

## 津波浸水リスクのホットスポット解析

Analysis of hotspot of tsunami inundation risk

徳島大学大学院社会産業理工学研究部 教授 馬場俊孝

### （研究計画ないし研究手法の概略）

西日本ではマグニチュード8から9の南海トラフ巨大地震の発生が予測され、国や自治体は様々な対策を進めている。津波対策の第一歩であるハザードマップは、最大規模の地震を想定し、その津波を数値計算により求め、津波の高さや到達時間を津波避難施設とともに示すものである。これは一般向けにはよいが、地震の発生様式は複雑かつ多様であるため、最大のみを想定したハザードマップは津波災害の可能性を十分示しているとは言えない。特に国や自治体では、発生した地震や津波のパターンによって多種多様な対応が求められる。この意味において、ただか数ケースの想定では、発災時に想定外による思考停止に陥る恐れがある。そこで本研究では、過去の地震の発生様式を考慮して作成された3480ケースの南海トラフ巨大地震のすべてに対して、ハザードマップと同等の詳細な津波浸水計算を実施する。そこで得られる情報から最大浸水高、浸水範囲という津波特性を確率で評価する。本研究の独創的な点は、多様な南海トラフ地震による津波データベース（特に浸水）を作成する点と、これを用いて津波浸水リスクの高いホットスポット域を示し、津波被害軽減に貢献することである。

### （実験調査によって得られた新しい知見）

#### （1）津波浸水データベース

本研究では南海トラフ地震で津波が襲来する恐れのある徳島県沿岸域を研究対象地域とした。津波浸水データベースは、南海トラフ地震の断層モデル群の定義、津波伝播および浸水計算の2つの項目からなる。南海トラフ地震の断層モデル群の定義においては、防災科学技術研究所が作成した断層すべりの不均一性を考慮したMw7.6~9.1の3480ケースの断層モデル群<sup>1)</sup>をそのまま使用した。まず、各ケースの断層パラメタから半無限均質弾性体の解析解<sup>2)</sup>を用いて海底地殻変動を計算し、海底斜面の水平変位による隆起沈降<sup>3)</sup>も考慮して鉛直変位を求めた。この海底鉛直変位に線形ポテンシャル理論に基づく水理フィルタ<sup>4)</sup>を施して海面変位を求め、津波の初期水位とした。津波伝播および、浸水計算の基礎方程式には平面2次元の非線形長波式<sup>5)</sup>を使用し、スタックカード格子・リープフロッグ法の有限差分法で解いた。津波計算における潮位条件はT.P. ±0mとした。津波計算の負荷軽減のため、対象地域である徳島県の沿岸域に向かって計算領域を5層にネスティングを行い、最小格子は10mとした。線境界として導入されている防潮堤など構造物については、考慮する場合と考慮しない場合の両方について計算を実施し、確率的な評価における構造物の効果を検証した。構造物を考慮する場合は、越流した時に完全破壊するとして扱った。最終的に計6960ケースの津波計算を実施した。なお、地形および構造物データは徳島県より県の津波浸水想定で利用したものを提供いただいた。津波計算には海洋研究開発機構のスーパーコンピュータ（地球シミュレータ）を利用させていただいき、津波計算コードはオープンソースのJAGURS<sup>6)</sup>を利用した。

## (2) 本研究の確率論的津波浸水評価の手法

津波浸水リスクの高いホットスポット域を明らかにするために、本研究では確率論的な評価を行う。津波浸水データベースの全ケースの浸水データに対して、陸上の浸水深が0.3mを超えるかどうかを判定し、0.3mを超えていればその場所に1を、超えていなければ0を与える。本研究では、この1,0データを浸水判定データと呼ぶ。浸水判定データを全3480ケース分加算すれば、全ケースのうち、ある陸上地点において浸水深0.3mを超える回数がわかる。ここで、地震の発生はマグニチュードに依存しており、小さいマグニチュードの地震ほど多く発生し、大きいマグニチュードの地震ほど発生回数は少ない。これをゲーデンベルグ・リヒター則（G-R則）という。3480シナリオはG-R則を満たしてはいないので、G-R則を考慮して総和が1になるように各シナリオに相対的な重みを配分した。全シナリオで0.3m以上浸水する地点は1に、1回も浸水が起こらなければ0になる。重ね合わせ（浸水確率の算出）は次の式を利用した。

