

# 共同研究成果報告書

## 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定 方法に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立大学法人東北大学

東北学院大学

令和6年12月

## 1. 研究目的

従来の津波評価における初期水位の設定では、海底の地殻変動の鉛直変位のみを海面に与える方法が用いられてきた<sup>1,2</sup>。平成29年に地震調査研究推進本部が公表した「津波レシピ」<sup>3</sup>では、地殻変動の鉛直変位に加え、地殻変動の水平変位による鉛直成分への寄与（以下「水平変位の寄与」という。）を考慮する方法<sup>4</sup>（以下「TS法」という。）が採用され、一般的になりつつある。令和2年度までに実施した研究<sup>5</sup>では、海溝軸付近の地形を模擬し、水平変位の寄与が海水面の水位変動に及ぼす影響を確認するために水理実験を行うとともに、水理実験と同一条件において非線形長波理論に基づく1次元津波伝播解析（以下「津波伝播解析」という。）を行った。その結果、津波伝播解析による水位が水理実験による水位を下回ったこと<sup>6,7</sup>から、TS法を用いた津波伝播解析においては、更なる津波初期水位の設定方法の改良・精緻化が必要であると考えた。本研究の目的は、海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験並びに水理実験と同一条件で実施した津波伝播解析及び津波伝播解析より高精度に水理実験の再現が期待できる断面2次元流体解析（以下「流体解析」という。）の結果に基づいて、津波の初期水位の生成メカニズムの解明と、その特徴を考慮した津波の初期水位設定方法の改良を行い、津波評価方法に関する知見を拡充することである。

## 2. 研究内容

海溝軸付近で発生する津波について、初期水位の生成過程に関する実験的及び解析的な既往研究をレビューして知見を蓄積するとともに、令和2年度までの水理実験に新たな条件及び計測項目を追加してデータを取得する。さらに、水理実験並びに水理実験と同一条件で実施した津波伝播解析及び流体解析の結果を踏まえ、津波評価における初期水位の設定方法を改良する。

## 3. 実施方法

### 3.1 初期水位の生成過程に関する知見収集

初期水位の生成過程に関する実験的及び解析的な既往研究をレビューして知見を蓄積する。また、水理実験を再現するための流体解析に関する知見を蓄積する。

### 3.2 海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験の実施

津波の初期水位の生成過程を明らかにするために、海溝軸付近で発生する津波を模擬し、令和2年度までの水理実験に新たな条件（可動式斜面模型の変位速度、変位量等）及び計測項目（流速等）を追加した水理実験を行い、津波発生時の海水面の水位変動や水中の流速場に関するデータを取得する。また、水理実験に当たって、令和2年度の水理実験結果の確認のため、可動式斜面模型の振動データを取得する。さらに、水理実験の現象を詳細に分析するため、可動式斜面模型の振動データを用いた粒子法による流体解析を行い、水中の流速場

や圧力場のデータを取得する。なお、水理実験の可動式斜面模型と実地形の縮尺比は1/28,900 (=170<sup>2</sup>)である。実現象スケールからフルード相似則を用いて水理実験スケールの変位速度等を設定すると、変位速度は水理実験では再現できない程小さく、有意な水位変動も観測できない。そのため、水理実験の条件は、実現象より大きく設定している。

### 3.3 既往の初期水位の設定方法の改良

3.2の水理実験結果や水理実験を再現した粒子法による流体解析の結果を整理し、津波の初期水位の生成過程を把握する。実現象を考慮した津波初期水位の設定のため、既往の初期水位の設定方法（原子力規制庁が保有する津波伝播解析を行うコード「SANNAMI（+TUNAMI）コード」の津波初期水位設定機能）を改良するとともに、水理実験の再現解析を実施し、再現性を確認する。

また、既往津波を対象として、改良した初期水位設定方法を適用したジョイント・インバージョン解析を行い、津波波源のすべり量分布を推定するとともに、改良方法の効果を確認する。

さらに、その推定結果を踏まえて、新たな初期水位生成過程を考慮した津波断層モデルの設定方法を提案し、取りまとめる。

## 4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	東北大学	東北学院大学
(1)初期水位の生成過程に関する知見収集	◎	○	○
(2)海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験の実施	○	◎	◎
(3) 既往の初期水位の設定方法の改良	◎	○	○

(◎：主担当、○：副担当)

## 5. 共同研究参加者

氏名	所属部局・職名	本研究における各組織の役割
道口 陽子	技術基盤グループ地震・津波研究部門主任技術研究調査官	・研究の統括（主に解析、コードの改良）
杉野 英治	同 安全技術管理官（地震・津波担当）	・既往の初期水位の設定方法の改良 ・海溝軸付近で発生する津波を模擬した実験の実施の補助
山下 啓	同 研究部門副主任技術研究調査官	

