論により、Mansinha and Smylie<sup>4)</sup>の方法で求めることができる。

数値計算で用いた3つの既往地震断層モデルは、全て相田<sup>5)</sup>が示した断層モデルを用いた。その各モデルの断層パラメータをTable 1に示す。

2.2 地震断層の移動と断層幅の変化

Fig. 2に過去の震源位置と断層の仮想移動位置を示す。過去に南海トラフで発生した海溝型地震の震源位置を結び、そのライン(I列)を基準として沖側35kmの位置に基準ラインと平行に仮想のライン(II列)を設定した。ラインI, II列ともにプレート境界より内側である。また、各ラインを11分割し2系列22個の仮想断層位置を設定した。

さらに、津波の周期特性を考慮するために、昭和南海地震断層をベースとしてその断層断層幅を2/4, 3/4, 4/4, 5/4の4種類に変化させた。その際、各オリジナルの断層モデルの最大鉛直変位と同じ値となるように各断層幅を変えた場合の最大鉛直変位の値を合わせている。

3. 数値計算法

現在用いられている津波の数値計算法は、大きく2つに別れる。太平洋の深海域を伝播する津波と沿岸部の比較的浅海域を伝播する津波の計算法である。前者は津波の波高に対して水深が大きい場合で、非線形効果が小さ

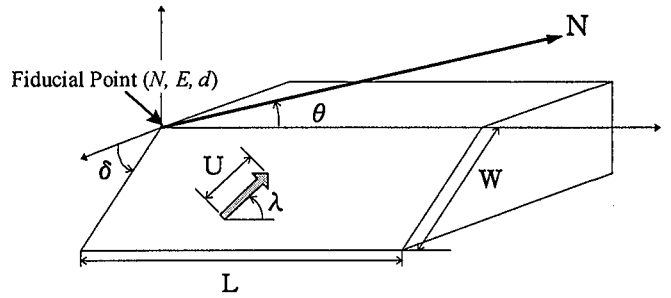


Fig. 1 断層モデル図  
Fault Model

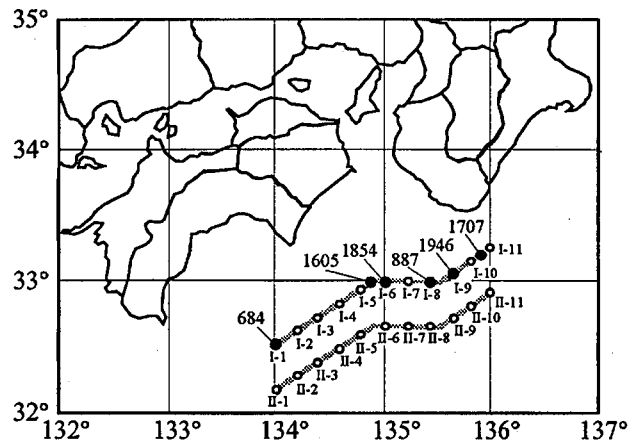


Fig. 2 断層移動位置図 (●は既往地震の年代)  
Fault Displacement Location  
(●: Historical Tsunamis)

Table 1 断層パラメータ (相田<sup>5)</sup>)  
Fault parameters (by Aida<sup>5)</sup>)

●宝永南海地震 (1707, M=8.4)

	N	E	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
1)	33.41	136.15	10	250	10	124	150	70	560
2)	33.40	134.57	1	220	20	90	140	80	700
3)	32.33	133.57	1	240	20	90	60	80	1390

●安政南海地震 (1854, M=8.4)

	N	E	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
1)	32.70	134.74	1	250	20	117	150	120	630
2)	33.41	136.15	10	250	10	127	150	70	470

●昭和南海地震 (1946, M=8.0)

	N	E	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
1)	32.68	134.75	1	250	20	104	120	120	500
2)	33.24	136.22	10	250	10	127	150	70	400

