

4. 断層モデルを用いた四国沿岸域における津波リスクの評価

4.1 緒言

ここでは、3節で得られた筆者ら¹⁴⁾の知見をもとに、対象地域を高知県の足摺岬から徳島県鳴門市までとし、同地域を襲った代表的な津波（1707年宝永、1854年安政南海および1946年昭和南海）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リスクを評価した。

4.2 数値計算

計算領域は、前節の図4と同様に351.25 km × 168.75 kmとした。また、X軸・Y軸も全く同様とした。対象地域以外の四国沿岸での津波被害はあまり小さくなく、ここでは、図13に示すとおり、四国沿岸について等距離（約35 km）になるよう全8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1,250 mとし、各領域の長さと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(6)～(8)に示す。ここでは、水深50 m以上の海域では式(6)、(7)の右辺における第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。

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - f_c \frac{q_x Q}{H^2} - \frac{1}{H} \left(q_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + q_y \frac{\partial q_x}{\partial y} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - f_c \frac{\partial q_y Q}{H^2} - \frac{1}{H} \left(q_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + q_y \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\zeta - \xi)}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (8)$$

ここに、 t ：時間、 ζ ：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 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¹⁵⁾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るとしたものである。なお、式中の H および Q は以下の式(9)、(10)によって与えられる。

$$H = h + \zeta + \xi \quad (9)$$

$$Q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \quad (10)$$

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慮して式(11)を適応する。ここで、符号は ζ 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。