$$P(x,y) = \sum_{i=1}^{3480} W_i I_i(x,y)$$

$P(x,y)$ は浸水確率、 $W_i$ は*i*番目のシナリオの重み、 $I_i(x,y)$ は*i*番目のシナリオの浸水判定データである。ここでわかるように、本研究では各シナリオを排反事象として扱っている。このため、本研究で示される確率は、地震や津波ハザードの確率論的評価で良く用いられるある一定期間内の事象の発生確率というものではない。言い換えれば、 $P(x,y)$ は次に南海トラフ域でMw7.6以上のプレート境界型地震が発生した時という条件で0.3m以上浸水する確率である。また、地震の発生はG-R則のみに従い、過去の地震発生履歴は無視している。津波計算によって得られる浸水深の予測誤差も確率評価に入っていない。これらの点の改善については今後の課題であるが、本研究の目的である津波浸水リスクの相対的に高いホットスポット域の可視化においては、本研究の方法で議論できる。

## (3) 確率論的津波浸水評価の結果

本研究で得られた徳島県北部の津波浸水確率分布を図-1に、徳島県中部の津波浸水確率分布を図-2に示す。また、それぞれ(a)に防潮堤などの構造物を考慮した津波浸水確率分布図、(b)に構造物を考慮しない確率分布図を示す。徳島県北部の構造物あり（図-1a）では、海岸沿いを除いて、津波浸水確率は最大で4~8%の区分にある。河川を遡った場所で浸水確率1~2%の領域がスポット的に確認できる（図-1aの赤丸アとイ）。構造物を考慮しない場合（図-1b）では、考慮する場合と比べて全体的に確率が、カラースケールの区分で2段階程度、高くなっている。河川沿いに高い浸水確率域が分布し（図-1bの矢印）、一部は8~16%の区分に位置する。

徳島県中部（図-2）では、黒四角で囲んだリアス式海岸域での高確率が顕著である。構造物を考慮する場合（図-2a）では確率の最大値は4~8%の区分にあり、考慮しない場合では（図-2b）では確率の最大値は32~64%の区分にある。北部（図1）の場合と同様に構造物を考慮する、しないの浸水確率に与える影響は大きく、津波浸水の構造物による大きな軽減効果が確認できる。

(4) 議論：本研究で得られた新たな知見

本研究では、南海トラフで発生する可能性があるプレート境界型地震の 3480 ケースを用いて津波浸水確率評価を行っているが、津波を励起する地震はプレート境界型地震に限らない。2004 年紀伊南東沖地震のようなプレート内地震でも津波は発生するし、1960 年チリ地震津波のように遠く離れた海域から到来するものもある。さらには、2019 年インドネシアで発生したパル地震やクラカタウ島の崩壊による津波など、海底地すべりや山体崩壊による津波もある。また、方法で述べたように本研究では津波計算の誤差を無視しているし、津波による浸水は潮位の条件によっても異なるが、これも考慮に入れていない。このため、本研究で求めた確率値の絶対値は、今後研究の進展によって変化するものである。しかし、3480 ケースの津波を同じ手法により計算しており、南海トラフ域で発生する Mw7.6 以上のプレート境界型地震に限って言えば、地域間や構造物の有無による確率の値の相対的な違いは議論できる。

図-1 および図-2 において、特に顕著であるのは、防潮堤などの構造物による津波浸水確率の減少である。構造物により浸水確率が 10%以上も低下する場所もある。海岸構造物の効果はある程度予想されたものだが、確率という形で評価できる意義は大きい。

