

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04670

研究課題名（和文）流れの阻害率に基づく抵抗力モデルの開発 - 低負荷で実行可能な市街地の津波氾濫解析 -

研究課題名（英文）Development of a drag force model based on the flow obstruction rate - A feasible and low-load tsunami inundation analysis in urban areas - .

研究代表者

水谷 夏樹 (Mizutani, Natsuki)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：50356036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、市街地に侵入する津波流れを数値計算で高精度に再現するため、従来のマンニングの粗度係数に替わる底面摩擦モデルを開発することを目的とした。流れのPIV計測から水平平均流速の鉛直分布の勾配を用いて底面摩擦力を推定するとともに、運動量方程式に計測値を当てはめることで概ね正しい摩擦力の推定が可能になった。また、桁を乗り越える流れのPIV計測から鉛直方向の流れに伴う運動量の損失をモデル化する必要があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、非定常流れのせん断応力の直接測定を試み、様々な計測機器を構築する中で概ね正しい値を得られたことは、今後、より複雑な実験条件における抵抗力を計測する上での基準となり大きな前進である。また、研究を進めることによって市街地における建物の影響をこれまでの底面摩擦係数に置き換えるだけでなく、運動量の損失項を導入することで合理的に評価することができ、それによってハザードマップの再評価が可能になるほか、道路などの空間に流れが集中する現象などを再現することができ、より安全な避難経路の誘導が可能になる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a drag force model to replace the conventional model using Manning's roughness coefficient in order to duplicate tsunami flows into urban areas with high accuracy in numerical simulations. The gradient of the vertical profile of the horizontal mean velocity of the flows was obtained using PIV measurements. The bottom friction force was then estimated. By fitting the measured values to the two-dimensional momentum equation, the bottom frictional force was estimated to be approximately correct. Furthermore, the PIV measurements of the flow over the girder revealed the need to model the momentum loss associated with vertical flow.

研究分野：水工学

キーワード：津波 底面せん断応力 街区 粗度係数 運動量損失

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

次の巨大津波の来襲に備え、地域の特性に応じた街区浸入後の氾濫水の挙動を正確に予測し、避難時間の確保を含めてより安全な避難経路を住民に提示する必要がある。

市街地への遡上津波の氾濫計算は、市街地の範囲が数 km～十数 km 四方に及ぶ場合もあるため、個々の建物を解像する計算格子サイズを選択することは事実上難しい。その結果、一つの計算格子内には複数の建物が含まれる場合があり、現状では計算格子面積に対する建物の占有面積を基に経験的にマンシングの粗度係数を与えて、底面摩擦による「流れにくさ」に変換して計算を実施している。結果として、建物背後に通過する津波の流量が正しく求められないことや、方向別の粗度係数を個別に設定できないことから、街区内の流れを正確に予測することが難しい。

市街地への遡上津波の氾濫計算は防災研究であり、実務に適用できるような計算負荷(格子の粗さ)での高精度計算手法が求められていることから、計算精度の低下要因となっている底面摩擦モデルの改良は急務かつ極めて重要な問題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、市街地の建物の配置によって変化する各格子内の方向別の流れの阻害率を建物の投影面積に基づいて定式化し、マンシング・モデルに代わる新たな抵抗力モデルの構築を目指す。また、そのモデルを組み込んだ津波氾濫計算を実際の市街地に対して適用・検証を行い、実務に耐えうる計算負荷(格子の粗さ)で高精度な市街地津波氾濫モデルの開発を目指すものである。

### 3. 研究の方法

実験水路を用いて、建物の数や大きさ、道路幅など、種々の条件を変化させた建物群に対する透過流量、流速、水位、建物群に作用する抵抗力などの計測結果から、一定幅(格子サイズ)の建物群に対する流れの阻害率に応じた抵抗力の変化特性を明らかにし、流れの阻害率に応じた抵抗力モデルの開発を目指す。

具体的には、新たに流れのせん断応力を直接測定できる機器を構築し、計測台上の単一の建物、あるいは建物群に作用する流れの抵抗力と建物群の周囲の水位、流量との関係から運動量の変化量を求め、建物群が周囲の流れ場に与える影響を定量的に検討する。同時に、建物群を含む一定幅に入射する流量と透過流量の関係を流入方向から見た建物の投影面積で評価し、抵抗力、水位と流量の関係から、建物群による流れの阻害率に基づく抵抗力モデルの開発を目指すものである。

