10. 特性化した波源断層モデルの妥当性の検討

「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)」(地 震調査委員会,2013)(以下,長期評価と略す)では, 南海トラフ沿いの地震の評価対象領域を図10.1-1の ように南海トラフの走向方向に6領域,フィリピン 海プレートの沈み込み方向に3領域に分割し,分割 したそれぞれの領域が個別に,あるいは複数が一体 となって地震を発生させる可能性が考慮されてい る.長期評価を踏まえ,6.3.3項では分割したそれ ぞれの領域の組合せで表現される多様な震源域に対 応する特性化波源断層モデルを作成した.また,長 期評価では,南海トラフ沿いでこれまで発生した大 地震の規模について表10.1-1のように評価するとと もに,各地震の震源域の拡がりについても言及して いる.

本章では,表10.1-1の宝永地震以降の5地震を検 討対象として,各地震の震源域に対応する特性化波 源断層モデルを用いた津波伝播遡上計算結果と,4.2 節に示した各地震の津波痕跡高データとを比較する ことで,特性化波源断層モデルの妥当性を検討する. なお,本章では特に断りのない限り,特性化波源断 層モデルを単に波源断層モデルと称することとす る.

	発生年月日	規模		
		М	Mt	Mw
正平(康安)東海地震	1361/08/0?			
正平(康安)南海地震	1361/08/03	8¼ ~ 8.5		
^{めいおう} 明応地震	1498/09/20	8.2 ~8.4	8.5	
慶長地震	1605/02/03	7.9	8.2	
宝永地震	1707/10/28	8.6	8.4	
安政東海地震	1854/12/23	8.4	8.3	
安政南海地震	1854/12/24	8.4	8.3	
昭和東南海地震	1944/12/07	7.9	8.1	8.1 ~ 8.2
昭和南海地震	1946/12/21	8.0	8.1	8.2 ~ 8.5

表 10.1-1 南海トラフ沿いの大地震の規模 (地震調査委員会, 2013)

※マグニチュードとして、宇津(1999)の表に記述されたマグニチュード (M)、津波の大きさから決めた津波マグニチュード(Mt)、各種研究成果を 踏まえ、地震モーメント等を利用して推定したモーメントマグニチュード(Mw) を示す。正平(康安)東海地震の発生年月日は南海地震と同時に起きた (8/3)という説と、2日前に起きた(8/1)という説があるため、日の表記を "?"にした。



図 10.1-1 南海トラフ沿いで発生するプレート間地震の 地震発生帯の領域区分(地震調査委員会(2013) に加筆)(図 8.2.1-1 再掲)

表10.1-2 津波伝播遡上計算の計算方法・条件

項目	計算方法・条件
方程式	非線形長波理論 (移流項,底面摩擦項,有限振幅項を含 む)
数値解法	東北大学モデル(Imamura <i>et al.</i> , 2006) Staggered Leap-frog 差分スキーム
計算格子間隔	1350 m, 450 m, 150 m, 50 m (海岸域 は全て 50 m) それぞれの領域を 1:3 でネスティング
計算時間	3~12時間(南海トラフ沿いの地震を 対象とした津波伝播遡上計算の計算条 件と同じ)
境界条件	陸側:陸域へ遡上 海側:完全無反射で透過
施設	各種施設(堤防・水門など)は考慮しな い
初期水位	Okada (1992) により計算される海底変 動量に,水平方向成分の寄与(Tanioka and Satake, 1996) を考慮し,梶浦フィル ター(Kajiura, 1963)を適用
動的破壞特性	ライズタイム:考慮しない 破壊伝播過程:考慮しない
潮位条件	T.P. ± 0 m
打ち切り水深	10 ⁻² m
粗度係数	$0.025 (\mathrm{m}^{-1/3}\mathrm{s})$

10.1 検討方法

特性化波源断層モデルによる津波伝播遡上計算 は,表10.1-2の計算方法・条件で実施した.津波伝 播遡上計算の詳細は7.3節を参照されたい.津波痕 跡高と計算津波高との比較では,痕跡高データの記 録地点から最も近いハザード評価点(汀線)の計算値 を1対1で対応づけて津波高を比較した.津波痕跡 高データは4.2節で選別されたものを用いた.また, 計算津波高として最大水位(T.P.)を用いた.

特性化波源断層モデルの妥当性, すなわち津波痕 跡高の再現性の評価では, (10.1-1)式で定義される 津波痕跡高と計算津波高の残差二乗和 Δ を参考値と して用いた.

$$\Delta = \sum_{i=1}^{N} (H_{cal}(i) - H_{obs}(i))^2$$
(10.1-1)

ここで,

H_{cal}(i):i番目の地点での計算津波高(最大水位(T.P.))
 H_{obs}(i):i番目の地点での津波痕跡高
 N:データ数

である.残差二乗和で評価される再現性は,津波痕 跡高の大きなデータに重みを置いた評価であり,値 が小さいほど再現性の高いモデルと判断できる.

また, Aida (1978) による幾何平均 K, および幾何 標準偏差 κ((10.1-2) 式, および(10.1-3) 式) も参考値 として算出した.

$$\log K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \log K_i$$
 (10.1-2)

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\log K_i)^2 - (\log K)^2\right]^{1/2}$$
(10.1-3)

ここで,

 $K_i = H_{obs} (i) / H_{cal} (i)$

である. 再現性の評価では, 土木学会 (2002) で示さ れている目安である, 0.95 < K < 1.05, かつ, κ < 1.45 という条件も参考とした.

再現性の評価は以下の手順で行った.まず, 6.3.3 項で作成した波源断層モデルのうち,検討対象とす る地震の震源域に対応するものを用いて計算した最 大水位(T.P.)と津波痕跡高を図面上で比較して再現 性を目視で確認する. その際, 残差二乗和, K, к も参考とする.この確認作業をステップ1と呼ぶこ ととする.ステップ1で再現性が低いと判断される 場合には,残差二乗和の小さな波源断層モデルに修 正を加えたモデルを用いた再現性の確認を行う. モ デルの修正では、長期評価と不整合のない範囲で地 震規模(M,)を調整するほか、大すべり域の形状や すべり量を変化させることで、津波痕跡を再現する 波源断層モデルを作成した. この確認作業をステッ プ2と呼ぶ、次節以降では、宝永地震以降の5つの 南海トラフ沿いの地震を対象とした検討について詳 述する.

10.2 1707 年宝永地震の津波痕跡を用いた再現性の 検討

(1) ステップ1

1707 年宝永地震の震源域は長期評価による領域 ADm に対応するものとする(震源域記号について は,8.2節参照).この領域を震源域とする波源断層 モデル(大すべり域を2つ配置したモデル)は全部で 135 個設定されており(表6.3.3-2,巻末資料2 南海 トラフ 波源断層モデル図 図9参照),ステップ 1 では,これらの波源断層モデル群に対して再現性 の検討を行う.領域 ADm を震源域とするモデル群 の断層パラメータを表10.2-1 に示す.

まず,4.2 節で選別した1707 年宝永地震の津波痕 跡高(図 10.2-1)を,その地点から最も近いハザード 評価点(汀線)において計算された最大水位(T.P.)と 比較した.残差二乗和,*K*,κの値を表10.2-2 に示す. このうち,残差二乗和が最小となった波源断層モデ ル(NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d2_02_Δσ2.6)に対 する計算津波高と1707 年宝永地震の津波痕跡高と の比較図(図 10.2-2)を見ると,赤三角印で示した計 算津波高は全体的に過小評価となっていることがわ かる.

同様に,目視によって,他のすべての波源断層モ デルの計算津波高のいずれも痕跡高よりも過小と

表 10.2-1 領域 ADm を震源域とする特性化波源断層モデ ルのパラメータ

	ステップ1	ステップ2		
M_w	8.7 8.8			
M_0 (Nm)	1.43E+22	2.36E+22		
断層面積 (km ²)	56338			
平均すべり量(m)	5.1	8.4		
大すべり域のすべり量 (m)	10.1	16.8		
背景領域のすべり量(m)	2.9	4.8		
断層面積に対する 大すべり域の面積比 (%)	30			
平均すべり量に対する 大すべり域のすべり量比	2.0			
平均応力降下量 (MPa)	2.6	4.3		

なっていることが確認でき(図は省略),表10.2-2 に 示した K の値もほとんどの波源断層モデルに対して 1.5 以上となる.

これらのことから,1707 年宝永地震は,将来の地 震を予測するために長期評価で想定されたスケーリ ング則から推定される *M*_w8.7(6.3.3 項の**表 6.3.3-1**)よ りもやや規模の大きい地震であった可能性が示唆さ れる.



図 10.2-1 1707年宝永地震の津波痕跡高データ(図 4.2-1 再掲)

表 10.2-2 1707 年宝永地震の津波痕跡高に対する各特性化波源断層モデルによる K, κ, 残差二乗和. 図 10.2-2 の痕跡高 と計算高の比較に用いた波源断層モデルを薄橙色で示す.