田中 仁 風間 聡 Nguyen Xuan Tinh	東北大学大学院工学研究科・工 学部 教授 同 教授 同 助教	・研究の統括（主に水理実験） ・海溝軸付近で発生する津波を模擬し た実験の実施 ・実験装置等の管理
三戸部 佑太	東北学院大学・工学部・環境 建設工学科 准教授	・研究の統括（主に画像解析） ・海底面の水平方向の地形変化を模擬 した水理実験の実施 ・水理実験で計測した水面の二次元及 び三次元画像の解析

※所属部局・職名は令和5年度共同研究終了時点のものである。

## 6. 研究実施工程

項 目	年 度		令和3年度 (2021年度)		令和4年度 (2022年度)		令和5年度 (2023年度)	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
(1)初期水位の生成過程に関する知見収集								
(2)海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験の実施								
(3)既往の初期水位の設定方法の改良								

## 7. 成果概要

### 7.1 初期水位の生成過程に関する知見収集

初期水位の生成過程に関する知見として、海底斜面の水平変位速度に起因する運動エネルギーに着目した知見（例えば Song et al., 2017<sup>8</sup>）の収集を行った。これは、地震によって発生したエネルギーが海水に伝播する力学的エネルギーのうち、海底の鉛直変位に起因する位置エネルギーよりも海底斜面の水平変位速度に起因する運動エネルギーの方が大きいというものであるが、それを否定する知見<sup>9</sup>もあり、精査が必要である。

一方で、令和2年度までに実施した水理実験において流体の粘性の影響等により実現象を再現できているかの確認、また、水理実験結果及び津波伝播解析結果の初期水位の水位差（以下「水位差」という。）の要因解明のため、海底斜面の底面摩擦や流体の粘性の影響等についても検討することにした。そのため、その検討方法に関する知見<sup>10, 11</sup>の収集も行った。収集の結果、底面摩擦や流体の粘性のパラメータスタディが実施しやすく、様々な実験条件を再現しやすい粒子法による流体解析が、水理実験結果及び津波伝播解析結果との水

位差の検討に適用可能ということが分かった。

## 7.2 海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験の実施

水理実験の実現象の再現性確認等のため、粒子法を用いて、底面摩擦や流体の粘性をパラメータとした流体解析を行った。

各ケースの粒子法による流体解析の結果、今回設定した解析条件では、ケース間の水位に大きな違いは見られなかった。また、流体解析結果と水理実験結果の水位を比較したところ、水理実験結果の最大水位が流体解析結果のものより大きくなる傾向があり、令和 2 年度の水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位と同様に、一致しなかった。この理由は、今回のような水位変化の時間スケール（3 秒程度）では粘性項の影響は小さいためと考えられ、底面摩擦や流体の粘性が水位に及ぼす影響は小さいと考える。なお、粒子法による流体解析結果の水位波形は、令和 2 年度に実施した津波伝播解析結果の水位波形とほぼ同じだった。

これらの結果を踏まえると、水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位差の要因として、流体の粘性等の影響はないことは分かったが、要因の特定には至らなかった。そのため、水理実験結果の精査の一環で、水理実験中の斜面模型の振動に着目し、水位への影響について検討することとした。

水理実験において、水平方向にのみ移動すると想定していた斜面模型が、繰り返し水理実験を行う中で鉛直方向にわずかに振動していたことを確認した。そこで、流速場測定のための PIV（Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法）用の高速カメラで取得した画像を用いて、斜面模型の底面の変動から鉛直方向の振動データを取得した。水理実験装置は、斜面模型とその動作を制御するアクチュエーターが固定治具によって繋がっており、アクチュエーターが動くことによって固定治具が斜面模型を押し出し、斜面模型が水平方向に移動するという構造になっている<sup>5</sup>。斜面模型の振動の要因の一つとして、固定治具が斜面模型を押し出す際に、固定治具が変形し、水平に押し出せていないことによって斜面模型全体が鉛直方向に振動していることが分かった。また、斜面勾配の緩い斜面模型においては、法先において斜面模型の下に水が入り込み、斜面模型全体がたわむことによって振動していることが分かった。これらの斜面模型の振動をモデル化し、そのモデルを取り込んだ粒子法による流体解析を 6 ケース実施した。その結果、いずれのケースにおいても粒子法による流体解析で得られた水位波形は、水理実験で測定された水位波形の再現性が向上した。このことから、水理実験で測定された水位波形には斜面模型の振動が影響していたと結論付けた。

また、振動を考慮していない場合の粒子法による流体解析結果は、令和 2 年度に実施した津波伝播解析で得られた水位波形と整合していた。このことから、水理実験結果と津波伝播解析結果の水位波形が合わなかった要因についても、津波伝播解析において、水理実験における斜面の振動を再現できていなかったためと結論付けた。

これらの結果を踏まえると、水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位差の要因として、

水理実験時に発生した斜面模型の振動が影響していたと考えられ、海溝軸付近で発生する津波の初期水位の設定に当たっては、令和 2 年度に取り入れた水平変位の寄与を考慮する方法<sup>4</sup>のみでも十分（妥当）であることが確認できた。

