

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04274

研究課題名（和文）ハイブリッド津波移動床・瓦礫移動モデルの開発とインフラ網断絶リスクマップの提案

研究課題名（英文）Development of a Hybrid Tsunami Movable Bed and Debris Movement Model and Proposal for an Infrastructure Network Disconnection Risk Map

研究代表者

梶川 勇樹 (Kajikawa, Yuki)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70432606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、津波防災・減災対策に資するため、津波移動床モデルおよび瓦礫輸送を統合した新たな解析モデルを開発するとともに、現地規模を対象とした本解析モデルによる土砂・瓦礫の集積予測から「インフラ網断絶リスクマップ」の提案を目的とした。まず、遡上津波による陸域での津波堆積物の形成および円柱周りの局所洗掘現象を精度よく再現できる二次元（2D）解析モデルを開発した。次に、津波による地形変化と瓦礫輸送を同時に解析できるモデルを開発し、数値実験から地形変化が瓦礫輸送に及ぼす影響を解明した。最後に、現地規模を対象とした解析を実施し、本モデルによる解析結果からリスクマップとして表現できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、津波による土砂移動（地形変化）予測および瓦礫の輸送・集積予測はそれぞれ個別に研究が進められてきた。本研究では、それらを同時に予測できる解析モデルの開発に成功し、さらには地形変化が瓦礫輸送に与える影響を明らかにした。この点が本研究の学術的意義と考えている。また、津波の防災・減災対策では、津波本体による人や物への直接的な被害に着目されてきたが、本研究で開発した解析モデルの利用により、津波による直接的な被害だけでなく、土砂・瓦礫の堆積・集積によるインフラ網の断絶という間接的な被害予測が可能となる道筋も示せた。この点が本研究の社会的意義と考えている。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study were to develop a new analytical model that integrates a tsunami movable bed model and debris transport, and to propose a “Infrastructure Network Disconnection Risk Map” based on the prediction of sediment and debris accumulation by this analytical model on a real-scale, in order to contribute to tsunami disaster prevention and mitigation measures. First, a two-dimensional analytical model was developed to accurately reproduce the formation of tsunami deposits on land and local scour around a cylinder caused by a tsunami run-up. Next, a model that can simultaneously analyze topographic change and debris transport due to tsunami was developed, and the effects of topographic change on debris transport were elucidated from numerical experiments. Finally, the analysis was performed for the real-scale, and the results of the analysis using this model showed the possibility of expressing the results as the risk map.

研究分野：河川工学，海岸工学

キーワード：津波 地形変化 土砂輸送 瓦礫輸送 数値解析

1. 研究開始当初の背景

津波による被害では、津波本体による人や物への直接的な被害のみならず、土砂や瓦礫の輸送・集積に伴う港湾施設の損壊や航路泊地の埋没、陸域での交通網の寸断など、救助活動および復興・復旧活動の妨げとなる間接的な被害も発生する。したがって、津波に対する防災・減災対策を講じる上では、襲来する津波規模等の予測のみならず、津波による土砂および瓦礫の移動に伴うインフラ網の断絶リスクも事前に評価しておくことが極めて重要である。

従来、津波による土砂輸送（地形変化）の予測に関して数多くの研究が行われてきた。特に、平面2次元解析（2D）は広域の地形変化をある程度の精度で予測可能であり、既に実用レベルにまで発展している。しかしながら、2Dでは局所的な当該現象の予測が難しく、そのような場には3次元解析（3D）の適用が望ましいものの、広域を含めた3Dの適用には課題がある。

一方、津波による瓦礫の移動予測についても精力的に研究が行われており、現地規模での瓦礫輸送解析や津波火災の発生・延焼を含めた予測モデルも提案されている。しかしながら、現在までに、土砂輸送（地形変化）と瓦礫移動の相互作用を考慮した解析モデルは提案されていない。

