

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14733

研究課題名（和文）遡上津波による沿岸石油コンビナートタンク群への作用波圧特性に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Basic study on wave pressure acting on petroleum tanks due to run-up tsunami

研究代表者

長山 昭夫 (nagayama, akio)

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：40621438

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：遡上津波による構造物への波圧推定は静水圧近似を想定した手法が津波避難ビルの設計指針等に採用され一定の成果を挙げているが、これらは単一構造物壁面を対象に検討されたものであり、構造物が規則的に配置された条件下での波圧についての検討はなされていない。また近年、3次元流体解析により複数配置された条件下での構造物への作用波圧の検討が実施されその特性が明らかにされつつある。

そこで本研究は規則的に配置された円柱群を対象とし設置間隔、作用波圧と比エネルギーの関係について数値計算と模型実験により検討を行った。その結果、格子配置された円柱群における円柱側面への波圧変動特性は格子間隔に影響を受けることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

格子配列に設置した円柱群における無次元波圧は円柱の設置間隔を変化させることで後列円柱のみならず前列円柱でも変動すること、最大無次元波圧作用時の円柱側面における比エネルギーの支配的な水頭が著しく変化することを明らかにした。

実際の沿岸部の都市部では構造物が群体として配置されているため、本研究結果により従来のハザードマップの高精度化、津波避難ビルの設計指針の高精度化、住民避難に関する効果的な提案に関して貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Conventionally, for the estimation of a wave pressure to a structure by a tsunami, a method assuming hydro static pressure has been proposed. The method is adopted as a design guideline for the tsunami evacuation building. However, the method was targeted to the wall surface of a single structure. Verification under the condition that a plurality of structures are arranged is not sufficient.

From this background, this study covers regularly arranged cylinder groups. The relationship between the installation interval of the cylinder, the generated wave pressure and the specific energy was studied by numerical calculation and model experiment. As a result, it was found that the wave pressure characteristics to the cylinder in the grid-arranged column group are strongly influenced by the lat-tice spacing.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波 遡上津波 openFoam

## 1. 研究開始当初の背景

2011年の東北地方太平洋沖地震津波による沿岸内陸への浸水は、地域社会に甚大な被害を与えるとともに、従来の静水圧近似モデルによる浸水想定範囲の予測の限界を示した。つまり想定を超えた津波による遡上波は、地形条件、構造物形状や配置条件に大きく影響を受け、その先端部は分離と結合を繰り返し多くの構造物を破壊した。一方、これまでにドライベッドを遡上する津波の解析については数多くの研究が実施されており、例えば Bernard が津波先端部の内部構造を分離領域・境界領域・波の先端部の特異点と定義し議論を展開している。流体力学における気固液の境界、特に液体の接触角についての議論は古くからなされており、Young の式を基にした数多くの検討がなされている。津波による構造物への作用波圧についても多くの検討がなされているが、構造物により津波の界面変動がどのように影響を受けるかの議論は不十分である。

一方、地震津波によるタンクへの作用波圧に関する研究は、これまでに一定の成果を挙げている。たとえば榊山は、津波遡上流がタンクに作用する場でのタンク周辺の水位、圧力とタンクに作用する流体力を常流と射流の条件下で測定した結果をまとめている。また朝倉らは遡上津波の無次元作用高さから津波波圧を推定し、津波避難ビル等に係るガイドラインインとして広く使用されている。しかしながら既往研究の多くは単体タンクや単体構造物を対象とした検討に留まっており、実際の石油コンビナートのようにタンク群が規則的に配置された条件下での津波による作用波圧やその周辺の水位変動については不明な点が多い。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、沿岸構造物を群体とみなし遡上津波先端部の3次元流動を解明し、これをもとに遡上津波の沿岸構造物群への作用波圧低減手法を示すことである。対象沿岸構造物を石油貯蔵施設である石油コンビナートのタンク群に的を絞り、[1] 構造物周辺の津波流動における群体効果の評価 [2] 遡上津波のタンク群に対する波圧特性の評価 [3] 防波堤・防油堤による遡上津波抑制効果の評価を行う。

