

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20447

研究課題名（和文）大気-海洋-河川結合モデルの構築と複合氾濫に対する脆弱性の評価

研究課題名（英文）Coupled atmosphere-ocean-river modeling and assessment of vulnerability to compound flooding

研究代表者

豊田 将也（Toyoda, Masaya）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：70908558

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は高潮と洪水による複合氾濫災害を対象に、新たな数値モデルの構築と、それを運用することによる都市域での複合氾濫に対するハザード評価を実施した。まず波浪・高潮結合モデルに対して河道を直接組み込み、河川流を考慮可能としたモデルを構築した。さらに上流からの洪水流に対しては降雨流出モデルの計算結果を利用し、モデル境界では時々刻々と変化する流量をシームレスに水位へと変換しながら結合した。実際の運用では、大阪湾（2018年台風21号）と伊勢湾（2018年台風24号）を選定し、評価を実施した。より許容流量の小さい中小河川では、高潮と洪水の時差が短く、複合氾濫リスクが極めて高いことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の数値モデルでは、「高潮」や「洪水」を個々に取り扱うモデルは存在していたが、これらを一体に取り扱うモデルは開発されていなかった。本研究では、実現象に即した「高潮と洪水の同時生起およびそれによる水位上昇」を高精度に表現可能なモデルを構築している。また気候変動により今後台風強度が増大することが懸念され、複合氾濫リスクも増大すると考えられる。本モデルの運用を、将来気候計算にも発展させることで、将来起こり得る災害リスクの評価や、脆弱な地点・河川の検出に応用できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a new numerical model was developed for compound flooding hazards due to storm surge and high-river discharge, and the model was applied to evaluate the hazard of compound flooding in an urban area. Firstly, a coupled wave and storm surge model was constructed by incorporating the river channel directly into the model and this model can consider the river flow. The model also utilizes the results of a rainfall-runoff model for flood flows from upstream, seamlessly converting ever-changing flow rates into water levels at the model boundaries. For actual operation, Osaka Bay (Typhoon No. 21 in 2018) and Ise Bay (Typhoon No. 24 in 2018) were selected for evaluation. It was found that small and medium-sized rivers with smaller allowable flows have a very high compound flooding risk due to the short time difference between storm surges and high-river discharge.

研究分野：海岸工学

キーワード：複合氾濫 高潮 洪水 台風

### 1. 研究開始当初の背景

勢力の強い台風の襲来は、高潮の河川遡上や大雨による河川の増水を発生させ、2つのハザードが同時発生することで大規模な氾濫(外水氾濫)に繋がることが懸念される(Wahl et al. 2015)。我が国の三大湾はいずれも地形的特徴から複合氾濫の可能性があり、高い人口密度から脆弱性も極端に高い。実際に2018年台風21号では、高潮が淀川を遡上し、河川水位が堤防高まで約1mの高さに迫るなど、高潮と河川氾濫の複合氾濫の危険性が明示された。

高潮と河川氾濫の複合氾濫の力学的評価では、台風から河川への降雨、洪水流および遡上する高潮の相互作用、河口域での高潮と洪水による氾濫の3つの相互作用を考慮する必要がある。また気候変動による台風に対する影響評価では、高潮および大雨に起因する洪水災害について幾つかの研究事例はあるものの(Mori and Takemi 2016)、複合氾濫を対象に力学的手法により一体的にモデル化した研究は殆どない。これは台風、高潮および河川の各イベントの時間・空間スケールが異なること、各過程の相互作用を考慮する必要があること、そして各モデル間における計算条件および次元が異なることで境界条件の接続が難解であることに起因する。本研究では、これら問題点を克服し台風気象場から複合氾濫までを一体で解く大気-海洋-河川結合モデルの開発を行う。本モデルは、L2 災害リスク評価や、地球温暖化による影響評価等の幅広い分野への応用が可能である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、流域内の相互関係を考慮した大気-海洋-河川結合モデルの開発と、複合氾濫メカニズムの解明および三大湾における脆弱性の評価である。既往研究では、力学的手法に基づいて台風と高潮についての個別の解析は行われているものの、一方で複合氾濫や豪雨の影響については研究対象としていなかった。これを発展させた本研究では、当該分野において力学的モデルのみを用いて、台風による複合氾濫災害に取り組む初めての研究事例である。また大気・海洋・河川の流域圏を一体として力学的に解く研究手法や、高潮と洪水の相互作用を考慮可能な新たな波浪・高潮結合モデルの開発により時空間スケールが異なる現象を扱うモデル間の不連続性を解決することは本研究の特筆すべき独自性である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究目標および検討事項

