

紀伊半島・四国沿岸における津波の危険度に関する考察

村上仁士*・伊藤 禎彦**・山本尚明***・佐藤 広章****

1. 緒 言

紀伊半島・四国沿岸を襲った昭和 21 年の南海地震津波から今年が 50 年目にあたる。当時被災した地域住民は、21 世紀前半にも起きるといわれる南海道沖の巨大地震によって併発される津波に対し、自分の地域は安全かという危機意識を強く抱いている。

河田・小池 (1995) は、次の巨大地震の震源位置は特定できないということを念頭に置き、断層モデルを南海トラフ沿いに移動させることで得られる種々の仮想津波のデータをもとに「死亡リスク」を推定し、津波の危険度を評価している。また、死亡リスクに加え、津波高や到達時間からみた津波の危険度評価も行っている。しかし、どこで震源が発生したとき、どの地域が、どの程度の津波高および到達時間となるのか、という地域住民が最も知りたい事柄については、必ずしも十分な考察がなされているとはいえない。これは、南海道における計算格子間隔が 5 km と粗いことからわかるように、研究の主目的は死亡リスクの推定と津波減災の方法の提案にあるためであろう。

本研究の目的は、南海道沿岸における震源の位置と津波高および津波の到達時間の相互関係を明確にすることにより、地域津波防災を考えた堤防高や避難体制のあり方を確立することにある。その第一段階として、著者は前報 (1995) において、陸域に到達する以前の入射波としての津波の特性を調べ、陸域を襲う潜在的な津波の危険度を検討した。その中で著者は、昭和南海地震津波と同じ規模を持つ楕円状の波源域を南海トラフ沿いに移動させつつ津波の屈折計算を行い、四国沿岸に襲う津波の到達時間や沿岸への津波エネルギーの集中度などから津波の危険度を評価した。

本報では、前報より得られた知見をもとに、対象地域を前報の四国沿岸から紀伊半島を含む南海道沿岸にまで拡張した。そして、同地域を襲った代表的な津波 [宝永 (1707), 安政 (1854), 昭和 (1946)] を起こした地震の

断層モデルを南海トラフ沿いに移動させ、沿岸における津波高や到達時間から津波の危険度を評価した。

2. 数 値 計 算

計算領域は図-1 に示すように、高知県の足摺岬から三重県の志摩半島を含む 515.00 km×168.75 km とし、 x および y 軸を図のようにとっている。図中には過去に南海道沖で発生した海溝性地震の年代と震源位置を●印で併記している。

計算領域以外の南海道沿岸での津波被害はあまり大きくなく、ここでは、図-2 に示すとおり、南海道沿岸について等距離 (約 35 km) になるよう全 16 の領域に分割し、各領域単位で津波の挙動を考察した。

計算格子間隔は全計算領域で 1250 m とし、各領域の長さに比較してかなり小さく、領域内についても津波の挙動の変化が考察できるようにした。水深は最小で 5 m、計算時間間隔は差分の安定性を考慮して 10 秒とし、地震発生後 1 時間まで計算を行った。

津波の解析における基礎方程式を式 (1)~(3) に示す。ここでは水深 50 m 以上の海域では式 (1), (2) の

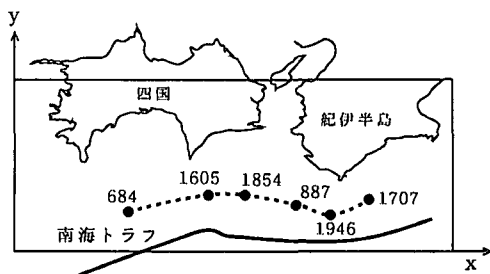


図-1 計算領域

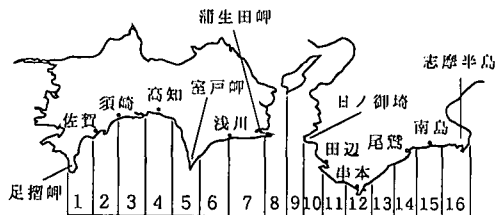


図-2 各分割領域の主要地名

* フェロー 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科
 ** 正 会 員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科
 *** 正 会 員 (株)四国総合研究所
 **** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科

右辺における第2項(摩擦項), 第3項(移流項)を省略した線形長波理論式が用いられている。

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = -gH \frac{\partial \xi}{\partial x} - f_c \frac{q_x Q}{H^2} - \frac{1}{H} \left(q_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + q_y \frac{\partial q_x}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = -gH \frac{\partial \xi}{\partial y} - f_c \frac{q_y Q}{H^2} - \frac{1}{H} \left(q_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + q_y \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial (\xi - \xi_0)}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \dots \dots \dots (3)$$

