

津波ハザード評価の不確定性について

関東学院大学工学部准教授 福 谷 陽

キーワード：沿岸災害、2011年東北津波、確率論的津波ハザード評価、不確定性、モード分解法

要約：

本稿では初めに、2011年東北津波直後に政府や学会から提示された津波対策の基本方針を解説し、次に、各種津波対策を実現するための第一歩となる、津波強度（ハザード）を工学的に評価する津波ハザード評価手法を解説し、また、これら評価の不確定性を陽に取り扱う確率論的津波ハザード評価手法（PTHA: Probabilistic Tsunami Hazard Analysis）の概要を述べ、最後に、PTHAの最新の研究成果について紹介する。確率論的ハザード評価は、津波の現象に限らず、災害を引き起こす様々な自然現象を想定する際の不確定性を明示する有効な手法であり、今後の災害対策を推進するうえで、重要な概念である。

1. 序論

わが国の沿岸部では、古来より津波や高潮等により甚大な被害を受けてきた。近年では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波（以下、2011年東北津波）による東北地方沿岸部での甚大な被害、2018年台風21号による大阪湾での被害等は記憶に新しい。2011年東北津波では、東北地方太平洋沿岸地域の多くの都市で、当時公表されていた津波ハザードマップの浸水域を大きく超える領域が浸水し、未曾有の大被害をもたらした（図1参照）。また、2018年の台風21号では、大阪港で既往最大を超える高潮が発生し、関西国際空港が高潮、高波により浸水するという甚大な被害が発生した。

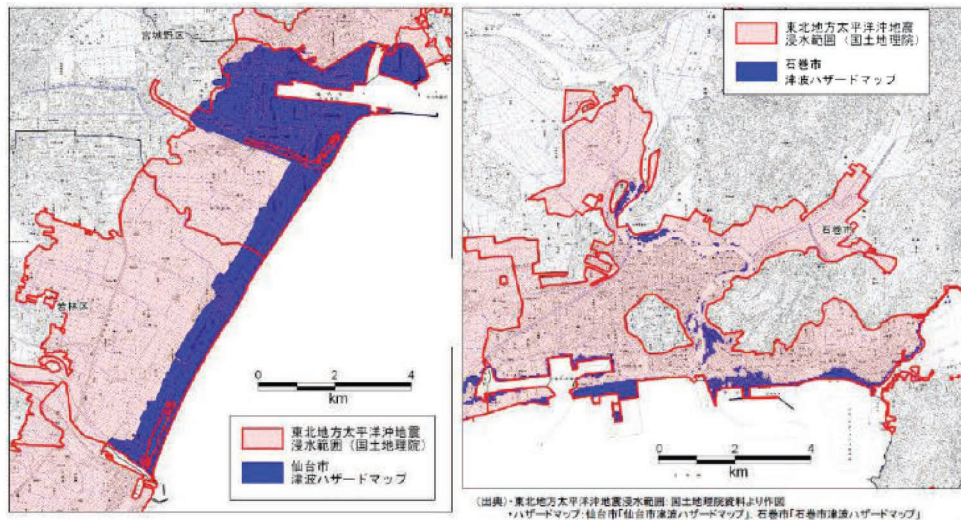


図1 2011年東北津波の浸水領域と当時公表されていた津波ハザードマップとの比較⁽¹⁾

今後、発生が想定されている南海トラフ巨大地震⁽²⁾および首都直下巨大地震⁽³⁾や、昨今の気候変動に伴う台風強度の変化による高潮・高波への影響を考慮すると、海岸保全施設の整備等のハード対策や、事前避難計画、復旧・復興計画策定等のソフト対策を推進し、発生し得る被害を最小限に留めるよう備えることが喫緊の課題となっていることは論を俟たない。そのためにはまず、沿岸部や陸域での波高や浸水深、流速等の津波や高潮の強度（ハザード）を、理学的、工学的知見に基づき事前に想定しておく必要がある。このような自然現象であるハザードを想定する際に重要となるのが、想定には不確実性が伴うことを理解し、不確実性を陽に扱って評価することである。これは、津波や高潮などの沿岸災害をもたらす自然現象の想定に限ったことではない。

本稿では初めに、2011年東北津波以降に政府や学会で示された津波対策の基本方針を解説し、その次に、各種津波対策を実現するための第一歩となる、津波強度（ハザード）を評価するための津波ハザード評価手法の基本的な説明、また、これら評価の不確実性を工学的に取り扱う確率論的津波ハザード評価（PTHA: Probabilistic Tsunami Hazard Analysis）の概要を述べると共に、最後に近年の研究成果であるPTHAの新技术を紹介する。なお本稿は、筆者が「土木学会第56回水工学に関する夏季研修会講義」にて作成した講義資料「確率論的津波ハザード評価とその利活用」⁽⁴⁾の内容を一部に含んでいることを断っておく。

