

南海地震に伴う津波の沿岸における発生確率について

平石 哲也*・柴木 秀之**・原崎 恵太郎**・田中 聡***

1. はじめに

津波対策施設は、津波発生予測が困難であり、予想被害規模が甚大であること等から、安全性に配慮した大規模なものが計画される。一方で、津波対策施設の建設によって期待される便益を客観的に評価し、これを施設規模に反映しようとする考え方も普及しつつある。施設設置に伴う便益を計算するためには、津波の発生確率と、それに対する被害規模を推定することが必要となる。

本論文で対象とする四国太平洋岸から紀伊水道沿岸は、日本の代表的な津波常襲地帯であり、津波対策施設の整備は急務である。しかしながら、設計外力となる南海地震に伴う津波の発生確率に言及した例は少なく、施設の便益計算に必要な基礎資料はないのが現状である。

そこで、本論文では、南海地震とそれに伴う津波の発生確率に関する解析を行い、代表再現期間の津波高を提示する。また、地震規模及び発生確率と津波高の関係、地震源が津波高と発生確率に及ぼす影響をまとめる。

2. 南海地震の発生確率

(1) 地震の極値データ

はじめに、四国太平洋岸から紀伊水道沿岸で発生する津波の要因となる南海地震の発生確率を求める。日本周辺で発生する地震の特徴が共通する地域は、地体構造的にも共通するという「地震地体構造論」に基づく、萩原ら (1991) の地体区分を適用して、過去の被害地震を地域分類する。被害地震の震源と規模は、理科年表 (国立天文台, 1998) 「日本付近のおもな被害地震年代表」及び渡辺 (1985) に記載されたデータを基に整理する。

対象とする南海地震は、図-1 に表す東南海プレート境界の地体区分 P_1 で発生する地震として分類される。そこで、東南海プレート境界で過去発生した被害地震を抽出し、その規模 (M : マグニチュード) を整理すると、図-1 の○印の分布となる。ここで、+印は抽出される地震の震源位置を表し、○の大きさは地震規模を表す。

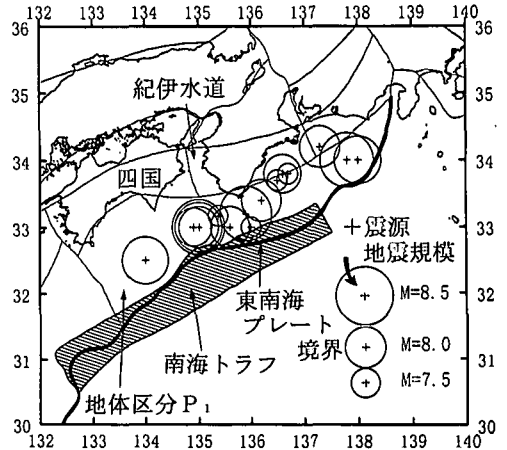


図-1 東南海プレート境界 (地体区分 P_1) の地震

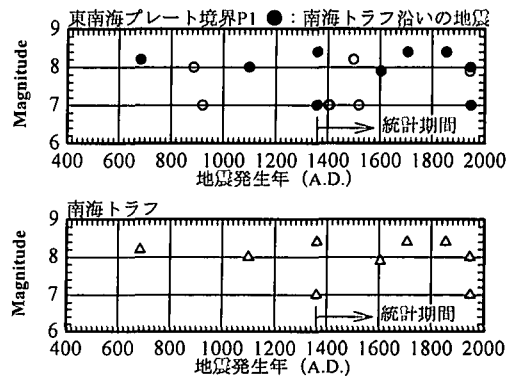


図-2 東南海プレート境界及び南海トラフで発生した被害地震の出現状況

図-1 に表す東南海プレート境界 P_1 の被害地震を年代順に表示すると、図-2 の出現状況図となる。図-2 上図は、東南海プレート境界 P_1 の被害地震の出現状況を表し、そのうち、●印は南海トラフ沿いの地震 (いわゆる南海地震) を表す。図の横軸は年代を、縦軸は地震規模をとる。また、下図は、上図中の●印で表す南海トラフ沿いの被害地震のみの出現状況を抜粋して表す。

