

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：32704

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14391

研究課題名（和文）確率論的津波浸水ハザード評価の効率化とその検証

研究課題名（英文）Efficiency improvement and validation of probabilistic tsunami inundation hazard assessment

研究代表者

福谷 陽（Fukutani, Yo）

関東学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：10785322

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：津波の発生から浸水の過程における複数の不確定性を考慮した多数の浸水深分布を固有直交分解によりモード分解し、結果を統計解析することで、計算負荷の高い確率論的浸水評価を効率的に、かつ、精度良く解析可能な手法を提案した。津波浸水深の評価で従来から検討されてきた地震断層の各種パラメータ変化だけではなく、防潮堤の破壊確率という陸域で影響の大きい不確定性も含んだ評価結果を示すことができた。結果として、対象地域で今後50年や10年で浸水深が1m以上になる確率の平面分布等の結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、各地域での津波浸水深の発生確率を効率的に評価する手法を提案した。固有直交分解を用いて、地震断層の不確定性に加えて、防潮堤の破壊確率も考慮した手法を構築したことは、学術的な意義が高い。提案手法を用いることで、沿岸部に防潮堤のある地域での陸域の津波浸水深の発生確率を、短期間で精度良く評価可能となるため、津波浸水確率を考慮した防災まちづくり計画や確率論的津波リスク評価等に利用されることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a method for efficiently and accurately analyzing computationally demanding probabilistic inundation evaluations by mode decomposing a large number of inundation depth distributions considering multiple uncertainties in the process from tsunami generation to inundation. We also incorporate statistical analysis to examine the outcomes. Our analysis not only considers conventional parameters related to earthquake faults, which have been traditionally used in probabilistic tsunami inundation assessment, but also factors in uncertainties that significantly influence the extent of inundated land, such as the probability of seawall rupture. The results obtained from our study include the spatial distribution of the probability of inundation depths reaching 1 meter or more within the next 50 years or 10 years in the specified area.

研究分野：海岸工学、津波工学

キーワード：津波 確率論的津波ハザード評価 固有直交分解 ガウス過程回帰 津波数値計算 BPT分布 防潮堤 破壊確率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

我が国の沿岸部では、古くから津波・高潮等による自然災害で甚大な被害を受けてきた。近年では、2011年東北地方太平洋沖地震津波による東北地方沿岸部や、2018年台風21号の高潮による大阪湾での被害、2019年台風15号の高潮による相模湾・東京湾での被害は記憶に新しい。これらの事例では何れも、その時点での既往観測最大波高を超える大きさの津波や高潮が襲来し、各地域に甚大な被害が発生した。今後の南海トラフ巨大地震および首都直下地震発生への切迫性や、気候変動に伴う台風強度の変化による高潮・高波への影響を考慮すると、このような沿岸災害に対して、海岸保全施設や事前避難計画、復旧・復興計画等を整備することが喫緊の課題となっている。このような沿岸災害に対しての事前対策や計画を整備するためにはまず、沿岸波高や、陸域での浸水深、浸水領域、流速等の津波や高潮の強度（ハザード）を、科学的知見に基づき事前に想定しておく必要がある。

2011年の東北地方太平洋沖地震以降、津波対策の基となる津波ハザード想定としては、発生頻度は極めて低いものの発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波（レベル2津波）と、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波（レベル1津波）の2つのレベルの津波高を考慮することが基本とされ、レベル2津波は千年に1度程度、レベル1津波は数十年から百数十年に1度程度発生する津波、と定義している。また、このレベル2津波を対象として、陸域の浸水想定区域図やハザードマップが作成され、住民避難のための情報として使用される。このレベル2津波による浸水想定区域図は、中央防災会議や自治体が各地域で最大の津波が襲来するような地震断層を想定し、数値計算を行うことにより算出している。対象となる地震断層は、基本的には過去の地震発生記録を基に、将来発生するおそれのある巨大地震を幾つか想定するが、ある限られたケース数のみ想定するのが現状である。しかしながら、例えある一つの地震断層を想定したとしても、実際には、そのすべり分布、すべり量、断層深さ、走行、傾斜角などが想定通りの地震が発生するとは限らず、現状では、その不確定性を適切に評価しているとは到底言えないため、不確定性を網羅的に考慮した確率論的浸水ハザード評価の手法を構築する必要がある。