## 3. 研究の方法

- (1) 直立型模型に対する遡上津波の水位変動の再現精度を向上させるために VOF モデルに動的接触角を導入し、その再現精度について検討を行った。
- (2) タンク群を模した円柱群を格子状に設置し、格子間隔を変化させた場合の円柱群への作用波圧と円柱周辺での水位変動特性について検討を実施した。
- (3) 規則的に配置された円柱群を対象に円柱設置間隔、作用波圧と比エネルギーの関係について数値計算と模型実験により検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 直立型模型に対する遡上津波の水位変動の精度向上

数値モデルは3次元数値流体解析ライブラリ OpenFOAM を使用した。ソルバは Higuera らが混相流計算 (VOF) ソルバ interFoam をベースに造波・境界条件を改良した olaFoam とした。非圧縮・混相流ソルバ interFoam の支配方程式は、連続式と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式である。この式に対して有限体積法で離散化し、PISO 法で流速と圧力を算出する。また気液界面の追跡については VOF 法 (Volume Of Fluid) を使用し、さらに界面の数値拡散を抑制するために人工圧縮項  $Ca$  を導入した移流方程式を採用している。また Higuera らは、Active boundary と称するデジタルフィルターを導入し、入射した波の流速と逆向きの流速を与えることで反射波の発生を抑制している。液滴の接触角と界面エネルギーについて Yong の式に基づき、液滴を対象とした平衡状態とした。また動的接触角にはヒステリシス性があり、前進接触角と後退接触角では異なる値をとることがわかっている。今回は Faghri らが提案式を利用した。

オランダ海洋開発機構 (MARIN) で行われた Breaking Dam Flows のベンチマークモデルを使用し、提案モデルの整合性について検討をおこなった。このモデルは図-1 に示すように Dam Break モデルに直方体を追加した3次元モデルであり、図中の CH02 と CH04 において水位変動の観測値が取得されている。また今回は使用ソルバの特徴である人工圧縮項  $Ca$  についても検討した。その結果の一部を図-2 に示す。CH04 において 2.5s 付近までは、重力による水面の低下を示しており、どの case においても実験値と一致することがわかる。2.5s 以降は、崩れた水が反対側の壁に衝突後、反射してきた時の水面変動を示しており全体として実験値をほぼ再現できていることがわかる。また 2.5s から 3.0s 付近の初期の水位上昇では、case02 と case03 のほうが case01 よりも再現性が高いことがわかった。ほかの CH においても同様の結果であり、動的接触角を設定することで流体の混合過程に違いがあることがわかった。人工圧縮項  $Ca$  が水位変動に与える影響については、大きな違いはなく今回の条件下では  $Ca$  が水位変動に与える影響は小さいことがわかった。以上より、人工圧縮項を考慮した VOF モデルに動的接触角を導入することで水位変動の再現精度が向上することがわかった。