NK ADm TYPE2Eh 30L2 d1 d1 02 Δσ2 6 1 72 1 65 502 4 NK ADm TYPE2Eh 30L2 m2 s4 02 Δσ2 6 1 58		
	1.72	577.5
<u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d1_d2_02_Δσ2.6</u> 1.75 1.60 492.3 <u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_d1_02_Δσ2.6</u> 1.68	1.74	525.5
<u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d1_d3_02_Δσ2.6</u> 1.80 1.51 520.2 <u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_d2_02_Δσ2.6</u> 1.70	1.68	526.2
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d1_d4_02_A02.6 1.87 1.57 619.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_d3_02_A02.6 1.75	1.61	556.6
NK_ADm_1YPE2Eh_30L2_d1_m1_02_A02.6 1.69 1.69 513.8 NK_ADm_1YPE2Eh_30L2_m3_04_U2_A02.6 1.88	1.64	641.5 522.7
NK_ADIT_TFEZET_3UL2_01_III2_02_A02.0 1.70 1.00 303.0 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_III_12_A02.0 1.02 1.02 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_III_2_02_A02.0 1.02 1.02 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_III_2_03_R02_02_A02.0 1.02 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_III_R02_A02.0 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_III_R02_A02.0 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_IIII_R02_A02.0 NK_ADIT_TFEZET_3UL2_IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII	1.70	527.0
NK ADM TYPEZEH 3012 d1 m4 02 A72 6 1.73 1.62 606 9 NK ADM TYPEZEH 3012 m3 m3 02 A72 6 1.72	1.66	550.2
NK ADM TYPEZEN 3012 d1 s1 02 402.6 1.72 1.71 523.1 NK ADM TYPEZEN 3012 m3 m4 02 402.6 1.72	1.65	619.1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d1_s2_02_Δσ2.6 1.70 1.64 503.5 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_s1_02_Δσ2.6 1.62	1.78	545.4
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d1_s3_02_Δσ2.6 1.65 1.57 500.2 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_s2_02_Δσ2.6 1.67	1.69	532.3
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d1_s4_02_Δσ2.6 1.64 1.67 602.7 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_s3_02_Δσ2.6 1.69	1.65	544.9
<u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d2_d1_02_Δσ2.6</u> 1.80 1.73 582.7 <u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m3_s4_02_Δσ2.6</u> 1.61	1.71	610.6
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d2_d2_02_Δσ2.6 1.78 1.63 558.5 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m4_d2_02_Δσ2.6 1.86	1.84	733.6
NK_ADm_1YPE2Eh_30L2 d2 d3 02 Δσ2.6 1.81 1.57 581.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m4_d3_02_Δσ2.6 1.88	1.77	727.1
NK_ADIT_TTPEZET_30L2_02_04_02_A02.6 1.90 1.02 07.3.9 NK_ADIT_TTPEZET_30L2_04_04_02_A02.6 1.94	1.77	785.0
NK ADM TYPEZEL 3012 dz m1 02 A02.6 1.75 1.68 559.5 NK ADM TYPEZEL 3012 04 m2 02 A02.6 1.83	1.89	/35.2
NK ADM TYPEZEN 30L2 d2 m3 02 A02.6 1.72 1.62 568.4 NK ADM TYPEZEN 30L2 m4 m3 22 A02.6 1.83	1.02	7 19.0
NK ADM TYPE2Eh 30L2 d2 m4 02 Δσ2.6 1.76 1.67 664.7 NK ADM TYPE2Eh 30L2 m4 92 02 Δσ2.6 1.76	1.01	723.8
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d2_s1_02_Δσ2.6 1.74 1.76 595.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m4_53_02_Δσ2.6 1.78	1.30	710.8
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d2_s2_02_Δσ2.6 1.72 1.67 558.0 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m4_s4_02_Δσ2.6 1.69	1.88	778.2
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d2_s3_02_Δσ2.6 1.68 1.62 566.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d1_02_Δσ2.6 1.58	1.68	360.1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d2_s4_02_Δσ2.6 1.67 1.73 671.2 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d2_02_Δσ2.6 1.58	1.58	333.1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d3_d1_02_Δσ2.6 1.75 1.76 601.1 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d3_02_Δσ2.6 1.62 1.62	1.52	363.0
NK_ADm_1YPE2Eh_30L2_d3_d2_U2_Δ02.6 1.80 1.69 592.5 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d4_02_Δ02.6 1.78	1.59	470.0
NK_ADM_17FE2Eh_30L2_03_04_02_Δ02.6 1.66 7341 NK_ADM_TYPE2Eh_30L2_s1_m1_02_Δ02.6 1.56	1.71	373.0
NK Δ0m TYPE2Eh 30L2 d3 m1 02 Δq2 6 1.71 178 6124 NK_Δ0m_TYPE2Eh_30L2 s1_m2_02_Δq2.6 1.58	1.63	339.9
NK ADM TYPEZEN 30L2 d3 m2 02 Ag2 6 1.78 1.73 596.8 NK ADM TYPEZEN 30L2 s1 m3 02 Ag2 6 1.59	1.57	352.2
NK ADm TYPE2Eh 30L2 d3 m3 02 Δσ2.6 1.78 1.67 614.0 NK ADm TYPE2Eh 30L2 s1 m4 02 Δσ2.6 1.62	1.60	450.0
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d3_m4_02_Δσ2.6 1.82 1.70 709.9 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_s1_02_Δσ2.6 1.58	1.72	300.7
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d3_s1_02_Δσ2.6 1.70 1.80 622.0 11.75 1.75 1.75 1.75 1.75 1.75 1.75 1.7	1.05	3/18 1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d3_s2_02_Δσ2.6 1.74 1.73 600.3 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_s4_02_Δσ2.6 1.53	1.65	447.0
NK ADm_TYPE2Eh_30L2_d3_s3_02_Δo2.6 1.73 1.67 608.2	1.72	368.4
NK ADm_1YPE2Eh_30L2 d3 s4 02 Δσ2.6 1.72 1.76 704.0 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2 s2 d2 02 Δσ2.6 1.50	1.62	344.6
NK_ADJ_117E2Eh_30L2_04_02_02_Δ02.6 1.92 1.62 76.4 NK_ADJ_17E 756.8 NK_ADJ_17E2Eh_30L2_52_d3_02_Δ02.6 1.55	1.55	366.0
NK ADm TYPE2Eh 30L2 d4 d4 02 Δα2.6 1.67 NK ADm TYPE2Eh 30L2 s2 d4 02 Δα2.6 1.67	1.63	447.8
NK ADm TYPE2Eh 30L2 d4 m2 02 Δσ2.6 1.87 1.88 766.9 NK ADm TYPE2Eh 30L2 s2_m1_02_Δσ2.6 1.46	1.73	376.0
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d4_m3_02_Aoz.6 1.87 1.79 743.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s2_m2_02_Aoz.6 1.51	1.66	346.9
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d4_m4_02_Δσ2.6 1.87 1.79 814.9 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s2_m3_02_Δσ2.6 1.52	1.60	361.9
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_d4_s2_02_Δσ2.6 1.79 1.88 760.5 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s2_m4_02_Δσ2.6 1.53	1.01	429.9
NK ADm_TYPE2Eh_30L2_04_s3_02_do2.6 1.83 1.79 740.1 NK ADm_TYPE2Eh_30L2_s3_102_04_s3_02_do2.6 1.47	1.66	353.8
NK ADm_TYPE2Eh_30L2_64_s4_0_2_62_6 1.75 1.87 824.0 NK ADm_TYPE2Eh_30L2_s2_3_02_02_6 1.50	1.59	359.5
NK_ADm_17PE2Eh_30L2_m1_d1_02_A02.6 1.66 1.67 2964 NK ADm_17PE2Eh_30L2_s2_s4_02_A02.6 1.43	1.65	424.9
NK_ADM_TYPE2Eh_3012_m1_d3_02_Δq2_6 1.50 1.51 418.7 NK_ADM_TYPE2Eh_30L2_s3_d1_02_Δq2_6 1.58	1.83	486.9
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m1_d4_02_Δσ2.6 1.81 1.57 518.1 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s3_d2_02_Δσ2.6 1.61	1.74	474.1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m1_m1_02_Δσ2.6 1.63 1.70 426.5 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s3_d3_02_Δσ2.6 1.67	1.67	498.1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m1_m2_02_Δσ2.6 1.64 1.63 395.7 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s3_d4_02_Δσ2.6 1.75	1.72	555.4
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m1_m3_02_Δσ2.6 1.62 1.55 405.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s3_m1_02_Δσ2.6 1.55	1.85	493.8
<u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m1_m4_02_Δσ2.6</u> 1.66 1.60 501.4 <u>NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s3 m2_02_Δσ2.6</u> 1.60 1.60	1.78	469.6
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m1_s1_02_Δσ2.6 1.64 1.71 439.3 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s3_m3_02_Δσ2.6 1.64	1.72	488.9
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2 m1_s2_02_Ao2.6 1.65 1.63 404.2	1.71	503.5
NK_ADM_ITPEZED_30L2_M1_\$3_U2_Δ02.0 1.59 1.55 405.2 NK_ADM_TYPE2ED_30L2_S3_S1_02_Δ02.0 1.57 NK_ADM_TYPE2ED_30L2_S3_S1_02_Δ02.0 1.57	1 78	475.4
NK ΔDm TVPE2Eh 3012 m2 d1 02 Δα2.6 1.65 1.75 402.6 NK ΔDm TVPE2Eh 3012 s3 s3 02 Δα2.6 1.61	1.72	485.3
NK ADm TYPE2Eh 30L2 m2 d2 02 Δσ2.6 1.64 1.67 476.2 NK ADm TYPE2Eh 30L2 s3 s4 02 Δσ2.6 1.50	1.75	527.0
NK ADm TYPE2Eh 30L2 m2 d3 02 Δσ2.6 1.69 1.61 512.2 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s4_d2_02_Δσ2.6 1.78	1.83	660.8
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m2_d4_02_Δσ2.6 1.81 1.65 598.1 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s4_d3_02_Δσ2.6 1.81	1.78	667.9
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m2_m1_02_Δσ2.6 1.59 1.76 500.3 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s4_d4_02_Δσ2.6 1.88	1.78	728.2
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m2_m2_02_Δσ2.6 1.64 1.71 484.2 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s4_m2_02_Δσ2.6 1.76	1.88	660.1
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_m2_m3_02_Δσ2.6 1.65 1.67 508.6 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s4_m3_02_Δσ2.6 1.78	1.82	656.4
NK_ADm_1YPE2Eh_30L2_m2_m4_02_Δσ2.6 1.67 1.67 582.7 NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s4_m4_02_Δσ2.6 1.73	1.81	716.1
INK_AUM_ITEZEN_JULZ_MZ_S1_UZ_Δ02.0 1.59 1.78 511.9 INK_AUM_ITEZEN_JULZ_S4_S2_UZ_Δ02.0 1.71	1.90	652.4
NK ADm TYPE2Eh 30L2 m2 s3 02 $\Delta\sigma$ 2.6 1.62 1.65 503.2 NK ADm TYPE2Eh 30L2 s4 s4 02 $\Delta\sigma$ 2.6 1.62	1.88	718.8



NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d2_02_Δσ2.6

図10.2-2 (左)1707 年宝永地震の津波痕跡高(青菱形)とステップ1 で残差二乗和が最小のモデルによる計算津波高 (赤三角)との比較.(右)残差二乗和が最小の特性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は 背景すべり域, 橙色の領域は大すべり域を示す.





図10.2-3 (左)1707 年宝永地震の津波痕跡高(青菱形)とステップ2 で設定した波源断層モデルの計算津波高(赤三角) との比較.(右)対応する特性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景すべり域,橙色の 領域は大すべり域を示す.

(2) ステップ2

ステップ1での過小評価を解消するため,残差二 乗和が最小となった波源断層モデル(図10.2-2)の地 震規模(すべり量)を調整する.長期評価(表 10.1-1) では宝永地震の M_wは評価されていないため,昭和 南海地震,昭和東南海地震のM_wとMの関係から類 推し M_w8.8 とした. 作成した波源断層モデルの断層 パラメータを表 10.2-1 に示す.

