

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01541

研究課題名（和文）沿岸地形の簡約化による広域低地群の浸水被害予測体系の構築

研究課題名（英文）Development of an efficient model of coastal inundation based on reduction of coastal topography

研究代表者

下園 武範 (Takenori, Shimozono)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70452042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、沿岸低地の地形情報を簡約化することで効率的に津波や高潮による浸水を表現するモデルを開発し、広域の沿岸低地群の浸水被害を効率的に一括評価できる予測手法を構築した。モデルは沿岸低地を小領域のネットワークとして表現し、線形理論に基づき小領域間での水の質量・運動量のやりとりを計算するものであり、従来のモデルに比べて少ない計算要素数で浸水過程を再現することができる。開発したモデルを過去の事例に適用して従来モデルと比較した結果、効率的に広域の浸水被害を予測する性能を有することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では長い海岸線に点在する大小沿岸低地が津波や高潮の脅威に晒されており、人口減少による急速な社会変化も踏まえて広域レベルで沿岸防護のあり方を検討しなければならない。そのためには広域的なハザード評価をもとにした俯瞰的・相対的な議論を支える技術が重要となるが、既往の浸水予測手法の高い計算コストが大きな足枷となっている。本研究で開発した計算精度とコストのバランスした新しいモデルは、広域の海岸低地群を対象に一括した浸水予測を可能にし、様々なシナリオのもとで効率的なハザード評価を実現するものである。

研究成果の概要（英文）：The study develops a new model framework for coastal flooding by tsunamis and storm surges, which enables an efficient hazard assessment of numerous small coastal communities along a long stretch of coastline. The model represents coastal low-lying areas as networks of their small subdomains and solve transfers of mass and momentum among the subdomains based on the linear shallow water equations. It is capable of simulating coastal flood processes with a smaller number of computational elements compared to conventional grid-based models. Model applications to past flood events confirmed that it achieves a good balance of accuracy and computational cost.

研究分野：海岸工学

キーワード：浸水 予測 モデル 津波 高潮

### 1. 研究開始当初の背景

長い海岸線を有する我が国においては、無数に点在する大小沿岸低地が津波や高潮による災害の脅威に晒されている。今後も南海トラフ地震による津波や気候変動に伴う台風強化が懸念されており、人口減少をはじめとする社会環境変化を踏まえて防災対策を議論しなければならない。国土全体での海岸防護のあり方を議論するためには広域的なハザード評価をもとにした俯瞰的・相対的な議論を支える技術が重要となる。沿岸低地の浸水予測には二次元浅水方程式（非線形長波方程式）に基づくモデルが確立しており、地震や台風による外力が与えられれば実用上は十分な精度で浸水状況を予測することができる。一方、外力や沿岸の防護状況には不確実性があり、その影響を考慮するためには各要素の振れ幅を考慮した多数の計算が求められる。通常、浸水予測は沿岸地形の効果を反映する必要から個別の沿岸地域スケールで行われる。このスケールは津波や高潮の影響範囲よりも小さいため入れ子計算（ネスティング）が行われ、不確実性評価には膨大な労力と計算資源を要する。沿岸ハザード評価のボトルネックの一つは浸水予測の高い計算コストであり、広域の沿岸低地群の浸水予測を一括して行うことのできる効率的な手法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では広域の沿岸低地群の浸水被害を一括して評価可能な浸水予測手法を構築する。津波や高潮による浸水被害は広範囲の海岸に及ぶが、比較的大きな計算格子でも海域の伝播挙動は再現できる。しかしながら、二次元浅水方程式による陸域への浸水状況の再現には、局所地形を解像するため細かい計算格子が求められる。ここでは、膨大な数に及ぶ沿岸小低地を標高データから抽出し、あらかじめ各低地を地形特性に応じて小領域に分割して簡約化した沿岸地形情報データベースを作成する。広域の津波・高潮モデル（海域モデル）による沿岸水理量をもとに、小領域を計算単位として浸水過程をモデル化することにより、各低平地の浸水状況を高速に予測する手法を開発する。このような浸水予測手法は、台風や地震によって生じる沿岸浸水被害を国全体や地方といった広域レベルで一括して評価することを可能にする。

### 3. 研究の方法

本研究では以上に述べた沿岸浸水予測体系を構築するため沿岸浸水の特性を踏まえた小領域を計算単位とするネットワーク型浸水計算法の開発を行う（図1）。国土数値情報の標高メッシュデータをもとに個々の沿岸低地を分離し、連結領域をラベリング処理することで一定面積以上の沿岸低地に番号をつけて抽出する。各低地内では標高レイヤーごとに領域分割を行って再度ラベリング処理をする。すなわち、各小領域は、沿岸低地番号、標高レイヤー番号、小領域番号、という階層構造でデータベース化される。各小領域は、図心の緯度経度、小領域隣接関係や水域との接線長といった情報に加えて、人口や土地被覆などの地理情報を持つようにする。

