

各種断層モデルによる四国沿岸域の
津波シミュレーションに関する考察

村上 仁 士 伊 藤 禎 彦
山 本 尚 明

各種断層モデルによる四国沿岸域の 津波シミュレーションに関する考察

村上仁士^{1,*}, 伊藤禎彦¹, 山本尚明²

Consideration on tsunami simulation using proposed fault models in Shikoku island

by

Hitoshi MURAKAMI, Sadahiko ITOH and Naoaki YAMAMOTO

(Received 2 November, 1995)

Simulation study was carried out on three cases of the tsunami using proposed fault models. Origins of these tsunamis were the epicenters of earthquakes of Hoei (1707), Ansei (1854) and Nankai (1946), all of which took places in and after Edo Period. Among the tsunamis caused by huge earthquakes that took place in the past on the Nankai trough along the Pacific coast of Shikoku island with the magnitude M7 or higher, these earthquakes are selected for the reasons that relatively rich observation data of tsunami is available on them and the tsunami simulation can be implemented on the fault models proposed for them.

Statistical analysis were also carried out using the ratio between the calculated and observed values of tsunami height. The fitness between these values are analyzed and evaluated in relation to each of fault models, areas in the study and intervals of calculation grids.

1. 緒 言

四国の太平洋岸においては有史以来、南海トラフ上で発生した地震マグニチュード7クラス以上の巨大地震を波源とする津波により、幾度となく大きな被害をうけてきた。特に、江戸時代以降では1605年2月3日(慶長9年12月16日:慶長地震), 1707年10月28日(宝永4年10月4日:宝永地震), 1854年12月24日(嘉永7年11月5日:安政南海地震)および1946年12月21日(昭和21年:南海地震)に伴う津波が挙げられ、ほぼ100年~150年の間隔で発生している。これらの津波についてはTable 1, Fig. 1に示すように、現地での津波高観測データが著者らにより近年再整理されている¹⁾。

一方、津波シミュレーションを実施するうえで基本となる断層モデルは、1707年宝永地震、1854年安政地震および1946年南海地震の3つの地震についてTable 2に示すように各種の断層モデルが提案されている²⁾⁻³⁾。

これら3つの地震による津波のシミュレーションについては相田提案の断層モデルが通常用いられており、Table 2に示す断層モデルの全てを用いた津波シミュレーションを行い、津波高に関する計算値と観測値の適合性について比較検討したものはなかった。

本研究は、1707年宝永地震、1854年安政地震および1946年南海地震の3つの地震津波を対象とし、各地震で提案された11種類の全ての断層モデル²⁾⁻³⁾を用いた津波シミュレーションを実施して津波高の計算値と観測値を比較することにより、提案された各種断層モデルの適合性を検討したものである。なお、以下では1946年南海、1854年安政および1707年宝永の各地震津波の順序で記述する。

1 徳島大学工学部建設工学科
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
The University of Tokushima

2 四国総合研究所
Shikoku Research Institute Inc.

*連絡者, 連絡先: 〒770 徳島市南常三島町2-1
徳島大学工学部

Table 1 Observed heights of tsunami in Shikoku island

(単位: m)

地名	1605慶長 地震津波 (T.P.基準)	1707宝永 地震津波 (T.P.基準)	1854安政 地震津波 (T.P.基準)	1946南海 地震津波 (M.S.L.基準)	地名	1605慶長 地震津波 (T.P.基準)	1707宝永 地震津波 (T.P.基準)	1854安政 地震津波 (T.P.基準)	1946南海 地震津波 (M.S.L.基準)
(徳島県)					(高知県)				
撫徳小中橋			1-2	0.9	奥浦		3.1		
松島			1-2	1.4	野見				5.6
島			1.5-2	2.0	押岡			7-8	
橋		3-4	4-5	4.0	吾井ノ郷		9	7-8	
泊部			3	3.7	多ノ郷		8.7	7.1-8.4	3.5
阿岐井			5.5		須崎		8	5.5	4.4
由岐		6-7	7-8	4	安和				5.1
田井			4.3	2	久礼		7.5-8	5.6-8.3	2.3, 3.7
木岐		6-7	6-7	4.2	上ノ加江		5	5-6	2.5-3.1
日和佐			2-3	2.5, 3.6	矢井			7.8	
牟岐	6	6-7, 8	6-7	4.5	興津	4-5	6	6	4.3
出羽			6	3.6	佐賀			5-6	4.7
浅川	9	6-7	6.5-7.2	4.7-5.3	伊田			7.5	4.9
那浦	4-5	3	3.5	2.0	上川			8.5	4.0
佐			5.5	4.2	入野		8.6	6-6.5	
穴喰	5-6	5.5	3.2-7.9	3.6	下田			4-5	3.9
(高知県)					布				2.5
甲浦	5-6	6	3.6	4.3	下ノ加江		10	7.2	3.7
野根	4-5				大岐		8.1	4.9-5.3	
佐喜浜	8.6-13.0	5		2.9	以布利		10	4.3-4.7	3.1
椎名				4.8	壺津			4.4	
室呂				1.9	大ノ浜		8.6	5	
室津	8-10	6-7	3.0	2	土佐清水		5	4-5	2.3
奈半利	6			3	下益野			4	
安田				2.3	三川		7	4-5	
伊尾木		6-7	5	3	下川口		7-8	4-5	3.0
安芸	3-4	6-7	5	3.3	貝ノ川		8	4	3.0
手結		6-7	5		大津		7		
下夜		9.3		1.5	古満			4	3.5
岸本		5-6	5		柏島			3.3	
赤岡		4-5	4.0		宿毛		4.5-5.5, 9.8	3.2, 3.5-4.0	1.8, 2.5
古川		4-5			(愛媛県)				
十種		7-8		1.7	岩水			3.5-4	
仁井		5-6			満倉			3	
下田		6-7			深浦			3-4	
吸江		6-7			久良			4-5	
一朝		7.7		1.3	貝塚			2-3	
高江		5-6		0.5	宇和島		5.1	2-3	1.5
御瀬		2-3	3	1.3	吉田		5	3.7	1.5
藻瀧		5-6		2.2	三瓶			3.5	1.2
浦瀧		5-6	5	1.8	八幡			3	0.9
桂戸		5-6	4.5-5		伊方			3	1.2
甲濱		5-6	4.5-5	4.3-5.1	三内				0.7
宇殿		8-13	5.8-8.9	4.6	(香川県)				
福佐		7-8	7-8	4.0	高松		3	1.5	0.9