表10.2-3 ステップ2 で設定した特性化波源断層モデル による 1707 年宝永地震の津波痕跡高に対する К, к, 残差二乗和

特性化波源断層モデル	К	к	残差二乗和
NK_ADm_TYPE2Eh_30L2_s1_d2_Mw8.8_02	1.05	1.58	364.4

1707 年宝永地震の津波痕跡高と計算津波高との 比較を図10.2-3 に示す.計算高は津波痕跡高とよ く合っていることが目視で確認できる.また,表 **10.2-3** に示された残差二乗和, K, κの値から, 作成 したモデルは K が1 に近い値となり, ステップ1 に おける過小評価は解消されたことが理解できる. す なわち,将来の地震を予測するために長期評価で想 定されたスケーリング則から推定される地震規模に 対して不確実さを考慮して調整することで津波痕跡 高を再現することができた.

10.3 1854 年安政東海地震の津波痕跡を用いた再現 性の検討

(1) ステップ1

1854 年安政東海地震の震源域は、長期評価によ る領域 CEm に対応するものとする(震源域記号に ついては、8.2節参照). この領域を震源域とする波 源断層モデル(大すべり域を1つ配置したモデル)は 12 個設定されている(表 6.3.3-2,巻末資料 2_南海 トラフ波源断層モデル図 図13参照). これらの波 源断層モデル群に対して再現性の検討を行う. 領域 CEm を震源域とするモデル群の断層パラメータを 表 10.3-1 に示す.

前節と同様に,4.2節で選別した1854年安政東 海地震の津波痕跡高(図10.3-1)を,その地点から最 も近いハザード評価点(汀線)において計算された最 大水位(T.P.)と比較した.残差二乗和,*K*, κの値を **表 10.3-2**に示す.目視による確認では,大すべり域 が最も西側に位置する場合に再現性が高い傾向が認 められた.そこで,大すべり域が最も西側に位置す る3つの波源断層モデルに対する計算津波高と1854 年安政東海地震の津波痕跡高との比較図を図10.3-2 に示す.赤三角で示した計算高は青菱形で示した 津波痕跡高の分布の特徴をとらえているものの,全 体的に過小評価となっていることがわかる.また, **表 10.3-2**に示した波源断層モデルに対する*K*の値 は,いずれも2程度より大きな値となっている.

これらのことから, 1854 年安政東海地震は, 将 来の地震を予測するために長期評価で想定された スケーリング則から推定される *M*_w8.3 (6.3.3 項の **表 6.3.3-1**) よりもやや規模の大きい地震であった可 能性が示唆される.

表 10.3-1 領域 CEm を震源域とする特性化波源断層 モデルのパラメータ

	ステップ1	ステップ2	
M_w	8.3 8.6		
<i>M</i> ₀ (Nm)	4.21E+21	1.00E+22	
断層面積 (km ²)	24969		
平均すべり量(m)	3.4	8.0	
大すべり域のすべり量 (m)	6.8	16.0	
背景領域のすべり量(m)	1.7	4.6	
断層面積に対する 大すべり域の面積比 (%)	30		
平均すべり量に対する 大すべり域のすべり量比	2.0		
平均応力降下量 (MPa)	2.6	6.2	

表 10.3-2 1854 年安政東海地震の津波痕跡高に対する各特 性化波源断層モデルによる K, κ, 残差二乗和. 図 10.3-2 の痕跡高と計算高の比較に用いた特性 化波源断層モデルを薄橙色で示す.

特性化波源断層モデル	К	к	残差二乗和
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_Δσ2.6	2.01	1.68	602.8
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d2_02_Δσ2.6	2.42	1.74	708.8
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d3_02_Δσ2.6	2.81	1.74	855.8
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d4_02_Δσ2.6	2.45	2.19	878.5
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_Δσ2.6	1.92	1.73	588.9
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m2_02_Δσ2.6	2.29	1.76	667.6
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m3_02_Δσ2.6	2.59	1.74	781.2
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m4_02_Δσ2.6	2.16	2.24	834.7
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Δσ2.6	1.89	1.72	571.9
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s2_02_Δσ2.6	2.19	1.70	635.5
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s3_02_Δσ2.6	2.47	1.71	742.6
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02_Δσ2.6	1.94	2.18	773.6



図 10.3-1 1854 年安政東海地震の津波痕跡高データ(図 4.2-1 再掲)

134° E

134° E

136° E

136° E

138° E

138° E

34° N

32° N

34° N

32° N

132° E

132° E



NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_ $\Delta\sigma$ 2.6

NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_Δσ2.6



 $NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_\Delta\sigma2.6$



図 10.3-2 (左列) 1854 年安政東海地震の津波痕跡高(青菱形)とステップ1における計算津波高(赤三角)との比較. (右列)対応する特性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景すべり域,橙色の領域は 大すべり域を示す.

(2) ステップ 2

ステップ1での過小評価を解消するため、ステッ プ1で取り上げた3つの波源断層モデル(図10.3-2) の地震規模(すべり量)を調整する.長期評価 (表10.1-1)では安政東海地震の*M*_wは評価されてい ないため、前節の1707年宝永地震の場合と同様に、 昭和南海地震、昭和東南海地震の*M*_wと*M*の関係か ら類推し*M*_w8.6とした.ステップ2で設定したモデ ル群の断層パラメータを表10.3-1に示す. 3つの波源断層モデルに対する計算津波高と1854 年安政東海地震の津波痕跡高との比較図を図 10.3-3 に示す.3つの波源断層モデルの計算高はいずれも 津波痕跡高とよく合っていることが目視で確認でき る.また,表10.3-3に示した残差二乗和,K, κ の 値から,作成した3つのモデルはいずれもKが1に 近い値(0.93~0.98)となり,また, κ もわずかなが ら小さくなり,ステップ1における過小評価は解消 されたことが理解できる.以上より,1854年安政 $NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_\Delta\sigma6.2$



NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_ $\Delta\sigma6.2$



NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Δσ6.2









図 10.3-3 (左列) 1854 年安政東海地震の津波痕跡高(青菱形)とステップ2における計算津波高(赤三角)との比較. (右列)対応する特性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景すべり域,橙色の領域は 大すべり域を示す.

東海地震については,長期評価で想定されたスケー リング則から推定される地震規模に対して不確実さ を考慮して調整することで津波痕跡高を再現するこ とができた. 表 10.3-3 ステップ2 で設定した特性化波源断層モデル による 1854 年安政東海地震の津波痕跡高に対 する Κ, κ, 残差二乗和

特性化波源断層モデル	К	к	残差二乗和
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_Δσ6.2	0.98	1.65	478.9
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_Δσ6.2	0.94	1.71	571.0
NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Δσ6.2	0.93	1.71	591.9

10.4 1854 年安政南海地震の津波痕跡を用いた再現 性の検討

(1) ステップ1

1854 年安政南海地震の震源域は、長期評価によ る領域 ABm に対応するものとする(震源域記号に ついては、8.2 節参照). この領域を震源域とする波 源断層モデル(大すべり域を1つ配置したモデル)は 12 個設定されている(表 6.3.3-2,巻末資料 2_南海 トラフ波源断層モデル図 図14参照). これらの波 源断層モデル群に対して再現性の検討を行う. 領域 ABm を震源域とするモデル群の断層パラメータを 表 10.4-1 に示す.

前節までと同様に,4.2節で選別した1854年安政 南海地震の津波痕跡高(図10.4-1)を,その地点から 最も近いハザード評価点(汀線)において計算された 最大水位(T.P.)と比較した.残差二乗和,*K*, κの値 を表10.4-2に示す.残差二乗和の小さな2つの波源 断層モデルに対する計算津波高と1854年安政南海 地震の津波痕跡高との比較図を図10.4-2に示す.赤 三角で示した計算高は青菱形で示した津波痕跡高の 分布の特徴をある程度表現しているものの,全体的 に過小評価となっていることがわかる.また,表 10.4-2に示した波源断層モデルに対する Kの値は, いずれも1.7程度より大きな値となっている.また, κの値は,波源断層モデル名にd1,d2,m1,m2, s1,s2を含む大すべり域が西側に位置する場合に小 さい傾向がみられる.

これらのことから,1854 年安政南海地震は,将 来の地震を予測するために長期評価で想定された スケーリング則から推定される M_w8.5 (6.3.3 項の

表 10.4-1 領域 ABm を震源域とする特性化波源断層モデ ルのパラメータ

	ステップ1	ステップ2	
	8.5	8.6	
<i>M</i> ₀ (Nm)	7.49E+21	1.18E+22	
断層面積 (km ²)	36670		
平均すべり量 (m)	4.1	6.5	
大すべり域のすべり量 (m)	8.2	12.9	
背景領域のすべり量(m)	2.3	3.7	
断層面積に対する 大すべり域の面積比 (%)	30		
平均すべり量に対する 大すべり域のすべり量比	2.0		
大すべり域のアスペクト比 (走向方向/傾斜方向)	2.0	2.3	
平均応力降下量 (MPa)	2.6	4.1	

表10.4-2 1854 年安政南海地震の津波痕跡高に対する各 特性化波源断層モデルによる Κ, κ, 残差二乗和. 図10.4-2 の痕跡高と計算高の比較に用いた特性 化波源断層モデルを薄橙色で示す.

特性化波源断層モデル	к	к	残差二乗和
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_Δσ2.6	1.78	1.58	365.1
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d2_02_Δσ2.6	1.96	1.58	359.7
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d3_02_Δσ2.6	1.95	1.67	355.0
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d4_02_Δσ2.6	1.90	1.86	365.9
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_Δσ2.6	1.68	1.62	326.6
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02_Δσ2.6	1.78	1.64	314.3
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m3_02_Δσ2.6	1.81	1.76	320.1
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m4_02_Δσ2.6	1.78	1.90	339.0
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Δσ2.6	1.72	1.62	314.9
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s2_02_Δσ2.6	1.69	1.73	293.8
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s3_02_Δσ2.6	1.71	1.83	332.0
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s4_02_Δσ2.6	1.71	1.91	319.3

表 6.3.3-1) よりもやや規模の大きい地震であった可 能性が示唆される.