大気-海洋-河川結合モデル開発し、我が国の三大湾とその流域において、複合氾濫メカニズムの解明と脆弱性の評価を行った。また将来発生し得る最大クラスの複合氾濫の評価も行う。この目的達成のため、2021年度から2022年度までの2年間で、図2に示すように大気-海洋-河川結合モデルの構築、過去事例によるモデルの検証、極端事例を想定した脆弱性の評価、の3項目を実施した。

#### (2) 詳細な研究手法

##### 大気-海洋-河川結合モデルの構築

まず根幹となる河口水位を計算する波浪・高潮結合モデルの改良を実施した。具体的には、波浪・高潮結合モデルである SuWAT (Kim et al. 2007) に対して河道を組み込み、30m格子で沿岸から河口域までを高解像に計算範囲とした。河道の情報には、中央防災会議の地形情報を利用し、大阪湾では2河川、伊勢湾・三河湾では11河川、東京湾では3河川を対象とした。また SuWAT 内の河川上流端には、洪水の影響を考慮するために Flather (1976) による放射条件を適用し、上流からの水位や降雨流出モデルによる流量を側方境界条件として考慮可能とした。また流下してきた流量については、河道断面形状を用いて水位に変換することで、シームレスにモデル間を結合した。気象場については、領域気候モデル(WRF)および高解像度台風モデル(Toyoda et al. 2022)を採用し、降雨流出モデルについては RRI (Sayama et al. 2012) を採用した。RRI の解像度は J-FlwDir を用いて一級河川では90m、中小河川では30mとし、水系全体を高解像に表現した。

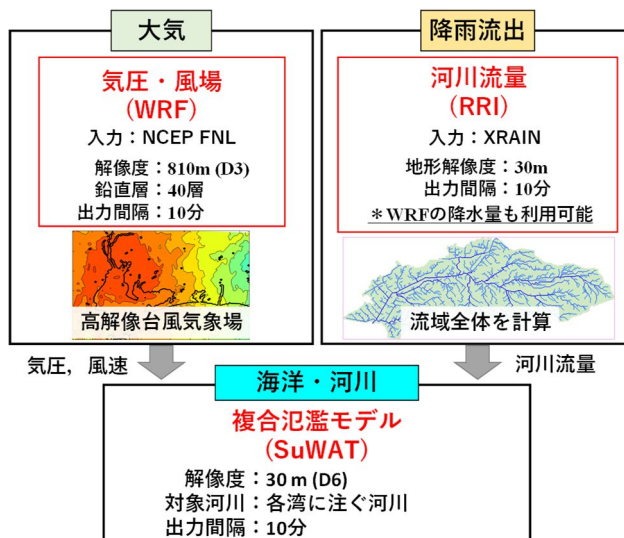


図-1 大気 海洋 - 河川結合モデルの概要

## 過去事例によるモデルの検証

続いて構築したモデルを運用し、過去事例での検討およびモデルの改良を行った。具体的には、まず近年三大湾にて高潮事例を引き起こした台風事例を選定し、各気象場および高潮偏差、洪水流量（水位）を算出し、計算結果と観測値を比較した。東京湾では2019年台風19号、伊勢湾・三河湾では2018年台風24号、そして大阪湾では2018年台風21号をケーススタディとして検証を進めた。

## 極端事例を想定した脆弱性の評価

最後に極端事例による高潮と洪水の同時生起を想定するため、特に伊勢湾・三河湾を対象に計算を実施した。ここでは、Toyoda et al. (2022)で台風強度の再現性が高い高解像度台風モデルを気象場計算に利用した。伊勢湾・三河湾域には、近年顕著な事例は襲来していない（2018年台風24号も高潮の規模は大きくない）ため、2019年台風19号を対象に、入力・境界条件を変更することで、この台風と同規模の台風事例が伊勢湾・三河湾域に襲来するケースを想定した。

## 4. 研究成果

### 2018年台風21号襲来時の大阪湾における高潮の河川遡上に関する再現実験

この実験では、領域気候モデルWRFとは別に、実務場で多用される経験的台風モデル(ETM)でも同様の計算を行い、それぞれの結果を比較した。また計算対象には、大阪湾に注ぐ一級河川である淀川および猪名川を選定した。

まず淀川および猪名川の2河川の河口域を対象に高潮の河川遡上が河川水位に及ぼす影響について確認する(図-2および図-3)。SuWATのD6における高潮偏差のスナップショット(2018年9月4日14時40分)では(図-2)、大阪湾で発生した高潮が淀川や猪名川を遡上し、モデル内で高潮の河川遡上が表現できている。河川流と高潮の遡上では、高潮の方が運動量が大きく、台風通過時には上流に向かう水位変化と流れが確認できる。続いて河川水位の再現性について、淀川では福島と毛馬の2地点、猪名川では戸ノ内の観測水位と比較した。まず淀川の2地点について検証する。福島(青)と毛馬(赤)では、高潮の河川遡上により福島で3.95m、毛馬で2.80mの水位ピークが観測されており、計算結果はETM駆動で3.27mおよび2.57m、WRF駆動では3.41mおよび2.71mとなった(図-3;青線および赤線)。高潮の遡上による水位のピーク時刻については誤差10分以内である。特に淀川大堰における水位変化が特徴的な毛馬では、高潮によるピークを挟んで水位が一定値に収束している。SuWATによる計算結果においても同様の時系列が再現された。続いて猪名川の戸ノ内(緑)の水位を検証する。観測されたピーク水位は3.57mであり、ETM駆動で3.06m、WRF駆動で3.38mとなった(図-3;緑線)。また高潮の遡上による水位のピーク時刻については、淀川と同様に誤差10分以内の精度で再現できている。以上より、福島でのピーク水位を過小評価する傾向にあるものの、3地点のピーク出現時刻は誤差10分以内と正確に表現されており、高潮の河川遡上を再現できる。また淀川および猪名川のいずれにおいてもD6の境界まで高潮の遡上が確認できており、これは災害調査報告において、この二河川の20km程度上流でも高潮の遡上が確認されたという情報とも整合する。したがって、本研究で構築したモデルは上流からの河川および高潮の河川遡上の両方を精度良く表現できることが示された。