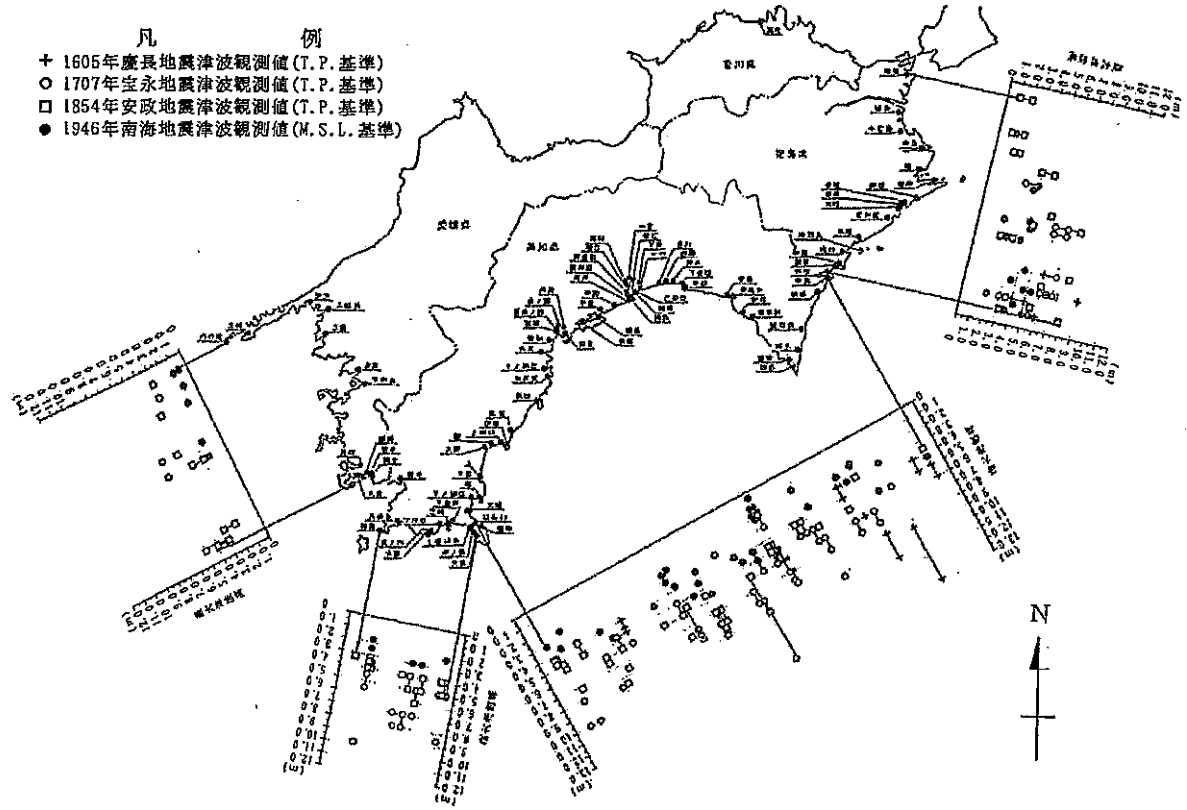


Fig. 1 Observed heights of tsunami in Shikoku island

Table 2 List of fault models proposed for earthquakes

対象地震	1946年南海地震	1854年安政地震	1707年宝永地震
断層モデル	①Fitch & Scholz(1971)	③Ando(1975) ③相田(1981)	⑩Ando(1975) ⑩相田(1981)
	②Kanamori(1972)		
	③Ando(1975)		
	④Ando(1982)		
	⑤Iwasaki(1981)		
	⑥相田(1981)		
	⑦Kato(1983)		

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

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

ここで、 $M = u h$ 、 $N = v h$ 、 η ：水位、 g ：重力加速度、 h ：静水深、 u 、 v ： x 、 y 方向の流速、 ξ ：海底地盤の垂直変位である。

さらに、水深の浅い沿岸近くまで伝播した津波の計算では波高が水深と同程度となり、非線形性が無視できず非線形長波理論すなわち浅水波理論を用いる。

2. 津波シミュレーションの計算条件

2.1 Leap-frog法による津波の支配方程式

発生したばかりの津波は、波長が数百km、水深はせいぜい数kmである。波長が水深に比べて大きい場合は、長波と呼ばれ鉛直方向の流速を無視し、鉛直方向に積分された長波理論が適用できる。また、波高も数m程度であり、波の非線形性が小さく水深の深い領域では、次式に示す線形長波理論を用いる。

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \frac{MQ}{D^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + g D \frac{\partial \eta}{\partial y} + f \frac{NQ}{D^2} = 0 \quad (6)$$

ここで, $D = \eta + h$, $M = uD$, $N = vD$, $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$, $f_x = gn^2 D^{-1/3}$, n : マニングの粗度係数である。

計算格子は, 水位計算点と流量計算点が1/2格子分だけずれた Staggered Leap-frog格子を用いる。

2.2 境界条件

津波シミュレーションにおける境界条件として, ここでは海岸で遡上する地域以外では, 海岸を鉛直壁と考え完全反射と仮定し, 岸に直角な流量を0としている。

$$Q_x \text{ or } Q_y = 0 \quad (7)$$

計算領域は有限であることから, 外界に人工的な境界が生じる。したがって, 境界で波が完全無反射で通過するものとして, 線形長波の進行波を考え次式を適用する。

$$\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = \pm \sqrt{gh} \eta \quad (8)$$

ここで, 符号は波の進行方向と関連づけて, η が正の時は Q_x が領域の外側に向かうようにとる。

2.3 安定条件

差分方程式において数値シミュレーションを安定に進めるため, Courant-Friedrichs-Lewyの条件に従う。

$$C_r = \frac{\Delta t \sqrt{2gh_{max}}}{\Delta s} \leq 1 \quad (9)$$

ここで, h_{max} : 各計算領域内の最大水深, Δt : 計算時間間隔, Δs : 計算格子間隔である。

2.4 津波シミュレーションの計算諸条件

津波シミュレーションに用いる初期条件および境界条件などの計算諸条件を Table 3, Table 4 に示す。津波の初期条件となる水位は与えられた各種断層パラメータを基に海底地盤を弾性体と仮定し, ポアソン比を 1/4 とした Mansinha-Smylie の方法¹⁰⁾ により計算した変位を用いる。

Table 3 Conditions for calculation in the tsunami simulation

項目	設定値		
領域番号	1 (K1領域)	2 (K2領域)	3 (K3領域)
基礎方程式	線形長波方程式		非線形長波方程式
沖側境界条件	透過境界	隣接する領域との接続	
岸側境界条件	反射境界		
底面摩擦	なし		マニングの粗度係数
初期条件	流速 0		
	水位 0		
波源モデル	1946年南海, 1854年安政, 1707年宝永の各地震において提案された各種断層モデル (計11種類)		
計算格子間隔	5,000m	1,250m	312.5m
最大水深	4,790m	1,460m	23~1,128m
計算時間間隔	1秒		
再現時間	3時間		