$$\sqrt{q_x^2 + q_y^2} = \pm \sqrt{gh} \zeta \quad (11)$$

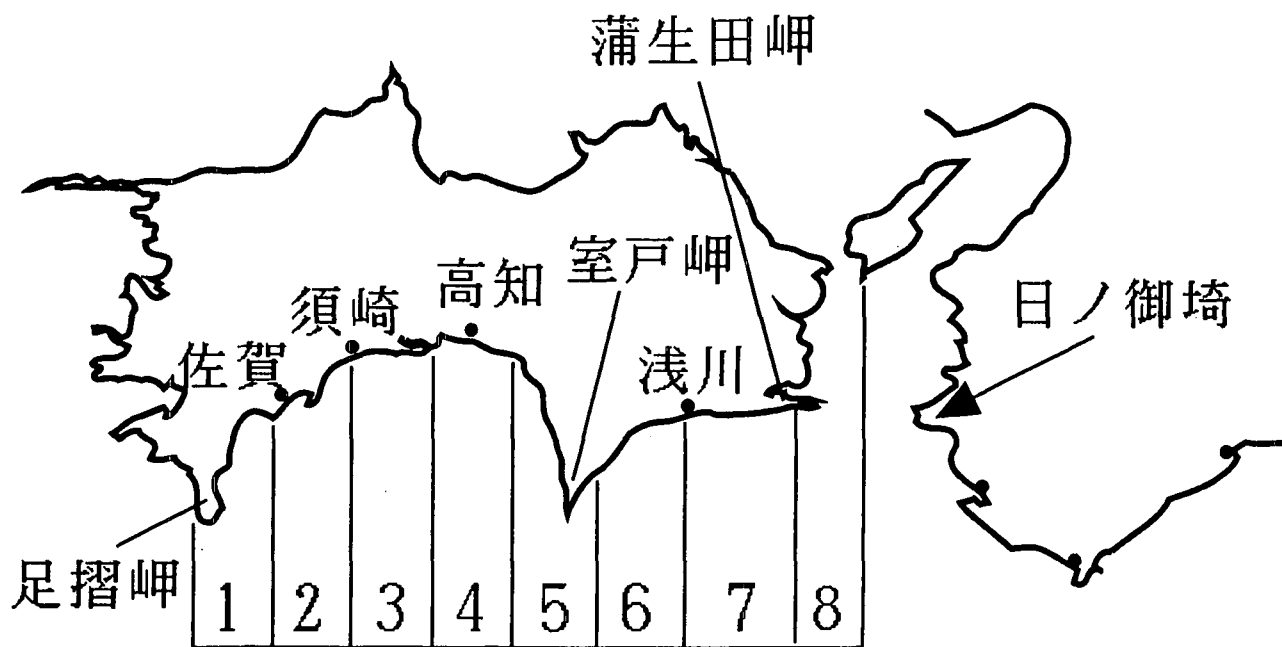


図13 各分割領域の主要地名

表2 断層パラメータ

断層モデル Model No.	2L (km)	W (km)	θ ($^{\circ}$)	ϕ ($^{\circ}$)	h (km)	Us (m)	Ud (m)	τ (min)	Mo (dyne-cm)
1946昭和 Model 19'	E part 150 Wpart 120	70 120	10 20	N20W N20W	10 1	2.4 1.2	3.2 4.8	0.5 3.0	$6.0 \cdot 10^{28}$
1854安政 Model 20'	E part 150 Wpart 150	70 120	10 20	N20W N20W	10 1	2.8 2.8	3.7 5.6	0.5 3.0	$8.0 \cdot 10^{28}$
1707宝永 Model 29'	E part 150 C part 140 Wpart 60	70 80 80	10 20 20	N20W N50W N30W	10 1 1	3.1 0.0 0.0	4.6 7.0 13.9	0.5 0.5 0.5	$10.2 \cdot 10^{28}$

2L:断層面の長さ, 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, Us:横ずれ量, Ud:縦ずれ量,
 τ :断層の立ち上がり時間, Mo:地震モーメント

4. 3 断層モデルの移動と津波高の補正

4. 3. 1 断層モデルの移動

図14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2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)¹⁶⁾である。それは、筆者ら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、本節でもこれらのモデルが採用されている。

再び前節の図4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4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14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とり、以下、隣り合う震源の間隔が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(図中断層底面の中心)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14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14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筆者らの研究から、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。

4. 3. 2 津波高の補正

用いた断層モデルの妥当性の検証は、既に筆者ら¹⁷⁾によってなされているものの、1,250m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。

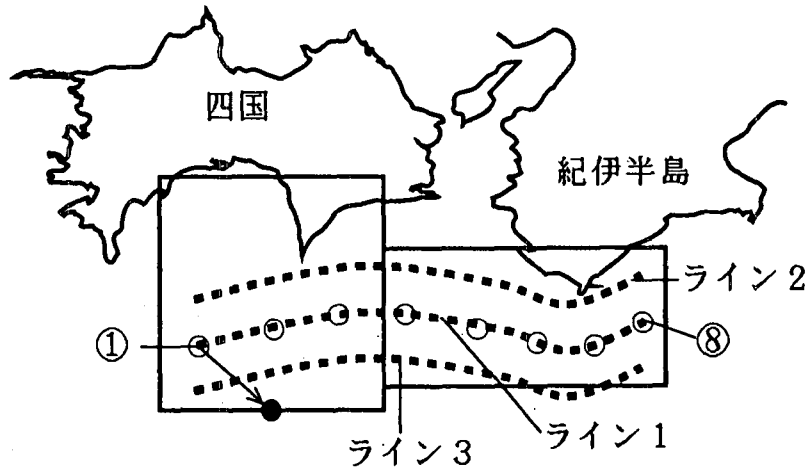
これまでに羽鳥¹⁸⁾や筆者¹⁹⁾らは、種々の歴史史料に基づき四国を襲った津波の痕跡調査を行い、被災当時の浸水高に関する多くの有意義なデータを提示している。もちろん、現地調査から得られる浸水高と沿岸は直立壁であるとした計算によって得られる津波高とは異なるが、以下では8分割した分割領域単位で、浸水高との誤差が±1.0mとなるように配慮しつつ、算出された津波高に一定の値を乗じることで、津波高の補正を行うことにした。表3に各断層モデルより得られた各領域における津波高の補正值を示す。なお、1946年昭和南海と1854年安政南海津波の補正值は、全く同じ値となった。

4. 4 津波リスクに関する考察

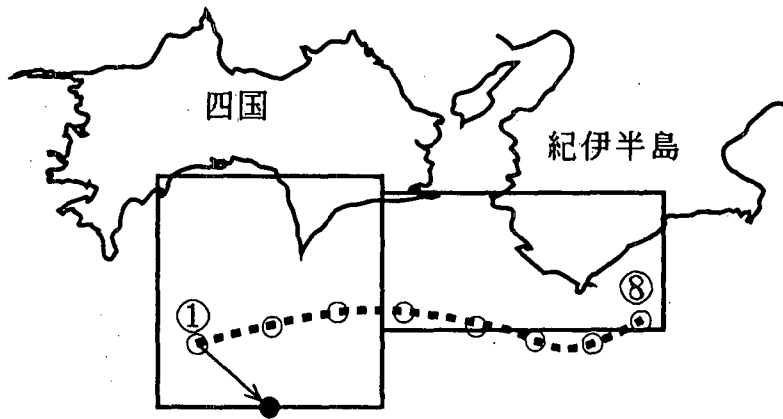
4. 4. 1 津波の来襲確率

南海道沖で津波が発生すると、沿岸各領域に來襲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、沿岸各領域に來襲する津波高の來襲確率について検討する。

