

水工学シリーズ 21-B-3

確率論的津波ハザード評価とその利活用

関東学院大学 准教授

福谷 陽

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

確率論的津波ハザード評価とその利活用

Probabilistic Tsunami Hazard Assessment and Its Application

福谷 陽
Yo FUKUTANI

1. はじめに

津波ハザードの評価は、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波源を一つ設定し、それにより発生する津波の浸水深や流速等のハザードを数値計算により評価する。一方、確率論的評価は、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様々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。これらの評価は、津波ハザードを評価する対象や目的によって使い分けることが重要である。後者は、一般的に、確率論的津波ハザード評価（PTHA: Probabilistic Tsunami Hazard Analysis）と呼ばれ、津波の発生・伝播・遡上の各段階で考え得る不確定性が多数存在するため、これに応じ、PTHAもこれまで、国内外で実に多くの評価手法が提案されてきた。本稿では、PTHAを対象とし、その手法や今後の課題等について概説することを目的とする。ただし、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当てる。また近年では、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。

本稿では、まず、PTHAの基礎として、津波ハザード評価の基本的な流れと確率論的津波ハザード評価の歴史を簡単に紹介する（2章）。次いで、これまでに提案されている多くのPTHAのうち、近年の研究成果を中心に幾つかを紹介する（3章）。更に、これら確率論的評価結果の具体的な利活用方法を幾つかの事例を交えて紹介する（4章）。最後に、本稿をまとめる（5章）。

2. 確率論的津波ハザード評価の基礎

2.1 津波ハザード評価の基本的な流れ

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、津波波源モデルの設定、地盤変動解析、津波伝播解析、津波遡上解析を実施する必要がある（図2.1）。決定論的評価では、ある一つの津波波源（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、それに伴う海面変動量（津波初期水位）を解析、そして、その津波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。しかしながら、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な手段となる。例えば、津波発生の過程では、地震の発生確率、地震断層の位置や形状（長さ、幅、深

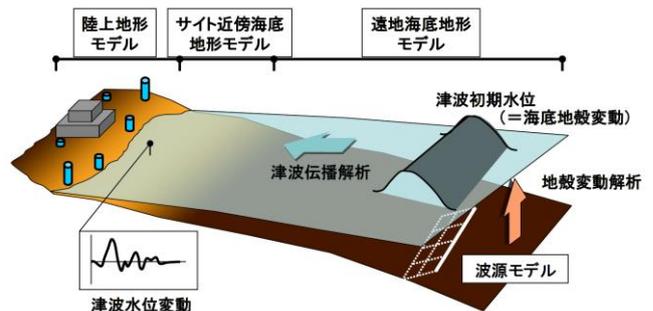


図2.1 津波伝播・遡上解析の概念図
(出典:原子力安全基盤機構(現:原子力規制庁),2014)

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、津波伝播の過程では、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。これらの不確定要素を考慮して、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のが、PTHAである。

2.2 確率論的津波ハザード評価の歴史

PTHAは、2000年以降、とりわけ、2004年スマトラ島沖地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波による被災経験を経て、急速に発展してきた。

確率論的津波ハザード評価研究の黎明期である2000年初頭には、Geist (2002, 2005), Geist and Parsons (2006), Annaka et al. (2007)等の研究があり、津波ハザードの考え得る不確定性要素を認識論的不確定性 (Epistemic uncertainty) と偶然的な不確定性 (Aleatory variability) に分類して評価する枠組みが提案された。この枠組みはCornell(1968)等に代表される1900年代半ば頃から進展してきた確率論的地震動予測 (PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Analysis) に関する議論に基づいている (例えば、Senior Seismic Hazard Analysis Committee, SSHAC, 1997; Toro et al., 1997; Anderson and Brune, 1999)。地震起因の津波ハザードの不確定性を考える場合には、必然的にPSHAの考え方を基にすることが多い。国内での確率論的津波ハザード評価に関する研究は、土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002)に端を発し、パラメータスタディという形で津波ハザードの不確定性を扱っている。

その後、2011年東北津波の経験を経た2010年代では、基本的な枠組みを踏襲しながらも、実に様々な多くのPTHAの手法が提案された。特に近年では、地震断層の大滑り域 (アスペリティ) の不均質性に伴う津波現象の不確定性に関する研究 (例えば、Mueller et al., 2014; Goda et al., 2014; Davies et al., 2015; Fukutani et al., 2015; LeVeque et al., 2016; Melgar et al., 2016; Sepúlveda et al., 2017; Crempien et al., 2020) や、多くの不確定性を取り扱う確率論的評価を実施する際の計算負荷の低減に関する研究 (例えば、Løvholt et al., 2015; Lorito et al. 2015; Davies et al., 2017; Glimsdal et al., 2019; Volpe et al., 2019; Kotani et al., 2020; Fukutani et al., 2021) などが、最新の研究の事例として挙げることができる。

国内では、土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)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)やAnnaka et al. (2007)の評価手法を採用した。更に、土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016)は、スケーリング則の適用方法やアスペリティ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。地震調査研究推進本部 (以下、推本) (2020)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)がJ-THIS津波ハザードステーションとして公開した (図2.2)。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いない。原子力安全基盤機構(2014) (現在、原子力規制庁) 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。

米国でも、津波ハザード評価に関する研究は、原子力発電サイトでの利用を想定して進展してきたが、USNRC(2013)の“Guidance for Performing Tsunami, Surge, or Seiche Hazard Assessment”では、確率論的な津波ハザード評価手法の枠組み構築に関しては、将来的な課題であるとした。一方、アメリカ土木学会 (American Society of Civil

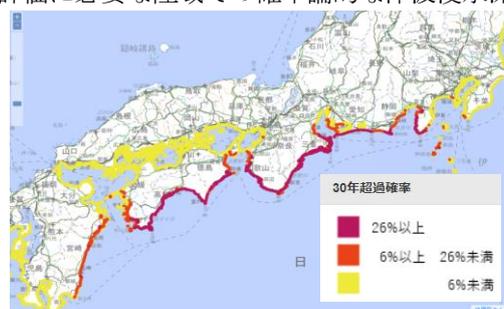


図2.2 J-THIS津波ハザードステーションで公開されている確率津波波高 (出典：防災科学技術研究所，2020)

Engineering) では、建築設計基準用の津波（基準津波）を評価するためのPTHAに関する研究が進められ、2017年に成果を公表した(ASCE, 2017). 基本的には、前述のロジックツリーを用いた評価手法を採用しており、例えば、考え得る最大の津波の定義として、再現期間 2500 年の津波を定義している。

3. 様々な確率論的津波ハザード評価手法

現在、PTHAとして様々な評価手法が提案されており、その全てを網羅的に紹介することは叶わないが、本章では、主なPTHAの手法や、最新の研究等について概説する。

3.1 ロジックツリーアプローチ

ロジックツリーアプローチは現在、PTHAの手法として多用されている。前述のように、地震による強震動を評価する際に考慮すべき不確定性の種類は、認識論的不確定性と偶然的な不確定性とに分類されており、PTHAでもこれを踏襲することが基本となっている。USNRC (2002)では、認識論的不確定性は科学的知識の欠如に起因するもので、データ量が増えれば将来的に減少させ得る不確定性であり、偶然的な不確定性は物理現象のランダム性に起因するもので、データ量には左右されず将来的にも減少不可能な不確定性である、と定義している。

推本(2020)や原子力安全分野の評価では、Geist and Parsons (2006)やAnnaka et al. (2007)の手法に基づき、図3.1に示す通り、様々な認識論的不確定性をロジックツリーにより捕捉し、偶然的な不確定性を津波水位が従う確率分布により評価するという手法を採用している。具体的には、認識論的不確定性としては、津波発生域（想定地震断層の発生領域）、地震のマグニチュード分布、地震の発生頻度、津波高さの推定方法、その他にも、マグニチュードの推定方法（スケーリング則の適用）、アスペリティ分布の設定方法などが考えられ、このように想定判断が分かれる事項に関して、複数の選択肢（分岐）あるいは連続的な確率分布を設定する。そして、ロジックツリーにより生成された各津波ハザードの計算ケースに対して、非線形長波理論を用いて対象地点の津波高を計算し、津波高の偶然的な不確定性として、解析値を中央値とする対数正規分布を考え、この超過確率分布を取ることによって、津波ハザード曲線を生成することができる。ロジックツリーアプローチによるPTHAの詳細、特に、地震断層のマグニチュード分布や発生確率の設定方法等の詳細は、土木学会原子力土木委員会(2011, 2016)や推本(2020)等を参照されたい。本稿では、このうち津波水位の偶然的な不確定性の考え方の箇所のみ、以下に詳述する。

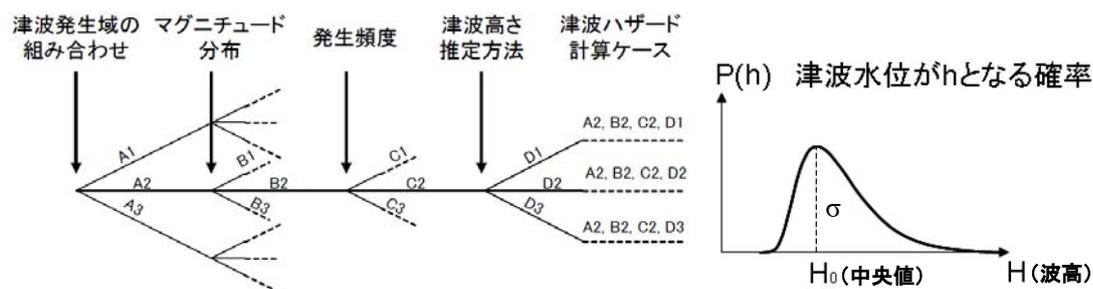


図3.1 (左) ロジックツリーによる認識論的不確定性の評価と (右) 確率分布による偶然的な不確定性の評価。土木学会原子力土木委員会 (2011) より抜粋，一部，筆者改変。

ここでの偶然的な不確定性とは、観測値と解析値の誤差（モデル化誤差）を表す式(1)の対数正規分布である。これは、過去に発生した複数の既往地震による津波の痕跡値と津波数値計算値を比較した結果、観測値と解析値の比が対数正規分布にほぼ従っていることが分かっているためである（土木学会原子力土木委員会，2002）。標準偏差の対数値は、津波数値計算の精度を測るための指標であるAidaの κ (Aida, 1978)と同等である。

$$P(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma h}} \exp\left\{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