Table 4 Manning coefficient of roughness

	水深 > 5 m	0 m ≤ 水深 ≤ 5 m
粗度係数	0.025	0.04

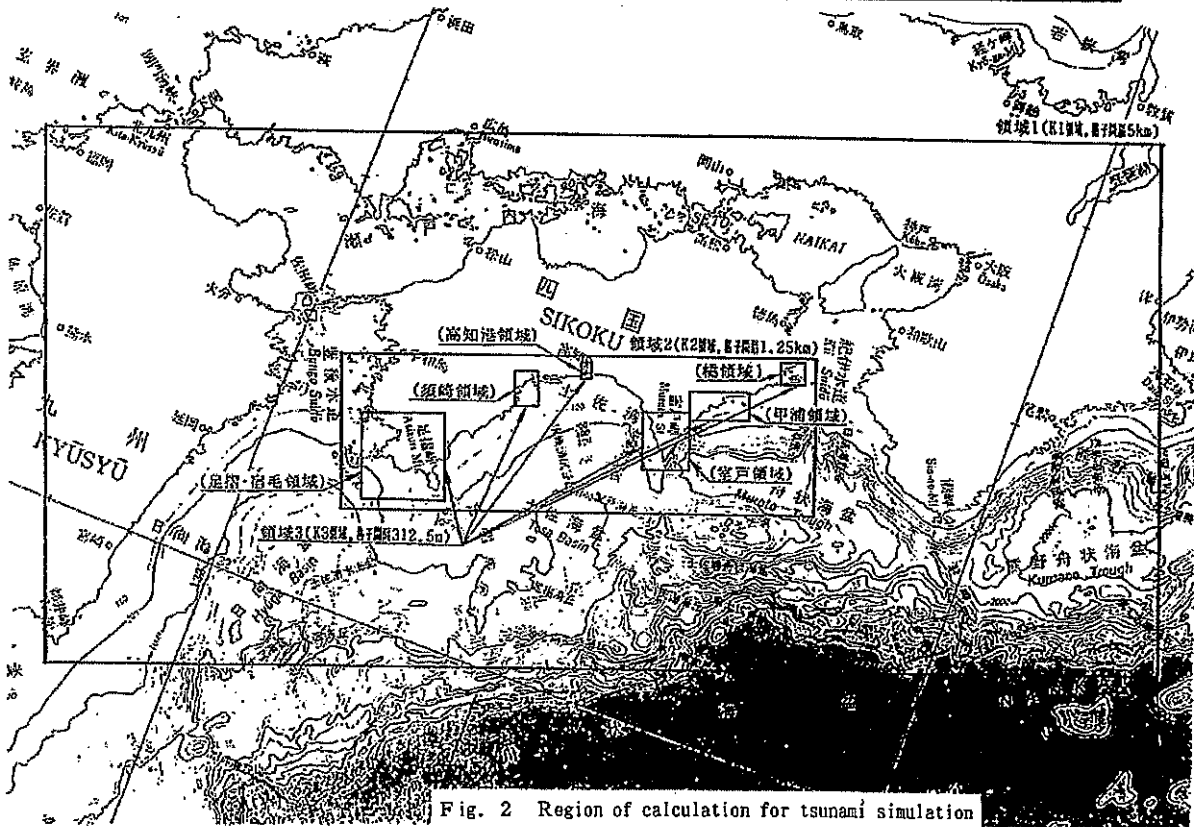


Fig. 2 Region of calculation for tsunami simulation

計算は Fig. 2 に示す計算領域の領域 1, 領域 2 および領域 3 について実施し, 計算結果の適合性の検討は領域 3 の範囲で得られた計算値と観測値を用いて行う。すなわち, Fig. 2 で示した橘領域, 甲浦領域, 室戸領域, 高知藩領域, 須崎領域および足摺・宿毛領域の各領域で計算値の適合性を考察する。

なお, 断層面の立ち上がり時間については, 提案された断層モデルの中でも相田, Ando など一部のものしか記載がないこと, 現在, 津波シミュレーションによく用いられている相田モデルでの立ち上がり時間の 30 秒, 60 秒, 3 分での結果等¹²⁾をふまえ, 本研究では 60 秒を用いて比較した。

2.5 津波シミュレーション結果の統計分析

津波シミュレーションの精度に関しては, 統一的に整理するため, 式(10), (11)に示す相田により提案された津波高の観測値と計算値の対数幾何平均 K , 対数幾何標準偏差 κ を導入し, 統計分析を行って検討した¹²⁾。

$$\log K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \left(\frac{R_i}{\eta_i} \right) \quad (10)$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\log \left(\frac{R_i}{\eta_i} \right) \right)^2 - (\log K)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

ここで, R_i, η_i はそれぞれ各地点における津波高の観測値および計算値である。

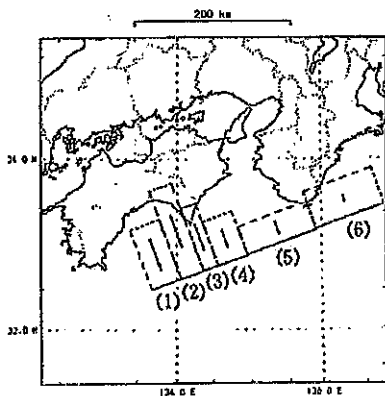
(1946年南海地震, $M=8.0$)

① Fitch & Scholz (1971) モデル

(a) パラメータ

	N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)	32.603	134.063	0	250	30	90	40	95	1800
(2)	32.695	134.365	0	250	30	90	30	140	1800
(3)	32.757	134.567	0	250	30	90	20	100	1500
(4)	32.880	134.970	0	250	30	90	40	70	1000
(5)	33.173	135.928	0	250	40	90	95	50	800
(6)	33.465	136.885	0	250	40	90	95	65	500

(b) 平面図



2.6 各地震で提案された断層モデルのパラメータリストおよび平面図

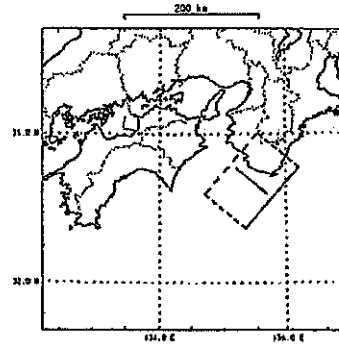
津波シミュレーションに用いる波源モデルとして, Table 2 で述べた各地震で提案された断層パラメータリストおよび平面図を Fig. 3 ~ Fig. 6 に示す¹²⁾。なお, 1946年南海地震の Fitch & Scholz (1971) モデルの(6), 1707年宝永地震の Ando (1975) モデルの(3)および相田 (1981) モデルの(1), (2)の各断層パラメータについてはその位置が東南海以東にあり, 四国沿岸域での津波に影響しないものと考えて今回の津波シミュレーションの検討では考慮していない。

② Kanamori (1972) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
33.55	136.20	-	220	10	90	120	80	310

(b) 平面図



③ Ando (1975) モデル

(a) パラメータ

	N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)	32.68	134.74	0	250	20	117	150	120	600
(2)	33.13	136.25	0	250	25	117	150	70	400

(b) 平面図

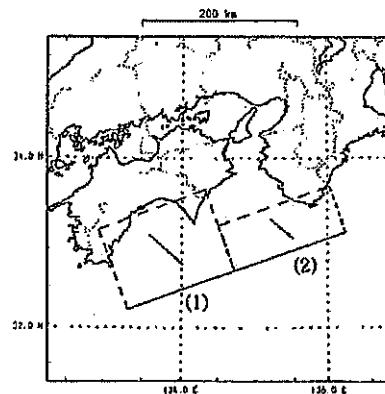


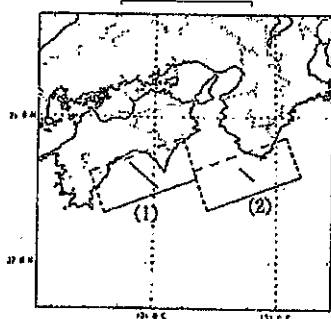
Fig. 3 Parameter lists and plans of fault models proposed for earthquakes (model①-③) (after 12))

④Ando (1982) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)33.15	134.71	0	250	20	117	150	70	600
(2)33.17	136.40	0	250	25	117	150	70	300

(b) 平面図

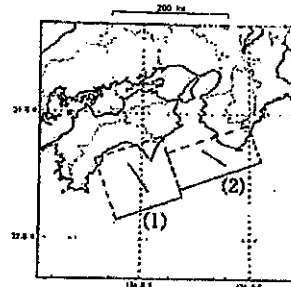


⑥相田 (1981) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°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

(b) 平面図

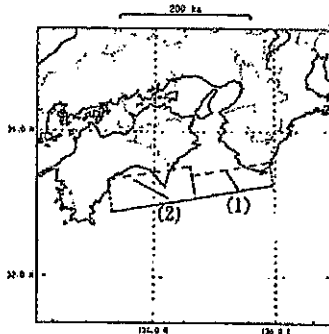


⑥Iwasaki (1981) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)33.27	135.97	2.3	260	22	112	122	38	300
(2)33.08	134.68	2.3	261	22	142	129	54	440

(b) 平面図



⑦Kato (1983) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)33.27	135.97	2.3	260	22	112	122	38	300
(2)33.08	134.68	2.3	261	22	142	129	54	440
(3)33.09	133.25	0.0	220	70	90	30	13	150

(b) 平面図

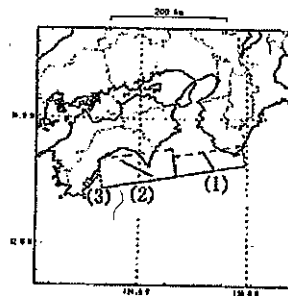


Fig. 4 Parameter lists and plans of fault models proposed for earthquakes (model④-⑦) (after 12))

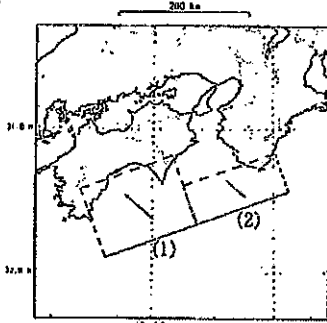
(1854年安政地震, M=8.4)

⑧Ando (1975) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°E)	d(km)	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)32.68	134.74	0	250	20	117	150	120	600
(2)33.13	136.25	0	250	25	117	150	70	400