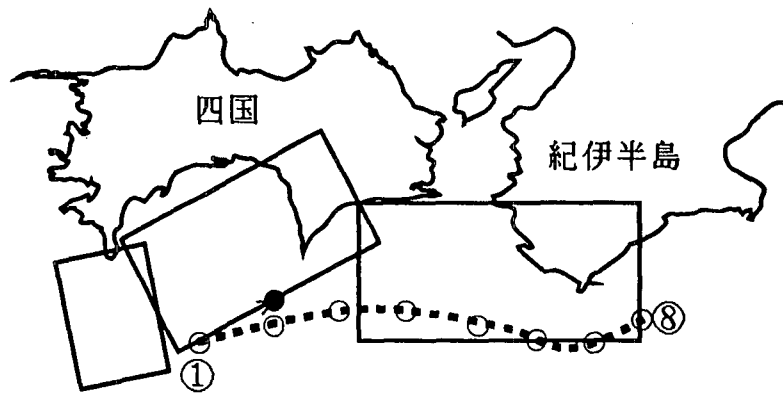
図15は津波の來襲確率Pを各分割領域ごとにまとめたものである。津波の來襲確率、例えば図中のP3値とは、南海道沖で津波が発生した場合、沿岸における津波高が設定津波高3mを超える確率と定義している。これにより全72通りの仮想津波のうち、どれだけが設定津波高を越えたか否かについて判定し、その値を超える確率から津波のリスクが評価できる。この図をみるにあたり、あらかじめ注意すべきことは、四国と紀



(1) 昭和南海地震 (1946)



(2) 安政南海地震 (1854)



(3) 宝永地震 (1707)

図14 各断層モデルの移動基準

表3 津波高の補正值

	昭和 ・安政	宝永
領域1	1.4	1.0
領域2	2.0	1.0
領域3	1.3	0.8
領域4	1.1	1.1
領域5	1.1	1.1
領域6	1.4	1.4
領域7	0.8	0.8
領域8	1.2	1.3