次に小領域を計算単位として浸水過程を再現するモデルを開発する。ノードとなる小領域で

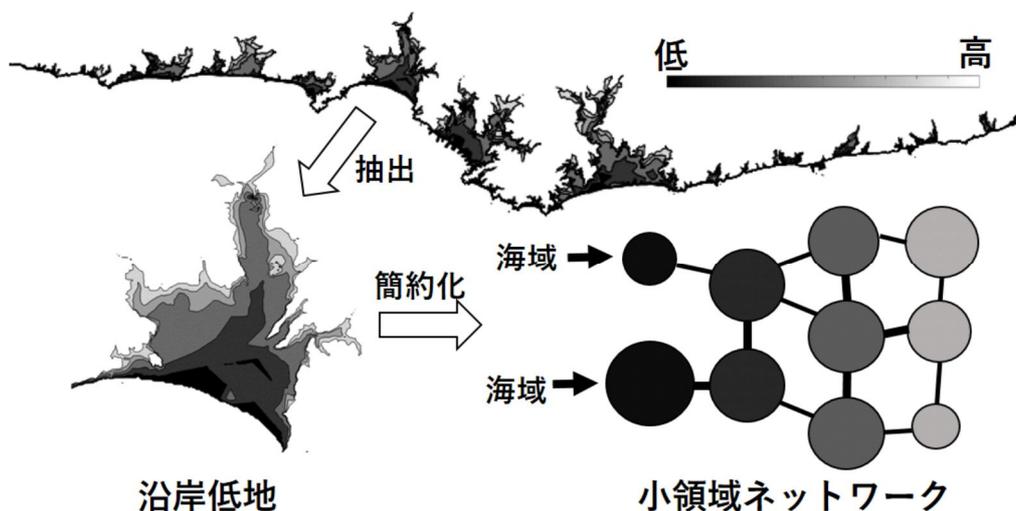


図1 沿岸地形の簡略化とネットワーク浸水モデルの概念図

は連続式により浸水深を求める一方、リンクでは領域間接面積、水位差や底面粗度を考慮して流量を評価する。従来の河川氾濫に用いられる同様のモデルではリンク流量の評価に課題があり、低地に向かって大きな運動量が流入する沿岸浸水の特性を考慮するための改良を加える。津波や高潮による実事例を対象として二次元浅水方程式による計算結果と比較・検証することで、モデル各部の改良や領域分割と精度の関係について検討を行い、計算コストと精度のバランスのとれたモデルを実現する。

上記浸水モデルは入力として海岸での外水位を必要とする。海岸水位を正確に評価するためには沿岸地形を考慮した長波の伝播計算を行う必要がある。特に浅海域の計算では細かいメッシュが必要になることから、従来の方法では外水位評価の計算負荷が高く、様々な波源シナリオを考慮する場合に浸水計算効率化のメリットが十分に活かさないことが想定される。そのため、支配方程式である浅水方程式を解析的に解いて、任意の沖合波形から海岸での水位変化を評価する手法の開発を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) ネットワーク型浸水モデルの開発

沿岸地形データ(10mメッシュ)より低平地を独立した領域として抽出し、さらに各低平地を標高によって小領域に分割して、互いの隣接関係を整理してネットワークとして表現するアルゴリズムの開発を行った。小領域には最低面積を設定して、それを下回るものは隣接領域に統合する処理を通して低平地の地形情報を損なわないようできるだけ少ない分割数で表現するように工夫した。さらに、小領域間の質量・運動量のやりとりを線形長波方程式によって記述することで、ネットワーク型浸水モデルの構築を行なった。構築したモデルの基本的な性能を確認するため、様々な地形条件で検証を行った結果、窪地や微高地が存在する複雑な地形条件でも浸水過程を適切に表現できることが確認された。また、従来の簡易浸水計算法であるレベル湛水法と比べた場合、本モデルでは運動量のやりとりを考慮することから、計算負荷は高いものの、遡上過程を再現することができるため浸水域や浸水深についてより高精度な評価ができる。