直立型模型周辺の水位変動に関する実験と数値計算の比較を行った。計算領域については図-3 に示す。また遡上津波による水位変動は直方体の重心位置から対称になることが想定されるため、計算領域は直方体重心位置から半分の範囲を対象とし、直方体を含む壁面を鏡像対象の境界条件とした。図-3 の左側境界を造波の入射境界とし、入射条件は、波高  $H=6\text{m}$ 、周期  $T=56\text{s}$  の Cnoidal 波とした。今回は、直方体模型の重心位置を  $x=0\text{m}$ 、 $y=0\text{m}$  とし、沖方向を正とし、岸沖方向は  $x=30\text{m}$  から  $-20\text{m}$ 、沿岸方向では  $y=0\text{m}$  から  $35\text{m}$  までの範囲を対象とした。直方体模型の重心付近 ( $y=5\text{m}$ ) における岸沖方向における水位変動は直方体模型よりも沖側にあたる位置 ( $x>0\text{m}$ ) での計算値は実験結果の再現性が高いことがわかった。一方、直方体模型背後に相当する位置 ( $x<0\text{m}$ ) での計算結果の再現性は低かった。また、直方体直上の  $x=0\text{m}$  における水位変動については、計算結果の方が実験値よりも大きな値になった。これは直方体壁面に衝突した津波先端部が、噴流のように垂直方向に打ち上げられる現象であり、今回の実験で使用した容量式波高計では、気相を含んだ急激な水位変動を正確に測定することで出来ないためであることがわかっている。また、 $47\text{s}$  から  $48\text{s}$  にかけて急激な水位上昇と、 $50\text{s}$  以降の水位下降について数値計算は実験結果とほぼ等しいことから、遡上流体が模型壁面に衝突し、垂直方向に打ち上げる現象の再現性を有していることがわかる。図-4 に示す  $y=15\text{m}$  の位置での水位変動については、模型よりも沖側の  $x$  が正の位置での計算値と実験値の再現性は高く、模型よりも岸側の  $x$  が負の位置での再現性は高くない。これは、模型直上の津波 jet 流、模型への越流や回折流など複雑な流れ場が形成されるために再現性が低くなることが推測される。津波先端部の直方体模型への衝突前後の界面変動の検討を行った。その結果を図-5 に示す。図中の左は模型実験において取得した画像を示し、右はセルの液相占有率が 0.1 を界面と仮定し描画したものである。(A) は、実験において、左から遡上してきた流体が直方体模型の直立壁面部に衝突し、鉛直方向に水塊が打ち上がる画像であり、(a) はそれに対応する計算結果を示したものであり、水位上昇の傾きはほぼ一致していることから、数値計算は、実験での水塊の打上現象についての再現性は高いことがわかる。次に(B) は、打ち上げられた水塊が後方の沖から流入した流体に押し出されることで、空中で湾曲する現象を示し、(b) はそれに対応する計算結果である。これより計算結果は、実験における水塊の湾曲についての再現性は低く、この影響が水位変動測定誤差の要因になったことがわかる。また、(C) は大気中の湾曲した水塊が自由落下し直方体模型に衝突する際の画像を示す。(c) はそれに対応する計算結果である。この結果から実験では、衝突した水塊は四方に拡散することに対し、計算結果は、岸沖方向のみに広がるといった差異も確認できる。

## (2) 格子配列円柱群への作用波圧と水位変動特

計算領域については図-6 に示すように高さ  $0.6\text{m}$ ・長さ  $3.45\text{m}$ ・幅  $1.2\text{m}$ 、水深  $0.405\text{m}$  の水路を想定した。また左側境界を造波の入射境界とし、岸側に  $10\%$  勾配の斜面を設け、その斜面部の一部に水深と同じ高さになるように平面ステージを設置した。また、円柱は図-7 に示すように実際の備蓄基地に設置されている備蓄タンク形状寸法を模擬して、直径