図-1a より図-2a を比べると、同じ構造物を考慮した場合でも津波浸水確率が異なっていることが分かる。図-1a より図-2a の方が総じて浸水確率が大きい。震源域である南海トラ

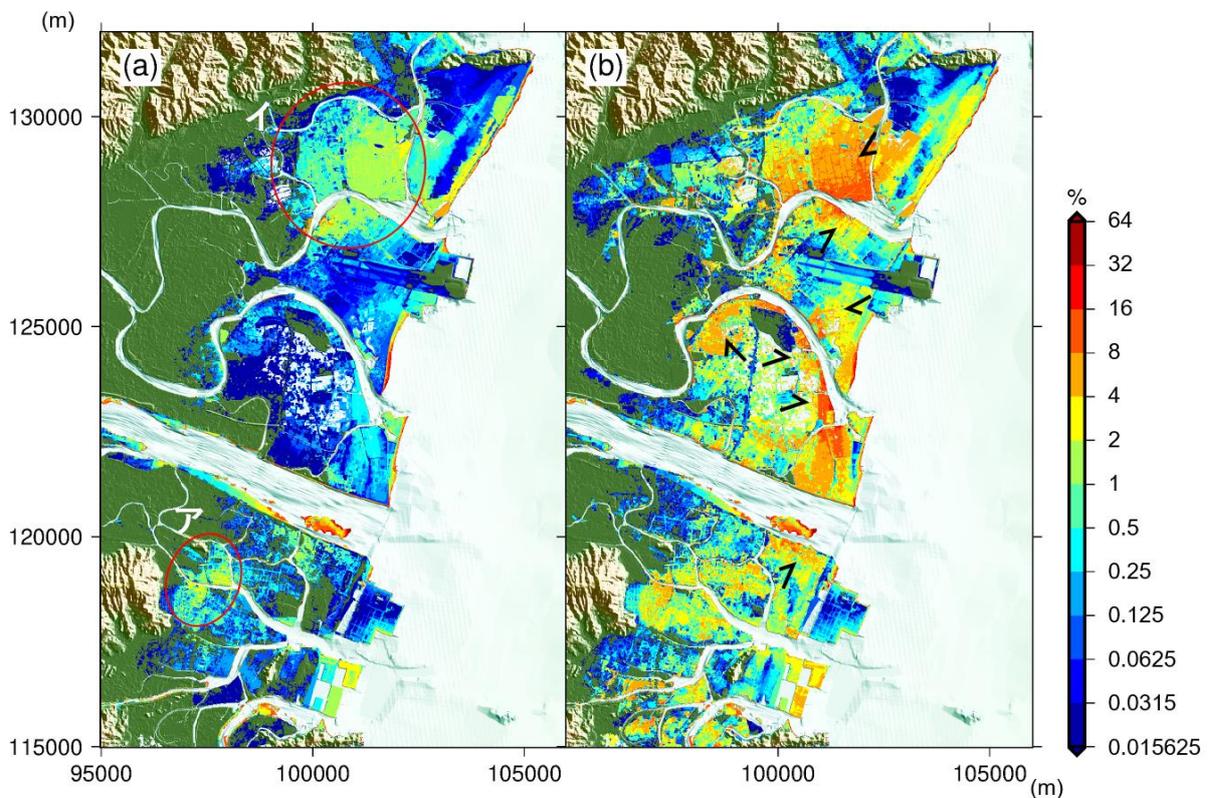


図-1 本研究で得られた徳島県北部の津波浸水確率。(a)防潮堤などの構造物を考慮した場合。ア、イで示した場所では周囲より確率が高い。(b)構造物を考慮しない場合。河川沿いに高確率が分布している(矢印)。位置座標は平面直角座標4系。

