

RREP-2018-4003

# 安全研究成果報告

## 津波ハザード関連評価技術の整備

Development of Methodology for Tsunami Hazard Assessment

**杉野 英治、 道口 陽子、 佐藤 太一**

Hideharu SUGINO, Yoko MICHIGUCHI, and Taichi SATO

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

**岩渕 洋子**

Yoko IWABUCHI

技術基盤課

Regulatory Standard and Research Division

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)

平成 30 年 11 月

November 2018

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。

本レポート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

# 津波ハザード関連評価技術の整備

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

杉野 英治 道口 陽子 佐藤 太一

技術基盤課

岩淵 洋子

## 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（以下「東北地震津波」という。）による福島第一原子力発電所の事故を踏まえれば、原子力発電所の津波に対するリスク評価が重要な課題となり、その観点から設計基準を上回る津波の発生を前提とすることが必要となる。そのためには、津波発生に係る不確かさを踏まえた津波発生の可能性評価、過去の津波の規模及び頻度に関する情報の拡充による経験的モデルの詳細化とその外挿範囲の説明性向上等、新たに考慮すべき課題を解決する必要がある。さらに、これらの課題に取り組む中で得られる知見を活用し、原子力安全のための取組及び原子力規制の継続的な改善に資することが重要である。本プロジェクトでは、上記の背景を踏まえて平成 25 年度から平成 28 年度にかけて、以下の研究課題（①～⑤）に取り組んだ。

①確率論的津波ハザード解析における断層破壊特性の影響評価手法の整備（平成 27～28 年度）

断層破壊特性（破壊開始点、破壊伝播速度等）の不確かさが津波水位に影響すると考えられる。そこで、断層の破壊開始点及び破壊伝播速度に係る不確かさを整理し、津波水位に及ぼす影響を把握した上で、これらの不確かさを確率論的津波ハザード解析において簡易的に反映する方法を提案した。

#### ② 構造物への作用波力評価手法の高度化（平成 25~27 年度）

屋外構造物等の津波遡上に対する安全対策の有効性確認及び津波リスク評価に係る津波フラジリティ評価のためには、構造物に作用する津波波力の評価手法の不確かさを評価する必要がある。そこで、防潮堤背後の屋外構造物等を対象とした作用波力に関する水理模型実験のデータを用いて三次元津波解析モデルによる推定値の不確かさを定量評価した。

#### ③ 津波堆積物による波源推定手法の整備（平成 25~28 年度）

津波堆積物は、過去の津波によって海底の土砂等が移動及び堆積したものであり、津波波源の規模及び頻度（過去の津波の襲来時期や回数）に関する有用な情報源の一つである。そこで、既往津波の波源に係る情報の拡充に資するため、津波堆積物情報及び陸上での土砂移動・堆積モデルを利用した波源推定に関する解析ツールを整備し、東北地震津波を対象にその適用性を確認した。

#### ④ 津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）の整備（平成 25~28 年度）

基準津波の妥当性判断に資するため、歴史津波に関する津波痕跡高情報及び古津波に関する津波堆積物情報を一元的に管理する津波痕跡データベースを整備した。津波痕跡高情報については、歴史津波を対象とした文献・史料調査、古文書の被害規模（集落の流失被害数等）の記事に着目した現地調査及び信頼度評価を行った。津波堆積物情報については、津波堆積物を客観的及び統一的に認定するための津波堆積物認定項目及び認定フローを作成し、これらを用いて既往文献に記載されている堆積物が津波由来である可能性を評価した。

#### ⑤ 海底地すべり起因の津波評価手法の整備（平成 26~28 年度）

海底地すべり起因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備に資するため、将来の地すべり発生の可能性に着目し、斜面安定解析手法及び確率論的手法を用いた海底地すべり発生危険度判定手法を考案した。また、海底の地すべりを模擬した模型実験を行い、上記の斜面安定解析手法の適用性を確認した。さらに、モデル地形を対象に海底地すべり危険度マップを試作し、上記の海底地すべり発生危険度判定手法の適用性を確認した。加えて、海底地すべり起因の津波解析コードを整備し、同解析コードを用いて感度解析を行い、海底地すべりの影響因子と津波高等の関係を整理した。

Development of Methodology for Tsunami Hazard Assessment

Hideharu SUGINO, Yoko MICHIGUCHI, and Taichi SATO  
Division of Research for Earthquake and Tsunami

Yoko IWABUCHI  
Regulatory Standard and Research Division

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

Abstract

Given the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident triggered by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami (hereinafter called the “2011 Tohoku Earthquake Tsunami”) on March 11, 2011, tsunami risk assessment for nuclear power plants is a key challenge. From this viewpoint, the premise that a tsunami will occur beyond the design basis must be adopted. In this respect, we must resolve new challenges, including the assessment of tsunami probability based on uncertainties, and the refinement of empirical models and the improvement of explainability of extrapolation area by expanding informations on magnitudes and occurrence frequencies of past tsunamis. Knowledge gained through efforts to tackle these challenges must be utilized to contribute to nuclear safety initiatives and the continuous improvement of nuclear regulations. Given the abovementioned background, the following research challenges ((1)-(5)) were conducted in this research project from FY2013 to FY2016.

- (1) Developing methods for assessing the effects of fault rupture properties in probabilistic tsunami hazard analysis (FY2015-2016)

As uncertainties of fault rupture properties (including rupture starting points and rupture velocities) are assumed to have an influence on tsunami wave heights, we sorted out uncertainties of fault rupture starting points and rupture velocities, identified their influence on tsunami wave heights, and proposed methods for reflecting the influence in probabilistic tsunami hazard analysis.

(2) Advancing methods for assessing action wave forces on structures (FY2013-2015)

In order to contribute to confirming the effectiveness of safety measures and to evaluating the fragilities against tsunami run-up for exterior structures, we quantitatively assessed uncertainties of wave forces estimated by a three-dimensional tsunami analysis model using the results of hydraulic experiment simulating overflow seawalls and tsunami wave forces on exterior structures behind seawalls.

(3) Developing methods for using tsunami deposits for estimating tsunami sources (FY2013-2016)

Tsunami deposits was seabed sediments that were moved by past tsunami waves and deposited, providing useful information on sizes and frequencies of tsunami sources (past tsunami times and frequencies). In order to contribute to expanding information on past tsunami sources, we built the analysis tool for tsunami source estimation using tsunami deposit data and onshore sediment movement and deposit model and confirmed its applicability to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami.

(4) Developing tsunami trace databases (tsunami trace height data and tsunami deposit data) (FY2013-2016)

In order to contribute to decisions on the suitability of design basis tsunami, we developed tsunami trace databases to integrally manage trace height data of historical tsunami and paleo-tsunami deposit data. As for tsunami trace height data, we investigated literature and historical archives on historical tsunami, conducted field survey paying attention to old articles on tsunami damage (including the number of washed-out houses in a community) and assessed their reliability. As for tsunami deposit data, we developed items and flows for identifying tsunami deposits objectively and uniformly, and used these items and flows to assess the possibility of documented deposits in past literature being tsunami deposits.

(5) Developing methods for assessing tsunami waves triggering submarine landslides (FY2014-2016)

In a bid to contribute to developing probabilistic hazard assessment methods for tsunami waves that triggered submarine landslides, paying attention to potential future landslides, we developed a submarine landslide risk assessment method using slope stability analysis and probabilistic methods. We also conducted model experiments simulating submarine landslides to confirm the applicability of the slope stability analysis method. Furthermore, we fabricated a submarine landslide map for model waters to confirm the method's applicability. Moreover, we conducted sensitivity analysis using codes for analyzing tsunami waves triggering submarine

landslides based on past studies and indicated relationships between influential factors behind landslides and tsunami wave heights.

## 目次

1. 序論	1
2. 研究期間を通じた主要成果	4
2.1 確率論的津波ハザード解析における断層破壊特性の影響評価手法の整備	4
2.2 構造物への作用波力評価手法の高度化	12
2.3 津波堆積物による波源推定手法の整備	19
2.4 津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）の整備	26
2.5 海底地すべり起因の津波評価手法の整備	35
3. 結論	40
参考文献	42
「津波ハザード関連評価技術の整備」の執筆者	45

## 表 一 覧

表 1	すべり分布の配置パターンと破壊開始点	7
表 2	津波伝播解析の計算条件	7
表 3	相対水位比（上昇側）の平均値及び標準偏差	7
表 4	構造物周りの計算格子サイズ一覧	14
表 5	三次元津波解析用の地形モデル	14
表 6	入射波及び砂の遡上距離と到達率	22
表 7	津波堆積物認定項目	30

## 図 一 覧

図 1	評価地点及び対象波源域	8
図 2	同心円状の破壊様式を仮定した津波波源モデル	8
図 3	津波伝播解析の計算領域	9
図 4	津波高に及ぼす破壊伝播特性の不確かさ影響（水位上昇側）	10
図 5	水位上昇側の津波ハザード曲線	11
図 6	水理模型実験の概要	15
図 7	三次元津波解析モデルによる浸水深の不確かさ	16
図 8	三次元津波解析モデルによる波圧の不確かさ	17
図 9	越流水深（ $\eta_{\max}$ ）の評価位置	18
図 10	水理実験の概要	22
図 11	東北地震津波による仙台湾南部海岸における土砂移動解析結果	23
図 12	柱状採泥地点における実測値と計算値の比較（左：水深、右：堆積厚）	23
図 13	津波堆積物に基づく津波波源推定データベース	24
図 14	推定候補として選定された波源モデル 26 種	25
図 15	津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）	31
図 16	1843 年天保根室沖地震津波の調査結果	31
図 17	1833 年天保出羽沖地震津波の調査結果（平成 26 年度）	32
図 18	1833 年天保出羽沖地震津波の調査結果（平成 27 年度）	32
図 19	1605 年慶長地震津波の調査結果	33
図 20	津波堆積物認定フロー	33
図 21	連続で採取した年代測定試料の例	34
図 22	ウィグルマッチングによる暦年較正結果	34
図 23	海底地すべり発生危険度判定手法の手順	38
図 24	せん断強度と深度の関係	38
図 25	PIV 画像解析によって得られた変位ベクトル	39
図 26	モデル地形における海底地すべり危険度マップ	39

## 1. 序論

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。）は、福島第一原子力発電所に襲来し、重大な事故を引き起こした。この事故は、同発電所の設計津波水位が低すぎたこと、設計津波水位を超える津波の発生に備えていなかったことに加えて、設計津波水位を超える津波のリスクが存在することを明示する結果となった。この事故を踏まえた政府報告書<sup>(参1)</sup>でも、深層防護の観点から、策定された設計用津波を上回る津波が施設に及ぶことによるリスクの存在を十分認識して、敷地の冠水や遡上波の破壊力の大きさを考慮しても重要な安全機能を維持できる対策を講じることや、確率論的リスク評価手法（Probabilistic Risk Assessment、PRA）を活用したリスク管理を実施することなどが教訓として示された。

平成24年9月に発足した原子力規制委員会は、福島第一原子力発電所の事故を教訓とし、新たな規制基準及び審査ガイドを策定及び施行し、現在、新規規制基準に基づく既設原子力発電所の適合性審査を行っている。

新規規制基準では、新たに「基準津波」に関する規定が明記され、基準津波を策定することと、その基準津波がどの程度の超過確率に相当するのかを把握すること（以下「超過確率の参照」という。）を要求している。これらの評価には二つの手法が用いられる。基準津波による津波高の評価には、決定論的津波ハザード評価（Deterministic Tsunami Hazard Assessment）手法が用いられる。一方、超過確率の参照には、確率論的津波ハザード評価（Probabilistic Tsunami Hazard Assessment）手法が用いられ、これは津波高に加えてその発生確率又は発生頻度を求めるための手法である。いずれの評価手法においても、それぞれの評価に必要な各種モデルのパラメータの不確かさを適切に考慮することが重要となる。「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド<sup>(参2)</sup>」でも、津波波源の設定に当たって、「国内のみならず世界で起きた大規模な津波事例を踏まえ、津波の発生機構やテクトニクス的背景の類似性を考慮していること」や、「地震や津波の発生域と規模は、過去の事例によるだけではそれをを超えるものが発生する可能性を否定したことにはならないこと」等に留意するよう記されている。

また、平成25年11月改正の核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律では、事業者に対する「安全性の向上のための評価の実施」を規定し、これに関連する「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<sup>(参3)</sup>」では、「発電用原子炉施設における安全に関する最新の知見を踏まえて当該施設の安全性向上評価を原則、5年ごとに実施する」よう記されている。この安全性向上評価では、外部事象の一つとして津波に対するPRA手法の活用が見込まれており、確率論的津波ハザード評価手法は、津波PRA手法を構成する主要な要素技術として必須のものであり、また、津波PRAの不確かさの大きな要因となる。

津波リスク評価の観点からは、設計基準を上回る津波の発生を前提とする必要があり、そのためには、津波発生に係る不確かさを踏まえた津波発生の可能性評価、過去の津波の規模及び頻度に関する情報の拡充による経験的モデルの詳細化とその外挿範囲の説明性向上等、新たに考慮すべき課題を解決する必要がある。さらに、これらの課題に取り組む中で得られる新たな知見を活用して上記の安全性向上評価の妥当性確認を行い、原子力安全のための取組及び原子力安全規制を継続的に改善していく必要がある。

本プロジェクトでは、今後、定期的実施される安全性向上評価の妥当性確認に資するよう、津波 PRA に係る確率論的津波ハザード評価手法の信頼性向上のため、これに係る断層破壊特性の影響評価、津波防護施設越流後の屋外構造物・設備等への津波の作用波力評価、津波堆積物情報を活用した津波波源推定及び地すべり起因の津波評価等に関する手法・解析コード並びに津波痕跡データベース及び津波堆積物データベースの整備を目的とする。上記の背景を踏まえて平成 25 年度から平成 28 年度にかけて、以下の研究課題 (①~⑤) に取り組んだ。

①確率論的津波ハザード解析における断層破壊特性の影響評価手法の整備 (平成 27~28 年度)

断層破壊特性 (破壊開始点、破壊伝播速度等) の不確かさが津波水位に影響すると考えられる。そこで、断層の破壊開始点及び破壊伝播速度に係る不確かさを整理し、津波水位に及ぼす影響を把握した上で、これらの不確かさを確率論的津波ハザード解析において簡易的に反映する方法を提案した。

②構造物への作用波力評価手法の高度化 (平成 25~27 年度)

屋外構造物等の津波遡上に対する安全対策の有効性確認及び津波リスク評価に係る津波フラジリティ評価のためには、構造物に作用する津波波力の評価手法の不確かさを評価する必要がある。そこで、防潮堤背後の屋外構造物等を対象とした作用波力に関する水理模型実験のデータを用いて三次元津波解析モデルによる推定値の不確かさを定量評価した。

③津波堆積物による波源推定手法の整備 (平成 25~28 年度)

津波堆積物は、過去の津波によって海底の土砂等が移動及び堆積したものであり、津波波源の規模及び頻度 (過去の津波の襲来時期や回数) に関する有用な情報源の一つである。そこで、既往津波の波源に係る情報の拡充に資するため、津波堆積物情報及び陸上での土砂移動・堆積モデルを利用した波源推定に関する解析ツールを整備し、東北地方太平洋沖地震津波を対象にその適用性を確認した。

④津波痕跡データベース (津波痕跡高情報及び津波堆積物情報) の整備 (平成 25~28 年度)

基準津波の妥当性判断に資するため、歴史津波に関する津波痕跡高情報及び古津波に関する津波堆積物情報を一元的に管理する津波痕跡データベースを整備した。津波痕跡高情報については、歴史津波を対象とした文献・史料調査、古文書の被害規模（集落の流失被害数等）の記事に着目した現地調査及び信頼度評価を行った。津波堆積物情報については、津波堆積物を客観的及び統一的に認定するための津波堆積物認定項目及び認定フローを作成し、これらを用いて既往文献に記載されている堆積物が津波由来である可能性を評価した。