(b) 平面図



⑨相田 (1981) モデル

(a) パラメータ

N(°N)	E(°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

(b) 平面図

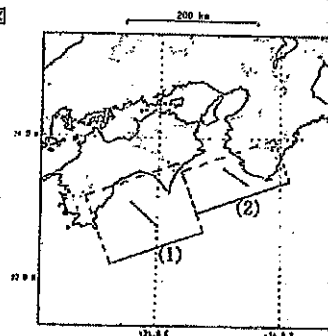


Fig. 5 Parameter lists and plans of fault models proposed for earthquakes (model⑧-⑨) (after 12))

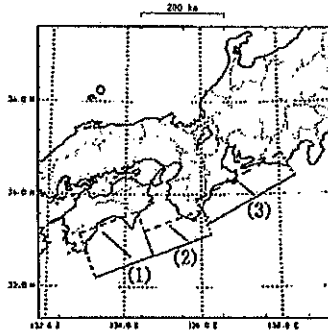
(1707年宝永地震, $M=8.4$)

⑩ Ando (1975) モデル

(a) パラメータ

	N(°N)	E(°E)	d(km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)	32.68	134.74	0	250	20	117	150	120	1200
(2)	33.13	136.25	0	250	25	117	150	70	800
(3)	34.39	138.39	0	240	25	108	230	70	800

(b) 平面図



⑪ 相田 (1981) モデル

(a) パラメータ

	N(°N)	E(°E)	d(km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L(km)	W(km)	U(cm)
(1)	35.14	138.73	2	198	34	71	115	70	400
(2)	33.90	138.13	3	245	24	113	150	100	400
(3)	33.41	136.15	10	250	10	124	150	70	560
(4)	33.40	134.57	1	220	20	90	140	80	700
(5)	32.33	133.57	1	240	20	90	60	80	1390

(b) 平面図

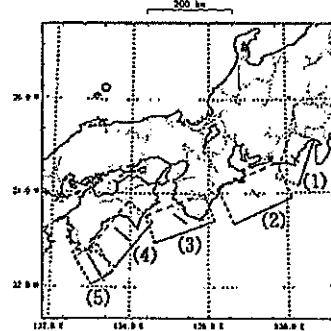


Fig. 6 Parameter lists and plans of fault models proposed for earthquakes (model ⑩-⑪) (after 12))

なお、Fig. 7は断層パラメータの定義について示したもので、各パラメータは次のことを意味している。
 N: 断層面基準点 (Fig. 7に示すように断層面を手前に傾き下がるようにおいた場合、左上に位置する端点) の緯度, E: 断層面基準点の経度, d: 断層面基準点の深さ, θ : 断層面の走向方向を北より東回りに測った角度, δ : 断層面の傾斜角, λ : 断層面の上盤の下盤に対する食い違い方向を断層面上で走向方向より反時計回りに測った角度, L: 断層面の走向方向の長さ, W: 断層面の傾斜方向の長さ (幅), U: 断層面の食い違い量, U_d : 断層面の食い違い量の走向方向成分 (左横ずれを正とする), U_s : 断層面の食い違い量の傾斜方向成分 (逆断層成分を正とする), ϕ : 断層面の傾斜方向を北より東回りに測った角度, τ : 断層面の食い違い量が0からUに達するまでの時間, M: 地震マグニチュードである。

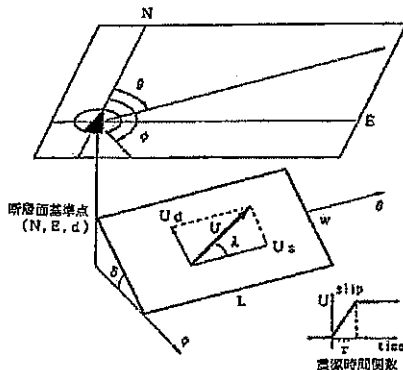


Fig. 7 Definition of fault parameter

3. 計算結果

3.1 津波シミュレーションによる津波高計算値と観測値の比

前章の計算諸条件に基づき、津波シミュレーションを実施した。ここで求めた計算値は、2.4でも述べたようにFig. 2に示す6つあるK3領域内の各観測地域における計算格子間隔がそれぞれ5 km, 1.25 kmおよび312.5 mで求めた最大津波高の値を示す。なお、これらの計算値は観測値との比較がしやすいように計算値と観測値の比を求め、この値と地域名を組み合わせる表示した。

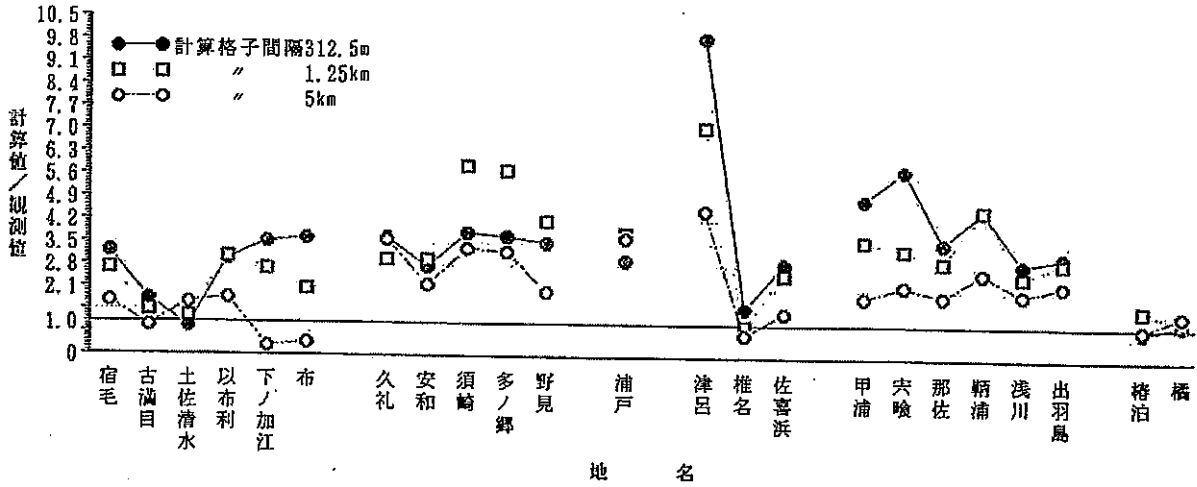
1946年南海, 1854年安政, 1707年宝永の各地震津波における南四国領域の各地域の計算値と観測値の比をFig. 8~Fig. 11に示す。なお、計算値/観測値は計算値の適合度 (Fitness Factor) を示す指標であり、便宜上これをF値と呼ぶ。F値が1であれば両者の適合度が最もよく、その値が小さいことは計算値は観測値よりも小さいことを意味する。

本計算では海岸境界面は完全反射と仮定しており、陸上に津波は侵入しないとしている。しかし、実際の観測値は陸上に遡上した浸水高であり、たとえF=1となっても計算結果が実際の現象を再現できたということにはならない。それは工学上の当該地域の津波高さを推定する値となっていると解釈すべきであろう。

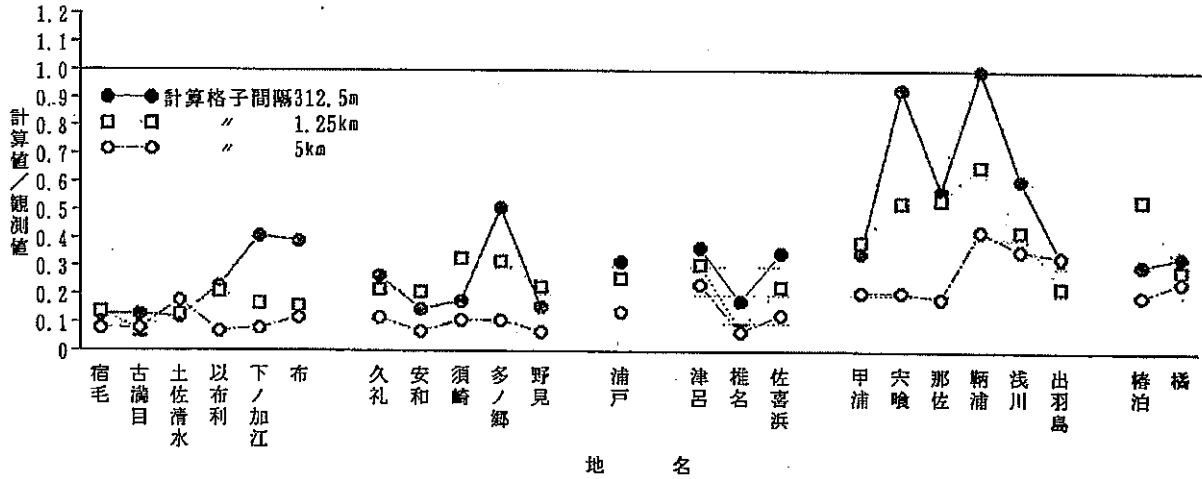
各地域における計算値と観測値の適合性について、F値が1に近い値をとる地域を適合性が高いと考え、提案

