

RREP-2025-4001

安全研究成果報告

S/NRA/R Research Report

津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究

Study on Tsunami Evaluation Methods and Estimation of Source Models of Large Historical Tsunamis

道口 陽子 山下 啓 佐藤 太一 杉野 英治

MICHIGUCHI Yoko, YAMASHITA Kei, SATO Taichi, and SUGINO Hideharu

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和7年6月

June 2025

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2226
ファックス：03-5114-2236

津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

道口 陽子 山下 啓 佐藤 太一 杉野 英治

要 旨

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震津波による東京電力福島第一原子力発電所の事故が契機となり、原子力発電所の津波に対する評価が重要と認識されるようになった。そして、現行の規制基準では、「基準津波の策定」等が要求事項として加わるようになった。原子力規制の継続的な高度化のためには、これらの要求事項に係る種々の評価手法を改善し続けていくことが重要である。本安全研究プロジェクトでは、令和 3 年度から令和 6 年度にかけて、以下の研究課題に取り組んだ。

「海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」に係る研究として、海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験結果等に基づいて、津波の初期水位の生成過程の解明と、その特徴を考慮した津波の初期水位設定方法の改良に関する知見を拡充した。なお、当該研究は、原子力規制庁、国立大学法人東北大学及び東北学院大学による共同研究で実施した。

「既往の巨大津波の波源推定」に係る研究として、津波波源が明確になっていない既往の巨大津波を対象に現地調査を行い、津波堆積物を認定した。そして、その津波堆積物情報に基づき、平成 28 年度までに実施した安全研究プロジェクト「津波ハザード関連評価技術の整備」のうち研究テーマ「津波堆積物による波源推定手法の整備」において構築された土砂移動モデルによる波源推定手法に津波堆積物の不確かさ（津波堆積物の認定精度、堆積年代の推定の幅、津波堆積物が未発見であっても津波による浸水や堆積物消失の可能性を否定できないこと等の不確かさ）の影響を取り入れて具体的な津波波源を推定するとともに、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性に関する知見を拡充した。なお、当該研究は、原子力規制庁、学校法人関西大学、国立大学法人東北大学災害科学国際研究所及び国立大学法人東京大学による共同研究で実施した。

Study on Tsunami Evaluation Methods and the Estimation of Source Models for Large Historical Tsunamis

MICHIGUCHI Yoko, YAMSHITA Kei, SATO Taichi, and SUGINO Hideharu

Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

The accident at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami has increased awareness of the necessity for effective tsunamis evaluation for nuclear power plants in Japan. Consequently, design basis tsunamis requirements have been incorporated into the NRA regulatory standards. To ensure continuous improvement in nuclear regulations, evaluation methods related to these requirements must be consistently enhanced. In this project, we studied the following two key research subjects (1) and (2) from FY 2021 to FY 2024.

(1) Improvement of a method for determining initial sea surface displacement at tsunami source near a trench

In this study, based on the results of hydrological experiments simulating tsunamis generated near a trench, we clarified the generation mechanism of the initial sea surface displacement of a tsunami and expanded our knowledge on the improved method of determining this initial displacement at tsunami source by considering its characteristics. This study was conducted under the multilateral agreement of the joint research project among the NRA, Tohoku University and Tohoku Gakuin University.

(2) Estimation of source models for large historical tsunami

In this study, we conducted a field survey and identified tsunami deposits for a large historical tsunami for which the tsunami source has not been clarified. We analyzed the information about these tsunami deposits and improved the tsunami source estimation method using the sediment transport model which was developed in the earlier project entitles “Developing methods for using tsunami deposits for estimating tsunami sources” (up to FY 2016). We then estimated the specific tsunami source for the target historical tsunami, thereby expanded our understanding of the

relationship between the estimated tsunami source and the uncertainties associated with the tsunami deposits (such as epistemic and aleatory uncertainties in the identification of tsunami deposits and the estimation of deposition ages). This study was conducted under the multilateral agreement of the joint research project among the NRA, Kansai University, International Research Institute of Disaster Science in Tohoku University and the University of Tokyo.

目 次

1.	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	全体行程	2
2.	本論	4
2.1	海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良	4
2.1.1	初期水位の生成過程に関する知見収集	6
2.1.2	海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験に対する流体解析の再現性	7
2.1.3	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	11
2.2	既往の巨大津波の波源推定	14
2.2.1	津波堆積物に関する知見収集	15
2.2.2	数値解析の実施及びデータベースの拡充	16
2.2.3	津波堆積物の不確かさを考慮した津波波源の推定	26
2.2.4	津波及び土砂移動の数値解析ツールの高度化	28
2.2.5	砂質津波堆積物の相似則の提案	29
3.	結論	32
3.1	成果の要点	32
3.2	目的の達成状況	33
3.3	成果の公表等	33
3.3.1	原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表	33
3.3.2	共同研究先による公表	33
3.4	成果の活用等	34
3.5	今後の課題等	34
	参考文献一覧	36
	執筆者一覧	42

表 目 次

表 2.1.1 流体解析条件	8
----------------------	---

図 目 次

図 1	本安全研究プロジェクトの全体行程	3
図 2.1.1	津波初期水位（上）及び水平変位の寄与分（下）のイメージ	5
図 2.1.2	水理実験装置の概要	5
図 2.1.3	水理実験と津波伝播解析の最大水位と底面高さの増分の比 (H_{max}/dy) と無次元ライズタイム ($Tr/(L/c)$) の関係	6
図 2.1.4	流体解析の解析モデルの一例（斜面勾配が 0.1 の場合）	8
図 2.1.5	流体解析のパラメータ	9
図 2.1.6	底面摩擦と流体の粘性の違いによる水位の比較	9
図 2.1.7	水理実験、津波伝播解析並びに斜面模型の振動を考慮した場合及び考慮しない場合の流体解析の水位	11
図 2.1.8	斜面模型が振動しないと仮定した水理実験の流体解析及び津波伝播解析の結果	13
図 2.1.9	ジョイント・インバージョン解析によるすべり分布（左：TS 法、右：従来法）	13
図 2.2.1	青森県における堆積物試料の CT 画像、写真及び柱状図	16
図 2.2.2	日本海溝から千島海溝のプレート間地震を対象として得られた特性化波源断層に基づくシナリオ波源のすべり分布	18
図 2.2.3	シナリオ波源を用いて推定された津波高分布	22
図 2.2.4	宮城県仙台平野の亘理地域を対象とした津波及び土砂移動の数値解析結果	23
図 2.2.5	209 通りの全シナリオ波源に基づく堆積面積/浸水面積と津波高との関係	24
図 2.2.6	津波堆積物に基づく津波波源推定データベースの画面	25
図 2.2.7	1611 年津波の津波堆積物に基づく波源推定による評価上位 5 波源	28
図 2.2.8	1611 年津波の津波堆積物、痕跡高及び未発見情報に基づく波源推定による波源の一例	28
図 2.2.9	津波堆積物の堆積面積と海岸線における最高津波高の関係（左）と対象地域の地形（右）	31

用語の定義

イベント堆積物	上下の堆積物や周辺の地形から推定される平常時の堆積環境では形成され得ない堆積構造、包有物等が認められる堆積物。津波のみならず洪水や高潮・高波、地すべり等のあらゆるイベントにより形成された可能性がある（後藤ら、2017 ^{1.1} ）。
確率論的津波ハザード解析手法	特定地点・特定期間において、津波の高さとその高さを超える津波が来襲する確率の関係を推定するための手法である。同手法では、地震の規模や発生頻度等、津波の高さの推定に関わる様々な不確かさが系統的に考慮される。得られた関係は津波対策等の様々な意思決定及び工学的判断のための基礎データとして活用される。
基準津波	設計基準対象施設の供用中に当該施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波をいう。当該施設は、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ない。
シナリオ波源	位置や規模等を仮定した個々の津波波源モデルを指す。
ジョイント・インバージョン解析	性質の異なる複数の観測データに合うように津波波源モデルのすべり量を算定する解析方法（Satake, 1989 ^{1.2} ; 杉野ら、2013 ^{1.3} ）。本安全研究プロジェクトでは、観測されたデータとして、津波波形及び地殻変動量を用いた。
津波痕跡高	津波が浸水したことを示す痕跡の基準面からの高さである。その痕跡には、現地調査から特定される水跡や漂流物等の物的証拠のほか、古文書や伝承等の歴史記録から推定される浸水地点も含まれる。津波来襲時刻が既知の近代津波では、津波痕跡高の基準面は潮位面である。津波来襲時刻が未知の歴史津波等では、一般に、基準面は T.P. 0 m（Tokyo Pail：東京湾平均海面）とする。津波来襲後の現地調査に基づく津波痕跡高は、静的な浸水の高さを表す浸水高と、動

	的な遡上先端の高さを表す遡上高に大別される。
津波堆積物	津波により海底や沿岸の砂泥や礫等が侵食・運搬され、地表や湖沼底、浅海底に再堆積した、泥、砂、礫等の堆積物の総称である（原子力安全基盤機構、2014 ^{1.4} ）。
津波波源モデル	位置や規模等をモデル化した地震等に伴う地殻変動又はそれにより生成される津波の初期水位分布を指す。津波波源モデルを津波解析の初期条件として津波の伝播・浸水等の評価・予測を行う。
特性化波源断層モデル	沿岸部での津波評価を標準化するために、津波波源としての特性を断層の長さ、幅、すべり量等の主要なパラメータで簡略化した予測用波源モデルである（杉野ら、2014 ^{1.5} ）。

1. 序論

1.1 背景

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波（以下「東北地震津波」という。）の発生以後、平成 25 年に東京電力福島第一原子力発電所の事故を教訓に、「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（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号。以下「規制基準」という。）」及び各種審査ガイドが施行された。特に本安全研究プロジェクトが対象とする津波に関連する規定としては、新たに「基準津波の策定」等が明記され、これを補足するガイドとして「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド（原管地発第 1306193 号、平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定。以下「津波審査ガイド」という。）」が策定された。津波審査ガイドには、基本方針として「基準津波の策定」について、「最新の科学的・技術的知見を踏まえ、（中略）地震学的見地から想定することが適切なもの」とすること、また、「不確かさを考慮して数値解析を実施し、策定すること。」が記されている。これらの規制基準及び審査ガイドに基づいて現在、既設発電所の適合性審査が行われている。

また、平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）」により、事業者に対する「安全性の向上のための評価」の実施が規定され、適合性審査を終えた既設発電所から順次、安全性向上評価が定期的に行われている。この安全性向上評価は、電力事業者が主体的に行うものであるが、常に最新の科学的・技術的知見に基づいてなされる必要がある。

上述の適合性審査及び安全性向上評価の確認を適切に行う上では、「基準津波の策定」等に係る種々の評価手法において、最新の知見を取り入れつつ必要な見直しを行うこと等、原子力規制の継続的な改善が重要である。

これまでの津波に係る安全研究では、平成 25 年度から平成 28 年度までの安全研究プロジェクト「津波ハザード関連評価技術の整備」（以下「平成 28 年度プロジェクト」という。）において、東北地震津波の波源推定、その知見を踏まえたプレート間地震による津波水位評価のための津波波源モデルの設定方法、同津波波源モデルを用いた確率論的津波ハザード解析手法、津波痕跡高情報及び津波堆積物情報を集めた津波痕跡データベース及び津波堆積物に基づく津波波源推定手法等に係る知見を蓄積してきた。これらの成果^{1.3,1.5-1.9}の一部^{1.3,1.5}は、上記の津波審査ガイドに反映され、既設発電所の適合性審査において有用な知見の一つとして活用されている。さらに、平成 29 年度から令和 2 年度までの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」（以下「令和 2 年度プロジェクト」という。）において、津波の発生要因となる地震の規模や発生頻度に係る不確かさが確率論的津波ハザードに与える影響、海溝軸付近で発生するプレート間地震による津波を対象に、地殻変動を模擬した水理実験を踏まえ、海底面の水平方向の地殻変動を考慮した既往の津波評価手法の適用性等に関する知見を蓄積した。これらの成果の一部^{1.10-1.13}は、広く原子力安全に役立てるため、学術論文として公表した。

しかしながら、海底面の水平方向の地殻変動を考慮した既往の津波評価手法の適用性確認において、海溝軸付近の地殻変動を模擬した水理実験及び水理実験と同一条件で実施した津波伝播解析による水位の結果が合わないこと、津波堆積物に基づく津波波源推定手法において、津波堆積物の不確かさ（津波堆積物の認定精度、堆積年代の推定の幅、津波堆積物が未発見であっても津波による浸水や堆積物消失の可能性を否定できないこと等の不確かさ）を考慮できていないこと等の課題が残った。これらの安全研究プロジェクトの成果及び課題を踏まえ、基準津波に関する適合性審査や安全性向上評価の確認の際に技術基盤として活用するため、更に海底面の水平方向の地殻変動を考慮した津波の初期水位設定方法の改良や津波堆積物の不確かさを考慮した津波波源の推定方法の整備等に関する知見が必要と考えられる。

そこで、本安全研究プロジェクトでは、適合性審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備の一環として、「（１）海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」及び「（２）既往の巨大津波の波源推定」を行う。なお、各テーマの背景については、後述２章の本論の中でテーマごとに示す。

1.2 目的

本安全研究プロジェクトでは、津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する以下の研究を行い、適合性審査等の際の判断に必要な知見を収集し、整備することを目的とする。なお、巻末の「執筆者一覧」に各研究課題の主な担当者を示す。

(1) 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験結果等に基づいて、津波の初期水位の生成過程の解明と、その特徴を考慮した津波の初期水位設定方法の改良に関する知見を拡充する。

(2) 既往の巨大津波の波源推定

津波波源が明確になっていない既往の巨大津波を対象に、現地調査を行い、津波堆積物を認定する。そして、その津波堆積物情報に基づき、平成 28 年度プロジェクトのうち「津波堆積物による波源推定手法の整備」で構築された土砂移動モデルによる波源推定手法に津波堆積物の不確かさの影響を取り入れて、具体的な津波波源を推定するとともに、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性に関する知見を拡充する。

1.3 全体行程

本安全研究プロジェクトは図 1 に示した計画のとおり、令和 3 年度から令和 6 年度にかけて実施したものである。本安全研究プロジェクトは、他の研究機関との共同研究（令和 3 年度～令和 5 年度）により実施した。各研究テーマの共同研究体制を以下に記す。

(1) 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

- ・ 原子力規制庁
- ・ 国立大学法人東北大学
- ・ 東北学院大学

(2) 既往の巨大津波の波源推定

- ・ 原子力規制庁
- ・ 学校法人関西大学
- ・ 国立大学法人東北大学災害科学国際研究所
- ・ 国立大学法人東京大学

	R3 年度	R4 年度	R5 年度	R6 年度
(1) 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良	既往研究の知見の整理、水理実験の実施	津波の初期水位の生成過程の把握、解析手法の改良及び水理実験結果を用いた検証	津波の初期水位設定方法の改良及び適用範囲の把握	初期水位の設定方法のまとめ
(2) 既往の巨大津波の波源推定	津波堆積物の文献・現地調査	津波堆積物の現地調査・年代分析（青森県・宮城県）	津波堆積物の現地調査・年代分析（青森県・福島県・茨城県） 土砂移動解析の改	↓
	土砂移動解析ツールの整備	シナリオ波源の設定及び土砂移動解析の実施並びにデータベースの拡充	善及びデータベースの拡充	データベースの拡充 ↓ 津波堆積物の不確かさとシナリオ波源の関係性の整理及び 1611 年慶長三陸地震津波波源の推定