#### ⑤海底地すべり起因の津波評価手法の整備（平成 26~28 年度）

海底地すべり起因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備に資するため、将来の地すべり発生の可能性に着目し、斜面安定解析手法及び確率論的手法を用いた海底地すべり発生危険度判定手法を考案した。また、海底の地すべりを模擬した模型実験を行い、上記の斜面安定解析手法の適用性を確認した。さらに、モデル地形を対象に海底地すべり危険度マップを試作し、上記の海底地すべり発生危険度判定手法の適用性を確認した。加えて、既往研究を基にした海底地すべり起因の津波解析コードを用いて感度解析を行い、地すべりの影響因子と津波高等の関係を整理した。

## 2. 研究期間を通じた主要成果

### 2.1 確率論的津波ハザード解析における断層破壊特性の影響評価手法の整備

東北地震津波では、プレート境界における断層の破壊領域が広大であり、破壊継続時間がおよそ五分間に及んだ可能性が示されている<sup>(参4)(参5)</sup>。この点は、将来の津波発生を想定する際に津波波源のモデル化上、考慮すべき不確かさ要因の一つである。確率論的津波ハザード解析では、津波波源のモデル化に際し、地震規模の不確かさを考慮するために広大な領域の津波波源を想定することが必要であるため、この断層破壊特性（破壊形状、破壊開始点及び破壊伝播速度）に係る不確かさの考慮が必要となる。また、断層破壊特性は、地震（津波）発生前に特定することが困難なため、不確かさの程度を整理し、津波水位に及ぼす影響を把握した上で確率論的津波ハザード解析手法に反映される必要がある。

本研究<sup>(参6)</sup>では、まず、断層破壊特性に係る不確かさが津波水位に及ぼす影響を把握するため、千島海溝から日本海溝沿いのプレート間地震（Mw8.3~9.6）を対象に、断層破壊特性の不確かさとして破壊形状、破壊開始点及び破壊伝播速度を変化させた津波波源モデルを複数設定し、八戸沖、気仙沼沖、福島沖、神栖沖の四つの地点を評価地点とする津波伝播解析を実施した。図1に評価地点及び対象波源領域を示す。

津波波源モデルは、プレート境界面に配置した約5km四方の小断層の集合で構成される。表1に示すように複数の破壊開始点及び二種類の破壊伝播速度  $V_r$ （1.5及び3.0km/s）を設定し、同心円状の破壊様式を仮定した運動学的破壊伝播モデル（以下「破壊伝播モデル」という。）と、瞬時の破壊様式を仮定した運動学的同時破壊モデル（以下「同時破壊モデル」という。）を設定した。前者の破壊伝播モデルの概念図を図2に示す。いずれも断層すべりの立ち上がり時間は考慮しない。

津波伝播解析の計算条件を表2に示す。津波伝播解析には、非線形長波理論を用い、運動方程式には、移流項、海底摩擦項を考慮する。海底摩擦項にはマンシングの粗度係数0.025を用いた。数値計算には、差分法を用い、海域及び陸域の地形モデルはA領域からF領域まで六つの領域で構成され、空間格子間隔が外洋のA領域・1350mから陸域のF領域・5.6mまで1/3ずつ徐々に小さくして接続計算を行った。これらの計算領域を図3に示す。境界条件は、沖側では自由透過、陸側ではA領域からC領域までを完全反射、D領域からF領域までを小谷ほか<sup>(参7)</sup>の遡上境界とした。同図中には、評価地点位置も併せて図示した。八戸沖と気仙沼沖はA領域（空間格子間隔1350m）に、福島沖と神栖沖はB領域（同450m）にそれぞれ含まれる。

図4(a)~(d)に津波伝播解析による水位上昇側の結果を示す。横軸は同時破壊モデルによる最大水位 $h_s$ 、縦軸は破壊伝播モデルによる最大水位 $h_r$ と $h_s$ の比 $k (=h_r/h_s)$ の自然対数をそれぞれ表す。同図中には、全ての $\ln(k)$ 値によるヒストグラムも併せて示した。同図より、いずれの評価地点においても $\ln(k)$ 値はほぼ0.0を中心とする正規分布（標準偏差 $\beta_{\Delta r}$ ）に従

うことが確認できる。各評価地点における $\ln(k)$ 値の平均値 $\mu$ 及び標準偏差 $\beta_{\Delta r}$ の値を表3に示す。

次に、相対水位比 $\ln(k)$ がほぼ0.0を中心とする正規分布で表される特徴を利用して、上記の破壊伝播特性の不確かさ影響を考慮した津波高の確率分布モデルの作成を試みた。

相対水位比 $\ln(k)$ は、式(1)で表される。

$$\ln(k) = \ln\left(\frac{h_r}{h_s}\right) \quad (1)$$

ここで、 $h_r$ は破壊伝播モデルによる最大水位上昇量（又は下降量）を、 $h_s$ は同時破壊モデルによる最大水位上昇量（又は下降量）をそれぞれ表す。式(1)を変形すると次のように表される。

$$\ln(h_r) = \ln(k) + \ln(h_s) \quad (2)$$

ここで改めて各変数 $h_r$ 、 $h_s$ 、 $k$ を確率変数とし、それぞれ $Hr$ 、 $Hs$ 、 $K$ で表すと、式(2)は次のように表すことができる。

$$\ln Hr = \ln K + \ln Hs \quad (3)$$

前述の分析結果に基づき、相対水位比 $\ln K$ を平均値0.0、標準偏差 $\beta_{\Delta r}$ の正規分布で仮定する。また、同時破壊モデルによる最大水位 $\ln Hs$ は、PTHA手法では、通常、津波伝播解析による算定値 $h_s$ を平均値とし、津波伝播解析のモデル化に起因する不確かさを表す標準偏差 $\beta_s$ を有する正規分布で仮定される。したがって、式(3)の右辺は正規分布の和で表され、その結果もまた正規分布となる<sup>(参11)</sup>。二つの確率変数 $K$ 、 $Hs$ が独立であると仮定すれば、 $\ln Hr$ の平均値 $\ln \overline{Hr}$ と標準偏差 $\beta_r$ は、確率変数 $K$ 、 $Hs$ の平均値及び標準偏差を用いて次式のように表すことができる。

$$\text{平均値：} \quad \ln \overline{Hr} = \ln \overline{K} + \ln \overline{Hs} = \ln(h_s) \quad (\because \ln \overline{K} = 0.0) \quad (4)$$

$$\text{標準偏差：} \quad \beta_r = \sqrt{\beta_{\Delta r}^2 + \beta_s^2} \quad (5)$$

以上の検討を踏まえて、確率論的津波ハザード解析手法における断層破壊特性の不確かさ反映方法として二種類の検討を行った。一つは、上記の破壊伝播モデルの $h_r$ と津波数値解析のモデル化に起因する不確かさ $\beta_s$ を組合せた詳細法のCase1であり、もう一つは、同時破壊モデルの $h_s$ と式(5)で表した断層破壊特性を踏まえたばらつき $\beta_r$ を組合せた簡易法の

Case2 である。それぞれの方法による確率論的津波ハザード解析を行い、結果を比較した。その他の解析条件は、杉野ほか<sup>(参12)</sup>を参考とした。

図5(a)～(d)に各評価地点の津波ハザード曲線を示す。同図より Case1 (詳細法) と Case2 (簡易法) の両者は、どの評価地点でも年超過発生頻度が  $10^4$  を下回る範囲で相対最大水位に相違が見られるものの、その差は小さくほぼ同じ結果となった。この差の原因は、図4に見られるように、破壊伝播モデルの  $h_r$  が同時破壊モデルの  $h_s$  よりも小さくなる傾向にあり、これが津波ハザード曲線にも表れたと考えられる。これらの結果から、破壊伝播特性の不確かさ影響の反映方法として Case1 (詳細法) と Case2 (簡易法) の両手法の長所と短所を整理した。Case1 (詳細法) は、破壊伝播特性の不確かさ影響をできるだけ詳細に反映できる反面、評価条件として多数の解析ケースが必要となる。一方、Case2 (簡易法) は、モデル化上の不確かさが増大するためにやや大きめの結果を示すものの、Case1 (詳細法) に比べて評価条件が格段に少なく簡便な方法である。この点からも Case2 (簡易法) が有効であることを確認できた。

以上より、破壊伝播特性の不確かさ影響を確率論的津波ハザード評価手法に取入れるための簡易的な手法を提案した。詳細は、杉野ほか<sup>(参6)</sup>を参照されたい。

表1 すべり分布の配置パターンと破壊開始点

Table.1 Patterns of typical slip distribution and rupture starting points

地震規模	小～中規模 (~Mw8.2)	大規模 (~Mw8.8)	超大規模 (Mw8.9~)
津波波源モデルのイメージ			
		<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>■ : 超大すべり域</p> <p>■ : 大すべり域</p> <p>■ : 背景領域</p> <p>☆ : 破壊開始点</p> </div>	
不均一すべりの配置	—	1パターン	3パターン
破壊開始点	—	2パターン	4パターン
破壊伝播速度	—	2種類(1.5km/s, 3.0km/s)	

出典) 杉野ほか (2017) (参6)

表2 津波伝播解析の計算条件

Table.2 Calculation conditions for tsunami propagation analysis

項目	設定値						
各領域の解析条件		A領域	B領域	C領域	D領域	E領域	F領域
	空間格子間隔(m)	1350	450	150	50	17	5.6
	時間格子間隔(s)	2.43	0.81	0.27	0.09	0.03	0.01
	基礎方程式	非線形長波式					
	地形モデル	海域のみ			海域および陸上		
	境界条件	陸側	完全反射			小谷ら(参7)の遡上境界	
	沖側	自由透過	外側の大格子領域と、水位・流量を接続				
初期条件	Mansinha and Smylie(参8)の方法を用いて設定。						
海底摩擦係数	Manningの粗度係数 $n=0.025m^{-1/3}s$ (後藤・佐藤(参9)、土木学会(参10))						
水平渦動粘性係数	考慮しない						
現象再現時間	地震発生後6時間						

出典) 杉野ほか (2017) (参6)

表3 相対水位比(上昇側)の平均値及び標準偏差

Table.3 Means and standard deviations of logarithmic ratio of relative tsunami height (peak side)

評価地点	八戸沖	気仙沼沖	福島沖	神栖沖
平均値 $\mu$	0.003	0.008	0.009	0.030
標準偏差 $\beta_{\Delta r}$	0.120	0.118	0.117	0.097

出典) 杉野ほか (2017) (参6)

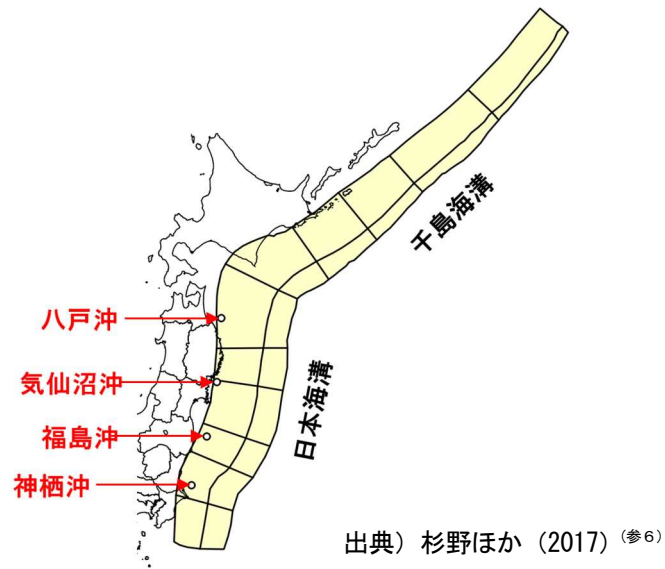


図1 評価地点及び対象波源域

Fig.1 Targeted points and an area of tsunami source

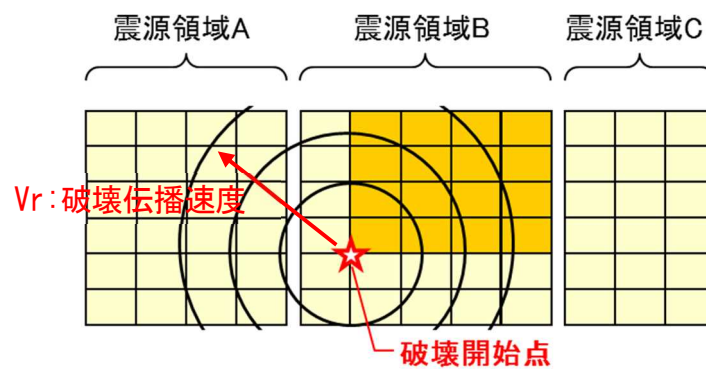
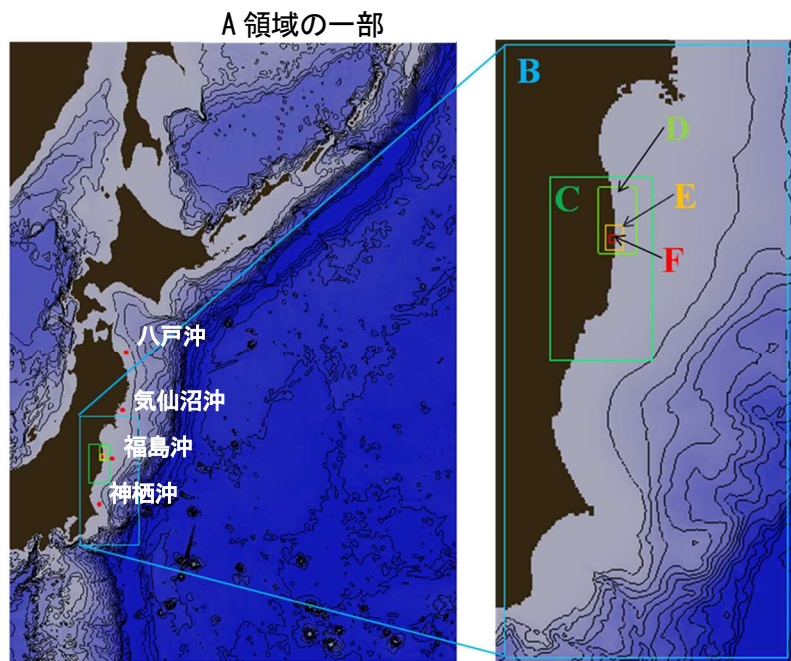


図2 同心円状の破壊様式を仮定した津波波源モデル

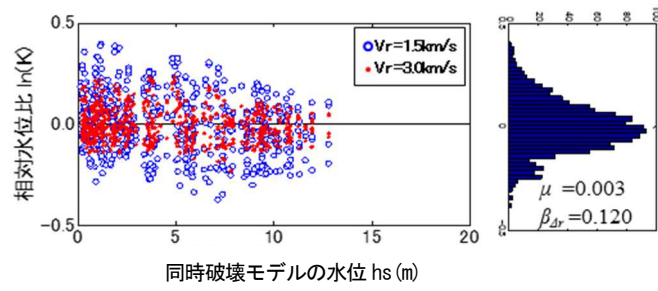
Fig.2 Illustrated tsunami source model assuming concentric rupture propagation



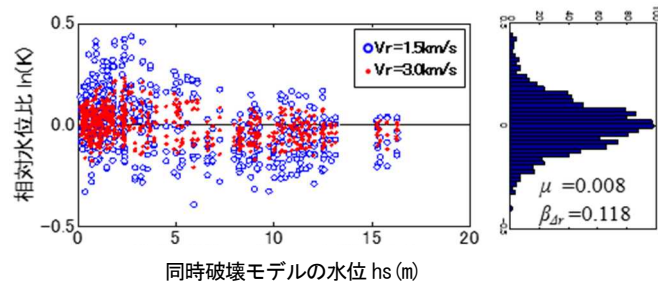
出典) 杉野ほか (2017) (参6)

