

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15104

研究課題名（和文）複数の海底地すべりによる津波の増幅機構の解明とその予測手法の開発

研究課題名（英文）Investigation of the Amplification Mechanism of Tsunamis Generated by Multiple Landslides and Development of their Prediction Method

研究代表者

高畠 知行 (TAKABATAKE, Tomoyuki)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：30823380

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では複数の地すべり津波を対象とした水理実験および数値解析を行うことで、(1)地すべり津波は多くの場合、非線形波に分類されるため、重なり合った場合には単純な重ね合わせでは最大水位を正確に表現できないこと、(2)複数の地すべり津波を予測するためには、本研究で導出した単独の地すべり津波に対する最大水位の予測式に数%程度の安全率を加える、もしくは非線形性・分散性を考慮可能な数値解析モデルを用いる必要があること、(3)地すべり津波は地震発生後、即座に襲撃する恐れがあるため、地すべり津波に対する適切な避難計画の策定が必要であること、を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地すべりによって発生する津波のメカニズムを解明し、その最大高さを予測可能にすることは、社会と人命を守るために非常に重要である。本研究では、地すべり津波を対象として水理実験と数値解析を行い、地すべり津波のメカニズムを分析するとともに、その高さを予測する手法を開発した。また、地すべりが複数発生した場合にも津波高さを予測する手法についても考察し提案した。さらに、地すべり津波から有効に避難を行うためには、通常の地震津波による避難計画に加えて、地すべり津波に対応した避難計画の策定が必要であることを示した。

研究成果の概要（英文）：In the present study, I performed hydrodynamic experiments and numerical simulations targeting multiple landslide-generated tsunamis. As a result, the present study revealed that: (1) landslide-generated tsunamis, being predominantly classified as nonlinear waves, cannot be accurately represented by a simple superposition when overlapping, for the maximum water level; (2) to predict the height of the multiple landslide-generated tsunamis, it is necessary to add a safety margin of several percent to the prediction equations for the maximum water level of a single landslide-generated tsunamis, derived in the present study, or to use a numerical simulation model that can consider both nonlinearity and dispersion effects; (3) as landslide-generated tsunamis could potentially strike immediately after an earthquake occurs, it is necessary to formulate appropriate evacuation plans against landslide-generated tsunamis.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波 地すべり津波 地すべり 非線形性 簡易予測式 津波避難シミュレーション 津波避難

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2018年9月、インドネシア・スラウェシ島の沿岸都市パルにて、マグニチュード7.5の地震とそれに伴う津波が来襲し、2,000人以上の方が死亡または行方不明となる被害が発生した。一方、パル地震を発生させたと言われる震源断層は「横ずれ」であることが確認されており、一般に大きな津波を引き起こす「縦ずれタイプ」の地震ではない。実際に、同津波の発生後、公表されている断層パラメータを用いて津波の伝播計算を行ったところ、津波が来襲したパルにおいては、高々50cm程度の津波しか到達していないことが確認された。また、様々な研究機関が実施した災害後の現地調査によれば、同津波は地すべり津波によって発生したことが明らかとなった。さらに、過去に地すべりによって引き起こされた津波（例えば、1998年パプアニューギニア島地震津波）とは異なり、パル湾に来襲した津波は、一つの大規模な地すべりによって発生したのではなく、複数かつ様々な形態の地すべり（陸上地すべり、半没水地すべり、海底地すべり）によって発生し、それが湾内で重合・増幅した可能性が高いことも現地調査より明らかになった。このような複数の地すべりによって津波が生成され、海域で重合・増幅した例は極めて稀で、その機構も未解明である。そのため、こうした津波による水位変化を予測する手法や、人々をどのように避難させるかといった検討はほとんど行われていないのが現状である。我が国にも駿河湾など地すべり津波が発生する恐れがある海域が複数存在している。パルの教訓を活かし、将来の津波被害を低減するためには、こうした津波の増幅機構の解明や予測手法、避難方法の確立をすることが重要である。そこで本研究では、(1) 複数の地すべりの発生により、津波がどのように増幅するか？ (2) そしてそれを予測し、人々の命を守るためにはどうすればよいか？ の2つを学術的問いとして設定した。

### 2. 研究の目的

2018年インドネシア・スラウェシ島の湾岸都市パルを襲った地すべり津波の被害を踏まえ、本研究では、(1) 複数の地すべりの発生に伴う津波の増幅機構を解明すること、(2) 複数の地すべりによる津波の水位を予測する手法を確立すること、(3) 地すべり津波に対して有効な避難方法を提案すること、の3つを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 地すべり津波を対象とした水理実験

早稲田大学内の2次元水槽および3次元平面水槽を用いて、地すべり津波を対象とした水理実験を実施した。研究開始当初は、複数の地すべり津波のみを対象とした実験を行う予定であったが、既往研究を更に精査した結果、想定以上に単独の地すべり津波に対する知見も少ないことがわかった。特に、地すべり土塊の初期位置が水面より高い位置にある陸上地すべり、水面より低い位置にある海底地すべり、水面に接した位置にある半没水地すべりの3つの形態の全てを対象に地すべり津波の実験を行い、知見を体系的に整理した研究は見当たらないことがわかった。2018年のパル津波では、これら3つ全ての形態の地すべり津波が発生したことを踏まえ、本研究ではまずこれら3つの形態の地すべり津波を対象とした網羅的な水理実験を行い、その後複数の地すべり津波を対象とした実験を行うこととした。

まず、2次元水槽を用いた断面2次元の水理実験を実施した。図1に実験のセットアップを示す。地すべりは、ガラスビーズ（比重2.5）を斜面に設置したゲート背後に集積し、ゲートを急開させることで発生させた。斜面角度（ $\alpha$ ）、ゲートの設置高さ（ $h_i$ ）、初期水深（ $h$ ）、ビーズ粒径（ $d$ ）、ビーズ重量（ $m$ ）をパラメータとし、合計261ケースの実験を行った。水槽内の4か所（WG1～WG4）に容量式波高計を設置し、水位変化を計測するとともに、WG3の位置に電磁流速計を設置し流速も計測した。また、いくつかのケースについてはWG3付近で流況を高速カメラにより撮影し、PIV解析を行った。単独の地すべりを対象とした実験は図1の左側斜面から、複数の地すべりを対象とした実験は両側の斜面から地すべりを生成させた。

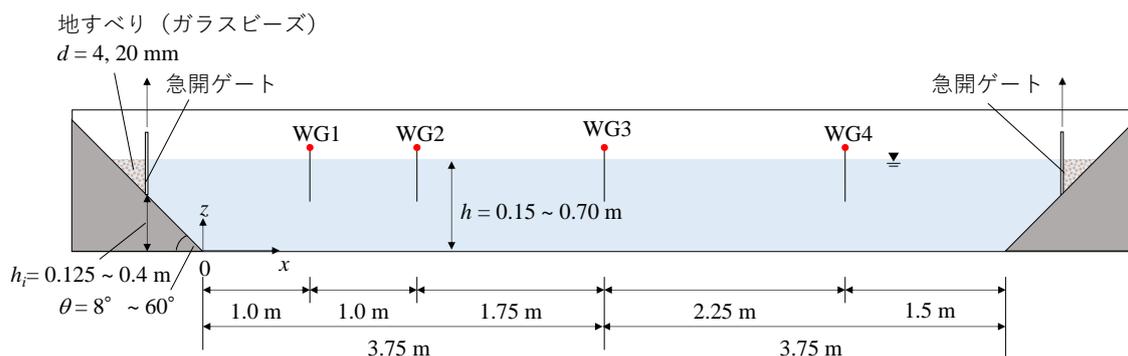


図1 実験セットアップ (2次元水槽実験)

図 2 に 3 次元平面水槽による水理実験の実験セットアップを示す。2 次元水槽実験の時と同様に地すべりは、ガラスビーズと急開ゲートを用いて生成した。実験パラメータは、斜面角度 ( $\alpha$ )、ゲートの設置高さ ( $h_i$ )、初期水深 ( $h$ )、ビーズ重量 ( $m$ ) とし、合計 114 ケースの実験を行った。計測項目は水位時系列とし、平面水槽内の合計 12 点 (WG1 ~ WG12) に設置した容量式波高計を用いて計測した。

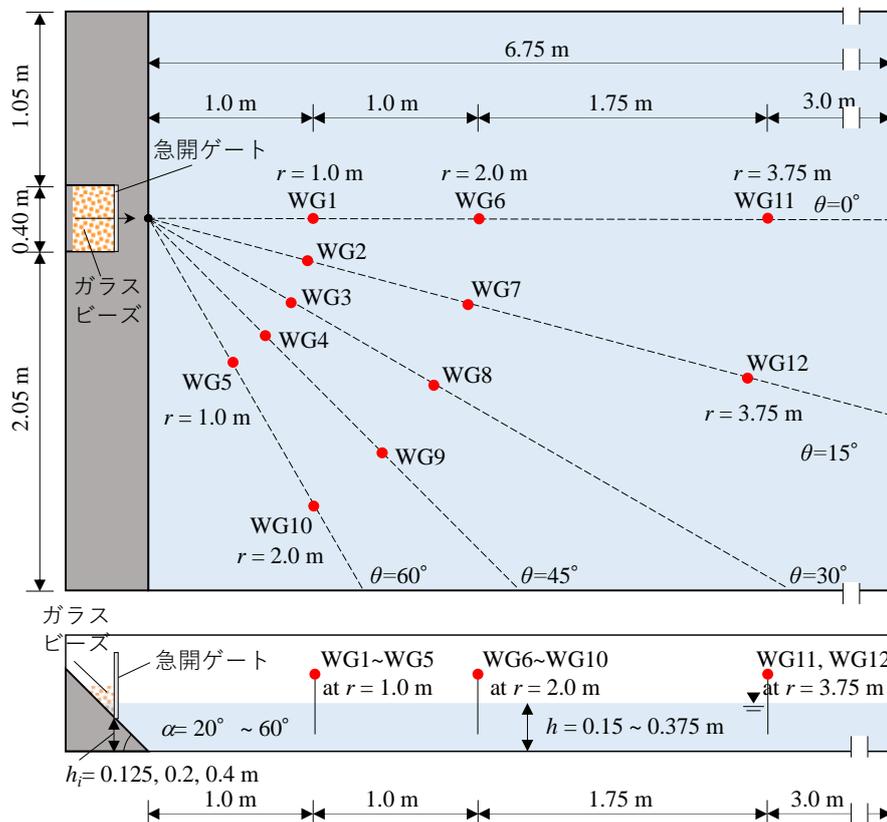


図 2 実験セットアップ (3 次元平面水槽実験)

## (2) 地すべり津波を対象とした数値解析

3 次元数値流体解析ツール OpenFOAM を用いて地すべり津波を対象とした水理実験の再現解析を行った。格子間隔は 2cm とし、斜面部は OpenFOAM のメッシュ生成機能 (snappyHexMesh) を用いて非構造格子により再現した。解析ソルバとしては、多相流体の流体運動を対象とした multiphaseInterFoam を用いた。地すべり塊 (ガラスビーズ) は空隙率を 0.35、動粘性係数を  $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  と設定することで再現した。本研究では、単独の地すべり津波を対象とした実験の再現解析をまず行い、精度検証をしたうえで、複数の地すべり津波を対象とした解析を行った。

また、2018 年パル湾で発生した複数の地すべり津波を対象とした再現解析も実施した。地すべりによる津波の生成過程の再現には Grilli と Watts (2003) および Watts ら (2005) の手法を採用し、津波の伝播過程の計算には波の非線形と分散性を考慮可能な数値解析プログラム FUNWAVE を用いた。

## (3) 地すべり津波を対象とした避難解析

まず、実際の地すべり津波を対象として被災者の避難行動を質問紙調査により分析した。具体的には、2018 年パル津波の被災者に対して避難行動に関する質問紙調査を実施した。その上で、2018 年のパル津波を対象として津波避難シミュレーションを実施した。津波避難シミュレーションモデルは、研究代表者がこれまでに開発したものを改良した。具体的には、車を用いた避難行動や建物倒壊によって生じる道路閉塞を考慮できるように改良した。

## 4. 研究成果

### (1) 地すべり津波を対象とした水理実験

水位時系列の実験結果から、地すべり津波の特性を分析した。その結果、例えば、陸上地すべり津波は第 1 波の方が第 2 波よりも大きいものに対し、海底地すべり津波は第 2 波の方が大きいこと、伝播速度はソリトン波の伝播速度と概ね一致することなどがわかった。また、生成された地すべり津波は沖合への伝播過程で分散し、第 1 波の波高は伝播に従いが減少するが、周期は増大することもわかった。地すべり津波の重合の効果について分析するため、2 次元および 3 次元実験を通じて得られた地すべり津波の第 1 波を周期波と仮定し、波動理論の分類図と比較した (図 3)。図 3(a) に示す通り、海底地すべり津波は線形波に分類されるが、陸上地すべり津波・半没水地すべり津波の場合は、多くの場合、非線形波に分類されることがわかった。また、3 次元実験の結果 (図 3(b)) を見ると、全ての生成波が非線形波に分類されることがわかった。このことは、複数の地すべり津波が重合する場合、その高さは単純に重ね合わせるだけでは再現できないことを示している。実際に、複数の地すべり津波を実験により発生させ、単独の地すべり津波を生成した場合の最大水位と比較すると、単純に単独の地すべり津波による最大水位を 2 倍するだけでは複数の地すべり津波による最大水位を再現できないことが確認された。

地すべり津波によって生成される最大水位を予測するため、実験結果から多変量回帰分析を

行い、簡易予測式の導出も行った。3次元実験を元に算出した半没水地すべり津波の予測式による予測結果と実験結果の比較を図4(a)に、既往の実験結果(藤井ら, 2018)と比較した結果を図4(b)に示す。同図から、予測式は研究代表者らの実験結果だけでなく、既往の実験結果(藤井ら, 2018)も良好に再現できることが確認された。同式を用いることで、地すべりによる津波の大きさを概略的に知ることができ、数値解析により詳細に検討すべき地すべりを複数候補の中から選定する際に役立つと考えられる(導出した予測式の詳細については、発表論文[Takabatake et al. 2020 ; Takabatake et al. 2022]を参照されたい)。