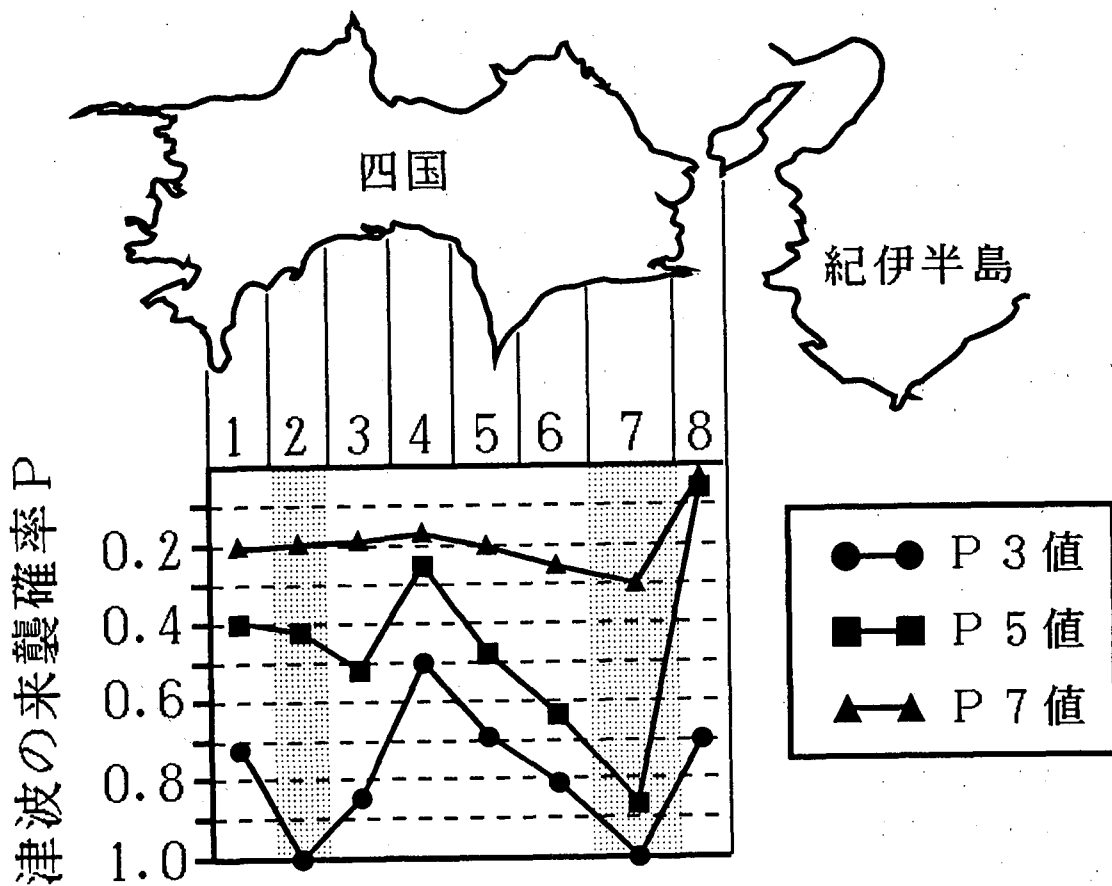


図15 津波の来襲確率

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では、来襲確率が極めて低くなっていることである。この領域は太平洋に直接には面しておらず、特定地区（特に領域の南岸部）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15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3m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では、津波高が5mを超える確率（P5値）は約90%、7m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リスクは高いといえる。

4.4.2 震源位置と津波高の関係

4.4.1では、ある津波高を超える確率P値から津波のリスクを評価した。ところが、津波高が3.1mも4.9mも設定津波高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16は各津波モデルについて領域7および領域3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16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16の2)の領域3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15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、津波高に関するリスクとしては極めて高い領域の1つに挙げられよう。

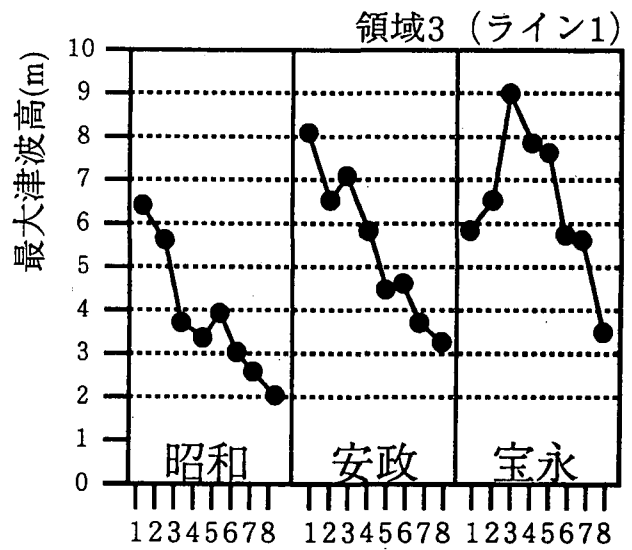
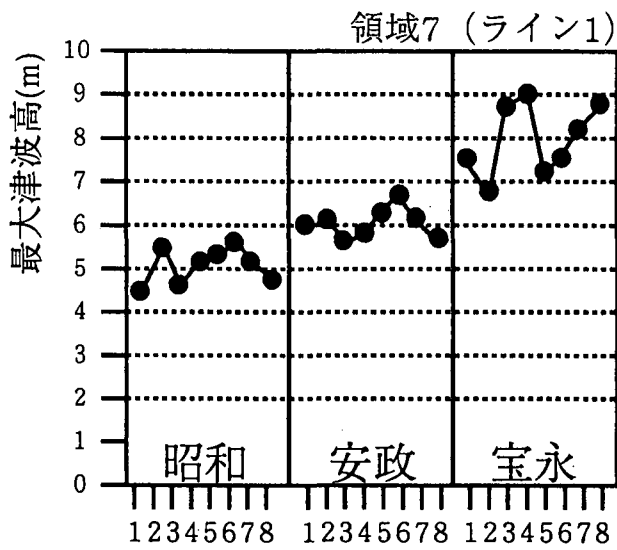
以上の津波高に関する考察結果より、震源の位置と津波高の関係を考慮した場合、網掛けの領域に加えて領域3、6も、津波のリスクは高い領域であるといえる。

なお、本節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、前節で示した入射波としての津波リスクの高い領域と全く一致している。

4.4.3 到達時間分布

津波のリスク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17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6から、室戸岬を含む領域5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。高知県沿岸の領域1～4では、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、前節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。これを本節の結果と比較すると、領域1～2において本節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と思われる。