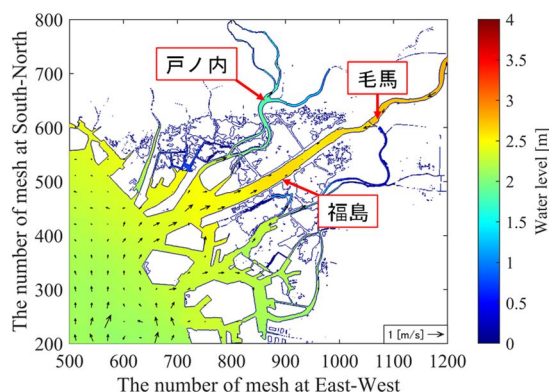


図-2 SuWATのD6における高潮偏差

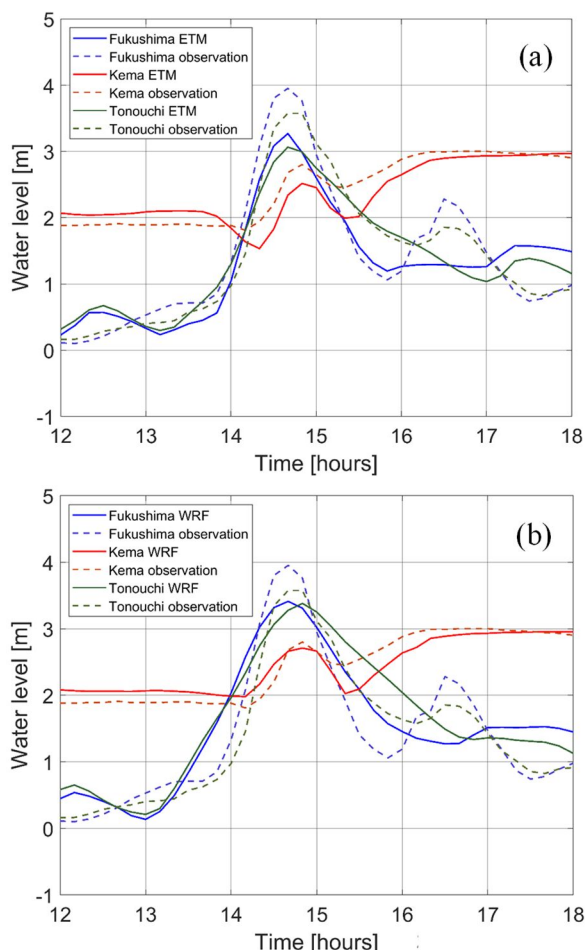


図-3 (a)ETM駆動と(b)WRF駆動による淀川および猪名川における水位の時系列

### 中小河川を含めた複合氾濫リスクの評価

ここでは三河湾を対象に、一級河川である豊川と二級河川である梅田川および柳生川で台風襲来時の高潮と洪水の時刻差に着目して解析を行った。対象の3河川について、高潮と洪水のピーク時刻の差についてそれぞれ確認する(図-4)。高潮のピーク時刻は三河湾でほぼ一様に生じるため、いずれの河川でも9月30日23時頃である。一方で洪水のピークは流域の面積と地形によって大きく異なる。一級河川である豊川では(青線)、10月1日3時頃に洪水によるピーク水位が出現している。このため高潮と洪水のピーク時間差は約4時間であり、本台風事例により複合氾濫が発生する危険性は低かったことが推察される。続いて中小河川である柳生川(赤線)・梅田川(緑線)でも同様に確認する。柳生川では、高潮のピークと10分以内に洪水のピークが出現している。また梅田川では高潮のピークから約30分遅れて洪水のピークが出現している。降雨から河口までの洪水到達時間については、2021年8月から11月の期間で行った現地観測からも同様の到達時間が得られているため、柳生川および梅田川それぞれの流下特性と判断できる。したがって柳生川および梅田川では、降雨開始から河口までの流下時間が短く、河口での洪水ピークが高潮と重なる危険性が極めて高いといえる。続いてSuWAT-Riverモデル内で洪水流の有無による水位に対する感度実験を実施し、各河川での河口水位に対する洪水流量の影響について調査する(表-1)。洪水流の有無による河口での最大水位の差は豊川で1.65m、柳生川で0.51m、梅田川で0.70mであった。さらに、水位上昇量を各河川の最大流量で除することで単位流量あたりの河口水位変化量を求める。その結果、単位流量あたりの水位変化量は豊川で0.06cm、柳生川で0.44cm、梅田川で0.19cmとなった。以上の検証より、洪水流による水位変化量は柳生川では豊川の7.3倍、梅田川では豊川の3.2倍大きいことが明らかとなった。三河湾で発生した高潮の規模は、豊川河口および中小河川の河口では大きな差はなく、豊川河口で2.28m、柳生川・梅田川河口で2.11mであった。したがって中小河川の洪水流に対する鋭敏性が氾濫リスクに大きく寄与しているといえる。出現時間について見ると、柳生川および梅田川では、高潮と洪水のピーク時刻が1時間以内となっているため複合氾濫リスクが極めて高いといえる。本事例のように複数の河口で同規模の高潮が襲来する場合は、中小河川の氾濫リスクは一級河川に比べて数倍高いことが明らかとなった。

