

# ランダムフェーズモデルを用いた徳島県沿岸の津波水位の確率評価に関する研究

安田 誠宏<sup>1</sup>・田中 晴規<sup>2</sup>・繁田 航平<sup>3</sup>・谷口 純一<sup>4</sup>・北野 利一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

E-mail: yasuda-t@kansai-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

E-mail: k522465@kansai-u.ac.jp

<sup>3</sup>元関西大学 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

<sup>4</sup>正会員 東京建設コンサルタント 環境防災研究所 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

E-mail: taniguchi-j@tokencon.co.jp

<sup>5</sup>正会員 名古屋工業大学教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: kitano@nitech.ac.jp

東北地方太平洋沖地震発生以降、津波災害に関する関心が高まり、津波の確率評価が必要になってきている。本研究では、ランダムフェーズモデルを用いて津波計算をし、徳島県沿岸の確率津波水位を推定するとともに、すべり分布の個数が津波の超過確率分布に及ぼす影響を評価し、再現期間を算出して、設計津波水位・徳島県津波浸水想定と比較した。検討の結果、多くの地点でレベル1、レベル2津波の概念よりも再現期間が大きくなることが示唆された。一部の地点では、局所地形等の影響で再現期間が非常に大きくなった。また、再現期間の計算において、すべり分布の個数は各 $M_w$ の発生頻度に応じて増やす必要はなく、一律でよいと示唆された。本研究の成果を用いれば、現況堤防高がどの程度の再現期間の津波水位に対応しているかをアセスメントすることができる。

**Key Words:** design tsunami height, random phase model, return period, slip distribution

## 1. 緒論

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震津波の発生により、津波災害評価に対する関心が一層高まり、津波の確率評価がされるようになった。現在、津波災害評価手法には2つのアプローチがある。1つ目は、津波の最大シナリオに基づく決定論的アプローチであり、2つ目は、確率論的津波ハザード解析によるアプローチである。設計津波の水位の設定方法は、実績・想定津波高からL1津波群を設定して、海岸管理者が経済性や環境保全、周辺景観との調和等を総合的に考慮して決定するとされているが、防災面を重視した結果、決定論的にL1津波群の最大値が採られる傾向にある。土木学会減災アセスメント小委員会<sup>1)</sup>は、純便益指標を用いて物理的津波防御レベルの設定を行うための方法に関して議論を進めている。背後地も考慮して経済的な照査を行い、効率性基準を満たす範囲内で最も望ましい防御水準を採択する方法である。防潮堤による被害軽減額の期待値を計算するためには、津波の確率評価が必要である。確率論的アプローチを用いて、丸山ら<sup>2)</sup>は Goda et al.<sup>3)</sup>によるランダムフェーズモ

デルに地震規模も変数として捉え、地震のスケーリングを考慮し、静岡県を対象に0.2刻みで $M_w$ 7.8から9.0の範囲において、津波高の確率評価を行った。また、地震調査委員会<sup>4)</sup>は、2017年に策定した津波レシピ「波源断層を特性化した津波の予測手法」に基づいて確率論的な津波評価を行い、今後30年以内の津波高の超過確率を示した。今後の津波対策の議論は、決定論から確率論に変わっていくと期待できる。

そこで本研究では、ランダムフェーズモデルを用いて津波計算をし、徳島県沿岸を対象とした確率津波水位を推定し、徳島県が発表した設計津波の水位<sup>5)</sup>・徳島県津波浸水想定<sup>6)</sup>と比較を行う。また、すべり分布の数が津波の超過確率分布に及ぼす影響を評価する。

## 2. 徳島県の津波想定

### (1) 設計津波の水位

徳島県<sup>5)</sup>は2013年、レベル1津波(比較的発生頻度の高い津波)を想定した「設計津波の水位」を設定した。既往津波高さを用い、データが少ない場合は再現シミュレ

ーションを行い、再現シミュレーションが可能な地震津波断層モデルの中で、徳島県において津波高の高かった「宝永地震津波」, 「安政南海地震津波」を検討対象とし、水位を設定した。設計津波の水位は沿岸域を「湾の形状や山付け等の自然条件」及び「過去に発生した津波の実績津波高さ及び津波シミュレーションの津波高さ」から、同一の津波外力を設定しようと判断される一連の海岸線に分割した地域海岸ごとに算定した。本研究では、北から順に 1-A~1-Y の25地点を対象とする。