図2には本モデルを単一の沿岸低平地に適用した例を示している。図2aに示すような沿岸地形を標高に応じて分割することで図2bのように簡略化する(このケースでは25の小領域に分割)。海に接する小領域では海岸水位をもとに越流公式によって流入量を与え、内陸への浸水は小領域間の質量・運動量のやりとりをネットワークモデルで計算することにより表現する。図2c,dでは、非線形長波方程式を細かい格子で解いた場合(通常の浸水モデル)と本モデルにより求めた最大浸水深の分布を比較している。また、図2e,fには低地内の点a,bにおける浸水深の時間変化について両モデルの結果を比較している。両者はよく一致しており、分割数を大きくすると本モデルの結果はより非線形長波モデルによる結果に近づくことになる。本モデルでは従来の格子によるモデルに比べてより少ない計算要素数で浸水を表現できることから効率的な浸水予測手法としての有効性を確認することができた。

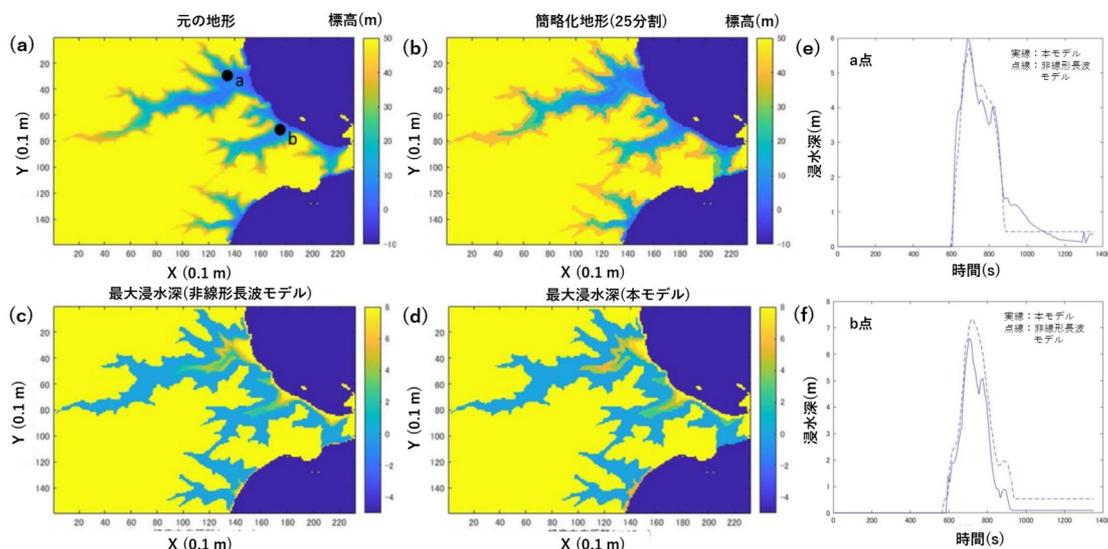


図2 ネットワーク型モデルと非線形長波モデルによる浸水計算の例：(a)元の地形(10mメッシュ)、(b)簡略化地形、(c)最大浸水深(非線形長波モデル)、(d)最大浸水深(本モデル)、(e)、(f)点a,bにおける浸水深