以上のように、津波の防災・減災対策を講じる上では、土砂および瓦礫移動に伴うインフラ網の断絶リスクを事前に評価しておくことが重要であるものの、広域の土砂・瓦礫移動を同時にかつ高精度に予測できる解析モデルは提案されておらず、更に、解析結果を災害リスクとして定量的かつ効果的に表示する手法も提示されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、津波災害の防災・減災対策に資するため、広域かつ高精度の土砂・瓦礫移動予測を目指し、2D領域に3D領域を埋め込んだハイブリッド津波移動床モデルの開発、およびその移動床モデルに瓦礫の発生・移動・集積予測を統合した新たな解析モデルを開発するとともに、津波による地形変化が瓦礫の輸送・集積に及ぼす影響を数値実験により解明し、更に実地形を対象としたシナリオ解析から「インフラ網断絶リスクマップ」を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では上記の研究目的を達成するため、以下の（1）から（4）について検討を進めた。

（1）遡上津波による陸域での津波堆積物形成の予測精度向上

津波移動床モデルの作成を進める上で、遡上津波による海域（移動床）から陸域（固定床）への土砂輸送・土砂堆積の再現性向上が課題であった。そこで、移動床と固定床とが混在する場での土砂輸送を高精度に予測できる手法として、従来河川分野で用いられてきた掃流砂層モデル¹⁾を修正し、新たな掃流砂層モデルを開発した。具体的には、固定床上の土砂量に応じて非線形に流砂量を修正するとともに、平衡掃流砂層厚も変化させる手法である。

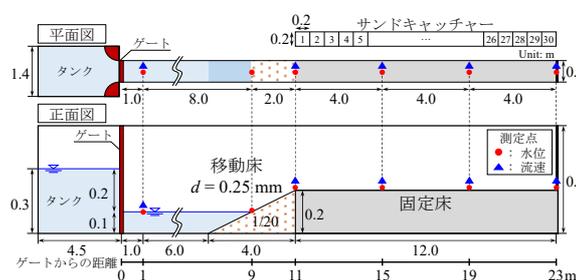


図-1 津波堆積物形成に関する水路実験²⁾

開発したモデルを図-1 に示す水路実験²⁾に

適用した。移動床部に中央粒径 $d = 0.25 \text{ mm}$ の砂を敷詰め、ゲートを急開することで津波を発生させている。流況が落ち着いた後、固定床部の水路中央縦断を対象に 0.2 m 四方枠を連結したサンドキャッチャーにより堆積土砂を捕捉し、各枠内の土砂質量が測定されている。

（2）2Dによる局所洗掘解析の予測精度向上

2D-3Dハイブリッドモデルであっても地形変化まで加えた際の計算負荷がネックとなったため、新たな方向性として、2Dの枠組みで局所洗掘現象を再現できる手法の導入を試みた。具体的には、構造物周辺での水面勾配および水深平均流れの流線の曲率を考慮して底面せん断力を増加させる手法³⁾である。

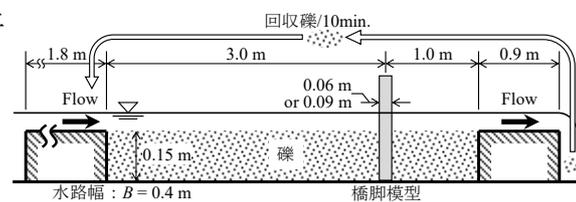


図-2 円柱周りの局所洗掘現象に関する水路実験

開発したモデルを図-2 に示す円柱周りの局所洗掘現象に関する水路実験に適用した。実験では流量を $0.0165 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定とし、移動床には平均粒径 $d = 5.21 \text{ mm}$ の礫を敷き詰めた。橋脚直径 D を 0.06 m と 0.09 m の2種類、水路勾配 I を $1/50$ 、 $1/75$ 、および $1/100$ の3種類として、これらを系統的に変化させた。フルード数は $Fr = 0.92 \sim 1.21$ の範囲であった。通水時間は、水路勾配 $I = 1/50$ および $I = 1/75$ の場合では90分、 $I = 1/100$ では120分とした。

（3）津波による地形変化が瓦礫の輸送・集積に及ぼす影響の解明

津波の土砂輸送に伴う地形変化が瓦礫の輸送・集積状況に及ぼす影響を明らかにするため、両者を考慮した数値解析モデルを開発するとともに、津波襲来時における港湾内および遡上域周