## (2) 津波浸水想定

徳島県<sup>6)</sup>は2012年、中央防災会議<sup>7)</sup>の発表を受けて、徳島県津波浸水想定を発表した。この想定は、徳島県が中央防災会議の示す11ケースのすべり分布のうち、県内に大きな影響を及ぼすケース3, 9, 10, 11 (図-1参照)を採用してシミュレーションを行い、その結果から作成した「最大クラス(レベル2津波)」の浸水想定である。本研究では北から順に 2-A~2-AI の35地点を対象とする。

## 3. ランダムフェーズモデル

ランダムフェーズ津波モデル<sup>8),9)</sup>は、ランダムにすべり分布を生成し、Okadaの式<sup>10)</sup>により初期水位分布を求め、津波伝播計算を行う一連のモデルである。

### (1) モデルパラメータ

確率すべり分布を生成する際に考慮するモデルパラメータは、大きく分けて4種類ある。

- i) 断層パラメータのスケーリング特性である断層長  $L$  (m), 断層幅  $W$  (m), および面積  $S$  (m<sup>2</sup>),
- ii) すべり統計パラメータである平均すべり量  $D_a$  (m), 最大すべり量  $D_m$  (m), Box-Cox パラメータ  $\lambda$ ,
- iii) 空間すべり分布パラメータである傾斜方向の相関長  $A_z$  (km), 走行方向の相関長  $A_x$  (km), ハースト指数  $H$ ,
- iv) 力学的パラメータである破壊伝播速度 (m/s), ライズタイム (s),

である。これらのパラメータは、不確実性を表すためにランダム変数として扱う。

### (2) スペクトル解析

確率すべり分布を生成するためには、空間相関性を考える必要がある。本研究では、波数スペクトル解析を行うことで空間的相関性を考慮する。

スペクトル解析は逆解析すべり分布毎に行う。すべり分布に対して二次元フーリエ変換を行い、傾斜・走行方向の波数パワースペクトル分布を推定する。そして、中心から放射状にパワースペクトルの平均値をとり

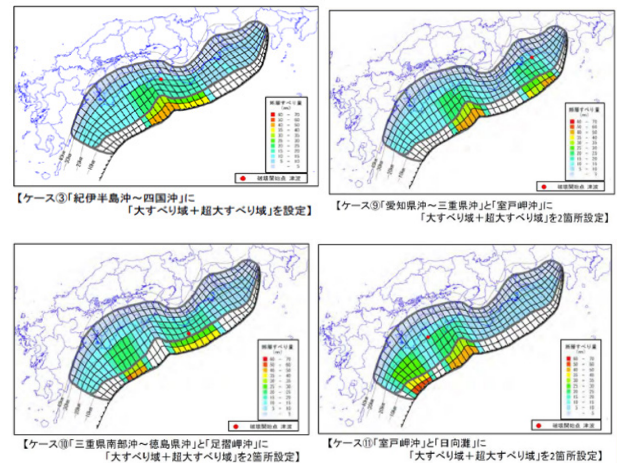


図-1 想定南海トラフ地震のすべり分布 (ケース 3, 9, 10, 11)

(circular average), それぞれに対して、横軸を波数, 縦軸をパワースペクトルとしてプロットし、このスペクトル密度の勾配の推定を線形回帰分析により行う。

以下に、線形回帰分析時の傾きとハースト指数の関係式を示す。

$$P(k) \propto \frac{A_z A_x}{(1+k^2)^{H+1}} \quad (1)$$

ここで、 $P$  は波数スペクトル,  $k$  は波数 ( $=A_z^2 k^2 + A_x^2 k_x^2$ )<sup>05</sup>,  $A_z, A_x$  は傾斜・走向方向の相関長,  $H$  はハースト指数である。circular averageの理論式への適用に関しては、 $H$ と $A$ の値を変化させながら、曲線に最も合致するような $H$ と $A$ の値の組み合わせを模索して決定する。また、circular averageの理論式に関して、様々な理論式のモデルが存在するが、描いた曲線に最も合致するとして、フォンカルマンモデルの理論式を採用した。