ここで、 $P(h)$:津波波高 h の確率密度、 σ :標準偏差、 μ :平均値、である。図3.2左に、土木学会(2011)で提案された

標準偏差の対数値 (β) の値を示す。この標準偏差の値についても、幾つかの可能性が考えられることから、これをロジックツリーの分岐として、 $\beta = 0.223, 0.300, 0.372, 0.438$ の4パターンを設定している。更に、対数正規分布は、比較的裾の長い分布であり、モデル化による誤差が極端には大きくならないという仮定のもと、確率分布の両端打ち切り有/無の分岐を入れることが提案されている。両端打ち切りの程度として、 $\pm 2.3\beta$ または $\pm 10\beta$ の分岐が設けられているが、 $\pm 10\beta$ の分岐は、両端を打ち切らないことと殆ど等しい。一方、図3.2右に確率分布の両端を $\pm 2.3\beta$ で打ち切ったときの効果を具体的に示す。実線が両端打ち切り無し、点線が両端を $\pm 2.3\beta$ で打ち切った場合の結果であり、それぞれ赤線が確率密度関数、青線が超過確率分布を表す。赤点線で示す両端打ち切り有の確率密度関数を見ると、津波高の確率密度がある範囲に限定され、その範囲の確率密度が、通常と比べて高くなる。これは、確率密度関数内の面積が1.0になる原則を考えれば当然である。この超過確率を取れば、青点線で示す両端打ち切り有の超過確率分布となる。青実線で示す両端打ち切り無しの超過確率分布と比較すると、確率1.0から確率が下がり始める津波高の値が高くなり、また、ある津波高の値で確率が0.0まで落ちる。両端打ち切り無の対数正規分布を使えば、理論上は、津波高が取り得る値は無限大となり、地震の規模に上限があることを考えれば、物理的に有り得ない試算となってしまうため、避ける必要がある。このように、基本的には、両端打ち切り有の確率分布を用いて偶然的不確定性を考慮するが、その打ち切り範囲の妥当性については議論の余地がある。現状の $\pm 2.3\beta$ とは、分布の両端の各1%に入る現象は実際には起こらないと判断した場合での設定である。

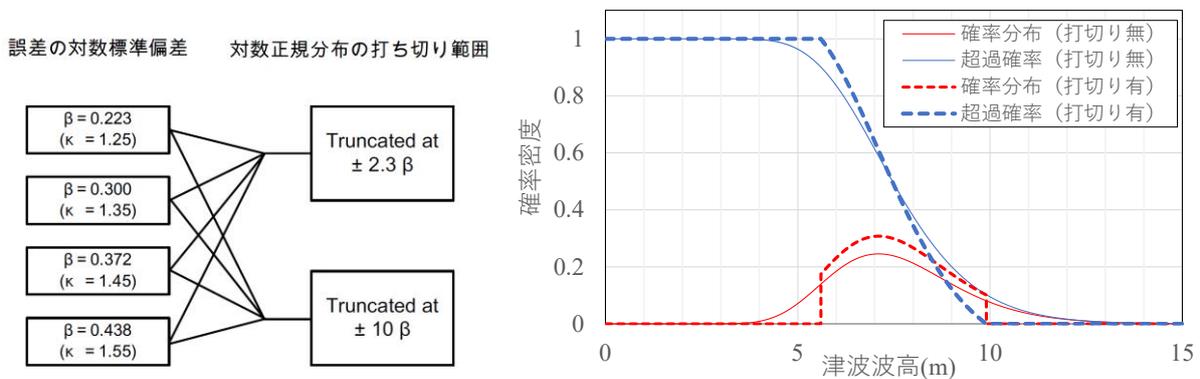


図3.2 (左) ロジックツリーアプローチで設定される対数標準偏差と打ち切り範囲、
(右) 打ち切りの有無による対数正規分布の確率密度関数と超過確率分布の違い

また、ここでの偶然的不確定性を表す対数正規分布とは、ある特定の津波波源モデル (位置、長さ、幅、深さ、すべり量、すべり角、走行、傾斜角、ライズタイム、破壊伝播速度) を用い、かつ、ある特定の津波数値計算の条件を用いたときの観測値と計算値の誤差を意味する分布として設定される、ということに注意が必要である。このようにある特定の条件下で試算された観測値と計算値の誤差を表す対数正規分布のみでは、これらの条件が変動したときの津波高の変動分が考慮できていないことになる。そこで、このような場合、ある特定の条件の変動分による誤差を、(1)偶然的不確定性として別に考慮して加えるか、あるいは、(2)認識論的不確定性と考えてロジックツリーの分岐として別に考慮するか、の2パターンが考えられる。

(1)の場合、波源モデル、伝播モデル、遡上モデルの各段階におけるモデル化誤差を $\beta_s, \beta_p, \beta_i$ とにおいて、各誤差が独立であると仮定すれば、式(2)を用いて全体のばらつき β を評価することが可能となる。

$$\beta = \sqrt{\beta_s^2 + \beta_p^2 + \beta_i^2} \quad (2)$$

このように各段階でのモデル化誤差を評価した研究として、海岸線からの距離、津波水位、計算格子の値による誤差の変動を評価した栗田ら(2013)、プレート間地震による津波を対象に波源特性を主要なパラメータで表した波源モデルを用いて誤差評価した杉野ら(2014)や是永ら(2013)、断層の破壊伝播速度の誤差を確率分布で評価した Fukutani et al. (2016)や杉野ら(2017)などがある。

3.2 地震断層のアスペリティ設定モデル -津波レシピ, ランダムフェーズモデル, KL展開法-

PTHAにおいて、津波波源である地震断層の規模やアスペリティ（大滑り域）の位置設定は、最終的な評価結果に大きく影響を及ぼす要素の一つである。推本(2020)では、図3.3に示すように波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ）（推本,2017）に基づき南海トラフ域での大滑り域を設定している。津波レシピでは、最大で超大滑り域、大滑り域、背景領域の3段階の滑り域を設定することができるとしており、超大すべり域のすべり量は、波源全体の平均すべり量の4倍、面積が波源全体の10%、大すべり域のすべり量は、波源全体の平均すべり量の2倍、面積が波源断層全体の20%と設定することができる等と定めている。しかし、この方法では、アスペリティの設定位置に人為的な判断が入ることになる。近年、このようなアスペリティの平面分布をランダムに多数生成可能な確率滑りモデルを用いて、確率論的に津波ハザードを評価する手法が多く提案されている（例えば、Mueller et al., 2014; Goda et al., 2014; Davies et al., 2015; LeVeque et al., 2016; Melgar et al., 2016; Sepúlveda et al., 2017; Crempien et al., 2020）。Goda et al.(2014)は、過去の複数の巨大地震のインバージョン滑りモデルから、スペクトル解析を用いてすべり量の空間相関特性を抽出した後、位相をランダムに変化させて空間領域での確率滑り分布を得るランダムフェーズモデルを提案した。図3.4にランダムフェーズモデルを用いて生成した断層モデルの例を示す。想定した断層の領域内にアスペリティがランダムに多数生成することができる。LeVeque et al.(2016)は、KL展開法(Karhunen-Loève expansion method)（例えば、Karhunen, 1947; Loe've, 1977; Schwab and Todor, 2006）の理論を用いて、アスペリティ分布の空間固有モードから、ランダムなアスペリティ分布を合成する手法を提案した。図3.5にアスペリティ分布の空間モードの例を示す。この空間モードと乱数を用いることによって、断層上のアスペリティがランダムに生成される。ただし、空間モードを合成する際に用いる共分散行列は、断層の幅と長さから経験的に決定する必要がある。

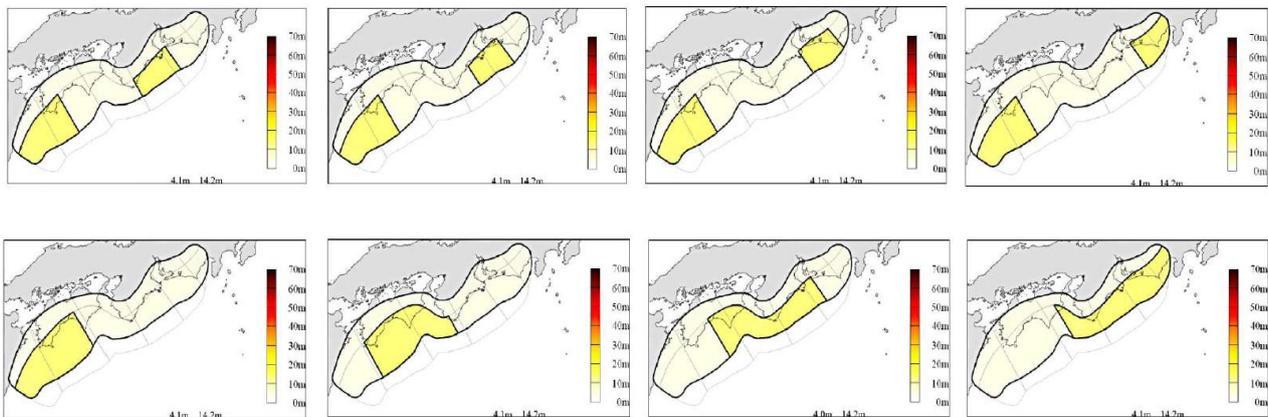


図3.3 津波レシピを用いた地震断層の大滑り域（アスペリティ）の設定例（推本, 2020）

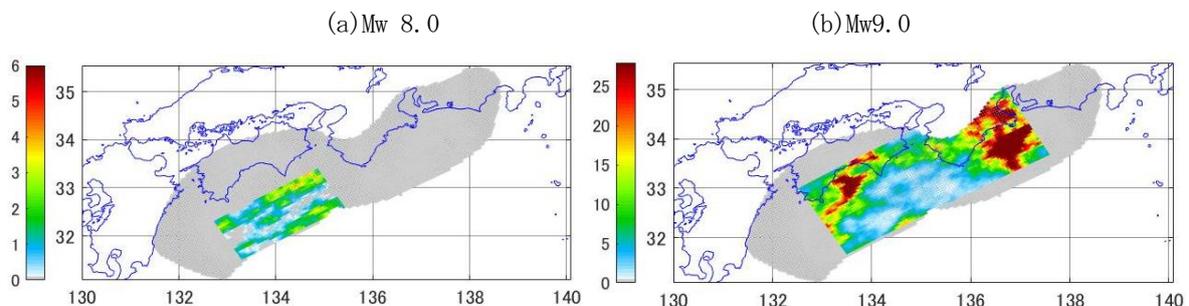


図3.4 ランダムフェーズモデルにより生成した確率すべり分布の例（カラーバーの単位：m）（土木学会, 2021）

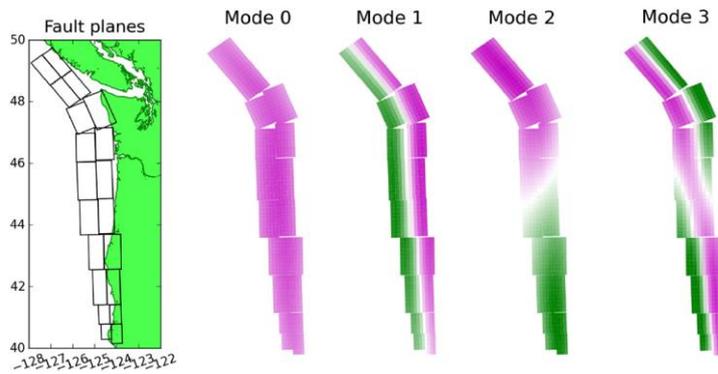


図3.5 海溝型地震断層のアスペリティ分布の空間モードの例 (LeVeque et al., 2016)