2. 2011年東北津波以降の津波対策の方針

2011年東北津波の後、内閣府中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」⁽¹⁾では、土木学会の提言を引用する形で、今後の津波対策を構築するにあたっては、基本的に二つのレベルの津波を想定する必要があるとした。一つは、防波堤や海岸堤防等の構造物によって、津波の内陸への浸入を防ぐ海岸保全施設等

の建設を行う上で想定する津波、もう一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で設定する津波、である。前者は、レベル1 (L1) 津波と呼び、発生頻度が比較的高く、津波高は比較的低いものの大きな被害をもたらす津波 (およそ数十年から数百年に一度程度の発生確率) であり、後者は、レベル2 (L2) 津波と呼び、発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波 (およそ1000年に一度程度の発生確率) である (図2 参照)。

	対象津波	要求性能
レベル1 津波	近代で最大 (100年で1回程 度の発生確率)	防災 ・人命を守る. ・財産を守る/経済活動を守る
レベル2 津波	最大級 (1000年に1回程 度の発生確率)	減災 ・人命を守る. ・経済的損失を軽減する. ・大きな二次災害を引き起こさない. ・早期復旧を可能にする.

図2 レベル1 (L1) とレベル2 (L2) の津波と要求性能⁽⁵⁾

L1津波は、各海岸地域での防潮堤などの構造物の高さを決定する際に用いられるため、ハード対策を推進する上で重要な指標である。海岸関係4省庁 (国土交通省水管理・国土保全局、同省港湾局、農林水産省水産庁、同省農村振興局) は、課長通知「設計津波の水位の設定方法等について」⁽⁶⁾ を公表し、L1津波の具体的な設定手順を示した。手順のなかでは、過去に発生した津波の痕跡高や、津波数値計算による計算結果を時系列に並べ、ある一定の頻度 (数十年から百数十年に一度程度) で発生すると想定される津波の集合を選定し、その対象津波群の中から、海岸管理者間で十分調整を図ったうえで、設計津波の水位を海岸管理者が適切に設定すべき、としている。しかしながら、この設定手順では、津波の発生頻度の評価方法が至極曖昧であり客観性に乏しいうえ、発生確率の定義である数十年から百数十年という期間にも幅があり、L1津波を適切に設定することは極めて難しいものと言える。

一方、L2津波は、1000年に一度程度の発生確率となる最大クラスの津波であり、各地域での津波ハザードマップを作成する基となる重要な指標である。基本的には、各地域周辺で発生が想定される最大の地震を想定しているが、これまで、国は、2012年に南海トラフ巨大地震 (モーメントマグニチュード Mw9.1)⁽²⁾、2013年に相模トラフ沿いの海溝型地震 (Mw8.7)⁽³⁾、2016年に日本海における最大クラスの津波断層 (最大 Mw7.9)⁽⁷⁾、2020年に日本海溝沿いの巨大地震 (Mw9.1)・千島海溝沿いの巨大地震 (Mw9.3)⁽⁸⁾、などを公表してきた。これらは、各調査検討会において、最新の科学的知見に基づき想定地震の領域や規模を慎重に評価した結果であり、各自治体での津波浸水想定区域図を作成する際に

使われる津波断層モデルとなる。ただし、多くの津波浸水想定区域図や津波ハザードマップの留意事項等に記載されるように、最大クラスの地震を基にした津波想定は、あくまで決定論的評価であり、局所的に考えれば、浸水想定区域以外での浸水や、一部では浸水深が大きくなることも十分考え得る。

上記のようなL1津波、L2津波の高さを決定するためには、理学的、工学的に津波の高さを評価する津波ハザード評価が重要となってくる。次章では、津波ハザードの工学的評価手法の概要について述べる。