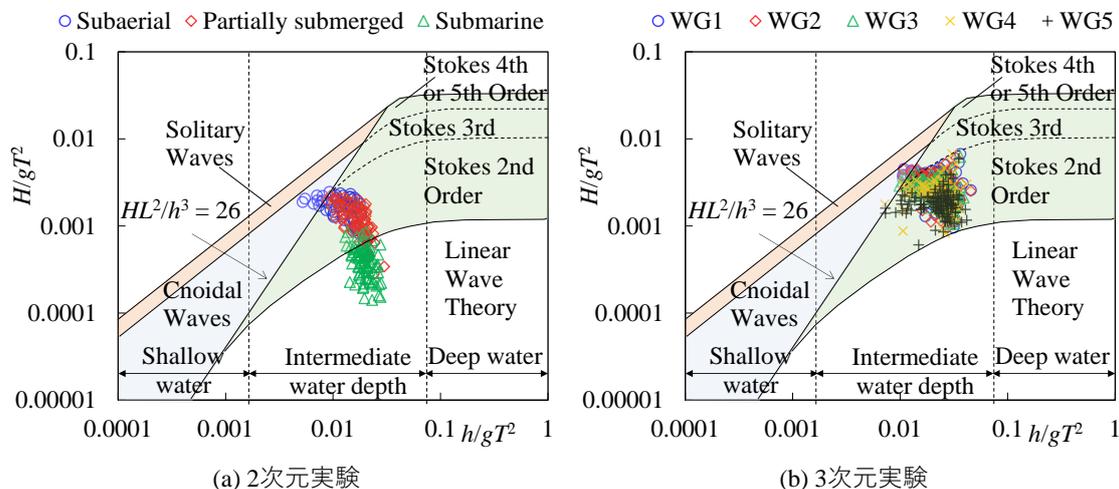


図3 実験により生成された第1波と波動理論の分類図との比較

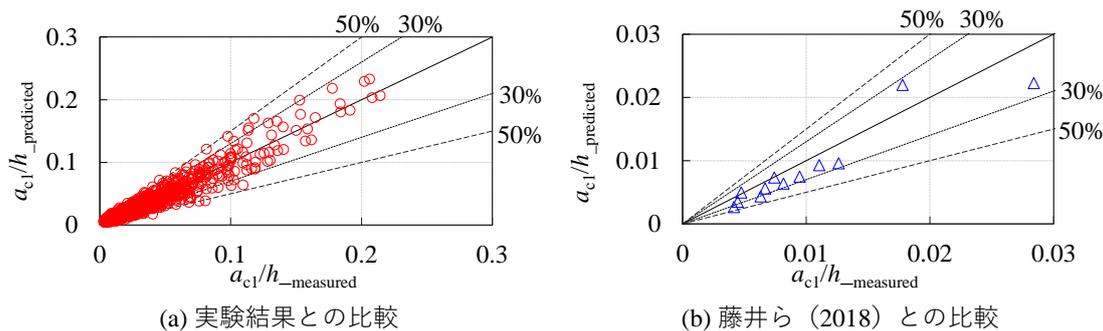


図4 導出した予測式と (a) 実験結果および(b)藤井ら (2018) との比較

### (2) 地すべり津波を対象とした数値解析

OpenFOAMを用いて、地すべり津波実験の再現解析を行った結果を図5に示す。第2波の再現性にやや課題はあるものの、第1波の再現性はいずれの地点でも良好であることが確かめられた。複数の地すべり津波を対象に解析した結果を図6に示す。図6(a)は2次元水槽の中間地点において、水槽両端から造波した場合(Both sides)と片側から(左側および右側)のみ造波した場合(Left side, Right side)の水位時系列を比較したものである。片側からのみ造波した場合は、左側も右側も中間地点では同様の水位変化となる一方、両端から造波した場合は明確に水位変動が大きくなることが確認できる。また、最大水位に着目すると、第1波の大きさは単独で造波した場合の水位を2倍するよりも約3%、第2波は約12%大きくなることがわかった。したがって、複数の地すべり津波の発生が予想される場合には、前述の単独の地すべり津波を対象とした予測式を使って算出した最大水位を単純に足し合わせるのではなく、数%程度の安全率を加味して最大水位を推定することが必要であると考えられる。また、パル津波の再現解析を行った結果、非線形性と分散性を考慮可能な数値解析モデルを用いれば、津波の最大水位を概ね再現できることもわかった。このことは、適切な数値解析モデルを用いることでも、複数の地すべり津波による最大水位を予測できることを示唆している。

### (3) 地すべり津波を対象とした避難解析

実施した質問紙調査の結果を分析すると、パル津波の場合、地震発生後に避難を決意した被災者が約50%、津波の来襲が明らかになった時点で避難を開始していた被災者が約90%以上になることがわかった。過去の地震津波では、津波の来襲が明らかになったにも関わらず、情報収集や家族の安否確認といった避難行動以外の行動を取る被災者が多く見られたことを考えると、今回

の津波では比較的迅速に避難行動を開始した避難者が多かったと考えられる。それにも関わらず大規模な被害が発生したのは、地震発生から数分以内で津波が来襲したため、被災者が避難を完了することができなかつたためであると推察できる。実際に、被害が発生したパル西部を対象に避難シミュレーションを実施したところ、地震発生直後に避難行動を開始したにも関わらず、半数以上の避難対象者が10分以内には避難が完了できないという結果が得られた。地すべり津波は陸地に近い場所で発生し、その到達時間が短い傾向があるため、避難ビルの増設など、地すべり津波に対する新たな避難方策の検討が必要であることが示唆された。加えて、質問紙調査の結果から、約62%の被災者が避難時に道路混雑に遭遇していたこともわかった。そのため、避難行動の迅速な完了を実現するためには、道路幅の拡幅や使用する避難路の選定などを事前に計画しておく必要もあると考えられる。