開発した抵抗力モデルについて、水理実験に用いた大小の水槽スケールに対する遡上津波の数値計算を行い、計算格子サイズの変化に対する抵抗力モデルの応答特性について明らかにする。また、必要に応じて追加実験を

行い、街区に対して斜め入射する場合など、抵抗力モデルの精度検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) せん断応力の直接測定

本研究で最も挑戦的な課題はせん断応力の直接測定であった。建物を配置した状態での計測の前に単純な段波による水平床でのせん断応力の直接測定を試みた。

本研究において主に使用した実験水路では、水平床におけるせん断応力のオーダーが数 Pa～十数 Pa 程度でこれらの値を精度良く計測する機器が市販品では見つからなかったことから独自の計測装置の開発を行った。最初は4つのステンレス球によって支持された作動プレートを設置し、これに作用するせん断応力を歪みゲージで直接計測する方法を試みた。しかし、作動方向が一方向にならないことから水平二成分や回転成分を分解し、正しい(であろう)計測値を得る事が困難であった。次に4本の板バネで支持された作動プレートの移動変位量をレーザー変位計で非接触に計測する方法を試みた。しかし、これも段波の先端によって作動プレート上に不均一に加重が作用するとプレートにモーメントが発生し、計測値からせん断応力だけを分離することが困難であった。様々な計測方法を試行錯誤する中で、20年以上前に製造された微小せん断応力計を入手することが出来たため、これを使用して計測を行った。この結果、段波の先端部から最大水位までの微小時間帯においては概ね正しい(であろう)計測値を得ることができたが、水位勾配が逆勾配となる最大水位発生時以降の水位が減少する時間帯では妥当な値とならず、時間的に急激に変化する非定常なせん断応力の直接測定は困難が伴った。

#### (2) 流速計測からのせん断応力の推定

前述のせん断応力の直接測定の困難さに加え、実験スケールの段波が生じさせるせん断応力のオーダーを知る必要もあり、水平床における段波の流速計測をPIVによって行うことでせん断応力の推定を行った。

図1は段波先端部の流速計測結果の一例である。水平床から0.56mmの近傍まで流速を得ることができた。これらの流速値からせん断応力を推定する方法として平均水平速度の鉛直分布を求め、その鉛直勾配から推定することができる。ただし、非定常流れであるため平均操作に一般的な時間平均を使うことができない。そこでPIVの特性を生かし、水平方向に空間平均をとって平均水平速度を求めた。

図2は平均水平速度の鉛直分布である。こ

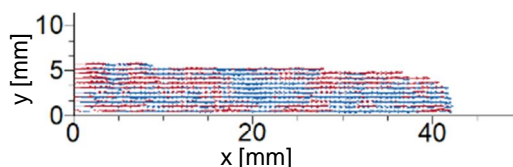


図1 水平床を進む段波先端部の流速分布

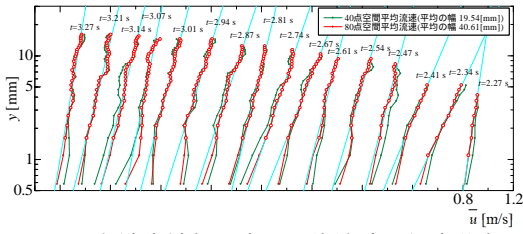


図2 段波先端部の水平平均流速の鉛直分布

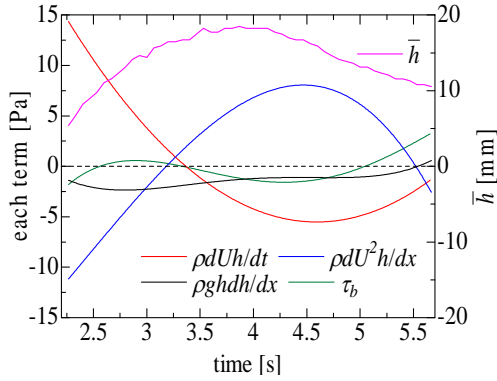


図3 PIVの結果を用いた一次元運動量方程式によるせん断応力の推定

これから水平床に作用するせん断応力は数 Pa ~ 10Pa 程度であり、事前の予測値と一致する結果を得た。

一方、せん断応力を推定するもう一つの方法として運動量方程式を解く方法がある。

$$\frac{\partial U h}{\partial t} + \frac{\partial U^2 h}{\partial x} + g h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_b}{\rho} = 0 \quad (1)$$