フからの距離や地形による増幅効果もあるが、図-2a は相対的に津波防御策が不足していると解釈することもできる。東日本大震災以降、L1 津波に対しては防潮堤などの構造物で対応する方針がとられている。この場合、L1 津波シナリオを仮定し、ある地域に襲来する津波高を算出するが、考えられる L1 津波シナリオは多数存在するため、本研究で示したような確率的な評価が構造物整備の上で有効であると思われる。

図-1a のアとイの領域は、構造物を考慮している条件で、周辺よりも津波浸水が発生するリスクが高い、津波浸水リスクのホットスポット域と言える。この地域では河川を遡上する津波が、河川の屈曲による増幅や堤防の条件により河川からあふれ、浸水が発生しているとみられる。図-3a に示した通常の津波浸水想定では、図-1a のアとイの領域が相対的に浸水しやすいことは読み取れない。特にアの領域は海岸からの距離もあり、津波浸水リスクが相対的に高いことを地域住民は理解していないと思われ、本研究の結果は重要な示唆を与えている。

津波は V 字型湾のリアス式海岸で増幅し高くなるため注意が必要である、と一般に言われる。また、津波は河川を通じて遡上するため、津波避難の際には河川からなるだけ離れなければならない。これらは津波の物理に基づくものである。V 字型湾による増幅については、従来の津波ハザードマップからその危険性が読み取れるが（図-3b の黒四角）、河川周辺の津波の危険性については従来の津波ハザードマップからあまり読み取れない。一方、津波確率評価においては、図-1b の矢印で示したように、河川に沿って津波の危険性が高