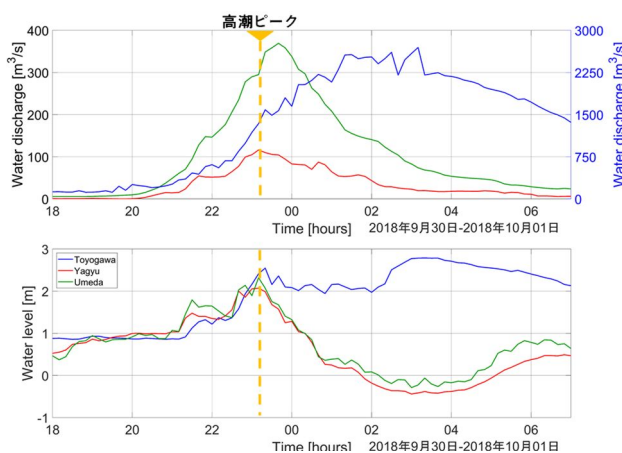


図-4 柳生川(赤)、梅田川(緑)、豊川(青)におけるハイドログラフ(上段)と水位の時系列(下段)

表-1 豊川、柳生川および梅田川の感度実験結果

	豊川	柳生川	梅田川
水位上昇量 [m]	1.65	0.51	0.70
最大流量 [m³/s]	2695.12	116.24	369.33
単位流量あたりの洪水影響量 [cm / (m³/s)]	0.06	0.44	0.19
河口での高潮 [m]	2.28	2.11	2.11

### 極端事例による伊勢湾・三河湾での複合氾濫に関する領域的な評価

最後に2019年台風19号クラスの台風が伊勢湾・三河湾地域に襲来したケースを想定し、経路に関する感度実験を実施した。その際、台風経路については6ケース用意し、伊勢湾・三河湾での計11河川の河口地点において、ピーク高潮とピーク洪水の時刻差に関する検討を実施した。その結果、「高潮と洪水の時刻差」と「河川規模」には強い正の相関があり、河川規模が小さい(流路が短い)河川ほど、洪水到達時間が短くなり、結果として高潮との同時生起となり得ることが明らかとなった。さらに、小規模河川ほど台風経路に関わらず時刻差は短くなる傾向にあり、中小河川では複合氾濫リスクが高いといえる。