3.3 coRaL法 (A method of incorporating Random phase model into Logic tree approach)

本節では、前述の地震断層のアスペリティの平面分布をランダムに発生させるランダムフェーズモデル (Goda et al., 2014; 安田ら, 2020) により生成したモーメントマグニチュード (以下, Mw) 毎の地震断層を用いて計算した津波浸水深の結果を、認識論的不確定性を捕捉するロジックツリーに組み込む確率論的津波ハザード評価手法であるcoRaL法 (A method of incorporating Random phase model into Logic tree approach) (福谷ら, 2021) を紹介する。coRaL法での評価の流れを図3.6に示す。手法の一部は、北野ら(2020)で示された考え方に基づいている。まず、ランダムフェーズモデルによりMw毎に考え得る多数のアスペリティ分布を持った地震断層を生成し、非線形長波理論を用いて、対象地域の津波浸水深分布を得る。Mw毎で浸水深の経験分布関数を生成した後、偶然的な不確定性を表す切礎対数正規分布を適用し、平滑化する (次節で詳述)。さらに、想定する地震断層の考え得る平均発生間隔を複数設定し、平滑化した経験分布関数と合わせて、津波浸水深と年超過確率の関係である津波ハザード曲線を得る。確率規模毎に浸水深を取得する操作を行うことにより、確率規模毎の津波浸水深分布を得ることができる。認識論的不確定性であるロジックツリーの分岐として、地震断層のMw、および、平均発生間隔の変動を考慮し、ツリーの各分岐に重みを与えることで、パーセンタイル毎の浸水深を評価することが可能となる。

まず初めに、coRaL法における偶然的な不確定性の考え方、適用方法の詳細を示す。これまで国内で提案されてきたロジックツリーアプローチによるPTHAにおいては、津波波高の偶然的な不確定性として、対数正規分布を仮定する (土木学会, 2016; 推本, 2020)。この対数正規分布の標準偏差は、過去の巨大地震による津波の数値計算値と観測値の誤差、つまり、モデル化誤差を表現するAidaの κ (Aida, 1978) の評価値に基づいている。そして、津波数値計算による解析値を中央値と仮定して、対数正規分布の超過確率曲線を得ることで、津波ハザード曲線を得る。したがって、多数の地震断層を想定した津波数値計算による解析値が多数あれば、各解析値に対応する多数の超過確率曲線を得ることになる。しかし、この評価手法では、多大な計算コストをかけて得られた数値計算による多数の解析値、一つ一つの情報が薄れることになり、解析結果の有効性の低下に繋がる。また、解析値1つのみで分布関数全体を決定する仮定など、改善すべき点が残っている。さらに、既往研究では、空間的な確率変動と時間的な確率変動が等しいとするエルゴード仮定を置くため、空間的ばらつきを表現するAidaの κ に基づく対数正規分布を用いて生成した超過確率曲線が、超過発生確率と津波ハザード値の関係である津波ハザード曲線であると

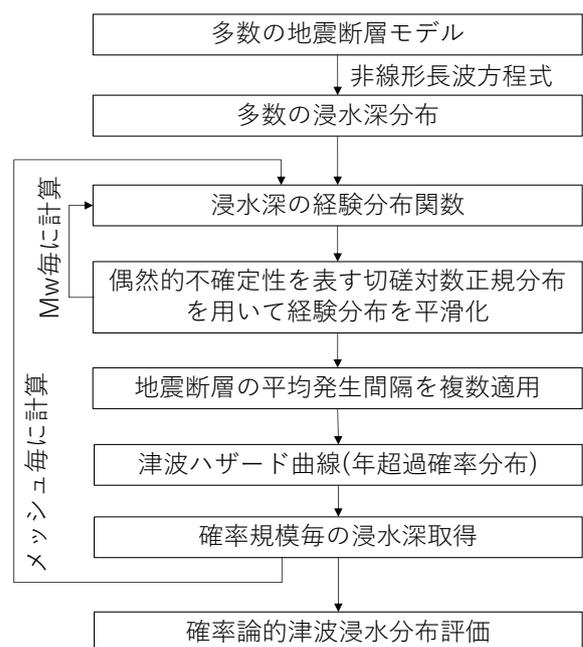


図3.6 coRaL法による確率論的浸水ハザード評価の流れ

考えるが、この仮定の妥当性についても未だ議論の余地がある。

coRaL法では、この偶然的不確定性の考え方を刷新する。まず、多数の数値計算による解析値の情報を最大限に活用するため、解析値をそのまま利用する経験分布関数を生成し、その関数に対し、式(3)を用いてモデル化誤差を表すAidaの κ による対数正規分布を適用し、平滑化した関数を得る。

$$Q(x) = \sum_{i=1}^n w_i \left(1 - \Phi(\log(x); \log(x_i), \sigma^2) \right) \quad (3)$$

ここで、 $\Phi(x; \mu, \sigma^2)$ は、浸水深 x 、平均 μ 、標準偏差 σ の正規分布の累積確率分布関数、 i は確率シミュレーションの標本番号、 n は標本数、 w_i は標本に付与する重みを表す。式(3)の標準偏差にAidaの κ を適用する。既往研究では、対数正規分布の両端の裾の打ち切りを考慮しているが、この場合、式(4)を用いることで同様に計算できる。

$$Q'(x) = \sum_{i=1}^n w_i \left(1 - \Phi'(\log(x); \log(x_i), \sigma^2) \right) \quad (4)$$

ここで、 $\Phi'(x; \mu, \sigma^2)$ は、浸水深 x 、平均 μ 、標準偏差 σ の両端打ち切り有りの切礎正規分布の累積確率分布関数であり、分布の打ち切りを考慮して全確率が1となるように処理する。図3.7に、例として、数値シミュレーション等による解析値（浸水深）の個数が4個（ $n=4$ ）の場合に式(3)を適用する概念図を示す。図に示す通り、各解析値 P_i （ $i=1\sim 4$ ）周りに対数正規分布のばらつきが存在すると考え、各解析値の対数正規分布のある浸水深を超過する確率（ $1 - \Phi(\log(x); \log(x_i), \sigma^2)$ ）を解析値の個数全て合計する操作を、浸水深をずらしながら計算を実行する。式(4)を適用するためには、両端の裾を打ち切った対数正規分布を用いて同様な計算をすることで実現できる。

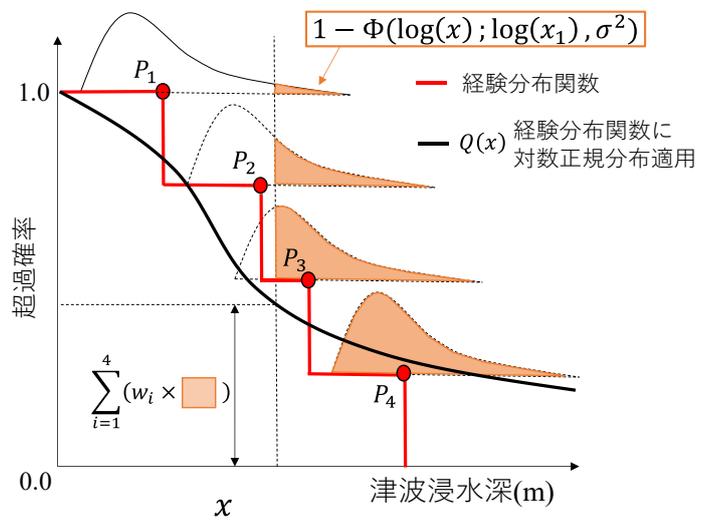


図3.7 解析値（浸水深）の個数が4個の場合の経験分布関数に式(3)を適用する概念図。

以上の操作により、これまで解析値毎に設けていた分布関数を与える対数正規分布を、経験分布関数全体を構成する多数の解析値1つ1つに局所的に平滑化する形で適用することが可能となる。図3.8に評価対象地域のある地点を対象とした計算結果を示す。縦軸の超過確率は(a)線形軸、(b)対数軸、である。今回は、標準偏差 σ として、推本(2020)で偶然的不確定性として使用されている自然対数標準偏差0.35、両端打ち切り幅 $\pm 3\sigma$ を用いた。赤太線は、Mw9.0、Mw8.6、Mw8.2の各ケースにおけるランダムフェーズモデルから得られる津波浸水深の経験分布関数である。紙面の都合上、3ケースの結果のみを示す。破線は、経験分布関数に対数正規分布を適用した超過確率曲線(式(3))、実線は、経験分布関数に切礎対数正規分布を適用した超過確率曲線(式(4))を表す。図3.8(a)を見ると、経験分布関数は、解析値をそのまま描画しているため階段上の関数となっているが、これらに対数正規分布、および、切礎対数正規分布を適用した超過確率曲線は平滑化されていることが分かる。いずれのケースでも、超過確率の最大値の7割程度の箇所で、経験分布関数と平滑化曲線が交差している。なお、各Mwの計算結果で超過確率の最大値が1とならないのは、浸水深0 mとなる解析値が存在するためであり、当然、Mwが小さくなる程、そのようなケースが多く存在するため、超過確率の最大値は小さくなる。図3.8(b)は、縦軸の超過確率を対数軸として示しており、これにより、分布の両端を打ち切る効果が明瞭となる。今回、各Mwで60ケースの解析を行ったため、経験分布関数(赤線)の超過確率の最小値は、 $1/60 \approx 0.0167$ となる。破線が対数正規分布を適用した曲線であり、裾が長く、超過確率の小さい領域まで滑らかに伸びている一方、実線が