図3 津波伝播解析の計算領域

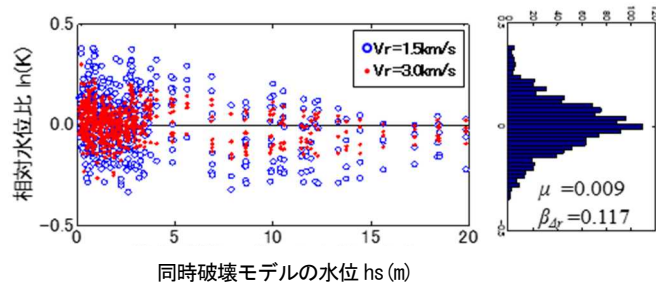
Fig.3 Domains for numerical tsunami analysis



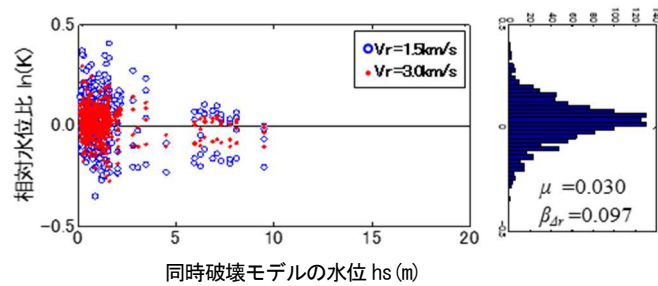
(a) 八戸沖



(b) 気仙沼沖



(c) 福島沖

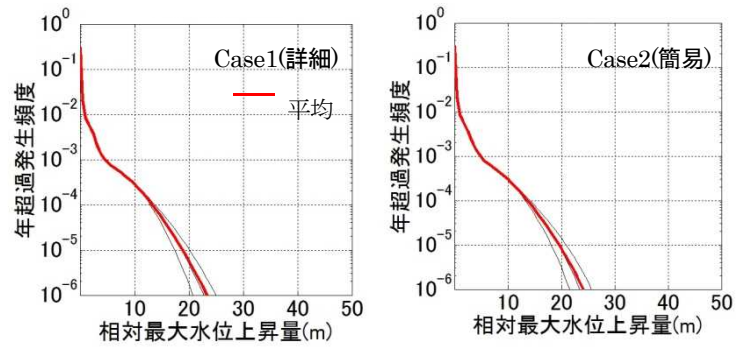


(d) 神栖沖

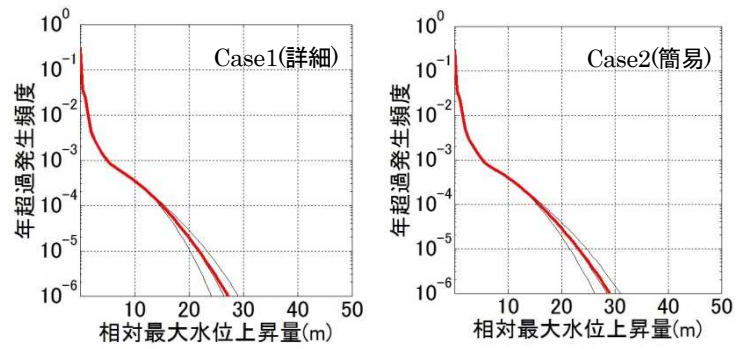
出典) 杉野ほか (2017) (参6)

図4 津波高に及ぼす破壊伝播特性の不確かさ影響 (水位上昇側)

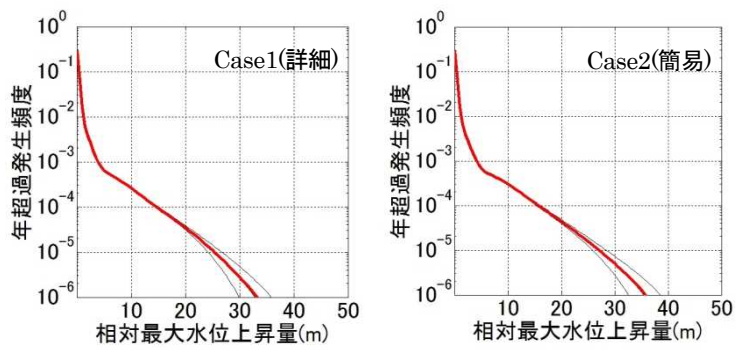
Fig.4 Influence on the simulated tsunami height regarding uncertainties in the rupture process parameters (peak side)



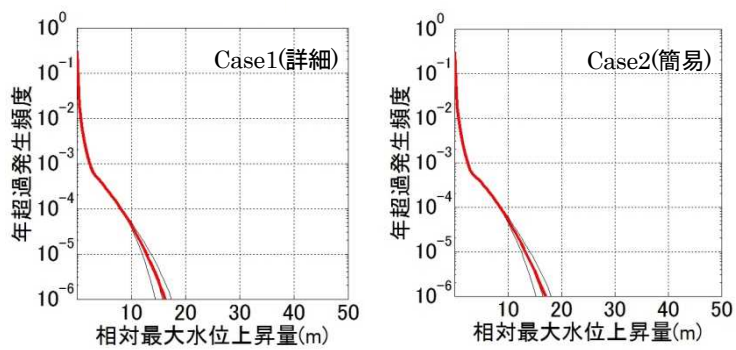
(a) 八戸沖



(b) 気仙沼沖



(c) 福島沖



(d) 神栖沖

出典) 杉野ほか (2017) (参6)

図5 水位上昇側の津波ハザード曲線

Fig.5 Tsunami hazard curves on peak side of water level

## 2.2 構造物への作用波力評価手法の高度化

東北地震津波の際には、東北地方の太平洋側に立地する原子力発電所において、来襲した津波により防波堤や重油貯蔵タンク等が損傷した。また、原子力発電所以外の一般構造物でも、津波波力に対して耐性があると考えられてきた鉄筋コンクリート造構造物等が、津波波力によって滑動、転倒するなどの被害が生じた。

東北地震津波による福島第一原子力発電所の事故を教訓に、原子力規制委員会では、津波に係る規制基準を強化した。これに対し、既設の原子力発電所では、防潮堤等の津波防護施設を設置するなどの対策が施されてきた。

津波に対する原子力発電所のリスクを考えると、設計基準内の事象だけでなく、設計基準を上回る事象の発生を考慮することが前提となる。そこで、防潮堤等の損傷又は越流によって敷地内に津波が流入することを想定し、防潮堤背後の建屋等への作用波力の評価が重要となる。防潮堤背後の建屋等への作用波力の評価に当たっては、三次元の津波遡上解析が有効であるが、対象構造物の形状や配置、防潮堤及び越流の有無、地形モデルの計算格子サイズ等の条件によって解析による推定値の精度に違いが生じる。津波に対するリスク評価、特に、構造物の津波脆弱性評価を三次元津波解析コードによる場合、同解析コードによって得られる推定値の不確かさ（以下「解析モデルの不確かさ」という。）の程度が重要なパラメータとなることから、実測データに対して感度解析的に検討しておくことが必要となる。

本研究では、津波に対する原子力発電所の確率論的リスク評価の構成要素である、構造物の津波脆弱性評価に資するよう、防潮堤越流を模擬した水理模型実験のデータ<sup>(参13)</sup>を用いて三次元津波解析モデルの不確かさを評価した。三次元津波解析コードには、VOF法（Volume of Fluid Method）に基づく Open FOAM (Open source Field Operation And Manipulation)<sup>(参14)</sup>を利用した。ここで、解析モデルの不確かさについては、実験値と解析値との比のばらつき（対数標準偏差）をもって表すこととした。上記の水理模型実験のケース数は、入力波形（高さ及び形状）が4種類、防潮堤の設置有無で2種類及び防潮堤と建屋間の距離（以下「護岸距離」という。）が4種類、これらを組み合わせて計32ケースとなる。各実験ケースでは、図6に示すように、陸域に三種類の建屋模型（平面形状○型、◇型及び□型）を並べて設置し、各模型の前面、側面及び背面での水位、波圧及び流速が計測されている。三次元津波解析モデルの不確かさを把握するため、上記模型実験データを対象に、波力算定結果への影響が大きいと考えられる構造物周りの計算格子サイズを変化させた組合せ5ケースに対して津波遡上解析を実施した。表4に解析に用いた5ケースの地形モデルの計算格子サイズ一覧を示す。表中には各ケースの水平二方向と鉛直方向の計算格子サイズを示した。また、一例として表中のケース3及び5の地形モデルを表5に示す。

図7(a)～(c)に三次元津波解析モデルを用いて推定される浸水深の不確かさ評価結果を、図8(a)～(c)に同波圧の不確かさ評価結果を示す。いずれも上段の図(a)の横軸は、防潮堤

がある場合には防潮堤天端における越流水深  $\eta_{\max}$  を、防潮堤がない場合には汀線位置での浸水深を越流水深と読み替え、これを鉛直方向の格子サイズ  $dz$  で除した値（格子分割数  $\eta_{\max}/dz$ ）で整理した（図9参照）。縦軸は、評価対象位置での浸水深  $h$  又は波圧  $p$  の実験値と計算値の比の自然対数  $\ln(h_{\text{exp}}/h_{\text{cal}}$  又は  $p_{\text{exp}}/p_{\text{cal}}$ ）で整理した。これらの結果から、浸水深比及び波圧比はいずれも越流水深の格子分割数が大きくなるほどばらつきが小さくなることが分かる。

次に、これらのデータのばらつきの傾向を把握するために、全データを越流水深の格子分割数の並びで10分割し、それぞれの区間で浸水深比及び波圧比の平均値及び対数標準偏差  $\beta$  を算定した。その結果を中段の図(b)に示した。同図中には各区間における浸水深比（又は波圧比）及び格子分割数の平均値を○印でプロットし、エラーバーとして  $\pm 2\beta$  の範囲を図示した。これらの結果から、浸水深比の平均値は格子分割数によらずおおむね0（自然対数）を中心にばらつくこと、一方、波圧比の平均値は0よりもやや上方の約0.4（自然対数）を中心にばらつくことを確認した。三次元津波解析モデル Open FOAM を用いて推定される波圧については、上記の格子分割数に関わらず、実際のデータよりもおよそ三割程度小さくなることに注意が必要である。

また、下段の図(c)には、各区間の対数標準偏差  $\beta$  を示した。浸水深比では0.64~0.14、波圧比では0.86~0.36となり、格子分割数が大きくなるほどばらつきが小さくなる傾向を定量的に示すとともに、ばらつきは波圧比の方が大きくなることが分かった。

以上より、三次元津波解析モデル Open FOAM を用いて推定される浸水深及び波圧の不確かさに関する知見を蓄積した。今後、三次元津波解析コードを用いた構造物の津波フラジリティ評価に際し、地形モデルの計算格子サイズに合わせて解析モデルの不確かさとして上記の対数標準偏差  $\beta$  を活用していく。

なお、本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究（平成25年度 構造物構造物への作用波力評価手法の整備、代表：東北大学災害科学国際研究所 越村俊一）及び原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成26~27年度 構造物への作用波力評価手法の整備、代表：東北大学災害科学国際研究所 越村俊一）事業により実施した。

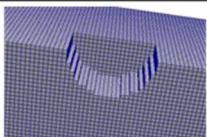
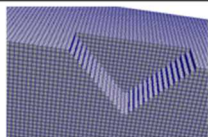
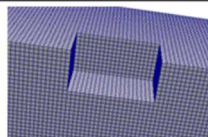
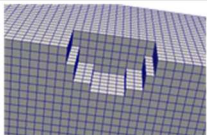
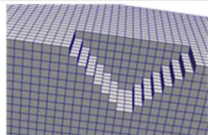
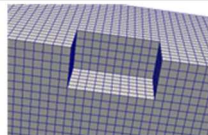
表4 構造物周りの計算格子サイズ一覧

Table.4 List of calculated lattice sizes around the structure

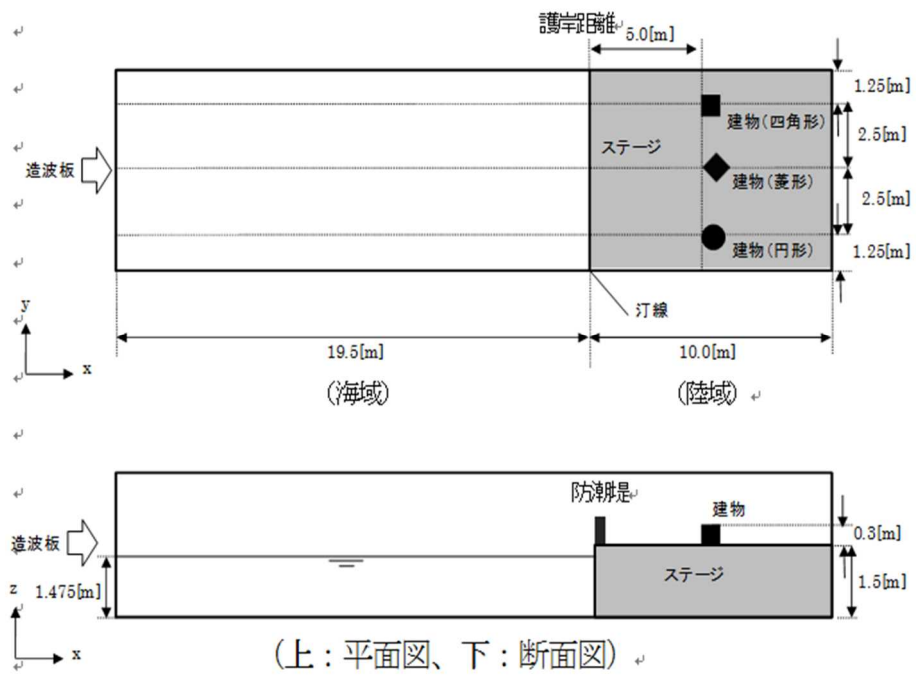
ケース	水平方向 (cm)	鉛直方向 (cm)
1	1.25	1.25
2	2.5	1.25
3	2.5	2.5
4	5.0	2.5
5	5.0	5.0

表5 三次元津波解析用の地形モデル

Table.5 Topographic models for 3D numerical analysis

格子サイズ	○型模型	◇型模型	□型模型
2.5cm (ケース3)			
5.0cm (ケース5)			

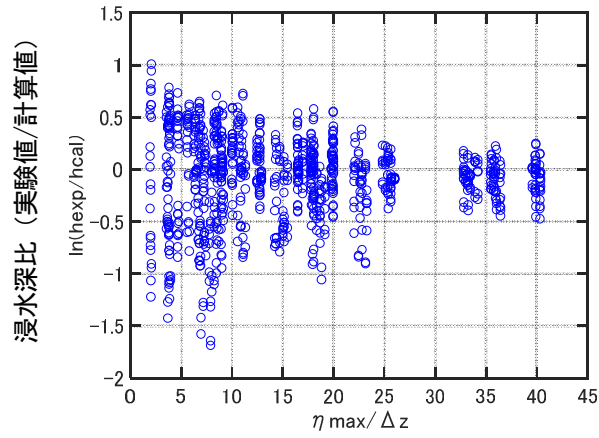
(注) 下方から見上げた地形モデルの様子



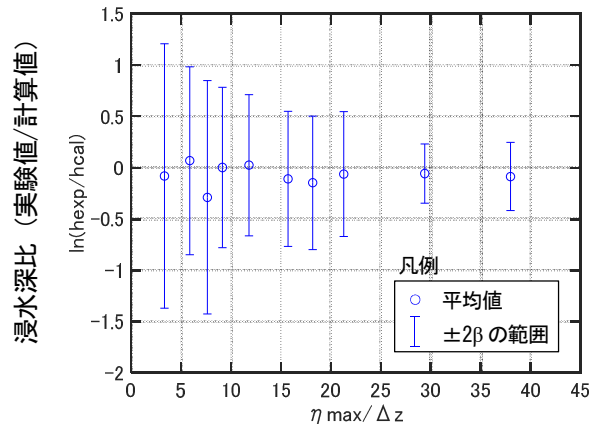
出典) 有川ほか (2014) (参13)