図 1 本安全研究プロジェクトの全体行程

Figure 1 Overall schedule of the research project

2. 本論

2.1 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

海溝軸付近で発生するプレート間地震による津波は、断層運動に伴う地殻変動（鉛直変位及び水平変位）によって生じるが、これまでの津波の評価手法では、津波初期水位の設定に当たって、地殻変動の鉛直変位のみを海面に与える方法^{2.1.1,2.1.2}が用いられてきた（以下「従来法」という。）。従来法は、津波審査ガイドに示されているが、平成 29 年に地震調査研究推進本部が公開した「津波レシピ」^{2.1.3}等では、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「水平変位の寄与分」という。）を考慮することが基本とされ、その方法として Tanioka and Satake (1996)^{2.1.4}が示されている（以下「TS 法」という。）。従来法では、水平変位の寄与分の効果を地殻変動の鉛直変位に含め、津波波源のすべり量を割り増しすることで考慮してきたと考える。しかし、そのような従来法で用いられてきた津波波源のすべり量を用いて算定される地殻変動の鉛直変位に対して更に水平変位の寄与分を加えた場合、水平変位の寄与分が重複することになるため、津波水位の評価を確認する上で、津波初期水位の設定に課題がある。また、現在活用されている沿岸部での津波評価を標準化するための特性化波源断層モデル（例えば杉野ら (2014)^{2.1.5}）は、従来法での利用を前提としたものであり、TS 法を利用して津波の初期水位を設定する場合の特性化波源断層モデルが必要である。

令和 2 年度プロジェクトにおいて、TS 法を用いた津波の初期水位設定方法による水平変位の寄与分が海水面の水位変動に及ぼす影響（図 2.1.1）を確認するために、海溝軸付近の地形を模擬した水理実験（図 2.1.2）及び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。）を実施し、TS 法による初期水位への効果を調査した。その結果、津波の初期水位設定に当たり、TS 法のみでは、津波伝播解析による水位が水理実験による水位を下回り（図 2.1.3）、津波伝播解析結果は水理実験結果を十分に再現できなかった（道口ら、2019^{2.1.6}; Michiguchi et al., 2020^{2.1.7}）。今後の適合性審査において、TS 法が用いられる場合も考えられることから、水理実験結果及び津波伝播解析結果の乖離の要因を明確にするとともに、津波初期水位の設定方法を改良する必要があると考えた。

そこで本研究では、津波評価方法に関する知見を拡充することを目的として、まず、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と、更に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。）を実施した。それらの結果に基づいて、津波の初期水位の生成過程の解明と、その特徴を考慮した津波の初期水位設定方法の改良を実施した。

本報告については、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」^{2.1.8}を基に記載する。

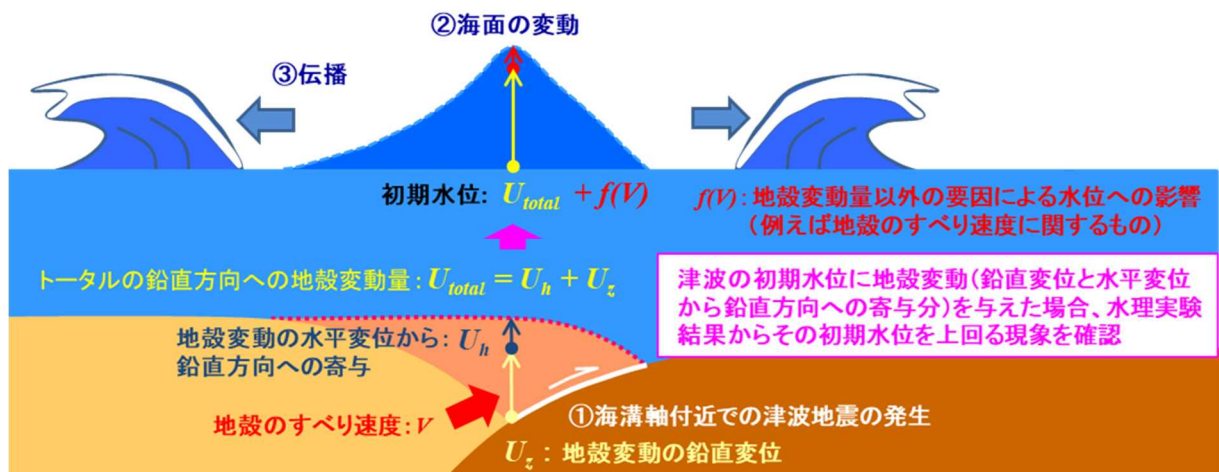
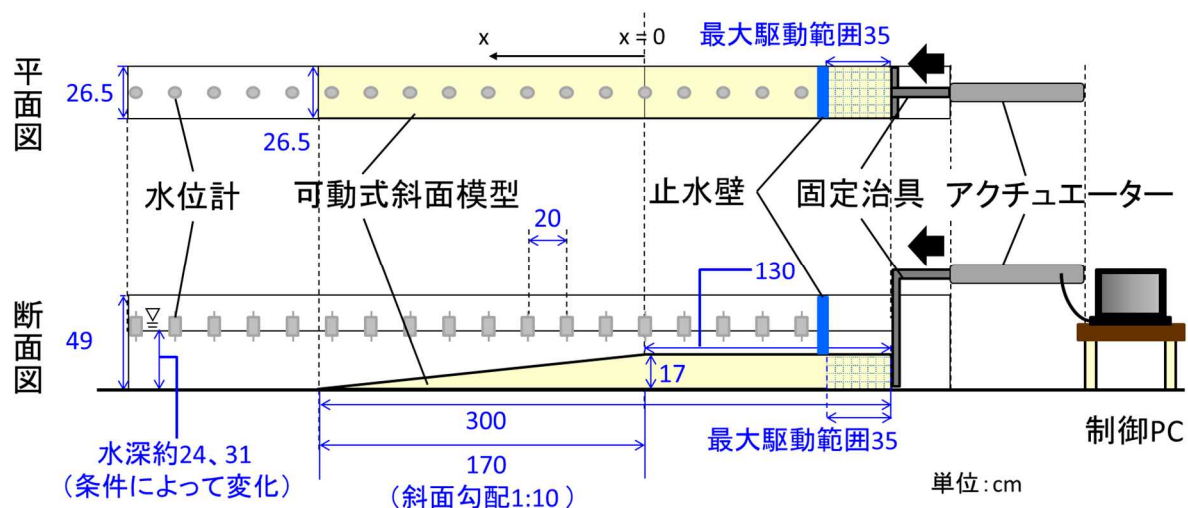


図 2.1.1 津波初期水位（上）及び水平変位の寄与分（下）のイメージ

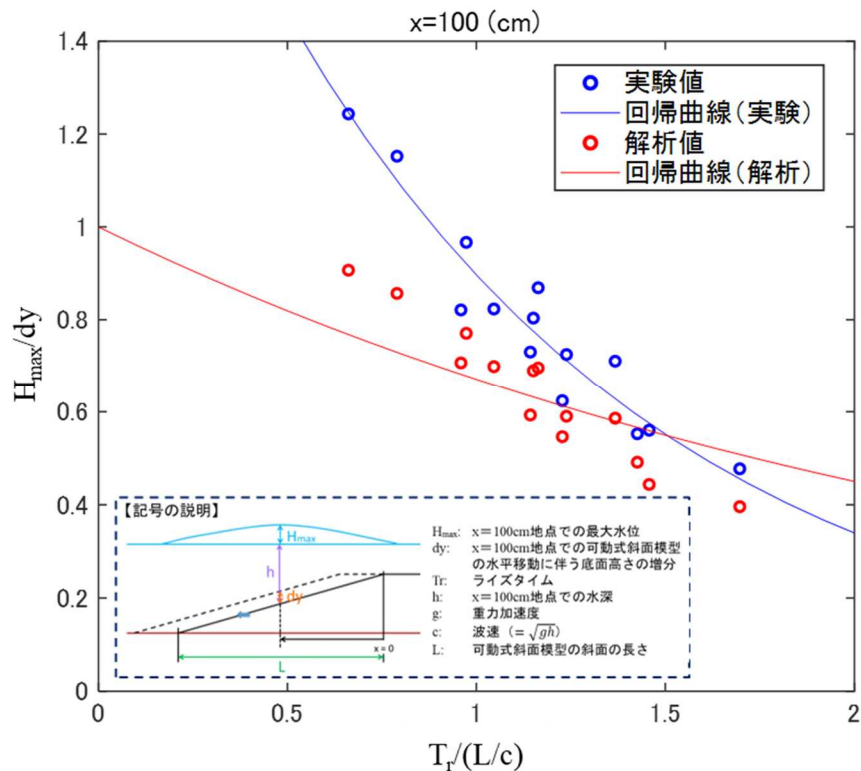
Figure 2.1.1 Image of the tsunami initial displacement on sea surface (upper) and contribution of horizontal crustal displacements (lower)



出典) 道口ら (2019) ^{2.1.6} を一部修正

図 2.1.2 水理実験装置の概要（実地形の 1/28,900 スケール、斜面勾配が 0.1 の場合）

Figure 2.1.2 Schematic of the hydraulic experiment
(1/28,900 scale of prototype geometry, slope gradient of 0.1)



出典) Michiguchi et al. (2020)^{2.1.7} を一部修正

図 2.1.3 水理実験と津波伝播解析の最大水位と底面高さの増分の比 (H_{max}/dy) と無次元ライズタイム ($Tr/(L/c)$) の関係

Figure 2.1.3 H_{max}/dy versus dimensionless risetime ($Tr/(L/c)$)

H_{max} : the tsunami height, dy : total height of the net rise of the seabed due to the horizontal displacement of the slope, Tr : time for the horizontal displacement of the slope, T : time of long-wave propagation over the slope length ($T = L/c$, L : slope length, c : celerity of the long-wave)

2.1.1 初期水位の生成過程に関する知見収集

はじめに、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するとともに、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した。

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の移動速度に起因する運動エネルギーに着目した知見の収集を行った。Song et al. (2017)^{2.1.9}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の移動速度に起因する運動エネルギー(以下「運動エネルギー」という。)の方が大きく津波高等への影響があると示唆しているが、それを否定する知見^{2.1.10}もあり、精査が必要である。

一方で、令和2年度プロジェクトで実施した水理実験が実現象を再現できているかの確

認のため、また、水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位の差の要因解明のため、海底斜面の底面摩擦や流体の粘性の影響等についても調査することにした。その調査方法に関する知見の収集を行った結果、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^{2.1.11-2.1.13}が、水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位の差の要因解明に有用であるということが分かった。

2.1.2 海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験に対する流体解析の再現性

(1) 底面摩擦及び流体の粘性の影響確認

水理実験において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。流体解析は、連続体としての液体及び固体に対して粒子法の一つである SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) (以下「粒子法」という。) を適用し、これらを対象とする連続方程式及び運動方程式を離散化する数値解析コード DYBECS (構造計画研究所開発)^{2.1.12} を用いた。本研究では、液体と固体 (可動式斜面模型 (以下「斜面模型」という。) 等) の壁境界は粒子でモデル化し、液体と固体の相互作用を考慮し、斜面模型の運動・変形を粒子や壁境界の運動・変形を制御することで行っている (図 2.1.4)。なお、本解析コードについては、本研究の水理実験と類似した壁境界が移動して波を起こすスロッシング実験の水位と解析による水位を比較することで、スロッシング問題に対する粒子法の計算精度が確認されている^{2.1.12}。また、水の 10 万倍の粘性をもつ高粘性流体を対象とした単純せん断試験の 2 次元解析を行い、理論解との比較から、精度良く計算が行えていることが確認されている^{2.1.13}。

底面摩擦及び流体の粘性を変化させた計 7 ケースの粒子法による流体解析の結果 (表 2.1.1、図 2.1.5)、今回設定した解析条件では、水位 8.6~9.0 mm に対してケース間の水位の差は 0.4 mm 以下であり、大きな違いは見られなかった (図 2.1.6)。また、流体解析結果と令和 2 年度プロジェクトで実施した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 年度プロジェクトで実施した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。また、後述するように、粒子法による流体解析結果の水位波形は、令和 2 年度プロジェクトで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。

底面摩擦や流体の粘性を変えた流体解析結果の水位の差が小さい (図 2.1.6) ことは、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く、また、本研究のような開水路流れの水理実験では重力の影響が大きいため、水位への底面摩擦や流体の粘性の影響が小さいことを示していると考ええる。水理実験結果と流体解析結果の水位の差の主要な要因は、粘性ではなく別にあると考えられる。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の差の要因として、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。津波伝播解析と流体解析の両者において、モデル化していない何らかの現象が影響しているのではないかと推定した。

一方、(2) で後述する令和 2 年度プロジェクトの追加の水理実験において、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。そのため、水理実験結果の精査の一環として、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調査することとした。

表 2.1.1 流体解析条件

Table 2.1.1 Conditions in the fluid analysis

Case	加速度 a (cm/s^2)	速度 V (cm/s)	減速度 $a2$ (cm/s^2)	変位量 U (cm)	水深 H (cm)	ライズ タイム Tr (s)	流体の種類	底面摩擦
1	50	20	-50	10	24	0.9	水	水の 1 倍
2								水の 10 倍
3								水の 100 倍
4								水の 1,000 倍
5								水の 10,000 倍
6								水の 100,000 倍
7							低粘性流体 (水の 1/30,000)	水の 10,000 倍

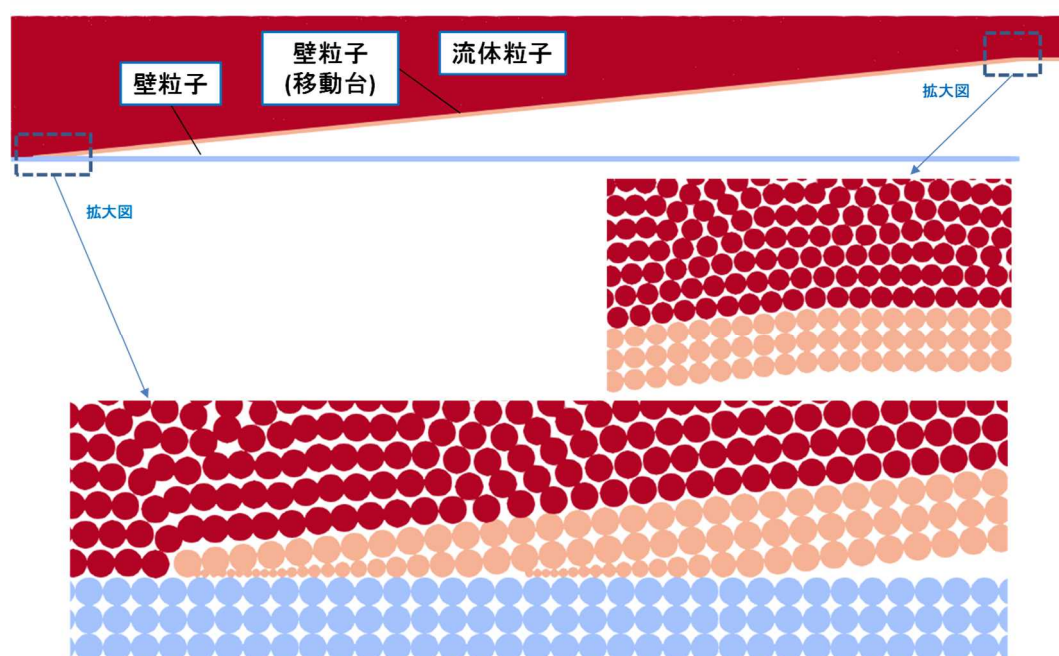


図 2.1.4 流体解析の解析モデルの一例（斜面勾配が 0.1 の場合）

Figure 2.1.4 Example of analytical model for fluid analysis (slope gradient of 0.1)

The diagram illustrates a movable inclined plane model. A blue arrow points left from the right side of the inclined plane, labeled "可動式斜面模型". The water depth is indicated by a red vertical arrow on the left, labeled "水深:H". The motion of the model is divided into three horizontal segments along the top surface: a green segment labeled "減速区間: α_2 ", a purple segment labeled "定速区間:v", and an orange segment labeled "加速区間: α ". Below the horizontal axis, a blue double-headed arrow indicates the displacement "変位量:u", and a purple double-headed arrow indicates the inclined plane length "斜面長さ:L".