N, E: 断層基準点の北緯・東経 d: 断層の深さ

く微小振幅長波理論(線形長波理論)が成立する。また、後者は、水深に対する相対波高が大きくなると非線形効果や海底摩擦、さらに波の分散効果等が無視できなくなる。

本研究では、沿岸部における津波の危険度を評価することが主目的であり、断層位置や断層幅をパラメータとして多ケースの解析を行い津波の最大水位を求めるもので、数値計算法としては、微小振幅長波理論を用いた。さらに、微小振幅長波理論は現在の津波計算法から見れば計算時間も早い、計算領域の多領域接合、開境界処理等、多量の計算では時間がかかりすぎるため、微小振幅長波理論を基に配列、境界処理などに工夫をし、短時間に精度良く演算できる高速演算型津波計算法を開発した。

ここでは、津波の数値計算法の概要として基本である線形長波理論に基づく計算法について述べる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\eta$ は津波の水位、 $M, N$ は水平方向  $x, y$ の流量フラックス、 $g$ は重力加速度、 $h$ は静水深を示す。上式にコリオリ力を考慮する場合もあるが、日本近海で発生する津波の場合は比較的伝播距離も短いのでその効果が小さいので省略する。この支配方程式をスタaggerドリーブフログ差分法を用いて計算する。

3.1 計算領域と計算格子

計算領域は、Fig.3に示したように領域 IからIVまでを多領域接合し、領域 Iの計算格子間隔を3, 600m、領域II

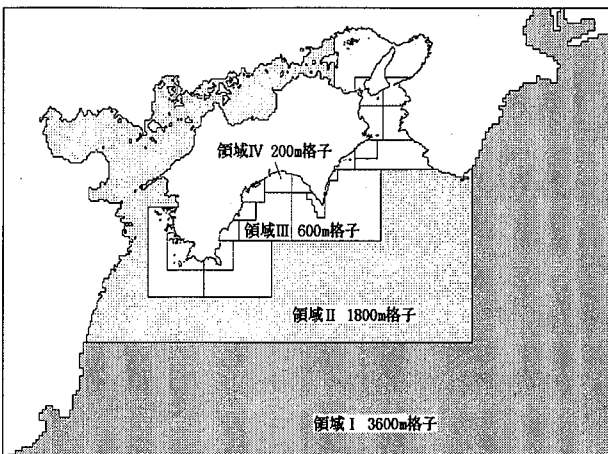


Fig. 3 計算領域図  
Calculation Domains

を1, 800m、領域IIIを600m、領域IVを200mとして計算した。陸域との境界条件は、鉛直壁条件とした。

3.2 数値計算の再現性の検討

津波の数値シミュレーションの計算結果の再現性(計算精度)を評価するために、相田<sup>6)</sup>により提案された評価指標K(幾何平均)および $\kappa$ (幾何分散)を用いた。この方法はある地点の津波高の観測値と同地点での計算値を比較するもので、K値は全体として計算値をK倍すれば観測値に一致するという指標であり、1に近いほど良好な結果である。また、 $\kappa$ 値は計算値ばらつき度を示すもので、対数値で表した標準偏差に相当する量である。今回の数値計算結果は、K値1.26、 $\kappa$ 値1.31であり数値計算の再現性が確認された。

4. 結果および考察

4.1 全体の津波集中度

沿岸部に来襲する津波の大きさは、津波波源の相対的な位置関係、津波波形の持つ全エネルギーとその地域的分布、津波伝播中の海底地形影響等があり、沿岸部の津波波高を単純に重ねて表示してもそれぞれの地域での津波の評価にはならない。そこで高橋・首藤<sup>7)</sup>が提案している津波のエネルギー集中度を表す指標を用いて評価した。来襲する全津波エネルギーの大小によらず、その場所的な集中度を表すのが津波集中度(TCD: Tsunami Concentration Degree)である。全来襲津波エネルギー $Et$ は以下のように表すことができる。

$$Et = \int_s H(s)^2 ds = \Delta s \sum_{n=1}^N H(n\Delta s)^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで $s$ は対象とする海岸線に沿った軸であり、 $H(s)$ は最大津波波高である。また $N$ は長さ $\Delta s$ の部分区間で全海岸線を分割した場合の総数であり、 $s=n \cdot \Delta s$ と表す。

またある部分区間への来襲津波エネルギー $E(s)$ は以下のように表すことができる。

$$E(s) = \int_{\Delta s} H(s)^2 ds = \Delta s H(n\Delta s)^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