実験に用いた水路は幅 40cm であり、流れは一方方向に流下するものと仮定して、(1)式の一次元運動量方程式に PIV の計測結果を代入してせん断応力の推定を行った。図 3 はその結果である。

$\bar{h}$  はコントロール領域内の平均水位の変化であり、 $\tau_b$  は推定されたせん断応力、その他は一次元運動量方程式の各項の時間変化である。運動量の時間項(赤)と移流項(青)は時間的に正負対照的な変化をしており、それらの差と圧力項との和が釣り合うようにせん断応力が推定される。ただし、せん断応力が負値を示すことがあり、この段階ではこれを説明できる合理的な理由が分からなかった。

しかし、前節(1)で述べたように、古いせん断応力計を入手することができたため、再度計測を行った際に流れの連続式を確認したところ、(2)式が厳密には成立していないことがわかった。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} + \frac{\partial V h}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

(2)式に PIV の計測値を当てはめ、鉛直断面計測では求めることができない左辺第三項を残差として求め、計測値  $U$  を使って次式のように変形した。

$$U \times \frac{\partial V h}{\partial y} = \frac{\partial U V h}{\partial y} - V \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3)$$

ただし、右辺第二項は鉛直断面 PIV の計測結果から求めることができない。実験時の水面形の観察から水路横断方向  $V$  は小さく、

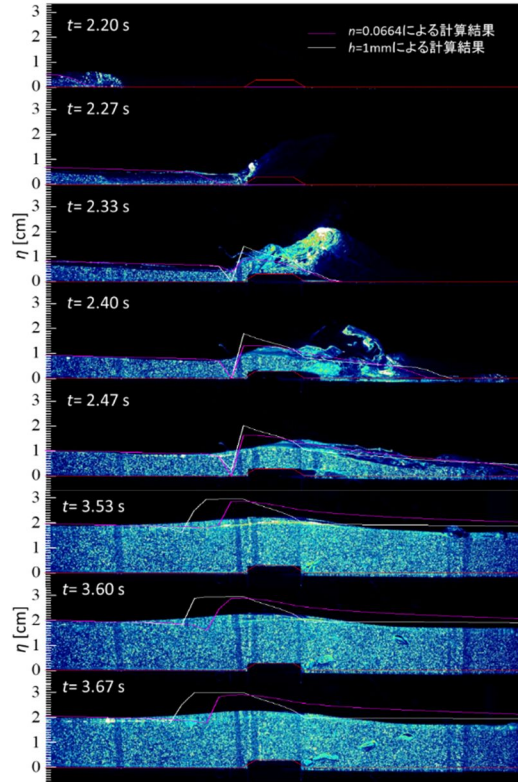


図4 高さ 3mm の桁周辺の段波先端部の変化

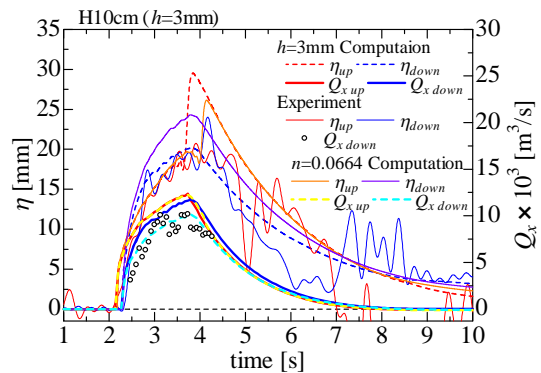


図5 高さ 3mm の桁による桁前後の水位と流下流量の時間変化

$\partial U / \partial y$  も小さいと予想されるが、正確な値は分からない。ここでは右辺第二項を無視し、(3)式を使って運動量方程式を一次元ではなく(4)式のように平面二次元として取り扱った。

$$\frac{\partial U h}{\partial t} + \frac{\partial U^2 h}{\partial x} + \frac{\partial U V h}{\partial y} + g h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_b}{\rho} = 0 \quad (4)$$

すると図 3 で見られたせん断応力の負値がなくなり、せん断応力計の計測結果やこれまでの推定値をある程度説明できるようになった。

今後は、(3)式の右辺第二項を計測値から求める必要があり、鉛直断面 PIV 計測に加えて代表断面の平面二次元計測を行うなど、結果の検証が必要であると考えている。

### (3) 桁を乗り越える流れの計測

本研究の目的の一つは市街地における氾濫流の評価である。せん断応力の計測と並行して桁を乗り越える流れに対して PIV 計測を行い、桁前後の水位、流速から透過流量を求