図-2 によれば、南海トラフ沿いの被害地震は、1315 年間 (684 年~1998 年) に 9 個あり、その規模は $M =$

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長
 ** 正会員 工修 株式会社エコー 環境水理部
 *** 正会員 工修 株式会社エコー 海外事業部

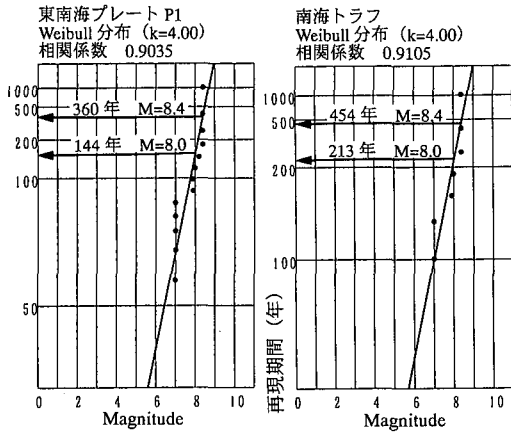


図-3 東南海プレート境界(地体区分P₁)及び南海トラフ沿いの被害地震の確率分布

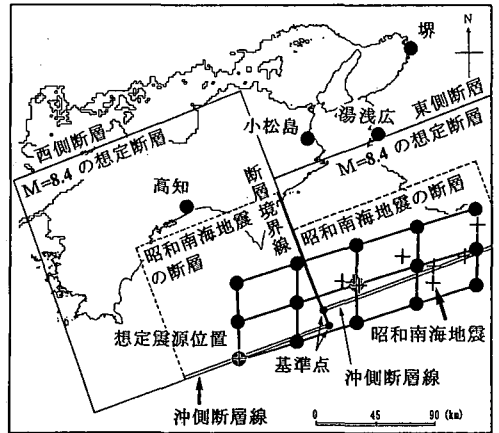


図-4 南海地震の震源位置と震源の想定位置及び昭和南海地震の断層(相田(1981))

7.0~8.4となる。ただし、東南海プレート境界P₁の被害地震を見ると、1360年より前の被害地震記録は、それ以降の記録と比べて相対的に個数が少ない。これは、1360年より前の小規模な被害地震記録が欠落しているためと考えられ、統計期間を1315年にとると、期間内のデータ密度が不均一になる可能性がある。そこで、以降の解析では、統計期間を1360年から1998年までの639年間とする。

(2) 地震の極値統計解析

南海地震の発生確率を明らかにするために、被害地震の規模(マグニチュード)を極大値データとする地震の極値統計解析を行う。

極値統計解析に用いるデータ群は、独立性を満足することが要求される。プレート境界地震は、境界部に蓄積する地殻のひずみが限界に達した時、エネルギーを放出するために生じる現象である。一般に、1回の地震に伴うエネルギーの放出量は、前回の地震規模の影響を受けると言われており、個々の地震規模が完全に独立するという仮定には問題がある。さらに、図-2のように、地震の発生間隔と規模に関するデータは少なく、不規則であるため、地震の発生が、ある確率分布に従うという仮定についても疑問が残る。しかしながら、現段階では、地震発生間隔を物理的に予測することが困難である。そのため、地震調査委員会(1999)は、大規模地震の発生間隔の推定法として、極値分布関数を利用する統計的手法を提案し、また、三省報告(農水省・運輸省・建設省, 1996)は、日本海東縁部の地震空白域における地震発生確率及び規模の決定において、地震の極値統計解析を適用している。そこで、本研究においても、統計的手法により、地震の発生確率について検討を行う。

極大値データ(地震の規模)に当てはめる分布関数に

は、グンベル分布とワイブル分布を採用する。各々、グンベル分布は成ヶ沢(1972)、ワイブル分布はNishenko(1985)が、地震発生間隔の推定に適用した例がある。ここで、ワイブル分布の形状母数 k は、1.0~7.0まで1.0間隔の7種類とし、プロット・ポジション公式の係数は、ペトルアスカス・アーガード公式を用いる。そして、8種類の分布関数から最も適合するものを最小2乗法により選定する。