図 2.1.5 流体解析のパラメータ

Figure 2.1.5 Parameters in fluid analysis

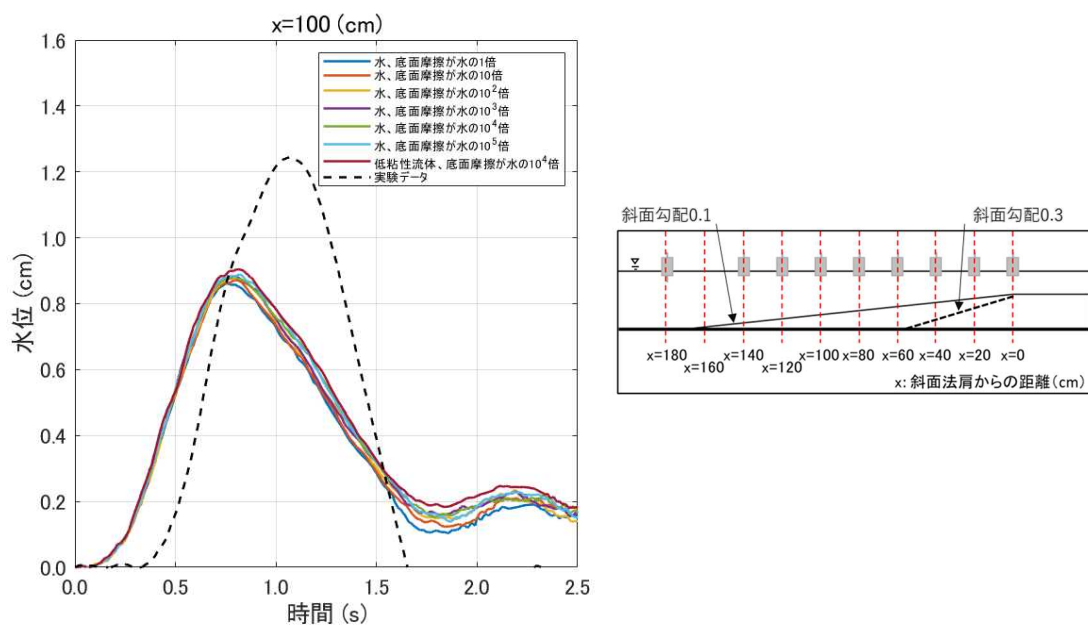


図 2.1.6 底面摩擦と流体の粘性の違いによる水位の比較

Figure 2.1.6 Comparison of water levels with different values for bottom friction and fluid viscosity

令和2年度プロジェクトで実施した水理実験に新たな条件（斜面模型の移動速度、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、津波発生時の水面の水位変動や水中の流速場に関するデータを取得した。また、追加の水理実験において、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ことから、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が固定治具によって繋がっており、アクチュエータ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（図 2.1.2）^{2.1.6}。さらに、水理実験中に生じている現象を詳細に分析するため、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した。なお、水理実験の斜面模型と実地形の縮尺比は $1/28,900 (=170^2)$ である。実現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移動速度等を設定すると、移動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、水理実験の条件のうち移動速度は、実現現象より大きく設定している。

高速カメラで取得した画像解析の結果、固定治具が斜面模型を水平に押し出す際に、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、斜面先端部の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。これらが斜面模型の振動の要因であると考ええる。

これらの斜面模型の振動を正弦波型の振動及び指数関数的な減衰を仮定した振動としてモデル式として導き、モデル式による振動成分を斜面模型底面粒子の振動として与えた粒子法による流体解析を 6 ケース実施するとともに、水理実験及び津波伝播解析の水位波形との再現性を確認した（図 2.1.7）。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 年度プロジェクトで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模型の振動を考慮していなかったため、水理実験を再現できていなかったと結論付けた。なお、斜面模型の振動を低減させるため、固定治具の締め直しや法先付近の斜面模型内部に重りを付ける等を施し、水理実験を実施したが効果はほとんど無く、振動を無くすためには水理実験装置の根本的な設計改良が必要であった。水理実験装置の根本的な設計変更及び改良には、技術的困難が予想されたため、今後の課題とした。

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の差の要因として、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 年度プロジェクトで取り入れた水平変位の寄与を考慮する方法^{2.1.4}のみで十分であることが確認できた。

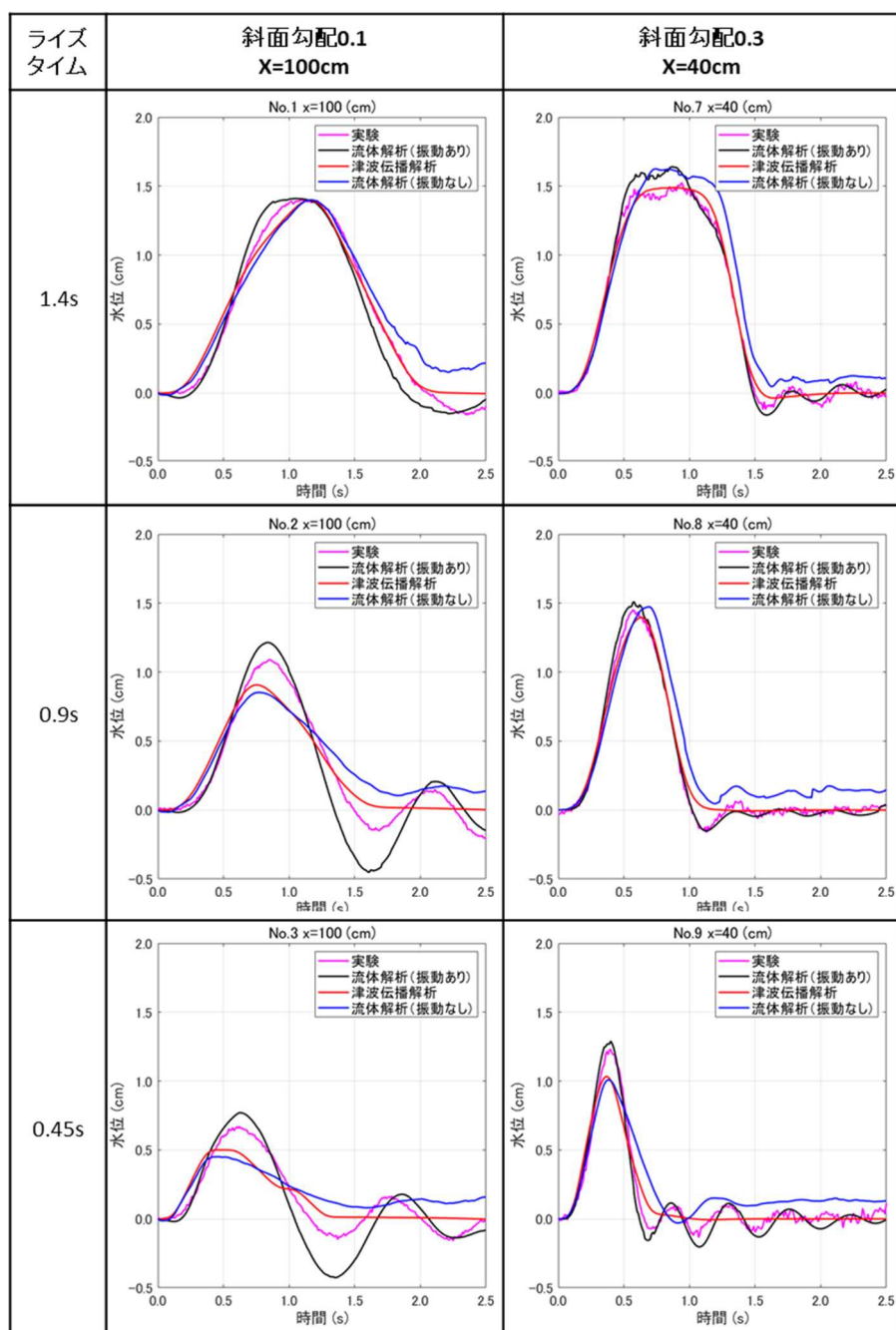


図 2.1.7 水理実験、津波伝播解析並びに斜面模型の振動を考慮した場合及び考慮しない
場合の流体解析の水位

Figure 2.1.7 Water levels in hydraulic experiments, tsunami propagation analysis and, fluid
analysis with and without consideration of vibration of the slope model

2.1.3 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年度プロジェクトで実施した水理実験結果と津波伝播解析結果の水位に差があったことから、初期水位の設定に当たり、令和2年度プロジェクトで取り入れたTS法に加え、2.1.1で収集した運動エネルギー^{2.1.9}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、2.1.2 (2) の結果に基づくと、水位の差の要因は、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と斜面模型の斜面先端部の法先における斜面模型下への水の入り込みに起因する鉛直方向の振動）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調査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移動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が考慮されている。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と仮定した水理実験の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（図 2.1.8）。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 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 年度プロジェクトで実施^{2.1.14,2.1.15}している（図 2.1.9）。TS 法を適用したジョイント・インバージョン解析による津波波源は、従来法に基づく津波波源と比較して、すべりが生じている小断層の面積、最大すべり量、平均すべり量、地震モーメント等が小さくなるというような特徴を示していた。さらに、津波波源を海溝軸に平行な深さ方向（図 2.1.9 の A 列から H 列へ向かう方向）に領域分けして比較分析したところ、TS 法では平均すべり量が海溝軸沿いで大きくなる一方、従来法では平均すべり量がやや深い領域で大きくなったという特徴も示した（道口ら、2022^{2.1.14}）。

これらの結果を踏まえ、TS 法を利用して津波の初期水位を設定する場合の特性化波源断層モデルは、従来法での利用を前提とした杉野ら^{2.1.5}の特性化波源断層モデルと比較して、波源全体の面積、超大すべり域の面積比及び平均すべり量が小さくなること等に加え、超大すべり域及び大すべり域が断層の海溝軸沿いだけではなく深いところに設定することを示した^{2.1.15}。この特性化波源断層モデルの設定方法に関する論文を、投稿する計画である。なお、今後、令和 2 年度プロジェクトで実施した水理実験結果及び津波伝播解析結果の水位の差の要因分析についても、論文化することを計画している。

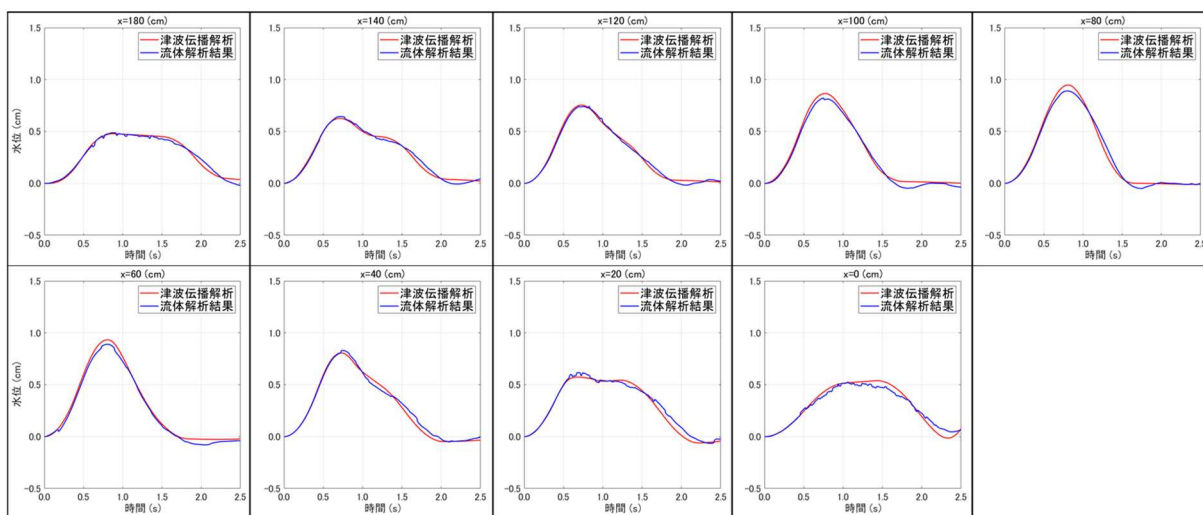
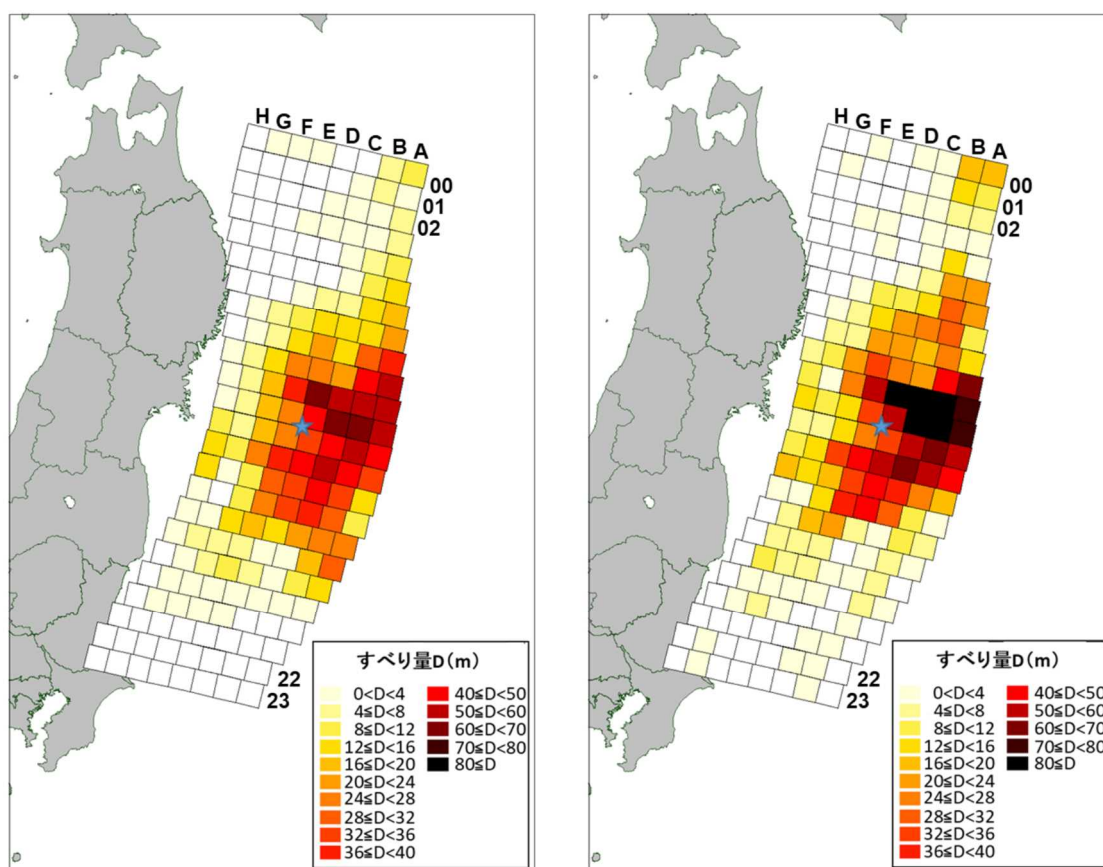