したがって(4)式と(5)式の比率、

$$TCD(s) = \frac{E(s)}{Et} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(6)$$

が津波の集中度TCDとなる。

Fig.4に解析領域における津波集中度を示す。四国沿岸部の岬付近に顕著な津波エネルギー集中が見られ、その値は全津波エネルギーの0.20%~0.27%である。またFig.5は既往の津波3ケース(1707年宝永南海地震、1854年安政南海地震、1946年昭和南海地震)から求めた津波集中度である。これを見ると、おおむね傾向は定量的にも全

ケースのTCDと変わらない。津波の地域的危険度は津波の種類によらず、また地震断層の移動および断層幅の変化にもかかわらず同じような傾向を示すことが分かる。

#### 4.2 断層幅による津波集中度

4.1で述べたTCDを各断層幅ごとに整理したものがFig.6である。これを見ると、ピークを示す地点では幅による違いはそれほど見られないが、2番目のピークを示す地点では断層幅が大きくなるに従って集中度も大きくなっている。しかし、断層幅が2/4のときに最大の集中度を見せている地点も見受けられる。

これらはいずれもその地点の地形的影響があると考えられる。さらに湾あるいは港湾での共振や岬周りでの回り込みなどの影響が強く出る場所では、津波防災上の設計津波の考え方は断層の位置のみならず、断層幅の変化、すなわち津波の周期特性まで考慮して考える必要がある。

#### 4.3 主な地点での津波高

断層モデルの位置および断層幅の違いによる津波の最大水位がどのような傾向にあるのか、紀伊水道の沿岸域の主な地点について求めた。

全体的な傾向としては当然ながら断層位置が紀伊水道に近づくに従い津波水位は大きくなり、本来の昭和南海地震断層位置よりも東側で地震が起きると最大水位はほとんどの沿岸域でより大きくなること分かった。

そこで沿岸域の代表例として、四国A港とB岬、紀伊半島のC港とD港の断層位置と幅の違いによる津波の最大水位を示す。Fig.7, Fig.8はI列断層位置及びII列断層位置に関するA港の最大水位図である。同じくFig.9, Fig.10はB岬, Fig.11, Fig.12はC港, Fig.13, Fig.14はD港の最大水位図である。

どの例からも前述の通り断層位置が異なると大きく沿岸津波高が異なることが分かる。また断層の長手主方向の向きのため四国側では全体的に紀伊半島側より津波高は高めである。

I列目とII列目を比較すると、II列目は震源が35kmほど沖側になるにもかかわらず同じような津波高を示し、おおまかな傾向も同じであることが分かる。トラフ上ということもありII列目の方が平均で1,500mほど水深が深くなっており、単純にグリーンの法則によれば、II列目時の津波高はI列目時の津波高より大きくなるはずである。しかし距離減衰などの効果もあり同じような津波高になったものと考えられる。さらに地形影響などによって複雑に伝播するので、距離が違う場合全く同じ傾向にはならず、細かく見ると各ケースで様々な応答を示しているのが分かる。

I列目ではそのピークがたいてい断層位置10にあるが、II列目では位置11にピークがある。これはI列目とII列目では緯度方向のみにずらしたため、海岸線に沿って考えるとI列目では位置10が最もこの紀伊水道沿岸に

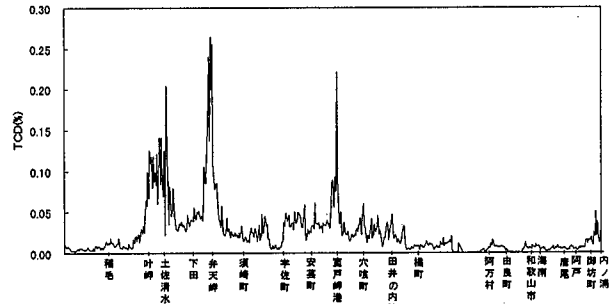


Fig. 4 津波集中度(全ケース)  
Tsunami Concentration Degree  
(All Cases)

