

「確率論的津波ハザード解析における津波発生・伝播モデルの不確かさの影響」について（案）

令和 4 年 9 月 29 日
地震・津波研究部門

1. 背景

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下「設置許可基準規則」という。）第5条では、設計基準対象施設は、基準津波に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならぬと規定されている。また、設置許可基準規則解釈別記3において、策定された基準津波については、その水位の超過確率を把握することを求めている。さらに、「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」では、確率論的津波ハザード評価（以下「PTHA」という。）により当該超過確率を求め、その値が参照されていることを確認する、としている。

PTHA 手法では、津波発生・伝播モデルには不確かさが伴うため、偶然的な不確かさと認識論的不確かさに分類して考慮することが一般に行われる。しかし、従来の PTHA 手法（例えば、土木学会¹⁾、杉野ら²⁾、地震調査研究推進本部³⁾）では、津波発生・伝播モデルには不確かさが存在するが、その影響が考慮されていないモデルもある。

そこで、原子力規制庁では、従来の PTHA 手法に見られる上記の課題を解決するために、安全研究プロジェクト「津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究（実施期間：平成29年度～令和2年度）」のうち、「(1) 地震起因の津波の確率論的ハザード評価手法の信頼性向上」の「a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備」を研究テーマとして実施した。そして、その研究成果の一部が日本地震工学会論文集に公表¹⁾された。本論文の内容は、現行規制基準の超過確率に関連する情報であることから、その内容と今後の対応について報告する。

2. 本論文の内容と得られた新知見

本論文の概要は、以下のとおりである。

- 著者らは、プレート間地震による津波を対象に、従来の PTHA 手法¹⁾⁻³⁾における課題を提示し、その解決策を提案するとともに、提案手法をモデルサイトに適用して、不確かさ項目が PTHA の結果に及ぼす影響を比較分析した。

¹⁾ 杉野英治、阿部雄太：確率論的津波ハザード解析における津波発生・伝播モデルの不確かさの影響、日本地震工学会論文集、第22巻、第4号、pp. 1-22、2022.

- 1つ目の課題として、従来手法では地震規模に係るスケーリング則²、地震発生頻度に係るグーテンベルグ・リヒター則³の各モデルの不確かさを考慮していない（平均値のみを考慮し、確率分布を考慮していない）ことを挙げた。著者らは、これらの既往研究を基に不確かさを定量的に評価し、確率モデルを設定した。そして、これらのモデルを導入した PTHA 手法を提案した。新たに導入したモデルを図 1、図 2 及び図 3 に示す。