図 2.1.8 斜面模型が振動しないと仮定した水理実験の流体解析及び津波伝播解析の結果
(0.1_case6)

Figure 2.1.8 Fluid analysis and tsunami propagation analysis simulating the hydraulic experiment assuming without vibration of the slope model



出典) 道口ら (2022) 2.1.14

図 2.1.9 ジョイント・インバージョン解析によるすべり分布 (左: TS 法、右: 従来法)

Figure 2.1.9 Slip distributions by the joint-inversion analyses with TS method (left) and conventional method (right)

2.2 既往の巨大津波の波源推定

基準津波の策定において、津波堆積物等の地質学的証拠や歴史記録等から推定される既往津波波源及び津波の規模（津波高及び浸水域）に関する情報が活用されている。しかし、津波堆積物や歴史記録に基づいて浸水したことが推定されるような過去の巨大津波の中には、その津波波源の位置や規模が明確には定まっていないものがある。その要因の一つとして、津波堆積物は、その認定精度、堆積年代の推定の幅、未発見であっても浸水や堆積物消失の可能性を否定できないこと等の不確かさ^{2.2.1}を伴うことが挙げられる（以下「津波堆積物の不確かさ」という。）。

1611年慶長三陸地震津波（以下「1611年津波」という。）は、その津波波源の位置や規模に関して諸説があり^{2.2.2,2.2.3}、それらが明確には定まっていない巨大津波の一つである。1611年津波により東北地方が浸水したことを示す歴史記録は複数ある。また、1611年津波によって形成された可能性のある津波堆積物は、北海道及び東北地方の太平洋沿岸に広く分布する^{2.2.3}。しかし、これらの沿岸で同時代に発生した津波イベントは複数あるため、津波堆積物と津波イベントとの対応関係の解釈の違いが、統一的な津波波源の推定を困難にさせている要因の一つとなっている。こうした解釈の違いは、津波堆積物に基づく津波波源の推定では常にある津波堆積物の不確かさに起因する課題であるものの、可能性のある津波波源を推定する上では重要である。そして、その推定波源の確度を高めるために津波堆積物情報を拡充するほか、津波堆積物の不確かさを低減することが望まれる。しかしながら、津波堆積物の不確かさに起因する津波堆積物に対する解釈の違いが、津波波源の位置及び規模の推定結果へ及ぼす影響、すなわち、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性については殆ど知られていない。このような知見が得られれば、既往津波の再現のために有用な津波堆積物（調査地点、不確かさの低減等）の特定に役立てられる。また、1611年津波と関連する津波堆積物の不確かさを考慮して推定される津波波源の情報は、基準津波の策定において参照すべき既往津波の一つとしての活用が見込まれる。

そこで本研究では、津波堆積物の不確かさを考慮して1611年津波の津波波源を推定するとともに、津波堆積物の情報量や信頼度等の違いが津波波源の推定結果にどの程度影響するのかを把握することを目的とした。まず、文献調査により1611年津波と関連する津波堆積物及び歴史記録を抽出した。次に、文献調査で得られた情報を踏まえて現地調査を実施し、1611年津波の堆積物情報を拡充した。さらに、津波及び土砂移動の数値解析ツールを整備して、北海道及び東北地方の太平洋沿岸を対象に津波波源の位置や規模を様々に考慮した津波及び土砂移動の解析を実施した。以上の文献調査、現地調査及び解析結果に基づき、1611年津波の可能性のある津波波源やそれに対する津波堆積物の不確かさの影響を確認した。

本報告は、共同研究の実施期間で得られた成果^{2.2.4}とその後得られた成果をまとめたものである。ただし、その後得られた成果は、共同研究者と協議した方針に基づくものであり、共同研究の成果である。

2.2.1 津波堆積物に関する知見収集

(1) 文献調査及び現地調査の実施

1611 年津波によると考えられる津波堆積物の分布範囲に関する情報を得るため、文献調査を実施した。その結果、岩手県及び宮城県では、1611 年津波が押し寄せた歴史記録が各地域にあることから、1611 年津波と対比し得る津波堆積物の情報が比較的多くある一方で、青森県、福島県及び茨城県では、1611 年津波に係る歴史記録が少なく、1611 年津波と対比し得る津波堆積物の情報も少ないことが分かった。津波波源推定に当たり、1611 年津波の本州における津波堆積物分布の境界に関する情報を拡充する必要性を認識し、青森県、宮城県（南部）、福島県及び茨城県における 6 地域で現地調査を行い、イベント堆積物の確認及び試料採取を行った。

(2) 試料分析

簡易型地層抜き取り装置等で採取した堆積物試料について、肉眼観察を行い、イベント堆積物及び平常時堆積物（例えば植物由来の有機質堆積物等）を区分した。その上でそれぞれから年代測定用及び各種分析（火山灰分析及び珪藻分析）用の試料を採取し、放射性炭素年代測定、火山灰分析及び珪藻分析を行った。その結果、青森県において、1611 年津波によって堆積した可能性を有するイベント堆積物が得られた（図 2.2.1）。このイベント堆積物の堆積年代を絞り込むため、人工改変の影響が見られなかった特に状態の良い堆積物試料一つについて、イベント堆積物の上位層及び下位層から採取した複数箇所の年代測定の結果を利用し、統計的な処理を行ったところ、AD1506～1655 に堆積したと推定された。宮城県（南部）、福島県及び茨城県で得られたイベント堆積物については、ほぼ全ての地点で 1611 年津波よりも古い年代を示した。ただし、数地点では 1611 年津波による可能性を否定できない堆積年代を示すイベント堆積物を確認できたが、海岸線に対して直交方向に群列採取した周辺の堆積物試料では、同堆積物の連続性（広範囲な分布）を確認できなかったため、津波起因かどうかの判断は困難であった。なお、珪藻分析からは、津波起因の根拠とできる有意な結果は得られなかった。

(3) 津波堆積物の信頼度判定

上記 (2) のイベント堆積物について、現地調査及び試料分析の結果に基づき、過去の安全研究で整備した津波堆積物の認定手順^{2.2.1}等に照らし、津波堆積物としての信頼度判定を行った。イベント堆積物は、以下の六つの分類（S、A1、A2、B、C 及び X）のうち、C 又は X に判定された。また、文献調査の結果として、24 件の文献から抽出されたイベント堆積物約 400 件についても信頼度判定を行い、A1、A2、B、C 又は X と判定した。

津波堆積物の分類グループ

S：地質学的、歴史的証拠に基づき津波により堆積した可能性が高いイベント堆積物

A1：津波による堆積が示唆されるイベント堆積物

A2：歴史記録に対応するイベント堆積物

B：海水起源のイベント堆積物

C：現世の津波堆積物と類似した堆積学的特徴を有するイベント堆積物

X：上記以外のイベント堆積物

さらに、上記の現地調査及び文献調査の本判定の情報に年代測定結果、歴史記録の有無等を加え、1611 年津波の堆積物に関する信頼度の判定（以下「1611 年津波堆積物の信頼度」という。）を行った。

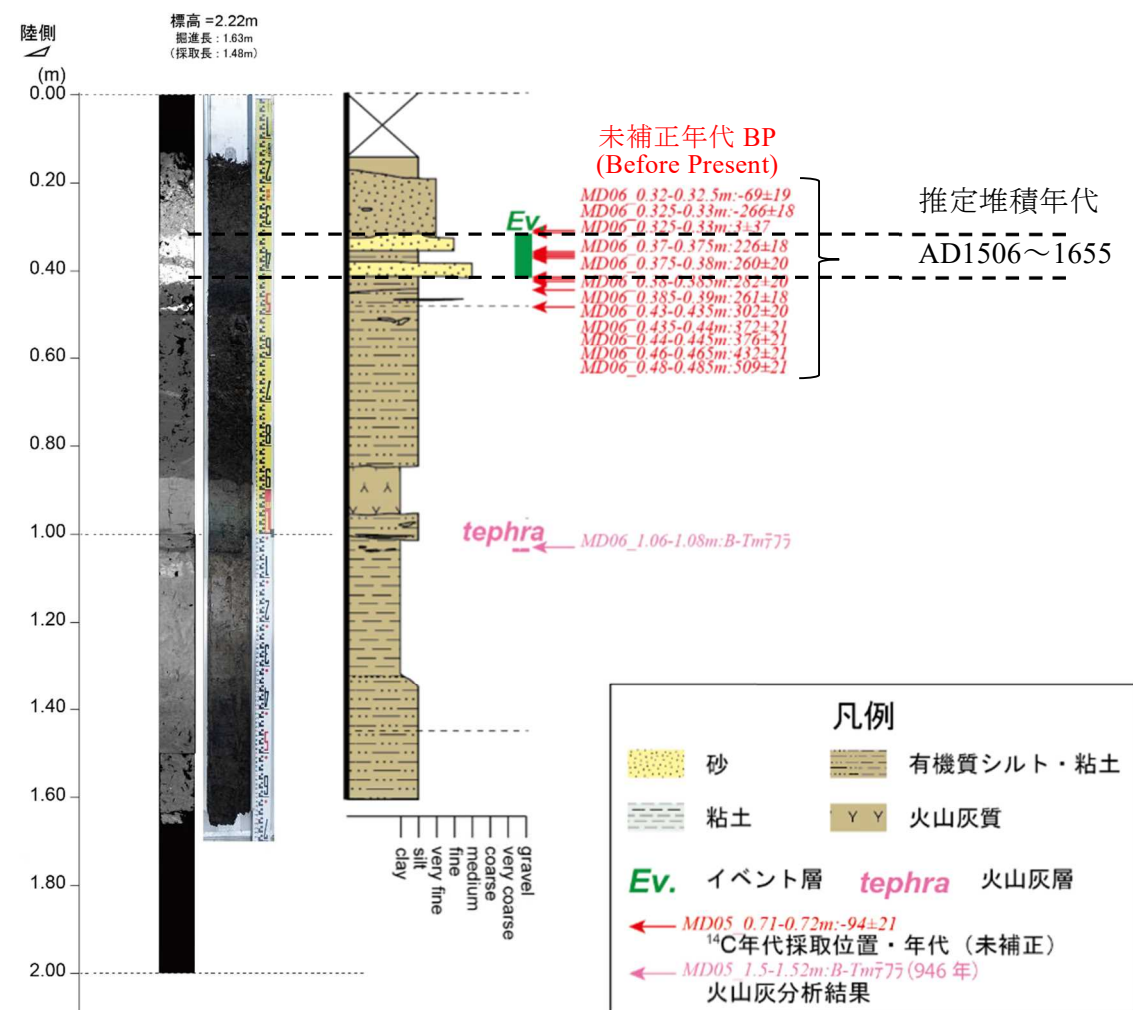


図 2.2.1 青森県における堆積物試料の CT 画像、写真及び柱状図

Figure 2.2.1 CT image, photograph and stratigraphy at the Aomori site

2.2.2 数値解析の実施及びデータベースの拡充

1611 年津波と関連する津波堆積物及び歴史記録、並びに津波及び土砂移動の数値解析に基づき、1611 年津波の津波波源を推定するため、「(1) シナリオ波源の設定」、「(2) 解析対象領域の設定」及び「(3) 津波遡上解析及び土砂移動解析の実施」に取り組み、「(4) 波源推定のためのデータベースの拡充」を行った。

(1) シナリオ波源の設定

1611 年津波の波源候補として、日本海溝から千島海溝におけるプレート間地震及びアウターライズ地震（海溝等へ沈み込む前の位置で発生する海洋プレート内地震）を対象に、津波波源の位置や規模を仮定した多数のシナリオ波源を設定した。プレート間地震の設定では、令和 2 年度プロジェクト^{2.2.5}で得られた成果を応用した。すなわち、地殻変動の水平変位が鉛直方向に寄与する効果（水平変位の寄与分（2.1 参照））を考慮し、東北地震津波で検証した特性化波源断層モデルの超大すべり域及び大すべり域の面積比率やすべり量の設定方法を用いて、日本海溝から千島海溝におけるプレート間地震の特性化波源モデルを設定した。なお、超大すべり域及び大すべり域はそれぞれ最大一つとした。

図 2.2.2 は、上記の特性化波源断層モデルの設定方法に基づき設定した、対象海域で発生し得るプレート間地震を網羅した合計 193 通りのシナリオ波源（Mw 7.9～Mw 9.4）である。これら特性化波源断層モデルのほか、1611 年津波（相田、1977^{2.2.6}；Yamanaka and Tanioka, 2022^{2.2.7}）、17 世紀津波^(注1)（Ioki and Tanioka, 2016^{2.2.8}）、東北地震津波（道口ら、2022^{2.2.9}）及び日本海溝沿いのアウターライズ地震津波（Baba et al., 2020^{2.2.10}）を対象とする、合計 16 通りの既往の津波波源モデル（Mw 8.1～Mw 9.1）を含む、合計 209 通りのシナリオ波源を 1611 年津波の波源候補とした。なお、Baba et al. (2020)^{2.2.10} のアウターライズ地震津波の断層モデルには、本研究で新たに設定した不均質すべり分布を有する 1 通りを含めた。

(注1) 北海道東部に広く分布する津波堆積物に基づき千島海溝沿いで発生したと推定されている巨大津波。17 世紀初頭に発生したと考えられている。



図 2.2.2 日本海溝から千島海溝のプレート間地震を対象として得られた特性化波源断層に基づくシナリオ波源のすべり分布

Figure 2.2.2 Slip distributions of characterized tsunami source models for interplate earthquake along the Japan trench to the Chishima (Kuril) trench

(2) 解析対象領域の設定

2.2.1 における文献調査及び現地調査に基づく津波堆積物の分布結果を踏まえ、1611 年津波の波源推定に効果的であると考えられる、北海道から千葉県にわたる合計 18 地域の解析対象地域を設定した。地形データは、沖合から沿岸に向かって解像度を高めるため、2410 m、810 m、270 m、90 m、30 m 及び 10 m のメッシュサイズを採用した。土砂移動解析を実施する 10 m メッシュサイズの解析領域の地形データについては、現在得られるデータは現代のものであるため、海岸線の位置・形状の調節や人工構造物の除去を行い、可能な限り 1611 年当時に近づけるように整備した。土砂移動解析における土砂供給源は、当時の状況を復元することは困難であるため、公開されている土地利用図等を参考に設定した。また、土砂移動解析における土砂供給源の粒径 3 種類を設定するため、2.2.1 (1) における文献に加え、海岸工学分野等における文献（例えば宇田ら、2016^{2.2.11}）を調査し、18 地域の解析対象地域における津波堆積物や海浜等の粒径に関する情報を抽出した。