図6 水理模型実験の概要

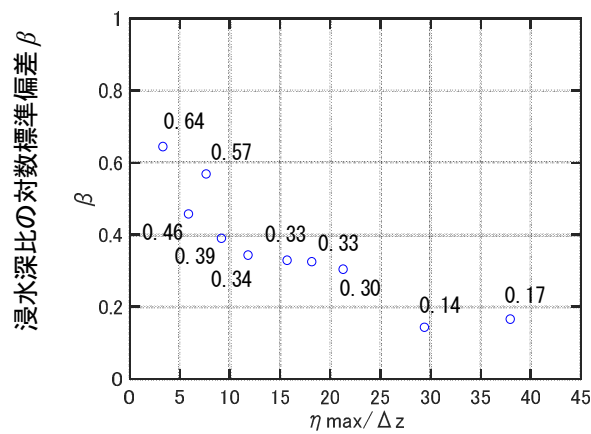
Fig.6 Overview of hydraulic test



(a) 越流水深の格子分割数と浸水深比（実験値／計算値）との関係

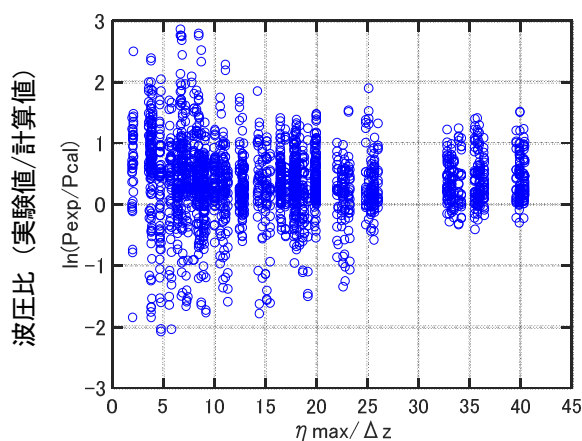


(b) 浸水深比（実験値／計算値）の平均値と対数標準偏差  $\beta$

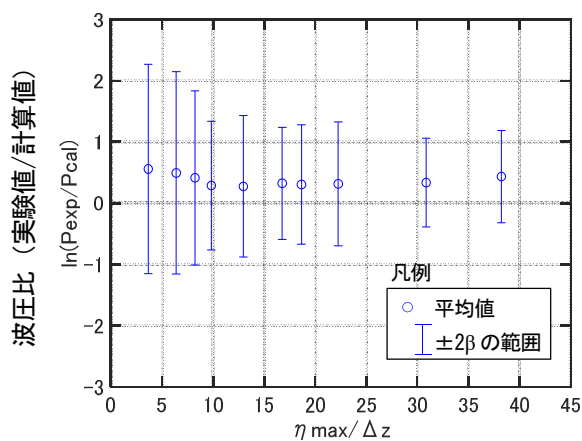


(c) 越流水深の格子分割数と浸水深比の対数標準偏差  $\beta$  との関係

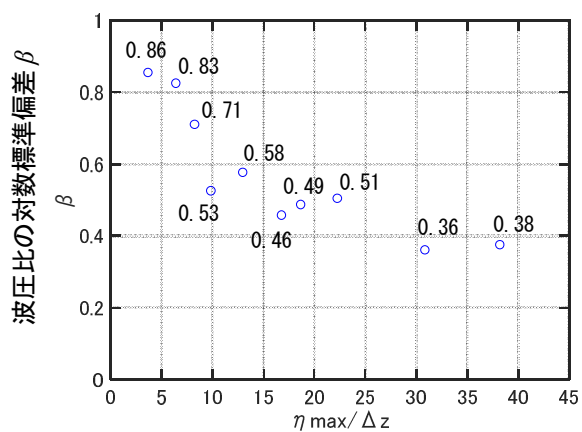
図7 三次元津波解析モデルによる浸水深の不確かさ  
 Fig.7 Variation of inundation depth simulated by 3D numerical model



(a) 越流水深の格子分割数と波圧比（実験値／計算値）との関係



(b) 波圧比（実験値／計算値）の平均値と対数標準偏差  $\beta$



(c) 越流水深の格子分割数と波圧比の対数標準偏差  $\beta$  との関係

図8 三次元津波解析モデルによる波圧の不確かさ

Fig.8 Variation of hydrodynamic load simulated by 3D numerical model

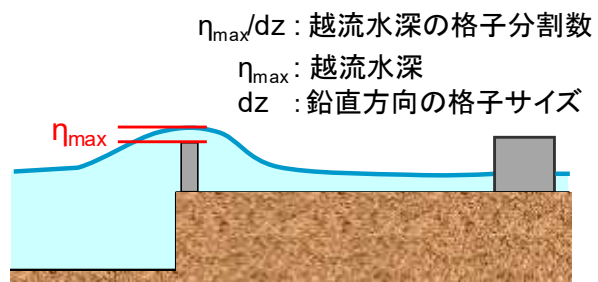


図9 越流水深 ( $\eta_{\max}$ ) の評価位置  
 Fig.9 Evaluation point of overflow depth ( $\eta_{\max}$ )

### 2.3 津波堆積物による波源推定手法の整備

津波堆積物は、過去の津波によって海底の土砂等が移動し、堆積して生成され、津波波源（規模や広がり）及び頻度（過去の津波の襲来時期や回数）を知るための有効な情報源となる。これらの情報は、基準津波の策定及び確率論的津波ハザード評価にとって重要となる。

津波堆積物から津波波源を推定する方法として、既往研究では、津波堆積物の分布域が浸水域と同等であると仮定し、津波波源の推定を試みている。しかし、菅原<sup>(参15)</sup>は、東北地震津波による堆積物が分布する領域の汀線から内陸端部までの距離と、浸水域の汀線から遡上先端までの距離の関係をまとめ、その比がおよそ3:4になることを示している。津波堆積物から津波波源を推定するには、津波堆積物が形成されるメカニズムを考慮することが重要である。そこで本研究では、既往津波の波源に係る情報の拡充に資するため、津波による陸上土砂移動・堆積モデルを利用した津波堆積物による波源推定に関する解析ツールを整備した。

具体的には、①現地調査による津波堆積物データの収集及び分析、②津波による陸上土砂移動・堆積に係る水理実験、③津波による陸上土砂移動・堆積のモデル化並びに解析コードの改良及び検証、④改良した解析コードを用いた波源推定ツールの整備を行った。項目①～④の主な成果は以下のとおりである。

① 現地調査では、東北地震津波により発生した津波による土砂堆積厚データを収集するため、仙台湾において計20箇所掘削（柱状採泥）を行い、実地形を対象とする陸上土砂移動・堆積モデル及び解析コードの検証用データを整備した。

② 水理実験では、土砂移動・堆積モデルの検証用データを収集するため、陸上の土砂移動及び堆積過程を模擬する実験を行った。実験は、実験水路の上流側の貯水タンクに一定水位の水を貯めてゲートを急開することで、水路内に入射した波が斜面を駆け上り、汀線付近に敷詰めた砂が斜面上に運ばれて堆積する過程を模擬するものである。斜面上に堆積する砂は、内寸20cm×20cmの長方形のマスを複数一列に繋げた捕捉装置（サンドキャッチャー）を遡上域に落として捕獲した（図10）。実験により、波の初期水位、土砂粒径及び斜面勾配を実験パラメータとした移動砂量の分布、砂の遡上距離（DS）と水の遡上距離（DW）の比で表した砂の到達率等のデータを取得した。その結果、砂の到達率は実験条件によって66.7%から100%までばらついており、粒径が粗いほど砂の到達率が小さくなることを実験でも確認した<sup>(参16)</sup><sup>(参17)</sup>。表6にこれらの結果を示す。

③ 津波による陸上の土砂移動・堆積を再現するため、今井・菅原・他<sup>(参18)</sup>の方法を用いて津波による陸上土砂移動・堆積のモデル化並びに解析コードの改良を行った。具体的には、掃流砂及び浮遊砂の流砂量とシールズ数（摩擦速度や砂の比重等を用いて無次元化された底面せん断力）との関係式（実験的）の改良<sup>(参19)</sup>に加えて、津波の浸水深と流速から飽和浮遊砂濃度を予測する式等を導入した。さらに、本解析コードに対し上述の①、②で収集したデータを用いて検証した。①については、東北地震津波時の仙台湾南部海岸の土砂移動計

算を実施し、計算結果と被災前後の航空写真とを見比べて実際に観測された地形変化を再現することができた(図1 1)。加えて、調査地点における実測値と計算値を比較した結果、一部の地点で乖離があるものの、水深及び堆積厚をおおむね再現することができた(図1 2)。②については、実験で得られたデータ(流速、波形、土砂粒径ごとの堆積分布量等)を用いて検証した結果、土砂の遡上距離(先端)に着目すると実験と計算の差はおおむね5%以内であった。以上より、改良版解析コードは、津波による陸上土砂移動・堆積を推定するのに有効であることを確認した。

④一般的に津波波源を推定する手法としては、津波の線形理論が適用できるある程度水深のある沖合の観測波計に対し、断層面に単位すべりを与えて得られる解析波形をグリーン関数とし、これを用いてインバージョン解析<sup>(参4)(参5)</sup>する方法がある。しかし、津波堆積物から波源を推定する場合には、土砂移動とその駆動力となる津波(水位、流速等)の間には線形性が成立しないため、本課題に対して線形性を前提とするグリーン関数を用いたインバージョン解析はなじまない。そこで、あらかじめ多数の津波シナリオを設定し、土砂移動・堆積モデルを用いた解析を行って解析結果をデータベース化し、現地調査による津波堆積物情報に基づいてこのデータベースから津波波源を選定する手法を提案した。具体的にはデータベースには、対象とする「領域」、各津波シナリオによって生じた砂の「堆積高」、その砂の「粒径」が保存されており、これら3つが検索条件となってデータベースを参照し、インターフェイス上に検索条件と近い条件の津波シナリオの波源を表示する仕様とした。さらに、検索条件を重ねることで整合する波源を絞り込める仕様とした。

次に、検証対象として日本海溝沿いの東北地震津波を選定し、津波堆積物分布から同津波波源の推定を試みた。解析領域は、千葉県から青森県の太平洋沿岸より地域的な偏りが無いように20地域を選定した。波源モデルは防災科学技術研究所<sup>(参20)</sup>の東北地方太平洋沖型106種類から49種類(Mw8.6~9.1)を選択し、3種類の土砂粒径について解析を行った。この解析結果(全2940ケース)をデータベースとして格納し、検証用データとして得られた東北地震津波の津波堆積物情報(4地域)を検索条件として同津波波源を推定した。図1 3に検索条件(地域、堆積高、砂粒径)の入力と出力(該当波源候補、地盤変動量、堆積高分布)の例を示す。検索条件を「領域 A9(福島県相馬市)、堆積高 0.395m 以上、砂粒径 0.166mm」、「領域 A10(宮城県岩沼市)、堆積高 0.051m 以上、砂粒径 0.166mm」、「領域 A11(宮城県石巻市)、堆積高 0.003m 以上、砂粒径 0.166mm」、「領域 A13(岩手県陸前高田市)、堆積高 0.315m 以上、砂粒径 0.166mm」として推定した結果、図1 4に示す26の波源モデルが推定候補として選定され、その中に東北地震津波の津波波源に近いモデル(F16)が含まれることを確認した<sup>(参21)</sup>。波源モデル候補が複数選定されたのは、検索条件として設定した津波堆積物情報が4地域のみであったことが候補を絞り切れなかった原因と考えられる。検索条件を充実できれば、更に候補を絞り込むことも可能と考える。今後、既往津波の波源情報を拡充するため、波源が明確になっていない歴史津波や古津波を対象に、本手法を適用して

いく。ただし、古津波への適用に際しては、本手法の推定精度（不確かさ）に留意する必要がある。

なお、本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究（平成 25 年度 津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発、代表：関西大学社会安全学部 高橋智幸）及び原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成 26～28 年度 津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発、代表：関西大学社会安全学部 高橋智幸）事業により実施した。

表6 入射波及び砂の遡上距離と到達率

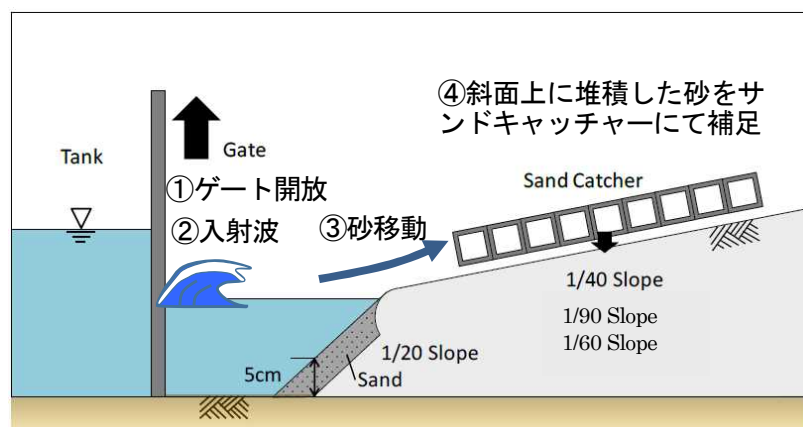
Table.6 Distance from shoreline of reflected wave and sand

Slope	H	Sand type	Distance from shoreline(m)		Distance from shoreline DS/DW(%)
			Water(DW)	Sand(DS)	
1/90	14	U1	15.0	10.0	66.7
		U2		12.0	80.0
		U3		15.0	100
	9	U1	10.5	7.8	74.3
		U2		9.0	85.7
		U3		10.5	100
1/60	19	U1	15.5	12.0	77.4
		U2		13.0	83.9
		U3		15.0	96.8
	14	U1	12.5	10.2	81.6
		U2		10.5	84.0
		U3		12.0	96.0
1/40	25	U1	15.0	12.8	85.3
		U2		12.6	84.0
		U3		14.4	96.0
	19	U1	11.6	9.6	82.8
		U2		9.8	84.5
		U3		10.6	91.4

H: 入射波の波高

Sand type : U1 (中央粒径 0.560mm)、U2 (中央粒径 0.299mm)、U3 (中央粒径 0.189mm)

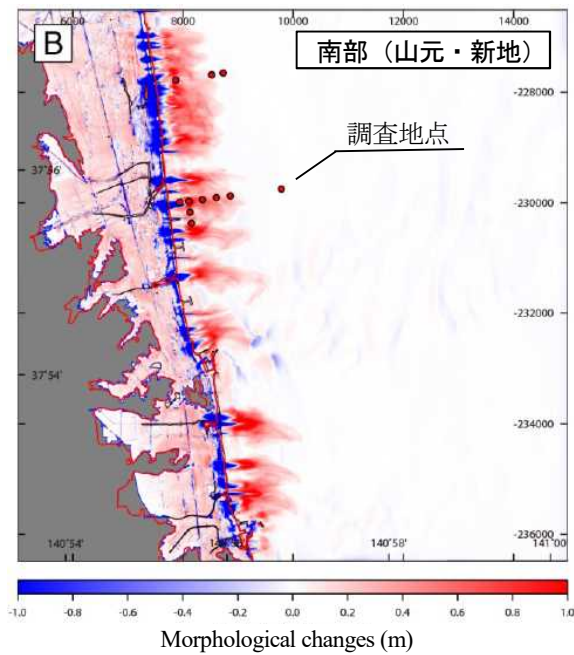
出典) 山本ほか (2017) (参<sup>17</sup>) の一部修正



出典) 関西大学 (2017) (参<sup>21</sup>) に一部加筆

図10 水理実験の概要

Fig.10 Hydraulic experimental overview

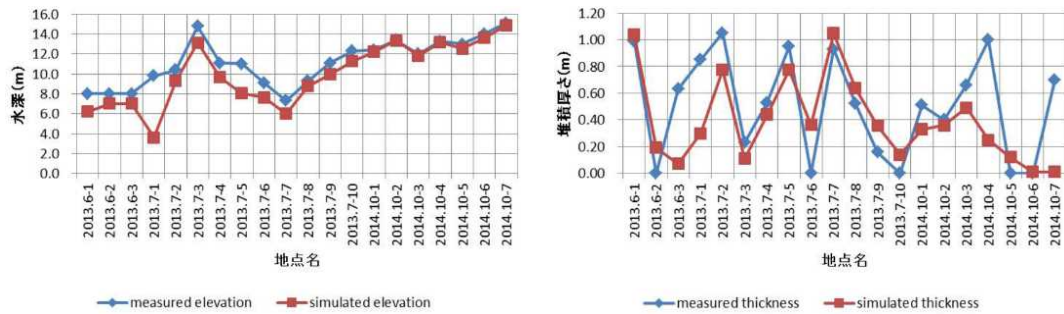


青は浸食及び赤は堆積を示す

出典) 関西大学 (2016) (参22) に一部加筆

図 1 1 東北地震津波による仙台湾南部海岸における土砂移動解析結果

Fig.11 Calculation result of geomorphological changes after the tsunami in southern sendai coast