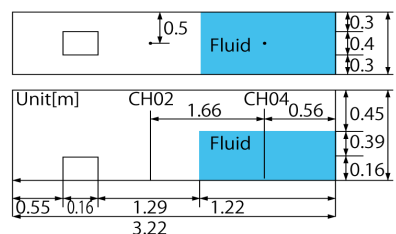


図-1 ベンチマークの計算領域

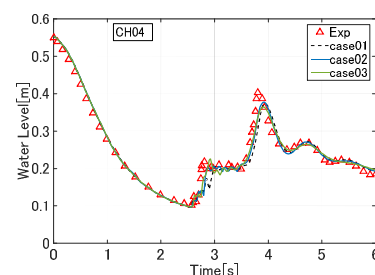


図-2 CH04 における水位変動

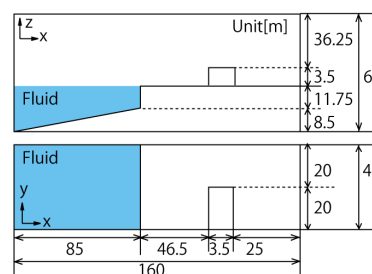


図-3 計算領域の側面図と平面図

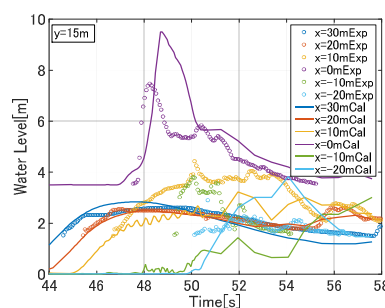


図-4 実験値と計算値の比較

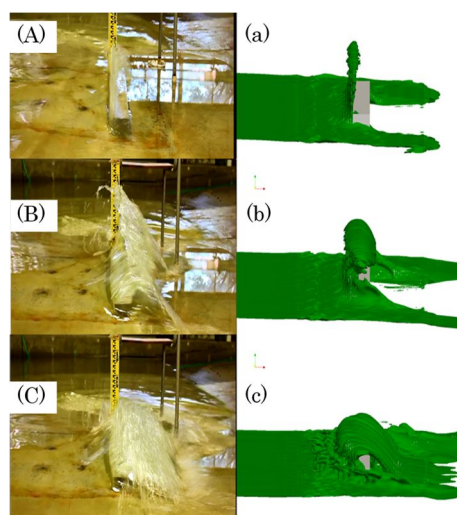


図-5 実験と計算結果における津波 jet 流の比較

$D=0.2\text{m}$ 、高さ  $H=0.05\text{m}$  とし、格子状に 6 個設置した。また図-6 の最沖側の緑色円柱を基準とし設置間隔を設定し、沿岸方向距離を  $L_s$ 、岸沖設置距離を  $L_o$  とした。case01 から case04 の設置条件で検討を行った。現実のタンクの配置は、格子状または千鳥配置になっているが、設置間隔については直径  $D$  が多いこと、 $2D$  以上の広さは現実的ではないことを考慮した。まず前列円柱における各点 (P01 ~ P08) における波圧変動について衝撃波圧と持続波圧の発生について確認した。その結果の一例である前列円柱各点での波圧変動を図-8 に示す。この図より前列円柱の前面 (P01) において、無次元波圧が静水圧の 6 倍を超える急激な圧力上昇 (衝撃波圧) が生じ、その後一旦下降し静水圧の 3~4 倍程度の圧力が継続する (持続波圧) ことが確認できる。このことから使用した数値モデルは、衝撃波圧と持続波圧について再現可能であると判断した。次に中央列円柱側面での作用波圧に関して検討を行う。これは前列と後列に円柱が存在することで格子間隔に強く影響を受けることが想定されるためである。図-9 には case01 の一例を示す。この図から中央列円柱に作用する最大波圧は、各 case において静水圧の 5 倍~7 倍程度となり格子間隔の条件次第では前列円柱に作用する波圧よりも大きくなることがわかった。さらに各測定点における圧力上昇に違いが生じることが判明した。また各 case での最大波圧発生位置は前列円柱のように前面位置では生じないことがわかった。これは遡上津波先端部が前列円柱を回り込んで中央列円柱の斜前面から左面付近に衝突するためであることが考えられる。次に格子間隔が波圧に与える影響について検討を行った。沿岸・岸沖方向距離がともに  $1D$  である case01 の場合、斜前面位置に津波先端部が衝突し波圧が上昇し、それが継続して高い状態にあるが、その他の位置においては急激な圧力が発生しにくいことがわかる。次に case01 に対して岸沖方向距離  $L_o$  が  $2D$  である case02 の結果を図-10 に示す。この図より津波先端部の斜前面 (P12) への衝突した後の急激な圧力上昇は同じであるが、case01 にはない前面 (P11) における急激な圧力上昇が確認できる。これにより円柱間隔が  $1D$  と狭い場合、遡上した津波先端部が密な円柱配置により運動を妨げられ作用波圧は小さくなる傾向にあることがわかる。一方、case02 は沿岸方向距離  $L_s$  が  $1D$  で狭く、岸沖方向距離  $L_o$  は  $2D$  と広いため、円柱間から遡上した津波先端部が十分に加速した状態で円柱に衝突することが想定され中央列円柱には静水圧の 7 倍近い圧力が作用したことが考えられる。