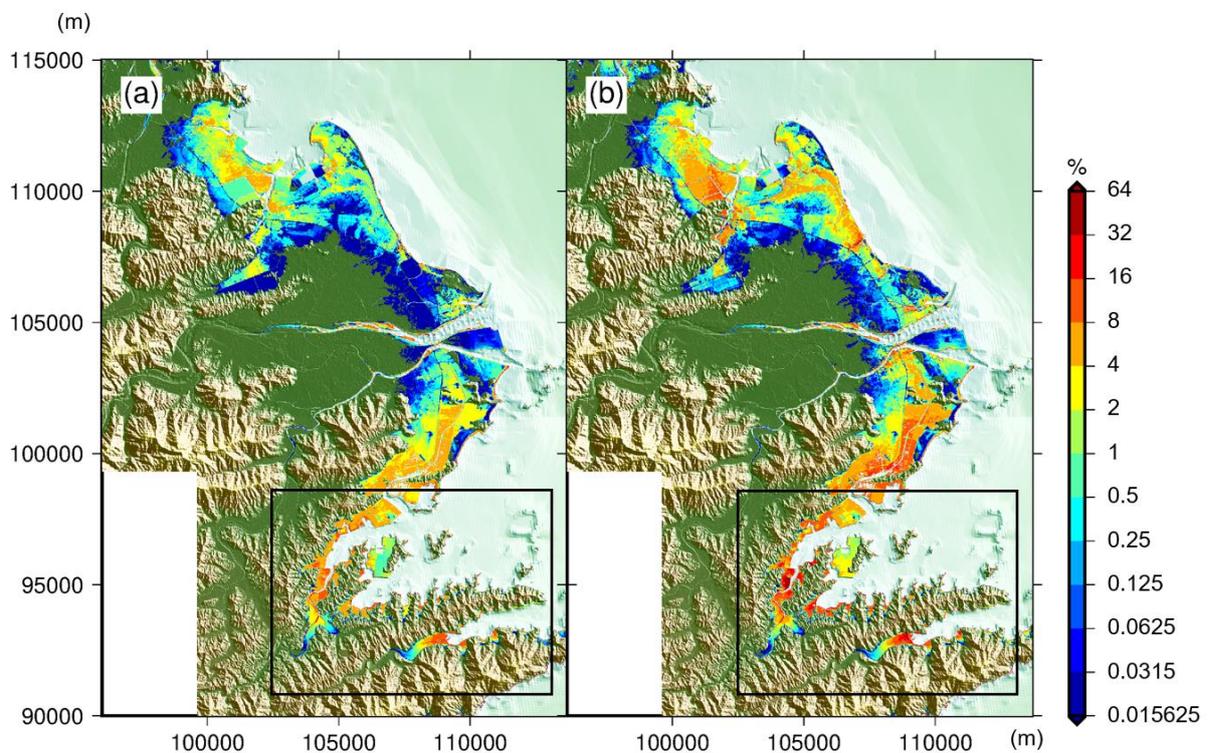


図-2 本研究で得られた徳島県中部の津波浸水確率。(a) 防潮堤などの構造物を考慮した場合、(b) 構造物を考慮しない場合。黒四角の領域では、リアス式地形による津波の増幅で相対的に高い確率となっている。

いことが表現されている。

#### (5) まとめと今後の課題

本研究では、徳島県を対象として 3480 ケースの南海トラフ地震シナリオの津波シミュレーションを実施し、データベースを構築した。また、防潮堤などの構造物を考慮する場合と、しない場合の 2 通り計算したので、合計で 6960 回の津波計算を行った。計算量が膨大であったので、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用させていただいた。構築した津波データベースと、南海トラフでの G-R 則を利用して、津波浸水確率を算出した。ここで言う津波浸水確率は、具体的には次に南海トラフ域で Mw7.6 以上のプレート境界型地震が発生した時という条件で 0.3m 以上浸水する確率に相当する。得られた確率分布図は、構造物による津波軽減効果や地域間における津波浸水リスクの差異を定量的に示した。また、本研究の津波浸水確率分布図は、従来の津波ハザードマップでは表現しきれていなかった津波浸水リスクの高いホットスポット域や、河川近傍の危険性をうまく表現している。一部のホットスポット域は、河川を遡った津波が河川の屈曲や堤防高が相対的に低いなどの理由で溢れているためと考えられる。このように、津波浸水の確率論的な表現は、従来の津波ハザードマップでは認識できなかった津波の危険性を理解するのに役立つ。

今後の課題は、津波計算の誤差や潮位条件を確率に取り込むことである。水域では計算誤差を確率評価に入れることができるが、遡上先端において計算誤差や潮位条件をどのように考慮するかについては検討の余地がある。同様に構造物ありでは、越流後破堤としていいるが、ここにも計算誤差(ばらつき)をどのように考慮するか解決しなければならない。