一方で、解析を容易にするため、逆解析されたすべり分布を変換し、正規分布に近づける。任意の分布を持つ変数を正規分布に近づける手法として、Box-Cox 変換がある。Box-Cox 変換の式を以下に示す。

$$y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} \quad (2)$$

ここで、 $x$  は変換前のすべり量,  $y$  は変換後のすべり量を表す。変換前と変換後のすべり分布を比較し、最も相関係数が1に近づくときの $\lambda$ をBox-Cox 変換のパラメータとして定める。定められた $\lambda$ を用いれば、Box-Cox 変換およびその逆変換が可能となるため、すべり分布における正規分布と非正規分布の相互変換操作を行うことができる。

### (3) すべり量の確率的合成

合成されたすべり分布が望ましいアスペリティ特性を確実に有するように、複数の候補すべり分布が生成され、パターンマッチングの基準を満たしているかどうかを評

価して、1つのすべり分布を生成する。そして、物理的基準に基づいて、非現実的に大きいすべり値を再サンプリングする。

#### (4) 動的断層破壊プロセス

断層破壊点は、Mai et al.<sup>11)</sup>により経験的に求められた確率モデルに従って決めた。震源位置の確率密度関数も、Mai et al.<sup>11)</sup>によって開発された統計モデルに基づいて定義する。震源位置の予備PDFは、断層の大きさと平均すべり率、最大すべり率に基づいて決めた。

#### (5) スケーリング則

Goda et al.<sup>8)</sup>は地震規模（マグニチュード）との関係性を調べ、線形回帰分析を行うことで、地震規模とパラメータの関係を表すスケーリング則を求めた。このスケーリング則を用いて $M_w$ に応じた相関長、ハースト指数、最大すべり量、平均すべり量を設定し、確率すべり分布を多数生成する。

#### (6) 確率すべり分布の作成

$M_w = 7.9 \sim 9.1$ の範囲で0.2刻み毎に6つの $M_w$ それぞれに対して確率すべり分布を3200, 2000, 1200, 800, 500, 300ケース生成した。このケース数は式(3)のグーテンベルグ・リヒター則（GR則）を適用し、発生頻度を求め、 $M_w 9.0$ のときを300ケースとして、発生頻度に応じて増やしたケース数である（表-1）。

$$\log_{10} y = 6.31 - 1.03M_w \quad (3)$$

ここで $y$ は $M_w$ の階級に対する発生頻度（1/年）である。本研究では、すべての $M_w$ で300個を用いる場合とGR則を適用した場合を比較する。すべり分布の断層幅、断層長を変化させ、アスペリティ領域に関しては、ケースごとにランダムに位置するように定めた。

図-2に生成した確率すべり分布の例を示す。左のカラーバーはすべり量を表しており、地図上の灰色の部分は、中央防災会議<sup>7)</sup>が公表している南海トラフ巨大地震の想定震源断層域を示している。図-2(a)と(b)より、 $M_w$ 毎にアスペリティ領域の位置、断層長、断層幅がランダムな値を取っていることが確認できる。

#### (7) 津波伝播計算

各震源の断層パラメータからOkadaの式<sup>10)</sup>を用いて初期水位分布を計算する。そして、初期水位分布を用いて、非線形分散波モデルを用いた津波計算コードJAGURS<sup>12)</sup>で津波伝播計算を行う。格子間隔810mと270mの地形データを用いて、ネスティング計算を行う。

表-1 GR則を適用した $M_w$ ごとの計算ケース数

$M_w$	発生頻度 ( $\times 10^{-3}$ )	必要サンプル数	計算ケース数
8.0	11.75	3216	3200
8.2	7.31	2002	2000
8.4	4.55	1246	1200
8.6	2.83	775	800
8.8	1.76	483	500
9.0	1.10	300	300