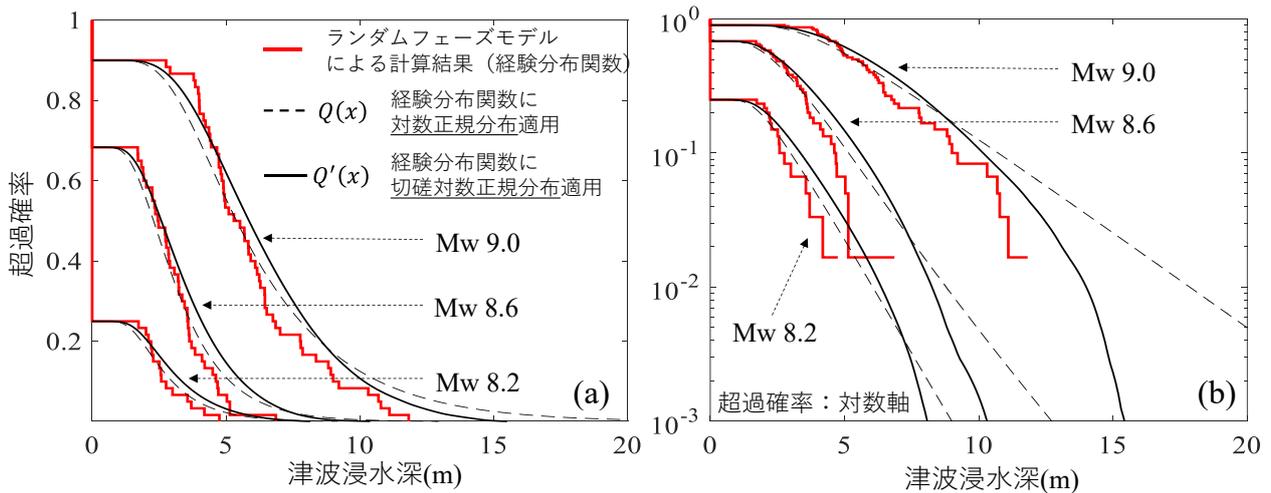


図3.8 ランダムフェーズモデルによる経験分布関数（赤太線），経験分布関数に対数正規分布を適用した超過確率曲線（破線），経験分布関数に切確対数正規分布を適用した超過確率曲線（実線）．縦軸の超過確率：(a)線形軸，(b)対数軸．

切確対数正規分布を適用した曲線であり，分布の両端打ち切りの効果により，超過確率が小さく津波浸水深の大きい領域まで伸びず，浸水深に上限のある傾向となる．興味深いことに，Mw9.0の結果で顕著であるが，元の経験分布関数には浸水深の頭打ちの傾向が見られる．したがって，通常対数正規分布ではなく，切確対数正規分布による平滑化が妥当であると言える．Mw9.0の結果ほど明瞭ではないが，Mw8.6やMw8.2の結果でも，同様に元の経験分布関数に頭打ちの傾向が見られるため，分布両端の打ち切りを考慮した平滑化が妥当である．このような浸水深に上限のある傾向は，どのような地点においても共通の事象であるか，今後更なる検討が必要であると考えられる．なお，北野ら(2020)でも，同じランダムフェーズモデルの結果である沿岸部の津波波高の頻度分布から，沿岸波高の高さに上限の可能性を指摘している．以上が，coRaL法において，多数の津波数値解析結果に対して偶然的な不確定性を付与する基本的な考え方である．

coRaL法による具体的な適用例を示すため，南海トラフ巨大地震による津波襲来のリスクが想定されている太平洋沿岸に位置する都市を対象として，提案手法を適用した．

(1) ランダムフェーズモデルによる津波浸水計算

まず，過去の巨大地震断層のアスペリティ分布に基づき，断層滑りの2次元分布をランダムに多数生成可能なランダムフェーズモデル (Goda et al., 2014; 安田ら, 2020) を用いて，南海トラフ巨大地震の領域において，Mw 8.0から9.0までの間，Mw 0.2刻みの6ケースの断層規模に対して，それぞれランダムに60個の地震断層（計360ケース）を生成し，Okadaの式(Okada, 1985)により初期水位分布を求め，以下の非線形長波方程式により対象地域の津波浸水深分布を得た．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M}{D^{3/2}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N}{D^{3/2}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{7}$$

ここで， η は静水面からの水位変化量， D は水底から水面までの全水深， g は重力加速度， n はマンニングの粗度係数， M, N は x, y 方向の全流量フラックスである．図3.9に数値計算の計算領域を示す．メッシュサイズ最大2,000 mから最小約63 mでキューブ分割を行い計算した (有川ら, 2021) ．

なお、南海トラフ巨大地震領域の深度25 km以深の深部領域では、断層の平均すべり量の2倍を超える大すべり域は生じない（推本, 2020）という知見を基に、別途、ランダムに生成された地震断層から深部領域にアスペリティを含む地震断層を除外した計算結果を確認したところ、結果への影響はほとんど無いという結論を得ている。これは、深部領域で発生した地震では、地盤変動が海面まで伝わり難く、波高の高い津波が誘起され難いことを意味する。よって今回は、ランダムに生成された地震断層全てを用いて、津波浸水計算を行った。

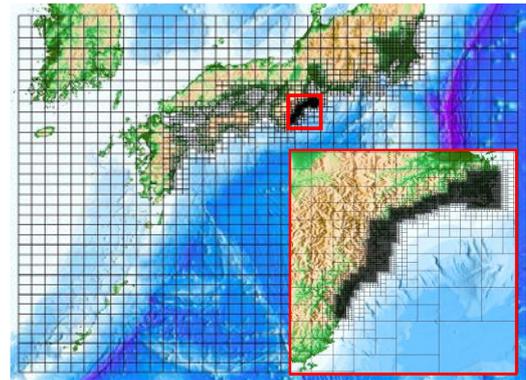


図3.9 津波数値計算の計算領域

(2) 地震の平均発生間隔

地震にはある平均的な発生周期が存在するという仮定の下、想定地震の平均発生間隔の設定方法がこれまで複数提案されている。これらは認識論的不確定性であるため、ロジックツリーの分岐として取り扱うことが望ましい。本研究では、南海トラフ巨大地震領域を対象としており、図3.10に示す3分岐を設定した。88.2年や116.9年は、いずれも推本(2020)が公表する南海トラフ巨大地震領域を対象とした平均発生間隔



図3.10 南海トラフ巨大地震の平均発生間隔に対するロジックツリーの分岐

の評価値であり、88.2年は高知県室津港における南海地震時の隆起量と地震発生間隔との関係から評価された値、116.9年は南海トラフ域で発生した過去の地震の発生間隔の単純平均値である。一方、地震の規模に対する地震の発生数の関係はGutenberg–Richter則（G-R則）で説明できることが古くから知られており、G-R則から計算された平均発生間隔をもう1つの分岐とすることが考えられる。対象とする南海トラフ域では様々なG-R則が提案されているが（例えば、丸山ら(2017)），ここでは、 $\log_{10}n = 7.01 - 1.03M_w$ を用いた。 n は年間の地震発生頻度の密度であり、これにより計算すれば、 $M_w 8.0$ 以上の地震の平均発生間隔は34.1年となった。

(3) ロジックツリーの分岐とその重み

ロジックツリーの分岐は、平均発生間隔の3分岐に対して、想定断層の $M_w 8.0$ から 9.0 までの間、 $M_w 0.2$ 刻みの6分岐があるため、計18分岐となる。合計が1となるよう各分岐に重みを設けて、パーセンタイル毎の評価をすることが可能である（土木学会, 2016）。平均発生間隔の3分岐は、それぞれ相違する観点から導出された平均発生間隔であり、分岐により重みを変化させることは困難と判断し、等重みとした。 M_w 毎の分岐の重みは設定した平均発生間隔により変化させた。すなわち、G-R則から計算した各 M_w の生起率を、 M_w の大きい方から順に和をとり、その逆数が、対象の平均発生間隔となるように重みを定めた。表3.1に結果を示す。

表3.1 各平均発生間隔に対する M_w 毎の分岐の重み

	平均発生間隔 88.2年	平均発生間隔 116.9年	G-R則による $M_w 8.0$ 以上の地震の平均発生間隔 34.1年
$M_w 9.0$	0.097	0.128	0.037
$M_w 8.8$	0.155	0.206	0.060
$M_w 8.6$	0.250	0.331	0.097
$M_w 8.4$	0.401	0.335	0.155
$M_w 8.2$	0.097	0	0.250
$M_w 8.0$	0	0	0.401

(4) 津波ハザード曲線

津波浸水深と年超過確率の関係である津波ハザード曲線は、各Mwでの津波浸水深の経験分布関数に偶然的な不確定性の考え方を適用し、図3.10に示す地震の平均発生間隔を乗じることで得られる。例として、図3.11に、地震のMw 6ケース、平均発生間隔3ケースの場合に、陸域のある地点を対象に生成したロジックツリーの分岐毎の津波ハザード曲線を示す。ロジックツリーの本数は $6 \times 3 = 18$ 本となる。ロジックツリーの各分岐に重みを設け、各浸水深の年超過確率の小さい方から重みを積み上げ、各パーセント点の年超過確率を取得していくことで、各パーセント点の津波ハザード曲線を構築する。図には、16パーセンタイル曲線（青線）、50パーセンタイル曲線（赤線）、および、84パーセンタイル曲線（緑線）を示した。また、以下の式(8)により、ロジックツリーの各分岐の重みを考慮した加重平均値を計算すれば、不確定性を内包したハザード曲線（紫線）を求めることができる。

$$H(h_i) = \sum_{k=1}^n w_k P_k(h_i) \quad (8)$$

ここで、 i : 対象地域におけるメッシュ番号、 h_i : メッシュ i での浸水深、 n : ロジックツリーの本数、 w_k : ロジックツリーの分岐 k に対する重み、 P_k : ロジックツリーの分岐 k での偶然的な不確定性を考慮した津波浸水深のハザード曲線である。

(5) 確率論的津波浸水深分布評価

平面の全メッシュで同様な計算を実行し、津波ハザード曲線から確率規模毎（150年・500年・1000年・2500年等）の浸水深を取得することで、確率論的に津波浸水深分布を評価した。図3.12に、50パーセント点の年超過確率を取得して評価した対象地域での計算結果を示す。当然ながら、確率規模が大きくなると、津波浸水領域が拡大していることが分かる。2500年に1度の確率規模の津波は、ASCE(2017)ではMaximum Considered Tsunami (MCT) と呼ばれ、考え得る最大クラスの津波と定められている。決定論的評価であるハザードマップに示される浸水領域に加え、このような確率論的評価に基づいた浸水領域を、要避難区域として設定することも考えられる。図3.13は同様に、84パーセント点の年超過確率を取得して評価した対象地域での計算結果である。図3.12の50パーセント点の結果と比較すると、浸水深が大きく、浸水領域が拡大していることが分かる。このように、ある確率規模の浸水深分布であっても、各パーセント点の評価結果を見ることで、その不確定性を考慮できる。

最後に、平均発生間隔の算出で用いるG-R則の変化が結果に与える影響を見る。これまで様々な切り口からのG-R則が多数提案されており、これらは認識論的不確定性の一種であると言える。G-R則の切片はa値、傾きはb値と呼ばれ、例えば、南海トラフ地震領域を対象として解析したNanjo and Yoshida (2018)によれば、b値がすべり欠損速度の関数として表現され、概ね1.0未満となっている。そこで、一例として、使用したG-R則のa値は固定し、b値を0.95とした場合の結果を確認する。b値の低下は、G-R則の勾配が小さくなることを意味し、各Mwの地震の発生確率が高く見積もられる。図3.14に同様な手法で評価した確率規模毎の津波浸水深分布（50パーセンタイル値）を示す。G-R則のb値1.03である図3.12と比較すると、浸水領域が拡大して

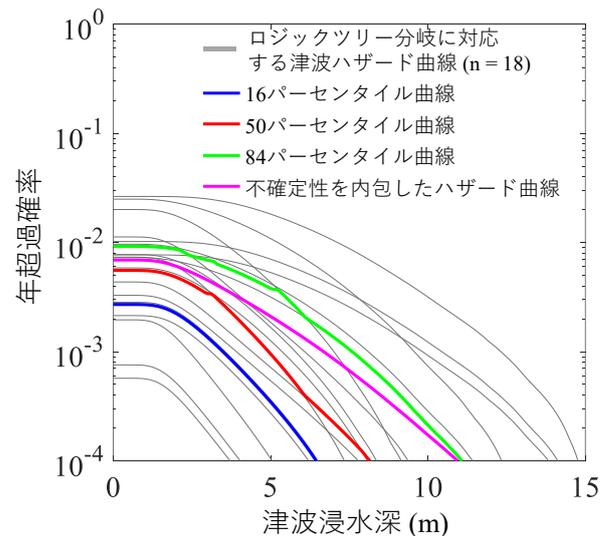


図3.11 陸域のある地点での津波ハザード曲線
(津波浸水深と年超過確率の関係)

おり、また、G-R則のb値1.03、84パーセンタイル値である図3.13と同程度の浸水領域となっている。このように、設定するG-R則によっては評価結果に影響を及ぼすため、複数のG-R則を用いて評価した複数の結果を比較、検討し、最終的に利用する結果を選択していく必要があると考えられる。なお、coRaL法のように地震断層の不均質なアスペリティモデルの結果をロジックツリーアプローチに取り込む研究として、手法は異なるが、Fukutani et al. (2015)やGoda et al. (2019)などがある。

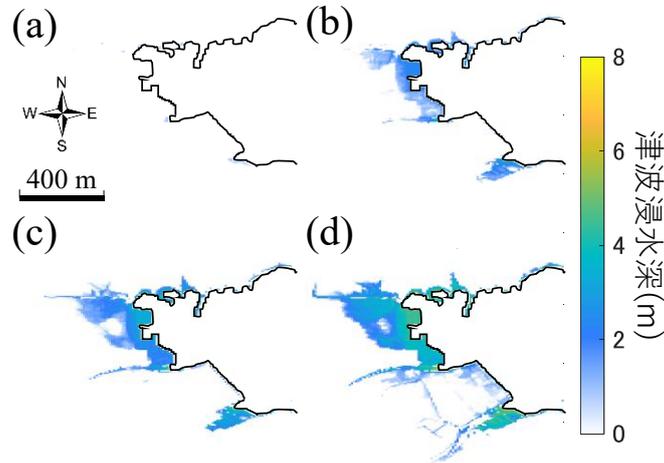


図3.12 確率規模毎の津波浸水深分布（50パーセンタイル値）(a)150年，(b)500年，(c)1000年，(d)2500年

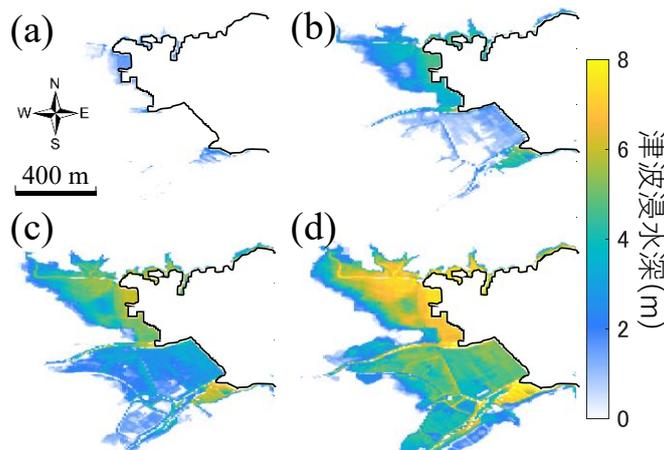


図3.13 確率規模毎の津波浸水深分布（84パーセンタイル値）(a)150年，(b)500年，(c)1000年，(d)2500年

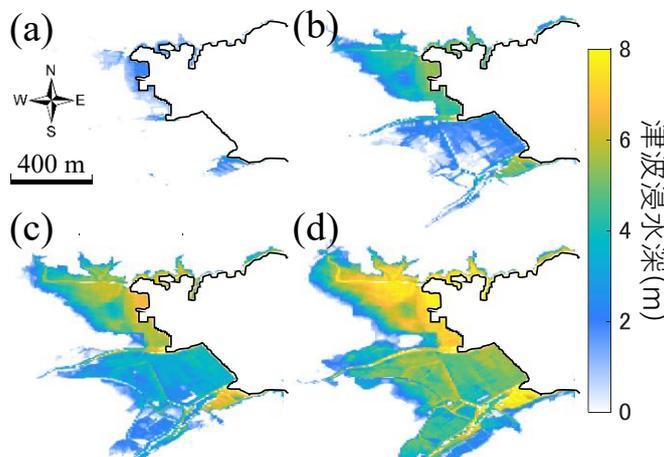


図3.14 G-R則のb値を0.95に変更した場合の確率規模毎の津波浸水深分布（50パーセンタイル値）
(a)150年，(b)500年，(c)1000年，(d)2500年

3.4 グリーン関数を用いたアプローチ -計算負荷の低減-

多数の地震断層を基にするPTHAは、基本的には、対応する多数の非線形長波方程式を解く必要があるため、通常は計算負荷が大きく、容易には実行できない。近年、このようなPTHAの計算負荷を如何に低減させ、効率良く計算できるかに焦点を当てた研究が盛んになってきている。Løvholt et al.(2012, 2015)は、計算負荷を抑えるため、Amplification Factor(AF)を用いる手法を提案している。この手法ではまず、想定する津波波源領域で、単位すべり波源を多数作成し、それによる水深50m地点での沖合津波波高を線形理論により事前に計算しておくグリーン関数 (Green's function) をデータベースとして作成する。そして、アスペリティ分布の変動を含む多数の想定地震断層に対して、波の線形重ね合わせにより、沖合における津波波高を評価する。この手法は、リアルタイム津波数値シミュレーションのアルゴリズムの一部としても頻繁に使用されている (図3.15)。沖合波高から沿岸波高(AH: Amplification height), 浸水高(MIH: Maximum inundation height)の評価には、増幅係数(AF: Amplification Factor)を掛けて評価する。AFは、非線形長波理論等による精度の高い津波数値計算を事前に実施し、地域によって、その係数を決定しておく (図3.16)。現在、主に欧州の沿岸地域を対象として、これを用いたPTHAや浸水深の不確定性評価手法、津波数値計算結果と比較した検証も行われ、その有効性が示されてきている (例えば、Davies et al. 2017; Glimsdal et al, 2019)。このように、計算負荷を抑えた確率論的評価が可能になれば、グローバルな領域を対象としたPTHAも可能となる。国際連合は2009年から国連防災白書 (GAR: Global Assessment Report)を隔年で発刊し、グローバルな領域を対象とした各自然災害の確率論的ハザード、リスク評価のデータを公表しているが、2019年に公表されたGAR2019 (UNDRR, 2019)では、このAF methodや関連する手法を用いた、グローバルを対象としたPTHAの結果が示されている。また、大西洋から地中海沿岸を含む欧州の広範囲に亘って確率論的津波浸水深分布評価を実施するTSUMAPS-NEAMSプロジェクト(Basili, R. et al., 2018)等があり、Webで計算結果が公開される等している。

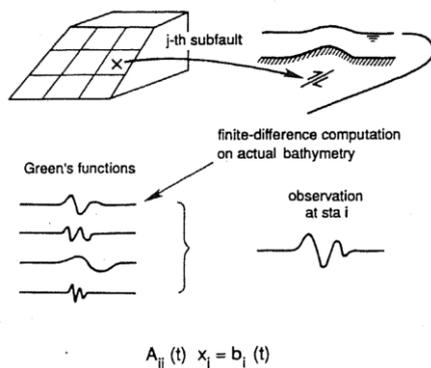


図3.15 Green's functionsによる沖合波高評価 (Satake and Imamura, 1995)

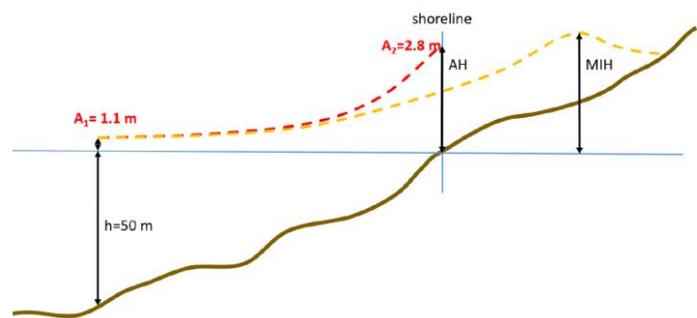


図3.16 沿岸波高 (水深50m) から沿岸波高/浸水高を評価する概念図。AH: Amplification height, MIH: Maximum inundation height (Glimsdal, 2019)

上述の手法は、計算負荷が大きい陸域の浸水深を迅速に評価する有用な手法であるが、内陸の地点によっては、AFを乗じるだけの単純化した評価では精度が劣る。そこで、Lorito et al. (2015)やVolpe et al. (2019)は、同様に多数の津波波源を用いて、沿岸波高まではGreen's functionによるアプローチを適用して予備的なPTHAを実施したが、その後、評価対象領域に影響の小さい波源や、ハザードへの寄与が同様の効果をもたらす似たような波源を削除するフィルターを掛けることで、当初設定した数を大幅に削減した津波波源を選別し、確率論的に津波浸水深を評価する手法を提案し、その検証も行っている (図3.17)。

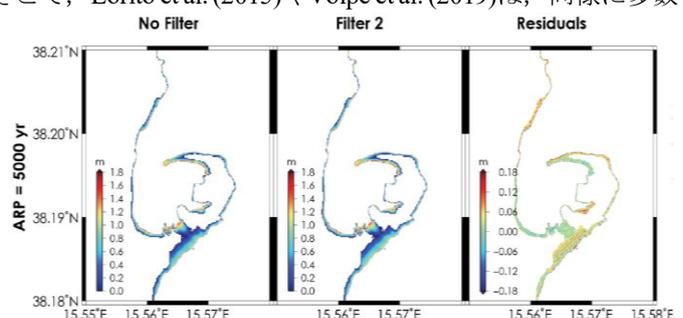


図3.17 Lorito et al. (2015)による確率論的津波浸水深 (再現期間5000年)の検証

3.5 モード分解法によるアプローチ -計算負荷の低減-

PTHAの計算負荷を低減させる観点で、本節では、固有直交分解から得られる特異値分解の関係をを用いて津波浸水深分布の空間モードを評価することで浸水深分布をランダムに生成し、さらに、地震動の切迫性を考慮した確率論的津波浸水深を評価する手法 (Fukutani et al., 2021) を概説する。

図3.18に本手法のPTHAの流れを示す。まず、津波浸水計算で用いる地震断層のパラメータを変化させることで、不確定性を考慮した地震断層を複数作成する。生成した地震断層に対して、Okadaの式(Okada, 1985)、および、非線形長波理論を用いて、津波数値計算を実行し、対象地域における津波浸水深、津波浸水分布を得る。複数の津波浸水深分布のデータから行列 \mathbf{X} を作成し、特異値分解 (SVD: Singular Value Decomposition) を適用することで、元の浸水深分布と同数の浸水モード分布に分解する。各浸水モード分布を線形結合することで、元の浸水深分布を完全に表現することができるが、適当な次元数に減じることで、元の浸水深分布をほぼ再現し、かつ、計算負荷を削減することができる。また、元の津波数値計算による浸水深の値が再現できるよう、線形結合の各係数を、Gaussian process regressionを用いて決定する。各係数が変化すれば、浸水深の空間相関は維持したままで、元の浸水深分布とは相違する浸水深分布が表現可能となる。以上のようにして生成した多数の津波浸水深分布に、固有地震の発生確率分布として知られるBrownian Passage Time (BPT) 分布を適用して、Time-dependent Monte-Carlo simulationを実行することで、例えば、今後50年に着目した対象地域全体の津波浸水深と超過確率の関係である条件付津波ハザード曲線、および、確率論的津波浸水域を生成することができる (図3.19)。以下では紙面の都合上、不確定性を考慮した複数の地震断層から計算した複数の浸水深分布データにSVDを適用して、浸水モードを抽出する箇所のみを概説する。

まず、非線形長波理論で計算した各メッシュ点 i での浸水深行列を $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i)^T$ と定義する。地震断層の不確定性を考慮した解析ケース数を j 、各解析ケースの浸水深データを \mathbf{x}_j として、式(9)のように浸水深のデータ行列 \mathbf{X} を生成する。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_j) = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} \end{pmatrix} \quad (9)$$

\mathbf{X} は多くの場合、非正方行列となる。このデータ行列 \mathbf{X} に対して、式(10)の特異値分解を適用する。

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \begin{pmatrix} | & \dots & | \\ \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{u}_j \\ | & \dots & | \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} - & \mathbf{v}_1 & - \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ - & \mathbf{v}_j & - \end{pmatrix}^T \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{U} はモード j の列ベクトル \mathbf{u}_j からなる左特異ベクトル、 \mathbf{V} はモード j の列ベクトル \mathbf{v}_j からなる右特異ベクトル、 $\mathbf{\Sigma}$ は特異値 λ (固有値 σ の平方根) を対角要素に並べた対角行列である。共分散行列との関係から、メッシュ間の空間相関に関する情報は、左特異ベクトル \mathbf{U} と特異値 $\mathbf{\Sigma}$ に集約される。左特異ベクトル \mathbf{U} により、津波浸水深分布の固有モードを評価することができる。特異値 λ は、全体に対する各モードの影響の多寡を示している。式(10)の特異値分解の関係より、あるケース j の浸水深の列ベクトル \mathbf{x}_j は、式(11)の通り変形できる。

$$\mathbf{x}_j = \sum_{k=1}^N \mathbf{u}_k (\lambda_k \mathbf{v}_{kj}^T) = \sum_{k=1}^N (\lambda_k \mathbf{v}_{jk}) \mathbf{u}_k = \sum_{k=1}^N (\alpha_{jk}) \mathbf{u}_k \quad (11)$$

ここで、 N は全モードの数、 α_{jk} は、特異値と右特異ベクトルを掛け合わせたモード k に対する第 j ケースの係数として表す。このように、浸水深の列ベクトル \mathbf{x}_j は、各モード値の線形和として表現できることが分かる。特異値 λ により表現される各モードの影響度を考慮して、影響度の低いモードだけを除去することで、次元を削減した代理モデルを生成することができる。例えば、影響度の高いモード1からモード R までの線形和として代理モデルを生成すると、式(12)となる。

$$\mathbf{x}_j = \sum_{k=1}^R (\alpha_{jk}) \mathbf{u}_k \quad (12)$$

この式より、モード k の列ベクトル \mathbf{u}_k の係数 α_{jk} を入力パラメータ (すべり量、断層深さ、すべり分布など)

の応答として表現することで、入力パラメータの確率分布を考慮した浸水深分布をランダムに多数生成することができる。

現在、このモード分解法を用いたリアルタイム津波数値シミュレーションの試み（外里ら, 2020; Tozato et al. 2021）も為されており、今後の展開が期待される。

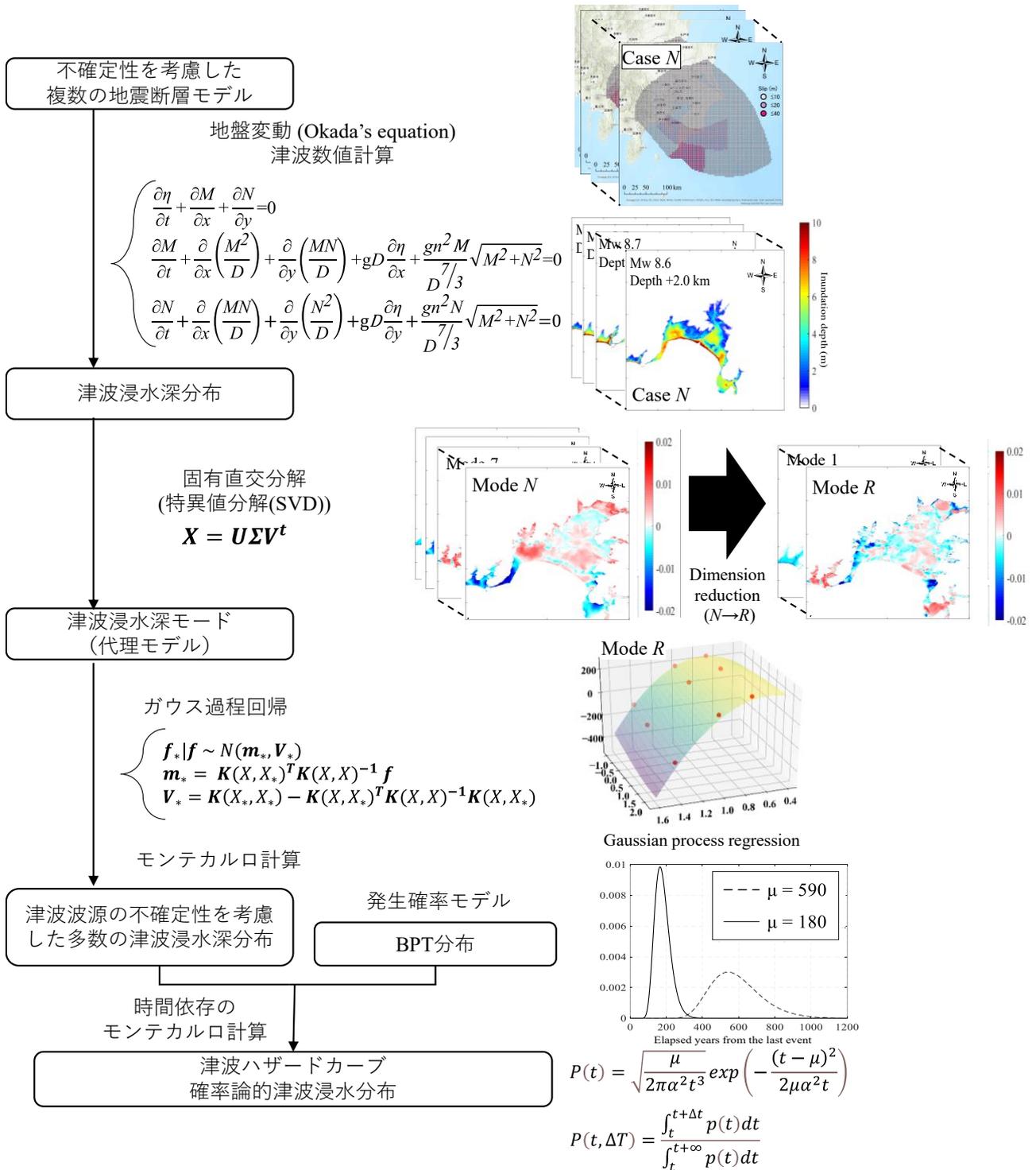


図3.18 モード分解を用いた確率論的津波ハザード評価 (Fukutani et al., (2021)より抜粋)

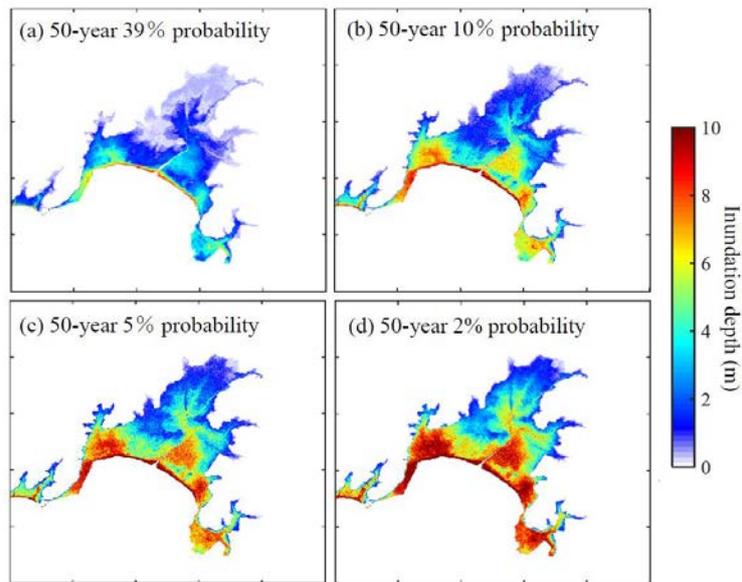


図3.19 モード分解法により評価した確率論的津波浸水深分布 (Fukutani et al., 2021)