3. 津波ハザードの工学的評価手法

津波のハザード評価は、決定論的評価と確率論的評価の大きく二つに分類できる。

決定論的評価では、対象地域に一定の影響があると考えられる津波の波源（地震断層）を一つ設定し、それにより対象地域沿岸、または、陸域の対象地点において発生する津波の波高や浸水深、流速等のハザードを数値計算により評価する。図3に津波ハザード評価の基本的な流れを示す。地震に起因する陸上での津波ハザード（例えば、浸水深、流速、フルード数、流体力等）を評価するためには、ある一つの津波の波源（地震）を想定し、その地震が発生した時の地盤変動量を解析、それに伴う海面の変動量（津波初期水位）を解析、そして、その津波の初期水位を入力値として、主に非線形長波理論を用いて、津波伝播、津波遡上を評価することが基本となる。現状、L1津波やL2津波は、想定する津波の波源（地震）は異なるものの、津波発生、津波伝播津波遡上の各段階は、数値計算上、このような手法により算出されている。なお、津波は海底地滑りや噴火に伴う山体崩壊、隕石衝突等によっても発生し得るが、本稿では、地震起因による津波の評価にのみ焦点を

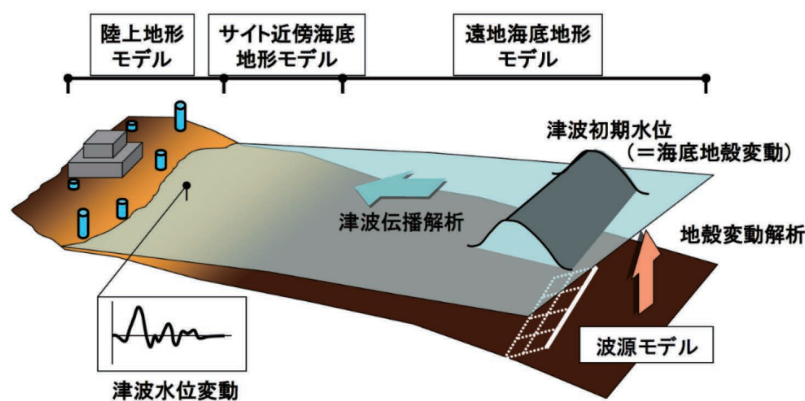


図3 津波伝播・遡上解析の概念図⁽⁹⁾

当てる。近年では、津波に伴う土砂移動に起因する津波波高や流速の変化等が示唆されているが、このような現象も本稿の対象外とすることを補記しておく。

一方で、これら津波発生、伝播、遡上の一連の現象の解析には大きな不確定性を伴うた

め、確率論的評価が有効となる。例えば、津波発生過程では、地震の発生確率、地震断層の位置や形状（長さ、幅、深さ、すべり量、すべり角、走行、傾斜角）、断層破壊の開始点・伝播速度・ライズタイム、初期水位の計算手法、津波伝播過程では、基礎方程式や計算スキーム、潮位、海底地形、津波遡上の過程では、陸上地形、人工構造物（建築物・防潮堤・防波堤）、粗度等の全ての設定が、最終的な津波浸水深や流速といった津波ハザードに影響を及ぼす。確率論的津波ハザード評価（PTHA）は、対象地域に一定の影響があると考えられる津波波源を多数設定し、津波の発生・伝播・遡上の各段階で考え得る上記の多種多様な不確定性を考慮し、対象地域での、ある特定期間における津波ハザードの規模とその発生確率の関係を評価する。図4に結果の一例を示した。横軸は津波ハザードの規模、ここでは、津波波高を示す。縦軸は年超過確率であり、この逆数は、再現期間、すなわち、その現象が何年に1度程度の頻度で再来するかを示す。この曲線をハザードカーブと呼んで

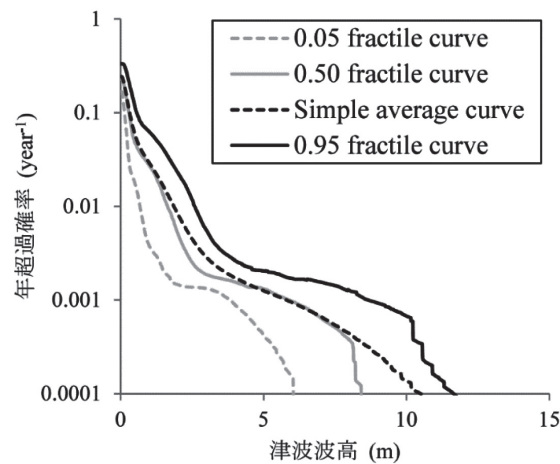


図4 津波波高と年超過確率の関係を示す津波ハザードカーブの例⁽¹⁰⁾

いる。この関係を用いれば、各再現期間に対する津波ハザードの規模を客観的に算出することが可能となる。本来であれば、L1津波やL2津波は、発生確率の概念を含んでいることから、津波の発生確率とその規模を、不確定性を考慮して客観的に評価可能なPTHAの手法により厳密に評価すべきと考えられる。