(1946年南海地震津波)

① Fitch & Scholz (1971) モデル



② Kanamori (1972) モデル



③ Ando (1975) モデル

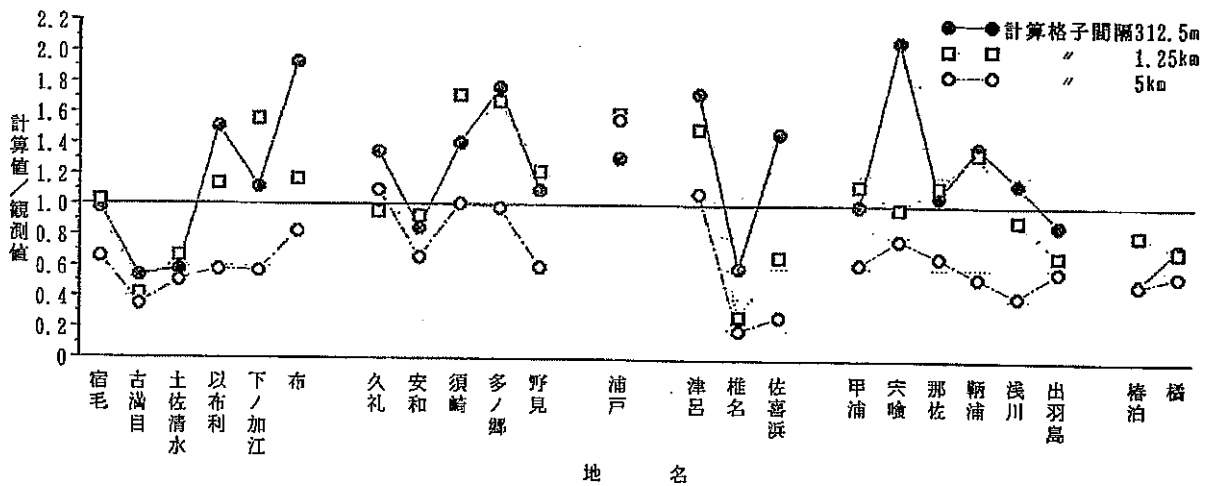


Fig. 8 Ratio between calculated and observed values of tsunami height (model①-③)

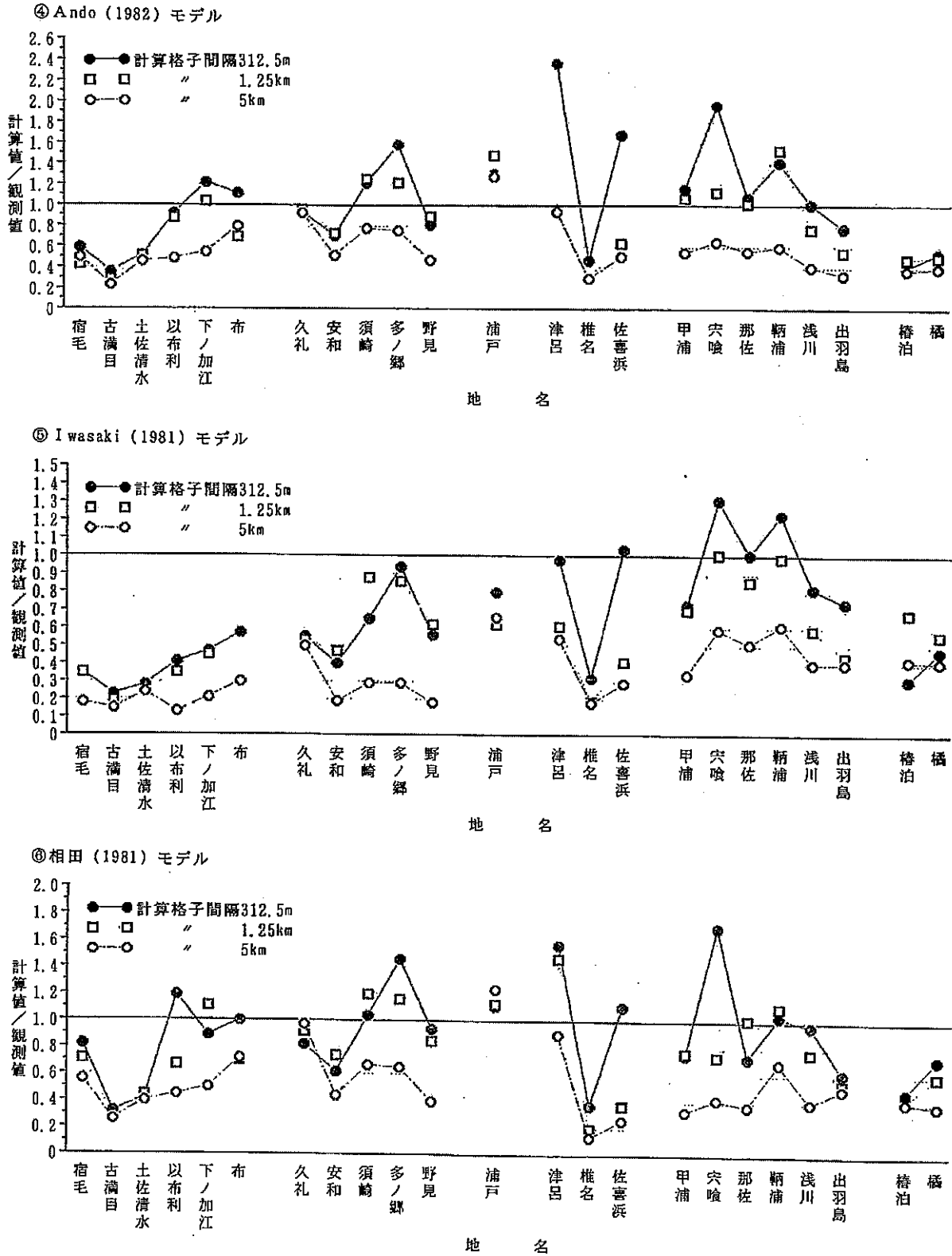


Fig. 9 Ratio between calculated and observed values of tsunami height (model④-⑥)