辺での当該現象を対象とした数値解析的検討を行った。モデルでは瓦礫を粒子として捉え、個別要素法を用いてその粒子の運動を追跡することで瓦礫輸送を表現した。瓦礫の運動方程式には、一般的に瓦礫に作用する外力として考慮される種々の力に加え、津波波形の水面勾配による重力の影響を付加した。

開発したモデルを図-3 および図-4 の水理実験にそれぞれ適用した。図-3 の実験⁴⁾では、周期 60 秒の半周期分、片振幅 0.06 m の津波条件で、中央粒径 $d = 0.08 \text{ mm}$ の砂を用いた移動床実験が行われた。瓦礫は港湾内に 670 個の木片 (7.5 cm 角, $s = 0.6$) を配置した。図-4 の実験⁵⁾では、長さ 135 m, 幅 2 m, 深さ 5 m の大型水路が使用され、勾配 1/20 の斜面中央部に直径 0.5 m の円柱を設置して孤立波を作用させている。本研究では水深 2.45 m, 波高 0.22 m の条件を対象とした。また、瓦礫の初期配置として、504 個の木片 (4.0 cm 角, $s = 0.6$) を沖側、水際 (水域), および水際 (陸域) と変化させて配置した。

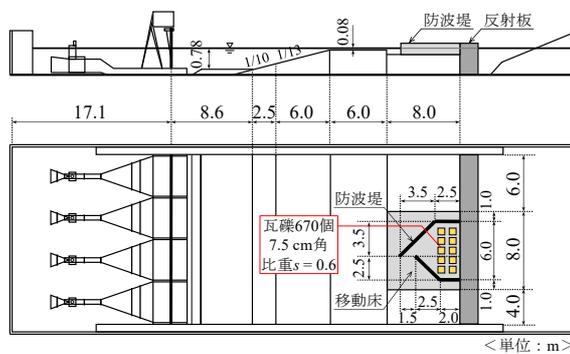


図-3 港湾模型を有する平面水槽実験⁴⁾

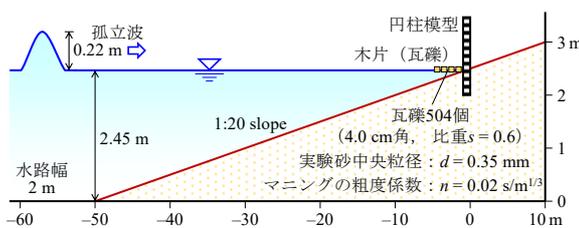


図-4 一様斜面上に円柱を有する水路実験⁵⁾

(4) 現地規模への適用とリスクマップ化

鳥取県東部に位置する浦富地区の田後港を対象に、本モデルの適用を試みた。図-5 に(a)計算領域の全体図、および(b)瓦礫 (船舶・車) 配置図をそれぞれ示す。海底砂粒径は $d = 0.20 \text{ mm}$ とし、対象津波は鳥取県沖の F55 断層 (長さ 51 km, 幅 15 km, 断層深さ 15 km, 想定地震規模 Mw 7.30) による津波を想定した。