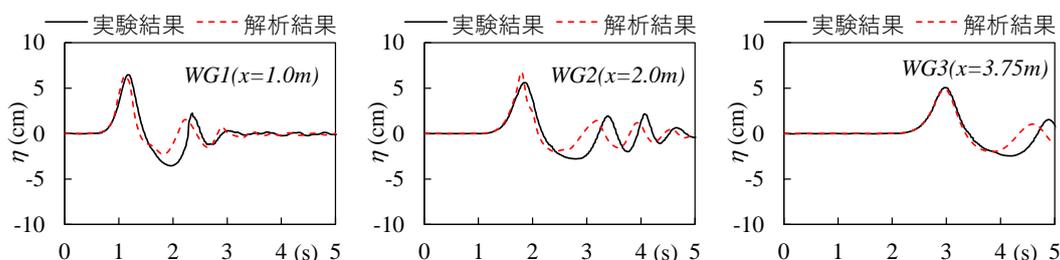


図5 OpenFOAMによる再現解析結果と実験結果の比較

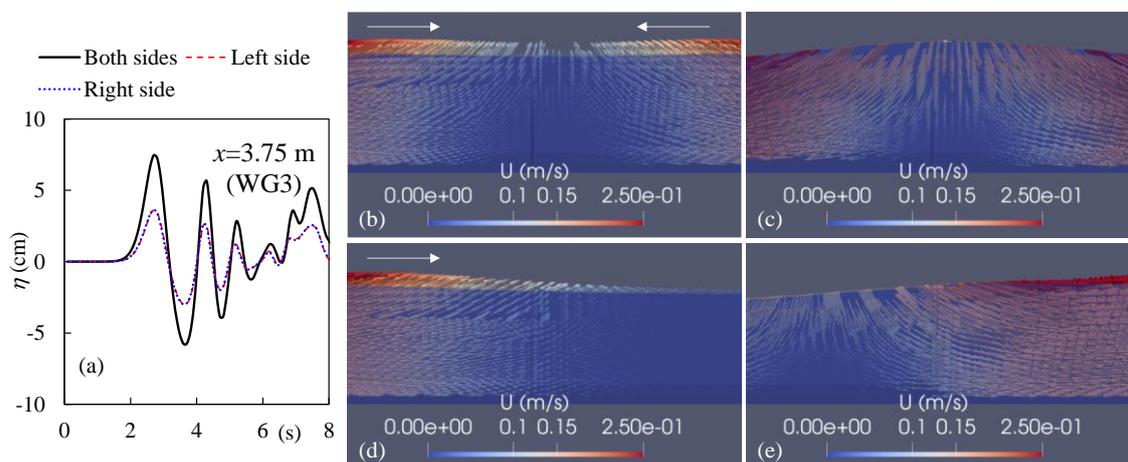


図6 (a)水槽両端から造波した場合と片側からのみ造波した場合の水位時系列の比較, (b) (c) 両端から生成した津波が重なり合う直前・直後の流速分布, (d) (e) 同一時刻における片側からのみ造波した場合の流速分布

以上の成果をまとめると、本研究を通じ、(1)地すべり津波は多くの場合、非線形波に分類されるため、重なり合った場合には単純な重ね合わせでは最大水位を正確に表現できないこと、(2)複数の地すべり津波を予測するためには、本研究で導出した単独の地すべり津波に対する最大水位の予測式に数%程度の安全率を加える、もしくは非線形性・分散性を考慮可能な数値解析モデルを用いる必要があること、(3)地すべり津波は地震発生後、即座に来襲する恐れがあるため、地すべり津波に対する適切な避難計画の策定が必要であること、が明らかになった。