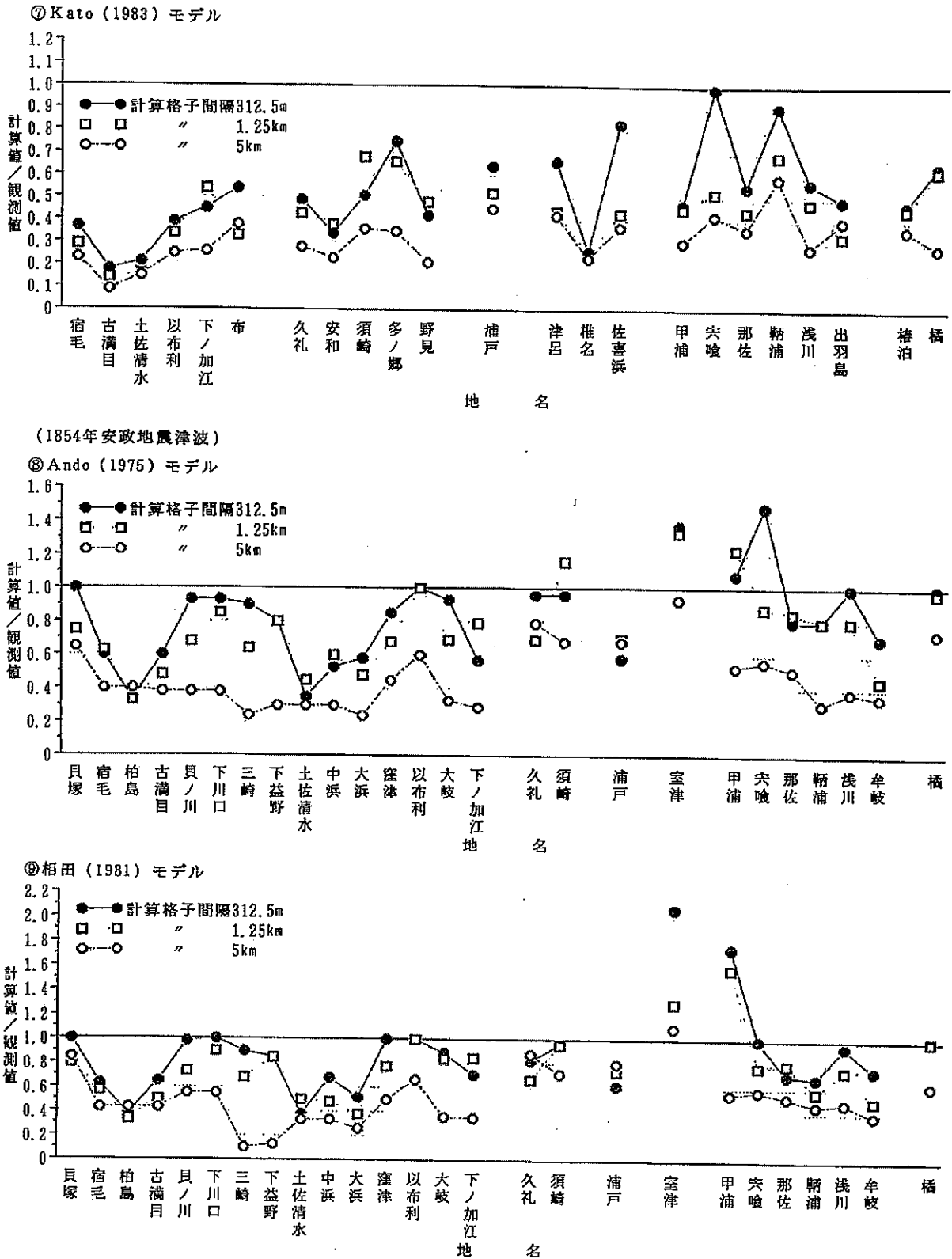
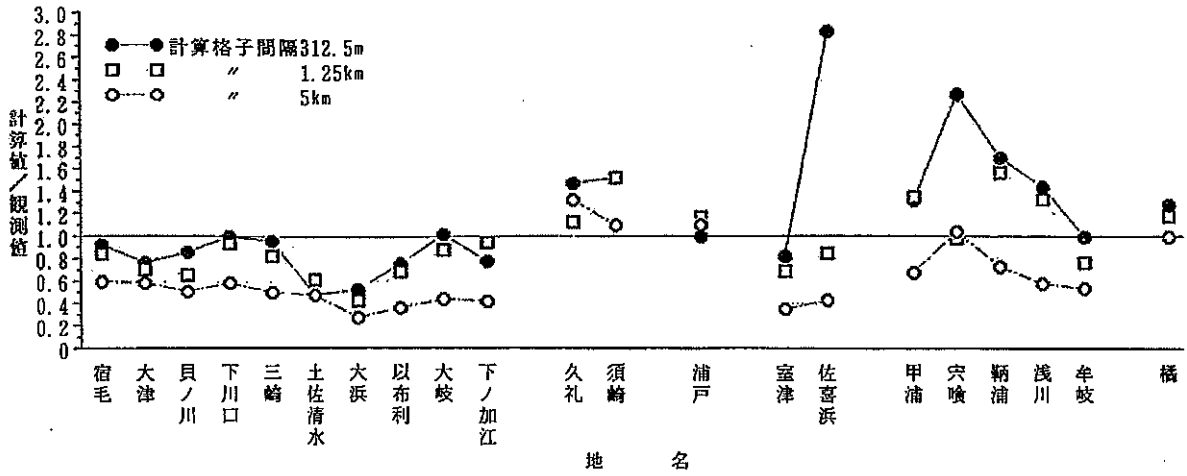


Fig. 10 Ratio between calculated and observed values of tsunami height (model⑦-⑨)

(1707年宝永地震津波)

⑩ Ando (1975) モデル



⑪ 相田 (1981) モデル

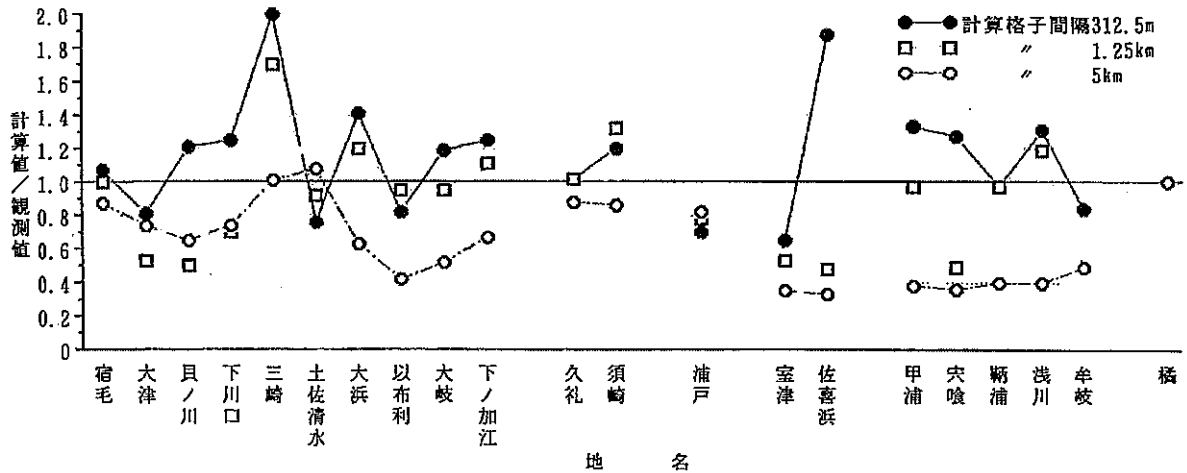


Fig. 11 Ratio between calculated and observed values of tsunami height (model⑩-⑪)

された各断層モデルごとにそれらの地域を以下に列挙する。

(1) 1946年南海地震津波 (7モデル)