ここに, t : 時間, ξ : 静水面からの水位上昇量, h : 水深, f_c : 海底摩擦係数, $q_x(q_y)$: $x(y)$ 方向の線流量である。 ξ_0 は海底変動の鉛直水位であり, これは断層モデルをもとに Mansinha-Smylie (1971) の解析解で計算される地震時の海底地盤変動量の鉛直成分がそのまま海水面の変位となつたものである。なお, 式中の H および Q は以下の式(4), (5) によって与えられる。

$$H = h + \xi + \xi_0 \dots \dots \dots (4)$$

$$Q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \dots \dots \dots (5)$$

境界条件は, 陸側では完全反射すると仮定し, 外界との境界では完全無反射で通過するとして線形長波の進行

波を考えて式(6)を適応する。ここで, 符号は ξ が正のときに q_x が計算領域の外側に向かうようにとっている。

$$\sqrt{q_x^2 + q_y^2} = \pm \sqrt{gh} \xi \dots \dots \dots (6)$$

3. 断層モデルの移動と津波高の補正

3.1 断層モデルの移動

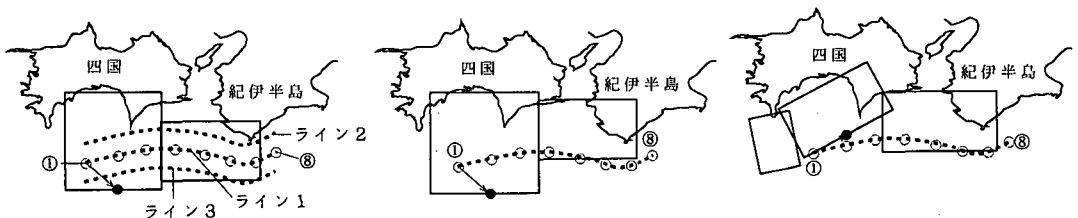
図-3 には, ここで用いた3つの津波に対する断層モデルの移動基準を, また, 表-1 には各モデルの断層パラメータを示す。数値計算に用いた断層モデルはいずれも相田モデル No.19, No.20, No.29 (1981) である。それは, 著者ら (1996) が四国の太平洋沿岸域について種々の断層モデルの適合性を検討した結果によるものであり, 本報でもこれらのモデルが採用されている。

再び図-1 をみると, 南海道沖で発生した地震の震源の位置のほとんどが南海トラフに沿う内陸側にあることがわかる。また, 震源は紀伊水道沖から和歌山県南西沖付近に集中しており, 今後発生する地震も, これらの震源を結ぶ一本のラインに沿う位置で発生する可能性が高いと考えられる。そこで, 図-1 に点線で示したラインをモデル移動の基準ラインとして考え, 図-3 に示すとおり, この基準ライン上に, 震源①が684年, 震源⑧が1707年の震源と一致するようにとり, 以下, 隣り合う震源の

表-1 断層パラメータ

断層モデル Model No.		2L (km)	W (km)	θ (°)	ϕ (°)	h (km)	U_s (m)	U_d (m)	τ (min)	M_0 (dyne-cm)
1946 昭和 Model 19*	E part	150	70	10	N20W	10	2.4	3.2	0.5	6×10^{28}
	W part	120	120	20	N20W	1	1.2	4.8	3.0	
1854 安政 Model 20*	E part	150	70	10	N20W	10	2.8	3.7	0.5	8×10^{28}
	W part	150	120	20	N20W	1	2.8	5.6	0.5	
1707 宝永 Model 29*	E part	150	70	10	N20W	10	3.1	4.6	0.5	10.2×10^{28}
	C part	140	80	20	N50W	1	0.0	7.0	0.5	
	W part	60	80	20	N30W	1	0.0	13.9	0.5	

2L: 断層の長さ W: 断層の幅 θ : 断層の傾斜角 ϕ : 断層の走向 h: 断層上辺までの深さ
 U_s : 横ずれ量 U_d : 縦ずれ量 τ : 断層の立ち上がり時間 M_0 : 地震モーメント



(1) 昭和南海地震 (1946)

(2) 安政南海地震 (1854)

(3) 宝永南海地震 (1707)