国内外での確率論的津波ハザード評価に関する既往研究は、主に原子力安全分野を中心に発展し、米国や日本では、津波ハザード評価に関わる不確定性を認識論的不確定性と偶発的不確定性に分類して評価する、いわゆる、ロジックツリー手法が一般的に採用されてきた。東北地方太平洋沖地震津波後、原子力規制庁(2014)や地震調査研究推進本部(2020)等は同様な手法で、沿岸部での確率津波波高の評価手法を提案している。また、Goda et al. (2014, 2015)・Fukutani et al. (2015, 2018)などは、津波波源の滑り分布をランダムに生成し、沿岸波高および浸水深の不確定性を議論している。これら既往研究では、津波浸水深の発生確率分布は、数百・数千を超える多数の想定される地震断層を生成し、非線形長波方程式を解き、計算された浸水深を用いて評価することが通常である。しかしながら、浸水深の発生確率分布を得るために、これほど多数の非線形方程式を解法するには膨大な計算負荷が掛かり、実用に適さない。また例えば、一度、陸地や沿岸の地形、堤防の状況等の計算の諸条件が変化すれば、再評価する必要があるが、そのためにまた多大な計算負荷が必要となってしまう、実務的な手段とは言えない。Grezio et al. (2017)やGlimsdal (2019)らは、欧州沿岸を対象に、グリーン関数法を用いて比較的計算負荷を減らした浸水深の確率評価手法を提案しているが、効率的、かつ、物理的に妥当な津波浸水ハザードの確率論的評価手法は未だ研究途上であると言える。

2. 研究の目的

本研究では、多大な不確定性を有する陸域での津波の浸水深、浸水領域の発生確率分布について、その計算負荷を緩和するために、少数の数値解析結果を効率的に利用する確率論的津波浸水評価の枠組みを提案することを目的とした。本報告では、津波浸水深の不確定性に特に大きな影響を及ぼす波源の滑り分布のランダム性と地震・津波発生時の防潮堤高さの不確定性を考慮し、多数の浸水分布をモード分解することで、確率論的津波浸水評価を効率化した研究を報告する。解析結果を既往の物理モデルの結果と比較することで評価手法の妥当性検証を行い、最終的には、提案した枠組みを基に、地震の発生確率モデル（BPT分布）を考慮し、対象領域における浸水深の発生確率を評価する。

3. 研究の方法

以下の2項目に分けて研究手法を示す。

1. 津波浸水分布のモード分解結果を利用したランダムな津波波源滑り分布の解析数の削減

南海トラフ巨大地震断層の滑り分布をランダムに配置した津波波源として、Goda et al. (2016)による波源を用いた。モーメントマグニチュード（以下、Mw）9.0, 8.8, 8.6, 8.4, 8.2, 8.0の6ケース、各100個の断層を生成し、非線形長波方程式により対象地域の津波浸水深分布（計600ケース）を得た（図-1参照）。これら多数の浸水深の面的な分布を考慮した場合、想定地震断層の数を削減可能か検討するため、断層の数を50個、20個、10個と変更して得られた浸水分布に対して、特異値分解を適用して浸水分布をモード分解し、右特異ベクトルに乱数を当て

ることで、浸水分布を多数再生成し、生成した浸水分布と元の浸水分布の統計値を比較した。右特異ベクトルの生成方法として、標準正規乱数による手法と統計的拘束条件法の 2 つの手法を試行した。