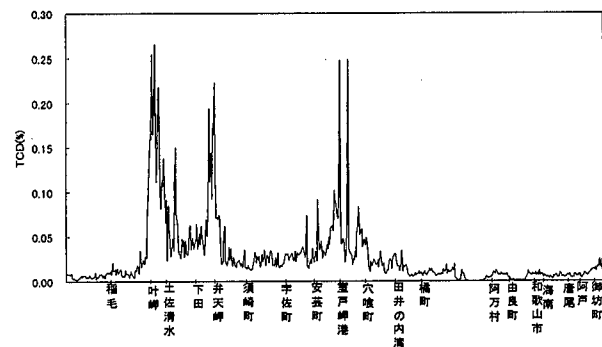


Fig. 5 津波集中度(既存3ケース)  
Tsunami Concentration Degree  
(The Past Three Cases)

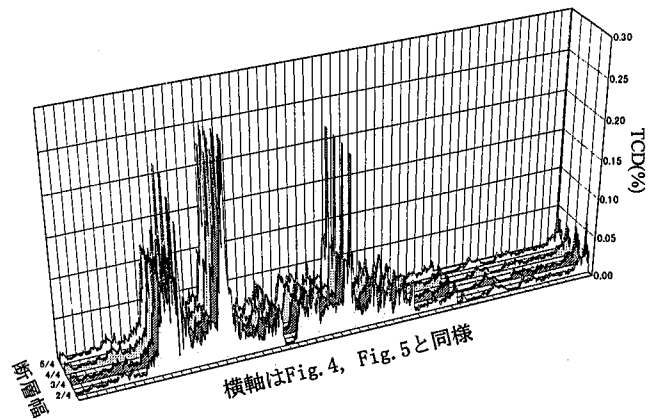


Fig. 6 各断層幅でのTCD  
TCD on Each Fault Width

近づき、II列目では位置11が最も近づくためである。

さてFig.7では、断層位置10で断層幅が3/4の方が断層幅4/4より沿岸津波高が著しく大きくなっている。地震断層の相似則に従うと設定地震マグニチュードが大きいほど断層幅が広く推定される傾向があるが、必ずしも地震マグニチュードが大きい方が津波対策を考える上で安全側であるとは言い切れない。またFig.8では本来の昭和南海地震津波時に一番近い断層位置(位置9)での最大水位に対して、東側にずれた場合(位置11)は最大水位が約2倍となる。これから津波防災上設定断層位置の選定

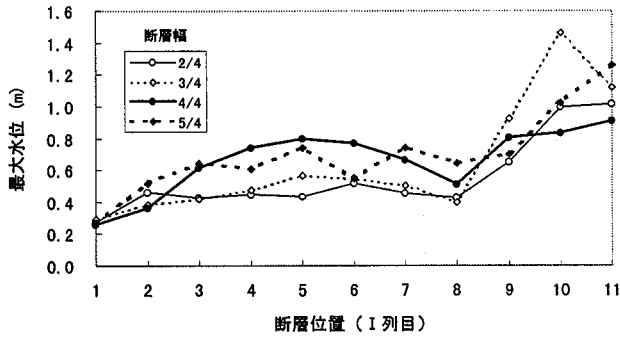


Fig. 7 最大津波高(A港, I列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-A, Line-I)

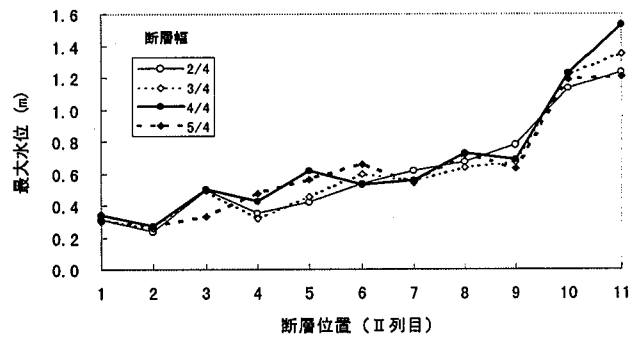


Fig. 8 最大津波高(A港, II列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-A, Line-II)