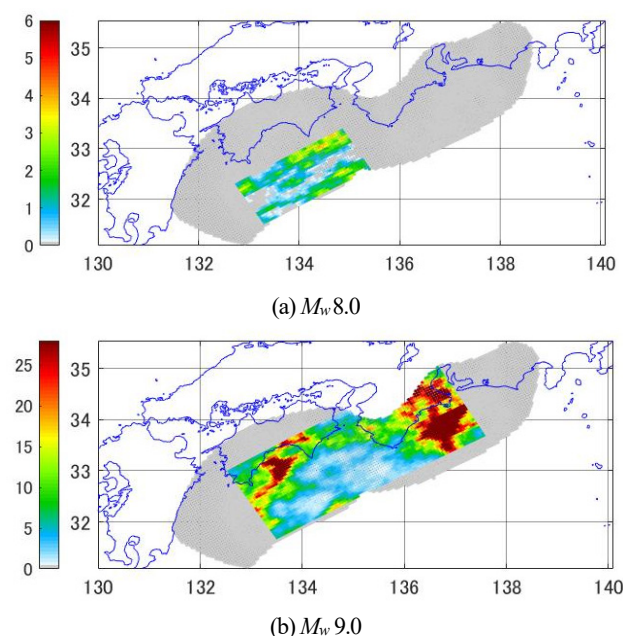


図-2 確率すべり分布の一例（カラーバーの単位：m）

## 4. 解析方法および結果

### (1) 確率密度分布

一例として、県南部の1-X地点を対象に、すべり分布を全 $M_w 300$ で固定した場合の解析結果を示す。津波水位の正規化した確率密度分布を図-3に示す。 $M_w$ が大きくなるにつれて分布が広がり、出現頻度のピークが津波水位の高い方に移動しており、大きな $M_w$ ほどより高い津波が来る確率が高くなっていることが示されている。

### (2) 津波ハザードカーブ

津波ハザードカーブの作成手順は、まず、正規化した各 $M_w$ の確率密度分布を津波水位方向で積分する。そして、各 $M_w$ の地震発生確率（表-1参照）を掛け、超過確率分布を求める。この超過確率分布を津波ハザードカーブ（図-4参照）と呼び、横軸は津波水位、縦軸は超過確率を表している。この津波ハザードカーブを用いることにより、その地点におけるある再現期間で発生する津波水位を求めることができ、沿岸の津波ハザードを確率的に解釈することに有用である。



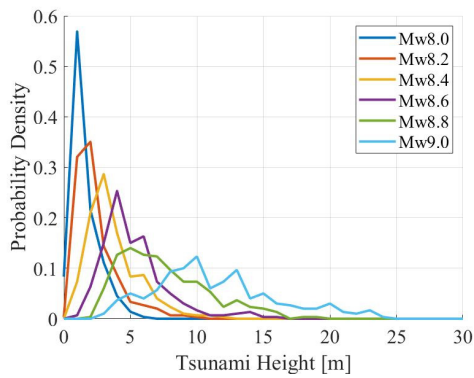


図-3 津波水位の確率密度分布 (1-X 地点)

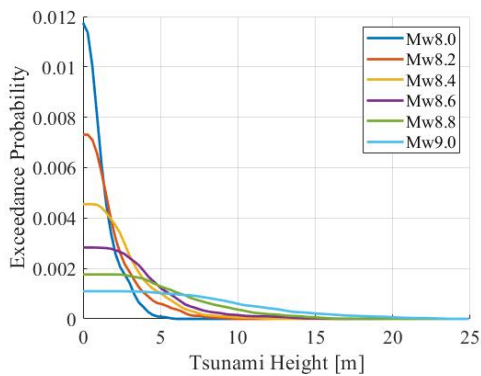


図-4 津波ハザードカーブ (1-X 地点)

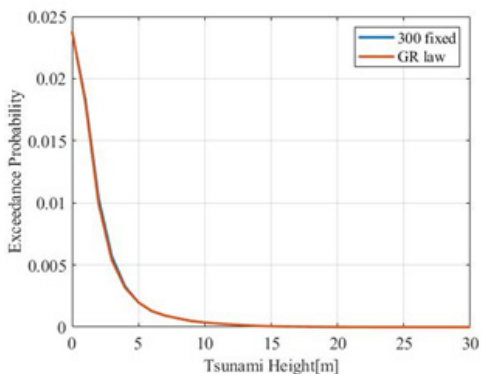
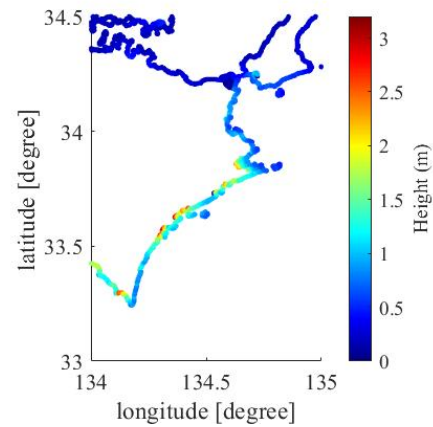