出典) 関西大学 (2016) (参22)

図 1 2 柱状採泥地点における実測値と計算値の比較 (左 : 水深、右 : 堆積厚)

Fig.12 Comparison between measured value and simulated value. (Left: Water Depth, Right: Deposition thickness)

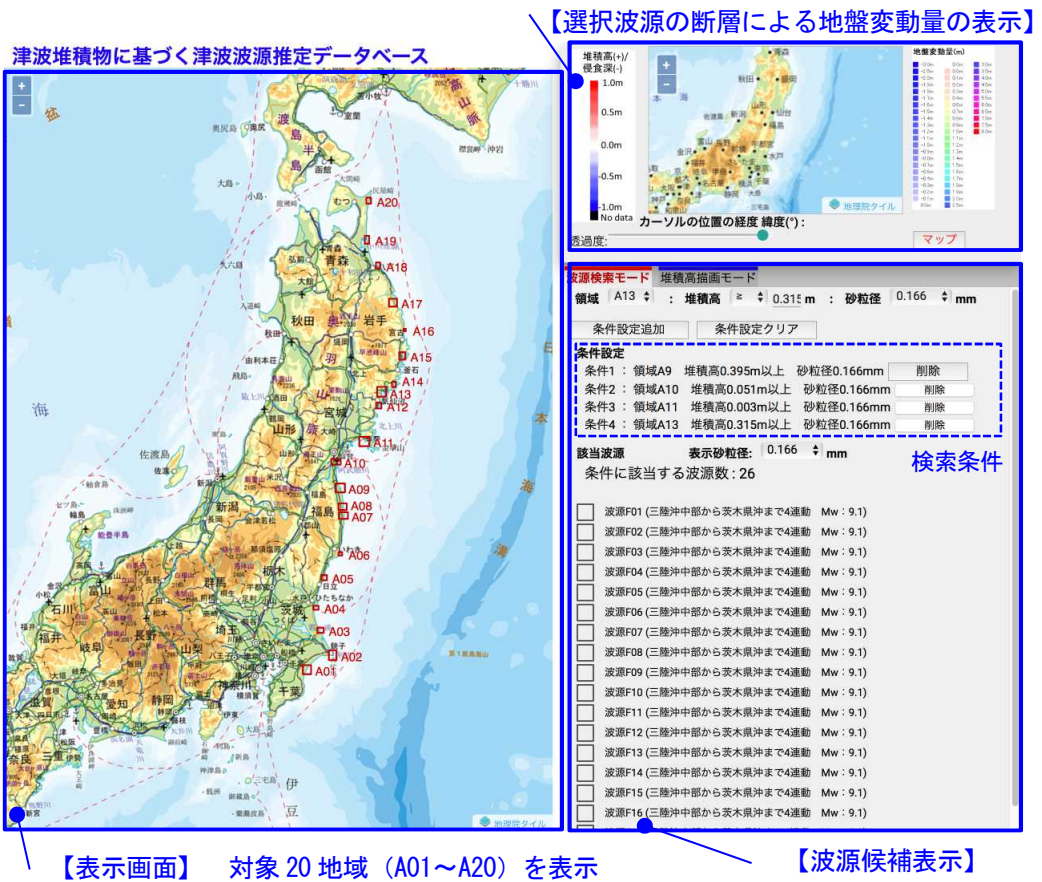
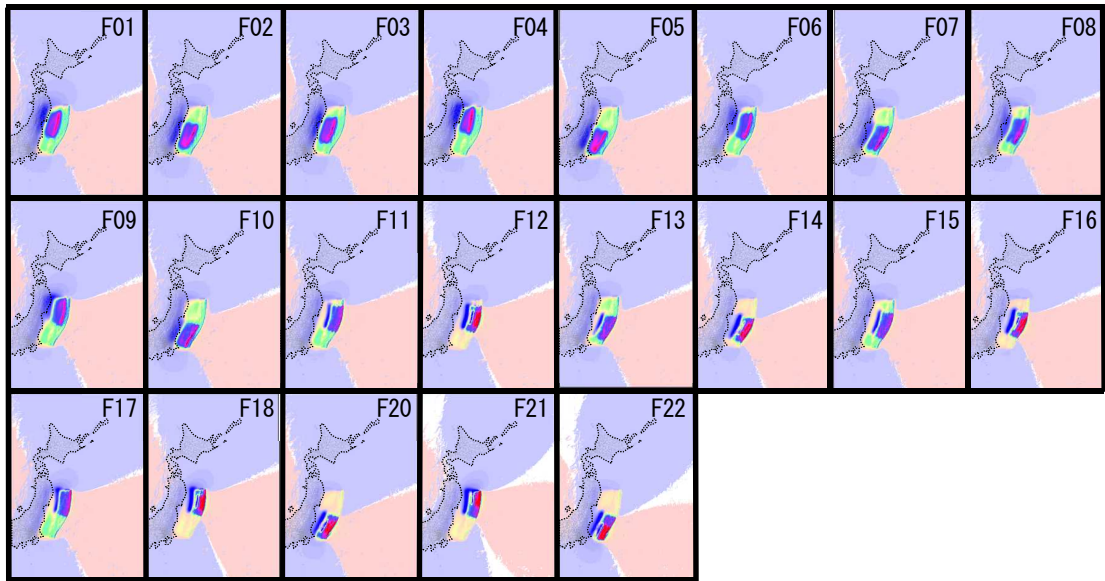
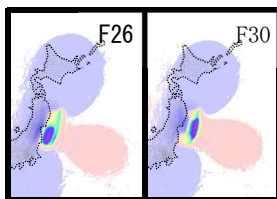


図 1 3 津波堆積物に基づく津波波源推定データベース

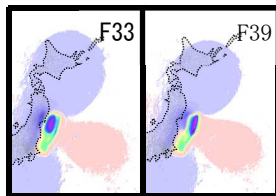
Fig.13 Database for estimating tsunami sources based on the distribution of tsunami sediments



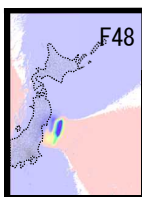
(a) 三陸中部から茨城県沖まで4連動(Mw9.1)



(b) 三陸中部から福島県沖まで3連動(Mw8.8)



(c) 宮城県沖から茨城県沖まで3連動(Mw8.8)



(d) 宮城県沖と福島県沖の2連動(Mw8.6)

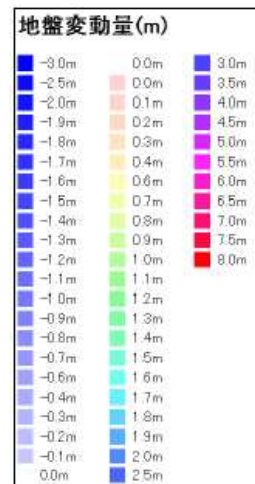


図 1 4 推定候補として選定された波源モデル 26 種

Fig.14 26 kinds of selected wave source models

## 2.4 津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）の整備

新規制基準では、「基準津波による遡上津波は、敷地周辺における津波堆積物等の地質学的証拠及び歴史記録等から推定される津波高及び浸水域を上回っていること」を求めている。津波の痕跡高等に関する歴史記録は過去数百年前まで、また、地質学的証拠である津波堆積物は過去数千年前までの情報を保持しており、基準津波の妥当性判断の材料の一つとして有効である。さらに、歴史記録や津波堆積物等から得られる津波高さや発生頻度等の情報は、津波ハザード曲線を算出する際の主要なパラメータであり、確率論的津波ハザード評価においても有効である。本研究では、津波痕跡高情報（既往文献、歴史記録に基づく情報）及び津波堆積物情報を基準津波の妥当性判断及び確率論的津波ハザード評価に有効に活用するため、「津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）」（図15）<sup>(参23)</sup>として整備し、情報の拡充を図った。二つの情報を合わせることで、津波の評価（発生頻度、規模、波源推定等）の効率的な実施に活用できる。また、当該データベースに登録した津波痕跡高情報に関しては、古文書等の歴史史料調査及び現地調査による情報の拡充並びに岩削ほか<sup>(参24)</sup>等に基づく信頼度評価を実施した。さらに、津波堆積物情報についても津波堆積物認定項目（以下「認定項目」という。）及び認定フロー<sup>(参25)</sup>を作成し、堆積物が津波由来かどうかの可能性の程度を客観的に評価した。

### ①歴史記録等に基づく津波痕跡高情報の拡充

歴史津波は、古文書等によりその発生は知られているものの、その被害の全容が明らかになっていないものがある。本研究では、近年の津波の痕跡高情報や既往津波の波源モデルに関する情報の収集と合わせて古文書の記載からより多くの痕跡記録を得るために、津波高さ情報以外の被害規模（集落や船舶の流失被害数等）の記事に着目し、歴史津波の痕跡高情報を収集した。これらの痕跡高情報については現地調査によりその位置、信憑性等を確認し、「津波痕跡データベース（津波痕跡高情報）」<sup>(参23)</sup>に登録し、情報の拡充を図った。

平成25年度は、調査がほとんど実施されてこなかった1677年延宝房総地震津波での愛知県、1833年天保出羽沖地震津波での山形県及び新潟県佐渡島、1843年天保根室沖地震津波での北海道～三陸海岸、1856年安政三陸地震津波での青森県～岩手県を対象に史料調査及び現地調査を実施した。1843年天保根室沖の調査では、根室市花咲で集落の大半が流失したことを示す史料に基づき現地調査を行い、痕跡記録を得た。また、記録がほとんどなかった三陸でも、新史料の調査により、宮古市（鉾ヶ崎・赤前）、大船渡市で新たな痕跡記録を得た（図16）<sup>(参26)</sup>。

平成26年度は、江戸中期から後期までに発生した津波について、日本海沿岸及び南海トラフ沿岸（秋田、新潟、大分、宮崎及び愛媛）の痕跡調査を実施した。そのうち日本海東縁部を波源とする1833年天保出羽沖地震津波については、前年度の調査に引き続き、秋田県及び新潟県を対象に津波浸水や遡上高さの史料調査及び現地測量を実施した。これまで痕

跡データが全く得られていなかった新潟県村上市瀬波では、河川を遡上した津波が大龍寺の垣根まで達したことを示す伝承記事を見つけた。また、秋田県にかほ市象潟町でも、海辺の集落（関、洗釜及び川袋）において家屋等が流失したことを示す史料を見つけた。これらの情報を基に各地点で現地測量を行い、新たな痕跡記録を得た（<sup>参27</sup>）。図17に調査地点及び測量結果を示す（図中●は平成25年度、○は平成26年度の調査地点を示す）。

平成27年度は平成26年度に引き続き調査範囲を拡げ、北海道～青森県、石川県～福井県～京都府舞鶴、島根県を対象に被害規模に関する史料調査及び現地標高測量を行い、八十地点で津波高さの推定を実施した。1833年天保出羽沖津波の調査地点及び測量結果の一部を例として図18に示す。石川県では、これまで輪島以外にほとんど記録が得られていなかったが、寺院の過去帳を調査することにより、同県珠洲市大谷で新しい痕跡記録を得た（<sup>参28</sup>）。

平成28年度は、太平洋側で発生した十九件の歴史津波（室町時代以前、安土桃山～江戸前期、江戸中期・後期）を対象に史料調査を行い、それらのうち南海トラフで発生した九件の津波に関して現地調査及び痕跡高情報の信頼度評価を実施した。広域に被害が及んだとされる1605年慶長地震津波及び1707年宝永地震津波に対しては、千葉県、三重県～和歌山県、徳島県、宮崎県～大分県を対象に被害規模に関する史料調査及び現地標高測量を行い、約八十地点で津波高さの推定を実施した。1605年慶長地震津波の調査地点及び測量結果の一部を例として図19に示す。千葉県沿岸では、既往調査研究により痕跡記録が得られていたが、痕跡高の信頼度（<sup>参23</sup>）がD（参考値に相当するもの）及びZ（広域での総括値等に相当するもの）であったため、これまでは津波推定及び評価には利用できなかった。そこで本研究では、1605年慶長地震津波の房総半島における総括史料『房総治乱記』及び『当代記』に記述された沿岸の村々での集落被災度に着目して調査することにより、房総半島東海岸100kmに分布する四十地点において、利用可能な精度（痕跡高の信頼度C以上に相当するもの）の痕跡記録を得た（<sup>参29</sup>）。

本研究で収集した歴史津波の痕跡記録は、基準津波の妥当性判断の材料として活用するとともに、歴史地震津波の規模の解明、より精度の高い波源の推定、更には確率論的ハザード評価への活用も期待される。

なお、本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究（平成25年度 津波痕跡データベースの高度化、代表：東北大学災害科学国際研究所 今村文彦）及び原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成26年度 津波痕跡データベースの高度化、平成27～28年度 歴史津波記録の調査（太平洋沿岸及び日本海沿岸）、代表：東北大学災害科学国際研究所 今村文彦）事業により実施した。

## ②津波堆積物情報の評価

津波による堆積物は、堆積構造や構成物等が堆積環境によって相違すること及び高潮や洪水等による堆積物と類似することから、他の堆積物から識別し津波堆積物と認定することが困難である。そのため、これらを客観的及び統一的に認定できるよう、堆積環境が異な

る地点（例えば泥炭地、谷地形等）における現地調査や採取した試料を用いた分析（微化石分析、放射性炭素同位体測定等）等を実施し、津波堆積物の特徴を考慮した認定項目（表7）を整理した<sup>(参25)</sup>。さらに、津波堆積物の専門家から意見を聴取し、それらを踏まえて認定項目を精査するとともに、認定フローを作成した（図20）。認定項目は、「堆積学的特徴」、「古生物学的特徴」、「古地震学的・歴史学的特徴」、「各種室内分析によりわかる特徴」、「水理学的特徴」、「津波石」の六つの観点及び42項目からなる。認定項目及び認定フローの作成に当たっては、津波堆積物の専門家が現地調査から諸分析・解析を行い、最終的に津波堆積物であるかどうかの判断をする観点及び思考プロセスにできるだけ沿ったものにした。この認定項目及び認定フローを用いて、既往文献から抽出されたイベント堆積物が津波由来である可能性の程度を客観的に評価し、「津波痕跡データベース（津波堆積物情報）」<sup>(参23)</sup>に登録した。調査した文献は1961年から2013年の総数約190編であり、登録された津波堆積物情報は約3000層になる。今後、これらの情報は基準津波の妥当性判断の材料として活用するとともに、過去の津波に関する頻度や規模等の情報を得られることから確率的ハザード評価への活用も期待される。