① Fitch & Scholz (1971) モデル

1) 格子間隔312.5mでは、橋領域の椿泊、足摺・宿毛領域の土佐清水。

2) 格子間隔1.25kmでは、室戸領域の椎名。

3) 格子間隔5kmでは、橋領域の椿泊、足摺・宿毛領域の古溝目。

② Kanamori (1972) モデル

格子間隔312.5mにおける甲浦領域の鞆浦、穴喰。

③ Ando (1975) モデル

1) 格子間隔312.5mでは、甲浦領域の那佐、甲浦、須崎領域の野見、足摺・宿毛領域の宿毛。

2) 格子間隔1.25kmでは、甲浦領域の浅川、穴喰、須崎領域の安和、久礼、足摺・宿毛領域の宿毛。

3) 格子間隔5kmでは、室戸領域の津呂、須崎領域の多ノ郷、須崎、久礼。

④ Ando (1982) モデル

1) 格子間隔312.5mでは、甲浦領域の浅川、那佐、須崎領域の久礼、足摺・宿毛領域の以布利。

2) 格子間隔1.25kmでは、甲浦領域の那佐、甲浦、室

戸領域の津呂, 須崎領域の野見, 久礼, 足摺・宿毛領域の下ノ加江。

3) 格子間隔5 kmでは, 室戸領域の津呂, 須崎領域の久礼。

⑤ Iwasaki (1981) モデル

1) 格子間隔312.5mでは, 甲浦領域の那佐, 室戸領域の佐喜浜, 津呂, 須崎領域の多ノ郷。

2) 格子間隔1.25 kmでは, 甲浦領域の鞆浦, 穴喰。

⑥ 相田 (1981) モデル

1) 格子間隔312.5mでは, 甲浦領域の浅川, 鞆浦, 室戸領域の佐喜浜, 高知港領域の浦戸, 須崎領域の野見, 須崎, 足摺・宿毛領域の布, 下ノ加江。

2) 格子間隔1.25 kmでは, 甲浦領域の鞆浦, 那佐, 須崎領域の久礼, 足摺・宿毛領域の下ノ加江。

3) 格子間隔5 kmでは, 室戸領域の津呂, 須崎領域の久礼。

⑦ Kato (1983) モデル

格子間隔312.5mにおける甲浦領域の鞆浦, 穴喰。

(2) 1854年安政地震津波 (2モデル)

⑧ Ando (1975) モデル

1) 格子間隔312.5mでは, 橋領域の橋, 甲浦領域の浅川, 甲浦, 須崎領域の須崎, 久礼, 足摺・宿毛領域の大岐, 以布利, 三崎, 下川口, 貝ノ川, 貝塚。

2) 格子間隔1.25 kmでは, 橋領域の橋, 足摺・宿毛領域の以布利。

⑨ 相田 (1981) モデル

1) 格子間隔312.5mでは, 橋領域の橋, 甲浦領域の浅川, 穴喰, 須崎領域の須崎, 久礼, 足摺・宿毛領域の大岐, 以布利, 窪津, 三崎, 下川口, 貝ノ川, 貝塚。

2) 格子間隔1.25 kmでは, 橋領域の橋, 須崎領域の須崎, 足摺・宿毛領域の以布利。

3) 格子間隔5 kmでは, 室戸領域の室津。

(3) 1707年宝永地震津波 (2モデル)

⑩ Ando (1975) モデル

1) 格子間隔312.5mでは, 甲浦領域の牟岐, 高知港領域の浦戸, 足摺・宿毛領域の大岐, 三崎, 下川口, 宿毛。

2) 格子間隔1.25 kmでは, 甲浦領域の穴喰, 足摺・宿毛領域の下ノ加江, 下川口。

3) 格子間隔5 kmでは, 橋領域の橋, 甲浦領域の穴喰, 高知港領域の浦戸, 須崎領域の須崎。

⑪ 相田 (1981) モデル

1) 格子間隔312.5mでは, 橋領域の橋, 甲浦領域の鞆浦, 須崎領域の久礼, 足摺・宿毛領域の宿毛。

2) 格子間隔1.25 kmでは, 橋領域の橋, 甲浦領域の鞆浦, 甲浦, 須崎領域の久礼, 足摺・宿毛領域の大岐, 以

布利, 土佐清水, 宿毛。

3) 格子間隔5 kmでは, 橋領域の橋, 足摺・宿毛領域の土佐清水, 三崎。

3.2 津波高の計算値と観測値の比による統計分析

3.1で得られている計算値と観測値の関係を統計的に評価するため, 2.5で述べた相田提案による対数幾何平均 K , 対数幾何標準偏差 κ を用い, 各地震津波について統計分析を実施した。

分析は, 各種断層モデルによる津波シミュレーションの計算結果が対象とする領域の違いによりどうなるのかを把握するため, 計算格子間隔が312.5mの6つの領域を合わせた南四国全体を対象とした場合と, 各領域別の評価として津波高の観測値が数多く得られている四国東岸側の紀伊水道に位置する甲浦領域, 四国西岸側の豊後水道に近い足摺・宿毛領域を選定し, この3つの領域における各種断層モデルと各計算格子間隔を組み合わせた全てのケースについて実施した。その結果をTable 5 ~ Table 7に示す。

なお, 対数幾何平均 K および対数幾何標準偏差 κ の値は従来の津波シミュレーション結果から判断して, それぞれ $0.8 \leq K \leq 1.2$, $\kappa \leq 1.6$ といずれの基準も満たすとき, 津波高の計算値と観測値の適合性が高いと判断されている¹⁹⁾。以下では, これらの基準を満たすモデルを列挙する。

(1) 1946年南海地震津波

1) 南四国全体では, Ando (1975) モデル (格子間隔: 312.5m, 1.25 km) および相田 (1981) モデル (同: 312.5m)。

2) 甲浦領域では, Ando (1975) モデル (格子間隔: 312.5m, 1.25 km), Ando (1982) モデル (同: 312.5m, 1.25 km), Iwasaki (1981) モデル (同: 312.5m), 相田 (1981) モデル (同: 312.5m)。

3) 足摺・宿毛領域では, Ando (1975) モデル (格子間隔: 312.5m, 1.25 km)

(2) 1854年安政地震津波

1) 南四国全体では, 相田 (1981) モデル (格子間隔: 312.5m)。

2) 甲浦領域では, Ando (1975) モデル, 相田 (1981) モデル (いずれも格子間隔: 312.5m)。

3) 足摺・宿毛領域では, Ando (1975) モデル, 相田 (1981) モデルとも, いずれの格子間隔の場合も適合性が低い。なお, 格子間隔が312.5mおよび1.25 kmでは κ の値がいずれも判断基準を満たしており, これら断層モデルを用いて津波シミュレーションを実施する場合は K の値を補正率として用いることで対応することが可能

Table 5 Values K and κ for tsunami in Nankai earthquake, 1946

(南四国全体)								
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	① Fitch & Scholz (1971)	② Kanamori (1972)	③ Ando (1975)	④ Ando (1982)	⑤ Iwasaki (1981)	⑥ 相田 (1981)	⑦ Kato (1983)
312.5m (K3)	K	0.34	3.28	0.92	1.06	1.70	1.20	2.06
	κ	1.75	1.79	1.49	1.64	1.63	1.54	1.52
1.25km (K2)	K	0.36	3.99	1.03	1.31	1.98	1.42	2.45
	κ	1.67	1.76	1.54	1.58	1.61	1.62	1.49
5km (K1)	K	0.59	7.01	1.62	1.85	3.20	2.13	3.39
	κ	1.95	1.75	1.57	1.48	1.61	1.61	1.47

(甲浦領域)								
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	① Fitch & Scholz (1971)	② Kanamori (1972)	③ Ando (1975)	④ Ando (1982)	⑤ Iwasaki (1981)	⑥ 相田 (1981)	⑦ Kato (1983)
312.5m (K3)	K	0.25	1.74	0.83	0.85	1.05	1.09	1.58
	κ	1.28	1.54	1.32	1.33	1.26	1.39	1.34
1.25km (K2)	K	0.30	2.27	0.99	1.04	1.37	1.24	2.12
	κ	1.20	1.40	1.24	1.38	1.34	1.26	1.25
5km (K1)	K	0.47	3.63	1.69	1.98	2.16	2.29	2.63
	κ	1.13	1.36	1.21	1.27	1.24	1.28	1.27

(足摺・宿毛領域)								
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	① Fitch & Scholz (1971)	② Kanamori (1972)	③ Ando (1975)	④ Ando (1982)	⑤ Iwasaki (1981)	⑥ 相田 (1981)	⑦ Kato (1983)
312.5m (K3)	K	0.42	4.87	1.00	1.39	2.72	1.43	3.02
	κ	1.67	1.67	1.59	1.55	1.36	1.61	1.48
1.25km (K2)	K	0.48	7.17	1.09	1.71	3.32	1.67	3.64
	κ	1.41	1.39	1.54	1.55	1.32	1.54	1.57
5km (K1)	K	1.12	10.39	1.77	2.10	5.14	2.18	4.82
	κ	2.05	1.38	1.31	1.45	1.32	1.37	1.58