### (3) 格子配列円柱群への作用波力と比エネルギーの検討

模型実験は平面水槽を使用した。平面水槽は岸沖方向  $30\text{m}$ 、沿岸方向  $14\text{m}$ 、沖側水深  $0.605\text{m}$ 、岸側に勾配  $11\%$  の斜面があり、この斜面には静水面と同じ高さに幅  $3\text{m}$ 、長さ  $2\text{m}$  の平面ステージが造成されている。また沖側端部にプランジャー型造波装置が設置されている。今回対象とした円柱は直径  $D$  が  $0.1\text{m}$ 、高さを  $0.05\text{m}$  とし、平面ステージ端部から岸沖方向に  $0.3\text{m}$ 、沿岸方向に  $0.3\text{m}$  の位置を円の中心とし 6 個設置し、円柱直径  $D$  を基準に沿岸方向と岸沖方向

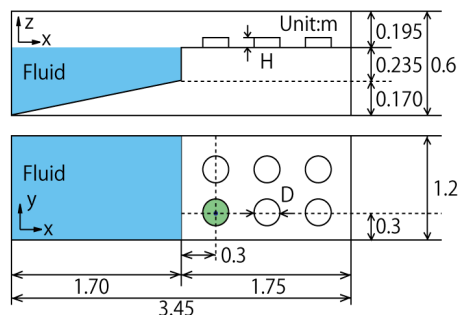


図-6 計算領域

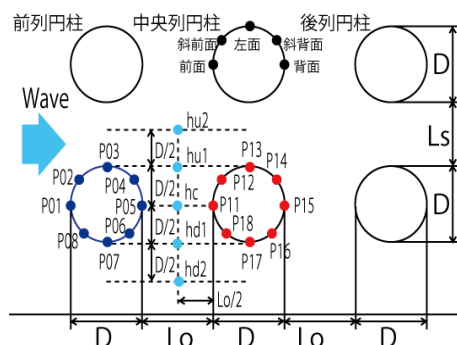


図-7 円柱配置間隔と測定箇所

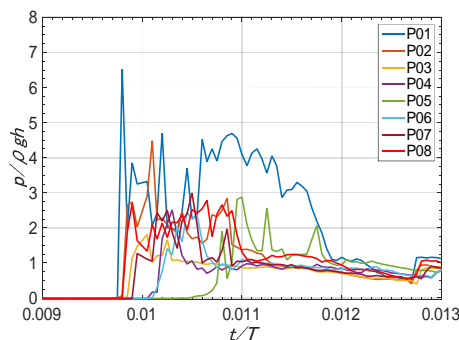


図-8 前列円柱各点での波圧変動

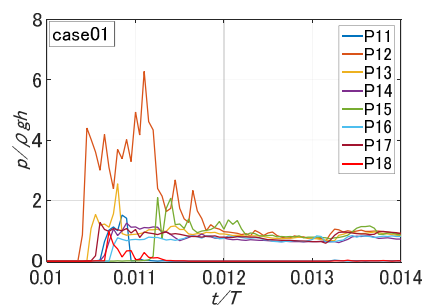


図-9 case01 における波圧変動

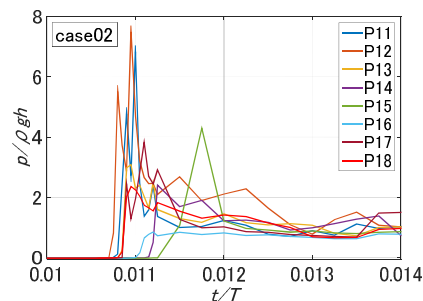


図-10 case02 における波圧変動

をの間隔を 0.5D(case1) ,1.0D(case2) ,2.0D(case3) とした(図-11) .また図に示すように前列円柱 A・B , 後列円柱 C・D と称する .前列と後列の中央に位置する円柱 B と D には分力計を設置し岸冲方向成分の津波波力を測定した .各 case における前列円柱 A・B と後列円柱 C・D における無次元最大波力について検討を行った .各円柱に作用する最大波力  $F$  を単体円柱に作用する最大波力  $F_0$  で除した結果を図-12 に示す .この図より ,円柱の設置間隔を变化させることで後列円柱のみならず前列円柱での無次元最大波力も変動することがわかる .前列円柱は設置間隔が狭いほど大きくなり ,間隔が 0.5D と狭い case1 と間隔 2.0D の case3 を比較すると約 10% の違いが見られる .これは前列円柱と後列円柱との間に津波による水が滞留するためであり ,円柱間距離が狭いほどその影響が大きくなっているためである .