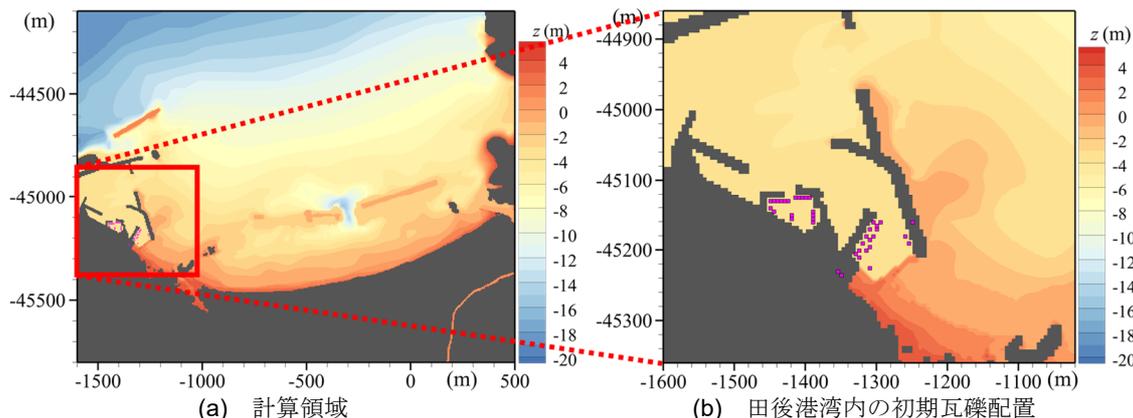


図-5 鳥取県浦富地区を対象とした F55 断層津波による土砂・瓦礫輸送解析

4. 研究成果

(1) 遡上津波による陸域での津波堆積物形成の予測精度向上

図-6 は(a)平衡掃流砂層厚 E_{se} を変化させた検討、および(b)流砂量の補正にかかる係数 γ_b の非線形性を考慮した検討に関する結果をそれぞれ示している。横軸は図-1 に示されるゲートからの距離であり、縦軸は各ポイント (区間) での堆積土砂量である。

(a)より、平衡掃流砂層厚 E_{se} が大きくなるほど土砂の移動が抑えられ、 $\alpha = 3$ のとき堆積のピーク位置が概ね実験値を一致した。また(b)より、流砂量の補正に係る係数 γ_b の非線形性を β で表現した場合、 β が小さくなるほど土砂は流送され易くなり、 $\beta = 1/2$ のとき解析値は実験値と良好に一致した。

以上のように、掃流砂層モデルの導入により遡上津波に伴う陸域堆積物形成の状況を再現可能であることが分かり、また各係数についても、実験室レベルではあるが、その適正値を見出すことができた。

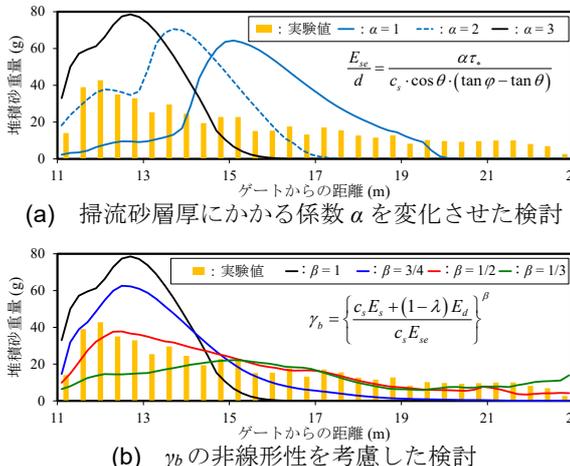


図-6 津波堆積物形成に関する解析結果

(2) 2Dによる局所洗掘解析の予測精度向上

図-7は水路勾配 1/50 における(a)円柱直径 $D = 0.06\text{ m}$, (b) $D = 0.09\text{ m}$ での最終洗掘孔形状の比較を示している。左は実験結果, 右は解析結果をそれぞれ示している。実験結果を見ると, 円柱下流域では水路中央に直線的な堆積域が形成され, 円柱直径が大きいほどその堆積域も大きく表れている様子が分かる。一方, 解析ではその様な堆積域が十分再現できていない。しかしながら, 円柱周りにおける局所洗掘現象を2Dであるにも関わらず再現できていることが分かる。特に, 実験では円柱直径が大きいほどその洗掘孔および洗掘深も大きく表れているが, 解析はその状況を良好に再現できている。

このように, 2D-3Dハイブリッドによる地形変化モデルの作成は困難であったものの, 2Dのみでも十分に構造物周りの局所洗掘現象を再現できる解析モデルの開発に成功し, より実用的なモデルとなった。

