

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：15101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20447

研究課題名（和文）浅海域・堤防・陸域における水理現象をシームレスに考慮した高潮浸水モデルの開発

研究課題名（英文）Development of numerical model of storm surge inundation seamlessly considering hydraulic phenomena in shallow water, levees and land areas

研究代表者

福井 信気（Fukui, Nobuki）

鳥取大学・工学研究科・助教

研究者番号：70962306

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：浅海域及び陸域における高潮に付随する水理現象をシームレスに評価するモデル開発を目標とし、特に浸水における建物のモデル化を重点的に実施した。研究代表者が過去に開発した市街地を対象とした高潮浸水サブグリッドモデルについて、課題として挙げられていた質量保存則への建物情報のフィードバックを行った。開発したモデルは簡単な都市地形を用いた理想化数値実験、市街地模型を用いた浸水実験の再現計算、東京湾沿岸部を対象とした高潮浸水計算について適用し、建物体積による浸水深の上昇が確認され、浸水深と浸水範囲について実験や高解像度計算とより整合する結果を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

市街地を対象とした高潮浸水計算において、建物形状を考慮する場合は建物を解像可能な高解像度計算が求められる、計算負荷の観点から建物よりも粗い解像度で建物形状を考慮できる数値モデルが求められる。当該研究では、建物幅よりも格子間隔が大きい解像度でも建物群を一括で表現可能なモデル構築を行い、質量保存則の改良により浸水深及び浸水範囲について水理実験や高解像度計算とより整合する結果を得ることに成功した。本モデルの運用を、気候変動予測結果を外力とした大量ケースの高潮浸水計算に発展させることによって、気候変動による高潮浸水リスク評価を行うことが可能になると期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of the research project is set to develop a model that seamlessly evaluates hydraulic phenomena associated with storm surge in shallow water and land areas, with particular emphasis on modeling buildings during inundation. The model was developed by the principal investigator for a subgrid model of storm surge inundation in urban areas, and the building information was fed back to the mass conservation law, which had been identified as a problem. The developed model was applied to an idealized numerical experiment using a simple urban topography, a reproduction of an inundation experiment using an urban model, and a storm surge inundation calculation for the Tokyo Bay coastal area. The results are more consistent with experimental and high-resolution calculations of the inundation depth and extent.

研究分野：海岸工学

キーワード：市街地浸水 高潮 建物モデル 質量保存則 浸水

### 1. 研究開始当初の背景

台風襲来時の海域では、風の吹き寄せと海水の吸い上げによる潮位上昇(①高潮)と、強風による短周期の波(②高波)が生じ、これらが堤防を乗り越える(③越波越流)ことで④陸域浸水が発生する。現状の手法では、水の質量と運動量保存を記述する長波方程式によって高潮を、波のエネルギー保存によるスペクトル法を用いて高波を表現する。その後、実験に基づく経験式を用いて越波越流する水の量を求めた後、陸域での浸水を計算する。しかし、各過程における評価手法は不連続であり、各過程間の相互作用などが適切に考慮できていないことから、浸水流量を過小評価する傾向にある。実際に、2018年台風21号では高潮、高波と越波越流の複合現象が発生し、広域で陸域浸水が発生しており、各過程の相互作用を考慮する必要があることを示唆している。ただし、その実現においては、各過程のモデル間における計算条件及び次元が異なることにより境界条件の接続が困難であり、また計算負荷・安定性や対象領域の広さに関わる問題が存在する。

### 2. 研究の目的

1で述べた背景を踏まえ、本研究の研究開始当初の目的は、浅海域及び陸域における高潮に付随する水理現象をシームレスに評価するモデル開発とした。当初の計画では、堤防をまたぐ浅海域及び陸域のシームレス化を目的としていたが、研究項目の一つである建物サブモデルについてさらなる検証及び高度化が必要となり、最終的には建物サブモデルの高度化が主たる研究となった。

### 3. 研究の方法

#### (1) 都市を対象としたサブグリッド高潮浸水モデルの開発・高度化

研究代表者が過去に開発した都市氾濫モデル iDFM (Fukui et al., 2022a) は計算格子内の複数構造物を対象に、格子内の建物個数、東西南北方向の平均投影面積、平均建物高さを関数として格子内の建物群に加わる抗力の総和を運動量保存則にフィードバックするサブグリッドモデルである。本研究では、Fukui et al., (2022a) で課題として挙げられていた質量保存則への建物情報のフィードバックを行い、iDFM の改良を行った。改良では建物解像地形を用いて wet fraction (計算格子内の水体積比率) を毎タイムステップ計算し、質量保存則に組み込むことによって行った。以降、改良前後のサブグリッドモデルをそれぞれ iDFM-v1, iDFM-v2 と呼ぶ。

### 4. 研究成果

#### (1) 簡単な都市地形を用いた理想化数値実験

モデルの検証を行うために平易な地形を用いて理想化数値実験を行う。建物を高解像度地形として入力する建物解像モデル (SRM) による結果を真値とする。計算設定は Fukui et al. (2022) を参考に、一様な形状 (幅: 5 m, 高さ: 6 m) をした建物を建物間隔可変にして配置した建物群 (Regular: 10 m, Regular LD: 5 m, Regular HD: 10 m) 及びランダムな建物形状 (幅, 高さが 2-15 m の一様分布, 迎角を 0-360 度の一様分布で与える) の建物群を標高 0 m の陸域に設置し、水深 10 m の水平床に斜面 (勾配 0.0208) で接続した理想地形を作成した。