Table 6 Values K and κ for tsunami in Ansei earthquake, 1854

(南四国全体)				
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	⑧ Ando (1975)	⑨ 相田 (1981)	
312.5m (K3)	K	1.27	1.16	
	κ	1.44	1.51	
1.25km (K2)	K	1.41	1.38	
	κ	1.39	1.45	
5km (K1)	K	2.38	2.25	
	κ	1.44	1.67	

(甲浦領域)				
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	⑧ Ando (1975)	⑨ 相田 (1981)	
312.5m (K3)	K	1.06	1.09	
	κ	1.28	1.38	
1.25km (K2)	K	1.30	1.35	
	κ	1.34	1.45	
5km (K1)	K	2.39	2.03	
	κ	1.25	1.15	

(足摺・宿毛領域)				
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	⑧ Ando (1975)	⑨ 相田 (1981)	
312.5m (K3)	K	1.44	1.31	
	κ	1.47	1.49	
1.25km (K2)	K	1.60	1.56	
	κ	1.35	1.43	
5km (K1)	K	2.85	2.80	
	κ	1.27	1.68	

Table 7 Values K and κ for tsunami in Hoei earthquake, 1707

(南四国全体)				
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	⑩ Ando (1975)	⑪ 相田 (1981)	
312.5m (K3)	K	0.92	0.92	
	κ	1.52	1.34	
1.25km (K2)	K	1.10	1.21	
	κ	1.39	1.47	
5km (K1)	K	1.70	1.72	
	κ	1.55	1.49	

(甲浦領域)				
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	⑩ Ando (1975)	⑪ 相田 (1981)	
312.5m (K3)	K	0.66	0.89	
	κ	1.29	1.21	
1.25km (K2)	K	0.86	1.31	
	κ	1.29	1.46	
5km (K1)	K	1.48	2.55	
	κ	1.29	1.13	

(足摺・宿毛領域)				
計算格子間隔 (領域)	断層 モデル	⑩ Ando (1975)	⑪ 相田 (1981)	
312.5m (K3)	K	1.27	0.88	
	κ	1.28	1.32	
1.25km (K2)	K	1.35	1.11	
	κ	1.26	1.42	
5km (K1)	K	2.15	1.41	
	κ	1.26	1.31	

である。

(3)1707年宝永地震津波

1)南四国全体では, Ando (1975) モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km), 相田(1981)モデル(同: 312.5m)。

2)甲浦領域では, Ando (1975) モデル(格子間隔: 1.25km), 相田(1981)モデル(同: 312.5m)。

3)足摺・宿毛領域では, 相田(1981)モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km)。

4. 結 論

本研究では, 1946年南海, 1854年安政および1707年宝永の各地震津波で提案されている11種類の断層モデルを用い, 計算格子間隔が5km, 1.25kmおよび312.5mの場合における津波シミュレーションを実施して, その適合性を検証した。津波高に関する計算値と観測値の適合性および統計分析結果については, 3. の計算結果で詳述したとおりである。ここでは, 今後, 四国沿岸域を対象とした津波シミュレーションを実施する場合の断層モデルの選定および計算格子間隔の決定に関する参考資料とするため, 本研究で得られた結果をとりまとめて以下に示す。

(1) 1946年南海地震津波

1)南四国全体を対象とする場合は, 提案された7つの断層モデルの中では, Ando (1975) モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km) および相田(1981)モデル(同: 312.5m) の2つの断層モデルが適合性が高い。

2)四国東岸の紀伊水道に接する甲浦領域を対象とする場合は, Ando (1975) モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km), Ando (1982) モデル(同: 312.5m, 1.25km), Iwasaki (1981) モデル(同: 312.5m) および相田(1981)モデル(同: 312.5m) の4つの断層モデルで適合性が高い。

3)四国西岸の豊後水道に近い足摺・宿毛領域を対象とする場合は, Ando (1975) モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km) を用いるのが妥当である。

(2)1854年安政地震津波

1)南四国全体を対象とする場合は, 相田(1981)モデル(格子間隔: 312.5m) が妥当である。

2)甲浦領域を対象とする場合は, Ando (1975) モデル, 相田(1981)モデル(いずれも格子間隔: 312.5m) の適合性が高い。

3)足摺・宿毛領域を対象とする場合は, Ando (1975) モデル, 相田(1981)モデルとも適合性が低い。なお, この領域では格子間隔が312.5mおよび1.25kmの場

合, 対数幾何標準偏差 κ の判断基準 $\kappa \leq 1.6$ のみは必ずしも満たしている。

(3)1707年宝永地震津波

1)南四国全体を対象とする場合は, Ando (1975) モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km) および相田(1981)モデル(同: 312.5m) の適合性が高い。

2)甲浦領域を対象とする場合は, 相田(1981)モデル(格子間隔: 312.5m), Ando (1975) モデル(同: 1.25km) の適合性が高い。

3)足摺・宿毛領域を対象とする場合は, 相田(1981)モデル(格子間隔: 312.5m, 1.25km) が妥当である。

なお, 上述した南四国全体, 各領域において適合性が高いと判断された断層モデルを用いて津波シミュレーションを実施する場合でも, 従来より行われている対数幾何平均 K の値を補正率として考慮することは, その精度すなわち計算値と観測値の適合性をさらに高めるため必要であることはいうまでもない。

また, 今回対象とした3つの地震津波の南四国全体および各領域において適合性が高いと判断された断層モデルでも, 各地域ごとに見ると計算値と観測値に多少の差が見られるものも少なくない。したがって, これらの各地域についても計算値と観測値の比の値を補正率として考慮するなど, その精度を高めることが必要である。

さらに, 1854年安政地震津波の足摺・宿毛領域での津波シミュレーション結果で見られるように, 現在提案されている断層モデルを用いた場合でもその適合性が低い領域および地域があることをふまえ, これら地震津波および領域, 地域に対する適合性の高い新たな断層モデルの検討, 提案が望まれる。

一方, 津波シミュレーションを実施する場合においても沿岸部の詳細な海底地形データの入手, 当時の地形・構造物の状況把握, 観測値の精度ならびに地盤変動による補正など, 多くの問題点をかかえている。

これらの諸問題については, 今後の課題として取り組んでいきたい。

謝辞: 最後に, 本研究を行うにあたりご協力をいただいた日本工営関石塚淳一氏(元徳島大学大学院生), 徳島大学大学院生佐藤広章氏に謝意を表す。また, 本研究は平成7年度文部省科学研究一般研究(C)(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

- 1)村上仁士, 島田富美男, 伊藤禎彦, 山本尚明, 石塚

- 渟一：四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，Vol. 15, No.1, 1996（印刷中）。
- 2) Fitch, T. J. and C. H. Scholz: Mechanism of underthrusting in southwest Japan: A model of convergent plate interactions, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, pp.7260-7292, 1971.
- 3) Kanamori, H. : Tectonic implication of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol.5, pp. 129-139, 1972.
- 4) Ando, M. : Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, *Japan. Tectonophysics*, Vol.27, pp.119-140, 1975.
- 5) Ando, M. : A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol.28, pp.320-336, 1982.
- 6) Iwasaki, T. : Theoretical study on the surface deformations in a medium with viscoelastic layers (surface loads and dislocation sources) - Rheological structure of the upper mantle, Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo, 1981.
- 7) 相田 勇：南海道沖の津波の数値実験，東京大学地震研究所集報，Vol.56, pp.713-730, 1981.
- 8) Kato, T. : High-angle reverse faulting associated with the 1946 Nankaido earthquake, *Tectonophysics*, Vol.96, pp.31-44, 1983.
- 9) 相田 勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験，東京大学地震研究所集報，Vol.56, pp.367-390, 1981.
- 10) Mansinha, L. and D. E. Smylie: The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 11) 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集報，Vol.52, pp.71-101, 1977.
- 12) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会，pp.1-214, 1989.
- 13) 後藤智明，佐藤一央：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発，港湾技術研究所報告，Vol. 32, No.2, pp.3-44, 1993.