図-3は、統計期間639年(1360年~1998年)の被害地震の確率分布を表す。左図は、東南海プレート境界P₁の被害地震の確率分布であり、右図は、南海トラフ沿いの被害地震(極大値7個)の確率分布である。2つともワイブル分布($k=4.0$)が適合分布関数となる。

これらの図から任意規模の地震の発生確率が推定できる。例えば、東南海プレート境界P₁の地震(左図)の場合、 $M=8.0$ 規模(昭和南海地震に相当)の再現期間は140年程度、 $M=8.4$ 規模(宝永、安政南海地震に相当)は360年と推定される。一方、南海トラフ沿い地震(右図)の場合、 $M=8.0$ 規模が210年程度、 $M=8.4$ 規模が450年程度となり、50年程度長い。大規模な南海地震($M=8.0$ 以上)の発生周期は100~150年と言われており、東南海プレート境界P₁の地震の再現期間はほぼ一致するが、南海トラフ沿いの地震は長めとなる。

3. 沿岸における津波高の推定

(1) 南海道沿岸の津波計算

南海トラフ沿いの地震に伴う、南海道沿岸の津波高を求めるために、想定地震に伴う津波の数値シミュレーションを行う。津波の波源条件は、次のように設定する。

図-4の+印は、南海トラフ沿いの被害地震の震源位置を表し、この震源を網羅する範囲に●印で表す想定震

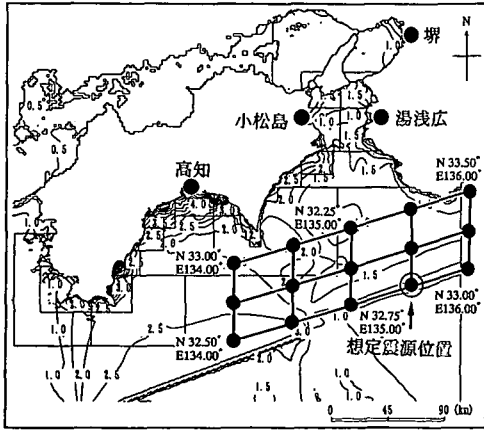


図-5 想定震源位置と想定南海地震 ($M=8.4$) の最大津波高分布の関係

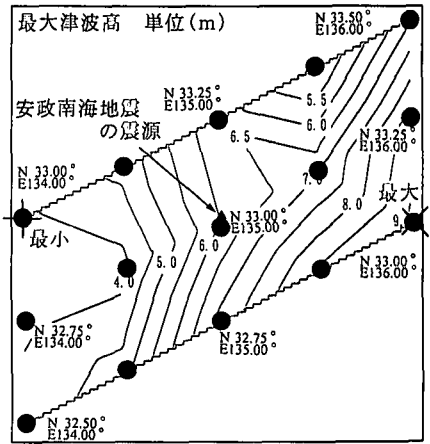


図-6 高知における想定地震 ($M=8.4$ 規模) の震源位置と最大津波高の関係

源を15点設定する。また、被害地震の記録が、 $M=7.0\sim 8.4$ の範囲にあることから、想定地震規模は、 $M=7.0, 7.8, 8.0, 8.2, 8.4, 8.6$ の6種類とする。

津波初期水位の決定に必要な、想定地震の断層パラメータは、平石ら(1997a)が報告した、地震相似則に基づく方法により設定する。この方法は、図-4に表す相田(1981)の昭和南海地震モデル($M=8.0$)を基本として、各規模の断層長さ・幅・すべり量は、佐藤(1989)が提案する地震相似則から、 $M=8.0$ に対する各規模の倍率を算定し、この倍率を昭和南海地震の値に乗ずることにより求める。他の値は、相田の提案値を用いる。また、西側(四国側)と東側(紀伊水道側)の2断層を考え、断層の走向も一致すると仮定する。

断層位置は、図-4に表す、2断層間の境界線、境界線端の基準点及び沖側断層線と、震源(+印)の位置関係が変化しないと仮定し、震源から決定する。この仮定により、例えば、想定地震 $M=8.4$ が昭和南海地震の震源で発生する場合、図-4に表す $M=8.4$ の断層のように、地震規模増加に伴う断層面積の増大は、西側断層が北西側に、東側断層が北東側に広がることで表現される。