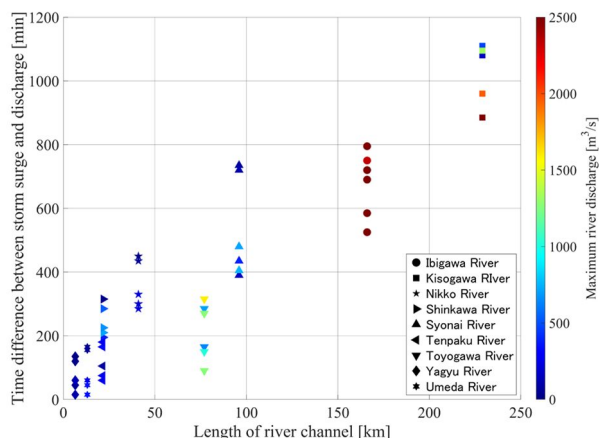


図-5 高潮および洪水の時刻差と河川流路延長の散布図

## 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 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 TOYODA Masaya, MORI Nobuhito, KIM Sooyoul, SHIBUTANI Yoko	4. 巻 77
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF A COUPLED WAVE AND STORM SURGE MODEL INCLUDING RIVER RUN-UP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_121 ~ I_126
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_121	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 Toyoda Masaya, Fukui Nobuki, Miyashita Takuya, Shimura Tomoya, Mori Nobuhito	4. 巻 64
2. 論文標題 Uncertainty of storm surge forecast using integrated atmospheric and storm surge model: a case study on Typhoon Haishen 2020	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 135 ~ 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2021.1997506	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 YOSHINO Jun, KURINO Yuma, TOYODA Masaya, KOBAYASHI Tomonao	4. 巻 77
2. 論文標題 PSEUDO-GLOBAL WARMING TRACK ENSEMBLE EXPERIMENTS ON HEAVY RAINFALL INDUCED BY TYPHOON HAGIBIS (2019)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1249 ~ I_1254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_1249	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 Toyoda Masaya, Yoshino Jun, Kobayashi Tomonao	4. 巻 64
2. 論文標題 Future changes in typhoons and storm surges along the Pacific coast in Japan: proposal of an empirical pseudo-global-warming downscaling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 190 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2021.2002060	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 Toyoda Masaya, Mori Nobuhito, Yoshino Jun	4. 巻 64
2. 論文標題 Optimization of empirical typhoon model considering the difference of radius between pressure gradient and wind speed distributions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 376 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2022.2035514	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 HARUYAMA Kazuki, TOYODA Masaya, KATO Shigeru	4. 巻 78
2. 論文標題 CHARACTERISTIC ANALYSIS FOR INCREASING IN WATER LEVEL DUE TO COMPOUND FLOODING IN SMALL AND MEDIUM RIVER BASIN	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_403 ~ I_408
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_403	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 TOYODA Masaya, MORI Nobuhito, KIM Sooyoul, SHIBUTANI Yoko	4. 巻 78
2. 論文標題 COMPOUND FLOOD MODELING FOR SMALL AND MEDIUM-SIZED RIVERS USING AN INTEGRATED MODEL OF ATMOSPHERIC, OCEAN AND RIVER	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_193 ~ I_198
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_193	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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 豊田将也
2. 発表標題 2018年台風21号による高潮の河川遡上に関する再現実験
3. 学会等名 京都大学防災研究所研究集会「台風研究会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田将也
2. 発表標題 高潮の河川遡上を考慮した波浪・高潮結合モデルの開発
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗野優真
2. 発表標題 2019年台風19号の大雨に関する擬似温暖化進路アンサンブル実験
3. 学会等名 第66回水工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 SITI AFIFAH
2. 発表標題 STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN TOPOGRAPHY AND SAND RIPPLE FORMATION AREA ON TIDAL FLAT
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 HAFIZI BIN MOHAMED
2. 発表標題 STUDY ON TOPOGRAPHIC MONITORING AND ANALYSIS OF TOPOGRAPHIC CHANGES ON MAESHIMA TOMBOLO TIDAL FLAT IN 5 YEARS
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 春山和輝
2. 発表標題 2018年台風24号による梅田川，柳生川における複合氾濫リスクの評価
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaya Toyoda
2. 発表標題 Hindcast Experiments on River Run-up of Storm Surge Using Integrated Model of Atmospheric, Rainfall-runoff, and Storm Surge
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society annual meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田将也
2. 発表標題 柳生川・梅田川の高潮・洪水の重複による水位上昇特性の評価
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茂呂陽真人
2. 発表標題 日本に上陸する台風の最大風速半径の時間変化に関する解析
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 春山和輝
2. 発表標題 愛知県三河湾における台風進路が河口部での複合氾濫リスクへ与える影響評価
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 豊田将也
2. 発表標題 大気 - 海洋 - 河川結合モデルを用いた中小河川の複合氾濫モデリング
3. 学会等名 第69回海岸工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春山和輝
2. 発表標題 中小河川における高潮・洪水の重複による水位上昇特性の評価
3. 学会等名 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
---------	---------