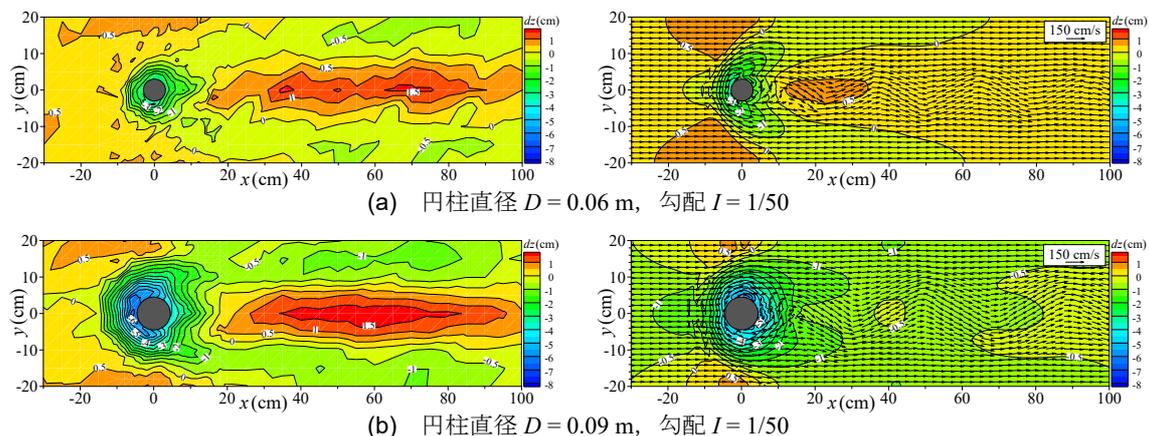


図-7 最終洗掘孔形状の比較 (左: 実験結果, 右: 解析結果)

(3) 津波による地形変化が瓦礫の輸送・集積に及ぼす影響の解明

津波による地形変化と瓦礫輸送を考慮した数値解析モデルを開発した。開発した解析モデルについて, 移動床への適用前に, 固定床での瓦礫輸送実験に適用し, その妥当性を検証した。その結果, 固定床斜面における津波遡上時の瓦礫輸送を概ね良好に再現できることを確認し, 次に進めた。

移動床港湾内での瓦礫輸送を想定した検討を行った。図-8に計算結果による造波開始から0s (左上), 50s 地形変化あり (右上), 180s 地形変化あり (左下), および180s 地形変化なし (右下) における地形変化量 dz と瓦礫の輸送状況をそれぞれ示す。50s 地形変化ありの図より, 瓦礫は引き波時に港内の循環流に乗り, 港外へと輸送されている。180s 地形変化ありでは, 港内中央での土砂堆積, 港口での局所洗掘が確認できる。これを180s 地形変化なしと比較すると, 地形変化ありでは港内の瓦礫残存数が少なく見える。

表-1は地形変化の有無による180sでの港湾内の瓦礫残存率を纏めたものである。瓦礫残存率は地形変化の有無により大きく違いが表れ, 地形変化ありでは変化なしに比べて残存率が約15%も低くなった。これは, 地形変化ありでは港内中央での土砂堆積により, 循環流外縁の流れが強化されたためと考えられる。実際, 図-8の50s 地形変化ありに示しているPt. A での水深平均流速は, 地形変化なしに対して変化ありでは10%程度も強化されていた。

以上, 瓦礫が接地しない条件の場合, 地形変化により港湾内外縁の流れが強化された循環流が瓦礫をより港外へと輸送し, 港湾内の瓦礫残存率が低くなる可能性を示した。この結果は, 実現象において, 細砂で海底が構成される港湾での瓦礫輸送予測に対し, 地形変化考慮の必要性を示唆した。