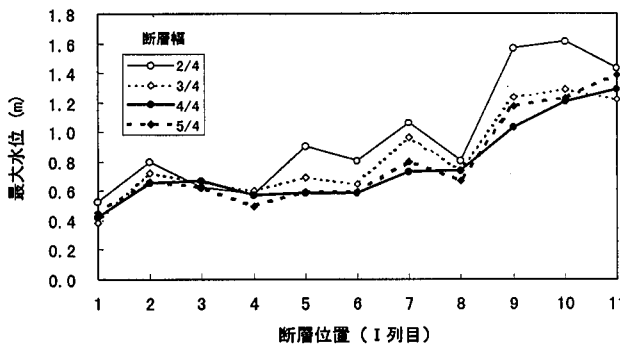


Fig. 9 最大津波高(B岬, I列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-B, Line-I)

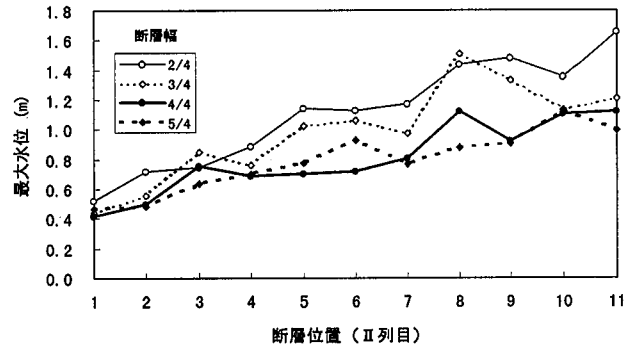


Fig. 10 最大津波高(B岬, II列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-B, Line-II)

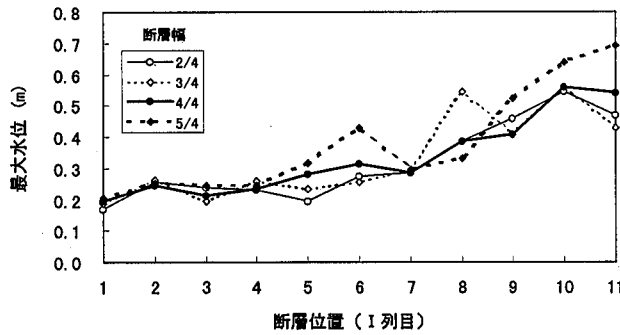


Fig. 11 最大津波高(C港, I列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-C, Line-I)

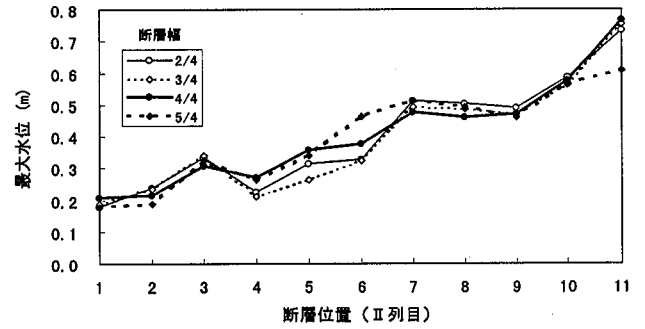


Fig. 12 最大津波高(C港, II列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-C, Line-II)

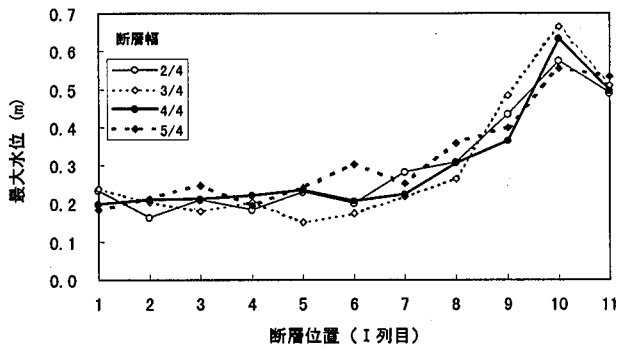


Fig. 13 最大津波高(D港, I列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-D, Line-I)