図-3 各断層モデルの移動基準

間隔が64 kmとなるよう全8つの仮想震源を設定した。また、各断層モデルに基準点●印(図中断層底面の中点)を設け、モデルの基準点と基準ラインの設定震源との位置関係は変わらないという仮定のもとで、各断層モデルを移動させた。さらに、図-3の(1)に示したようにライン1の南北に25 kmの間隔でライン2, 3を設定した。図示していないが、図-3の(2), (3)でも同様な2つのラインを設定している。このように、3種類の断層モデルと24点の震源を仮定することで、計72通りの仮想津波を考えた。なお、豊後水道沖では日向灘沖地震などが発生しているものの、紀伊水道沖での地震に比べて津波の発生頻度が低いうえに、仮にここで地震が発生しても従来の著者らの研究から、津波の危険度は低いと判断したため、豊後水道沖には震源を設定しなかった。

3.2 津波高の補正

用いた断層モデルの妥当性の検証は、既に著者ら(1996)によってなされているものの、1250 mの格子間隔による数値計算だけで、沿岸全分割領域での津波高を正確に再現できるものではない。

これまでに羽鳥(1991)や著者ら(1996)は、種々の歴史史料に基づき四国を襲った津波の痕跡調査を行い、被災当時の浸水高に関する多くの有意義なデータを提示している。もちろん現地調査から得られる浸水高と沿岸は直立壁であるとした計算によって得られる津波高とは異なるが、以下では16分割した分割領域単位で、浸水高との誤差が ± 1.0 mとなるように配慮しつつ、算出された津波高に一定の値を乗じることで、津波高の補正を行うことにした。表-2に各断層モデルより得られた各領域における津波高の補正值を示す。なお、昭和南海と安政南海地震津波の補正值は、全く同じ値となった。

4. 津波の危険度に関する考察

4.1 津波の来襲確率

南海道沖で津波が発生すると、沿岸各領域に襲来する津波高の空間的な分布特性は沿岸地形などにより大きく変化する。この項では、沿岸各領域に襲来する津波高の来襲確率について検討する。

図-4は津波の来襲確率Pを各分割領域ごとにまとめたものである。津波の来襲確率、例えば図中のP3値とは、南海道沖で津波が発生した場合、沿岸における津波高が設定津波高3 mを超える確率と定義している。これにより全72通りの仮想津波のうち、どれだけが設定津波高を越えたか否かについて判定し、その値を超える確率から危険度が評価できる。この図をみるにあたり、あらかじめ注意すべきことは、四国と紀伊半島のボトルネックとなっている蒲生田岬と日ノ御崎より内側の領域8, 9では、来襲確率が極めて低くなっていることである。

表-2 津波高の補正值

	昭和 ・安政	宝永		昭和 ・安政	宝永
領域1	1.4	1.0	領域9	1.1	1.2
領域2	2.0	1.0	領域10	0.8	1.0
領域3	1.3	0.8	領域11	1.3	1.3
領域4	1.1	1.1	領域12	0.9	1.0
領域5	1.1	1.1	領域13	0.8	1.1
領域6	1.4	1.4	領域14	0.9	1.0
領域7	0.8	0.8	領域15	1.0	1.0
領域8	1.2	1.3	領域16	1.5	1.7

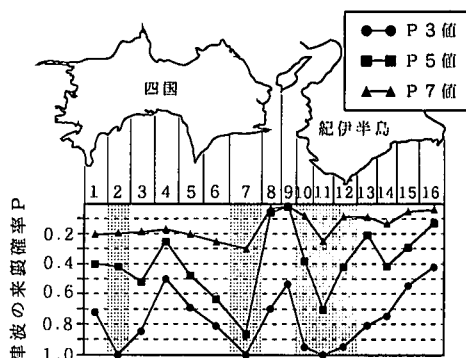


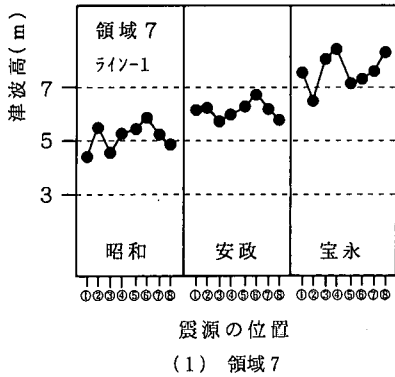
図-4 津波の来襲確率

これらの領域は太平洋に直接には面しておらず、特定地区(特に両領域の南岸部)では、他領域と同程度の津波高を示す場合もあるが、これを領域内で平均しているため図に示す程度の来襲確率となっている。このように、局所的に津波高が大きくなっても、1つの領域で見ると確率は小さくなることもある。さて、図において、網掛けで表示している領域2, 7および領域10~12では、P3値からわかるように、領域の沿岸ではほぼ確実に3 m以上の津波高となることがわかる。また、これらの領域のうち、領域7および11では、津波高が5 mを超える確率(P5値)は70~90%, 7 mを超える確率(P7値)も約30%と高く、津波高には最も注意すべき領域といえる。一方、網掛け以外の領域をみると、P5値が高いのは領域6で60%, 領域3, 5で50%程度となり、これらの領域でも津波高に関する危険度は高いといえる。