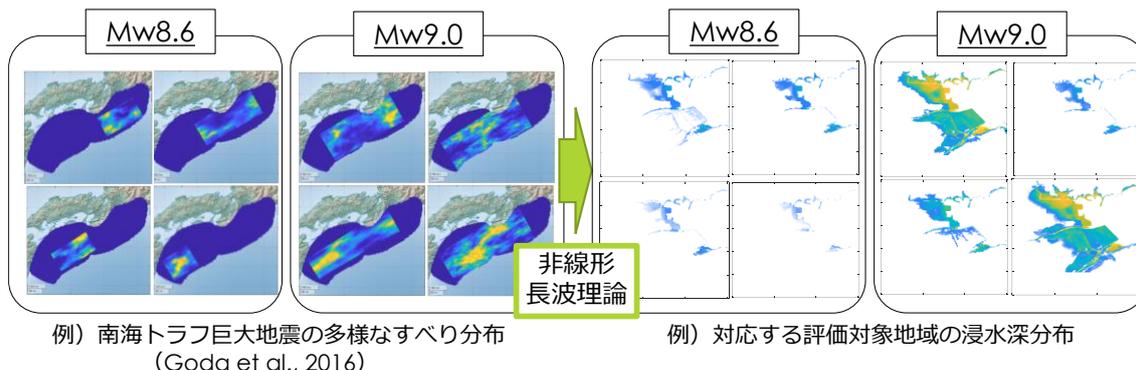


図-1 地震断層の多様な滑り分布から解析した津波浸水深分布の例

2. 防潮堤高さの不確定性を考慮した確率論的浸水評価

対象地域の沿岸に 10m の防潮堤を想定し、1. で選別した各 Mw20 個の浸水分布と防潮堤破壊の不確定性を考慮した浸水分布を評価した。まず、各計算結果に対して、10m、および、5m の高さの防潮堤を想定した浸水分布を計算した (図-2 参照)。防潮堤は沿岸部の標高を変更することで簡易的に設定した。地震動や液状化、津波による防潮堤破壊の不確定性を考慮するため、防潮堤の高さに確率密度を与えて評価する。具体的な手順として、非線形長波方程式により得られた浸水分布に対して、同様にモード分解による手法で多数の浸水分布を再生成する際、図-3 に示す防潮堤の高さ 0m-10m までの確率密度を設定する。図-3 (a) は各防潮堤の高さを等確率、図-3 (b) は 10m に確率密度の重きを置いた設定である。前者と比較して、後者は粘り強い堤防の設定を意味する。また、想定する南海トラフ巨大地震の発生確率として、発生確率が非定常な BPT 分布を適用した。分布の平均値は 88.2 年、分布のばらつきを表す α 値は 0.24 を設定して、1 年毎に地震の発生可否を判定し、今後 50 年分の計算を 1000 セット行うモンテカルロシミュレーションを実施し、確率論的に津波浸水分布を評価した。

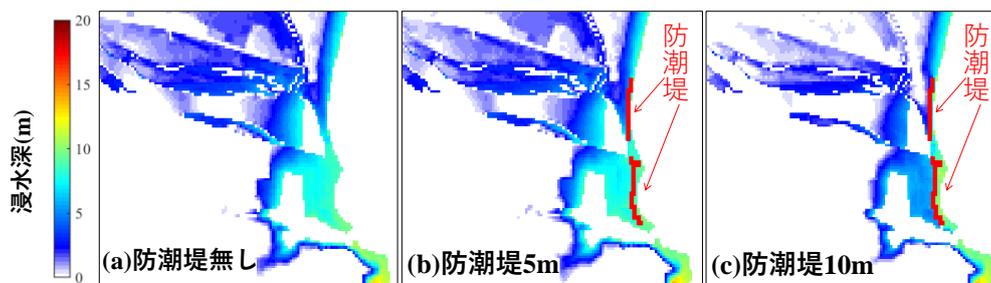


図-2 Mw8.8・case1 の (a)防潮堤無し、(b)防潮堤 5m 設置時、(c)防潮堤 10m 設置時の津波浸水分布 (m)