このようにして、震源位置15点と地震規模6種類の計90個の波源を対象とする津波数値シミュレーションを行う。計算に用いる地形は、平石ら(1997b)の南海道津波計算に用いた地形を基本とし、四国太平洋岸と紀伊水道沿岸を200m、大阪湾を600m格子で近似する。また、津波計算の基礎式である、浅水長波の連続式・運動方程式は、空間差分にスタッガード格子、時間差分にリーブ・フロッグ法を用いて差分化する。

(2) 沿岸津波高の計算結果

図-5は、震源位置が、図中◎印で表す $135.5^{\circ}E, 32.875^{\circ}N$ 、規模が $M=8.4$ の想定地震の津波数値シミュ

レーションから求められる最大津波高分布である。この図と同様の、全90ケースの最大津波高分布から、任意の沿岸格子点における津波高を抽出し、地点別に、地震規模毎の津波高と震源位置の関係図を作成する。

図-6は、図-5に表す高知における、 $M=8.4$ 規模の地震に伴う最大津波高と震源位置の関係図であり、横軸に震源の経度、縦軸に緯度をとる。図中の●印は、15個の想定震源を表す。津波高の等値線は、想定震源位置で発生する $M=8.4$ の地震に伴う最大津波高を、線形平面補間により0.1°間隔の値に変換し、この補間値を用いて描かれる。これと同様に、地震規模毎の「最大津波高と震源の関係図」が、 $M=7.0$ と $M=7.8\sim 8.6$ まで0.2間隔の6種類作成される。

この関係図を用いれば、震源位置と地震規模を与条件として、津波高が補間処理により求まる。例えば、図中▲印は、安政南海地震($M=8.4$)の震源($135^{\circ}E, 33^{\circ}N$)に一致し、高知における最大津波高は6.0mとなる。この津波高は、安政南海地震津波の痕跡値(浦戸5m、宇佐7~8m)とほぼ一致する。

4. 沿岸における南海地震津波の発生確率

(1) 沿岸津波高の極値データ

任意の地点における、地震規模毎の「最大津波高と震源位置の関係図」から、1360年以降の、南海トラフ沿いの被害地震に伴う最大津波高を求め、これを極大値データとする極値統計解析を行う。さらに、関係図から、同規模の地震に伴う津波高が、最大となる震源位置と最小となる震源位置を抽出する。この津波高の最大値及び最小値を極大値データとする極値統計解析も行う。

例えば、 $M=8.4$ 規模の想定地震に伴う高知の津波高は、最大となる震源が、図-6中に最大(×印)と表示す

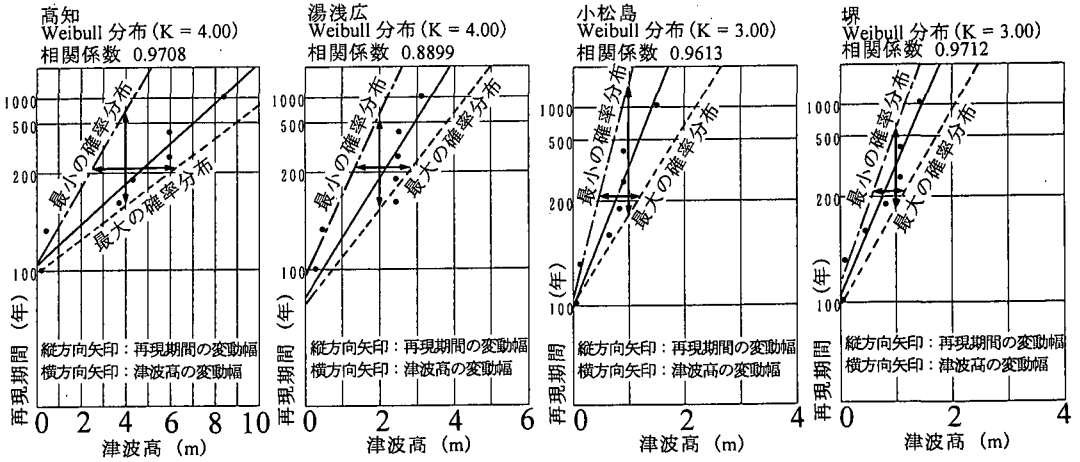


図-7 沿岸代表点における津波高の確率分布と震源位置の違いによる確率分布の比較

る 136.0°E, 33.0°N の位置となり、最小となる震源が、最小 (+印) と表示する 134.0°E, 33.0°N の位置になる。なお、津波高の極値統計解析に用いるの分布関数は、地震の極値統計解析に準じる。