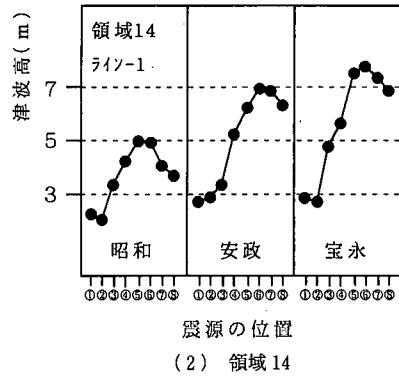
P7値は、先に述べた領域7, 11以外では大きくないが、一般にその値は紀伊半島沿いよりも四国沿岸の方が大きいことも特徴として挙げられる。

4.2 震源位置と津波高の関係

4.1では、ある津波高を超える確率P値から津波の危険度を評価した。ところが、津波高が3.1 mも4.9 mも



(1) 領域7



(2) 領域14

図-5 震源位置と最大津波高

設定津波高3m以上5m以下という同じP3値に属してしまう。また、領域8、9のように、1つの領域内で局所的に大きくなる津波高を、P値のみで十分に評価することはできない。

図-5は各津波モデルについて領域7および14における震源の位置と領域内の最大津波高との関係を示した一例である。図-5の(1)から、領域7では、震源が変わっても、同じ津波モデルであれば津波高には後述の場合ほど極端な変化は見られない。これに対して図-5の(2)の領域14では、震源の位置によって、領域内の津波高が大きく変化することがわかる。同様に全沿岸領域についてみると、図-4の網掛けしている領域が前者に、網掛けしていない領域が後者にあてはまる。網掛けしている領域では、P3値がほぼ100%であることからわかるように、どこで地震が発生しても津波高は高くなるといえる。一方、網掛けしていない領域、すなわち震源位置によって最大津波高が変化する領域の中には、仮に最も津波高が大きくなる震源位置で地震が起こった場合、過去に記録した以上の津波高となる領域もある。特に領域3、6、16では、震源の位置によっては8mを越えるという計算結果が得られており、津波高に関する危険度としては極めて高い領域の一つに挙げられよう。

以上の津波高に関する考察結果より、震源の位置と津波高の関係を考慮した場合、網掛けの領域に加えて領域3、6をはじめ、P値はそれほど大きくなかった領域16も、津波の危険度は高い領域であるといえる。

なお、本報で得られた四国沿岸の領域1～7の津波高に関する結果は、前報で著者らが示した入射波としての津波危険度の高い領域と全く一致している。

4.3 到達時間分布

津波の危険度の評価は沿岸の津波高のほかに、地震発生から津波来襲までの時間も、避難を考えた場合には重要な要素となる。この項では津波の第一波の到達時間から津波の危険度を評価する。

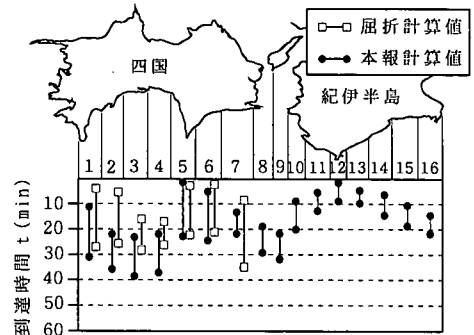


図-6 到達時間分布

図-6は、計72通りの仮想津波の計算から得られた各領域における津波の第一波の到達時間を●印で示したものである。到達時間に幅があるのは、震源の位置を土佐湾沖から紀伊半島沖にまで移動させているためである。図から、室戸岬、潮岬を含む領域5、12では、最短到達時間がきわめて短く、地震発生直後にも津波が来襲する可能性がある。日ノ御崎から志摩半島までの領域10～16では、どこで地震が発生しても遅くとも20分以内に津波が来襲する点に注意を要する。また、高知県沿岸の領域1～4は、対象領域中最も到達時間が遅くなる領域であるが、それでも遅くとも40分以内には第一波が来襲することを念頭に置く必要がある。また、同図には、前報の屈折計算による四国沿岸への到達時間分布を□印で併記している。これを本報の結果と比較すると、領域1～2において本報の結果の方がやや到達時間が遅い値を示しているものもあり、むしろ危険側の値をとった方が避難を考えた場合にはよいであろう。