また、津波堆積物のより精度が高い堆積年代の推定のため、年代評価手法の高度化を図った。津波堆積物が堆積した年代（津波の発生年代値）の測定に当たっては、津波堆積物の直上及び直下の堆積物から採取される有機物試料（例えば種子や葉片等）を用いた放射性炭素年代測定が一般的に行われている。ただし、数試料から推定していること等から年代決定精度は数百年程度の大きな推定幅を持つ場合があった。そこで、津波堆積物の堆積年代について信頼性を高めるため、津波堆積物の直上及び直下に堆積している泥炭質土壌を対象として連続で採取した試料をミリメートルオーダー間隔で高密度に測定し、その測定結果をウィグルマッチング法に重点を置いた解析を行うことで年代評価手法の高度化を図った。ウィグルマッチング法とは、大気中の $^{14}\text{C}$ 濃度が変動していることを用いた年代評価方法である。一試料の測定結果では、この大気中の $^{14}\text{C}$ 濃度の変動により、幅広い範囲の年代が推定されるが、連続的に採取した複数の試料を測定することで、年代を絞り込むことができ、高精度での年代評価が期待できる。

図21に示す岩手県野田村や北海道浦幌町で採取された泥炭質土壌試料<sup>(参30)</sup>を用いて高解像度年代測定を実施した結果、年代推定が困難であった17世紀前半や約2000年前頃に堆積したとされてきた複数の津波堆積物の堆積年代を判別することができた（図22）<sup>(参31)</sup>。詳細は、Ishizawa et al.<sup>(参32)</sup>を参照されたい。

また、年代測定に用いる試料としては土壌試料以外の有機物試料が必ずしも適しているわけではなく、泥炭が連続的に堆積しているような環境では、統計処理が行えるという利点も考慮すると、本研究で実施したような泥炭質土壌試料の高密度な測定が有効であることが分かった。

なお、本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究（平成25年度 津波堆積物データベースの整備、代表：東北大学災害科学国際研究所 後藤和久）及び原子力規制庁の

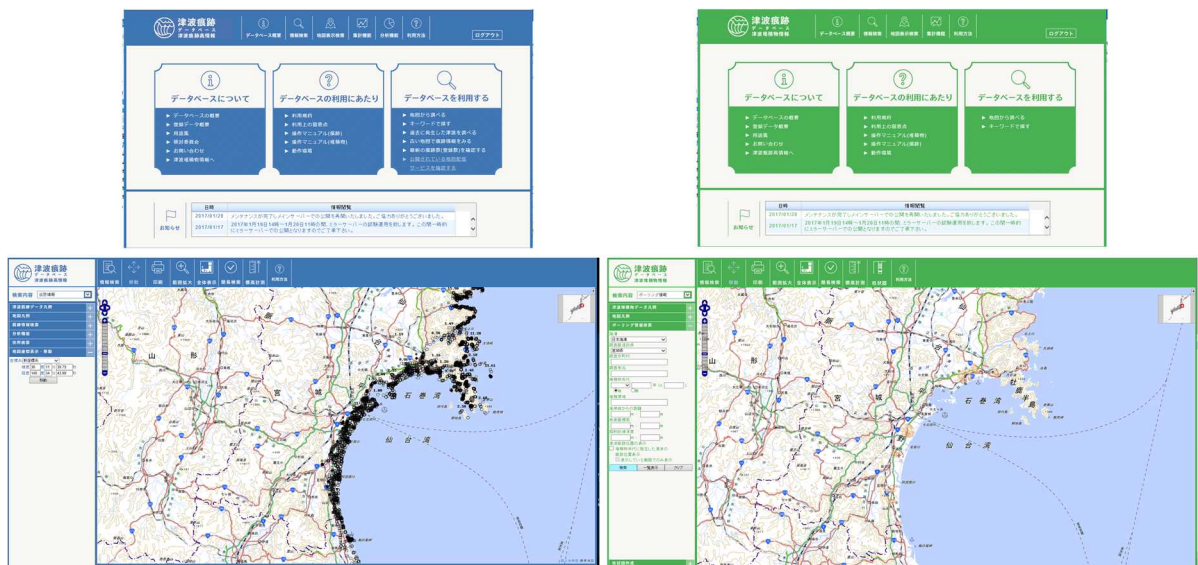
原子力施設等防災対策等委託費（平成 26～27 年度 津波堆積物データベースの整備、代表：  
東北大学災害科学国際研究所 後藤和久）事業により実施した。

表7 津波堆積物認定項目

Table.7 Tsunami deposits classification

大分類	No	分類	認定グループ
I 堆積学的特徴 (現地観察・剥ぎ取り資料からわかる情報)	1	イベント堆積物下端部に侵食面が認められる。	C
	2	イベント堆積物の下部に偽礫(粘土礫等)が認められる。	C
	3	イベント堆積物の下位層に変形が認められる。	C
	4	イベント堆積物に火炎状構造が認められる。	C
	5	当時の海岸線から連続的に追いかけて見た場合、イベント堆積物が陸側に薄層化する。	B
	6	当時の海岸線から連続的に追いかけて見た場合、イベント堆積物が陸側に細粒化する。	B
	7	イベント堆積物の内部または最上部に木・植物片が濃集する。	C
	8	イベント堆積物の内部に貝殻、礫等が濃集する。	C
	9	イベント堆積物に級化・逆級化構造が認められる。	C
	10	イベント堆積物の内部に強い水流下で形成されたことを示す堆積構造が認められる。	C
	11	イベント堆積物の内部に海・陸両方向の流れを示す堆積構造が周期的に認められる(潮汐堆積物との識別ができる)。	B
	12	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。	X
	13	当時の海岸線から連続的に追いかけて見た場合、内陸へ向かう流れを示す古流向が認められる(洪水堆積物との識別のため)。	B
	14	イベント堆積物の中に長周期の波の影響下で形成された証拠が認められる(侵食面や薄い泥層(マッドレーブ)で境された複数の層がイベント層内部にある、など)。	C
	15	海棲生物遺骸が認められないものの、上流側(砂丘や砂浜など)からの物質供給が確認できる。	B
II 古生物学的特徴	1	イベント堆積物の上下の地層から推定される環境が陸域であるにも関わらず、イベント堆積物中に海生生物遺骸が含まれる。	B
	2	イベント堆積物の上下の地層から推定される環境が浅海～陸域であるにも関わらず、イベント堆積物中に暴浪時波浪限界水深に深に生息する海棲生物遺骸が優位な割合以上含まれている。	A1
	3	イベント堆積物の中に含まれる海棲生物遺骸が、その上下の地層から推定される環境に生息するものとそれ以外の環境に生息するものの混合群集からなる。	C
III 古地震学的・歴史学的特徴	1	イベント堆積物の存在と地震、火山や山体崩壊等の目撃証言とが一致する(現世の事例を含む)。	A2
	2	イベント堆積物の形成年代と、古文書や多点精密年代測定結果(テフラ、年縞、U/Thなど数年以内の誤差で年代決定できるもの)等から得られる歴史津波の発生年代が調和的である。	A2
	3	イベント堆積物のある地点が歴史津波の浸水範囲内である。	C
	4	イベント堆積物の上下で地盤の隆起もしくは沈降を示す古環境変化が珪藻・花粉等の分析により認められる。	A1
	5	周辺に地震痕跡(液状化痕や地盤の隆起/沈降)、テフラ(火山)、地すべり痕(地すべり)等の津波発生源の証拠が存在し、その年代とイベント堆積物の形成年代とが調和的である。	A1
IV 各種室内分析によりわかる特徴	1	イベント堆積物中で海水由来の元素(微量元素も含む)が増加する。	B
	2	上下の地層と比べて磁化率が異なる。	C
	3	鉱物組成の類似性でイベント堆積物が地点間対比でき、分布の広がり認められる。	C
	5	泥を含む津波堆積物でヒ素や鉛などの重金属類を多く含有する。	C
	6	粒度分析の結果、上方細粒化または粗粒化傾向やユニット構造が認められる。	C
	7	粒度分析の結果、内陸細粒化の傾向が認められる。	B
	8	鉱物組成や粒子の特徴(粒子形状等)が、海底堆積物の特徴を有している。	B
	9	鉱物組成と粒度分析結果から、内陸に向けて粒子の軽量化傾向が認められる。	B
	10	X線CT撮影など各種非破壊高解像度分析に基づき、肉眼では観察できなかった流水を示す堆積構造が認められる。	C
	V 水理学的特徴(計算に基づく)	1	イベント堆積物の当時の海岸線からの分布距離ないし範囲が高潮や洪水で説明できない。
2		イベント堆積物の中の堆積構造や含有海棲生物遺骸が、その堆積場や供給源の深さから推定される波の周期や高さが津波でなければ説明が困難である(再堆積の可能性が排除できる)。	A1
3		イベント堆積物の分布標高が、津波でしか説明できない(海成段丘からの再堆積の可能性が排除できている)。	A1
VI 津波石	1	供給源からの移動距離が台風の高波や著しく発達した低気圧による高潮等などでは説明ができない(数値計算に基づく)。	A1
	2	供給源が自明であり、海側から陸側への移動が確認できる(転石とは区別できる)。	B
	3	ポットホールのように、常時波浪にさらされていた場所にあった特徴がある。	B
	4	表面に海棲生物遺骸が付着しており、海中に一時期あったことが自明である。	B
	5	古文書等に巨大岩塊の津波による移動が記録されており、現物が特定できる。	A2
	6	巨礫が存在する(転石の可能性が排除できた場合に限る)。	C

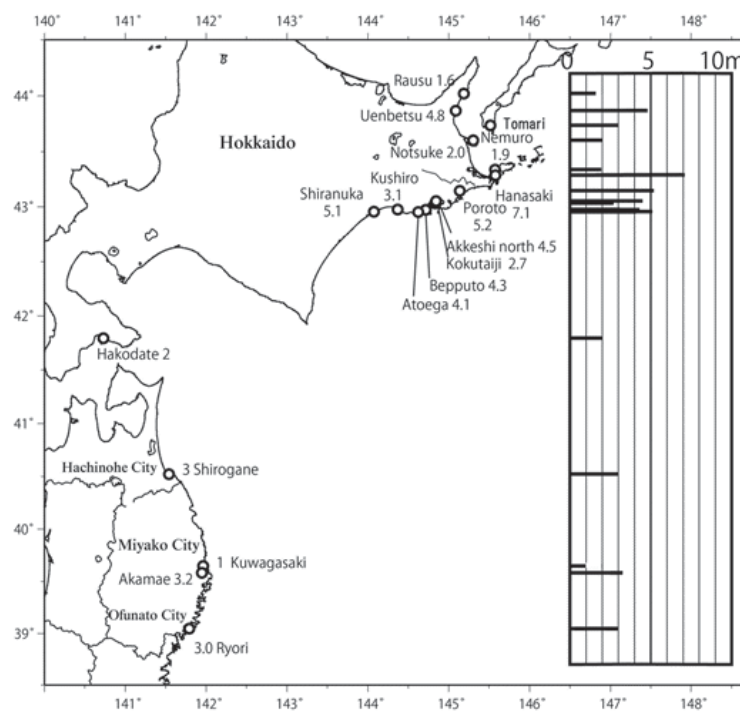
出典) 後藤ほか (2017) (参25)



出典) 東北大学災害科学国際研究所ほか (参23)

図15 津波痕跡データベース (津波痕跡高情報及び津波堆積物情報)

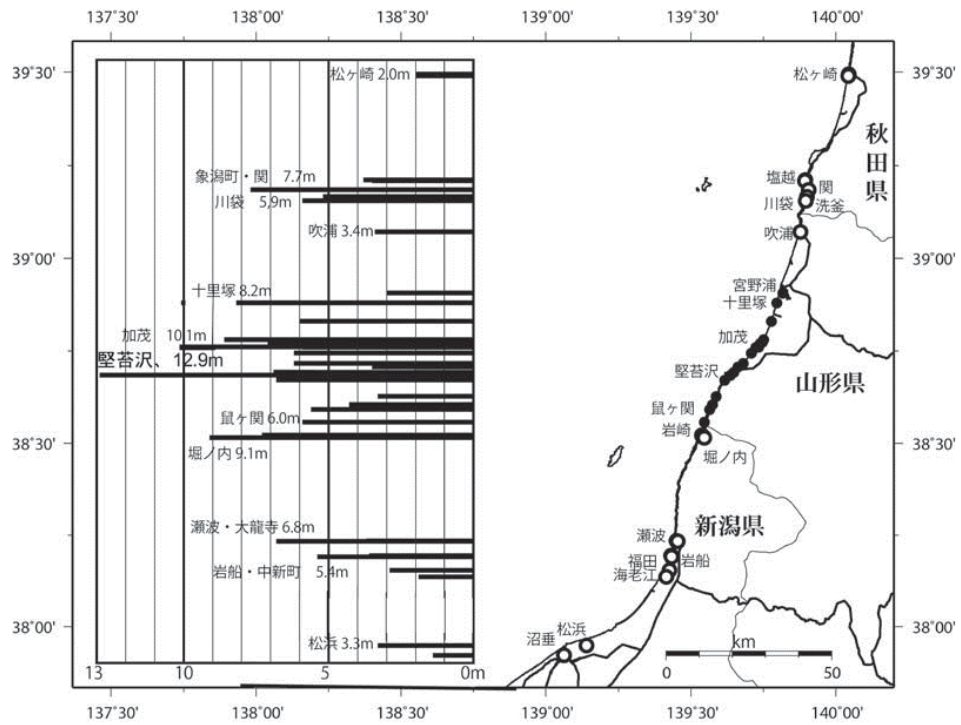
Fig.15 Japan Tsunami Trace Database (Tsunami trace heights information and Tsunami deposits information)



出典) 都司ほか (2014) (参26)

図16 1843年天保根室沖地震津波の調査結果

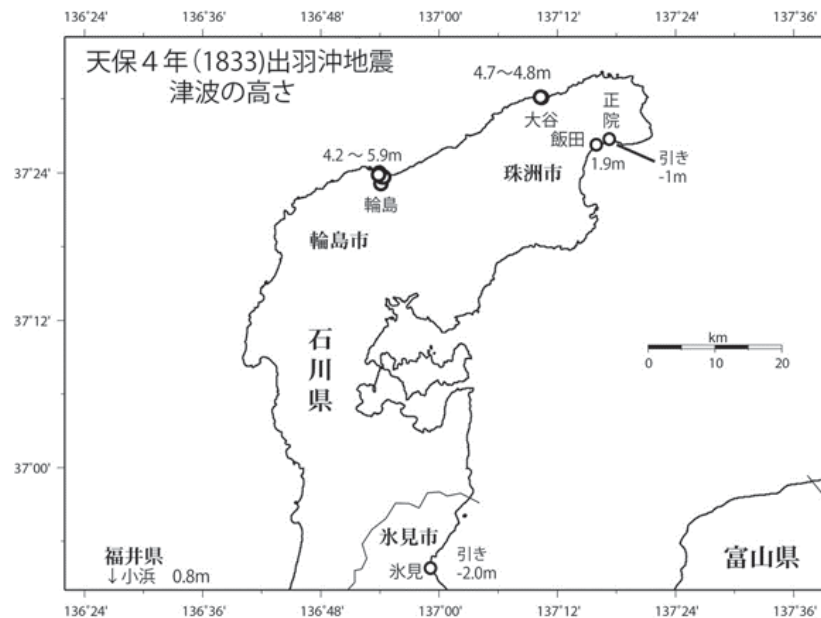
Fig.16 Field survey results of the 1843 Tenpo Nemuro-oki earthquake tsunami



出典) 都司ほか (2015) (参27)

図 1 7 1833 年天保出羽沖地震津波の調査結果 (平成 26 年度)