学問的には、PTHAは、2000年以降、とりわけ、2004年スマトラ島沖地震津波、2011年東北津波による被災経験を経て、急速に発展してきた。国内では、土木学会原子力土木委員会津波評価部会（2011）⁽¹¹⁾が、原子力発電サイトを対象としたPTHAの枠組みとして、津波ハザード評価に関わる不確定性を認識論的不確定性と偶然的な不確定性に分類し、認識論的不確定性はロジックツリーで、偶然的な不確定性は観測値と計算値の比が従う確率分布（対数正規分布）を用いて評価するGeist and Parsons（2006）⁽¹²⁾やAnnaka et al.（2007）⁽¹³⁾の評価手法を採用した。5年後には、土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会（2016）⁽¹⁴⁾で、スケーリング則の適用方法や、地震断層のアスペリティ分布（すべり量分布）の設定手法に関わる不確かさを導入する等の手法改良を提案した。更に、土木学会減災アセスメント小委員会（2021）⁽¹⁵⁾では、地震断層のアスペリティ分布を乱数により生成する手法⁽¹⁶⁾

を採用し、また、防潮堤の破壊確率を考慮した数値計算を実施して、津波ハザード評価に関わる不確定性を網羅的に評価する枠組みを構築している。一方、政府の地震調査研究推進本部（以下、推本）の津波評価部会は、南海トラフ域で発生する地震を対象として、主に太平洋沿岸での津波ハザードと発生確率の関係を評価した。評価結果は、防災科学技術研究所（2020）⁽¹⁷⁾がJ-THIS津波ハザードステーションとして公開した（図5参照）。ただし、これらの結果は、沖合および沿岸での確率論的津波ハザード評価に留まっており、被害計算やリスク評価に必要な陸域での確率論的な津波浸水深の評価は公表されておらず、浸水深の確率評価は今後の重要な研究課題である。原子力安全基盤機構（2014）（現在、原子力規制庁）⁽⁹⁾は、多数の模擬津波波形を入力条件として生成し、それらを用いて確率論的に津波遡上解析を実施する手法を提案している。これらの手法の詳細は各参考文献を参照されたい。次章では、陸域の浸水深を確率論的に評価するために、モード分解という手法を用いた新たなPTHAの手法を紹介する。

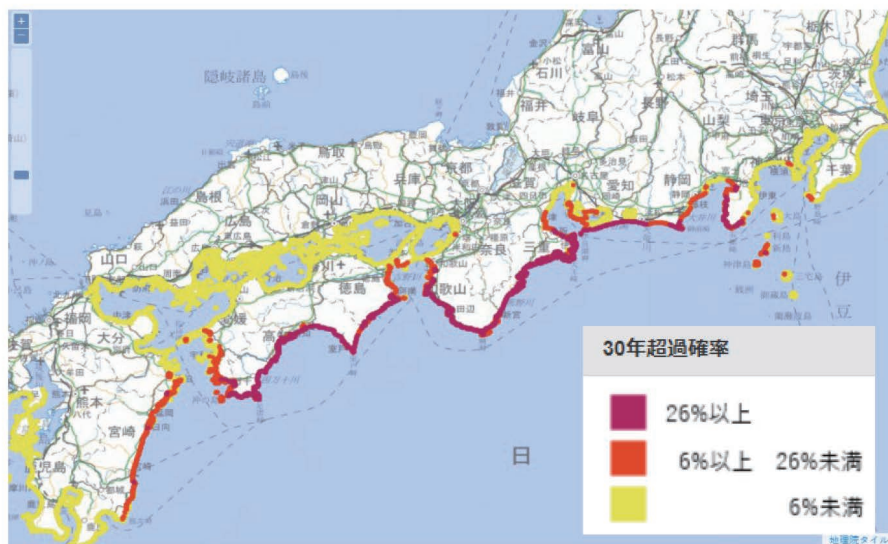


図5 J-THIS津波ハザードステーションで公開されている確率津波波高⁽¹⁷⁾

4. モード分解法を用いた確率論的津波ハザード評価

本章では、津波浸水ハザード評価の不確定性を工学的に評価するため、津波浸水深を確率論的に、かつ、効率的に予測することが可能な空間モード分解・結合を用いた実用的な評価の枠組みを提案し、最終的には、地震の発生確率モデルを組み合わせ、再現期間毎の津波浸水深分布を評価する手法を解説する。津波浸水ハザードを、計算負荷を抑えて効率的に評価可能にすることは、沿岸域における事前の避難計画、復旧・復興計画等の津波災害対策を推進させることに繋がる。なお、紙面の都合上、本稿では評価手法の概要を解説することに留めるため、詳細については、参考文献⁽¹⁸⁾を参照されたい。