図 10.4-1 1854 年安政南海地震の津波痕跡高データ(図 4.2-1 再掲)

 $NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02_\Delta\sigma2.6$





NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s2_02_ $\Delta\sigma$ 2.6



図 10.4-2 (左列) 1854 年安政南海地震の津波痕跡高(青菱形)と計算津波高(赤三角)との比較.(右列)対応する特 性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景すべり域,橙色の領域は大すべり域を示す.



 $NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_Am02s02_30s_2.0_\Delta\sigma4.1$







図 10.4-3 (左列)1854 年安政南海地震の津波痕跡高(青菱形)とステップ2 で設定した波源断層モデルによる計算津 波高(赤三角)との比較.(右列)対応する特性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景 すべり域, 橙色の領域は大すべり域を示す.

(2) ステップ2

ステップ1での過小評価を解消するため、ステッ プ1で設定した波源断層モデルの地震規模(すべり 量)を調整する.長期評価(**表 10.1-1**)では安政南海 地震の M_w は評価されていないため、昭和南海地震、昭和東南海地震の M_w とMの関係から類推し M_w 8.6 とした.

ステップ1では大すべり域が西側に位置する場合 にκの値が改善される傾向がみられたことから,ス テップ1での設定値よりも大きなアスペクト比(走 向方向/傾斜方向)を持つ大すべり域を震源域西側 に配置することで,大すべり域が震源域の西側を広 く覆うようにした.また,大すべり域の深さを2通 り設定した.ステップ2で設定した波源断層モデル の断層パラメータを**表 10.4-1** に示す.

2つの波源断層モデルに対する計算津波高と1854 年安政南海地震の津波痕跡高との比較図を図10.4-3 に示す.2つの波源断層モデルの計算高はいずれも 津波痕跡高によく合っていることが目視で確認でき る.また,表10.4-3に示した残差二乗和,K, κ の 値から,作成した2つのモデルはいずれもKが1に 近い値(1.14~1.20)となり,ステップ1における過 小評価は解消されたことが理解できる.また,大す べり域を深くした場合には,ステップ1に比べ残差 二乗和,K, κ が大きく改善されていることもわかる.

以上から,1854年安政南海地震については,長期 評価で想定されたスケーリング則から推定される地 震規模と,大すべり域の形状を調整することで津波 痕跡高を再現することができた.

表 10.4-3 1854 年安政南海地震の津波痕跡高に対する ステップ2 で設定した特性化波源断層モデ ルによる *K*, κ, 残差二乗和

特性化波源断層モデル	К	к	残差二乗和
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_Am02s02_30d_2.0_Δσ4.1	1.14	1.55	175.8
NK ABm TYPE2Eh 30L1 Am02s02 30s 2.0 Δσ4.1	1.20	1.71	297.4

10.5 1944 年昭和東南海地震の津波痕跡を用いた再 現性の検討

(1) ステップ1

1944 年昭和東南海地震の震源域は、長期評価に よる領域 CDm に対応するものとする(震源域記号に ついては、8.2 節参照). この領域を震源域とする波 源断層モデル(大すべり域を1つ配置したモデル)は 12 個設定されている(表 6.3.3-2, 巻末資料 2_ 南海 トラフ波源断層モデル図 図15 参照). これらの波 源断層モデル群に対して再現性の検討を行う. 領域 CDm を震源域とするモデル群の断層パラメータを 表 10.5-1 に示す.

前節までと同様に、4.2節で選別した 1944 年昭和 東南海地震の津波痕跡高(図10.5-1)を,その地点か ら最も近いハザード評価点(汀線)において計算され た最大水位 (T.P.) と比較した. 残差二乗和, K, κの 値を表 10.5-2 に示す. 目視による確認では、大すべ り域が西側に位置する場合に再現性が高い傾向が認 められた. そこで、大すべり域が西側に位置する3 つの波源断層モデルに対する計算津波高と1944年 昭和東南海地震の津波痕跡高との比較図を図10.5-2 に示す. 青菱形で示した津波痕跡高の方が赤三角で 示した計算高よりも大きい地点が若干見られるもの の,全体的には計算高は痕跡高を再現していると判 断できる.また,残差二乗和が最小となった波源断 層モデル (NK CDm TYPE2Eh 30L1 m1 02 Mw8.2 Δσ2.6) では、K=1.04、κ=1.35 となり、土木学会 (2002)で示されている条件(0.95 < K < 1.05, κ < 1.45) を満たしている.以上より、1944年昭和東南海地

表 10.5-1 領域 CDm を震源域とする特性化 波源断層モデルのパラメータ

M_w	8.2
<i>M</i> ₀ (Nm)	2.94E+21
断層面積 (km ²)	19668
平均すべり量 (m)	3.0
大すべり域のすべり量 (m)	6.0
背景領域のすべり量 (m)	1.7
断層面積に対する 大すべり域の面積比 (%)	30
平均すべり量に対する 大すべり域のすべり量比	2.0
平均応力降下量 (MPa)	2.6

表10.5-2 1944 年昭和東南海地震の津波痕跡高に対する 各特性化波源断層モデルによる Κ, κ, 残差二乗 和.図10.5-2 の痕跡高と計算高の比較に用い た特性化波源断層モデルを薄橙色で示す.

特性化波源断層モデル	К	к	残差二乗和
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_Mw8.2_Δσ2.6	1.08	1.34	112.3
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d2_02_Mw8.2_Δσ2.6	1.50	1.55	288.3
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d3_02_Mw8.2_Δσ2.6	2.43	1.76	731.2
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d4_02_Mw8.2_Δσ2.6	2.67	1.66	819.9
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_Mw8.2_Δσ2.6	1.04	1.35	111.5
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_m2_02_Mw8.2_Δσ2.6	1.60	1.65	325.1
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_m3_02_Mw8.2_Δσ2.6	2.33	1.70	709.5
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_m4_02_Mw8.2_Δσ2.6	2.51	1.64	768.2
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Mw8.2_Δσ2.6	1.05	1.36	119.7
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_s2_02_Mw8.2_Δσ2.6	1.73	1.63	366.3
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_s3_02_Mw8.2_Δσ2.6	2.37	1.63	730.8
NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_s4_02_Mw8.2_Δσ2.6	2.43	1.64	752.2

震についてはステップ1の検討において再現性が確認されたと判断した.



図 10.5-1 1944年昭和東南海地震の津波痕跡高データ(図 4.2-1 再掲)



 $NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_Mw8.2_\Delta\sigma2.6$





▲ 計算値 NK CDm_TYPEZED 30L1 s1 02_Mw8.2 602.6 (K-1.05, n-1.36)

٠

Ŧ

4

136

1.1

187

 $NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Mw8.2_\Delta\sigma2.6$

14

12

10 8

6

.4

2

152

133

134

135

経度

廠跡高、計算水位(m)







図 10.5-2 (左列) 1944 年昭和東南海地震の津波痕跡高(青菱形)と計算津波高(赤三角)との比較.(右列)対応する特 性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景すべり域,橙色の領域は大すべり域を示す.

1

189

.

*

138

10.6 1946 年昭和南海地震の津波痕跡を用いた再現 性の検討

(1) ステップ1

1946年昭和南海地震の震源域は、長期評価によ る領域 ABm に対応するものとする(震源域記号に ついては、8.2節参照). この領域を震源域とする波 源断層モデル(大すべり域を1つ配置したモデル)は 12個設定されている(表 6.3.3-2,巻末資料 2_ 南海 トラフ波源断層モデル図 図14参照). これらの波 源断層モデル群に対して再現性の検討を行う. 領域 ABm を震源域とするモデル群の断層パラメータを 表 10.6-1 に示す.

前節までと同様に、4.2節で選別した 1946 年昭和 南海地震の津波痕跡高(図10.6-1)を、その地点から 最も近いハザード評価点(汀線)において計算された 最大水位 (T.P.) と比較した.残差二乗和,K, κの値 を表10.6-2 に示す. 目視での確認により再現性が 高いと判断された2つの波源断層モデルに対する計 算津波高と1946年昭和南海地震の津波痕跡高との 比較図を図10.6-2に示す. 東経 135°~136°にかけ て青菱形で示した津波痕跡高の方が赤三角で示した 計算高よりも大きい地点が若干見られるものの、全 体的には計算高は痕跡高を再現していると判断でき る. また, これらの2つの波源断層モデルについて は、土木学会 (2002) で示されている条件 (0.95 < K < 1.05, κ < 1.45) を満たす、あるいは、ほぼ満たしてい る.以上より、1946年昭和南海地震についてはス テップ1の検討において再現性が確認されたと判断 した.

表 10.6-1 領域 ABm を震源域とする特性化 波源断層モデルのパラメータ

M_w	8.5
<i>M</i> ₀ (Nm)	7.49E+21
断層面積 (km ²)	36670
平均すべり量 (m)	4.1
大すべり域のすべり量 (m)	8.2
背景領域のすべり量(m)	2.3
断層面積に対する 大すべり域の面積比 (%)	30
平均すべり量に対する 大すべり域のすべり量比	2.0
平均応力降下量 (MPa)	2.6

表 10.6-2 1946 年昭和南海地震の津波痕跡高に対する 各特性化波源断層モデルによる Κ, κ, 残差 二乗和.図10.6-2 の痕跡高と計算高の比較 に用いた特性化波源断層モデルを薄橙色で 示す.

特性化波源断層モデル	К	к	残差二乗和
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d1_02_Δσ2.6	1.36	1.53	223.6
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d2_02_Δσ2.6	1.17	1.40	147.3
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d3_02_Δσ2.6	1.21	1.39	118.4
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_d4_02_Δσ2.6	0.93	1.42	73.6
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m1_02_Δσ2.6	1.23	1.48	175.4
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02_Δσ2.6	1.05	1.42	132.4
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m3_02_Δσ2.6	1.10	1.51	144.0
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m4_02_Δσ2.6	0.87	1.41	73.8
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s1_02_Δσ2.6	1.14	1.50	180.4
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s2_02_Δσ2.6	0.97	1.50	154.3
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s3_02_Δσ2.6	1.03	1.49	132.4
NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s4_02_Δσ2.6	0.85	1.41	74.8



図 10.6-1 1946年昭和南海地震の津波痕跡高データ(図 4.2-1 再掲)



NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02_ $\Delta\sigma 2.6$



NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_s3_02_ $\Delta\sigma$ 2.6



図 10.6-2 (左列) 1946 年昭和南海地震の津波痕跡高 (青菱形) と計算津波高 (赤三角) との比較. (右列) 対応する特性化波源断層モデル.波源断層モデルの薄黄色の領域は背景すべ り域, 橙色の領域は大すべり域を示す.