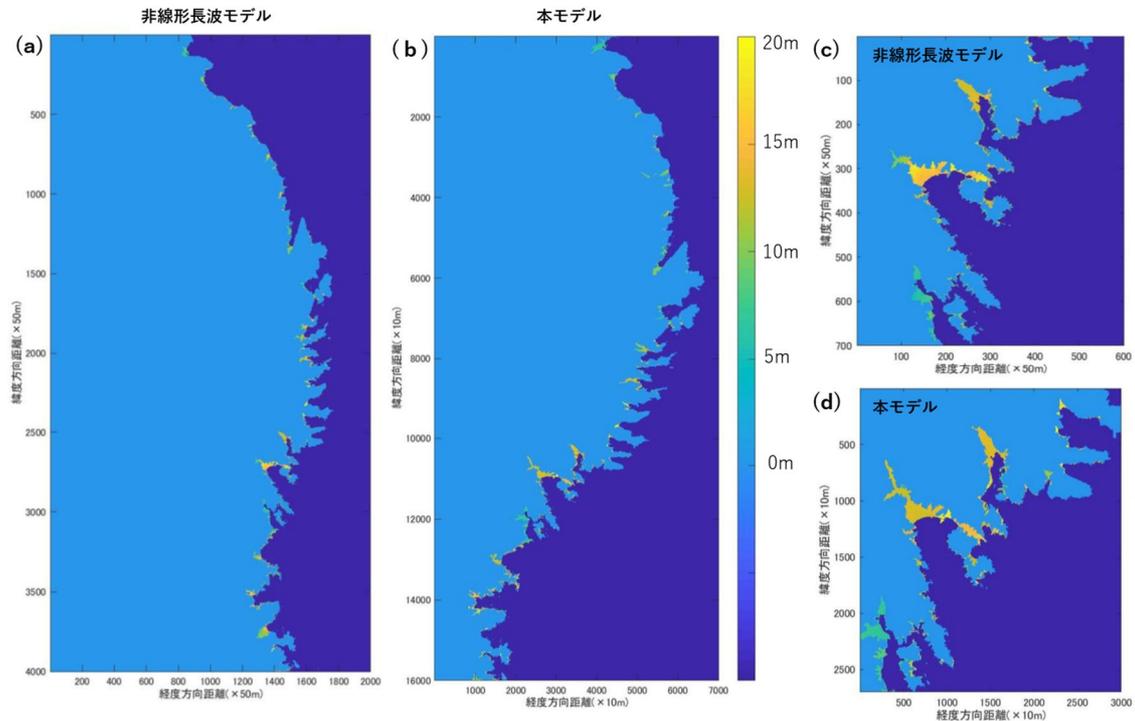


図3 東北地方太平洋沖地震津波による岩手県の浸水計算結果の比較：(a)非線形長波モデルによる浸水位，(b)本モデルによる浸水位，(c-d)陸前高田・大船渡周辺地域の拡大図

## (2) 過去の事例によるモデル性能の検証

多様な地形条件でモデル性能を検証するため，2011年東北地方太平洋沖地震津波による事例に本モデルを適用し，非線形長波モデルによる計算結果（50mメッシュ）との比較を行った．本モデルの入力条件としての海岸水位には非線形長波モデルによる結果を用いることとし，陸域での浸水計算部分のみの計算性能を比較した．図3には岩手県沿岸部で計算された浸水位の比較を示している．両者の浸水範囲はおおむね一致しているものの，陸域の地形に狭窄部が存在するような場合に大きな差が見られた．本モデルでは10mメッシュのデータをもとに領域分割しているため，50mメッシュで十分表現できない狭窄部を通るような浸水も再現することができる．このことにより正確な浸水域の再現につながるケースがある一方，浸水範囲を内陸側に過大に評価するケースも見られた．また，津波痕跡高との比較では両者の精度に大きな差は見られなかった．精度面で改良の余地が残るものの，提案モデルは従来の格子によるモデルに比べて少ない計算要素数で浸水概況を把握することができることから，広域的なハザード評価への活用が期待できる．また，モデルでは海域との境界部で堤防を設定できるため，堤防高と被害の関係を従来モデルに比べて効率的に評価できることが示され（図4），ハード対策の最適化に有効に活用することができる．

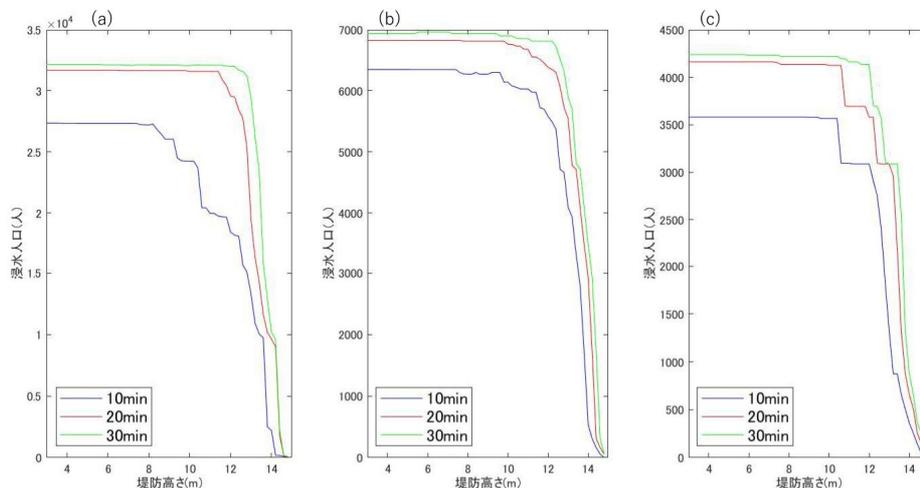


図4 波高15mの津波（周期10,20,30分）による浸水人口と堤防高の関係：(a)新宮，(b)尾鷲，(c)長島

### (3) 海域モデルとの効率的な接続手法の検討

開発したモデルには海岸から低地への流入量を境界条件として与える必要があるが、本研究での検討では海域の計算に非線形長波方程式による計算結果を用いた。しかしながら、この枠組みでは海域の計算負荷が大きくなるため、浸水計算は効率化できるものの、様々な波源に対して計算を行うような場合には計算効率の向上が限定的となる。そのため線形モデルで計算できる水深 100m 程度までの水位波形から海岸線での水位変化を予測する手法の開発を行った。この方法は線形長波理論に基づくカーネル関数を用いて、海岸水位変化を沖合水位変化の畳み込み積分として表現するものである。この手法を東北太平洋沖地震津波の事例に適用したところ、沖合の観測波計から高精度で高速に海岸水位を推定できることが示された(図 5)。この手法を用いれば線形モデルによる沖合の津波計算と浸水計算を直接的に接続することができるため、全体として計算効率を向上させることができる。また、海岸部には堤防が設置されている場合が多く、海岸水位から堤防を考慮して浸水量を評価する必要がある。従来の越流公式による評価方法には精度面での課題があり、水理実験を通してより合理的な評価手法について検討を行った。これらの成果をモデルに実装する段階には至らなかったが、今後のさらなるモデル改良に向けて有用な知見を得ることができた。

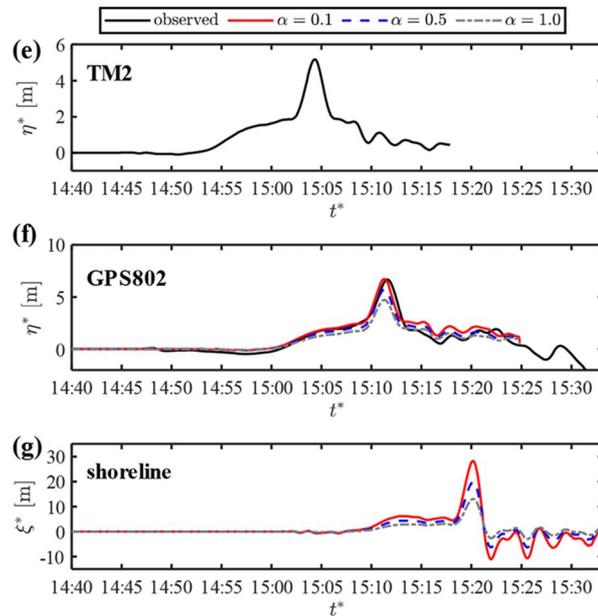


図 5 カーネルによる海岸波形の推定．沖合の津波波形から高速に海岸線上の津波波形を推定することができる(釜石沖の例): (a) 沖合の津波波形, (b) 沿岸の津波波形, (c) 海岸線上での津波波形 ( $\alpha$  は底面摩擦に関するモデルパラメータ)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 Shimozono, T.	4. 巻 476
2. 論文標題 Kernel representation of long-wave dynamics on a uniform slope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Royal Society A	6. 最初と最後の頁 20200333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rspa.2020.0333	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Yamanaka, Y., Shimozono, T.	4. 巻 in print
2. 論文標題 Rapid assessment of tsunami source impacts on low-lying coastal areas using offshore wave superposition and static sweep of onshore terrain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/21664250.2021.2005364	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Shimozono, T.	4. 巻 21
2. 論文標題 Tsunami propagation kernel and its applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Natural Hazards and Earth System Sciences	6. 最初と最後の頁 2093,2108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/nhess-21-2093-2021	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 Xie, W., Shimozono, T.	4. 巻 248
2. 論文標題 Water surge impingement onto a vertical wall: Laboratory experiments and stochastic analysis on impact pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 110422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.oceaneng.2021.110422	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Yamanaka, Y., Shimozono, T.	4. 巻 74
2. 論文標題 Tsunami inundation characteristics along the Japan Sea coastline: effect of dunes, breakwaters, and rivers.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-022-01579-5	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 林 隼佑, 下園 武範	4. 巻 77
2. 論文標題 東北地方太平洋沖地震津波による海岸林の被災要因に関する統計的研究	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 907-912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.77.2_1_907	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Yamanaka, Yusuke., Miyuki Nakamura	4. 巻 72
2. 論文標題 Frequency-dependent amplification of the Sanriku tsunamis in Ryori Bay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1128-1	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Shimozono, Takenori, Yoshimitsu Tajima, Kenzou Kumagai, Taro Arikawa, Yukinobu Oda, Yoshinori Shigihara, Nobuhito Mori, and Takayuki Suzuki.	4. 巻 62
2. 論文標題 Coastal impacts of super typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka areas, Japan.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2020.1744212	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中村みゆき, 山中悠資
2. 発表標題 綾里湾における三陸沖地震津波の沿岸挙動に関する研究
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takenori Shimozone
2. 発表標題 Long wave propagation in convergent bays
3. 学会等名 South China Sea Tsunami Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	山中 悠資  (Yamanaka Yusuke)  (60815108)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教     (12601)	

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
---------	---------