一方 ,後列円柱に関しては C・D では異なる特徴があることがわかる .両端を円柱に挟まれた円柱 D においては ,設置間隔が 1.0D の case2 が最も無次元最大波力が大きくなるが ,片側のみに円柱が設置されている円柱 C においては設置間隔が狭いほど無次元最大波力が小さくなる傾向にあることがわかる .

図-13 に各円柱側面における波圧測定位置を示す .今回 ,まず単体円柱を設置した状態で円柱側面を 10 度ずつずらし計 36 箇所の波圧を測定し ,波圧の対称性を確認した .その後波圧の特性を検討するため図に示す波圧位置を選定した .次に図-14 に設置間隔が最も狭い 0.5D(case1) ,における後列円柱側面への無次元波圧を示す .この図より ,設置間隔が狭い case1 における前方側面では比較的穏やかな圧力上昇になることに対して ,設置間隔が広い case2 においては ,13.5s から 13.75s 付近で急激な圧力上昇が確認できる .またこの圧力上昇については ,設置間隔が最も広い 2.0D(case3) においても発生していることを確認している .一方 ,最も岸側の p22 では ,設置間隔の有無に関係なく大きな波圧が生じている .これは後方円柱よりも陸側に構造物が存在しないため ,流の剥離や渦が発生していることが想定される .次に図-15 に後列円柱にける最大無次元波圧作用時の比エネルギーの内訳を示す .図中における各観測点の比エネルギーは左から順に case1 から case3 までを示している .この図より比エネルギーの大部分は圧力水頭であることがわかり ,最大無次元波圧はこの作用を受けていることがわかる .円柱の設置間隔が無次元作用高さ に与える影響について検討を行った .図-16 は無次元作用高さ と最大水深時  $h_{max}$  時の  $Fr$  数について整理した結果である .この図より ,最大水深時での  $Fr$  数は前列円柱では常流 ,後列円柱では射流となった .また設置間隔の狭い case1 での前列円柱における が従来の提案式よりも大きくなることがわかり ,格子配列された構造物の前面には想定以上の波圧が作用する可能性がある .また格子間隔を広げた場合では変動が大きく今回の条件では傾向が掴めなかった .一方 ,後列円柱においては全ての case において一般的に使用される朝倉の式よりも下回る結果となった .これは前列円柱が存在することで波の遮蔽効果が影響していることが考えられる .