10.7 まとめ

宝永地震以降の5つの南海トラフ沿いの大地震を 検討対象として、6章で作成した各地震の震源域に 対応する複数の特性化波源断層モデルを用いた津波 伝播遡上計算結果と、4章で取りまとめた各地震の 津波痕跡高データとを比較することで、特性化波源 断層モデルの妥当性を検討した.

1944 年昭和東南海地震,1946 年昭和南海地震に ついては,6章で作成された波源断層モデルによっ て津波痕跡高を再現することができた.1856 年安 政東海地震,1707 年宝永地震については,長期評 価と不整合のない範囲で地震規模を調整することで 痕跡高を再現することができた.また,1856 年安 政南海地震については,地震規模と大すべり域の形 状を調整することで津波痕跡高を再現することがで きた.

以上のように、地震調査委員会(2017)による「波 源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシピ)」 に基づいて作成された特性化波源断層モデルに対し て、長期評価と不整合のない範囲で地震規模等の調 整を行うことで過去の南海トラフ沿いの大地震によ る津波痕跡高を再現することができ、津波レシピに 基づく特性化波源断層モデルの妥当性が確認され た.なお、本章では6章で作成した波源断層モデル の面積を固定して検討を行ったが、波源断層モデル の面積を調整することによって過去の南海トラフ沿 いの大地震による津波痕跡高を再現できる可能性を 否定するものではない.

10 章の参考文献

- Aida, I. (1978) : Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, 26, 57-73.
- 2) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002): 原子力発電所の津波評価技術 付属編, 212pp.
- Imamura F., Yalciner A. C., and Ozyurt G. (2006)
 : TSUNAMI MODELLING MANUAL (TUNAMI model), http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/ hokusai3/J/proproje/manual-ver-3.1.pdf (2019 年 10 月 24 日参照).
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2013): 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版).

- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2017): 波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシ ピ).
- Kajiura, K. (1963) : The leading wave of a tsunami, Bull. Earthq. Res. Inst, 41, 535-571.
- Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- 8) Tanioka, Y. and K. Satake (1996) : Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophysical Research Letters, Vol. 23, No. 8, 861-864.

11. 平均応力降下量の津波高さへの影響の検討

11.1 背景

6.2.1 項で述べた通り、将来の津波の予測や評価 を試みた既往研究において南海トラフ周辺のプレー ト間地震を対象に設定された平均応力降下量(Δσ)に は認識論的不確定性がある.「津波レシピ」(地震調 査研究推進本部, 2017)では、地震モーメントと断 層面積の経験的関係を用いて特性化波源断層モデ ル(これ以降,特段の必要がない限り,波源断層モ デルと呼ぶ)の規模(断層面積あるいは地震モーメン ト)を設定するとしており、地震モーメントと断層 面積の経験的関係式(スケーリング則)としては、過 去の地震のデータがある程度得られている場合に は、その地域性を考慮した式を用いるとしている. しかしながら、上述のように Δσの値には認識論的 不確定性があり, Δσの値の変化によってスケーリ ング則から算出される波源断層モデルのM_wや平均 すべり量も変化するため、津波ハザードカーブへも 大きな影響があると考えられる.一方で、水深に対 して波高が十分に小さい場合にはグリーンの法則で 表されるように、沖合の津波高さ(初期水位)と沿岸 の津波高さには線形の関係が期待される. 初期水位 の高さはΔσに依存しており、Δσと海岸での最大水 位上昇量の関係を明らかにできれば,ある Δσ を仮 定した津波伝播遡上計算による海岸での最大水位上 昇量を,任意のΔσに対する海岸での最大水位上昇 量に変換できる可能性がある. そこで, Δσの値を 変えることによって海岸の津波高さがどの程度変化 するのかを把握するため, Δσの値を系統的に変え たパラメータスタディ(以下,パラスタ)を行った.

11.2 検討モデルの設定

パラスタに用いる波源断層モデルは南海トラフ沿 い、日本海溝沿い、千島海溝沿いに設定した.平均 応力降下量 $\Delta \sigma$ が3.0 MPa,地震規模が M_w 8.3 およ び M_w 9.0 のものを基準モデルとし、基準モデルか らの $\Delta \sigma$ の変化倍率をその常用対数が±0.20,±0.15, ±0.10,±0.05 となるようなモデル群を構築した.そ の際、断層面積 S を固定して $\Delta \sigma$ の変化に対し平均 すべり量 D および M_0 , M_w を変化させた。断層パラ メータの算出には式(11.2-1)~(11.2-4)を用いた。剛 性率 μ は5.0×10¹⁰ Nm とした. M_w 8.3 の基準モデル ($\Delta \sigma$ = 3.0 MPa)の平均すべり量 D は 3.5 m となり, $\Delta \sigma$ の変化(常用対数で±0.20)は, M_w については8.167 ~ 8.433, Dについては2.21 m ~ 5.55 m の変化に対応する. 同様に, M_w 9.0の基準モデル(D = 7.85 m) に対しては, M_w は8.867 ~ 9.133, Dは4.95 m ~ 12.43 m の変化に対応する.

N

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0 - 9.1}{1.5} \tag{11.2-1}$$

$$I_0 = \frac{16}{7 \times \pi^{\frac{3}{2}}} \times \Delta \sigma \times S^{\frac{3}{2}}$$
(11.2-2)

$$M_0 = \mu DS \tag{11.2-3}$$

$$D = \frac{16}{7 \times \pi^{\frac{3}{2}} \times \mu} \times \Delta \sigma \times S^{\frac{1}{2}}$$
(11.2-4)

波源断層モデルの位置は,上端深さを揃えるとと もに、海溝軸(トラフ軸)方向に概ね等間隔に設定 した. M_w9.0 の基準モデルでは大すべり域と背景す べり領域の2種類のすべり量で表現される波源断層 モデル(2段階すべりモデル)と、これらに超大すべ り域を加えた3種類のすべり量で表現される波源断 層モデル(3段階すべりモデル)を設定し、大すべり 域、超大すべり域は震源域の浅部中央に配置させた (大すべり域,超大すべり域については6章を参照). 一方, M_w8.3 の基準モデルでは2段階すべりモデル のみを設定し、大すべり域は震源域中央に配置させ た. また, 波源断層モデルの上端深さを0kmとす ることを基本とし、3段階すべりモデルについては 断層上端深さを3 km 深くしたケースも設定した. これは、断層上端を深さ0kmよりも若干深く設定 することで、波長の短い大振幅の津波を生じさせる ような初期水位分布が得られるためである(藤原ほ か,2015). パラスタに用いた波源断層モデルの諸元, 個数および位置を表 11.2-1,表 11.2-2 に示す.平均 応力降下量 Δσ のパラスタの検討に用いる全波源断 層モデルの総数は198 個である. なお, M_w9.0 の基 準モデルについては,既存の領域区分を基に震源域 を設定しているため断層面積はそれぞれ異なる(表 11.2-1).

津波伝播遡上計算の計算条件は7章と同様である.地殻変動量計算を行う際の地形モデルは,南海トラフ沿いの計算では7.1節で述べた地形モデルのうち UTM53帯地形モデルを,日本海溝沿いと千島海溝沿いを対象とした計算では藤原ほか

(2015) で作成された UTM54 帯の地形モデルを用 いた.なお、日本海溝沿いと千島海溝沿いを対象 とした計算に用いる計算領域は同一である.図 11.2-1 に南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する 計算領域と日本海溝・千島海溝沿いの波源断層モデ ルに対する計算領域を示す.

		基地	単モデルの	のパラメ	-3		モデル数		
地震発生領域	すべり量分布図 (3段端すべりモデル)	断層面積 [km ²]	Δσ [MPa]	Mw	Mo [Nm]	2段階 すべり モデル	3段階 すべり モデル	3段階 +3km モデル	合計
南海トラフ	Contract Contract	94557	3.0	9.0	3.58E+22	9	9	9	27
	A REAL	78514	3.0	8.9	2.71E+22	9	9	9	27
日本海溝		107968	3.0	9.0	4.37E+22	9	9	9	27
	.)[110249	3.0	9.0	4.51E+22	9	9	9	27
千島海溝		102127	3.0	9.0	4.02E+22	9	9	9	27

表 11.2-1 M_w9.0 として設定した波源断層モデル

表 11.2-2 M_w8.3 として設定した波源断層モデル

		基2	単モデルの	のパラメ	-9	モデル数	į.
地震発生領域	すべり量分布図	断層面積 [km ²]	Δσ [MPa]	Mw	Mo [Nm]	2段階 すべり モデル	合計
南海トラフ	18 miles	20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9
	Proto and	20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9
	1.10	20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9
日本海溝	a	20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9
	Ø	20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9
		20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9
千島海溝		20248	3.0	8.3	2.24E+21	9	9



図 11.2-1 (上) 南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する計算領域(図 7.1.2-4 再掲). (下) 日本海溝沿いと千島海溝沿いの波源断層モデルに対する計算領域.

11.3 津波伝播遡上計算に基づく検討

まず、ある平均応力降下量 $\Delta \sigma_j$ の波源断層モデルによる海岸での最大水位上昇量 $H_{\Delta \sigma_j}(i)$ と、 $\Delta \sigma$ =3.0 MPaの基準モデルによる海岸での最大水位 上昇量 $H_{3,0}(i)$ の比 $r_{\Delta \sigma_j}(i)$ を次式により求める.

$$r_{\Delta\sigma_j}(i) = \frac{H_{\Delta\sigma_j}(i)}{H_{3.0}(i)}$$
(11.3-1)

ここで,*i*は*i*番目の海岸(ハザード評価点)を示す. 次に, $r_{\Delta\sigma_j}(i)$ の幾何平均 $\bar{r}_{\Delta\sigma_j}$,および幾何標準偏差 (常用対数標準偏差) $S_{\Delta\sigma_j}$ を,波源断層モデル毎,海 域毎,3つの海域の全ての波源断層モデルに対して 式(11.3-2),および式(11.3-3)により算出し, $\Delta\sigma$ の 変化倍率と幾何平均,常用対数標準偏差の対応表を 作成した.

$$\log \bar{r}_{\Delta\sigma_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \log r_{\Delta\sigma_j}(i)$$
(11.3-2)

$$\log S_{\Delta\sigma_j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(\log r_{\Delta\sigma_j}(i) \right)^2 - \left(\log \bar{r}_{\Delta\sigma_j} \right)^2}$$
(11.3-3)

ここで、Nはハザード評価点ののべ数を示す.