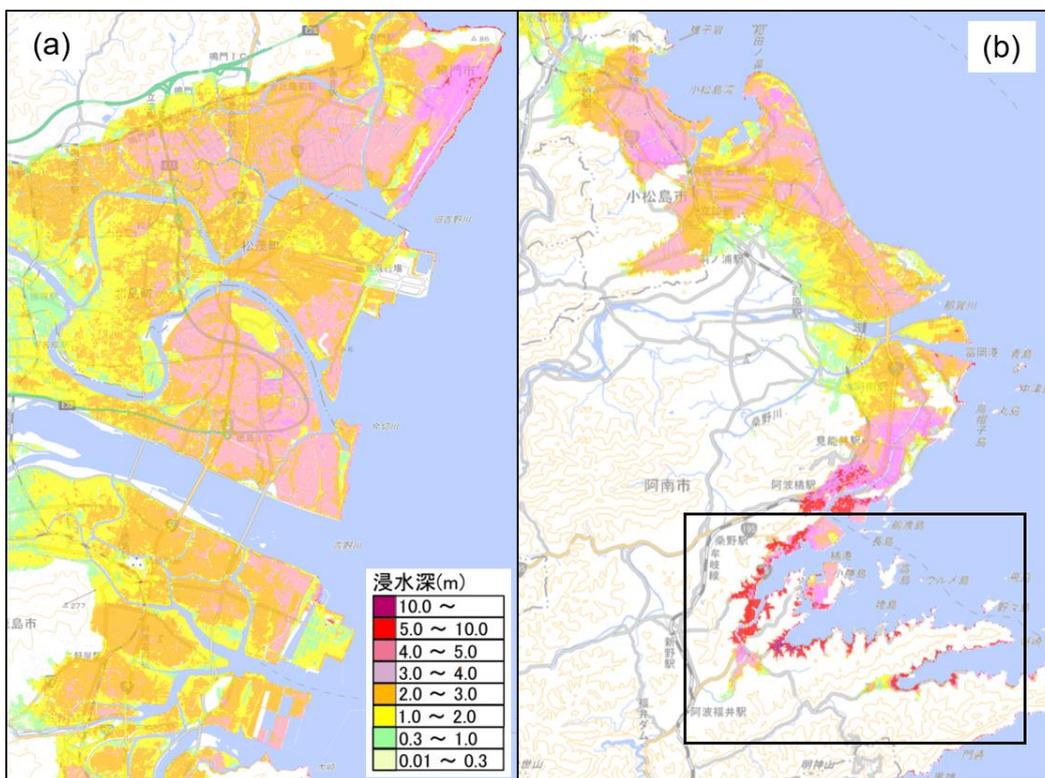


図-3 徳島県による最大クラスの南海トラフ地震による津波浸水想定。(a)徳島県北部、(b)徳島県中部。黒四角はリアス式海岸地域。(図は徳島県 HP より引用)

津波浸水確率分布図の具体的な活用については、次のようなアイデアがある。(1)防潮堤などの構造物を考慮した場合でも津波水確率が高い地域に重点的に構造物の設置を進める。また、新たな構造物込みの津波浸水確率分布図を作成することにより、構造物設置による被害軽減効果を定量的に示すことができる。(2)各住戸から避難所までの経路を探索し、道路ごとに利用頻度(使う人数など)を求め、それと津波浸水確率を重ね合わせる。頻度が高く、浸水確率も高い街路を見つけ、重点的に整備する。(3)居住地選択確率と浸水確率を重ね合わせることで、より重点的に建築規制を行う地域を絞り込める。(4)徳島のような人口減少地域で将来を見越して都市のコンパクト化を図る場合、津波危険性を考慮して、居住地を集約する場所、市街地以外の土地利用に転換する場所を抽出できる。一般に、居住地を集約する場所は、災害リスク(洪水、津波など)がない場所を選ぶという方針だが、L2津波の予測は浸水域があまりに広く、検討が難しいことが指摘されている。

#### ( 参 考 文 献 )

- 1) 防災科学技術研究所：南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価，防災科学技術研究所研究資料第439号(2020)。
- 2) Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half - space. *Bull. Seism. Soc. Am.* **75**, 1435-1154 (1985).
- 3) Tanioka, Y., & Satake, K. Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 861-864 (1996b).
- 4) Kajiura, K. The leading wave of a tsunami, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **41**, 535-571 (1963).
- 5) Satake, K., Linear and nonlinear computations of the 1992 Nicaragua earthquake tsunami. *Pure Appl. Geophys.* **144**, 455-470 (1995).
- 6) Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Ando, K., Matsuoka, D. & Kato, T. Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami. *Pure and Applied Geophysics* **172**, 3455-3472, <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1049-2> (2015).

#### ( 発 表 論 文 )

- 1) 武田達，馬場俊孝，大角恒雄，藤原広行，津波浸水確率における海岸構造物有り無しの影響，HDS08-P15, JpGU 2020: Virtual (2020)。
- 2) 武田達，馬場俊孝，大角恒雄，藤原広行，津波データベースと G-R 則に基づく津波浸水リスクの確率評価と海岸構造物による影響，令和2年度自然災害フォーラム(2020)。