(3) 津波遡上解析及び土砂移動解析の実施

① 津波及び土砂移動の数値解析ツールの整備

平成 28 年度プロジェクトにおける委託研究 ^{2.2.12} で整備された津波及び土砂移動の数値解析ツール「TUNAMI-STM」^{2.2.13,2.2.14} の土砂移動解析機能を、原子力規制庁が所有する津

波及び土砂移動の数値解析ツール「SANNAMI (+TUNAMI)」に適合するように実装した。

「TUNAMI-STM」の土砂移動解析機能は、高橋ら（1999）^{2.2.13}の土砂移動モデルに菅原ら（2014）^{2.2.14}の流況に応じて飽和浮遊砂濃度を動的に変化させる予測式を導入したものであり、これらを「SANNAMI (+TUNAMI)」に実装することで、土砂移動解析の精度向上が期待される。本手法は、津波による土砂移動及び地形変化を精度良く評価できることが国内外の津波イベントを対象に広く確認されている（例えば Yamashita et al., 2022^{2.2.15}）。

なお、本数値解析ツールの整備に当たっては、計算安定性を確保するために複数の課題を解決した。SANNAMI (+TUNAMI)の津波解析機能による全水深及び流量の計算値をTUNAMI-STMの土砂移動解析機能へ受け渡して土砂移動解析を実施する方法では、浸水限界付近の地形変化計算で斑状のノイズ（侵食や堆積の異常値）が発生する課題が生じた。TUNAMI-STM 及び SANNAMI (+TUNAMI) の中核である津波解析機能は、その基礎方程式及び計算手法が同一である津波解析ツールに基づくが、両者の津波解析機能における遡上先端の全水深の定義式が同一ではなくノイズの原因であることが分かった。そこで、SANNAMI (+TUNAMI)の津波解析機能における全水深の定義式をTUNAMI-STMの定義式と整合するよう改良したことによりノイズは解消され、様々な地形条件及び津波規模に対する津波及び土砂移動の数値解析においても不安定が生じないことを確認できた。また、遡上先端における土砂移動の境界条件の改良等を行い、数値解析ツールの精緻化も図った。

② 東日本の太平洋沿岸を対象とした津波及び土砂移動の数値解析

北海道を含む東日本の太平洋沿岸を対象に、2.2.2（1）、（2）及び（3）①に基づき、209波源、18地域及び3粒径に対する合計11,286ケースの津波及び土砂移動の数値解析を実施し、浸水高、津波堆積物の層厚等の数値解析結果を得た。そして、本数値解析によって得られた津波及び土砂移動に関する傾向や解析結果の妥当性を定性的な観点から調査した。

まず、図2.2.3は、193通りの特性化波源断層モデル（Mw 7.9～Mw 9.4）及び16通りの既往の津波波源モデル（Mw 8.1～Mw 9.1）を対象にした場合の海岸線における津波高分布を示したものである。ここで、地図上の赤枠は、土砂移動解析を実施した領域である。「調査地点標高」は、1611年津波と関連する津波堆積物が位置する標高である。193通りの特性化波源断層モデルの場合、千島海溝及び日本海溝の連動型地震が含まれるため、東日本の太平洋沿岸にわたる最高津波高（赤線）は総じて高い。一方、16通りの既往の津波波源の場合、最高津波高の地域差が顕著に表れている。北海道では、その南東部と比較して南西部の最高津波高が低い。また、東北地方では、岩手県におけるリアス海岸を有する地域において顕著に最高津波高が高く、特に注目すべきは、地震規模が最大 Mw 9.4 であるプレート間地震による最高津波高より高いことである。このような岩手県における最高津波高は、Baba et al. (2020)^{2.2.10}の日本海溝沿いのアウターライズ地震断層モデル（Mw 8.7）によるものである。このアウターライズ地震断層モデルにおける大すべり域が岩手県の沖合に位置することのほか、プレート間地震と比較してアウターライズ地震による津波の周期の方が短いため、リアス海岸における津波の増幅効果が強く表れたと考えられる。後者の

津波高の増幅は、東北地震津波や 1611 年津波において、比較的短周期の津波成分が局所的な津波高の増幅に寄与したことを示した Shimozono et al. (2014)^{2.2.16} や Yamanaka and Tanioka (2022)^{2.2.7} の知見と整合する。ただし、このような広範囲で津波高が 30 m を超えるような巨大津波（リアス海岸のため遡上高は更に高くなる。）の痕跡を示す津波堆積物等の地質学的証拠や歴史記録はこれまでに見つかっていないため、断層モデルの妥当性は慎重に確認する必要がある。また、本数値解析では、周期が短くなるほど顕著になる津波の分散性^(注2)の効果を考慮していないため、図 2.2.3 に示された津波高は、津波伝播における分散性に伴う誤差が比較的大きいことにも留意する必要がある。分散性を考慮した場合の津波高の評価及びその解析機能の SANNAMI (+TUNAMI)への実装は、今後の課題である。

なお、16 通りの既往の津波波源モデルによる東北地方太平洋沿岸における津波高は、上述した岩手県のリアス海岸を有する地域に加え、宮城県牡鹿半島南端を除くと、東北地震津波と同程度である。宮城県牡鹿半島南端は、津波が集中しやすい岬先端に位置することに加え、その先端の周辺に島嶼が複数あること及び土砂移動解析の対象ではないこの地域の解析解像度が比較的粗いことが原因となって、津波高の解析結果が局所的に高くなったと推測される。

次に、図 2.2.4 は、宮城県仙台平野における亘理地域を解析対象領域とする津波及び土砂移動の数値解析結果である。ここで、東北地震津波の津波波源モデル^{2.2.9}に対して、粒径を 0.267 mm とした場合の結果であり、本解析ツールの妥当性を調査することを目的とする。ただし、上段左図に示した数値解析に使用した地形データ（2.2.2 (2) 参照）は、当時の地形データとは若干異なるため、厳密な再現計算ではないことに留意されたい。上段右図の浮遊砂濃度のスナップショットは、海底からではなく汀線付近で土砂が巻き上がり、津波前面に浮遊砂を保持しながら遡上したことを示す。東北地震津波による仙台平野における津波堆積物の特徴の一つは、海底土砂の混入率が低いことであり、本数値解析は、その特徴を再現している。下段左図の最高水位分布は、汀線付近の津波高が約 10 mであることを示し、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ^{2.2.17}による調査結果と整合する。下段右図は、津波堆積物の層厚分布である。汀線付近の陸域では津波堆積物が認められず、その背後の最大 0.4 m 程度の層厚から内陸に向かって薄層化する分布が示されている。この傾向は Goto et al. (2014)^{2.2.18}に示された津波堆積物の分布傾向と良好に一致する。なお、プロットは既往文献（Sawai et al. 2012^{2.2.19} 及び津波痕跡データベース^{2.2.20}）に基づく津波堆積物の調査地点であり、●はイベント堆積物が認められた地点、×は認められなかった地点である。

以上の全シナリオ波源の特徴把握、津波及び土砂移動の解析ツールの検証を踏まえると、シナリオ波源による津波の多くは規模が大きいことには留意する必要があるものの、同海域において網羅的な中小規模の津波も含まれており、それら様々な規模のシナリオ波源を

(注2) 波の波長（又は周波数）によって波速が異なる性質を指す。波の分散性により、波を構成する成分波はそれぞれの波速で伝播するため波形が変化する。

候補とする中から、信頼できる解析ツールに基づいて波源を推定することが可能である。

図 2.2.5 は、図 2.2.4 に示した亘理地域における「堆積面積/浸水面積」と「津波高」の関係であり、209 種類の全てのシナリオ波源を対象とし、3 種類の粒径による結果を示した。ここで、対象領域の海岸線における津波高の最高値を横軸にプロットした。また、「堆積面積/浸水面積」は「堆積距離/浸水距離」に相当し、亘理地域の代表粒径は図中の「粒径（中間）」に相当する。東北地震津波による仙台平野における汀線付近の津波高は 10 m 程度（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ^{2.2.17)}、「堆積距離/浸水距離」は 0.6~0.7 であること（Abe et al., 2012^{2.2.21)}）が報告されている。本数値解析結果における「津波高」が 10 m である場合、「堆積面積/浸水面積」は 0.8 程度であるため、Abe et al. (2012)^{2.2.21)} の結果と比較するとやや大きいものの比較的良好な一致度合いである。

亘理地域における「堆積面積/浸水面積」は、来襲する津波の津波高に依存し、両者には明確な関係性が認められる。また、粒径が小さくなるほど、「堆積面積/浸水面積」が大きくなる傾向も認められる。一方、同一粒径の結果に着目すると、二つのグループが存在するようである。すなわち、同一の粒径及び津波高だとしても、「堆積面積/浸水面積」が大きいグループと小さいグループに分かれている。この原因の分析は今後の課題である。

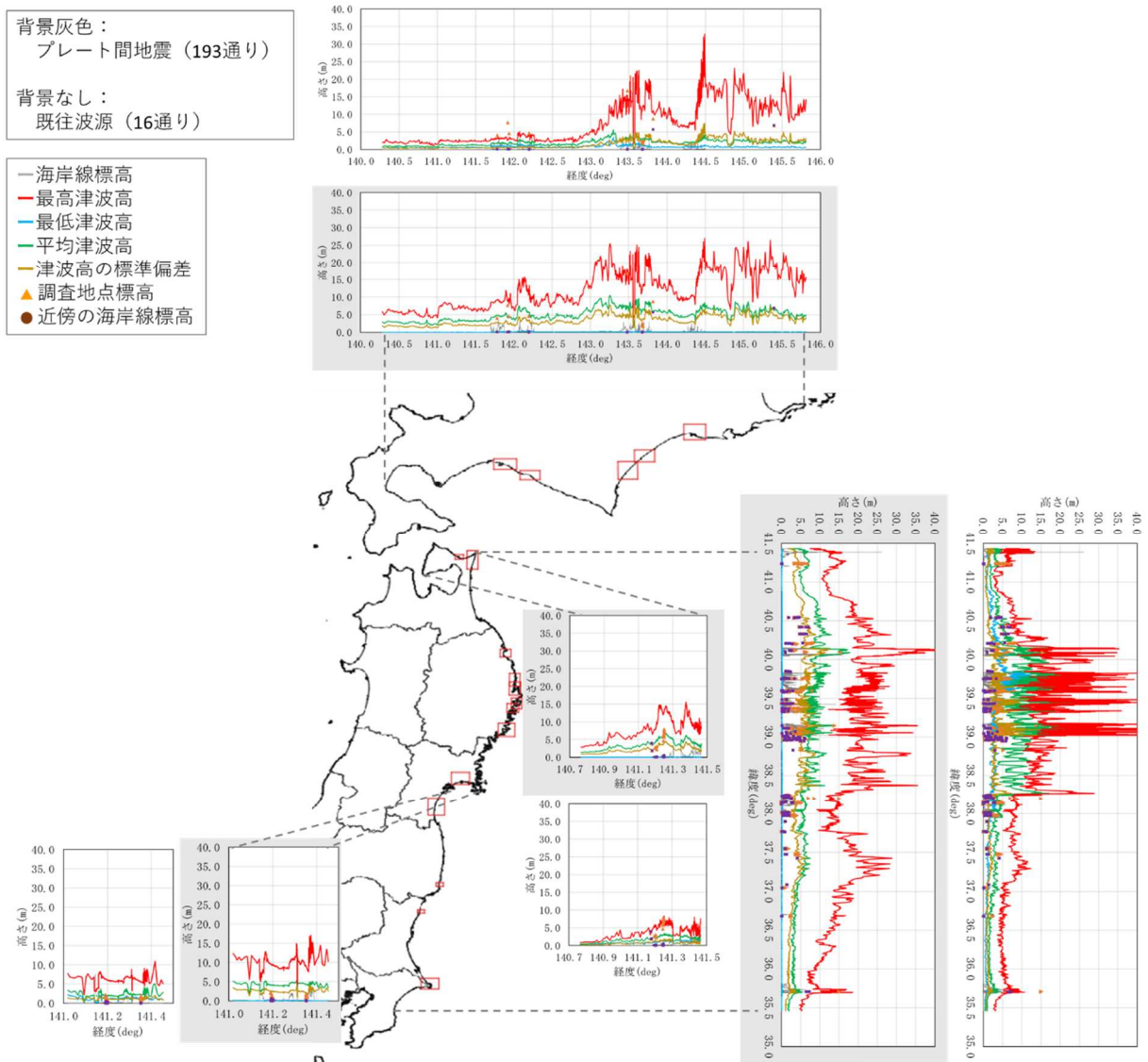


図 2.2.3 シナリオ波源を用いて推定された津波高分布

Figure 2.2.3 Tsunami height distributions along the coast estimated using scenario tsunami source models

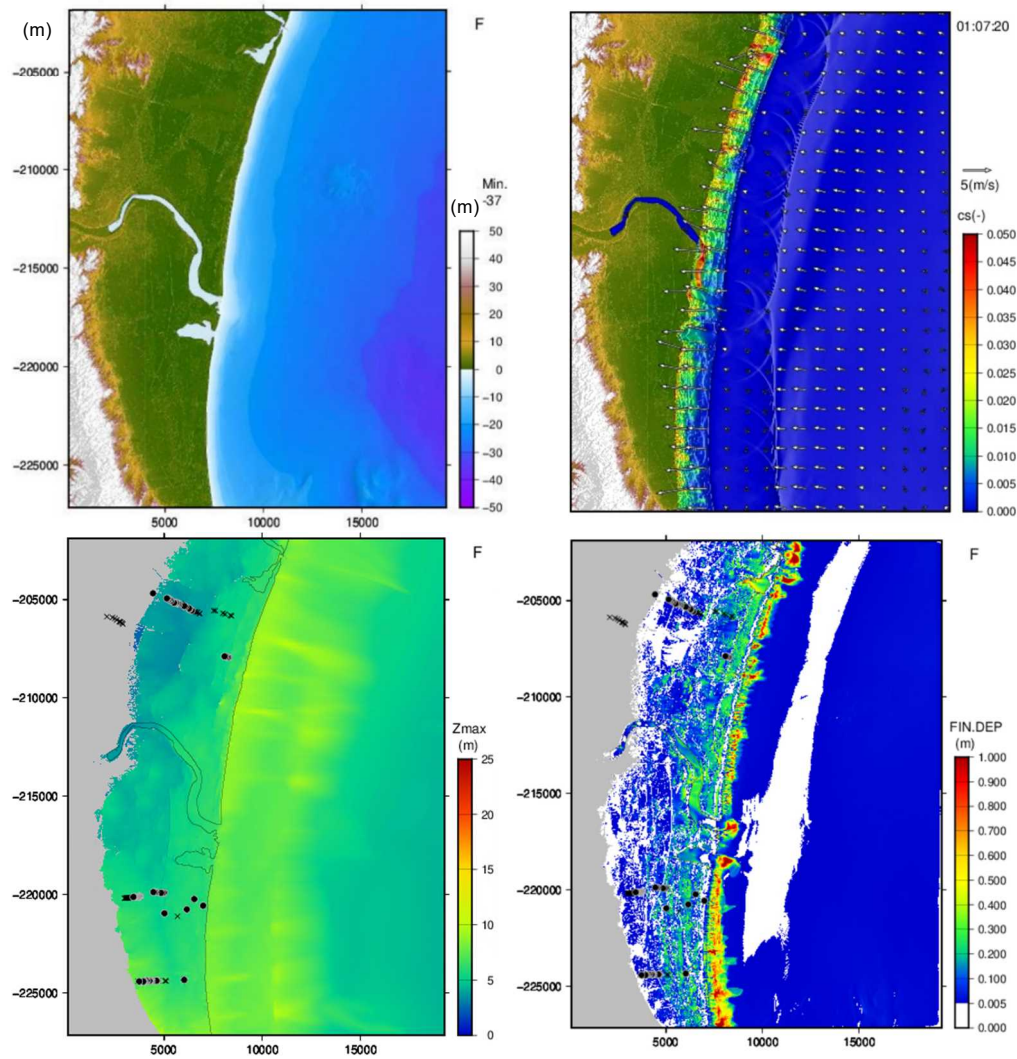


図 2.2.4 宮城県仙台平野の亘理地域を対象とした津波及び土砂移動の数値解析結果
 Figure 2.2.4 Numerical simulation results of tsunami and sediment transport in Watari area of the
 Sendai Plain, Miyagi Prefecture