南海トラフ沿い,日本海溝沿い,千島海溝沿いの 海域毎に,各波源断層モデルに対する平均応力降下 量比 ($\Delta \sigma_j / \Delta \sigma$)と最大水位上昇量比の幾何平均 $\bar{r}_{\Delta \sigma_j}$, および常用対数標準偏差 $S_{\Delta \sigma_j}$ を表 11.3-1 ~表 11.3-3 に示す.また,平均応力降下量比と最大水位上昇量 比の幾何平均との関係を図 11.3-1 ~図 11.3-3 に示す. 図中には,関係を直線近似した場合の傾き a の値を 示している.なお,直線近似は対数スケールで行っ た.

南海トラフ沿いの波源断層モデルに対しては,平 均応力降下量比と最大水位上量比の関係がほぼ直線 上に乗っている.これは,応力降下量,すなわち初 期水位の高さと海岸での最大水位上昇量の間に強い 正の相関があることを示している.なお,*M*_w9.0の モデルでは傾き *a* が 0.83~0.86 程度であるのに対し, *M*_w8.3 のモデルでは 0.84~0.90 程度とやや大きな値 になっており,規模の小さい地震による海岸の最大 水位上昇量の方が応力降下量の変化に敏感であるこ とが示唆される.

平均応力降下量比が1から離れるにつれ最大水 位上昇量比の対数標準偏差が大きくなる傾向が見ら れ,常用対数標準偏差で0.01~0.03程度の値であ る. これは、5.3.2 項で述べた $\sigma_{}_{}$ 計算誤差の 0.15 (常用 対数標準偏差) よりも小さい.また、断層上端深さ を 0 km とした場合と 3 km とした場合で大きな違い は見られなかった.

日本海溝沿いの波源断層モデルに対しては,南海 トラフ沿いと同様の傾向が見られ,*M*_w9.0のモデル に対する傾き*a*(0.82~0.85)と比較して,*M*_w8.3のモ デルでの傾き*a*(0.85~0.87)はやや大きい.

千島海溝沿いの波源断層モデルに対しては, M_w 9.0 の地震の傾き a の値が南海トラフ沿い,日本海溝沿 いに比べて大きい傾向が見られたが (0.87 ~ 0.88), M_w 8.3 のモデルの傾き a は南海トラフ沿いおよび日 本海溝沿いとほぼ同じであった (約 0.87).

最大水位上昇量比のばらつきに関連して, 平均応 力降下量別の最大水位上昇量比 r_{Δσi}(i)(式(11.3-1)) の常用対数をとって作成した度数分布を波源断層モ デル毎に図 11.3-4 ~ 図 11.3-6 に示す. 最大水位上昇 量比の度数分布は0を中心に左右対称の分布を示し ており, 平均応力降下量比が1から乖離するほどば らつき(対数標準偏差)が大きくなっている. そこで, 対数スケールで最大水位上昇量比を平均応力降下量 比 R で規格化した値 $\log_{10} r_{\Delta\sigma_i}(i) / \log_{10} R$ の確率密 度分布図を作成し,図11.3-4~図11.3-6に併せて示 した. 平均応力降下量比毎の $\log_{10} r_{\Delta\sigma_i}(i) / \log_{10} R$ の確率密度分布は概ね重なり合っており、正規分布 (対数正規分布)に近い形状となっているものの,平 均応力降下量比が1から乖離するにつれ,徐々に対 数正規分布から乖離した形状となることが見て取れ る. このことから, 平均応力降下量比が1から大 きく離れない範囲であるならば,最大水位上昇量 比のばらつきを対数正規分布の確率モデルによって 表現することが可能と考えられる.図11.3-4~図 11.3-6 において Δσ = 2.12 および Δσ = 4.23 (常用対数 で±0.15) で対数正規分布から乖離し始めていると判 断できることから, 平均応力降下量比が,

$$-0.15 < \log R < 0.15 \tag{11.3-4}$$

の範囲では最大水位上昇量比のばらつきを対数正規 分布で扱うことができると考えられる.

平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比と の関係を,3つの海域のすべての波源断層モデルに 対して算出した結果と海域別に算出した結果を図 **11.3-7** に示す.図中には、平均応力降下量比と最大 水位上昇量比の幾何平均の分布から求めた近似直線 も示している.また、 $\log_{10} r_{\Delta\sigma_j}(i)/\log_{10} R$ の確率 密度分布について、3つの海域のすべての波源断層 モデルに対する結果を重ねたものと、海域別にまと めたものを図11.3-8 に示す.図11.3-7、図11.3-8から、 本研究資料(第一部付録編)で適用する平均応力降下 量比 R に対する海岸の最大水位上昇量の変化率r は

$$\log r / \log R = 0.856 \tag{11.3-5}$$

と表される. 6.3.3 項や 8.1.4 項で述べたように,本 研究資料(第一部付録編)では平均応力降下量 3.0 MPaに相当する波源断層モデル群に対して津波伝播 遡上計算を行い,その結果に対して式(11.3-5)の関 係を適用することで平均応力降下量 2.6 MPaの波源 断層モデル群に相当する最大水位上昇量を求めてい る. なお,最大水位上昇量比のばらつきは

$$\sigma_{\bar{\kappa} \, j \, \bar{k} \, \bar{k} \, \bar{k} \, \bar{k}} = 0.161 \times |\log R| \tag{11.3-6}$$

で表される.

表11.3-1 南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比の幾何平均と対 数標準偏差(上段,中段: M_w9.0の波源断層モデル.SLm と書かれたモデルは超大すべり域のあるモデル, +3_90 と書かれたモデルは断層上端深さを 3 km 深くしたモデル. 下段: M_w8.3 の波源断層モデル.)

NK_ZBall_L1_s2+SLm+0_90

NK_ZBall_L1_s2_90

平均広力	平均広力	最大水位	上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
		平均	標準偏差
1.89	0.63	0.677	0.026
2.12	0.71	0.747	0.021
2.38	0.79	0.824	0.015
2.67	0.89	0.908	0.008
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.101	0.008
3.77	1.26	1.211	0.015
4.23	1.41	1.331	0.022
4.75	1.58	1.461	0.029

平均応力	平均応力	最大水位	Z上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
P4 ±	P年 1 重 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.676	0.029
2.12	0.71	0.746	0.023
2.38	0.79	0.823	0.017
2.67	0.89	0.908	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.101	0.009
3.77	1.26	1.212	0.018
4.23	1.41	1.334	0.025
4.75	1.58	1.466	0.033

NK_ZBall_L1_s2+SLm+3_90

平均広力	平均広力	最大水位	Z上昇量比
悠 下景	降下島 ド	幾何	対数
141 里	四里	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.677	0.030
2.12	0.71	0.747	0.023
2.38	0.79	0.823	0.017
2.67	0.89	0.908	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.101	0.010
3.77	1.26	1.211	0.018
4.23	1.41	1.331	0.026
4.75	1.58	1.462	0.033

NK_BEall_L1_s2_90

NK_BEall_L1_s3+SLm+0_90

平均応力	平均応力	最大水位	ī上昇量比
除下量	除下量比	幾何	対数
P44 III		平均	標準偏差
1.89	0.63	0.671	0.029
2.12	0.71	0.741	0.023
2.38	0.79	0.819	0.017
2.67	0.89	0.905	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.104	0.011
3.77	1.26	1.218	0.018
4.23	1.41	1.343	0.026
4.75	1.58	1.479	0.033

平均応力	平均応力	最大水位	达上昇量比
降下量	平均応力 降下量比	幾何	対数
P# 1 重		平均	標準偏差
1.89	0.63	0.678	0.030
2.12	0.71	0.748	0.024
2.38	0.79	0.824	0.017
2.67	0.89	0.908	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.100	0.010
3.77	1.26	1.209	0.018
4.23	1.41	1.328	0.026
4.75	1.58	1.458	0.034

NK_{-}	_BEall	_L1_	_s3+	SLm	ı+3_	90

平均応力	平均応力	最大水位	ī上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
P4 1 里	四日 1 1 10	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.680	0.030
2.12	0.71	0.749	0.024
2.38	0.79	0.825	0.018
2.67	0.89	0.909	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.099	0.010
3.77	1.26	1.207	0.018
4.23	1.41	1.326	0.026
4.75	1.58	1.455	0.033

NK_W_L1_mm_83

平均応力	平均応力	最大水位	Z上昇量比
路下量	除下量比	幾何	対数
F# 1 ±		平均	標準偏差
1.89	0.63	0.659	0.028
2.12	0.71	0.732	0.024
2.38	0.79	0.814	0.023
2.67	0.89	0.903	0.013
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.109	0.010
3.77	1.26	1.229	0.014
4.23	1.41	1.360	0.020
4.75	1.58	1.506	0.025

平均応力	平均応力	最大水位	这上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
P4 1 ±	[4] 포 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.667	0.028
2.12	0.71	0.738	0.020
2.38	0.79	0.817	0.015
2.67	0.89	0.904	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.104	0.010
3.77	1.26	1.218	0.017
4.23	1.41	1.345	0.023
4.75	1.58	1.483	0.030

NK_E_L1_mm_83

平均応力	平均応力	最大水位	ī上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
r# 1 ±	P# 1 ± 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.676	0.027
2.12	0.71	0.746	0.023
2.38	0.79	0.823	0.017
2.67	0.89	0.908	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.102	0.009
3.77	1.26	1.212	0.015
4.23	1.41	1.332	0.023
4.75	1.58	1.463	0.029



図 11.3-1 南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比(幾何平均)の 比較(上段,中段: M_w9.0 の波源断層モデル.SLm と書かれたモデルは超大すべり域のあるモデル, +3_90 と書かれたモデルは断層上端深さを3 km 深くしたモデル.下段: M_w8.3 の波源断層モデル.)

表11.3-2 日本海溝沿いの波源断層モデルに対する平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比の幾何平均と対数 標準偏差(上段,中段: M_w9.0 の波源断層モデル.SLm と書かれたモデルは超大すべり域のあるモデル, +3_90 と書かれたモデルは断層上端深さを3 km 深くしたモデル.下段: M_w8.3 の波源断層モデル.)