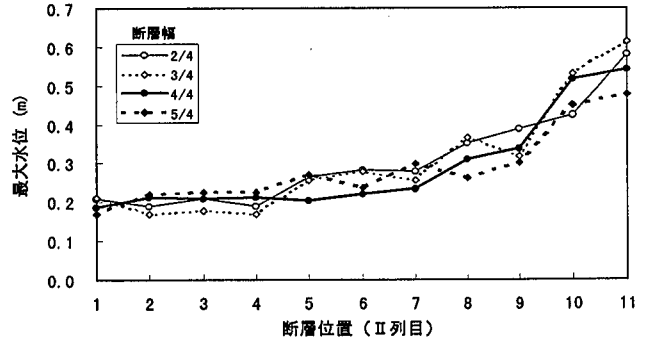


Fig. 14 最大津波高(D港, II列目)  
Maximum Tsunami Height (Point-D, Line-II)

には十分留意しなければならないことが分かる。

またFig. 9においては全般的に断層幅2/4が最大を示しており、4/4と5/4がどの位置でも低い。とくに位置9と11では2/4が5/4より30%以上大きくなっている。II列目のFig. 10を見ると2/4の断層幅の場合が更に他より大きめに出ており、3/4の場合もI列目と比べて他より大きく出ている。

Fig. 11においては断層位置によってどの断層幅が最大値を取るか異なっている。例えば位置6などでは5/4が最大であるが、位置8では3/4が最大となっている。Fig. 12ではI列目ほどの断層幅による違いは出ていない。

Fig. 13では他のケースほど断層幅の変化による最大津波高の違いは見られない。傾向的にはFig. 11, Fig. 12のC港と同じといえる。これはFig. 14においても同様である。

以上の結果から、従来の既往最大津波高で津波防災を考えると場合によっては防災対策の観点から見て危険側となり、断層の位置および断層幅の変化にまで考慮した設計津波の考え方が必要であることが分かる。

## 5. おわりに

昭和南海地震の断層モデルを南海トラフに沿って移動させ、同時に断層幅を変えながら津波の数値シミュレーションを行った。その結果次のような結論を得た。

1) 四国の各岬付近で津波エネルギーの集中が見られた。また、断層位置の違いに関しては、対象とする沿岸に断層位置が近づくに従い、沿岸津波高が大きくなる傾向がある。また、既往の断層位置よりも東側で地震が発生すると全体的に最大津波高が大きくなる。

2) 地震断層の相似則に従うと設定地震マグニチュードが大きいほど断層幅が広く推定される傾向があるが、必ずしも地震マグニチュードが大きい方が津波対策を考える上で安全側であるとは言い切れない。

3) 津波防災対策を策定するための設計津波としては、既往最大津波を含め、対象海岸にとって最も危険側の断層位置・断層幅を考慮して定める必要がある。

## 参考文献

- 1) 河田 恵昭, 小池 信昭: 危機管理と津波避難マニュアル, 京都大学防災研究年報, 第38号, B-2, p. 157~211, (1995)
- 2) 村上 仁士, 伊藤 禎彦, 山本 尚明, 佐藤 広章: 紀伊半島・四国沿岸における津波の危険度に関する考察, 第43回, 海講論文集, p. 316~320, (1996)
- 3) 平石哲也, 柴木秀之, 原崎恵太郎: 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, 第44回, 海講論文集, p. 286~290, (1997)
- 4) Mansinha, L. and D.E.Smylie: The displacement field of incised faults, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 61, No. 5, p. 1433~1440, (1971)
- 5) 相田 勇: 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, p. 713~730, (1981)
- 6) 相田 勇: 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, p. 71~101, (1977)
- 7) 高橋 智幸, 首藤 伸夫, 越村 俊一: 北海道東方沖で発生する地震津波の災害アセスメント, 第42回海講論文集, p. 356~360, (1995)
- 8) Tsukui, K., Y.Fujisawa and C.Goto: Tsunami Concentration Degree in Tonankai Plate Boundary, Proc. 16th Int. Conf. on OMAE, Vol. 1-B, p. 47~54, (1997)
- 9) 津久井啓介, 藤澤康雄, 後藤智明: 南海トラフにおける津波特性に関する研究, 第44回, 海講論文集, p. 336~340, (1997)
- 10) 佐藤良輔: 日本の地震断層パラメータハンドブック, 鹿島出版会, 390p., (1989)