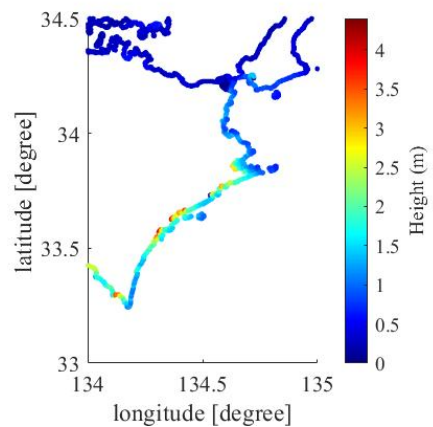
図-5 津波水位の超過確率分布 (1-X 地点)

### (3) 確率津波水位の推定

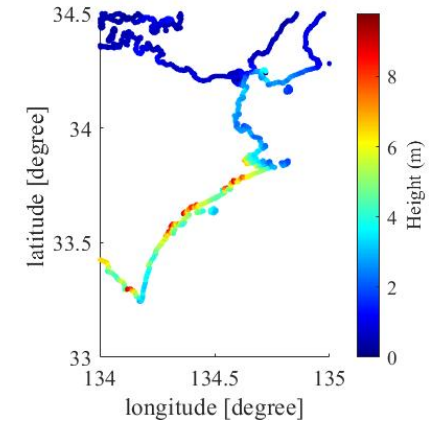
確率津波水位を推定するために、正規化した確率密度分布に地震発生確率を掛け、得られた確率密度関数を $M_w$ 方向で積分し、津波水位の発生確率を求める。その確率分布を津波水位方向に積分した値が、 $M_w$  8.0~9.0の年発生確率になるように調整する。式(3)のGR則を用いて、 $M_w$  8.0以上の地震発生確率と $M_w$  9.0以上の地震発生確率を求め、前者の値から後者の値を引けば、 $M_w$  8.0以上  $M_w$  9.0以下の地震発生確率は0.0238と計算できる。調整後の確率密度分布から求めた超過確率分布を図-5に示し、全 $M_w$ で300ケース固定とした場合の結果も示す。ケース数をGR則に基づいて増やした場合と300ケースで固定した



(a) 再現期間 100 年



(b) 再現期間 150 年



(c) 再現期間 1000 年

図-6 徳島県沿岸における確率津波水位

場合の違いはほとんどなく、県南部の 1-X 地点での100年確率津波水位は約 2 m、1000年確率津波水位は約 6 m と推定できる。

### (4) 再現期間毎の津波水位

(1)~(3)の手順で徳島県沿岸のすべての地点で解析を行い、レベル1津波を想定した再現期間100年、150年およびレベル2津波を想定した1000年の確率津波水位を求めた結果を図-6に示す。図-6より徳島県南部の海部灘地域では、津波水位が100年確率で1 m 以上を示す地域が多い。

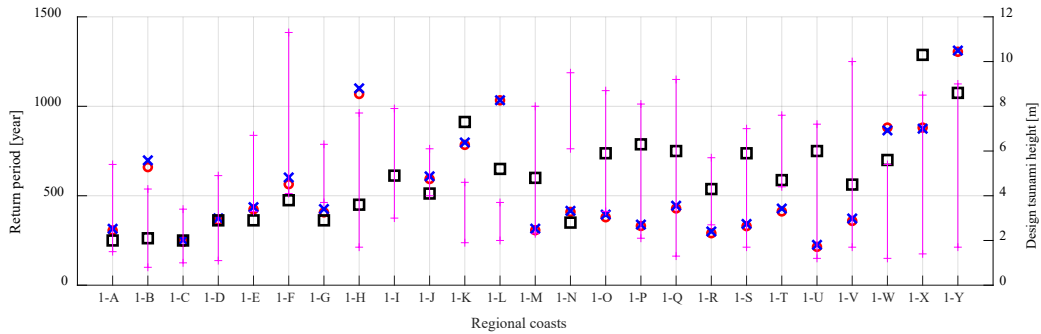


図-7 ランダムフェーズモデルによる津波の再現期間および設計津波水位と現況堤防高の関係 (赤：全  $M_w$  300 ケース，青：GR 則に基づくケース数，黒：設計津波水位，ピンク：現況堤防高の幅)