初めに、固有直交分解（特異値分解）により得られる空間モードを用いた確率論的津波浸水ハザード評価を行う。この手法では複数の浸水深分布の支配的な空間モードさえ特定

すれば良いため、数百・数千もの物理方程式を解く必要がないことが計算上の利点である。まず、首都圏に多大な影響を及ぼすと想定されている相模トラフ巨大地震を選定し、非線形長波理論による津波数値計算を実行することで、対象地域の浸水深を計算する。不確実性として、地震断層の深さとマグニチュードを変動させた浸水深について計算し、メッシュ上の浸水深に対して固有直交分解(特異値分解)を適用し、浸水深の空間モードを評価する。この各空間モードを、断層パラメータの確率分布を考慮して結合することで、比較的少数の計算結果から確率論的な浸水深の空間分布を得ることができる。

適用事例として、鎌倉市沿岸部を対象とした計算結果を示す。まず、対象地震は、内閣府中央防災会議(2014)の首都直下地震モデル検討会⁽³⁾で公表された「相模トラフ沿いの海溝型巨大地震」(Mw8.7)の3パターンとした。地震断層が大きく滑る領域により、西側、中央、東側の3パターンの巨大地震が想定されている。次に、地震調査研究推進本部の津波レシピ⁽¹⁹⁾を参考に断層全体の地震のMw8.7を満足させるように、超大滑り域(23.5m)、大滑り域(11.7m)、背景領域(1.94m)の3段階滑りをもつ断層を3つ作成した。(図6参照)

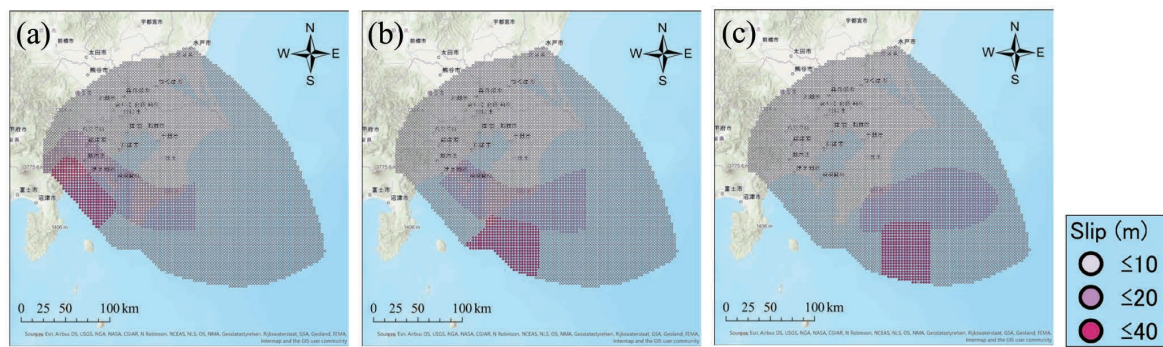


図6 首都直下地震モデル検討会で公表された相模トラフ沿いの海溝型巨大地震」(Mw8.7)。色の違いは、地震断層が滑る量の違いを表す。地震断層が大きく滑る領域により3パターン((a)西側、(b)中央、(c)東側)想定されている。

これらの断層パラメータから、Okadaの式を用いて津波の初期水位を求め、非線形長波理論により、地震発生から3時間分の津波数値計算を行った。地震断層の不確実性として、断層のすべり量(Mw 8.7 ± 0.1)と断層深さ(+ 2km, ± 0km, -1 km)の変化を考慮し、3 × 3 = 9ケースの津波数値計算を実施した。滑り分布の3ケースに対して、それぞれ9ケース実施するため、合計27ケースの計算を実施した(図7参照)。