また、津波高(特にP5値)からみて危険度が高かったのは領域3、5、6、7、11、であった。加えて到達時間を考慮した場合、特に領域5、6、11では、地震発生直後にも津波の第一波が来襲する可能性が高いことか

表-3 危険度の高い震源の位置

領域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
津波高	紀水沖		土佐湾沖			紀伊水道沖						紀伊半島南方沖				
到達時間	土佐湾沖			紀伊水道沖								紀伊半島南方沖				

表-4 沿岸領域と危険度の関係

領域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P3 値		◎	△			△	◎			◎	◎	◎	△			
P5・P7 値			△		△	◎	◎				◎					
震源と津波高の関係			◎			◎										◎
到達時間	△				◎	◎	△			△	◎	◎	◎	△	△	△

◎：最も危険度が高い △：◎に次いで危険度が高い □：最も危険度が高い領域

ら、これらの領域では、津波防災施設ばかりか早急な避難体制を熟考すべきことを強調したい。

4.4 危険度の高い震源位置

分割した同じ領域内でも震源位置によって津波高が大きく変化する領域があること（図-5）、また、到達する時間に幅があること（図-6）は既に述べた。

例えば図-5の（2）をみれば、昭和・安政・宝永の各断層モデルに関係なく津波高が最も大きくなるのは震源が⑤～⑦の場合である。したがって、領域14において津波高に関する危険度が最も高くなるのは、震源が紀伊半島南方沖にある場合といえる。このように、どのような位置に震源がある場合に津波の危険度が最も高くなるのか、津波高および到達時間について各領域ごとに検討した結果を表-3にまとめた。

まず津波高についてみれば、領域3～5では土佐湾沖に、領域1, 2, 6～12では紀伊水道沖に、そして領域13～16では紀伊半島南方沖に震源があった場合に最大津波高が記録されることがわかった。一方、到達時間についてみれば、当然の結果として各沿岸領域に最も近い震源で地震が発生したとき、津波の到達時間は最も早くなることがわかった。すなわち、土佐湾に面している領域では土佐湾沖に、紀伊水道沖に面している領域では紀伊水道沖に、紀伊半島東岸の領域13～16では紀伊半島南方沖に震源がある場合に津波の第一波が最短で到達すると思われる。

5. 結 言

本研究では、過去の歴史地震をもとに3種の断層モデルを考慮した全72通りの仮想津波を南海トラフ沿いに

想定するとともに、南海道沿岸を16の小領域に分割し、各領域ごとに来襲確率、震源位置と津波高の関係および到達時間を求めることで、津波の危険度に関する考察を試みた。各領域ごとに危険であると思われる指標（来襲確率、震源位置と津波高の関係、到達時間）についてとりまとめたものを表-4に示し、表より得られる結論を以下に示す。

1) 領域2, 7, 10～12では、南海道沖で地震が起これば、沿岸の津波高は必ず3m以上に達する。このうち領域7, 11では、5mを超える確率は70～90%、7mを超える確率は30%にもなる。

2) 領域3, 6, 16では、震源の位置

と地震の規模により津波高が8mを超えることもある。特に領域3, 6では、8mを超える確率が50%と高いことから、注意を要する。

3) 領域5, 6, 11～14では、津波の第一波の到達時間が早く、地震発生直後か遅くとも領域11～14では10分程度、領域5, 6では20分程度と考えておくべきである。特に、1), 2)で示した津波高に関する危険度の高い領域のうち、到達時間が早い領域では、津波防災施設ばかりか早急な避難体制を熟考すべきであろう。

最後に、本研究は文部省科学研究費基盤研究(c) [代表者：村上仁士] による研究の一部であることを記し、謝意を表する。

参 考 文 献

相田 勇 (1981): 南海道沖の津波の数値実験, 東大地震研究所 叢報, Vol. 56, pp. 713-730.
河田恵昭・小池信昭 (1995): 危機管理と津波避難マニュアル, 京大防災研究所年報, 第38号, B-2, pp. 157-711.
羽鳥徳太郎 (1991): 徳島県と和歌山県沿岸における津波災害の比較, 歴史地震, pp. 11-19.
村上仁士・伊藤禎彦・山本尚明・佐藤広章 (1995): 四国沿岸域の津波危険度に関する一考察, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 361-365.
村上仁士・島田富美男・伊藤禎彦・山本尚明・石塚淳一 (1996): 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, pp. 39-52.
村上仁士・伊藤禎彦・山本尚明 (1996): 各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, 徳島大学工学部研究報告, 第41号, pp. 39-53.
Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.