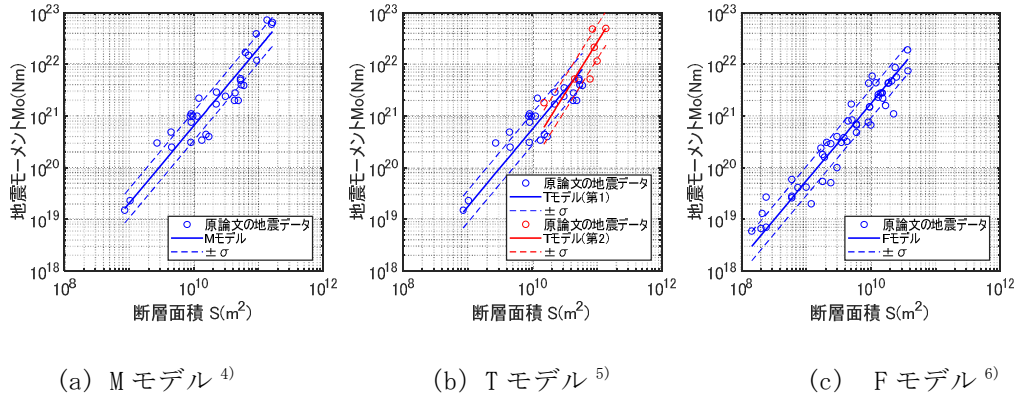


図 1 地震規模に係るスケーリング則の各モデル

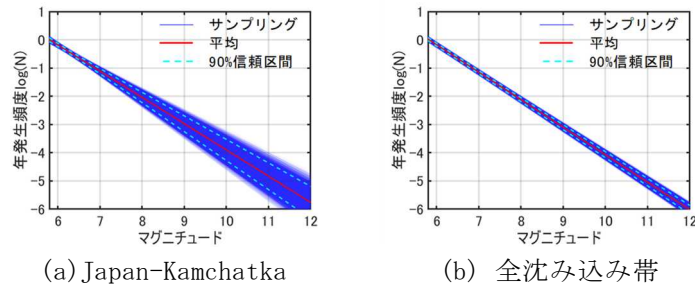


図 2 地震発生頻度に関する GR モデル⁷⁾

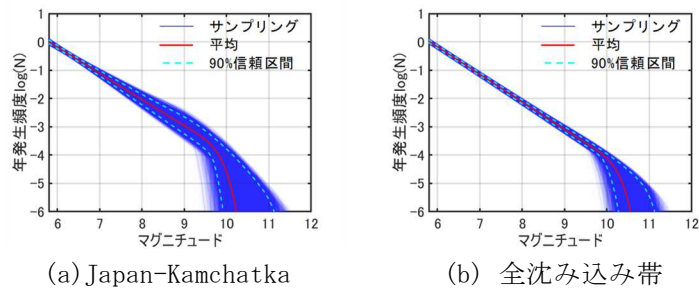


図 3 地震発生頻度に関する Tapered GR モデル⁸⁾

² 地震規模に係るスケーリング則とは、過去の地震のデータ（例えば、断層面積と地震モーメント）を近似した平均的傾向を表す経験式（回帰モデル）のこと。

³ 地震発生頻度に係るグーテンベルグ・リヒター則とは、地震の発生頻度と規模の関係を表す法則であり、縦軸を発生頻度の対数とした片対数グラフ上で直線関係を表す回帰式がよく知られている。また、これを改良した方法も提案されている。

- 2つ目の課題として、従来の PTHA 手法では、偶然的不確かさは1本の津波ハザード曲線で、認識論的不確かさは複数の津波ハザード曲線で表現するとされ、ハザード曲線の本数として現れるのは認識論的不確かさの影響のみとなり、偶然的不確かさと認識論的不確かさの両者の不確かさの影響を比較することができないことを挙げた。著者らは、両者の不確かさを同じように扱えるよう、層別サンプリング法⁴及びラテン超方格法⁵を組み合わせた方法を提案した。そして、両者が共にハザード曲線の本数やその拡がりとして明示的に表し、両者の不確かさの影響を比較できるようにした。
- さらに、著者らは、地震規模に係るスケーリング則及び地震発生頻度に係るグーテンベルク・リヒター則の各モデルの不確かさのほかに、津波波源の不均一すべり分布の配置パターン及び津波伝播モデルの不確かさを考慮して、福島県沖を例として PTHA を実施した。
- そして、上記の四つの不確かさ項目について、不確かさを考慮した確率モデルと不確かさを考慮しない平均モデルとしたときの違いやロジックツリー分岐が PTHA 解析結果に及ぼす影響を定量的に評価し、その結果、福島県沖での適用事例では、今回検討した中では図1の(a)～(c)に示す地震規模に係るスケーリング則の不確かさの影響が最も大きいことを示した。解析条件を表1に、解析結果を図4にそれぞれ示す。
- なお、著者らは、本提案手法において、水深が比較的深い沖合の地点を対象とすることにより、地震モーメントと津波高に比例関係が成り立つことを仮定したため、非常に大きい地震モーメント（確率は低い）に対応する極めて高い津波高が推定された。著者らは今後の課題として、津波高の成長限界やプレート間地震の地震モーメントの上限に関するモデルの検討の必要性を示している。

表1 不確かさ項目と取扱い方法一覧

ケース No.	地震規模に係るスケーリング則	地震発生頻度に係る GR 則	不均一すべりの配置パターン	津波伝播モデル
1	確率モデル	確率モデル	確率モデル	確率モデル
2	平均モデル	平均モデル	平均モデル	確率モデル
3	平均モデル	確率モデル	確率モデル	確率モデル
4	確率モデル	平均モデル	確率モデル	確率モデル
5	確率モデル	確率モデル	平均モデル	確率モデル

⁴ 層別サンプリング法とは、母集団を適当な数の層に分割し、各層でランダムサンプリングを行う方法をいう。ランダムサンプリングの質や効率の向上が見込まれる。

⁵ ラテン超方格法とは、実験計画法の一つであり、2次元のラテン方格をn次元に拡張したものをいう。n個の因子をそれぞれm層の層別サンプリングを行い、ランダムなm組の組合せを設定することにより、試行回数を減らすことができる。

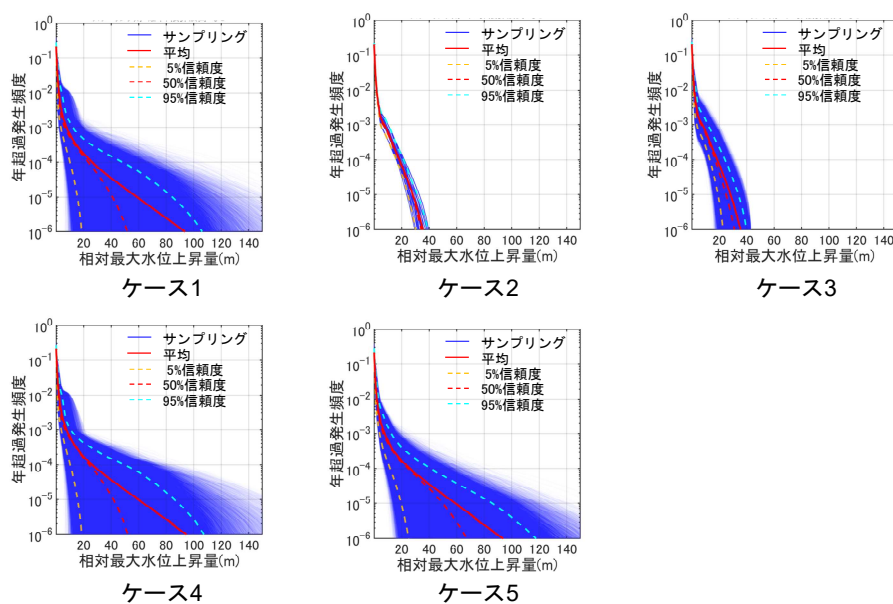


図 4 PTHA 解析結果

3. 今後の対応

本論文では、プレート間地震による津波を対象に、PTHA 手法においてこれまで考慮されていなかった地震規模に係るスケーリング則及び地震発生頻度に係るグーテンベルク・リヒター則の各モデルの不確かさを定量的に評価し、確率モデルを設定した。また、不確かさを考慮する方法とその適用事例を示した上で、地震規模に係るスケーリング則の不確かさが評価結果に大きく影響することを示した。

「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」の「4. 超過確率の参照」は、「津波発生モデル及び津波発生・伝播の数値モデルの不確かさ⁶を考慮して、（中略）津波水位とその超過確率との関係を表す津波ハザード曲線が算定されていることを確認する。」としている。本論文の知見は、「津波発生モデルの不確かさ」の具体的な項目とその導入方法を提案したものであり、この審査ガイドに反映すべき事項はない。

PTHA は、安全性向上評価においても実施する項目⁷である。本知見では、地震規模に係るスケーリング則の不確かさの考慮の仕方により、事業者の PTHA の評価結果に大きな影響を与える可能性が見出された。そのため、ATENA 定例面談等で事業者に対して周知することとしたい。

⁶ 「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」及び「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」の中では「不確かさ」と表現されており、そのまま引用した。一方、論文の中では「不確かさ」と表現した。両者は、同義である。

⁷ 「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では、「参考資料 1 確率論的リスク評価 (PRA) 実施手法の例」の PTHA に際し、「波源モデル及び津波伝播モデルの不確かさ要因の分析に関連する情報も併せて収集する。」としている。

参考文献

- 1) 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, 2016.
- 2) 杉野英治ほか：確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響，日本地震工学会論文集，2015.
- 3) 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，2020.
- 4) Murotani, S., Satake, K. and Fujii, Y.: Scaling Relations of Seismic Moment, Rupture Area, Average Slip, and Asperity Size for M~9 Subduction Zone Earthquakes, *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp. 5070–5074, 2013.
- 5) 田島礼子，松元康広，司宏俊，入倉孝次郎：内陸地殻内および沈み込みプレート境界で発生する巨大地震の震源パラメータに関するスケーリング則の比較研究，地震第2輯，Vol. 66, pp. 31-45, 2013.
- 6) 藤原広行，平田賢治，中村洋光，長田正樹，森川信之，河合伸一，大角恒雄，青井 真，松山尚典，遠山信彦，鬼頭 直，村嶋陽一，村田泰洋，井上拓也，斎藤 龍，秋山伸一，是永真理子，阿部雄太，橋本紀彦：日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，Vol. 400, pp. 49-52, 2015.
- 7) Gutenberg, R. and Richter, C. F.: Frequency of Earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34, pp. 185–188, 1944.
- 8) Kagan, Y. Y.: Seismic Moment Distribution Revisited: I. Statistical Results, *Geophysical Journal International*, Vol. 148, No. 3, pp. 520–541, 2002.