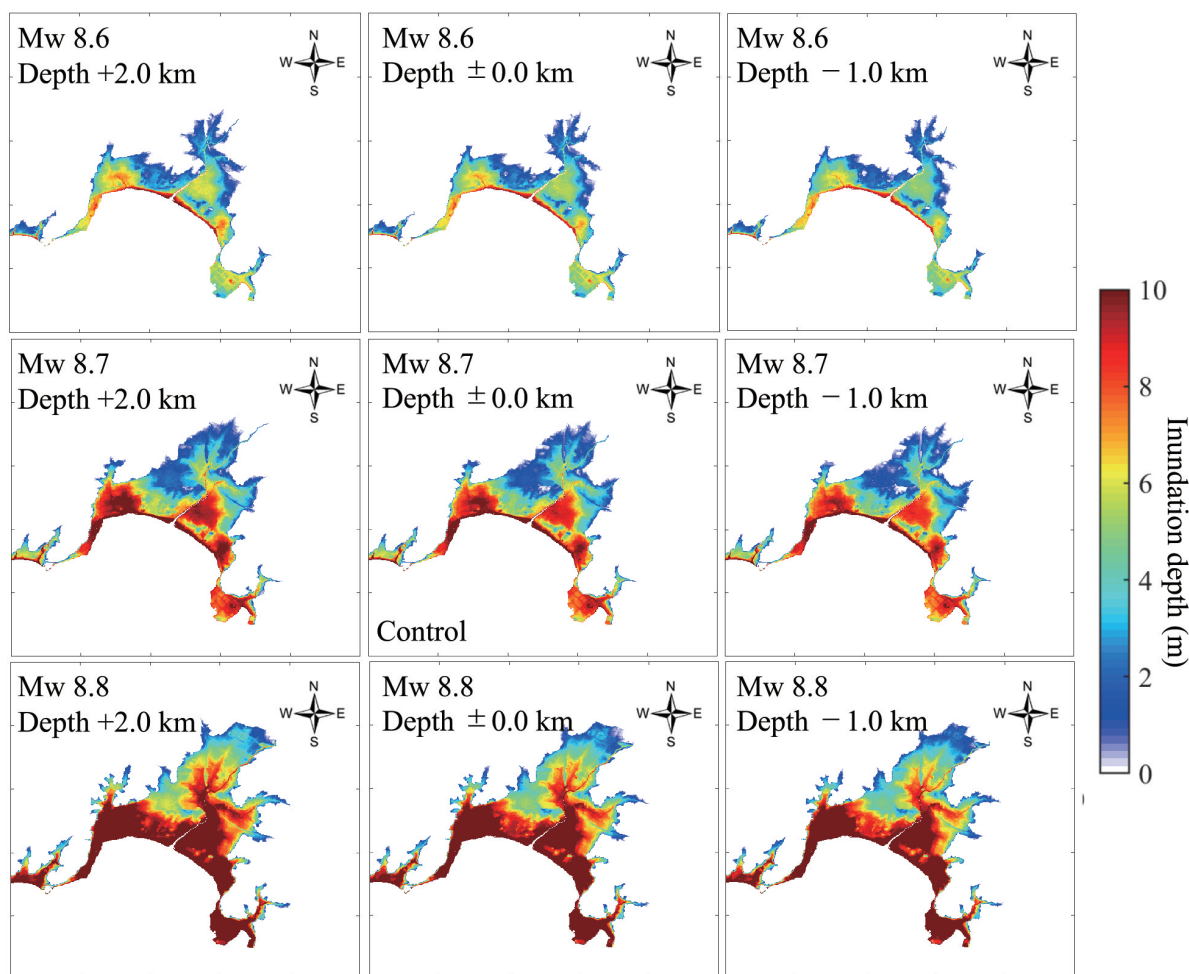


図7 神奈川県鎌倉市沿岸部を対象とした津波浸水深分布の計算結果

これらデータに対して、浸水深の空間分布（行方向）と解析ケース（列方向）のデータ行列 X を作成し、データ行列 X を特異値分解して、浸水深の空間相関の情報が集約される固有モードを抽出した（図8参照）。さらにこれら固有モードの線形結合を取ることで、疑似的な浸水深分布を多数再生成した。これにより数値計算結果以上の数の多数の浸水深分布が得られるので、計算負荷の大幅な低減を実現した。最終的に、地震の発生確率モデル（BPT分布）を適用し、今後50年で想定される浸水深を確率論的に評価した（図9参照）。

沿岸部の自治体で公表されている津波ハザードマップは、津波の再現期間という観点で評価がなされておらず、その発生確率は曖昧となっている。本研究の手法を用いて、再現期間毎のハザードマップを作成すれば、長期的な時間軸の観点を考慮した防災や減災に関わる各種対策、事前の避難計画、復旧・復興計画等の災害対策を推進できることが期待される。