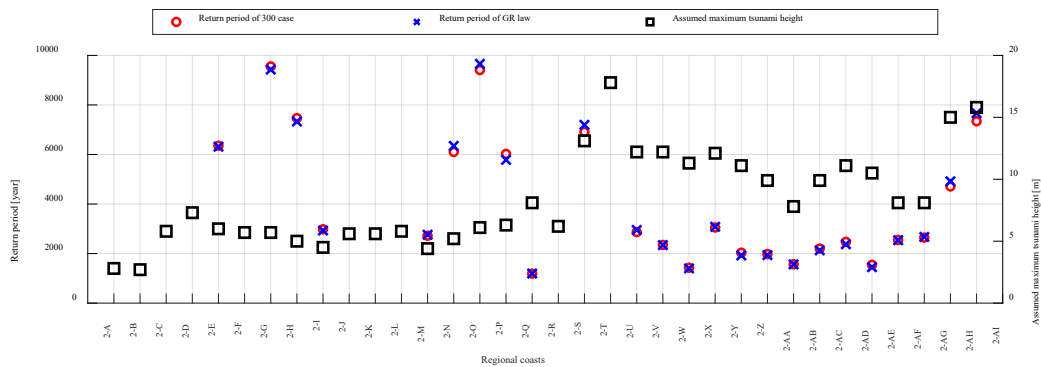


図-8 ランダムフェーズモデルによる津波の再現期間および最大クラス想定津波水位 (赤：全  $M_w$  300 ケース，青：GR 則に基づくケース数，黒：津波浸水想定高)

また、1000年確率で約 10 m の地点もあり、北部に比べて大きな値になっている。このことにより、南部では、ソフト対策がより重要になることが示唆できる。

### (5) 設計津波水位との比較

図-7に2. (1)で述べた設計津波水位が公開されている地点でのすべり分布のケース数をGR則に基づいて増やした場合と300で固定した場合の再現期間を示す。現況堤防高の幅(ピンク)も併せて示す。1-I では再現期間が約3500年となり極端に大きくなったため、図-7中には図示されていない。再現期間の推定結果は300~500年程度で、レベル1津波の定義よりやや大きくなった。県中部や南部の現況堤防高が不足している地点(中部: 1-K, 1-L; 南部: 1-W~1-Y)の再現期間はかなり長いという結果が得られ、地域海岸のレベル1津波群の最大値を採ることで、設計津波水位が高めに設定された可能性が示唆される。

### (6) 徳島県津波浸水想定との比較

図-8に2. (2)で述べた設計津波水位が公開されている地点でのすべり分布のケース数を、GR則に基づいて増やした場合と300で固定した場合の再現期間を示す。図示されていない地点については、極端に再現期間が大きくな

ったためである。再現期間の推定結果は、ほとんどの地点でレベル2津波の定義より大きくなり、また、地点によるばらつきもかなり大きくなった。特に、県北部、中部では極端に過大評価になる地点が多かった。原因として、県北部、中部では地形が複雑な地域が多く、計算格子間隔が270mと粗いためではないかと考えられる。

## 5. 結論

本研究で得られた主な結果を以下にまとめて示す。

- (1) 最大津波水位の  $M_w$  ごとの確率密度分布は、 $M_w$  が大きくなるにつれて分布が広がり、出現頻度のピークが津波水位の高い方に移動しており、大きな  $M_w$  ほどより高い津波が来る確率が高くなっていることが示された。
- (2)  $M_w$  8.0~9.0 の範囲の地震を考慮した最大津波高の確率密度分布から、100年・150年・1000年確率の各確率津波波高を推定した。徳島県南部の海部灘地域で、100年確率津波波高と1000年確率津波波高の変化は特に大きいことから、ソフト対策がより重要であることが示された。
- (3) 設計津波の水位を評価したとき、現況堤防が足りて

いない一部の地点では再現期間が大きな結果が得られた。これらの地域では、地域海岸のレベル1津波群の最大値を採ることで、設計津波水位が高めに設定された可能性が示唆される。その他の多くの地点では、再現期間がレベル1津波の定義より少し大きい300~500年程度という結果となった。