4. 確率論的津波ハザード評価の利活用

本章では、3章で概説したPTHAのアウトプットである対象地域の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は、具体的にどのような分野で利活用されるか、複数の事例を挙げる。

4.1 減災まちづくり

2011年の東北地方太平洋沖地震直後、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」（中央防災会議, 2011）では、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、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、もう一つは、防波堤や海岸堤防等の構造物によって、津波の内陸への侵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であるとした。前者は、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（1000年に一度程度の発生確率）、後者は、L1津波と呼び、発生頻度は高く津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波（数十年から数百年に一度程度の発生確率）である。これを受け、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」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る、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曖昧であり客観性に乏しいうえ、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なる。このような津波の評価は、本来であれば、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の手法を準用すべきと考えられる。土木学会減災アセスメント小委員会(2021)では、「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」を公表し、海岸堤防等の天端高については、L1津波高だけではなく、例えば、PTHAを実施し、再現期間50年程度、100年程度、150年程度等の複数の津波を想定し、背後地の利用状況を考慮したうえで、それぞれに対して経済的な被害評価（津波リスクアセスメント）を行い、堤防建設費用等との費用対効果を考えて、効率性の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という方法を提案した。また、南海トラフ沿いの地域を考えると、L1津波に対応した海岸堤防を計画したとしても、必要とされる事業規模に対して予算上の制約から計画を達成するまでに年月を

必要とすることも想定され、津波外力を対象とした海岸堤防の高さは、L1津波の高さで計画・整備されるもの以外に、このように予算制約等の理由からL1津波の高さで計画しつつ暫定形で整備されるもの、環境保全や周辺環境との調和の観点等からL1津波の高さよりも低い高さを整備目標として設定されるものに分類できる、とした(図4.1)。詳細は、上記の技術ガイドラインを参照されたい。

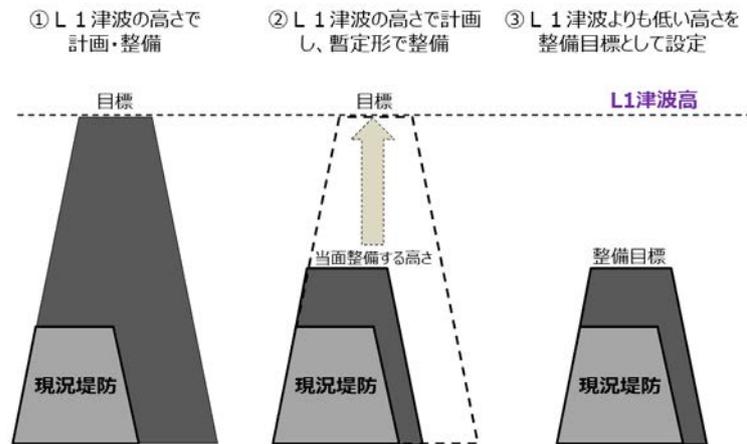


図4.1 海岸堤防の高さのパターン(土木学会減災アセスメント小委員会, 2021)

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、各地域で発生が想定される最大の地震を想定する。これまで、国は、2012年に南海トラフ巨大地震(M9.1)(内閣府, 2012)、2013年に相模トラフ沿いの海溝型地震(Mw8.7)(内閣府, 2013)、2016年に日本海における最大クラスの津波断層(最大Mw7.9)(国土交通省, 2016)、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)(内閣府, 2020)、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慎重に想定地震の領域や規模を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。PTHAは、津波の発生、伝播、遡上の各過程での不確定性を取り扱い、再現期間毎の津波ハザードを評価できるため、地域によっては想定されている最大クラスの津波想定を上回る津波ハザード評価の結果を出力することも可能である。決定論的評価である津波浸水想定区域図に示される浸水領域に加え、このようなPTHAに基づいた浸水領域を、住民の要避難区域として設定することも考えられる。以前、内閣府・国交省(2004)では、地域の実状に留意して安全側となるように、津波浸水想定区域の外側に、予測の不確定性を考慮したバッファゾーンを設定することが重要(図4.2)、としていたが、このような不確定性を考慮したバッファゾーンを評価する際に、PTHAの知見が重要となるように考えられる(福谷ら, 2019)。

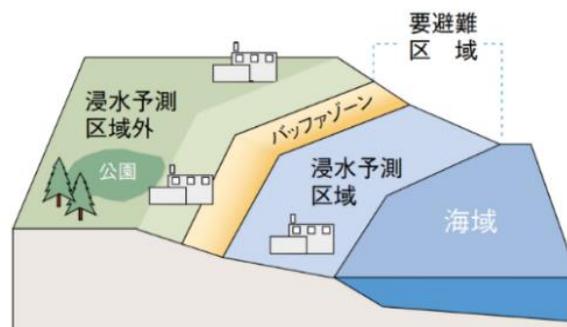


図4.2 バッファゾーンの概念図(出展:内閣府・国交省など, 2004)

4.2 原子力安全

原子力安全分野では、原子力発電所の安全機能喪失ならびに放射能ハザードの顕在化のリスクを多様な観点から定量的に評価することが求められる。このようなリスクは決定論的に評価できるものではなく、確率論的に評価する必要がある。これを確率論的リスク評価（PRA: Probabilistic Risk Assessment）と呼び、災害ハザードと対象の脆弱性を考慮することで、対象のリスクを評価する。津波に対しては津波PRAと呼ばれ、PTHAの知見を活用して津波ハザードを評価し、原子力発電所の建屋・機器の条件付き損傷確率評価等と合わせて炉心損傷等のリスクが算出される（日本原子力学会, 2019）（図4.3）。一般的な減災のための津波ハザード評価とは相違する大きな特徴の一つとして、最大津波波高に対する津波ハザード曲線を算出するだけではなく、冷却水の取水不可等のリスクを考慮して、水位下降側の津波ハザード曲線を算出すること等が挙げられる（佐藤ら, 2019）。津波に限らず、自然災害に対する確率論的リスク評価の手法は、主に原子力安全分野を中心に発展してきたとも言える。

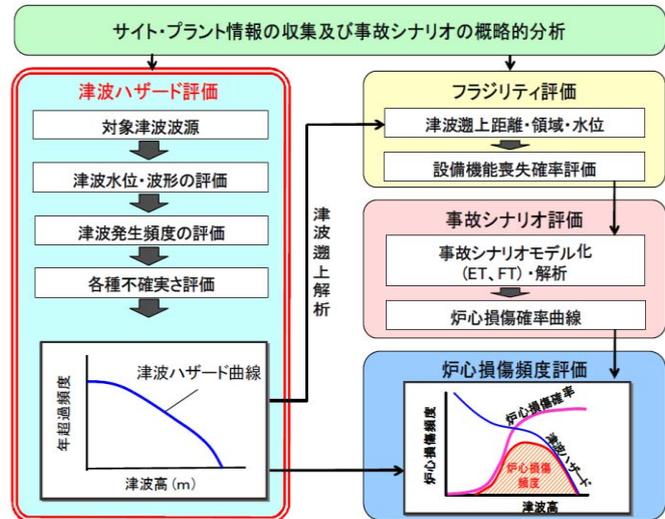


図4.3 津波PRA手法の手順

（原子力安全基盤機構（現：原子力規制庁），2014）

4.3 グローバルな自然災害リスク評価

国際連合等の国際機関やグローバルに展開する一般事業者等が、自然災害リスクに対する各種の意思決定をするためには、自然災害リスクを世界規模の視点で評価しておくことが重要となる。前述のように、国際連合は、2009年から隔年で、グローバルな領域を対象とした各災害の確率論的ハザード、リスク評価のデータを国連防災白書（GAR: Global Assessment Report）として公開している。図4.4は、国連が公開する世界全体を対象とした津波によるAverage annual loss（年平均津波損害額）の評価結果である。これは、簡易なPTHAの評価結果を基に、各地域での資産等の被害を考慮して算出されている。また、グローバルな自然災害リスク評価は、グローバルに事業を展開する一般事業者のポートフォリオリスク評価等のためにも活用されている。ポートフォリオとは、事業者が保有する資産全体のことであり、このような事業者は、事業所や資産が世界中の広範に亘って存在するため、これらが曝露される確率論的な自然ハザードと資産の脆弱性を考慮して、世界規模の視点で確率論的リスク評価を実施し、自社が保有する自然災害リスクを定量的に評価することで、経営の意思決定や事業継続計画（BCP）等の策定に活かすこともある。特に、Swiss ReやMunich Reに代表される世界の大規模な再保険会社や保険ブローカー等は、世界中に資産、契約者が存在し、ポートフォリオはグローバルに存在する。津波ハザード評価に関して言えば、このような対象全てに対して、計算負荷の高いPTHAによりリスク評価を実施することは実務上現実的ではなく、計算負荷を低減させるか、ある程度簡略化した計算手法を用いて評価する必要がある。



図4.4 Global Assessment ReportのTsunami average annual loss（年平均津波損害額）の分布（UNEP/GRID-Geneve, 2013）

る。保険会社やブローカー等は自社開発モデルや、モデル開発会社と連携して独自の自然災害リスク評価モデルを構築し、確率論的ハザード情報を公開しているところもある。このような評価の際、3.4や3.5で紹介したグリーン関数的アプローチやモード分解法を用いれば、計算負荷を低減し、かつ、信頼性の高い確率論的津波リスク評価が可能になると考えられる。

5. おわりに

本稿では、津波ハザード評価の基本的な流れ、確率論的津波ハザード評価の歴史や、幾つかの具体的なPTHAの手法、更に、これらの具体的な利活用方法を、事例を交えて紹介した。冒頭にも記載したように津波ハザード評価には、発生、伝播、遡上の各過程の評価で大きな不確定性が伴うため、不確定性を定量的に評価するPTHAが有効である。技術的には今後、不確定性の大きい陸域の浸水深に対する評価手法の研究の進展が見込まれる他、多くの不確定性を取り扱う際の計算負荷の低減に関する研究なども期待される。後者は、スーパーコンピュータや各種の大型計算機の登場による計算速度の向上との兼ね合いもあるが、計算結果の精度を担保したまま、データの特性を活かした計算負荷を低減する手法の研究開発は、今後も重要な位置付けになるであろうと思われる。本稿でも紹介したように現在でも様々なPTHAの手法が提案されている中で、今後これら様々な手法による計算結果を慎重に比較、検討していくことも重要であると考えられる。PTHAでは、津波現象の不確定性を定量的に評価するための各種条件や仮定が置かれるが、それらをどのように設定したか、また、扱っている不確定性やその処理方法が適切であるか、という観点で各手法の相違点を理解したうえで、計算結果を判断していく必要がある。