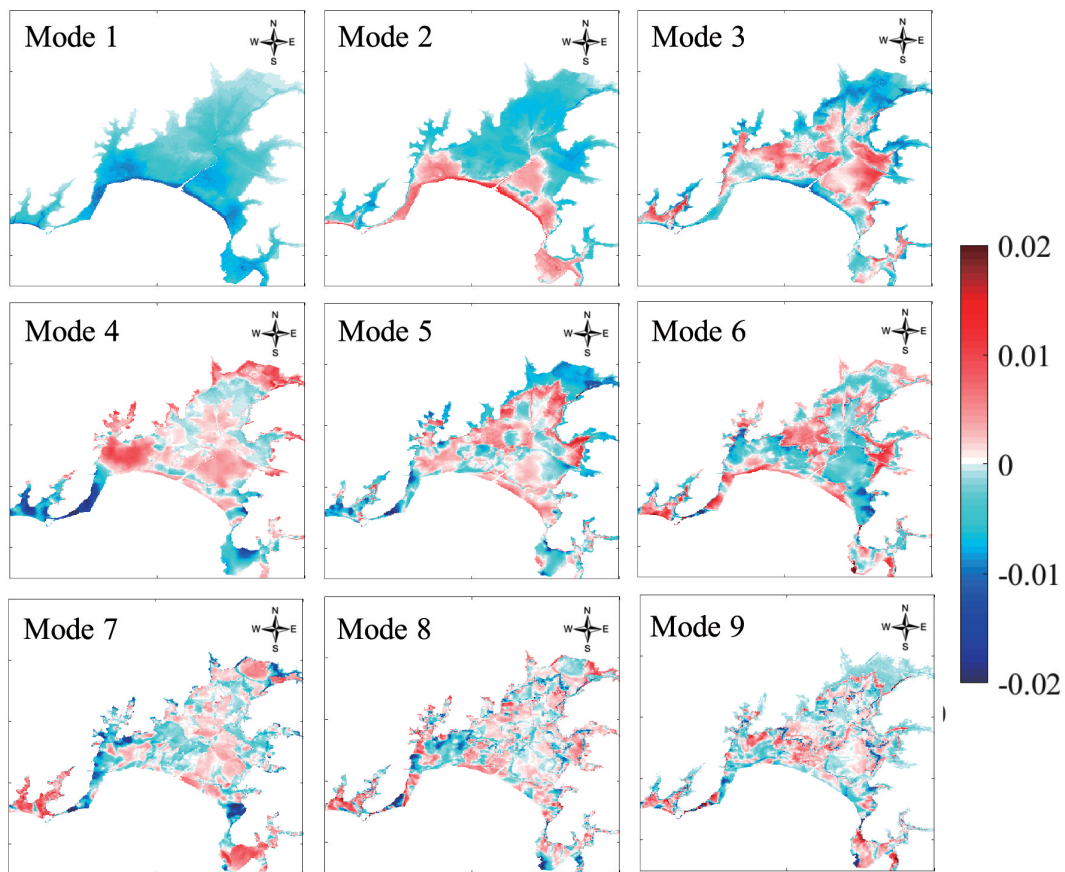


図8 浸水深分布のモード分解の結果

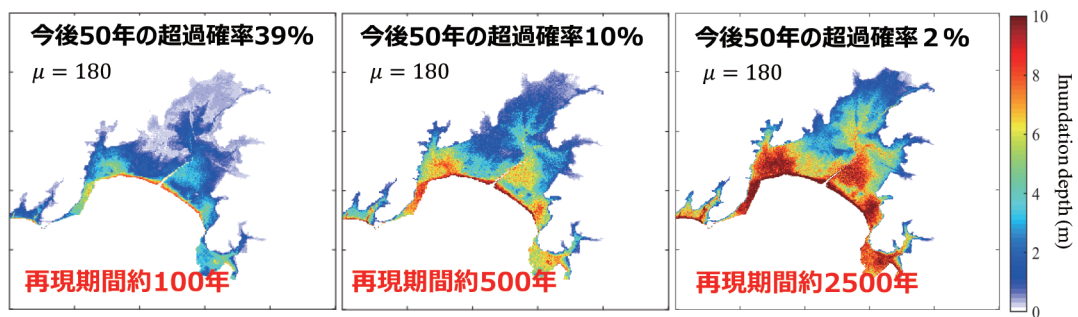


図9 神奈川県鎌倉市を対象とした各再現期間の津波浸水深分布の評価例

5. 結語

本稿では、今後の津波対策を実施するうえで重要な概念であるL1、L2津波の考え方、基本的な津波ハザード評価や確率論的津波ハザード評価の手法、最新の研究等について述べた。最後に、先日開催されたある講演会で示されたハザード評価の不確定性に関わる言説を紹介したい。去る2023年1月27日に土木学会原子力土木委員会において、東京大学の糸井達哉氏による「外的事象に関わるリスク評価技術の標準化に関する最近の取り組み」と題する講演会⁽²⁰⁾が開催され、講演のなかで、2019年のAntonio Godoy氏（元国際原子