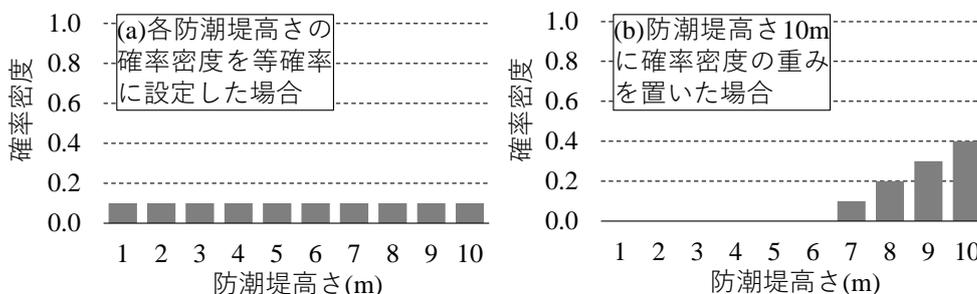


図-3 防潮堤の高さ毎の破堤確率の設定

4. 研究成果

以下の 2 つに分けて研究成果を示す。

1. 津波浸水分布のモード分解結果を利用したランダムな津波波源滑り分布の解析数の削減

図-4 に元の Mw9.0 の 100 個の断層による浸水分布の平均値と標準偏差、および、断層数を変更し、統計的拘束条件法を用いた右特異ベクトルの乱数生成により、浸水分布を 6,400 ケース生成した場合の浸水分布の平均値と標準偏差を示す。この結果より、断層数を 20 個にしても、元の 100 個の計算とほぼ変わらない結果を得られることが分かった。他の Mw での結果や 1 地点の詳細な解析でも概ね同様な結果を得た。これより、計算ケース数を 5 分の 1 と大幅に減らすこと

ができた。

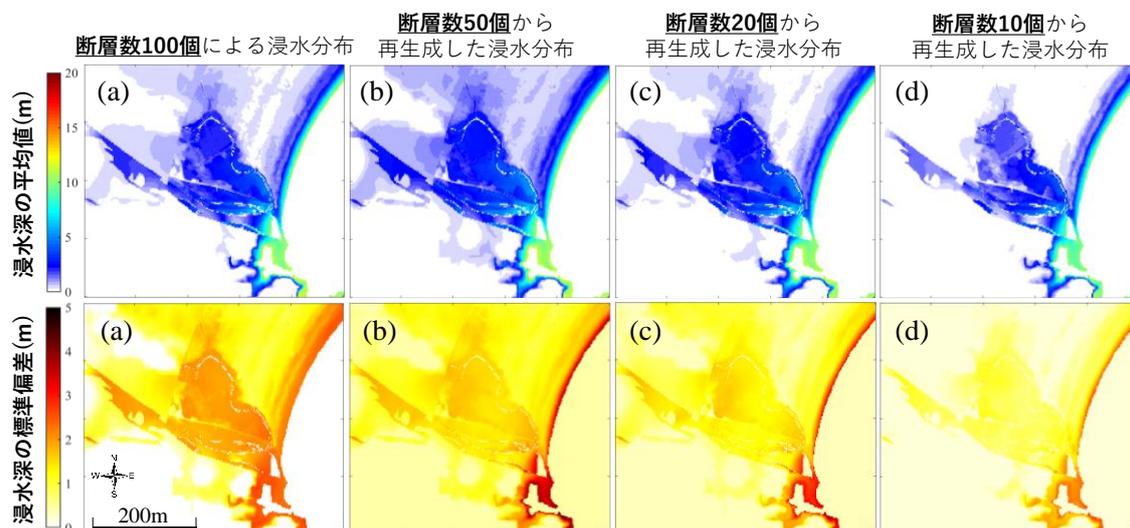


図-4 (a)元の断層数100個から計算したモード分解前の浸水分布、(b)-(d)各断層数から浸水モードを用いて再生成した浸水分布。(上段) 浸水深の平均値(m)、(下段) 浸水深の標準偏差(m)。

2. 防潮堤高さの不確定性を考慮した確率論的浸水評価

図-5 に、図-3 の防潮堤高さの確率密度を設定し、今後 50 年で浸水深が 1m 以上になる確率の平面分布の評価結果を示す。図-3 (b) の粘り強い堤防の設定とした場合、浸水領域が低減されていることが分かる。以上の通り、断層のランダムな滑り分布と防潮堤破壊の不確定性を考慮した確率論的津波浸水分布を効率的に生成し、評価することができた。