### 7.3 既往の初期水位の設定方法の改良及び成果の取りまとめ

本研究では、令和 2 年度に実施した水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位差があったことから、初期水位の設定に当たり、令和 2 年度に取り入れた TS 法に加え、7.1 で収集した海底斜面の水平変位速度に起因する運動エネルギー<sup>8</sup>の影響に係る知見等を取り入れた新たな津波の初期水位設定方法の改良を目的としていた。

しかし、7.2 の結果に基づくと、水位差の要因は、水理実験時に発生した斜面模型の振動（斜面模型が固定治具で水平に押される際の固定治具の変形による斜面模型の鉛直方向への振動及び斜面模型の法先における斜面模型下への水の入り込みによる鉛直方向への振動）が支配的であると考えられる。

また、初期水位の設定への影響を検討していた運動エネルギーに関して、水理実験では実現象と比較してフルード相似則に基づく変位速度を大きく設定しているため、水理実験の水位には運動エネルギーの影響が有意に表れると考えられる。さらに、津波伝播解析では運動エネルギーの寄与を考慮していないが、粒子法による流体解析では粒子が動くことによって運動エネルギーを考慮している。そのため、運動エネルギーが実験結果に影響しているとすれば、流体解析は水理実験結果を再現し、津波伝播解析は過小評価になると考えられる。しかし、流体解析結果は水理実験結果を再現している一方、斜面模型が振動しない水理実験を模擬した流体解析及び津波伝播解析による水位も同程度であった。この結果は、水理実験における運動エネルギーが水位に与える影響は小さいことを表している。以上より、水理実験より運動エネルギーの影響が小さい実現象においては、運動エネルギーの影響は無視できるものと結論付けた。

これらのことから、津波の初期水位に及ぼす運動エネルギーの寄与は小さく、津波の初期水位設定方法として、運動エネルギーを考慮していないこれまでの TS 法で十分な精度を確保できると判断した。そのため、新たな津波の初期水位設定方法を考慮した津波伝播解析コードの改良は不要であると判断した。また、改良した津波伝播解析コードを用いてジョイント・インバージョン解析を実施する予定だったが、同様に不要であるとの結論を得た。

特性化波源断層モデルの設定方法を提案する上で基礎情報となる TS 法を適用したジョイント・インバージョン解析は、既に令和 2 年度に実施<sup>11</sup>しているため、今後これらの結果を用いて、主に海溝軸付近で発生する津波に対する水平変位の寄与を考慮した初期水位の設定方法（特性化波源断層モデルの設定方法）の提案を行う。また、令和 2 年度に実施した水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位差の要因分析についても、今後、論文化することを予定している。

#### 7.4 今後の検討予定

水理実験結果の精査を行うに当たり、水理実験を再現するために複数の解析方法を用いた。また、水中での現象を詳細に分析するため、各ケースでの流況（水中の流速分布、全圧力分布、静水圧分布、動水圧分布、加速度分布、断面平均流速の解析結果等）のデータも取得した。今後、これらのデータを用いて、各解析方法間の流速分布や全圧力分布等の物理的な違いを把握するとともに、各解析方法の長所と短所を整理する予定である。

#### 8. 参考文献

- 1 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」、平成 14 年
- 2 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」、平成 28 年
- 3 地震調査研究推進本部 地震調査委員会、「波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ）」、平成 29 年
- 4 Tanioka, Y., Satake, K., “Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 8, pp. 861-864, 1996. <https://doi.org/10.1029/96GL00736>
- 5 道口陽子、三戸部佑太、杉野英治、田中仁、「地殻変動の水平変位による津波初期水位への影響に関する実験的検討」、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、75 巻、2 号、pp. I\_343-I\_348、平成元年. [https://doi.org/10.2208/kaigan.75.i\\_343](https://doi.org/10.2208/kaigan.75.i_343)
- 6 Michiguchi, Y., Mitobe, Y., Sugino, H., Tanaka, H., “Comparative study of experiments and analyses on tsunami generation by horizontal crustal deformation”, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, 2020.
- 7 Song, Y. T., Mohtat, A., Yim. S. C., “New insights on tsunami genesis and energy source”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 122, No. 5, pp. 4238–4256, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JC012556>
- 8 Lotto, C. G., Nava, G., Dunham, M. E., “Should tsunami simulations include a nonzero initial horizontal velocity?”, *Lotto et al. Earth, Planets and Space*, Vol. 69, No. 117, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0701-8>
- 9 公益社団法人土木学会、「数値波動水槽－砕波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して－」、丸善出版株式会社、平成 24 年
- 10 渡辺高志、榎谷浩、三橋祐太、「壁面境界の大変形を考慮した粒子法の計算手法に関する基礎的研究」、日本計算工学会論文集、2013 巻、pp. 20130021、平成 25 年. <https://doi.org/10.11421/jsces.2013.20130021>
- 11 道口陽子、杉野英治、三戸部佑太、田中仁、「地殻変動の水平変位寄与分の考慮方法の違いによる 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の推定波源のすべり量分布の比較」、日本地震工学会論文集、22 巻、5 号、pp.25-42、令和 4 年.

[https://doi.org/10.5610/jae.22.5\\_25](https://doi.org/10.5610/jae.22.5_25)