めた。また、同条件で平面二次元数値計算を行い、桁高さを物理的に与えたものと、粗度係数として与えたものについてそれぞれ検討を行った。

図4は、高さ3mmの桁を乗り越える段波先端の様子である。また、図5は同条件の水位と透過流量の時間変化を示す。これらの結果から、透過流量を再現するためには粗度係数を通常値の8倍の値を与える必要があった。しかしそれでも桁前後の水位変化を再現するには至らず、図4で見られるような桁による鉛直方向の流れの変化と流れの衝突に伴う非静水圧成分の発生が数値計算の誤差の原因であると考えられ、流れ場の上下動に伴う運動量の損失をモデル化する必要がある。

#### (4) 建物配置の違いによる水理特性

さらに段波流れの中に建物を複数配置し、その数と配列を変化させて街区内の水位や流速の特性について検討した。単位面積当たりの建物占有率が同じであっても配置が異なれば当然流れの特性は変化する。一般的に建物占有率が同じであれば、経験的に与える粗度係数は同じである。しかし、本実験の結果、流れの方向特性が建物の配置方向特性に依存する可能性が高いことが分かった。また、流れのFr数が小さいほど建物の影響を受けやすく、特に0.5を下回ると影響度が大きくなることが分かった。

実験結果から、単位面積当たりの建物占有率に加えて方向別の鉛直投影面積などがパラメータとして有効である可能性が高く、スケール等も含めてさらに検討を行う必要がある。

#### (5) 今後の課題

以上のように、本研究ではせん断応力の直接測定の困難さがあったが、PIV計測をうまく組み合わせることでせん断応力を高い信頼性をもって計測、推定することが可能であることがわかった。固定床におけるせん断応力の正しい値が確定すれば作動プレートによる計測も可能であり、プレート上に街区を設定するなど、より複雑な建物配置に対する計測、計算も可能になると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 水谷夏樹	4. 巻 Vol.75, No.2
2. 論文標題 ドライベッド上を進む段波の内部流速場と 時空間平均によるせん断応力の評価について	5. 発行年 2019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_7 - I_12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.I_7	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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kensei Kudo, Toshinori Ogasawara
2. 発表標題 Experiments on the Characteristics of Impact Forces of Bore Waves with Rectangular Drifting Objects
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ニコラス エコ サプトラ, 水谷夏樹
2. 発表標題 PIVデータに基づく非正常段波に作用する底面せん断応力評価の試み
3. 学会等名 土木学会令和2年度全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南 智弥, 荒木広周, 中村彩乃, 水谷夏樹
2. 発表標題 ドライベッド上の桁を乗り越える段波に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会令和2年度全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村優一, 佐藤瑠聖, 小笠原敏記
2. 発表標題 自動車を伴う段波衝突力に関する水理模型実験
3. 学会等名 平成30年度土木学会東北支部術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川拓実, 熊谷憲一, 小笠原敏記
2. 発表標題 建物の配置形式の違いによる津波氾濫流の水理特性について
3. 学会等名 平成30年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木広周, 中村彩乃, 水谷夏樹
2. 発表標題 ドライベッド上を遡上する段波の乱流構造
3. 学会等名 土木学会令和元年度全国大会第 74 回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshinori Ogasawara, Ryusei Satoh
2. 発表標題 Hydraulic Experiment on Collision Force on a Building of Tsunami Bore Accompanied by an Automobile
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村彩乃, 荒木広周, 水谷夏樹
2. 発表標題 陸上遡上する段波の水粒子速度分布と底面せん断応力の評価
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木広周, 中村彩乃, 水谷夏樹
2. 発表標題 ドライベッド上を遡上する段波の乱流構造
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenichi Kumagai, Toshinori Ogasawara
2. 発表標題 Hydraulic experiment on drifting automobile group affected by tsunami
3. 学会等名 Global Conference on the International Network of Disaster Studies in Iwate, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Natsuki Mizutani, Jinji Umeda
2. 発表標題 Relationships between fluid motion and pressure variation by dam-break flows colliding with vertical wall
3. 学会等名 The 36th International Conference on Coastal Engineering (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	小笠原 敏記  (Ogasarawa Toshinori)  (60374865)	岩手大学・理工学部・教授    (11201)	

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