JT_M_B4_L1_sm12_90

平均応力	平均応力	最大水位	江上昇量比
悠 下昰	降下島 ド	幾何	対数
1411 里	四十一 王 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.674	0.032
2.12	0.71	0.744	0.025
2.38	0.79	0.821	0.018
2.67	0.89	0.906	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.103	0.010
3.77	1.26	1.215	0.018
4.23	1.41	1.338	0.026
4.75	1.58	1.472	0.033

JT_M_B4_L1_sm12+SLm+0_90			
平均応力			Z上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
P# 1 重	四十 1 里 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.676	0.034
2.12	0.71	0.747	0.027
2.38	0.79	0.824	0.019
2.67	0.89	0.908	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.101	0.010
3.77	1.26	1.213	0.019
4.23	1.41	1.334	0.028
4.75	1.58	1.468	0.036

JT_M_B4_L1_sm12+SLm+3_90

平均応力	平均応力	最大水位	Z上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
P4 ±	P4 ± 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.676	0.035
2.12	0.71	0.746	0.027
2.38	0.79	0.824	0.019
2.67	0.89	0.908	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.101	0.011
3.77	1.26	1.213	0.020
4.23	1.41	1.335	0.028
4.75	1.58	1.468	0.036

JT_SN_SS3_sm12_90

JT_SN_SS3_sm12+SLm+0_90

平均応力	平均応力	最大水位上昇量比	
降下量	降下量比	幾何	対数
P# 1 里		平均	標準偏差
1.89	0.63	0.675	0.027
2.12	0.71	0.744	0.021
2.38	0.79	0.822	0.015
2.67	0.89	0.906	0.008
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.102	0.008
3.77	1.26	1.214	0.016
4.23	1.41	1.337	0.022
4.75	1.58	1.472	0.028

平均応力	平均応力	最大水位	ī上昇量比
路下量	除下量比	幾何	対数
17 I <u>se</u>	14120	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.683	0.030
2.12	0.71	0.751	0.024
2.38	0.79	0.827	0.017
2.67	0.89	0.910	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.099	0.009
3.77	1.26	1.209	0.017
4.23	1.41	1.329	0.023
4.75	1.58	1.460	0.030

JT_	_SN_	_SS3_	_sm12+	SLm+	-3_	90
-----	------	-------	--------	------	-----	----

平均広力	平均応力	最大水位上昇量比	
[10,0005] 隆下景	降下豊臣	幾何	対数
甲丁里	면 보니	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.683	0.030
2.12	0.71	0.752	0.024
2.38	0.79	0.827	0.017
2.67	0.89	0.910	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.099	0.009
3.77	1.26	1.208	0.017
4.23	1.41	1.328	0.024
4.75	1.58	1.460	0.030

JT_S_L1_mm_83

平均広力	平均広力	最大水位	11上昇量比
降下量	降下量比	幾何	対数
P4 ±	1 프 20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.672	0.026
2.12	0.71	0.743	0.021
2.38	0.79	0.821	0.015
2.67	0.89	0.906	0.008
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.103	0.008
3.77	1.26	1.215	0.015
4.23	1.41	1.337	0.022
4.75	1.58	1.471	0.029

JΤ	М	11	mm	83
7 1	1 V I			00

平均応力 降下量	平均応力 降下量比	最大水位上昇量比	
		幾何	対数
	만부 포 20	平均 標準偏差	
1.89	0.63	0.666	0.026
2.12	0.71	0.738	0.020
2.38	0.79	0.817	0.014
2.67	0.89	0.904	0.008
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.105	0.008
3.77	1.26	1.220	0.015
4.23	1.41	1.345	0.021
4.75	1.58	1.482	0.028

JT_N_L1_mm_83

平均広力	平均応力	最大水位上昇量比	
降下量	降下量比	幾何	対数
141 里	P4 ±20	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.667	0.024
2.12	0.71	0.739	0.019
2.38	0.79	0.818	0.013
2.67	0.89	0.905	0.007
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.105	0.008
3.77	1.26	1.220	0.014
4.23	1.41	1.347	0.020
4.75	1.58	1.486	0.026



図 11.3-2 日本海溝沿いの波源断層モデルに対する平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比(幾何平均)の 比較(上段,中段: M_w9.0 の波源断層モデル.SLm と書かれたモデルは超大すべり域のあるモデル, +3_90 と書かれたモデルは断層上端深さを3 km 深くしたモデル.下段: M_w8.3 の波源断層モデル.)

表11.3-3 千島海溝沿いの波源断層モデルに対する平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比の幾何平均と対数標準偏差(上段: M_w9.0 の波源断層モデル.SLm と書かれたモデルは超大すべり域のあるモデル,+3_90 と書かれたモデルは断層上端深さを3 km 深くしたモデル.下段: M_w8.3 の波源断層モデル.)

KT_NSt_L1_s3_90

KT_NSt_L1_s3+SLm+0_90

KT_NSt_L1_s3+SLm+3_90

平均応力 降下量	亚构成力	最大水位上昇量比	
	降下量比	幾何	対数
	件「里比	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.666	0.027
2.12	0.71	0.738	0.021
2.38	0.79	0.817	0.015
2.67	0.89	0.904	0.009
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.105	0.009
3.77	1.26	1.221	0.016
4.23	1.41	1.348	0.023
4.75	1.58	1.488	0.031

平均広力	平均広力	最大水位上昇量比		
3/10/J 悠下景	「均心力」	幾何	対数	
年 里	四十里儿	平均	標準偏差	
1.89	0.63	0.667	0.032	
2.12	0.71	0.738	0.026	
2.38	0.79	0.817	0.019	
2.67	0.89	0.904	0.010	
3.00	1.00	1.000	0.000	
3.36	1.12	1.105	0.010	
3.77	1.26	1.221	0.020	
4.23	1.41	1.349	0.029	
4.75	1.58	1.490	0.038	

平均広力	平均広力	最大水位	Z上昇量比
隆下島	下均心力	幾何	対数
年 里	叶!主儿	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.667	0.032
2.12	0.71	0.738	0.026
2.38	0.79	0.817	0.018
2.67	0.89	0.904	0.010
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.106	0.010
3.77	1.26	1.222	0.020
4.23	1.41	1.349	0.029
4.75	1.58	1.488	0.038

KT_L1_mm_83

平均広力	平均広力	最大水位上昇量比	
降下量	均応力	幾何	対数
四日 里	四日 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	平均	標準偏差
1.89	0.63	0.666	0.027
2.12	0.71	0.738	0.021
2.38	0.79	0.817	0.015
2.67	0.89	0.904	0.008
3.00	1.00	1.000	0.000
3.36	1.12	1.105	0.009
3.77	1.26	1.220	0.016
4.23	1.41	1.346	0.023
4.75	1.58	1.484	0.029



図 11.3-3 千島海溝沿いの波源断層モデルに対する平均応力降下量比と海岸の最大水位上昇量比(幾何平均)の 比較(上段: M_w9.0 の波源断層モデル.SLmと書かれたモデルは超大すべり域のあるモデル,+3_90 と書かれたモデルは断層上端深さを3km深くしたモデル.下段: M_w8.3 の波源断層モデル.)



図 11.3-4 南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=Δa*/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列).(1/3)



図 11.3-4 南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=Δσ*/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列). (2/3)



図 11.3-4 南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=*4*o*/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列).(3/3)



図 11.3-5 日本海溝沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=Δσ*/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列).(1/3)



図 11.3-5 日本海溝沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=*Δσ/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列). (2/3)



図 11.3-5 日本海溝沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=*Δσ/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列). (3/3)



図 11.3-6 千島海溝沿いの波源断層モデルに対する,平均応力降下量別の最大水位上昇量比の度数分布図(左列) と平均応力降下量比(*R=Δσ*/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布(右列).



図 11.3-7 平均応力降下量比 (R=Δσ/3.0) と海岸の最大水位上昇量比の幾何平均値の関係. 黒点は各波源断層モデルに対 する結果,青点線は近似直線を示す. 左上:全ての波源断層モデル,右上:日本海溝沿いの波源断層モデル, 左下:千島海溝沿いの波源断層モデル,右下:南海トラフ沿いの波源断層モデルに対する結果. 左上図と右 下図の赤丸は,11.4節で行った平均応力降下量2.6 MPa と3.0 MPaの波源断層モデルを用いた比較結果を示す.



図11.3-8 平均応力降下量比(R=ムσ/3.0)で規格化した最大水位上昇量比の確率密度分布. 黒線は各波源断層モデルに対 する確率密度分布を示し,赤線は確率密度分布の平均値を示す. 左上:全ての波源断層モデル,右上:日本 海溝沿いの波源断層モデル,左下:千島海溝沿いの波源断層モデル,右下:南海トラフ沿いの波源断層モデ ルに対する結果.

11.4 結果の検証

6.3.3 項, 8.1.4 項で述べた通り,本研究資料(第一部付録編)では平均応力降下量を 3.0 MPa として構築した波源断層モデルに対して計算された海岸の最大水位上昇量を、本章で求めた平均応力降下量比と最大水位上昇量の変化率の準線形関係(式(11.3-5))を用いて補正することで平均応力降下量を 2.6 MPa とした時の海岸の最大水位上昇量を求めている.本節では、平均応力降下量を 3.0 MPa とした波源断層モデルと 2.6 MPa とした波源断層モデルを南海トラフ沿いに設定して津波伝播遡上計算を行い、計算結果から求めた最大水位上昇量の比と式(11.3-5)から算出される変化率とを比較した.

ここでは、図 11.4-1 に示した 2 つの波源断層モデ ルを検討対象とした.津波伝播遡上計算結果に基づ いて算出した,平均応力降下量を 3.0 MPa とした場 合に対する平均応力降下量を 2.6 MPa とした場合の 海岸の最大水位上昇量の比の幾何平均値は,

- NK_BEall_TYPE2Eh_30L1_s3+SL_02: 0.8868
- NK_ZBall_TYPE2Eh_30L1_s2+SL_02: 0.8859

となった.一方,平均応力降下量を3.0 MPaから 2.6 MPaに変える場合,式(11.3-5)から求められる最 大水位上昇量の変化率は

> $\log r = 0.856 \times \log(2.6/3.0)$ r = 0.885

となり,津波伝播遡上計算から求められる最大水位 上昇量比の幾何平均値と整合的な結果であることが 分かった.

実際に,図11.3-7に津波伝播遡上計算から求められた最大水位上昇量比の幾何平均値をプロットすると近似直線と重なっていることが確認できる.



図 11.4-1 使用した波源断層モデル (上:NK_BEall_TYPE2Eh_30L1_s3+SL_02 (*M*_w8.9), 下:NK_ZBall_TYPE2Eh_30L1_s2+SL_02 (*M*_w9.0)). 黄色は背景すべり領域,橙色は大すべり域,赤 色は超大すべり域を示す.