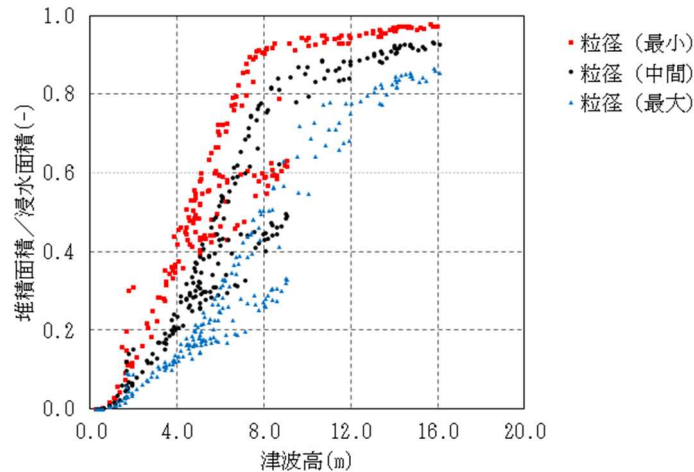


図 2.2.5 209 通りの全シナリオ波源に基づく堆積面積/浸水面積と津波高との関係
 Figure 2.2.5 Relationship between tsunami heights at the coast and deposition/inundation areas obtained from all the 209 types of scenario tsunami source models

③ 1611 年津波の津波波源に関する予察

「2.2.3 津波堆積物の不確かさを考慮した津波波源の推定」の予察として、2.2.1 における津波堆積物情報の一部と、2.2.2 (3) ②の試解析結果を用いて、1611 年津波の津波波源を推定した。津波堆積物情報を使用した地域は、1611 年津波を起源とする可能性が高い津波堆積物が見つかっている宮城県石巻地域に加え、その起源とする津波が 1611 年津波と 17 世紀津波とで解釈が分かれる北海道南東部とした。また、歴史記録による津波痕跡情報を使用した地域は三陸地方及び仙台平野とした。

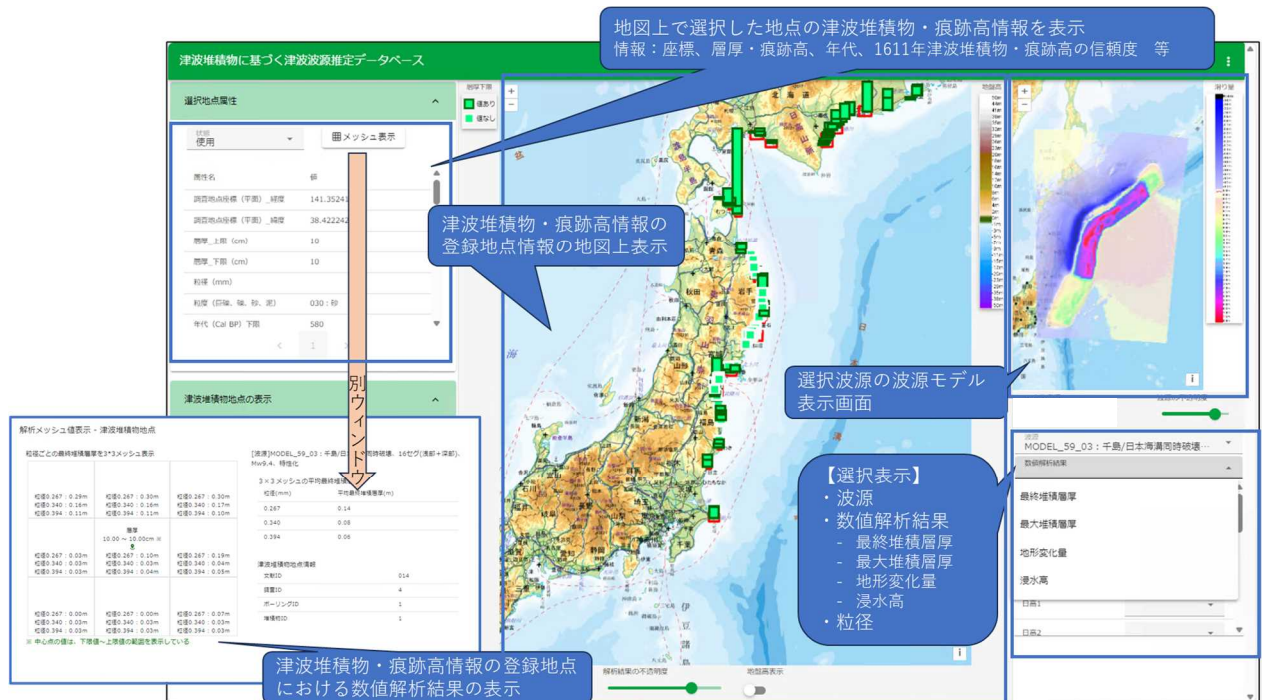
上記の津波堆積物に対する解釈の違いを考慮し、シナリオ A「北海道沿岸における津波堆積物は 1611 年津波が起源ではない場合」と、シナリオ B「北海道沿岸における津波堆積物は 1611 年津波が起源である場合」を仮定した。そして、シナリオ A 及び B の両者に共通する二つの必要条件を設定した。すなわち、仙台平野及び石巻地域の海岸線における津波高の解析結果が石巻地域の津波堆積物に対応した津波高を上回ることと、三陸地方沿岸の海岸線における津波高の解析結果が歴史記録による津波痕跡高を上回ることである。一方、シナリオ A 及び B における必要条件の違いは、北海道南東部の海岸線における津波高である。つまり、シナリオ A を満たすためには北海道南東部の津波高の解析結果は小さくなくならず、シナリオ B を満たすためには北海道南東部の津波高の解析結果は大きくなくならない。ただし、以上は予察のための必要条件の設定であるため、石巻地域の津波堆積物及び歴史記録に基づく海岸線における津波高の推定値をやや低く設定することにより、可能性のある津波波源を幅広く抽出することとした。

以上を踏まえて 1611 年津波の津波波源を予察的に推定したところ、各シナリオを説明し得る津波波源の波源域には、以下の特徴があることが分かった。

- ・ シナリオ A を説明し得る津波波源域は日本海溝沿いの津波波源モデルに限定される。
- ・ シナリオ B を説明し得る津波波源域は日本海溝沿い及び千島海溝沿いの両者にまたがる津波波源に限定される。
- ・ 千島海溝沿いのみの津波波源ではシナリオ A 及び B のいずれも説明できない。

(4) 波源推定のためのデータベースの拡充

1611 年津波と関連する津波堆積物及び歴史記録に対して、それぞれのシナリオ波源に基づく津波及び土砂移動の数値解析の再現性を評価するためには、複数の任意地点における現地の津波堆積物の層厚、浸水高、1611 年津波堆積物の信頼度（2.2.1 (3) 参照）等（以下「現地情報」という。）に加え、数値解析による津波堆積物の層厚、浸水高等（以下「数値解析情報」という。）の情報が必要である。そこで、平成 28 年度プロジェクト^{2.2.22}で構築された「津波堆積物に基づく津波波源推定データベースの構築」^{2.2.23}によるデータベース（以下「従来データベース」という。）を改良した。従来データベースに「評価に用いる地点を取捨選択できる機能」、「画面上で現地情報と数値解析情報を表示・確認できる機能」等を追加することで、2.2.3 で詳述する「推定波源の確からしさ」を算出する仕組みを構築した（図 2.2.6）。機能を追加したデータベース（以下「拡張版データベース」という。）に対し、2.2.1 で整理した現地情報及び 2.2.2 (1) ～ (3) で整理した数値解析情報を登録し、データの拡充を行った。



出典）画面中央及び右上の地図は、「地理院タイル一覧」（国土交通省国土地理院）^{2.2.24} を利用し、現地情報等を追記

図 2.2.6 津波堆積物に基づく津波波源推定データベースの画面

Figure 2.2.6 Screenshot of the tsunami source estimation database based on tsunami sediments

2.2.3 津波堆積物の不確かさを考慮した津波波源の推定

2.2.2 (4) の拡張版データベースを用いて、209 通りの全ての波源候補に対して 1611 年津波の波源である確からしさを定量的に評価し、複数の波源を推定した。推定波源の確からしさとは、1611 年津波堆積物の信頼度の判定結果を踏まえて津波堆積物の不確かさを数値化し、それぞれのシナリオ波源に基づく津波及び土砂移動の数値解析の再現性を定量的に評価する指標である。具体的には、現地情報と数値解析情報を用いて、選択地点の津波堆積物の現地の層厚と数値解析の層厚の差等より求められる値に、1611 年津波の津波堆積物の不確かさの程度を段階的に区分し重み付けした数値を与えた 3 種類の評価式を構築し、推定波源の確からしさを算出した。それぞれの評価式の特徴は、①津波堆積物の現地の分布地点と計算浸水範囲又は計算堆積範囲との整合性、②津波堆積物の層厚に対する平均絶対パーセント誤差（相対誤差の絶対値の平均）、及び③津波堆積物の層厚のばらつきを考慮した層厚の絶対誤差に着目した点である。以下では、②の評価式の結果を一例として示す。

まず、東日本の太平洋沿岸における現地情報と数値解析情報に基づき、推定波源の確からしさを算出した。その結果、評価値から千島海溝沿い及び日本海溝沿いの同時破壊の推定波源が上位 5 件中 4 件を占めた。5 件中の他の 1 件は東北地震津波の波源モデルであった。図 2.2.7 に上位 5 件までの波源を示す。評価値が上位 5 件となった推定波源は、 M_w が 9.1~9.3 程度で設定したシナリオ波源の中でも比較的規模の大きな波源が抽出された。この上位 5 件の波源の再現性を、津波痕跡高と数値解析結果である計算津波高の比を用いた再現性指標である相田^{2.2.6}の指標（幾何平均 K 、幾何標準偏差 κ ）で確認すると、それぞれ（0.38、1.65）、（0.39、1.50）、（0.40、1.64）、（0.37、1.55）、（0.59、1.62）であった。土木学会^{2.1.1}によれば、良好な再現性の目安として、 $0.95 < K < 1.05$ 、且つ $\kappa < 1.45$ の値の範囲が示されている。ここで、 K の値が 1 より小さい場合、計算津波高が津波痕跡高より大きいことを意味する。したがって、このような計算津波高が津波痕跡高より大きい津波によって形成される津波堆積物の数値解析による層厚は、相対的に厚くなる傾向になることが予想される。一方、本評価では 3 粒径のそれぞれで 18 地域の土砂移動解析を実施して層厚を算出し、その中から各地域における層厚の現地情報に最も適合する土砂移動解析結果を選択する方法を採用した。このため、規模の大きな津波でも土砂移動が抑制される大きな粒径による結果に基づき評価値が決定され、津波堆積物の現地情報の層厚に対する説明性が「見かけ上」高まったと考えられる。よって、津波堆積物のみに基づく波源推定において現地情報の層厚に対して適合度が高い粒径に基づく本評価では、津波痕跡高に基づく相田^{2.2.6}の指標では選択されないような巨大な津波でも評価値が高くなり得る。以上より、現地に即した粒径の設定のほか、津波堆積物に基づく評価のみでは無く津波痕跡高に基づく評価も考慮することが重要であることが分かった。後者の津波痕跡高に基づく評価を考慮した波源推定結果については後述する。前者の現地に即した粒径の設定については、今後の課題である。また、津波堆積物の不確かさに対する重み付けを含む様々なパラメータの影響を把握することも重要と考える。

次に、津波堆積物の有無の情報が推定波源の絞り込みに与える影響を把握するため、1611年津波による津波堆積物が無いと考えられる地点（以下「未発見情報」という。）を設定し、その地点で津波堆積物を形成させる波源を1611年津波の波源候補から除外することを試みた。北海道釧路市の春採湖では、1年に1層形成される縞模様の湖底堆積物（以下「年縞堆積物」という。）があり、堆積年代の推定に用いられている。Nanayama (2021)^{2.2.25}は、春採湖で確認された17世紀津波による津波堆積物の堆積年を、年縞堆積物に基づいておよそ1637年と推定している。そこで、春採湖では1611年津波による堆積は無かったと仮定し、拡張版データベースにて、この地点を堆積させる波源を候補から除外して評価を行った。その結果、上位5位の順位は変化が無かったが、それ以降の波源で釧路沖に大きなすべり量を持つ推定波源は評価から除かれた。これは、未発見情報が推定波源の位置や規模を規定する上で重要であることを示唆する。また、2.2.2 (3) ③の予察におけるシナリオAでは、北海道の津波堆積物を未発見情報と同等の位置づけとして扱ったため、千島海溝沿いに波源域を有する全ての波源が除外された。予察による結果は本評価と整合し、北海道の未発見情報が推定波源の北限を規定した結果である。今後、様々なシナリオを考慮して波源推定を行うことが課題の一つである。

さらに、以上の結果を踏まえ、津波堆積物、痕跡高及び未発見情報を総合的に考慮する定量的評価手法を考案して適用した。本手法では、未発見情報の扱い方は前述のとおりであるが、津波堆積物の層厚に対する指標及び津波痕跡高に対する相田の指標 K - κ を組み合わせた新しい指標により、津波堆積物と津波痕跡高に対する再現性を総合的に考慮した1つの評価値を与えることができる。本手法を適用した結果、図 2.2.8 に示す三陸沖に大きなすべり量を有する千島海溝沿い及び日本海溝沿いの同時破壊による津波波源 (M_w 9.0、 $K=0.76$ 、 $\kappa=1.57$) の評価値が最も高いことが分かった。この推定波源の波源域や規模は、千島海溝沿い又は日本海溝沿いにすべり域があるとする既往研究^{2.2.6-2.2.8}のそれらとは異なる。しかし、津波痕跡高が明らかな過大評価であった上述した津波堆積物のみを用いた推定波源と比べて地震規模が抑えられ、痕跡高への説明性が向上した。また、大きなすべり量が三陸沖にあるとする既往研究^{2.2.7}による波源との整合性も取れている。ただし、本指標の特性や妥当性の確認は今後の課題である。

最後に、津波堆積物の不確かさのうち、情報量の違いや信頼度が津波波源の推定結果にどの程度影響するのかの観点で、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性を調査した。具体的には、北海道の現地情報のみを用いた場合及び本州の現地情報のみを用いた場合の推定波源の評価値を算出し、結果の違いを確認した。その結果、北海道のみの場合は、同時破壊以外にも千島海溝沿いのみの比較的大きな波源でも評価値が高く、本州のみの場合は、同時破壊以外にも日本海溝沿いの比較的大きな波源で評価値が高い傾向となり、それぞれの前面海域の推定波源への寄与が大きいことが分かった。すなわち、波源推定に用いる現地情報の位置、量等は、波源の位置、規模等の推定に影響を及ぼすことを具体的に示すことができた。今後、 K 及び κ の値を含めて推定波源群の抽出傾向を分析し論文化する

計画である。

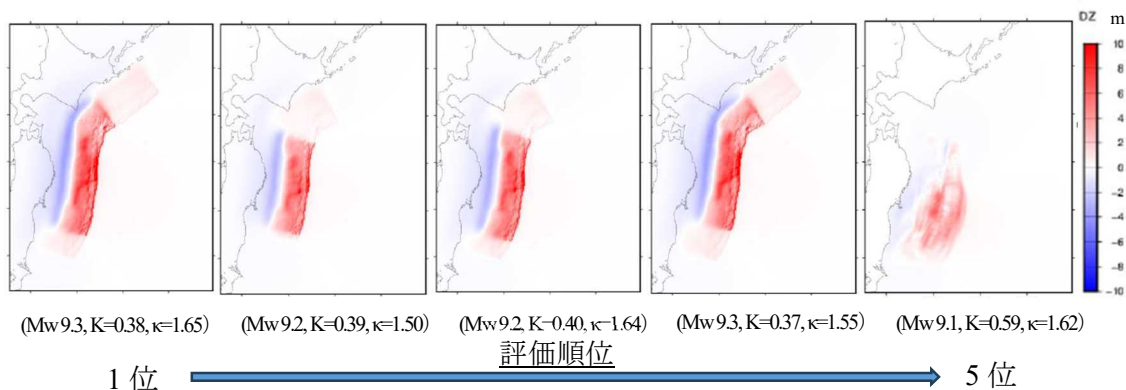


図 2.2.7 1611 年津波の津波堆積物に基づく波源推定による評価上位 5 波源

Figure 2.2.7 Top five wave sources by tsunami source estimation based on tsunami deposits

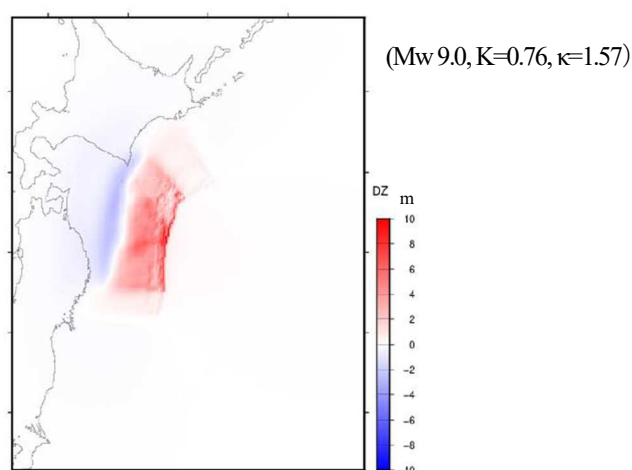


図 2.2.8 1611 年津波の津波堆積物、痕跡高及び未発見情報に基づく波源推定による波源の一例

Figure 2.2.8 Example of wave sources by tsunami source estimation based on tsunami deposits, tsunami trace heights and unfound tsunami deposits data

2.2.4 津波及び土砂移動の数値解析ツールの高度化

津波審査ガイドでは、土砂移動に関する数値解析手法は「今後もこの分野での研究成果は著しい発展を表す可能性が高く、最新の知見を考慮に入れて適切な数値計算を行う必要がある。」ことが記されている。従来手法に基づく、2.2.2 (3) ①で整備した津波及び土砂移動の数値解析ツールには様々な観点で高度化の余地が残されている。そこで、以下の観点で津波及び土砂移動の数値解析ツールの高度化を図った。

まず、土砂移動の駆動力として重要な摩擦速度の評価手法を高度化するため、非定常流

及び浮遊砂流の効果を同時に考慮できる新しい手法を開発し、その有用性を確認した^{2.2.26}。次に、TUNAMI-STM 及び SANNAMI (+TUNAMI) を含む従来の津波及び土砂移動の数値解析手法では、土砂移動による流体の密度変化が及ぼす流体運動への影響は考慮されないことから、流体の密度変化の効果を考慮した混合流体の挙動を記述する連続方程式及び運動方程式を新たに導出し、TUNAMI-STM 及び SANNAMI (+TUNAMI) へ適合するように実装した。さらに、TUNAMI-STM 及び SANNAMI (+TUNAMI) の土砂移動解析の対象は「砂」であることから、「泥・シルト」を対象とした既存手法（村上ら、1989）^{2.2.27}に基づく土砂移動解析を実施できるように TUNAMI-STM 及び SANNAMI (+TUNAMI) を拡張した。ただし、上記 3 種類の解析機能は、それぞれ、計算効率に課題があること、実地形への適用性を十分に把握できていないこと、及び 1611 年津波の波源推定で泥質の津波堆積物を対象としないことから、1611 年津波の波源推定では利用しないこととした。なお、上記の混合流体モデルについては、令和 7 年度から開始する次期安全研究プロジェクトにおいて追加検証を実施した後、論文化する計画である。

2.2.5 砂質津波堆積物の相似則の提案

2.2.3 までは当初計画通りの成果が得られたが、2.2.1 の文献調査において、津波堆積物に基づく津波規模推定に関する研究の現状と課題を整理したところ、津波堆積物と津波規模の基本的な関係に関しては未解明な点が多いことが分かった。そこで、本研究における津波堆積物に基づく津波波源の推定に資することを目的として、津波堆積物の「堆積距離」や「堆積距離/浸水距離」を含む土砂移動特性と津波規模との基本的な関係を表す津波堆積物の相似則を導いた^{2.2.28}。

本相似則の最たる関心事は、津波堆積物の「堆積距離」と津波規模との関係である。そこで、津波堆積物の「堆積距離」は土砂供給源から巻き上げられる土砂総量とその沈降時間に支配されるという概念を導入し、その物理過程における素過程と津波高との関係を津波及び土砂移動解析の理論体系に基づき仮定した関数形を用いて導いたものが本相似則である。例えば、津波解析で用いられる理論体系^{2.2.29,2.2.30}に基づけば、遡上距離 L_i 、遡上速度 c 及び遡上中の流速 u と、海岸線における津波高 H は、それぞれ、 $L_i \propto H$ 、 $c \propto H^{1/2}$ 及び $u \propto H^{1/2}$ の比例関係として表され、したがって、津波が遡上限界に達するまでに要する遡上時間 T_i は $T_i = L_i/c \propto H^{1/2}$ の比例関係として表される。また、土砂移動解析の理論体系^{2.2.13}に基づけば、単位時間における遡上津波の単位水柱による土砂の巻上量 P （土砂移動特性の一つ）は、 $P \propto u^4/H^{2/3}$ の比例関係として表される。したがって、津波及び土砂移動解析の両者の理論体系を考慮すれば、 $P \propto H^{4/3}$ の比例関係が導かれる。以上のように津波堆積物の形成に支配的な様々な素過程の代表量と津波高とを関係づけ、それら代表量を土砂の輸送・沈降の微分方程式^{2.2.13}における諸量へ代入して微分方程式を津波高によって特性化することにより沈降時間と津波高との関係式を得た。そして、沈降時間と遡上速度に基づき、津波堆積物の「堆積距離」と津波高との関係式を導いた。なお、本相似則の

導出方法は、長さ・質量・時間に基づく次元解析又は現象を支配する微分方程式に基づく無次元数（例えば Froude 数や Reynolds 数）から導く一般法とは異なり、「現象を支配する物理法則を見定め、それらの法則から直接、相似則を導き出すもの」^{2.2.31} と類似し、一般法の統合に相当すると考える。

まず、本相似則の概念実証として、一様勾配を有する理想地形を対象に、本相似則の導出で課した様々な仮定を反映させた津波及び土砂移動の数値解析を行い、数値解析による土砂移動特性と津波規模との関係を、本相似則による予測結果と比較した。その結果、本相似則は数値解析結果を良好に再現できることが分かった^{2.2.28}。

次に、本相似則の現地適用性を調査するため、実地形及び実規模の津波を対象に、本相似則の導出で課した様々な仮定を反映させない津波及び土砂移動の数値解析を行い、数値解析による土砂移動特性と津波規模との関係を、本相似則による予測結果と比較した。図 2.2.9（左）は、堆積面積と海岸線における最高津波高との関係性を示し、2.2.2（3）②において岩手県宮古地域（図 2.2.9（右））を対象にして得られた数値解析結果と本相似則による予測結果を比較したものである。ここで、5 mm 以上の堆積厚を有する面積を堆積面積として評価した。低次及び高次の相似則の両者とも、その予測精度は比較的良好であった（低次及び高次の相似則の違いは文献^{2.2.28}を参照されたい。）。

以上の概念実証及び現地適用性調査による結果は、既往の津波による津波堆積物の堆積距離を特定できれば、その津波による海岸線における津波高を推定できる可能性を示している。また、特定された堆積距離は、津波堆積物の不確かさ等に起因する誤差を有すると考えられるが、本相似則を用いることにより、その誤差を考慮した津波高の推定も可能であると考ええる。本相似則は、津波堆積物に基づく津波規模の推定手法として、津波堆積物から推定される津波高の情報を増やし、既往の巨大津波の波源推定の精度向上に役立てられると期待される（3.2 参照）。なお、現地適用性調査については、令和 7 年度から開始する次期安全研究プロジェクトにおいて追加検証を実施した後、論文化する計画である。

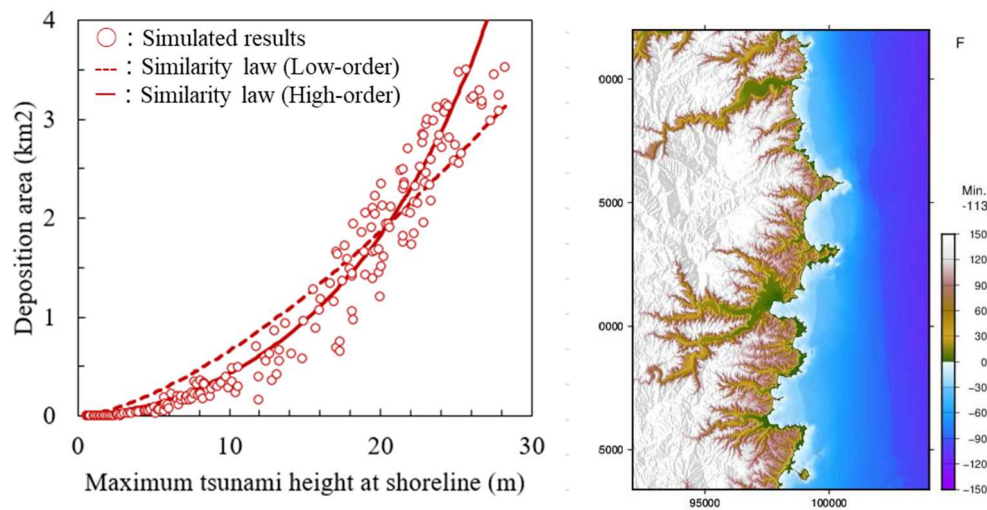


図 2.2.9 津波堆積物の堆積面積と海岸線における最高津波高の関係（左）と対象地域の地形（右）

Figure 2.2.9 Relationship between deposition area and tsunami height at shoreline (left panel) and the target area topography (right panel)

3. 結論

3.1 成果の要点

本プロジェクトでは、適合性審査等の際の判断に必要な知見を収集し、整備することを目的として、令和2年度から令和6年度までに津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する安全研究を実施した。各研究実施項目において以下の成果を得た。

(1) 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

本研究では、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の下で津波伝播解析及び流体解析を実施し、津波の初期水位の生成過程の解明と、その特徴を考慮した津波の初期水位設定方法の改良を目的として、津波評価方法に関する知見の拡充を行った。水理実験、津波伝播解析及び流体解析の結果、津波の初期水位設定方法については、令和2年度プロジェクトで取り入れたTS法で十分な精度を確保できることが分かった。この結果を踏まえ、TS法を利用して津波の初期水位を地殻変動の鉛直変位に加え、水平変位の寄与分を考慮する場合の特性化波源断層モデルを提案した。この特性化波源断層モデルの設定方法は、今後、プレート間地震に起因する津波波源の設定における活用が期待される。なお、当該研究は、原子力規制庁、国立大学法人東北大学及び東北学院大学による共同研究で実施した。

(2) 既往の巨大津波の波源推定

本研究では、津波堆積物の不確かさを考慮して、1611年慶長津波の津波波源を推定するとともに、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性を把握することを目的とした。1611年津波と関連する東日本太平洋沿岸を対象に、文献調査に基づく津波堆積物情報の抽出（253件）、現地調査に基づく津波堆積物情報の更なる拡充（13件）、津波及び土砂移動の数値解析ツールの整備、津波及び土砂移動の数値解析結果の取得（11,286ケース）のほか、推定波源の確からしさを表す評価式の構築、津波波源推定データベースの機能拡張及びデータ拡充により、「津波堆積物に基づく津波波源推定データベースの構築」^{2,23}により構築された津波堆積物に基づく波源推定データベースを改良した。そして、改良したデータベースに基づき、1611年津波の可能性のある津波波源を複数推定した。また、津波堆積物の情報量や信頼度を変化させたデータセットに基づき、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性を調査した。その結果、波源推定に用いる現地情報の位置、量等は、波源推定に使用される地域の前面海域の推定波源への寄与が大きく、波源の位置・規模等の推定に影響を及ぼすことを具体的に示すことができた。

本手法の特徴は、津波堆積物の不確かさを考慮するとともに、従来にはない東日本太平洋沿岸の広域及び多地域における浸水及び土砂移動を総合的に考慮して波源を推定できる点にある。また、上記の数値解析結果は、土砂移動まで含めた数値解析では前例のない大規模なデータセットであり、1611年津波の波源推定のみならず多岐にわたる用途への利用

が期待される有用性の高いデータであると考え。例えばその用途は、浸水高、津波堆積物の層厚や堆積距離等と津波規模との関係性を把握するための統計分析の基礎データのほか、関連する機械学習及び深層学習における教師データ等が考えられる。なお、当該研究は、原子力規制庁、学校法人関西大学、国立大学法人東北大学災害科学国際研究所及び国立大学法人東京大学による共同研究で実施した。

3.2 目的の達成状況

上記のとおり、「2.1 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」及び「2.2 既往の巨大津波の波源推定」の研究項目について、令和2年度から令和6年度までの4年間の実施計画に基づいて実施し、全ての研究項目の当初の目的を達成した。