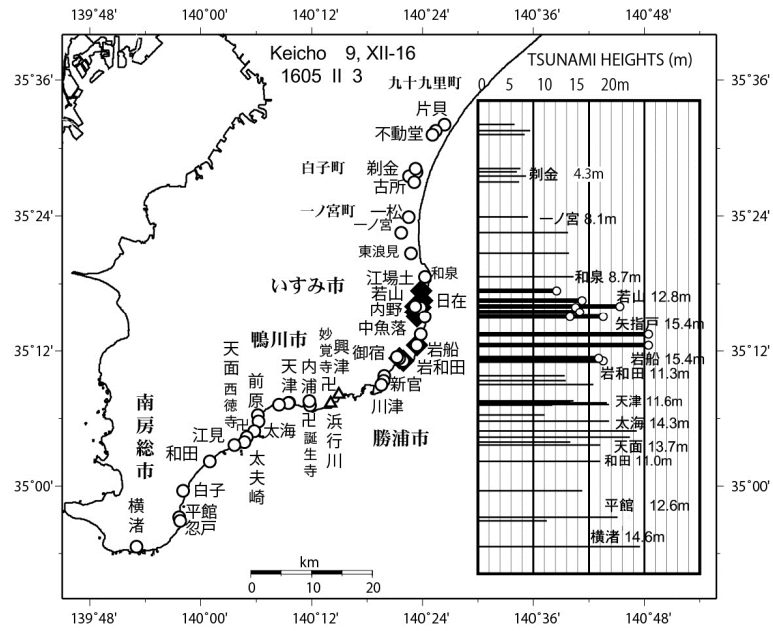
Fig.17 Field survey results of the 1833 Tenpo Dewa-oki earthquake tsunami (FY2014)



出典) 都司ほか (2017) (参28)

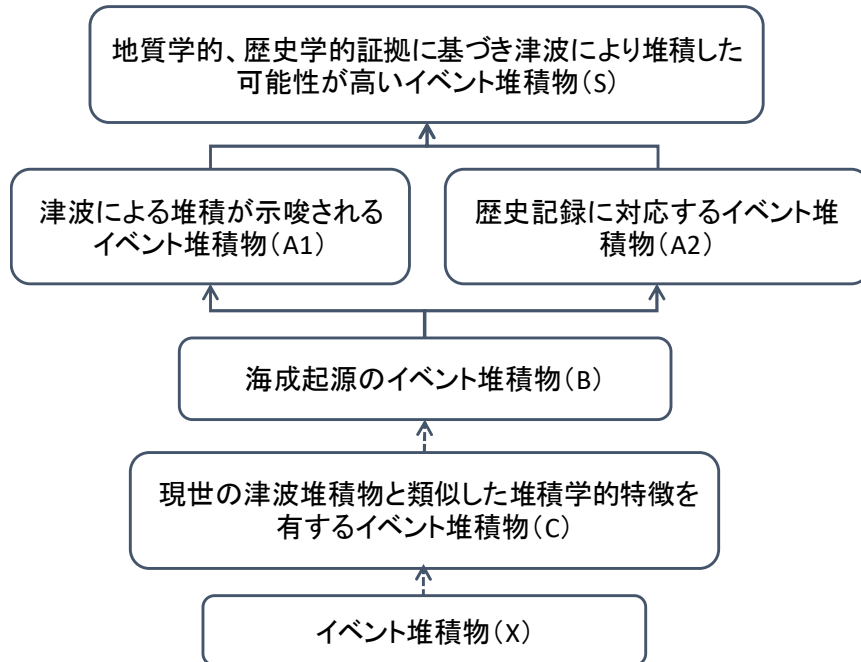
図 1 8 1833 年天保出羽沖地震津波の調査結果 (平成 27 年度)

Fig.18 Field survey results of the 1833 Tenpo Dewa-oki earthquake tsunami (FY2015)



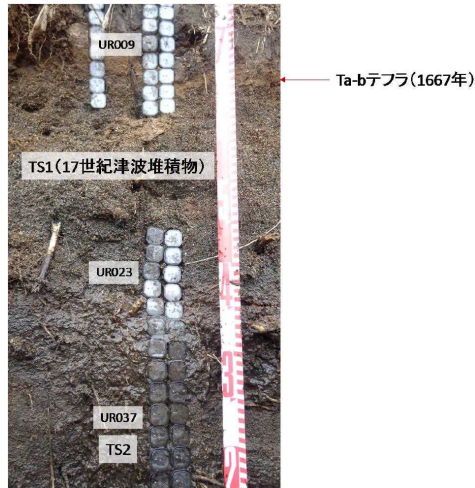
出典) 都司ほか (2017) (参29)

図19 1605年慶長地震津波の調査結果  
Fig.19 Field survey of the 1605 Keicho earthquake tsunami



出典) 後藤ほか (2017) (参25)

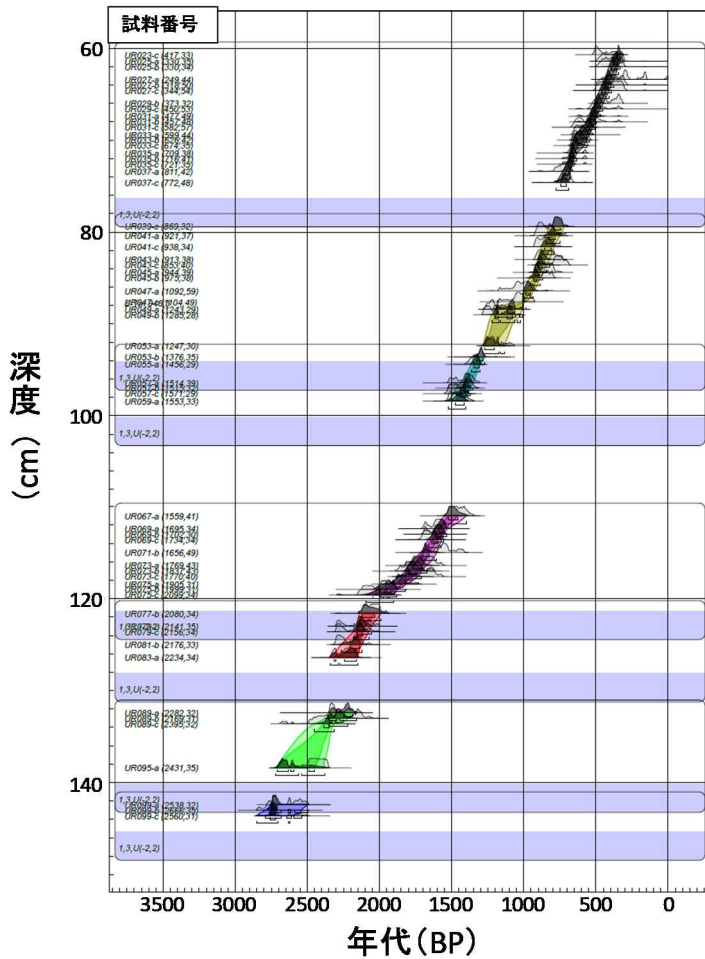
図20 津波堆積物認定フロー  
Fig.20 Flowchart of tsunami deposits classification



出典) 東北大学 (2015) (参30)

図 2 1 連続で採取した年代測定試料の例

Fig. 21 An example of continual sampling for the <sup>14</sup>C dating



※紫色は解析結果のラベル  
出典) 東北大学 (2016) (参31)

図 2 2 ウィグルマッチングによる暦年較正結果

Fig. 22 Result of <sup>14</sup>C calibration age based on wiggle matching

## 2.5 海底地すべり起因の津波評価手法の整備

地すべり起因の津波は、陸上において斜面崩壊した土砂等が海面に突入し津波を発生させる場合と海底において斜面が崩壊しそれに伴う地形変化が海面に変動を与えて津波を発生させる場合がある。海底での地すべりは、陸上の地すべりに比べて海洋という特殊性、海底という広大な領域等が制約となり、調査により得られる情報が限られる。このため、海底での地すべり起因の津波の波源を設定するに当たっては、過去に発生した海底地すべりの位置や形状等の情報が用いられている。

原子力発電所の津波に対するリスク評価の観点から、津波波源の設定においては、過去の海底地すべり発生箇所だけではなく、今後、発生する可能性も考慮して津波波源を設定することが望ましい。また、「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、外部事象に係る確率論的リスク評価に必要となる津波の発生確率を考慮することが求められており、海底地すべりに起因した津波についてもその評価が必要となる。

本研究では、海底地すべり起因の確率論的津波ハザード評価に資するため、海底地すべり発生危険度判定手法及び海底地すべり起因の津波水位評価手法を整備した。具体的には①確率論的斜面安定解析手法を用いた海底地すべり発生危険度判定手法の考案、②海底環境下における斜面安定解析手法の検証、③モデル海域における海底地すべり危険度マップの作成を実施した。以下に①～③について記述する。

①海底地形における傾斜位置情報や海底地盤の物性値のばらつきを考慮して、海底地すべりが発生する確率を評価するために、確率論的斜面安定解析手法を用いた海底地すべり発生危険度判定手法を考案した。本手法では、図2-3に示すように、海底地形モデルをメッシュ分割し、各メッシュ（評価対象地点）に対して、震度（外力）、海底地盤物性値（せん断強度、密度）及び地すべり斜面形状について不確かさを考慮して多数のケースを設定するとともに、これらの設定パラメータに基づいて斜面安定解析手法である修正フェレニウス法<sup>(参33)</sup>を適用し斜面安全率  $F_s$  を算定する。斜面安全率  $F_s$  の算定式を式(6)に示す。この式では、斜面安全率  $F_s$  が想定した地すべり面より上の土塊に作用する滑動力の総和とすべり面に期待される抵抗力の総和の比で表される。

$$F_s = \frac{\sum\{cl + (\gamma_{sub}h_s b \cos\theta - k\gamma_{sat}h_s b \cos\theta)\tan\phi\}}{\sum(\gamma_{sub}h_s b \sin\theta + k\gamma_{sat}h_s b \cos\theta)} \quad (6)$$

ここで、 $c$  は各スライスの粘着力、 $l$  は各スライスのすべり面の長さ、 $\gamma_{sub}$  は水中単位堆積重量、 $\gamma_{sat}$  は飽和単位堆積重量、 $h_s$  はスライスの厚さ、 $b$  はスライスの幅、 $\theta$  は傾斜角、 $\phi$  は内部摩擦角、 $k$  は水平加速度である。

さらに、算定された複数の斜面安全率  $F_s$  を用いて、斜面安全率が 1.0 以下となる確率を求めることで、地すべり発生確率を算定する手法である。なお、本手法では、海底地盤物性

については、国際的な海洋掘削データベースから収集したデータに基づいて整理した深度方向の平均及びばらつき（確率モデル）を用いた。図 2 4 に深度方向に離散化したせん断強度の平均及び標準偏差を示す。その際、各層の物性値が非現実的な組み合わせになることを回避するために、各層間の距離に応じた相関についても情報を整理し、本手法に反映した。ただし、400m 以深のせん断強度の確率モデルについては、データそのものが少なく、あくまでも仮定である。

② 上記①における地すべり斜面形状の設定及び斜面の安全率の算定には、修正フェレニウス法を用いている。修正フェレニウス法は陸上斜面に対して実績のある手法ではあるが、海底環境下での適用性を検証するため、海底環境下を模擬した実験を実施した。具体的には、はじめに海成粘土を模擬した模型地盤材料をカオリン粘土で作成した。作成した材料の一面せん断試験による圧密非排水条件で全応力表示の強度パラメータは正規圧密条件（圧密圧力 100kN/m<sup>2</sup> で予備圧密）で粘着力  $c_{cu}=2.7(\text{kN/m}^2)$ 、 $\phi_{cu}=14.4^\circ$  であった。また、過圧密条件（圧密圧力 170kN/m<sup>2</sup> で先行圧密）で  $c_{cu}=26.6(\text{kN/m}^2)$ 、 $\phi_{cu}=7.2^\circ$  であった。これらの強度パラメータを用いて非排水せん断強さと深度の関係を算定したところ、本粘土の強度分布は日本海と東京湾の粘土の強度分布の間にあることがわかり、海成粘土の強度特性を再現できた（<sup>参34</sup>）。

次に、高さ 500mm×幅 600mm の土槽に上述の地盤材料にて斜面を形成し水で満たした。この土槽を傾斜台に設置し、これを有効回転半径 3,050mm の遠心模型実験装置にて 90G 場まで高めた後に、徐々に傾斜角を上げることで静的な水平震度を与える遠心力模型実験を行い、斜面の地すべり挙動を観測した。斜面の地すべり挙動の様子は、斜面模型の側面を撮影した動画から静止画を抽出し、静止画間の差異を画像処理により求め変位の量と方向を求めることができる PIV（Particle Image Velocimetry）解析にて把握した。その結果、傾斜角 11.4° で斜面がすべり出し、円弧状のすべり面となることを確認した（図 2 5）。さらに、修正フェレニウス法を用いて算定された円弧状のすべり面の斜面安全率  $F_s$  は、おおむね 1.0 となり、同手法の適用性が確認された（<sup>参34</sup>）。

③ 上記①の海底地すべり発生危険度判定手法の適用性を確認するため、モデル地形を対象に図 2 3 の手順で求めたある水平震度  $k$  のときの条件付き地すべり発生確率と、仮の地震ハザード曲線から求めた水平震度  $k$  の地震発生確率を乗じ、任意地点の地すべりの年発生確率を算定し、これを面的に全ての地点において実施することにより海底地すべり危険度マップを試作した（図 2 6）。地すべりの崩壊形状としては、円弧状の他に、並進状の地すべりを想定した。なお、想定した地すべりの規模は、長さ方向で数百mから数 km を設定した。同マップより、斜面勾配の大きな箇所では地すべり発生確率が高くなる結果となった。これは、斜面勾配が大きいほど安定性が小さくなることと整合している。また、斜面勾配の小さな箇所でも、その直上や直下に斜面勾配が大きな箇所があれば、地すべり発生確率が比較的高くなっていることが分かり、勾配が大きな箇所だけでなく、その周辺にも影響を及ぼ

すことが確認できた。ただし、本モデル地形では全領域に対して同じ地盤物性を与えたため、特に斜面勾配の影響が際立ったと考えられる。

今後、海底地すべり発生危険度判定により得られる発生確率、海底地すべりの形状及び、海底地すべり起因の津波解析により算定される津波水位を組合せた確率論的津波ハザード評価手法の整備を進めていく。

なお、本研究における上述の「②海底環境下における斜面安定解析手法の検証」については、原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成 27～28 年度 海底における斜面の地震時安定評価に関する基礎検討、代表：日本大学工学部 中村晋）事業により実施した。

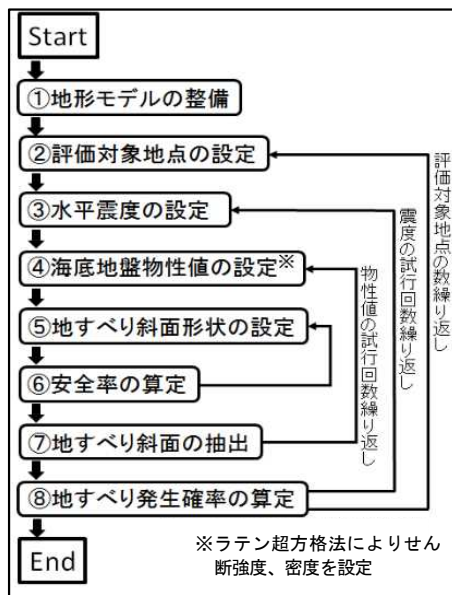


図 2 3 海底地すべり発生危険度判定手法の手順  
 Fig.23 Flow of hazard assessment for submarine landslide