#### 参考文献

- 藤井ら (2018) : 地すべりによる津波の平面水槽を用いた水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I\_145-I\_150.
- Grilli, S. T., and P. Watts. (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analyses. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, 131(6), 283-297.
- Takabatake, T., et al. (2020): Physical Modeling of Tsunamis Generated by Subaerial, Partially Submerged, and Submarine Landslides., *Coast. Eng. J.*, 62(4), 582-601.
- Takabatake, T., et al. (2022): Three-Dimensional Physical Modelling of Tsunamis Generated by Partially Submerged Landslides., *JGR:Oceans*, 127(1), e2021JC017826.
- Watts, P., et al. (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies., *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, 131(6), 298-310.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Kim Joseph, Takabatake Tomoyuki, Nistor Ioan, Shibayama Tomoya   | 4. 巻<br>49                    |
| 2. 論文標題<br>A comparison between agent-based and GIS-based tsunami evacuation simulations: a case study for Tofino, BC              | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Canadian Journal of Civil Engineering  | 6. 最初と最後の頁<br>511 ~ 526       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1139/cjce-2020-0660   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Takabatake Tomoyuki, Chenxi Dawn Han, Esteban Miguel, Shibayama Tomoya   | 4. 巻<br>68                    |
| 2. 論文標題<br>Influence of road blockage on tsunami evacuation: A comparative study of three different coastal cities in Japan        | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Disaster Risk Reduction   | 6. 最初と最後の頁<br>102684 ~ 102684 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ijdrr.2021.102684  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Takabatake Tomoyuki, Han Dawn Chenxi, Valdez Justin Joseph, Inagaki Naoto, M?ll Martin, Esteban Miguel, Shibayama Tomoya | 4. 巻<br>127                   |
| 2. 論文標題<br>Three Dimensional Physical Modeling of Tsunamis Generated by Partially Submerged Landslides                             | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Oceans  | 6. 最初と最後の頁<br>1 ~ 17          |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2021JC017826   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Takabatake Tomoyuki, Mall Martin, Han Dawn Chenxi, Inagaki Naoto, Kiszaki Daichi, Esteban Miguel, Shibayama Tomoya       | 4. 巻<br>62                    |
| 2. 論文標題<br>Physical modeling of tsunamis generated by subaerial, partially submerged, and submarine landslides                     | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Coastal Engineering Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>582 ~ 601       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1080/21664250.2020.1824329  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Aranguiz Rafael, Esteban Miguel, Takagi Hiroshi, Mikami Takahito, Takabatake Tomoyuki, Gomez Matias, Gonzalez Juan, Shibayama Tomoya, Okuwaki Ryo, Yagi Yuji, Shimizu Kousuke, Achiari Hendra, Stolle Jacob, Robertson Ian, Ohira Koichiro, Nakamura Ryota, Nishida Yuta, Krautwald Clemens, Goseberg Nils, Nistor Ioan | 4. 巻<br>62              |
| 2. 論文標題<br>The 2018 Sulawesi tsunami in Palu city as a result of several landslides and coseismic tsunamis  | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Coastal Engineering Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>445 ~ 459 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1080/21664250.2020.1780719   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する            |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Takabatake Tomoyuki, Shibayama Tomoya  | 4. 巻<br>7             |
| 2. 論文標題<br>Improving the Evacuation Plan of Coastal Communities using Tsunami Evacuation Simulations: Case Study from Tagajyo, Japan | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>International Journal Sustainable Future for Human Security  | 6. 最初と最後の頁<br>25 ~ 35 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Harnantyar Anisa Shafiyi, Takabatake Tomoyuki, Esteban Miguel, Valenzuela Paolo, Nishida Yuta, Shibayama Tomoya, Achiari Hendra, Rusli, Marzuki Abdul Gafur, Marzuki Muhammad Fadel Hidayat, Aranguiz Rafael, Kyaw Thit Oo | 4. 巻<br>43                    |
| 2. 論文標題<br>Tsunami awareness and evacuation behaviour during the 2018 Sulawesi Earthquake tsunami  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Disaster Risk Reduction   | 6. 最初と最後の頁<br>101389 ~ 101389 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ijdr.2019.101389   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                  |

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Takabatake, T.; Han, D. C.; Esteban, M.; Shibayama, T.              |
| 2. 発表標題<br>Three-dimensional physical modeling of landslide-generated tsunamis |
| 3. 学会等名<br>38th International Conference on Coastal Engineering (ICCE) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>高島知行; Dawn Chenxi Han; Miguel Esteban; 柴山知也 |
| 2. 発表標題<br>道路閉塞が津波避難に及ぼす影響の分析 鎌倉市・逗子市・藤沢市を対象として        |
| 3. 学会等名<br>第69回海岸工学講演会                                 |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>高島知行・Dawn Han Chenxi・Valdez Justin Joseph Panlilio・稲垣直人・澤辺大輔・Zhang Tingyu・木場隆文・Zhao Bingchan・Mall Martin・Miguel Esteban・柴山知也 |
| 2. 発表標題<br>地すべり津波を対象とした平面水槽による水理模型実験  |
| 3. 学会等名<br>第68回海岸工学講演会  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>高島知行・岸崎大知  |
| 2. 発表標題<br>Experimental Analysis on Landslide Generated Tsunamis            |
| 3. 学会等名<br>31st International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>高島知行                        |
| 2. 発表標題<br>陸上・半没水・海底地すべり津波を対象とした水理模型実験 |
| 3. 学会等名<br>第67回海岸工学講演会                 |
| 4. 発表年<br>2020年                        |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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              |  |  |  |
|---------|----------------------|--|--|--|
| チリ      | UCSC                 |  |  |  |
| カナダ     | University of Ottawa |  |  |  |