謝辞

本稿の一部の内容は、土木学会の海岸工学委員会と土木計画学研究委員会が協働する減災アセスメント小委員会（小委員長：多々野裕一、北野利一）での有意義な議論を通して導かれた成果であり、ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 有川太郎，宮内俊晴，北野利一，福谷陽，渡部真史：防護施設の脆弱性の違いによる背後地域の津波浸水確率への影響，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.77，No.2，2021。（投稿中）
- 北野利一，安田誠宏，福谷陽：確率津波シミュレーションに係るサンプルサイズの決め方，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.76，No.2，pp.I_361-I_366，2020。
- 栗田哲史，松山昌史，内野大介：東北地方太平洋沖地震津波の痕跡値を用いた津波解析のばらつき評価，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.I_216-I_220，2013。
- 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。
- 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，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchou sa/，2016。
- 是永真理子，阿部雄太，橋本紀彦，秋山伸一，藤原広行：確率論的津波ハザード評価における不確かさの取り扱いについて，日本地球惑星科学連合同学会，SSS35-P06，2013。
- 佐藤嘉則，栗田哲史，木村達人，松山昌史，森勇人：津波による取水設備内水位の確率論的評価手法に関する検討，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.75，No.2，pp.I_877-I_882，2019。
- 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の確率論的津波評価，78p.，2020。
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf。
- 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。
- 杉野英治，岩渕洋子，橋本紀彦，松末和之，蛭澤勝三，亀田弘行，今村文彦：プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案，日本地震工学会論文集，Vol.14，No.5，pp.5_1-5_18，2014。
- 杉野英治，岩渕洋子，阿部雄太：破壊伝播特性の不確かさ影響を考慮した確率論的津波ハザード評価手法，日本地震工学会論

- 文集, Vol.17, No.2, pp.2_108-2_127, 2017.
- 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，
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/index.html>, 2011.
- 外里健太, 小谷拓磨, 波多野僚, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 大竹雄：数値解析結果の空間モード分解による津波の
 リスク評価, 日本計算工学会論文集, Paper No.20200003, 2020.
- 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術, 2002.
- 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.
- 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.
- 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.
- 内閣府(防災担当), 国土交通省河川局, 国土交通省港湾局, 農林水産省農村振興局, 農林水産省水産庁：津波・高潮ハ
 ザードマップマニュアルの概要, 8p., <http://www.mlit.go.jp/common/000054428.pdf>, 2004.
- 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>, 2012.
- 内閣府, 首都直下地震モデル検討会, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/index.html>, 2013.
- 内閣府：日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会, http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/model/, 2020.
- 日本原子力学会：原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2016 (AESJ-SC-
 RK004:2016), 186p., 2019.
- 福谷陽, 倉橋和也, 島袋宗和, 志田一樹：津波ハザードマップに記載されるバッファゾーンの現状と課題—複数市町村の
 設定事例と平塚市での数値実験例—, 地域安全学会論文集, No.35, pp.173-179, 2019.
- 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, 2021. (投稿中)
- 防災科学技術研究所：J-THIS津波ハザードステーション, <https://doi.org/10.17598/nied.0016>, 2020.
- 丸山拓真, 安田誠宏, Katsuichiro Goda, 森信人：地震のスケーリング則を考慮した津波水位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.
- 安田誠宏, 田中晴規, 繁田航平, 谷口純一, 北野利一：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, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.I_367-I_372, 2020.
- Aida, I.: Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, Vol.26, pp.57-73, 1978.
- 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.
- American Society of Civil Engineers (ASCE): ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and
 Other Structures, Reston, VA, USA, 2017.
- Anderson, J. G. and Brune, J. N.: Probabilistic seismic hazard analysis without the ergodic assumption, *Seismol. Res. Lett.* 70, pp.19-28, 1999.
- Basili, R., Brizuela, B., Herrero, A., Iqbal, S., Lorito, S., Maesano, F.E., Murphy, S., Perfetti, P., Romano, F., Scala, A., Selva, J., Taroni, M.,
 Thio, H.K., Tiberti, M.M., Tonini, R., Volpe, M., Glimsdal, S., Harbitz, C.B., Løvholt, F., Baptista, M.A., et al.: NEAM Tsunami Hazard
 Model 2018 (NEAMTHM18): online data of the Probabilistic Tsunami Hazard Model for the NEAM Region from the TSUMAPS-NEAM
 project. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2018.
- Cornell, C. A.: Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- Crempien, J., Urrutia, A., Benavente, R., and Cienfuegos, R.: Effects of earthquake spatial slip correlation on variability of tsunami
 potential energy and intensities, *Scientific Reports*, 10, 8399, 2020.
- Davies, G., Horspool, N., and Miller, V.: Tsunami inundation from heterogeneous earthquake slip distributions: Evaluation of
 synthetic source models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 2015.
- Davies, G., Griffin, J., Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C., Thio, H., et al.: A global probabilistic tsunami hazard assessment from
 earthquake sources. Geological Society, London, Special Publications, 456, SP456.455, 2017.
- Fukutani, Y., Anawat, S., and Fumihiko, I.: Stochastic analysis and uncertainty assessment of tsunami wave height using a random source
 parameter model that targets a Tohoku-type earthquake fault, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol.29, No.7,
 pp.1763-1779, 2015.
- Fukutani, Y., Anawat, S., and Fumihiko, I.: Uncertainty in tsunami wave heights and arrival times caused by the rupture velocity in the strike
 direction of large earthquakes, *Natural Hazards*, Vol.80, No.3, pp.1749-1782, 2016.
- Fukutani, Y., Moriguchi, S., Terada, K., and Otake, Y.: 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.

- Geist, E. L.: Complex earthquake rupture and local tsunamis, *J. Geophys. Res.*, 107, ESE2-1–ESE2-15, 2002.
- Geist, E. L.: Local Tsunami Hazards in the Pacific Northwest from Cascadia Subduction Zone Earthquakes. U.S. Geological Survey Professional Paper 1661-B, 17 pp, 2005.
- Geist, E. and Parsons, T.: Probabilistic analysis of Tsunami Hazards, *Nat. Hazards*, Vol.37, pp.277-314, 2006.
- Glimsdal, S., Løvholt, F., Harbitz, C., Romano, F., Lorito, S., Orefice, S., et al.: A new approximate method for quantifying tsunami maximum inundation height probability. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 3227-3246, 2019.
- Goda, K., Mai, P.M., Yasuda, T., and Mori, N.: Sensitivity of Tsunami Wave Profile and Inundation Simulations to Earthquake Slip and Fault Geometry for the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, 66:105, 20pp., 2014.
- Goda, K.: Time-dependent probabilistic tsunami hazard analysis using stochastic rupture sources, *Stoch Environ Res Risk Assess*, Vol.33, pp.341-358, 2019.
- Karhunen, K.: Ueber lineare Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Helsinki, Finland: Universitat Helsinki, 1947.
- Kotani, T., Tozato, K., Takase, S., Moriguchi, S., Terada, K., Fukutani, Y., Otake, Y., Nojima, K., Sakuraba, M., and Choe, Y.: Probabilistic tsunami hazard assessment with simulation-based response surfaces, *Coastal Engineering*, Vol.160, 103719, 2020.
- LeVeque, R., Waagan, K., González, F., Rim, D., and Lin, G.: Generating random earthquake events for probabilistic tsunami hazard assessment. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.173, pp.3671-3692, 2016.
- Loève, M.: Probability theory. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1977.
- Lorito, S., Selva, J., Basili, R., Romano, F., Tiberti, M. M., and Piatanesi, A.: Probabilistic hazard for seismically induced tsunamis: Accuracy and feasibility of inundation maps. *Geophysical Journal International*, Vol.200, Issue.1, pp.574-588, 2015.
- Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Zamora, N., Nadim, F., Peduzzi, P., et al.: Tsunami hazard and exposure on the global scale, *Earth-Science Reviews*, 110(1-4), pp.58-73, 2012.
- Løvholt, F., Griffin, J., and Salgado-Gálvez, M. A.: Tsunami hazard and risk assessment on the global scale. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of complexity and systems science* (pp. 1–34). Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- Melgar, D., LeVeque, R. J., Dreger, D. S., and Allen, R. M.: Kinematic rupture scenarios and synthetic displacement data: An example application to the Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9), 6658-6674, 2016.
- Mueller, C., Power, W., Fraser, S., and Wang, X.: Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 488-502, 2014.
- Nanjo, K.Z., and Yoshida, A.: A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes. *Nature Communications*, Vol.9, 1117, 2018.
- Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135-1154, 1985.
- Schwab, C., and Todor, R. A.: Karhunen–Loève approximation of random fields by generalized fast multipole methods. *Journal of Computational Physics*, Vol. 217(1), pp.100-122, 2006.
- Sepúlveda, I., Liu, P. L. F., Grigoriu, M., and Pritchard, M.: Tsunami hazard assessments with consideration of uncertain earthquake slip distribution and location. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(9), 7252-7271, 2017.
- Satake, K., and Imamura, F.: Tsunamis: seismological and disaster prevention studies. *J. Phys. Earth* 43, 259-277, 1995.
- Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC): Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts. NUREG/CR-6372 UCRL-ID-122160 Vol. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 256p., 1997.
- Toro, G. R., Abrahamson, N. A., and Schneider, J. F.: Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties, *Seismol. Res. Lett.* 68, 41-57, 1997.
- Tozato, K., Takase, S., Moriguchi, S., Terada, K., Otake, Y., Fukutani, Y., Nojima, K., Sakuraba, M., and Yokosu, H.: Real-time Tsunami Force Prediction by Mode Decomposition-Based Surrogate Modeling, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2021. (preprint)
- UN Environment Programme (UNEP) / GRID-Geneva: Global Risk Data Platform, <https://preview.grid.unep.ch/index.php?preview=home&lang=eng>, 2013.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR): Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/full_gar_report.pdf, 2019.
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC): Guidance for Performing Probabilistic Seismic Hazard Analysis for a Nuclear Plant Site: Example Application to the Southeastern United States, NUREG/CR-6607, 138p, 2002.
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC): Guidance for Performing Tsunami, Surge, or Seiche Hazard Assessment, JLD-ISG2012-06, 52p, 2013.
- Volpe, M., Lorito, S., Selva, J., Tonini, R., Romano, F., and Brizuela, B.: From regional to local SPTHA: Efficient computation of probabilistic tsunami inundation maps addressing near-field sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(3), 455-469, 2019.