- (4) 徳島県津波浸水想定を評価したとき、再現期間がレベル2津波の定義より過大評価となり、ばらつきも大きくなった。地点によっては、再現期間が数万年と不確実性がみられた。
- (5) 再現期間の計算において、すべり分布数をGR則に基づく数とした場合と、全 $M_w$ 300で固定した場合とでは、再現期間はほとんど変わらない結果が得られ、著者ら<sup>2)</sup>の先行研究と同程度のすべり分布の数で十分だということがわかった。

以上から、ランダムフェーズモデルを用いて徳島県沿岸の津波水位を求め、設計津波の水位と徳島県津波浸水想定を再現期間を推定することができた。本研究の成果を用いれば、現況堤防高がどの程度の再現期間の津波水位に対応しているかをアセスメントすることができる。また、本研究の成果から、費用便益分析によってハード対策（施設整備など）やソフト対策（避難計画など）を行うことで、まちづくりと一体となった防災対策を行うことが期待できる。

**謝辞：**本研究は、科研費基盤研究（A）17H01293および京都大学防災研究所一般共同研究2020G-01の助成を受けて実施したことをここに記す。ウェスタン大学の合田且一郎先生と京都大学防災研究所の宮下卓也先生には、ランダムフェーズモデルのプログラムコード作成においてご助言いただいた。

## 参考文献

- 1) 土木学会減災アセスメント小委員会：減災アセスメント小委員会中間報告書，173p.，2018.
- 2) 丸山拓真，安田誠宏，Katsuichiro GODA，森 信人，間瀬 肇：地震のスケーリング則を考慮した津波高の確率評価に関する研究—南海トラフ地震を対象とした静岡県沿岸のケーススタディー，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.73，No.2，pp.I\_421-I\_426，2017.
- 3) Goda, K., Mai, P.M., Yasuda, T., Mori, N.: Sensitivity of tsunami wave profiles and inundation simulations to earthquake slip and fault geometry for the 2011 Tohoku earthquake. *Earth, Planets and Space*, 66:105, 20p, 2014.
- 4) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：南海トラフ沿いで発生する大地震確率論的津波評価，78p，2020.
- 5) 徳島県：設計津波の水位，14p，2013.
- 6) 徳島県：徳島県津波浸水想定公表について，<https://anshin.pref.tokushima.jp/docs/2012121000010/>，2012.
- 7) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），2012.
- 8) Goda, K., Yasuda, T., Mori, N., Maruyama, T.: New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulations, *Coastal Engineering Journal*, Vol.58, No.3, pp.1650010-1-40, 2016.
- 9) 宮下卓也，森 信人，Katsuichiro GODA：Random PhaseとLogic Treeを用いた確率論的な津波波高評価の比較，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.74，No.2，pp.I\_427-I\_432，2018.
- 10) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seimol. Soc. Am.*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 11) Mai, P.M., Spudich, P., Boatwright, J.: Hypocenter locations in finite-source rupture models, *Bull. Seimol. Soc. Am.*, Vol.95, No.3, pp.965-980, 2005.
- 12) Baba T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, T. Kato: Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.172, pp.3455-3472, 2015.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

## PROBABILITY EVALUATION OF TSUNAMI HEIGHT ALONG THE COAST OF TOKUSHIMA PREFECTURE USING RANDOM PHASE MODEL

Tomohiro YASUDA, Haruki TANAKA, Kohei SHIGETA,  
Junichi TANIGUCHI and Toshikazu KITANO

Since Tohoku Earthquake Tsunami, interest in tsunami disasters has increased, and probability evaluation of tsunami is being required. This study calculated tsunami height using a random phase model to estimate the probability of tsunami height along the coast of Tokushima Prefecture. The effect of the number of slip distributions on an exceedance probability distribution of tsunamis were also evaluated. We compared a return period with the design tsunami water level (Level 1) and the assumed maximum tsunami height (Level 2). The result indicated that the return period was larger than the concept of Level 1 and Level 2 tsunami at many regions. At some points, the return period became very long due to the influence of local topography. The results also showed that the GR law does not affect the number of slip distributions in the calculation of a return period. Using the results of this research, it is possible to assess how much the existing levee height corresponds to the tsunami height for the return period.