(2) 津波高の極値統計解析

図-7 は、高知、紀伊水道西岸の小松島、東岸の湯浅広、大阪湾奥の堺における、南海トラフ沿いの 7 個の被害地震に伴う津波高の確率分布を表す。これらの図から、4 地点における任意の再現期間の津波高がわかる。津波高の確率分布は、ワイブル分布 ($\kappa=3.0$ 又は 4.0) となり、地震の分布関数とほぼ一致する。図中、湯浅広の極値データは、分布関数とのズレが大きく、相関係数も低く、信頼性に問題があるため、参考値とする。表-1 に、4 地点における規模 $M=8.0, 8.4$ の地震の再現期間(各々、210 年と 450 年) に等しい津波高をまとめる。

次に、被害地震と同規模の地震が、津波高最大となる震源位置及び最小となる震源位置で連続発生する場合を想定すると、推定される確率分布は、図中に最大、最小と表示する分布となる。確率分布図上の最大と最小の幅は、横方向が震源位置の変化に伴う、津波高の変動幅を表し、縦方向が再現期間の変動幅を表す。

高知における 210 年確率の津波高は、震源位置の変化により 2.5~6.2 m 程度の変動幅を持ち、津波高 4.0 m の再現期間は、160~750 年程度の変動幅を持つ。既往被害地震の震源位置による津波高は、変動幅の最大により近い。このことは、既往被害地震の震源位置が、津波高最大となる震源位置に近いことを意味する。一方、堺は、高知と逆の傾向にあり、既往被害地震の震源位置は、津波高最小となる震源位置に近い。小松島と湯浅広は、両者の中間的傾向となる。いずれも、地震が同規模でも、より高い津波高となる震源が存在する。

表-1 代表確率年の津波高

地点	震源	津波高 (m)	
		210 年確率 ($M=8.0$ 対応)	450 年確率 ($M=8.4$ 対応)
高知	既往	4.75	6.82
	最大	6.15	8.64
	最小	2.50	3.59
小松島	既往	0.81	1.15
	最大	1.25	1.77
	最小	0.48	0.69
湯浅広	既往	2.17	2.87
	最大	2.87	3.73
	最小	1.33	1.85
堺	既往	0.82	1.19
	最大	1.20	1.69
	最小	0.62	0.93