上記に加えて、「2.2 既往の巨大津波の波源推定」においては、後述するような当初計画していなかった成果を得た。

「2.2.4 津波及び土砂移動の数値解析ツールの高度化」では、摩擦速度の評価手法^{2.2.26}及び混合流体モデルの開発並びに泥質の土砂移動解析のための機能拡張を行った。また、「2.2.5 砂質津波堆積物の相似則の提案」において、津波堆積物の「堆積距離/浸水距離」を含む、津波による土砂輸送特性と津波規模との関係を表す津波堆積物の相似則を導いた^{2.2.28}。これらの手法を津波堆積物に基づく既往の巨大津波の波源推定手法に適用することにより、備えるべき巨大津波の規模のより正しい推定が可能になると期待される。

3.3 成果の公表等

3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

(1) 論文（査読付）

- 1 Yamashita, K., Sugawara, D., Goto, K., Ishizawa, T., Takahashi, T., “A similarity law for sandy tsunami deposits –Feasibility of integration of inverse and forward approaches–”, Journal of Geophysical Research: Earth Surface. (submitted in March 2024)

(2) その他

- 1 山下啓、菅原大助、高橋智幸、「遡上津波の圧力勾配及び浮遊砂流の影響を考慮した津波土砂移動解析」、第29回海洋工学シンポジウム、OES29-052、令和4年

3.3.2 共同研究先による公表

(1) その他

- 1 大内桜子、菅原大助、石澤堯史、高清水康博、卜部 厚志、「三陸海岸南部における歴史津波および洪水堆積物と推定される津波波源の特徴」、日本地球惑星科学連合 2024 年大会、令和6年
- 2 佐藤由人、菅原大助、石澤堯史、卜部厚志、高清水康博、加藤学、川田強、「福島県浪

江町請戸地区における堆積環境の変遷と古津波履歴」、日本地球惑星科学連合 2024 年大会、令和 6 年

3.4 成果の活用等

「2.1 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」で得られた知見は、基準津波に関する規制要求（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の解釈（原規技発第 130619 号、平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定。以下「設置許可基準規則解釈」という。）別記 3 第 5 条 1、津波審査ガイド 3.3 津波波源の設定及び 3.4 津波評価手法及び評価条件 3.4.1 評価手法）に係る適合性審査の技術基盤として活用が見込まれる。また、安全性向上評価（原子炉等規制法第 43 条の 3 の 29）を確認するときの技術基盤として活用が見込まれる。津波の初期水位は、従来、地殻変動の鉛直変位を海面に与える設定方法が用いられてきていたが、本研究では、地殻変動の鉛直変位に加え、水平変位の寄与分から求める初期水位の設定方法（TS 法）の適用性を評価し、TS 法の妥当性を確認することができた。また、TS 法を適用した東北地震津波を対象としたジョイント・インバージョン解析の結果では、津波審査ガイドに記載されている従来法を適用した津波波源と比較して、津波波源のすべり量等は小さくなる傾向が示された。このことから、従来法ではすべり量を割り増しすることで水平変位の寄与の効果が含まれていること、それによって従来法によるすべり量の設定方法が妥当であることを確認した。ただし、水平変位の寄与は海底地形斜面の勾配等の影響を受けることから、水平変位の寄与の効果が大きくなる地形的条件及び水位に与える影響の程度について、今後も検討していく。また、提案した特性化波源断層モデルは、津波評価において、津波レシビ等で基本とされる TS 法を適用して津波の初期水位を設定する場合の新たな特性化波源断層モデルの一つとして、活用が見込まれる。

「2.2 既往の巨大津波の波源推定」で得られた知見は、基準津波に関する規制要求（設置許可基準規則解釈別記 3 第 5 条 2 の 5、津波審査ガイド 3.3 津波波源の設定及び 3.6 基準津波の選定結果の検証）に係る適合性審査の技術基盤として活用が見込まれる。また、安全性向上評価（原子炉等規制法第 43 条の 3 の 29）を確認するときの技術基盤として活用が見込まれる。推定された 1611 年津波の波源は、基準津波の策定において参照すべき既往津波の一例であり、また、設定された基準津波の波源規模の妥当性確認に資する知見としての活用が見込まれる。

3.5 今後の課題等

各研究実施項目における成果を踏まえて、今後の課題を以下に整理した。

(1) 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

本研究では、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津波伝播解析、流体解析等の複数の解析方法を用いた。これらの解析方法を用いて、水位の他に水

中の流速分布や全圧力分布等の様々なデータを取得しており、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における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し、津波評価手法への適用範囲を把握しておくことが望まれる。

(2) 既往の巨大津波の波源推定

本研究では、東日本太平洋沿岸の広域及び多地域における、津波堆積物及び津波痕跡高の現地情報並びに津波及び土砂移動の数値解析結果を用いて波源推定を行った。今後、粒径のほか、津波堆積物の不確かさに対する重み付けを含む様々なパラメータの感度分析や、1611 年津波による津波堆積物が無いと考えられる地点を制約条件とした波源推定が望まれる。

参考文献一覧

- 1.1 後藤和久、菅原大助、西村裕一、藤野滋弘、小松原純子、澤井祐紀、高清水康博、「津波堆積物の認定手順」、津波工学研究報告、33巻、pp.45-54、平成29年
- 1.2 Satake, K., “Inversion of tsunami waveforms for the estimation of heterogeneous fault motion of large submarine earthquakes: The 1968 Tokachi-Oki and 1983 Japan sea earthquakes”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 94, pp.5627-5636, 1989.
<https://doi.org/10.1029/JB094iB05p05627>
- 1.3 杉野英治、呉長江、是永真理子、根本信、岩渕洋子、蛭沢勝三、「原子力サイトにおける 2011 東北地震津波の検証」、日本地震工学会論文集、13巻、2号、pp.2-21、平成25年
https://doi.org/10.5610/jaee.13.2_2
- 1.4 独立行政法人原子力安全基盤機構、「津波堆積物調査ハンドブック」、独立行政法人原子力安全基盤機構HP、JNES-RE-2013-2039、平成26年
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000127085.pdf>（令和7年3月5日確認）
- 1.5 杉野英治、岩渕洋子、橋本紀彦、松末和之、蛭沢勝三、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、14巻、5号、pp.1-18、平成26年
https://doi.org/10.5610/jaee.14.5_1
- 1.6 内田淳一、岩渕洋子、杉野英治、「日本海東縁部における広域的地殻構造境界の津波波源の設定—認識論的不確実さ要因の一つとして—」、日本地震工学会論文集、19巻、4号、pp.122-155、平成31年
https://doi.org/10.5610/jaee.19.4_122
- 1.7 佐藤太一、杉野英治、「確率論的手法を用いた海底地すべり危険度判定手法の構築」、日本地震工学会論文集、19巻、6号、pp.283-295、平成31年
https://doi.org/10.5610/jaee.19.6_283
- 1.8 Sugino, H., Abe, Y., “Simple Modeling of Phase and Amplitude Spectra for Observed Tsunami Waves”, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, 2020.
- 1.9 杉野英治、阿部雄太、「統計的手法を用いた津波模擬波形の提案」、日本地震工学会論文集、21巻、1号、pp.1-24、令和3年
https://doi.org/10.5610/jaee.21.1_1
- 1.10 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、令和元年
https://doi.org/10.2208/kaigan.75.i_343
- 1.11 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.

1.12 佐藤太一、杉野英治、「Mw8.8 以下のプレート間地震津波に対する特性化波源モデルの再現性」、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、76巻、2号、pp.I_337-I_342、令和2年
https://doi.org/10.2208/kaigan.76.2_I_337

1.13 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/jaee.22.5_25

(1) 海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

2.1.1 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

2.1.2 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

2.1.3 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（津波レシビ）」、平成29年

2.1.4 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>

2.1.5 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、14巻、5号、pp.1-18、平成26年
https://doi.org/10.5610/jaee.14.5_1

2.1.6 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、令和元年
https://doi.org/10.2208/kaigan.75.i_343

2.1.7 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.

2.1.8 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、「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」、令和6年
<https://www.nra.go.jp/data/000474756.pdf>

2.1.9 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>
- 2.1.10 Lotto, C. G. Nava, G., Dunham, M. E., “Should tsunami simulations include a nonzero initial horizontal velocity?”, Earth, Planets and Space, Vol. 69, No. 117, 2017.
[doi:10.1186/s40623-017-0701-8](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0701-8)
- 2.1.11 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
- 2.1.12 渡辺高志、登柳正夫、嶋村洋介、榊谷浩、「固定屋根式タンクのスロッシング問題を対象としたSPH-FEM連成解析」、第11回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、平成26年
- 2.1.13 渡辺高志、榊谷浩、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、20130021号、平成25年
<https://doi.org/10.11421/jscs.2013.20130021>
- 2.1.14 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/jaee.22.5_25
- 2.1.15 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、「津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究」、安全研究成果報告、RREP-2021-4002、令和3年
<https://www.nra.go.jp/data/000355509.pdf>（令和7年1月23日確認）

(2) 既往の巨大津波の波源推定

- 2.2.1 後藤和久、菅原大助、西村裕一、藤野滋弘、小松原純子、澤井祐紀、高清水康博、「津波堆積物の認定手順」、津波工学研究報告、33巻、pp.45-54、平成29年
- 2.2.2 澤井祐紀、「東北地方太平洋側における古津波堆積物の研究」、地質学雑誌、123巻、10号、pp.819-830、平成29年
<https://doi.org/10.5575/geosoc.2017.0055>
- 2.2.3 宍倉正展、「千島・日本海溝沿いの超巨大地震履歴」、地震予知連絡会会報、101巻、pp.471-474、平成31年
- 2.2.4 原子力規制委員会 原子力規制庁、学校法人関西大学、国立大学法人東北大学災害科学国際研究所、国立大学法人東京大学「共同研究成果報告書：既往の巨大津波の波源推定－1611年慶長三陸地震津波を例として－」、令和7年
- 2.2.5 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、「津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究」、安全研究成果報告、RREP-2021-4002、令和3年
<https://www.nra.go.jp/data/000355509.pdf>（令和7年3月18日確認）
- 2.2.6 相田勇、「三陸沖の古い津波のシミュレーション」、東京大学地震研究所彙報 52巻、

- pp.71-101, 昭和52年
doi: 10.15083/0000033218
- 2.2.7 Yamanaka, Y., Tanioka, Y., “Short-wave run-ups of the 1611 Keicho tsunami along the Sanriku Coast”, *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol. 9, No. 37, 2022.
<https://doi.org/10.1186/s40645-022-00496-1>
- 2.2.8 Ioki, K., Tanioka, Y., “Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 433, pp.133-138, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.009>
- 2.2.9 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/jaee.22.5_25
- 2.2.10 Baba, T., Chikasada, N., Nakamura, Y., Fujie, G., Obana, K., Miura, S., Kodaira, S., “Deep investigations of outer-rise tsunami characteristics using well-mapped normal faults along the Japan Trench”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 125, 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JB020060>
- 2.2.11 宇多高明、大木康弘、三波俊郎、「日立市河原子海水浴場で進む急激な侵食の実態」、*海洋開発論文集*、72巻、2号、pp. I_103 I_108、平成28年
https://doi.org/10.2208/jscejoe.72.I_103
- 2.2.12 関西大学、「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発）事業成果報告書」、平成29年
- 2.2.13 高橋智幸、首藤伸夫、今村文彦、浅井大輔、「掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発」、*海岸工学論文集*、46巻、pp.606-610、平成11年
<https://doi.org/10.2208/proce1989.46.606>
- 2.2.14 菅原大助、成瀬元、後藤和久、「堆積粒子の巻き上げに伴うエネルギー散逸を考慮した津波土砂移動の計算と検証」、*日本堆積学会2014年山口大会講演要旨集*、O27、平成26年
- 2.2.15 Yamashita, K., Yamazaki, Y., Bai, Y., Takahashi, T., Imamura, F., Cheung, K.F., “Modeling of sediment transport in rapidly-varying flow for coastal morphological changes caused by tsunamis”, *Marine Geology*, Vol.449, 106823, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106823>
- 2.2.16 Shimozone, T., Cui, H., Peitzak, J.D., Fritz, H.M., Okayasu, A., Hooper, A.J., “Short wave amplification and extreme runup by the 2011 Tohoku tsunami”, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 171, pp.3217-3228, 2014.
<https://doi.org/10.1007/s00024-014-0803-1>

- 2.2.17 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、<https://www.coastal.jp/ttjt/index.php>（令和7年3月18日確認）
- 2.2.18 Goto, K., Hashimoto K., Sugawara, D., Yanagisawa, H., Abe, T., “Spatial thickness variability of the 2011 Tohoku-oki tsunami deposits along the coastline of Sendai Bay”, *Marine Geology*, Vol. 358, pp.38-48, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.015>
- 2.2.19 Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K., “Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L21309, 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012GL053692>
- 2.2.20 東北大学災害科学国際研究所、津波痕跡データベース
<https://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/tsunami/>（令和7年3月18日確認）
- 2.2.21 Abe, T., Goto, K., Sugawara, D., “Relationship between the maximum extent of tsunami sand and the inundation limit of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain”, *Japan. Sedimentary Geology*, Vol. 282, pp. 142-150, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.05.004>
- 2.2.22 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、「津波ハザード関連評価技術の整備」、安全研究成果報告、 RREP-2018-4003、平成30年
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11203941/www.nsr.go.jp/data/000253098.pdf>（令和7年3月18日確認）
- 2.2.23 高橋智幸、川崎浩司、平田賢治、「津波堆積物に基づく津波波源推定データベースの構築」、*土木学会論文集B2（海岸工学）*、74巻、2号、pp.I_541-I_546、平成30年
https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_541
- 2.2.24 国土交通省国土地理院、地理院タイル一覧、
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>（令和6年12月確認）
- 2.2.25 Nanayama, F., “Evidence of giant earthquakes and tsunamis of the seventeenth-century type along the southern Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan: a review”, *Geological Society London Special Publications*, Vol. 501, No 1, pp.131-157, 2021.
<https://doi.org/10.1144/SP501-2019-99>
- 2.2.26 山下啓、菅原大助、高橋智幸、「遡上津波の圧力勾配及び浮遊砂流の影響を考慮した津波土砂移動解析」、第29回海洋工学シンポジウム、OES29-052、令和4年
- 2.2.27 村上和男、菅沼史典、佐々木均、「底泥の巻き上げ現象とそのモデル化に関する実験的検討」、*海岸工学論文集*、36巻、pp.319-323、平成元年
<https://doi.org/10.2208/proce1989.36.319>
- 2.2.28 Yamashita, K., Sugawara, D., Goto, K., Ishizawa, T., Takahashi, T., “A similarity law for sandy tsunami deposits –Feasibility of integration of inverse and forward approaches–”,

Journal of Geophysical Research: Earth Surface. (submitted in March 2024)

2.2.29 Shuto, N., “Standing waves in front of a sloping dike”, Coastal Engineering in Japan, Vol.15, pp.13-23, 1972.

<https://doi.org/10.1061/9780872620490.093>

2.2.30 Shen, M.C., Meyer, R.E., “Climb of a bore on a beach Part 3. Run-up”, Journal of Fluid Mechanics, Vol.16, pp.113-125, 1963.

<https://doi.org/10.1017/S0022112063000628>

2.2.31 江守一郎、「模型実験の理論と応用」、技報堂出版株式会社、昭和54年（1版4刷発行）

執筆者一覧

原子力規制庁	長官官房	技術基盤グループ	地震・津波研究部門
道口	陽子	主任技術研究調査官	
山下	啓	副主任技術研究調査官	
佐藤	太一	副主任技術研究調査官	
杉野	英治	安全技術管理官（地震・津波担当）	