1) 領域7

2) 領域3

図16 震源位置と最大津波高

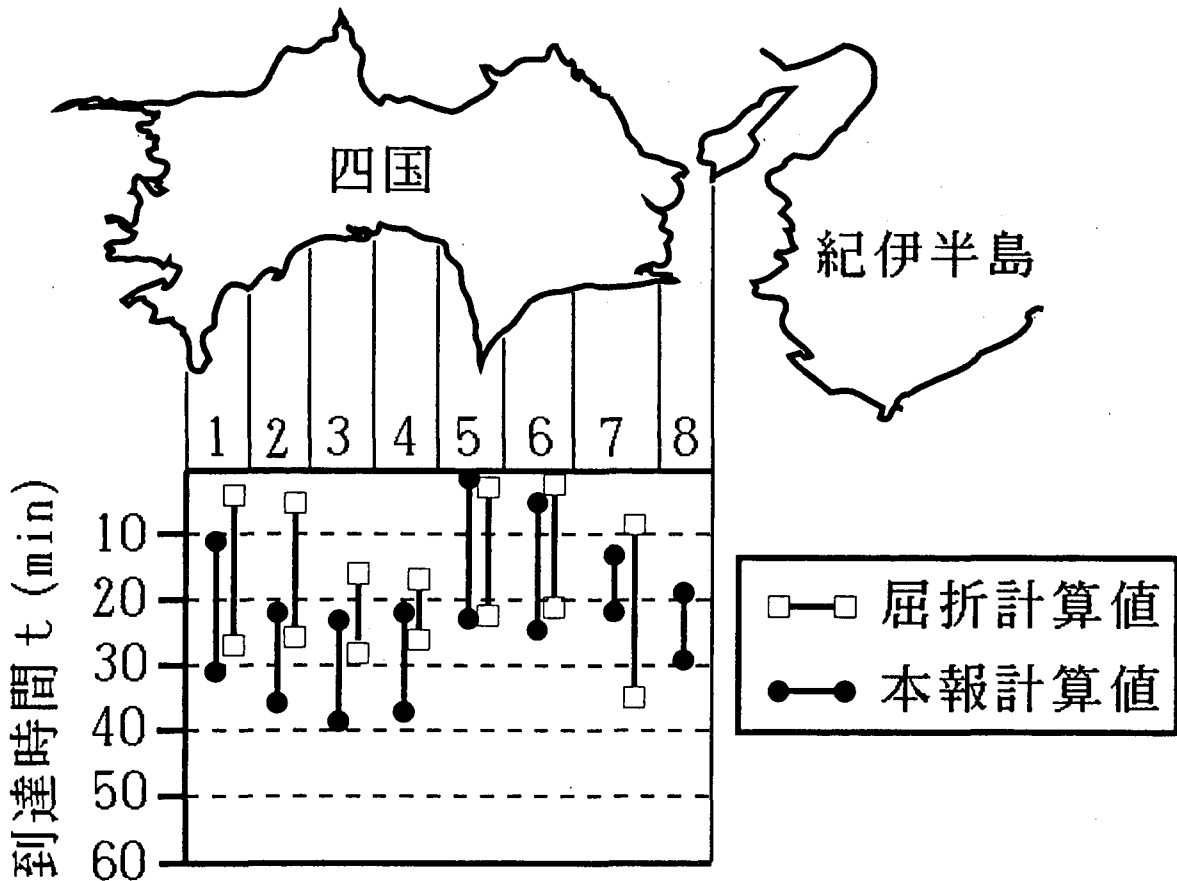


図17 到達時間分布

また、津波高（特にP5値）からみてリスクが高かったのは領域3，5，6および7であった。加えて到達時間を考慮した場合、特に領域5，6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。

4.4.4 リスクの高い震源位置

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16）、また、到達する時間に幅があること（図17）は既に述べた。

例えば図16の（2）をみれば、1946年昭和南海・1854年安政南海・1707年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①～③の場合である。したがって、領域3において津波高に関する危険度が最も高くなるのは、震源が紀伊水道沖または土佐湾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4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1，2，6～8では紀伊水道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。

4.5 結 言

本節では、過去の歴史地震をもとに3種類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、四国沿岸を8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5に示し、表より得られる結論を以下に示す。

- （1）領域2，7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では、5mを超える確率は90%、7mを超える確率は30%にもなる。
- （2）領域3，6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、5m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5，6では20分程度と考えるべきである。特に、（1）、（2）で示した津波高に関するリスクの高い領域のうち、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。