力機関国際地震安全センター (IAEA ISSC) センター長) による、自然現象のハザードを評価する者に対する言説を紹介している。これを引用すると、『外的事象のハザード評価は、不確かさがあるということが真実であり、不確かさの説明をタブー視すべきではない。最善の評価、それに加えて不確かさを理解する努力をすることで、公衆に対して正直であることができるというのが、米国でのこれまでの考え方である。・・・(中略)・・・ハザード評価で問題になるのは、確かに分かるところではなく不確かさな部分である。その部分を語らないのは、正直ではないということになる。』。ここでは、ハザード評価の不確かさに対するこれまでの米国の考え方だとしているが、ハザード評価の不確実性を突き詰めて考え、不確実性の評価結果を正直に公開していくべきである、というメッセージは、今後のわが国での自然現象のハザード評価をしていくうえで参考になる言説である。我々は、2011年の東北津波で、事前に災害リスクを想定して対応することの困難さを学んだ。津波に限らず、災害を引き起こす様々な自然現象のハザード評価では、現在は決定論的評価を基にした評価が殆どであるが、これらに加えて、今後、不確実性を定量化できる確率論的評価手法を活用することの有用性を多くの人を知り、それら評価結果に基づく具体的な対策を、関係者全員で議論して推進していくことの重要性を指摘して、本稿の結語としたい。

6. 参考文献

- (1) 内閣府中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会，2011.
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/index.html> (2023年1月26日参照)
- (2) 内閣府中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会，2012. <https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html> (2023年1月26日参照)
- (3) 内閣府中央防災会議：首都直下地震モデル検討会，2014. <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/> (2022年11月7日参照)
- (4) 福谷陽：確率論的津波ハザード評価とその利活用，第56回水工学に関する夏期研修会Bコース（海岸・港湾），2021.
- (5) 内閣府中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会第4回会合資料2-2巨大津波による防災施設の被災とレベルIとレベルIIへの対応一粘り強い防災施設を目指して一，2011. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/4/pdf/2-2.pdf> (2023年1月26日参照)
- (6) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室、同省港湾局海岸・防災課、農林水産省水産庁、同省農村振興局：設計津波の水位の設定方法等について，2011. <https://www.mlit.go.jp/common/000149772.pdf> (2023年1月26日参照)
- (7) 国土交通省：日本海における大規模地震に関する調査検討会，2016. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/ (2023年1月26日参照)

- (8) 内閣府中央防災会議：日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会，2020。
http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/model/ (2023年1月26日参照)
- (9) 原子力安全基盤機構 (現在，原子力規制庁)：確率論的手法に基づく基準津波策定手引き，JNES-RE-2013-2041，193p，2014.
- (10) 福谷陽，Suppasri Anawat，安倍祥，今村文彦：確率論的津波遡上評価と津波リスクの定量化，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.I_1381-I_1385, 2014. DOI:10.2208/kaigan.70.I_1381
- (11) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法，2011。
<https://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/39>
- (12) Geist, E. and Parsons, T.: Probabilistic analysis of Tsunami Hazards, Nat. Hazards, Vol.37, pp.277-314, 2006.
- (13) Annaka, T., Satake, K., Sakakiyama, T., Yanagisawa, K. and Shuto, N.: Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts, Pure Appl. Geophys., Vol.164, No.2-3, pp.577-592, 2007.
- (14) 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会：原子力発電所の津波評価技術，2016。
<https://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/84>
- (15) 土木学会減災アセスメント小委員会：津波に対する海岸保全施設整備計画のための技術ガイドライン，2021。 <https://committees.jsce.or.jp/cprcenter/node/310>
- (16) 福谷陽，北野利一，安田誠宏，有川太郎，山中亮一：確率論的津波ハザード評価手法 (coRaL法) の構築とそれによる津波浸水評価，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.77, No.2, pp.I_175-I_180, 2021.
- (17) 防災科学技術研究所：J-THIS 津波ハザードステーション，2020. DOI:10.17598/nied.0016
- (18) Yo Fukutani, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Yu Otake: Time-Dependent Probabilistic Tsunami Inundation Assessment Using Mode Decomposition to Assess Uncertainty for an Earthquake Scenario, Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol.126 (7) , e2021JC017250, 2021. DOI:10.1029/2021JC017250 (2021)
- (19) 地震調査研究推進本部：波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ) ，38p., 2017. https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf. (2023年1月29日参照)
- (20) 糸井達哉：外的事象に関わるリスク評価技術の標準化に関する最近の取り組み，土木学会原子力土木委員会公開講演会，2023年1月27日，土木学会講堂・オンライン開催