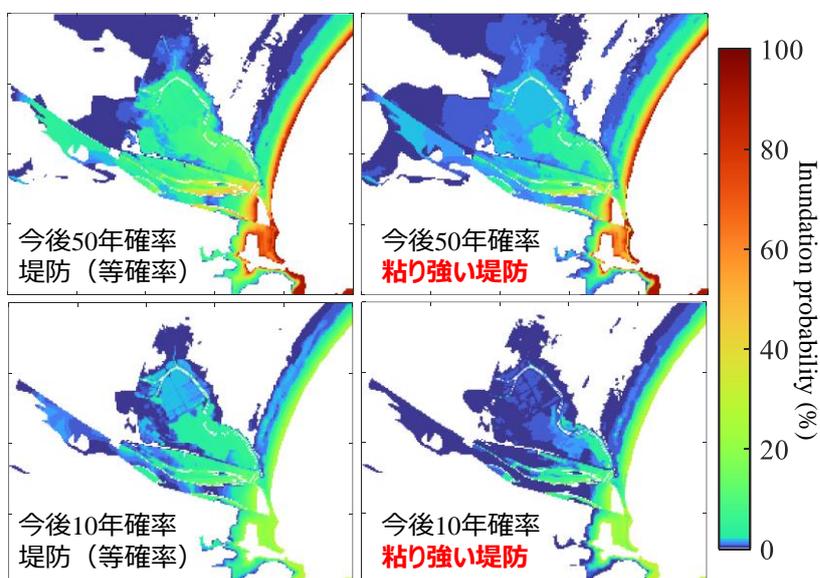


図-5 今後 50 年で浸水深が 1m 以上になる確率の分布。防潮堤高さの確率を、等確率、防潮堤高さ 10m に確率の重みを置いた場合 (粘り強い防潮堤) の結果

<参考文献>

- ① Yo Fukutani, Tomohiro Yasuda, Ryoichi Yamanaka (2023) Efficient probabilistic tsunami inundation prediction considering random tsunami sources and failure probability of seawalls, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol.37, pp.2053-2068. DOI:10.1007/s00477-023-02379-3
- ② 福谷陽, 安田誠宏, 山中亮一 (2022) 浸水分布のモード分解による確率論的津波浸水評価の効率化, 海岸工学論文集 Vol.78(2) 第1段階審査用原稿, 65.
- ③ Yo Fukutani (2021) Probabilistic tsunami inundation assessment for the maximum possible earthquake, the Sagami trough megathrust earthquake in Japan, Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, Paper No.C004492, pp1-11. 【Proceeding Paper】

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Fukutani Yo, Moriguchi Shuji, Terada Kenjiro, Otake Yu | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Time Dependent Probabilistic Tsunami Inundation Assessment Using Mode Decomposition to Assess Uncertainty for an Earthquake Scenario | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans | 6. 最初と最後の頁 e2021JC017250 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JC017250 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Fukutani Yo, Yasuda Tomohiro, Yamanaka Ryoichi | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Efficient probabilistic prediction of tsunami inundation considering random tsunami sources and the failure probability of seawalls | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Stochastic Environmental Research and Risk Assessment | 6. 最初と最後の頁 2053 ~ 2068 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00477-023-02379-3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yo Fukutani |
| 2. 発表標題 Probabilistic tsunami inundation assessment using mode decomposition method —A case study for Kamakura city— |
| 3. 学会等名 30th International Tsunami Symposium（国際学会） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yo Fukutani |
| 2. 発表標題 Probabilistic tsunami inundation assessment for the maximum possible earthquake |
| 3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering（国際学会） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 福谷陽 |
| 2. 発表標題 津波荷重評価に用いる水深係数のモード分解による空間的不確実性評価 |
| 3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）研究集会 陸上建物の津波荷重に関する研究の現状 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 福谷陽，安田誠宏，山中亮一 |
| 2. 発表標題 浸水分布のモード分解による確率論的津波浸水評価の効率化 |
| 3. 学会等名 土木学会第69回海岸工学講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |