

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04046

研究課題名(和文)短周期変動波浪が重合した津波や高潮による氾濫域被害増大特性の解明とその減災対策

研究課題名(英文) Study on amplification mechanisms of coastal hazard due to tsunami or storm surge combined with high-frequency wave components

研究代表者

田島 芳満 (Tajima, Yoshimitsu)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：20420242

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：津波や高潮、高波による浸水災害では、異なる周期の波が複雑に重合し、被害を増大する例が、昨今の災害時におけるビデオ画像などから明らかとなってきている。本研究では、このような周期の異なる波浪が重合する場を再現可能な実験装置を構築し、平面水槽実験を実施した。さらに画像計測手法を構築して、実験で見られた氾濫場および沿岸域における波・流れの定量的な特性を面的に捉えることにより、その特性の解明を試みた。次に段波の分裂に伴う高周波成分の生成や、高波や波群構造に伴う長周期成分の生成と伝播を再現可能な数値モデルを構築し、上記の特性を再現するハザード推定手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の沿岸域におけるハザード推定には十分に考慮されていなかった高周波の波動成分と、津波や高潮、長周期波などの長周期成分との相互干渉による浸水ハザードの増大特性を把握するための実験装置と、そのような現象を物理的なメカニズムに即して再現可能なハイブリッド数値モデルが構築された。これにより、各地で異なる地形による影響や不規則波の不確実性に伴う影響も考慮したよりハザード推定の高精度予測が可能となる。

研究成果の概要(英文)：Video footage of recent severe coastal inundation events due to tsunami, storm surge and stormy waves indicates that combination of waves with different frequencies has significant influence on amplification of coastal inundation. This study first developed a facility, which can generate waves with different frequencies including a bore to represent such wave-wave and wave-surge interactions. The numerical models were then developed for computation of such non-linear dispersive tsunami propagation with soliton fission and interaction of breaking and broken storm waves with storm surge induced by winds and waves. The models were validated through application to various experimental and field cases and it was confirmed that the model reasonably capture the observed amplification of inundation due to wave-wave and wave-surge interactions. The models and experimental facilities are readily applied for estimation of coastal hazard for designs of disaster mitigation.

研究分野：海岸工学

キーワード：高波 高潮 浸水 越波 波浪の重合 沿岸ハザード

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災での津波による被災を受け、我が国では新たに二段階津波の概念を導入し、数百年～千年に一度の発生確率を想定するレベル2の津波に対しては、氾濫を前提とした沿岸低平地での総合的な減災対策を講じることが提唱された(中央防災会議)。一方、海岸堤防については、可能な限り粘り強い構造とし、氾濫流の低減機能を発揮させることが提唱されているが、このような津波の越流に対する堤防の安定性や氾濫流の低減効果については未解明な部分が多く、重要な研究課題のひとつとなっている。また東日本大震災における津波は、GPS ブイ等による水位変動データに加え、沿岸部に来襲する際のビデオ画像なども多数記録されており、沿岸域や氾濫域における津波の挙動に関する新たな知見も得られた。たとえば申請者らは綾里湾で撮影されたビデオ画像を分析し、津波の来襲時には周期 7～8 秒程度の激しい水位変動が複雑に重合しており、沿岸構造物の破壊を大きく助長した可能性を指摘した。また、この様な周波数の異なる波浪の重合による被災事例は高潮や高波災害においても見られる。たとえば Hurricane Katrina による北米メキシコ湾岸での高潮災害では、沿岸部の家屋の被災率の分布は高潮による浸水深の分布のみでは説明できず、同時に来襲した高波による影響が大きいことが指摘されている。また 2013 年台風 Haiyan に伴うフィリピンのレーテ島における高潮災害においても、現地での目撃証言やビデオ画像から、高潮が集中しやすいサンペドロ湾奥に対し、湾口部周辺では比較的周期の短い水位の変動が卓越し、浸水高や氾濫被害が湾奥部と同等以上であったことなど明らかとなっている。

以上の津波や高潮、高波による様々な沿岸域災害の事例から、長周期および短周期変動成分の複雑な重合は、被災外力を局所的に増幅させる危険を有することが推察されるが、この様な複雑な現象を現地データに基づき把握するのは困難であり、そのメカニズムの解明も十分には進んでいない。特に氾濫を伴う沿岸域の巨大水災害に対しては、氾濫流の様々な水理現象による被災リスクの想定に基づき適切な減災対策を施すことが重要であり、沿岸域および氾濫域における複雑な水理特性の記述とその予測技術の向上、さらにそれに基づく被害状況の評価手法の構築は喫緊の課題である。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では津波による分裂波や風波などの比較的周期の短い波と、風波の非線形干渉等により生じる長周期波や、津波、高潮などの周期の長い流体運動との重合場に着目し、まず沿岸域および氾濫域におけるこれらの重合場の水理特性を再現可能な実験装置の開発を行う。次に、申請者らが構築してきた画像計測システムに更なる改良を加えることにより、再現した重合場の挙動を定量的かつ俯瞰的に記録し、現象の把握を試みるとともに、その物理的メカニズムに即した数値予測モデルを構築する。最後に構築した数値予測モデルに基づき、沿岸ハザードを推定してその特性を整理し、効果的な減災・防災策の提案を試みる。

また研究期間中に発生した沿岸域災害については現地調査を実施し、知見を蓄積するとともに、構築した実験施設および数値モデルを適用してそのメカニズムの解明を試みる。

3. 研究の方法

以上の研究目的を達成するため、本研究では(1)マルチスケール波浪重合場再現装置の開発、(2)マルチスケール波浪重合場再現モデルの構築、(3)津波・高潮・高波重合場の伝播・氾濫実験、(4)沿岸域災害の現地調査を実施し、最後に津波・高潮・高波重合場の氾濫特性の整理するとともに減災・防災策に関する考察を加えた。以下に研究方法の概要を示す。

(1) マルチスケール波浪重合場再現装置の開発

平面水槽において様々なスケールな波浪を造波し重合させる装置の開発を行った。まず、最も波長の長い波浪として段波造波装置の開発を行った。平面水槽で段波を造波することのできる装置として、ポンプ式、チャンバー式、ゲート式などの異なる造波装置を比較・検討し、規模や施工性、汎用性、段波の再現性の点でゲート式造波装置が有利であると考え、装置を設計し構築した。造波装置は組み立て式とし、水槽内の任意の地点に造波機を設置することができるようにした。さらに、ゲートの開閉にはコンプレッサーを用い、ゲートの開閉速度の再現性を向上させた。次に、より周期の短い任意の波を造波するため、ピストン式の造波装置を構築した。こちらも平面水槽内の任意の位置に設置できるように比較的コンパクトな構造とし、任意の波形の波を造波できるようにした。それぞれ構築した造波装置で段波や正弦波、有限振幅波、不規則波を入射させ、所定の波が造波できていることを確認した。さらに、これらの造波装置を用いて平面水槽における津波や高波、さらにこれらの波浪が重合する条件を再現し、氾濫域における水理特性や漂流物の挙動、堤防に作用する波力などの計測を実施した(図-1)。

(2) マルチスケール波浪重合場再現モデルの構築

ソリトン分裂などを含む津波の伝



図-1 ゲート式段波装置と平面水槽実験の例

播・変形を再現可能なモデルとして、非線形分波モデルの構築を試みた。モデルは基礎式を水深方向に積分したブシネスク方程式に基づく平面二次元の一般的なモデルに加え、潜堤を含む堤防を越流する状況への適用性も勘案して水深方向に複数の層数を多層平面の非線形分散波方程式も新たに導出してモデル化した。また、高潮と高波が重合する場における氾濫特性を効率よく再現することを主眼とし、位相平均型のエネルギー平衡方程式を用いて風波成分を、非線形長波方程式を用いて高潮および長周期波成分の伝播・変形を再現するモデルをそれぞれ構築し、両者の相互干渉を考慮しながら同時に計算することのできるモデルを構築した。以上のモデルは、本研究で実施した平面水槽実験や後述する沿岸域氾濫災害の現地調査結果から得られた条件等に適用し、その妥当性を検証した。またこれらの波浪モデルに加え、高潮および高波に伴う沿岸ハザードの再現期間を推定するために確率台風モデルを構築し、南西太平洋および北西太平洋にそれぞれ適用した。

(3) 津波・高潮・高波重合場の伝播・氾濫実験

上記(1)で構築した造波装置を用いて、様々な条件における平面水槽実験を実施した。以下、実施した主な実験の概要を整理する。

(a) 津波氾濫実験：平面水槽に段波津波を造波し、様々な条件に配置した堤防近傍での水位変動や堤防に作用する波力の計測を実施した。さらに、漂流物群が氾濫場の水理特性に与える影響を検証するため、氾濫域に多数の立方体の木片を置いた条件で段波を作用させ、水位変動や木片の挙動を画像解析を用いて定量的に抽出した。

(b) リーフ上における波浪伝播特性の実験：海岸線を取り囲むリーフ地形を模した地形を平面水槽に形成し、造波機を用いて規則波および不規則波をそれぞれ造波し、リーフ周辺およびリーフ上における水位変動を、画像計測技術を用いて面的に抽出した。これにより、リーフ上で急激に減衰する短周期波成分および、共振によってリーフ上で増大する長周期変動成分を位相・振幅分布を抽出するとともにその特性を分析した。

(c) 長大な潜堤上における stem 波の挙動に関する実験：長大な潜堤周辺部における波浪の発達と、潜堤上での波高の増大、減衰、それに伴う流速の特性を把握する実験を実施した。

(4) 沿岸域災害の現地調査

研究開始直前および研究期間中に発生した沿岸域の氾濫災害について現地調査を実施し、浸水高などの定量的なデータを得るとともに、その特徴を整理した。実施した沿岸域災害は、2013年台風 Haiyan による高波・高潮災害、2015年サイクロン Pam によるバヌアツにおける氾濫災害、2016年台風 Meranti によるフィリピン、バタン島における氾濫災害、2018年台風 21号および24号による大阪湾および和歌山における氾濫災害である。

4. 研究成果

構築した造波装置を用いた実験を行い、平面水槽内に造波された段波に高い再現性があることを確認した。また実験条件を再現する多層の非線形分散波方程式に基づく数値モデルも構築し、ゲートの開閉速度を考慮した造波境界を与えることにより、実験で計測したソリトン分裂を含む段波の波形を精度良く再現できることを確認した。さらに、氾濫域内に設置した漂流物群に段波を作用させ、漂流物と氾濫流の相互干渉による影響を考慮した氾濫場の再現モデルの構築を試みた。これにより、氾濫域に遡上する段波は漂流物群によって影響を受け、特に漂流物群が集積する地点の沖側で水位が上昇し、漂流物群の集積を助長する特性が見られた。モデルにおいては、流体と漂流物群との相互作用を考慮することにより、上記の特性を妥当に再現できることが分かった(図-2)。

さらに、津波・高潮・高波重合場の伝播・氾濫実験を行った。氾濫実験では、平面水槽内の斜面勾配を変化させて氾濫域を再現し、さらに海岸堤防や道路や鉄道による二線堤などを加えたモデル地形を製作した。これらの構造物や微地形を含む氾濫域における水理特性を定量的に捉え、実験結果を通じて構造物や微地形による減災効果を分析するとともに、数値モデルの検証データとしても活用した。また断面二次元水槽における基礎実験も実施し、段波成分と短周期波浪成分が重合した場合における砕波限界や、それにとまう衝撃波圧の変化を詳細に計測・分析した。

また2016年にはスーパー台風 Meranti によりフィリピンのバタン島で氾濫災害が起こったため、現地調査を実施した。その結果、リーフ上のある地点で局所的に浸水高が増大している地点があることが分かった。また同様の災害が2015年のサイクロン Pam によるバヌアツにおける災害調査においても見られた。以上から、これらの再現を可能な数値モデルとして、上述したエネルギー平衡方程式および非線形長波方程式に基づき、風波成分および高潮を含む長周期変動成分の発達・伝播を同時に計算し、両者の相互干

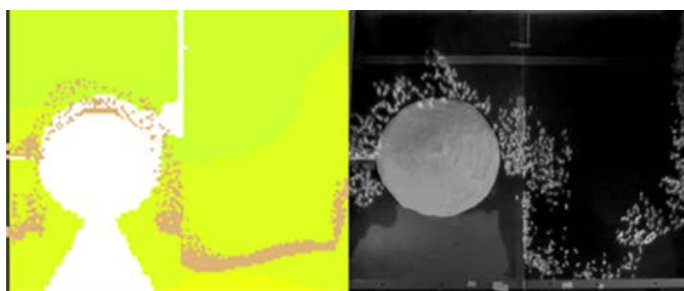


図-2 漂流物群と段波の氾濫の実験(左)と数値モデルによる再現(右)

渉を考慮することのできるモデルを構築した。さらにモデルの妥当性を検証するため、平面形状を長方形にしたリーフの模型を平面水槽の斜面上に設置し、このリーフ地形に不規則波を照射させた場合におけるリーフ上での時々刻々の水位変動を画像解析を用いて抽出した。抽出した水位の時空間分布に対して、スペクトル解析を実施し、ピークの見られた周波数成分に対して、その位相差および振幅の空間分布を図示した(図-3)。図-3に見られる様に、リーフ上における水位変動成分の周波数スペクトルには複数のピークが見られ、これらのピークの位相差および振幅には、岸沖方向(図の縦方向)および沿岸方向(図の横方向)に交互に腹・節をもつ共振現象の特性を示した。

この実験条件にも構築したモデルを適用し、モデルがリーフ上での平均水位の上昇および長周期変動成分を妥当に再現できることを確認した。次に妥当性を確認したモデルをバヌアツのTakara 地区に適用した。その結果、リーフ上では平面二次元的な波浪の伝播、変形、反射、重合により、水位上昇量が局所的かつ一時的に増幅する傾向を再現することができた。また分析する氾濫特性は、被害指標の構築とそれに基づく被害評価に用いることを念頭に置いており、例えば浸水深、流速、浸水までのリードタイムなどの、被害評価に必要であると考えられる項目を列挙し、それらの特性を定量的に抽出するモデルを構築した。また人的被害の推定について、避難計画や発災時時間帯、気候条件等のいくつかのシナリオを考え、これらの影響を考慮した避難シミュレーションに基づき氾濫域における避難可能率を算定する手法を構築した。また物的被害については、氾濫域における水位変動と流速に基づく被害関数を導入し、氾濫域の各地点における浸水深や流速の時間分布から建造物の被災率を推定する手法を構築した。

最後に高潮および高波に伴う沿岸ハザードの再現期間を推定するため、台風およびサイクロンの実測値を統計的に再現する確率台風モデルを南太平洋および北西太平洋を対象に構築した(図-4)。構築した確率台風モデルにより、多数のサイクロンおよび台風を生成し、個々の台風(サイクロン)に対して、波浪推算をすることにより、任意の地点における来襲波浪を再現期間別に推定する手法を構築した。構築した手法をサイクロン Pam による浸水被害が見られたバヌアツの Takara に適用した結果、Pam による来襲波の再現期間は 200 年程度と見積もることができた(図-5)。ここで得られた再現期間別の沖波条件を、本研究で構築したハイブリッドモデルに適用することにより、沿岸域の氾濫ハザードを再現期間別に推定した。

また、同手法を北西太平洋にも拡張し、2018 年台風 21 号および 24 号における大阪湾周辺部における浸水被害の再現期間を推定するとともに、台風接近時における任意時刻までの観測値に基づき以後の台風を確率台風モデルを用いて無数に生成することにより、台風接近時における湾内の各地点において発生し得るハザードの確率別推定手法を構築し、その適用性を示した。

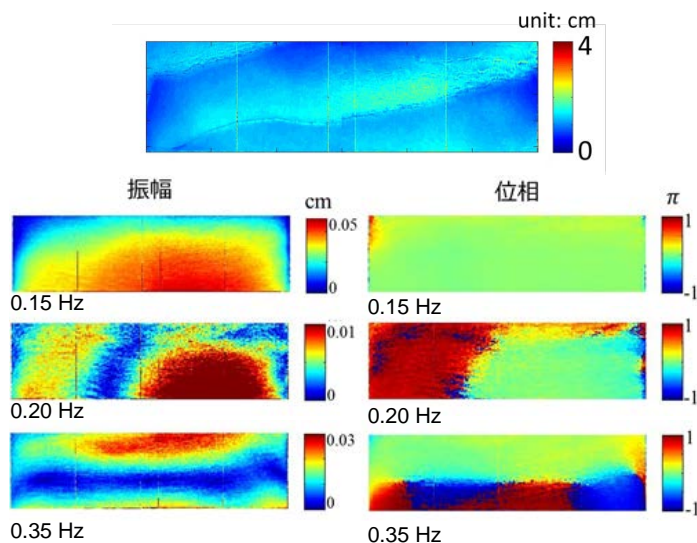


図-3 長方形リーフ上における波浪伝播時の水深分布の例(上)および、共振の見られた周波数成分の振幅(左)および位相(右)

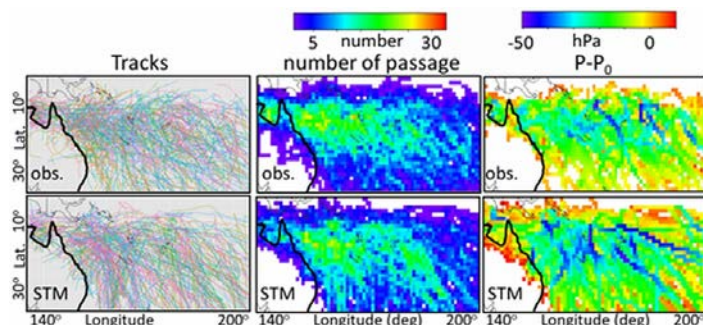


図-4 構築した確率台風モデル(STM)の適用例

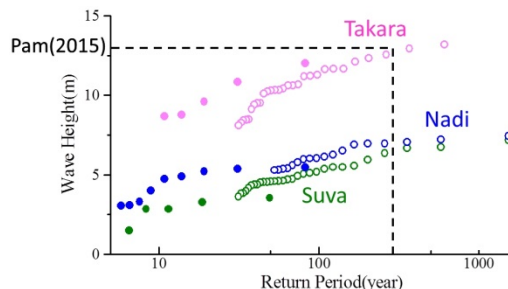


図-5 確率台風モデルで生成したサイクロンに基づき推定した Takara における来襲波の再現期間別分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 22 件、全て査読有)

- 1) 田口裕介・田島芳満・中村駿一郎・山中悠資：台風 Haiyan による San Pedro 湾口部における氾濫特性とそのメカニズムの分析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，2015.
- 2) 深沢壮騎・田島芳満：非線形項の離散化手法の違いが河川津波の遡上速度に与える影響，土木学会論文集 B2(海岸工学)，2015.
- 3) Tajima, Y., Gunasekara, K.H., Shimozone, T. and E.C. Cruz, Study on locally varying characteristics induced by super typhoon Haiyan. Part I: Dynamic behavior of storm surge and waves around San Pedro Bay, Coastal Engineering Journal, vol.58, No.1, 1640002, DOI:10.1142/S0578563416400027, 2016.
- 4) Tajima, Y., Shimozone, T., Gunasekara, K.H., and E.C. Cruz, Study on locally varying characteristics induced by super typhoon Haiyan. Part II: Deformation of storm waves on the beach with fringing reef along the east coast of Eastern Samar, Coastal Engineering Journal, vol.58, No.1, 1640003 (24 pages), DOI:10.1142/S0578563416400039, 2016.
- 5) 田島芳満・桐ヶ谷直也・櫻澤崇史：漂流物群と氾濫流の相互作用に関する研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，vol.72 No.2., pp.I_205-I_210, doi:http://doi.org/10.2208/jscejo.72.I_205, 2016.
- 6) 山中悠介・佐藤慎司・田島芳満・下園武範：南海トラフ巨大津波のソリトン分裂に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.72, No.2, pp.I_403-I_408, doi: http://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_403, 2016.
- 7) 櫻澤崇史・田島芳満：漂流物群を伴う氾濫場の平面実験とその特性の分析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.72, No.2, pp.I_1153-I_1158, doi: http://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1153, 2016.
- 8) 上島浩史・下園武範・田島芳満：堤防線形が津波波圧に与える影響に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.72, No.2, pp.I_1063-I_1068, doi: http://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1063, 2016.
- 9) Hussain, M.A. and Y. Tajima: Numerical investigation of surge-tide interactions in the bay of Bengal along the Bangladesh coast, Natural Hazards, vol.86, issue2, pp.669-694, doi: 10.1007/s11069-016-2711-4, 2016.
- 10) 山中悠資，田島芳満：段波と短周期波の重合場における波圧特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，73(2), I_391-I_396, 10.2208/kaigan.73.I_391, 2017.
- 11) 中村駿一郎，田島芳満，神原雅宏:低緯度帯における確率台風モデルの改良とその南太平洋島嶼国における沿岸ハザード評価への適用，土木学会論文集 B2(海岸工学)，73(2), I_133-I_138, 10.2208/kaigan.73.I_133, 2017.
- 12) Tajima, Y., Lapidez, J.P., Camelo, J., Saito, M., Matsuba, Y., Shimozone, T., Bautista, D., Turiano, M., and E. Cruz: Post-Disaster Survey of Storm Surge and Waves along the Coast of Batanes, the Philippines, caused by Super Typhoon Meranti / Ferdie, Coastal Engineering Journal, vol.59, No.1, DOI: 10.1142/S0578563417500097, 2017.
- 13) Lapidez, J.P., Tajima, Y., Camelo, J., Saito, M., Matsuba, Y., Shimozone, T., Bautista, D., Turiano, M. and E. Cruz, Locally varying inundation characteristics along coast lines of Batanes induced by super typhoon Meranti, Proc. Int. Conf. on Coastal Dynamics, 2017.
- 14) Lapidez, J.P. and Y.Tajima: Numerical simulation of storm waves generated by Super Typhoon Meranti/Ferdie at Batanes, Philippines, Proc. of Int. Conf. on Asian and Pacific Coast, 2017. doi:10.1142/9789813233812_0021
- 15) Tajima, Y.: Challenges in reconstruction and strategies for prevention and mitigation of coastal disasters five years after the GEJE, The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration, Springer, pp.405-421, 2017. DOI:10.1007/978-3-319-58691-5_23
- 16) Hussain, M.A., Tajima, Y., Hossain M.A., and P. Das: Impact of Cyclone Track Features and Tidal Phase Shift upon Surge Characteristics in the Bay of Bengal along the Bangladesh Coast, Journal of Marine Science Engineering, vol.5(4), 52, 2017. doi:10.3390/jmse5040052.
- 17) 田中良明・田島芳満：リーフ上の水位増幅機構に関する平面水槽実験，土木学会論文集 B2(海岸工学)，74(2)，pp.I_79-I_84, doi: 10.2208/kaigan.74.I_79, 2018.
- 18) 五十嵐雄介・田島芳満：ニューラルネットワークによる日本沿岸の波浪の推定に関する検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，74(2)，pp.I_685-I_690, doi: 10.2208/kaigan.74.I_685, 2018.
- 19) 谷口健司・佐貫宏・渋尾欣弘・田島芳満：疑似温暖化手法とアンサンブルシミュレーションによる東京湾における高潮推算，土木学会論文集 B2(海岸工学)，74(2)，pp.I_613-I_618, doi: 10.2208/kaigan.74.I_613, 2018.
- 20) 森岡純平・下園武範・門安曇・不動雅之・田島芳満：津波越流時に防波堤各部に作用する波力特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，74(2)，pp.I_271-I_276, doi: 10.2208/kaigan.74.I_271, 2018.
- 21) Yamanaka, Y., Sato, S., Shimozone, T. and Y. Tajima: A parametric study of tsunami fission generation in a bay geometry based on numerical simulation, Coastal Engineering Journal, 60:1, 22-38, doi:10.1080/05785634.2017.1418797, 2018.
- 22) 横堀聖人・田島芳満：複雑なリーフ形状を有する Samoa Faleolo における浸水特性の分析，

[学会発表] (計 17 件)

上記の土木学会論文集(海岸工学および海洋開発)は、それぞれ海岸工学講演会および海洋開発シンポジウムにて発表した(12 件)。さらに下記の国際会議での発表をした(5 件)。

- 1) Tajima, Y., Hamada, Y. and M.A. Hussain, Impact of Dynamic Morphology Change on Storm Surge Disaster Risks along The Meghna Estuary, Proc. of Int. Conf. on APAC, 2015.
- 2) Seto, S., Tajima, Y., Shimozone, T. and H. Nakao, Experimental Study on Tsunami Characteristics Flowing over Coastal Dikes with Different Shapes, Proc. of Int. Conf. on Coast. Structures, 2015.
- 3) Lapidez, J.P., Tajima, Y., Camelo, J., Saito, M., Matsuba, Y., Shimozone, T., Bautista, D., Turiano, M. and E. Cruz, Locally varying inundation characteristics along coast lines of Batanes induced by super typhoon Meranti, Int. Conf. on Coastal Dynamics, 2017.
- 4) Lapidez, J.P. and Y.Tajima: Numerical simulation of storm waves generated by Super Typhoon Meranti/Ferdie at Batanes, Philippines, Int. Conf. on Asian and Pacific Coast, 2017.
- 5) Matsuba, Y., Shimozone, T. and Y. Tajima: Observation of nearshore wave-wave interaction using UAV, Proc. Int. Conf. on Coast. Eng., 2018.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：下園武範

ローマ字氏名：Shimozone, Takenori

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学系研究科社会基盤学専攻

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：70452042

研究分担者氏名：佐藤慎司

ローマ字氏名：Sato, Shinji

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学系研究科社会基盤学専攻

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：90170753

※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、研究者個人に帰属されます。