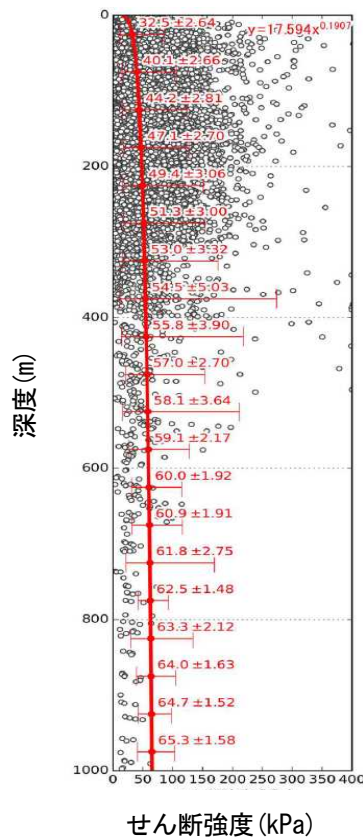
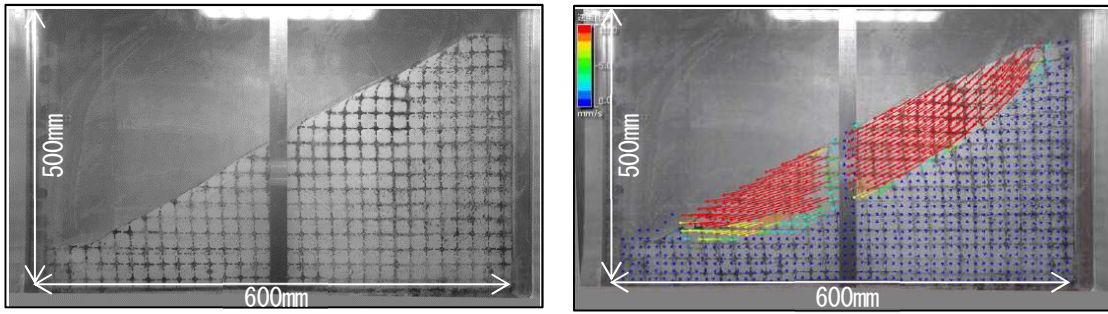


図 2 4 せん断強度と深度の関係

Fig.24 A regression curve indicating the relationship between shear strength and depth



出典) 日本大学 (2017) (参35) に一部加筆

図25 PIV画像解析によって得られた変位ベクトル  
(左: 初期状態 (傾斜 $0^{\circ}$  )、右: 滑動中 ( $11.6^{\circ} \sim 11.7^{\circ}$  ))

Fig.25 The displacement vector obtained by PIV analysis  
(Left: Initial state, Right: Sliding (Displacement difference of  $11.6^{\circ}$  to  $11.7^{\circ}$  ))

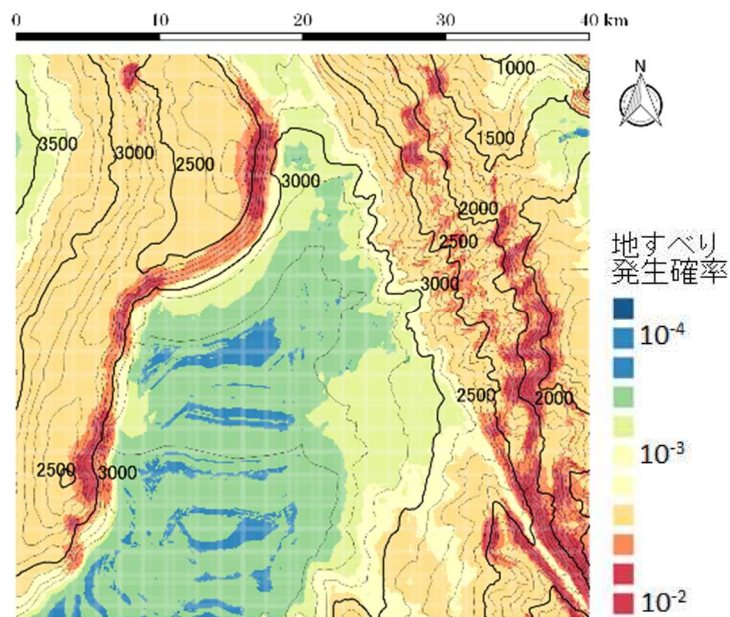


図26 モデル地形における海底地すべり危険度マップ

Fig.26 Submarine landslide hazard maps on arbitrary area

### 3. 結論

#### (1) 成果の要点

本プロジェクトでは、今後の定期的な安全性向上評価の妥当性確認に資するよう、津波 PRA に係る確率論的津波ハザード評価手法の信頼性向上のため、平成 25 年度から平成 28 年度まで実施期間において津波ハザード関連評価技術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 確率論的津波ハザード解析における断層破壊特性の影響評価手法の整備（平成 27~28 年度）

確率論的津波ハザード評価手法の高度化に資するよう、津波水位評価における破壊伝播特性に係る不確かさの影響を把握するため、同不確かさを考慮した津波波源モデル（破壊伝播モデル）を用いて津波水位を算出し、瞬時破壊を仮定した同時破壊モデルによる津波水位と比較して傾向を分析した。また、その分析結果に基づき、破壊伝播特性の不確かさの影響を確率論的津波ハザード評価手法に取入れるための簡易的な手法を提案した。

#### ② 構造物への作用波力評価手法の高度化（平成 25~27 年度）

原子力発電所の津波リスク評価に係る構造物の津波フラジリティ評価に資するため、防潮堤越流を模擬した水理模型実験のデータを用いて、三次元津波解析モデル Open FOAM による推定値の不確かさ（解析モデルの不確かさ）を評価した。解析モデルの不確かさの評価には、実験値に対する解析値の比のばらつきで表し、浸水深及び波圧について防潮堤の天端における越流水深を解析モデルの計算格子サイズで除した格子分割数との関係で評価した。その結果、浸水深の比及び波圧の比はいずれも格子分割数が大きくなるほどばらつきが小さくなること、また、浸水深比のばらつきの中心はほぼ 0（自然対数）、波圧比のばらつきの中心はほぼ 0.4（同）になることを確認した。さらに、ばらつき（対数標準偏差）を定量評価し、波圧比のばらつきの方が浸水深比のばらつきに比べて大きくなることを確認した。

#### ③ 津波堆積物による波源推定手法の整備（平成 25~28 年度）

既往津波の波源に係る情報の拡充に資するため、津波堆積物による波源推定に関する解析ツールを整備した。波源推定の解析ツールでは、多数の想定される津波の伝播解析及び土砂移動解析を実施し、その解析結果をデータベースに保存しておき、インターフェイス上にその解析結果から任意地点の津波堆積物情報（堆積層厚、土砂粒径等）と整合する津波波源候補を出力する仕組みとした。本データベースを用いて、東北地震津波による津波堆積物情報から同津波の波源を推定した結果、同津波の波源を一定程度推定することができた。また、本データベースの構築のため、陸上土砂移動・堆積のモデル化並びに解析コードの改良や水

理実験結果や現地調査結果を用いた解析コードの検証を実施し、おおむね良好な再現性を確認した。

#### ④津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）の整備（平成 25~28 年度）

「津波痕跡データベース（津波痕跡高情報及び津波堆積物情報）」の整備及び情報の拡充を行った。また、当該データベースへの情報の登録に当たって津波痕跡高情報に関しては、古文書等の歴史史料調査及び現地調査による情報の拡充並びに信頼度評価を実施するとともに、津波堆積物情報に関しても認定項目及び認定フローを作成し、津波由来の可能性を評価した。また、本データベースが広く活用されることを期待して、平成 29 年度 8 月にインターネットで閲覧できるよう公開した<sup>(参23)</sup>。今後は基準津波の妥当性判断の材料として活用するとともに、津波の規模の解明、更には確率論的ハザード評価への活用も期待される。

#### ⑤海底地すべり起因の津波評価手法の整備（平成 26~28 年度）

海底地すべり起因津波の確率論的ハザード評価手法整備の一環として、地震時の斜面安定解析手法（修正フェレニウス法）において地盤物性値（せん断強さ等）のばらつきを考慮した確率論的手法による海底地すべり発生危険度判定手法を考案した。また、遠心力模型実験にて海底環境下を模擬した斜面の地すべり挙動を観測し、上記の斜面安定解析手法の適用性を確認した。さらに、モデル地形を対象に海底地すべり危険度マップを試作し、上記の海底地すべり発生危険度判定手法の適用性を確認した。加えて、海底地すべり起因の津波解析コードを整備し、同解析コードを用いて感度解析を行い、海底地すべりの影響因子と津波高等の関係を整理した。

### （2）目的の達成状況及び成果の活用等

上記のとおり平成 25 年度から平成 28 年度までの実施期間の目的を全て達成した。成果の活用としては、新規制基準に基づく既設原子力発電所の適合性審査において、基準津波の策定に関連し、プレート間地震に伴う津波を対象とする津波波源モデルの設定方法として提案した「特性化波源モデル」に関する公表論文（杉野ほか<sup>(参36)</sup>）が活用された。

また、今後の適合性審査が予定されている太平洋側の既設原子力発電所の基準津波の策定に関しても、「特性化波源モデル」に関する公表論文（杉野ほか<sup>(参36)</sup>）が技術的知見の一つとして活用される見込みである。また、津波痕跡データベース及び津波堆積物の認定フローに関する成果及び、「特性化波源モデル」に関連する公表論文（杉野ほか<sup>(参6)</sup><sup>(参12)</sup><sup>(参36)</sup>）を取りまとめた NRA 技術報告「確率論的津波ハザード評価手法に係る手法の提案—プレート間地震による津波波源の設定方法—（平成 30 年 5 月発刊）」<sup>(参37)</sup>についても、今後の適合性審査において活用が期待される。

## 参考文献

- (参 1) 原子力災害対策本部:原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故について-,2011 年 6 月.
- (参 2) 原子力規制委員会 : 基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド、2013 年 6 月.
- (参 3) 原子力規制委員会 : 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、2017 年 3 月改定.
- (参 4) Satake, K., Y. Fujii, T. Harada and Y. Namegaya: Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake as inferred from tsunami waveform data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.103, No. 2B, pp. 1473–1492, 2013.
- (参 5) 杉野英治、呉長江、是永眞理子、根本信、岩渕洋子、蛭澤勝三 : 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、第 13 巻、第 2 号 (特集号)、pp.2 -21、2013 年.
- (参 6) 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、第 17 巻、第 2 号、pp.108-127、2017 年.
- (参 7) 小谷美佐、今村文彦、首藤伸夫 : GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法、土木学会、海岸工学論文集、第 45 巻、pp.356-360、1998 年.
- (参 8) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The displacement field of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., 61, pp.1433-1440, 1971.
- (参 9) 後藤智明・佐藤一央 : 三陸海岸を対象とした津波計算システムの開発、港湾技術研究所報告、第 32 巻、第 2 号、pp.3-44、1993 年.
- (参 10) 土木学会原子力土木委員会津波小委員会 : 原子力発電所の津波評価技術 2016、2016 年 9 月.
- (参 11) 伊藤學、亀田弘行、能島暢呂、阿部雅人 : 改訂 土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善株式会社、pp.202、2007 年.
- (参 12) 杉野英治、岩渕洋子、阿部雄太、今村文彦 : 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、第 15 巻、第 4 号、pp.40-61、2015 年.
- (参 13) 有川太郎、大家隆行、防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 70、No. 2、 pp. I\_806-I\_810、2014 年.
- (参 14) OpenFOAM、<https://www.openfoam.com>、(2018 年 9 月 27 日閲覧)
- (参 15) 菅原大助、津波堆積物と津波の規模について、地学雑誌 123 (6) 、 pp.797-812、2014 年.

- (参 1 6) 原田賢治、高橋智幸、野島和也、津波により陸上斜面上に形成される堆積砂分布に関する水理実験、土木学会第 36 回地震工学研究発表会、2016 年。
- (参 1 7) 山本阿子、高橋智幸、原田賢治、櫻庭雅明、野島和也、津波堆積物形成における粒径と外力の影響に関する水理実験、土木学会論文集 B2、Vol.73、No.2、pp.I\_367-I\_372、2017 年。
- (参 1 8) 今井健太郎、菅原大助、高橋智幸、岩間俊二、田中仁、2011 年東北津波における北上川河口部の大規模洗掘・堆積に関する数値的検討、土木学会論文集 B2、Vol.71、pp.I\_247-I\_252、2015 年。
- (参 1 9) 高橋智幸、黒川貴博、藤田将孝、島田広昭、津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験、土木学会論文集 B2、Vol.67、No.2、pp.I\_231-I\_235、2011 年。
- (参 2 0) 防災科学技術研究所：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、第 400 号、2015 年。
- (参 2 1) 学校法人関西大学：平成 2 8 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）事業報告書（代表：高橋智幸）、2017 年。
- (参 2 2) 学校法人関西大学：平成 2 7 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）事業報告書（代表：高橋智幸）、2016 年。
- (参 2 3) 東北大学災害科学国際研究所、原子力規制庁、津波痕跡データベース、<http://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp>、(2018 年 5 月 31 日閲覧)。
- (参 2 4) 岩渕洋子、杉野英治、今村文彦、都司嘉宣、松岡祐也、今井健太郎、首藤伸夫、信頼度を考慮した津波痕跡データベースの構築、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.68、No.2、pp.I\_1326-I\_1330、2012 年。
- (参 2 5) 後藤和久、菅原大助、西村裕一、藤野滋弘、小松原純子、沢井祐紀、高清水康人博、津波堆積物の認定手順、津波工学研究報告第 33 号、Vol.33、No.45、pp.45-54、2017 年。
- (参 2 6) 都司嘉宣、橋本佳祐・堀江岳人、佐々木崇之、松岡祐也、佐藤雅美、芳賀弥生、今村文彦、天保 14 年 3 月 26 日 (1843-IV-25) 根室沖地震の津波高分布、津波工学研究報告第 31 号、2014 年。
- (参 2 7) 都司嘉宣、今井健太郎、畔柳陽介、木南孝博、松岡祐也、佐藤雅美、芳賀弥生、今村文彦、文化元年 (1804) 象潟地震、および天保四年(1833)出羽沖地震による津波の秋田、山形、及び新潟県海岸での高さ分布、津波工学研究報告第 32 号、2015 年。
- (参 2 8) 都司嘉宣、岩瀬浩之、森谷拓実、松岡祐也、佐藤雅美、芳賀弥生、今村文彦、能登半島および若狭湾海岸を襲った寛保元年 (1741) 渡島大島噴火津波および天保四年 (1833) 出羽沖地震津波の浸水高、津波工学研究報告第 33 号、2017 年。

- (参 2 9) 都司嘉宣、畔柳陽介、木南孝博、佐藤雅美、芳賀弥生、今村文彦、慶長 9 年 12 月 16 日 (1605 - II - 3) 地震による房総半島沿岸での津波高さの分布、JpGU-AGU Joing Meeting、2017 年.
- (参 3 0) 東北大学、平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費 (津波堆積物データベースの整備) 事業 (代表: 後藤和久)、2015 年.
- (参 3 1) 東北大学、平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費 (津波堆積物データベースの高度化) 事業 (代表: 後藤和久)、2016 年.
- (参 3 2) Ishizawa, T., Goto, K., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Sawada, C., Nishimura, Y. and Sugawara, D.: Sequential radiocarbon measurement of bulk peat for high-precision dating of tsunami deposits, *Quaternary Geochronology*, Vol. 42, pp. 202–210, 2017.
- (参 3 3) 社団法人日本道路協会: 道路土工 盛土工指針 (平成 22 年度版)、pp.108-115, 2010 年.
- (参 3 4) 仙頭紀明、海野寿康、中村晋、海底地盤を模擬した斜面モデルの作製およびその安定性評価、土木学会第 42 回海洋シンポジウム、2017 年.
- (参 3 5) 学校法人日本大学: 平成 2 8 年度原子力施設等防災対策等委託費 (海底における斜面の地震時安定評価に関する基礎検討) 事業報告書 (代表: 中村晋)、2017 年.
- (参 3 6) 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、第 14 巻、第 5 号、pp.1-18、2014 年.
- (参 3 7) 杉野英治、岩渕洋子: 確率論的津波ハザード評価に係る手法の提案—プレート間地震による津波波源の設定方法とその適用例—、NRA 技術報告、NTEC-2018-4001、2018 年 5 月.

「津波ハザード関連評価技術の整備」の執筆者

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

杉野 英治 上席技術研究調査官

道口 陽子 技術研究調査官

佐藤 太一 技術研究調査官

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 技術基盤課

岩渕 洋子 技術戦略係長