11 章の参考文献

- 藤原広行・平田賢治・中村洋光・長田正樹・森 川信之・河合伸一・大角恒雄・青井真・松山尚典・ 遠山信彦・鬼頭直・村嶋陽一・村田泰洋・井上 拓也・斎藤龍・秋山伸一・是永眞理子・阿部雄 太・橋本紀彦(2015):日本海溝に発生する地震 による確率論的津波ハザード評価の手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料,第400号.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2017): 波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシ ピ), https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_ tsunami-recipe.pdf.

12. まとめと今後の課題

12.1 まとめ

本研究資料(第一部付録編)は,地震調査委員会 (2020)が公表した「南海トラフ沿いで発生する大地 震の確率論的津波評価」の考え方とその評価結果に ついてその詳細を説明することを目的として作成 された.ただし,資料全体としては地震調査委員会 (2020)の公表資料でカバーしきれなかった多数の情 報・項目もなるべく平易に,かつ漏らさず,掲載す ることに努めた.

本研究資料(第一部付録編)で説明してきた南海ト ラフ沿いの地震によって発生する津波に対する確率 論的ハザード評価の流れは,要点を抜粋すると,以 下のようになる.

- 本確率論的津波ハザード評価は、「南海トラフの 地震活動の長期評価」(地震調査委員会,2013)に 基づき、次の地震サイクル中に起こり得る大地 震(M9を超える最大クラスの地震は除く)の発 生規模・様式に多様性を考えることにより、同 地震によって発生する津波を確率論的に評価す ることを目的とする(5.2節).
- ② 次の地震サイクルの大地震の発生規模・様式の 多様性を表現するため、津波レシピ(地震調査 委員会、2017)に基づき、79 種類の震源域および2,720 種類の特性化波源断層モデル(6.3 節)、 ならびに、176 通りの震源域パターンおよび 348,345 通りの地震パターン(8.2 節)を設定する。
- ③ 2,720種類の特性化波源断層モデルそれぞれに対して、最小50m間隔のネスティング・グリッドで表現された陸海の地形モデルを与え、非線形長波方程式を差分法で解いて、津波伝播遡上計算を実施する(7章.11.1節も参照).
- ④ 南海トラフ沿いで過去発生した地震の発生履歴
 等を参考に、176通りの震源域パターンおよび
 348,345通りの地震パターンに重み(相対的発生
 確率)を設定する(8.2節および8.3節).
- ⑤ 本研究資料(第一部付録編)の確率論的津波ハ ザード評価では、津波伝播遡上の(決定論的な) 計算値には偶然的不確定性が伴い、その偶然的 不確定性は対数正規分布にしたがう確率変数で 表現できると考える(5.3節).ここでは、地震調 査委員会(2020)の考え方をそのまま採用し、そ の不確定性は、実際の地震断層を特性化波源断

層モデルで近似したことで生じる誤差および津 波伝播遡上計算等が持つ誤差に起因すると考え る.そして、津波痕跡高と計算高の比較から、 その偶然的不確定性にエルゴート性を仮定する ことにより、最終的に、常用対数標準偏差σ=0.15 で与えられると考える(5.3節)(地震調査委員会、 2020).

- ⑥ 津波伝播遡上計算によって得られた,2,720通りの海岸での津波の最大水位上昇量分布それぞれの空間的ばらつき(偶然的不確定性)が独立であると仮定し,これらを常用対数標準偏差σ=0.15の対数正規分布で表現された不確かさとともに確率論的に統合することにより,348,345通りのハザードカーブ要素を計算する(8.1節).
- ⑦ 348,345 通りのハザードカーブ要素に対して、④
 で設定した重み(相対的発生確率)および長期評価(地震調査委員会,2013)が推定した30年発生
 確率を適用する.
- ⑧ 次の地震サイクル中に起こり得る大地震の発生 規模・様式の多様性を表現するために設定され た 348,345 通りの地震パターンはお互い排他的 に発生する(すなわち, 348,345 通りの地震パター ンのうち1つだけが実際に発生し,残り 348,344 通りは起こらない)と考え,(8.1.3-1)式を用いて (8.1 節),海岸線に設けられたすべてのハザード 評価点(357,437 点)において最終的なハザード カーブを計算する(8.4 節)
- ⑨ 確率論的な津波ハザード評価の結果を第三者に わかりやすく伝えるために、すべてのハザード 評価点(357,437 点)の最終的なハザードカーブか ら、30年超過確率分布図(9.1節)および確率論的 な最大水位上昇量分布図(9.2節)などを作成する.

①から⑨の流れに沿って行われた本研究資料(第 一部付録編)の確率論的な津波ハザード評価結果の 要点を,地震調査委員会(2020)の公表資料の記載に 従い,以下に抜粋する.

- (i) 今後30年以内に南海トラフ沿いで大地震が発生し、海岸の津波高が3m以上になる超過確率
 (9.1節)は、
 - ・ 広い範囲で 26% 以上となる,
 - ・津波波源から少し離れた伊豆諸島や九州などでも局所的に超過確率が高くなる場所がある。

- (ii) 今後30年以内に南海トラフ沿いで大地震が発生し、海岸の津波高が5m以上になる超過確率
 (9.1節)は、
 - ・九州地方から東海地方にかけての太平洋側を 中心に広い範囲で6%以上となる,
 - ・ 震源域となり得る領域に近い地域では26%以上となる。
- (iii) 今後 30 年以内に南海トラフ沿いで大地震が発生し、海岸の津波高が 10 m 以上になる超過確率(9.1 節)は、
 - ・ 震源域となり得る領域に近い地域では6%以上 26%未満となる地域がある。
- (iv) すべての津波高に共通する特徴として,
 - ・外洋に面したリアス式海岸の湾奥や直線海岸 など一般的に津波が高くなる特徴を持つ地形 の場所では周辺と比較して確率が高くなる傾 向が見られる(9.1 節).

12.2 今後の課題

前節で述べたとおり,本研究資料(第一部付録編) は,地震調査委員会(2020)が公表した「南海トラフ 沿いで発生する大地震の確率論的津波評価」の考え 方とその評価結果についてその詳細を説明すること を目的としている.このため本節では地震調査委員 会(2020)の公表資料で述べられた留意点に沿った形 で,科学的あるいは技術的な観点で重要と思われる 項目を,今後の課題として以下に列挙しておく.

- 本研究資料(第一部付録編)では、既往最大である宝永地震と同程度以下の南海トラフ沿いで次に起きる地震による津波が評価対象である.最大クラスの地震については、津波レシピによる評価結果と実測値との比較検証ができないことから、評価対象外としたが、その影響は、今後検討する必要がある.
- ②本研究資料(第一部付録編)には、日向灘で単独 で発生する地震の津波評価は含まれていない、 これについては、日向灘沿いの地震活動の長期 評価に基づいて別途津波評価を行う予定である。
- ③本研究資料(第一部付録編)では、南海トラフ沿いの地震の長期評価(地震調査委員会,2013)で推定された大地震発生の確率の評価に含まれる不確さを考慮していない、今後検討する必要がある。

- ④ 本研究資料(第一部付録編)では、特性化波源断層モデルの設定で考慮していない不確さ(セグメントの区分け方、分岐断層など)が存在する。今後検討する必要がある。
- ⑤本津波評価がより広く有効的に津波防災対策に 活用されるためには、確率論的評価の意義・有 効性と同時に評価の仮定や限界をわかりやすく ユーザーに示し、また、ユーザー側からのコメ ントを参考に、さらなる研究や検討が必要であ る.
- ⑥ 今後南海トラフの長期評価が更新された場合には、それを取り込んで評価を更新する必要がある。特に以下の点が更新された場合には、津波評価を更新する必要がある。
 - 新たな知見に基づいて、大地震の発生確率・震 源域・規模が相当程度変更された場合、
 - ・大すべり域等の重みの配分方法について、新たな知見が得られた場合、
 - ・分岐断層を伴う地震に関する新たな知見が得られた場合.
- ⑦本津波評価で評価したのは浸水深ではなくて 海岸での最大水位上昇量であり、これらを混同 してはならない、浸水深を対象とした評価に ついては、さらなる研究や検討が必要である。

12 章の参考文献

- 地震調査推進研究本部地震調査委員会(2013): 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)につ いて、https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may _nankai/index.htm.
- 2) 地震調査推進研究本部地震調査委員会(2014): 全国地震動予測地図 2014 年版~全国の地震動 を概観して~, https://www.jishin.go.jp/evaluation/ seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2.
- 3) 地震調査推進研究本部地震調査委員会(2017): 波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レ シピ), https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan _tsunami-recipe.pdf.
- 4) 地震調査推進研究本部地震調査委員会(2020): 南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的 津 波 評 価, https://www.jishin.go.jp/main/ chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf.

謝辞

本研究は防災科学技術研究所の研究プロジェクト「ハザード・リスク評価に関する研究」の一環として実施 したものであり,地震調査研究推進本部地震調査委員会津波評価部会(2013年~現在,部会長:東北大学災 害科学国際研究所 今村文彦教授)の公表内容と等価なものである.また,防災科学技術研究所が設置した「津 波ハザード情報の利活用に関する委員会」(2013年~2016年,委員長:東京大学地震研究所 佐竹健治教授) および「津波ハザード・リスク情報の高度利用に関する委員会」(2017年~2018年,委員長:東京大学地震研 究所 佐竹健治教授;2019年~現在,岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂教授)から貴重なご意見をいた だいた.使用した地形データは内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)」および内閣府「日 本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会」からご提供いただいたデータをもとに作成した.プレート形 状データは内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」からご提供いただいたデータをもとに作成した. の図の作成には Wessel and Smith (1998)の GMT (Generic Mapping Tools)を用いた.また,2章,6章,7章 の初期の頃の取りまとめには長田正樹氏が関わっているほか,藤原ほか(2015)の内容を多用した.8章のハ ザードカーブ図のレイアウト調整作業は当研究所の小倉理氏によって繰り返し行われた.ここに記して感謝 いたします.

謝辞の参考文献

- 藤原広行・平田賢治・中村洋光・長田正樹・森川信之・河合伸一・大角恒雄・青井真・松山尚典・遠山信彦・ 鬼頭直・村嶋陽一・村田泰洋・井上拓也・斎藤龍・秋山伸一・是永眞理子・阿部雄太・橋本紀彦(2015): 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討,防災科学技術研究所研究資料, 400,216pp.
- 2) Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, **79**, 579.