中央代表断面における最大浸水深の空間分布 ( $\Delta x = 30$  m のケース) を建物高さとともに示す。

いずれの建物群においても、iDFM-v2 は iDFM-v1 に比べて浸水深が全体的に上昇し、汀線付近 ( $X = 1050-1150$  m) 上における SRM との整合性が向上する。これは、時間発展後の水位には水体積比率 ( $<1.0$ ) の逆数が掛かるため、iDFM-v1 に比べて水位の値が大きく計算され、建物遮蔽による水排除を表現することができる。この傾向は建物密度が大きくなるにつれて顕著に表れることが分かった。一方で、中央部 ( $1150-1300$  m) においては過大評価となり、特に建物密度が大きい場合における内陸部での浸水深の精度向上が必要であることが分かった。

#### (2) 縮小市街地モデルを用いた浸水実験の再現計算

より複雑な都市地形を対象とした検証を行うために、市街地を対象に浸水時の浸水範囲と流速場を計測した Fukui et al. (2022b) の浸水実験の再現計算を行った。この実験では、長さ 45

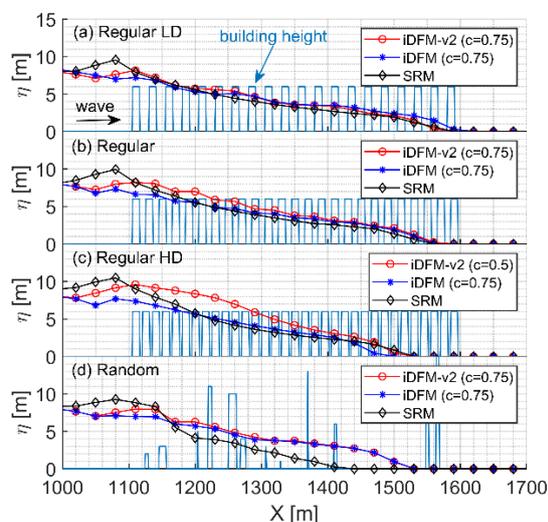


図1 代表断面における最大浸水深 (赤: iDFM-v2, 青: iDFM-v1, 黒: SRM 30 m メッシュ平均), 及び建物高さ (淡青) の空間分布

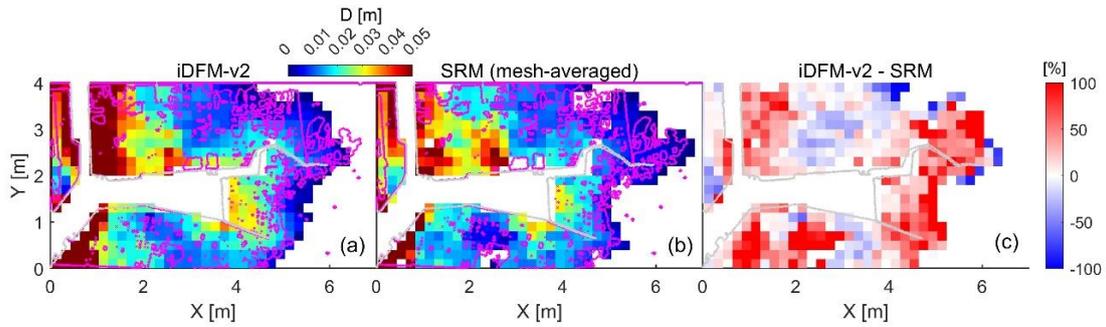


図2 開発したサブグリッドモデル (iDFM-v2) 及び建物解像モデル (SRM) による最大浸水深の空間分布とその相対差分, 赤線は浸水範囲の実験値

m, 幅 4 m の津波再現水槽に海底勾配 1/10 の斜面を, 岸側に平坦部を設け, 和歌山県海南市の沿岸都市部を 1/250 スケールで建物と地形を与えている. 実験では, 遡上時の浸水範囲を蛍光塗料で着色した水により, 流速を発泡粒子の移動から PIV 法を用いて同時計測した. さらに, 容量式波高計 (以降 WG) を計 12 台設置して海域・陸域の水位を計測した. 計測された浸水範囲と浸水深の時系列を比較対象として, SRM, iDFM-v2, iDFM-v1 の精度について検討を行った (図 2). 結果として, 浸水範囲については最大値及び時系列ともに実験結果や SRM と整合する結果が得られた. 最大浸水深の誤差特性は領域ごとに異なるものの, SRM との誤差が 30%以内 (領域全体の平均 24.83%) に収まる範囲が多い. また, 計測地点における浸水深についても, iDFM-v1 よりも浸水深が上昇傾向にあり, SRM および実験結果との整合性が向上した. さらに, 損壊する建物数や浸水面積の時間変化といったマクロ指標を用いてモデル間比較を行うと, 改良前からの浸水深の上昇に伴う損壊率の上昇により, SRM との整合性が向上した.

### (3) 東京湾沿岸部を対象とした高潮浸水計算

東京湾沿岸部の墨田区・江東区を対象に高潮浸水計算を実施した. 気象場には 2019 年台風 19 号の擬似温暖化実験結果を利用し, 海面上昇 1.2 m (ssp-585 シナリオ) と満潮位 1.0 m の条件で行った. 建物の取り扱いは iDFM-v2 及び iDFM-v1, 一般的に用いられる土地利用に基づく粗度モデル (粗度モデルと表記) の 3 種類を検討対象とし, いずれも水平解像度は 30 m とした. 計算の真値として, 建物を含む高解像度地形を用いた建物解像モデル (水平解像度 5 m) を用い, 浸水範囲や浸水深の比較を行った. なお, 建物の投影面積や高さは 3D 都市モデル PLATEAU から得られる建物の形状データを用いて計算している. 浸水範囲の時系列は浸水開始から 4 時間後までは精度よく評価されている. 6-8 時間後までは, iDFM ではやや過小評価であったのが改善され, 最大浸水範囲については iDFM や粗度モデルでは過小評価であった南西部の浸水を再現している. 続いて最大浸水深について各モデルを比較すると, 浸水域の北部で iDFM や粗度モデルよりもそれぞれ平均 45.4%, 146.52%大きくなる傾向が確認され, 浸水深の空間分布も建物解像モデルに近づいた. さらに, 建物による浸水深の上昇が大きい点において, 浸水深の時系列を調べると, 建物解像モデル, iDFM-v2, iDFM, 粗度モデルでそれぞれ最大 2.28 m, 1.89 m (相対誤差 約 17.1%), 1.59 m (相対誤差 約 30.3%), 1.43 m (相対誤差 約 37.3%) となり, iDFM からおよそ 43.5%の精度向上が確認できた. 計算格子内で建物高さを含む標高が静水深として入力される場合, 質量保存則における水位の計算や波先端条件において, 建物の影響が考慮される. このため, 建物が水を遮蔽することで発生する水位上昇が表現される. iDFM-v2 における質量保存則では, 計算格子内の建物内に水は侵入せず建物形状による水の押しのけを考慮するため, 計算格子内に流入する水量が一定の場合はその分だけ水位が上昇したと考えられる.

### (4) 成果のまとめ

当該研究では, 浅海域及び陸域における高潮に付随する水理現象をシームレスに評価するモデル開発を目標とし, 特に浸水における建物のモデル化を重点的に実施した. 質量保存則と建物体積に着目した高度化を行い, 浸水深と浸水範囲の精度の向上を行うことに成功した. 得られた成果は, 査読付き論文にて 3 編, 国際学会発表 1 件, 国内学会発表 2 件発表した.

### <引用文献>

- ① Fukui, N., Mori, N., Miyashita, T., Shimura, T., Goda, K.: Subgrid-scale modeling of tsunami inundation in coastal urban areas. *Coastal Engineering*, 177, 104175, 2022.
- ② Fukui, N., Chida, Y., Zhang, Z., Yasuda, T., Ho, T. C., Kennedy, A., & Mori, N.: Variations in building-resolving simulations of tsunami inundation in a coastal urban area. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 148(1), 04021044, 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 福井 信気, 森 信人, 金 洙列, 志村 智也, 宮下 卓也	4. 巻 78
2. 論文標題 平均化個別建物抗力モデルと適合格子細分化法を用いた大都市の効率的な高潮浸水計算の開発	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_229 ~ I_234
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_229	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 福井 信気, 森 信人, 宮下 卓也, 志村 智也	4. 巻 79
2. 論文標題 建物体積の影響を考慮した市街地における津波浸水計算	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集特集号 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-17025	査読の有無 無
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 Fukui Nobuki, Mori Nobuhito, Kim Sooyoul, Shimura Tomoya, Miyashita Takuya	4. 巻 188
2. 論文標題 Application of a subgrid-scale urban inundation model for a storm surge simulation: Case study of typhoon Haiyan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Coastal Engineering	6. 最初と最後の頁 104442 ~ 104442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coastaleng.2023.104442	査読の有無 無
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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Nobuki FUKUI, Nobuhito MORI, Sooyoul KIM, Tomoya SHIMURA, Takuya MIYASHITA
2. 発表標題 Feedback of Building Structure on Mass Conservation in Subgrid-scale Modeling of Storm Surge Inundation in a Coastal Urban Area
3. 学会等名 AOGS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福井 信気, 森 信人, 宮下 卓也, 志村 智也
2. 発表標題 建物体積の影響を考慮した市街地における津波浸水計算
3. 学会等名 第70回海岸工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuki FUKUI, Nobuhito MORI, Sooyoul KIM, Tomoya SHIMURA, Takuya MIYASHITA
2. 発表標題 SUBGRID SCALE MODELING OF STORM SURGE INUNDATION IN COASTAL URBAN AREA CONSIDERING VOLUME OF BUILDINGS
3. 学会等名 International Conference on Coastal Engineering 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------