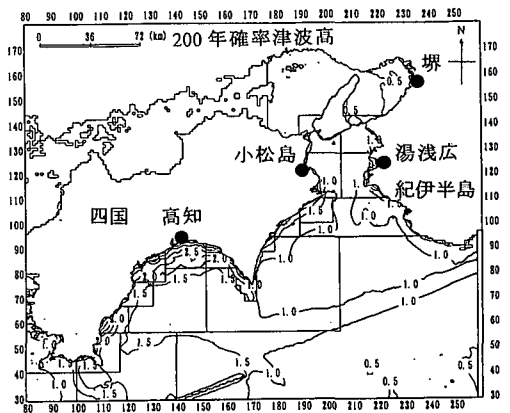


図-8 確率津波高 (200 年) の平面分布

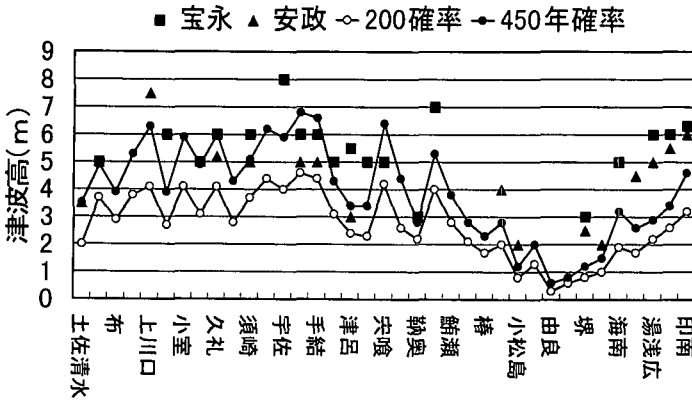


図-9 確率津波の沿岸分布

(3) 確率津波の空間分布

沿岸代表点で行った、津波高の極値統計解析を、全格子点について行い、任意の再現期間の津波高を求める。

図-8は、200年確率($M=8.0$ 規模の地震にほぼ相当)の津波高平面分布を表す。震源に面する四国太平洋岸の津波高が高く、紀伊水道、大阪湾沿岸にかけて次第に津波高が減少する。図-8から、200年確率のような、同じ再現期間を有する津波高が、平面的に把握できる。

さらに、海岸線沿いに、代表再現期間の津波高を抽出し、この津波高の沿岸分布を作成する。図-9は、200年、450年確率の津波高沿岸分布である。

450年確率($M=8.4$ 規模に相当)の津波高は、四国太平洋岸で5~6m程度、紀伊水道西岸で2~3m程度、東岸で3~4m程度、大阪湾奥で1.2m程度となる。450年確率の地震規模は、宝永、安政南海地震と同規模であるため、津波痕跡高と確率津波高の比較が可能である。比較すると、紀伊水道・大阪湾岸で確率津波高は痕跡高よりも低い傾向となる。これは、海岸計算格子が200mと粗く、津波高を過小に計算することも一因と考えられるが、今後、検討すべき課題と考えている。

以上の解析で求めた、再現期間の付加された津波高は、1つの被害地震に伴う津波高と違い、同じ再現期間を有する地震に伴う津波高の期待値という、従来ない新たな情報を表す。

5. おわりに

本論文では、津波数値シミュレーションを用いて、南海地震に伴う津波の発生確率の算定方法を述べ、南海地震と地震に伴う津波の再現期間を明らかにした。

以下に主要な結論をまとめる。

① $M=8.0$ 規模の南海地震の再現期間は210年程度、 $M=8.4$ 規模は450年程度となる。この $M=8.0$ 及び

8.4規模の地震と等しい再現期間の津波高を提示した。

② 既往被害地震と同規模の地震が、津波高最大又は最小となる震源位置で発生する場合を想定し、津波の発生確率を求めた。震源の違いにより、同規模の地震(同再現期間の地震)でも津波高の期待値は変動し、同じ津波高でも再現期間は変動する。既往地震の震源による津波高よりも、高い津波高となる震源は存在する。

③ 代表的な再現期間(例えば、200年確率)の津波高平面分布、沿岸分布を求めた。発生確率に関する情報が付加された津波高は、津波による被害額の期待値推定、津波対策施設の便益計算を行う上で重要となる新たな情報として位置づけられる。

なお、本解析では、南海道トラフ沿いの地震に伴う津波のみについて解析を行った。しかし、南海道沿岸は、東南海地震及び日向灘地震に伴う津波も来襲する。今後、両地震による津波についても考慮する必要がある。

謝辞：本研究を行うに当たり、東海大学工学部 後藤智明教授より数々の御助言を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 相田 勇(1981): 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所彙報, 第56号, pp. 713-730.
- 国立天文台編 (1998): 理科年表, pp. 794-825.
- 佐藤良輔編著 (1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, pp. 82-92.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1999): 長期的な地震発生確率の評価手法について.
- 成ヶ沢憲太郎 (1972): 大地震の時間的・空間的分布のシミュレーション, 北海道大学地球物理学研究報告, 第28巻, pp. 31-46.
- 農水省・運輸省・建設省 (1996): 日本海東縁部地震津波防災施設整備計画調査報告書.
- 秋原尊編(1991): 日本列島の地震(地震工学と地震地体構造), 鹿島出版会.
- 平石哲也・柴木秀之・原崎恵太郎 (1997a): 想定南海地震における共振周期特性の重要性について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 286-290.
- 平石哲也・柴木秀之・原崎恵太郎 (1997b): 津波表示装置による南海道津波危険度評価について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 331-335.
- 渡辺偉夫 (1985): 日本被害津波総覧, 東京大学出版会.
- Nishenko, S. P. (1985): Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of the South America, J. Geophys. Res., 90, pp. 3589-3615.