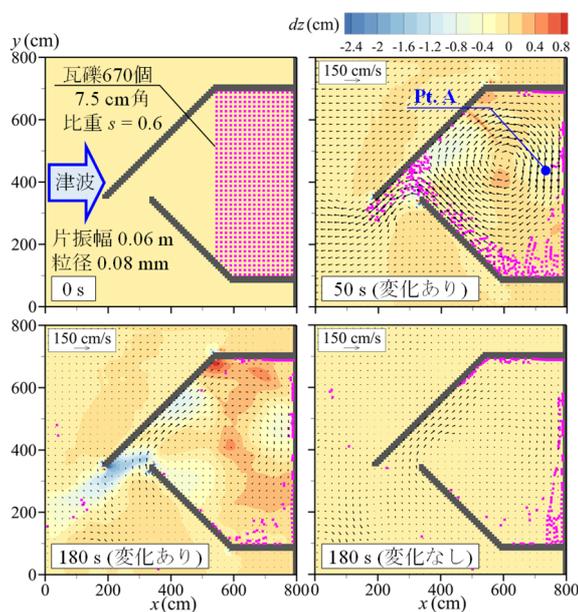


図-8 津波による港湾内瓦礫輸送の様子 (解析)

表-1 地形変化の有無による港湾内瓦礫の残存率

	地形変化あり	地形変化なし	初期
港湾内瓦礫個数 (個)	216	312	670
港湾内瓦礫残存率 (%)	32.2	46.6	

また、図-9(a)および(b)のそれぞれにおいて、上から順に、瓦礫初期配置、10 s (地形変化あり)、30 s (地形変化あり)、および30 s (地形変化なし)における地形変化量 dz と瓦礫の輸送・集積状況を示す。ここで、各図に示す10 s等の時刻は、津波の円柱到着時を0 sとして計測している。

これらの図より、陸域での瓦礫残存率に対する地形変化の影響は、瓦礫の初期配置によっては数%程度の差が表れる可能性があるものの、その影響は小さい。しかしながら、陸域奥部における瓦礫集積位置は、地形変化ありの方が変化なしよりも奥部となり、条件によっては更に奥部となる可能性がある。この結果は、実現象において細砂で構成される海浜域での瓦礫集積予測に対し、地形変化考慮の必要性を示唆した。

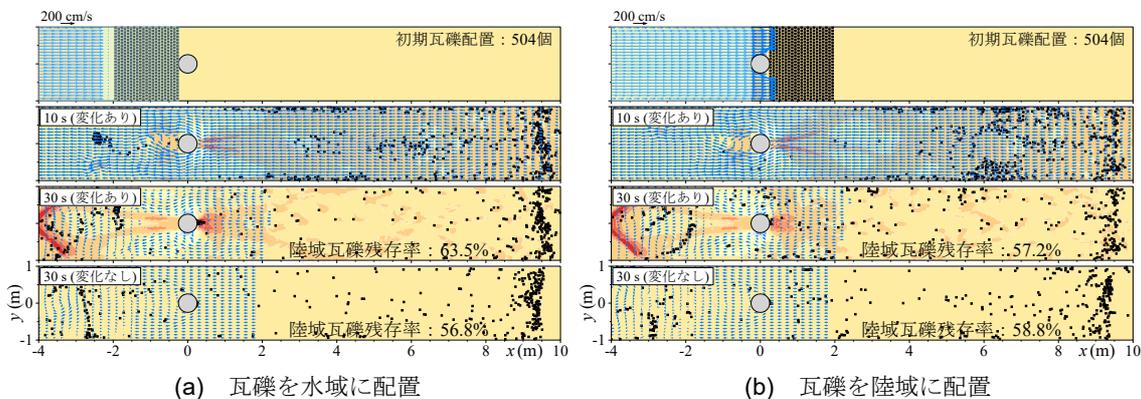


図-9 斜面上における瓦礫の輸送・集積状況 (解析結果)

(4) 現地規模への適用とリスクマップ化

図-10 は地形変化ありにおける津波襲来後の田後港周辺の地形変化と瓦礫位置を示している。本研究では F55 断層の地震津波を対象に解析を行ったが、本津波は比較的規模が小さく、陸域に大きく遡上するまでには至らなかった。しかしながら、表-2 に示されるように、田後港内の瓦礫残存率を調べたところ、現地規模においても、地形変化ありでは残存率が低下することが分かった。また、対象の津波規模が小さかったためにリスクマップとしての表現は困難であったものの、現地規模においても本解析モデルにより海域での地形変化および船舶等の瓦礫輸送状況を表示することができた。すなわち、本解析モデルは十分現地に適用可能であり、いくつかの津波シナリオに基づく解析から、リスクマップとして表現できる可能性を見出すことができた。

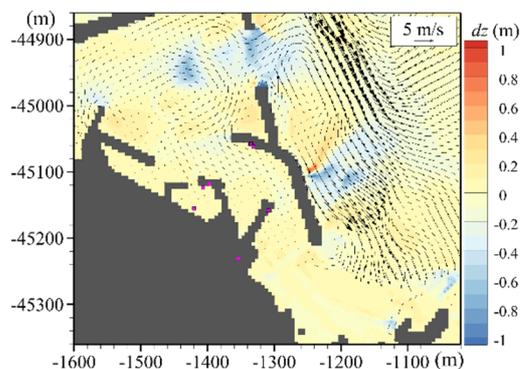


図-10 津波襲来後の地形変化と瓦礫輸送状況

表-2 田後港内の瓦礫残存率

	地形変化あり	地形変化なし
港湾内瓦礫数 (個)	20	23
港湾外瓦礫流出数 (個)	16	13
港湾内瓦礫残存率 (%)	55.6	63.9

参考文献

- 1) Luu, L.X., Egashira, S. and Takebayashi, H.: Investigation of Tan Chau reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, 水工学論文集, 48, pp. 1057-1062, 2004.
- 2) Yamamoto, A., Kajikawa, Y., Yamashita, K., Masaya, R., Watanabe, R. and Harada, K.: Comparisons of numerical models on formation of sediment deposition induced by tsunami run-up, *J. Dis. Res.*, 16(7), pp.1015-1029, 2021.
- 3) Wu, W.-M., and Wang, S.S.Y.: Prediction of local scour of non-cohesive sediment around bridge piers using FVM-based CCHE2D Model. *Proc., 1st Int. Conf. on Scour of Foundations*, H.-C. Chen and J.-L. Briaud, eds., Texas A&M University, College Station, TX, 1176-1180, 2002.
- 4) 藤井直樹, 池野正明, 榊山勉, 松山昌史, 高尾誠, 向原健: 津波による港湾内の流況と地形変化に関する実験およびその数値計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 65(1), pp. 291-295, 2009.
- 5) Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F. and Sato, S.: Tsunami scour around a cylinder, *J. Fluid Mech.*, 496, pp. 165-192, 2003.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 梶川勇樹, 川谷萌佳, 黒岩正光	4. 巻 80
2. 論文標題 津波による地形変化が瓦礫の輸送・集積に及ぼす影響に関する数値解析的検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土木学会論文集特集号（海洋開発）	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 梶川勇樹, 井上蓮, 黒岩正光	4. 巻 78
2. 論文標題 掃流砂層モデルを用いた津波堆積物形成の予測精度向上に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2（海岸工学）	6. 最初と最後の頁 I_253 ~ I_258
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/kaigan.78.2_I_253	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 梶川勇樹, 黒岩正光	4. 巻 77
2. 論文標題 3D RANSを用いた津波による急拡大部の流れと地形変化の再現性に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2（海岸工学）	6. 最初と最後の頁 I_157 ~ I_162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/kaigan.77.2_I_157	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 Yamamoto Ako, Kajikawa Yuki, Yamashita Kei, Masaya Ryota, Watanabe Ryo, Harada Kenji	4. 巻 16
2. 論文標題 Comparisons of Numerical Models on Formation of Sediment Deposition Induced by Tsunami Run-Up	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 1015 ~ 1029
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2021.p1015	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kajikawa, Y., Wada, T., Kuroiwa, M., and Miwa, H.
2. 発表標題 Hydraulic experiment on local scour around a cylinder in supercritical flow and its numerical simulation using shallow water flow model
3. 学会等名 39th IAHR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki KAJIKAWA and Masamitsu KUROIWA
2. 発表標題 3D Numerical Analysis of Tsunami-Induced Flow and Topography Change in an Abrupt Expansion Area with Different Shoreline Conditions
3. 学会等名 The 11th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------