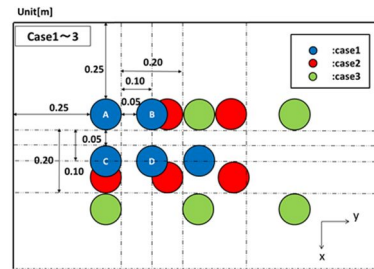


図-11 円柱設置間隔

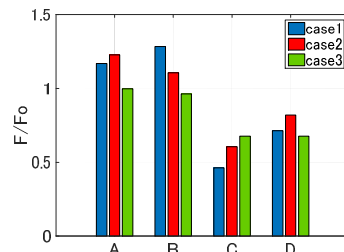


図-12 各円柱に作用する無次元最大波力

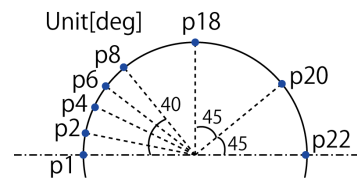


図-13 円柱側面での波圧測定位置

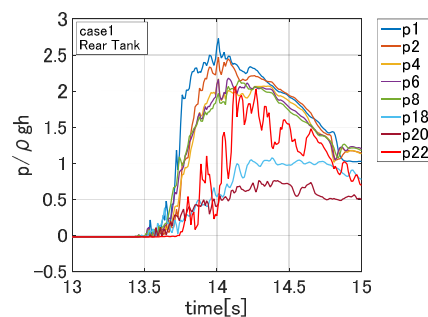


図-14 後列円柱側面での無次元波圧

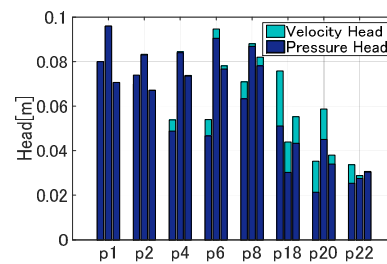


図-15 比エネルギーの内訳

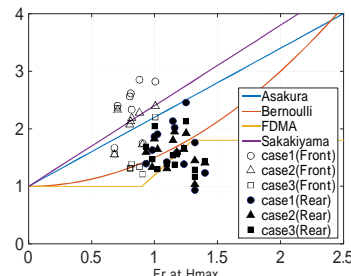


図-16 無次元作用高さ と最大水深  $h_{max}$  時の  $Fr$  数

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 長山 昭夫, 田中 友崇, 坂口 凌雅, 末吉 遼大, 浅野 敏之	4. 巻 74巻
2. 論文標題 規則配置された円柱群への津波波圧特性に関する検討	5. 発行年 2018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 p. I_259-I_264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_259">https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_259</a>	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 Akio Nagayama, Tomotaka TANAKA, Toshiyuki ASANO	4. 巻 28
2. 論文標題 Effects of Front Slope of a Breakwater on Tsunami Jet Flow Characteristics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Society of Offshore and Polar Engineers	6. 最初と最後の頁 pp200-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 長山昭夫, 石本健治, 種田哲也, 井崎丈, 浅野敏之	4. 巻 73巻2号
2. 論文標題 遡上津波による直立型構造物周辺の水位変動の数値解析	5. 発行年 2017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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 長山昭夫, 田中友崇, 浅野敏之	4. 巻 73巻2号
2. 論文標題 遡上津波によるタンク群への作用波圧と水位変動特性の検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長山昭夫
2. 発表標題 規則配置された円柱群への津波波圧特性に関する検討
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akio Nagayama
2. 発表標題 Effects of Front Slope of a Breakwater on Tsunami Jet Flow Characteristics
3. 学会等名 The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akio Nagayama
2. 発表標題 Effects of Front Slope of a Breakwater on Tsunami Jet Flow Characteristics
3. 学会等名 National Safety Day, India (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長山昭夫
2. 発表標題 遡上津波による直立型構造物周辺の水位変動の数値解析
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長山昭夫
2. 発表標題 遡上津波によるタンク群への作用波圧と水位変動特性の検討
3. 学会等名 土木学会海洋開発シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akio Nagayama
2. 発表標題 Effects of Front Slope of a Breakwater on Tsunami Jet Flow Characteristics
3. 学会等名 The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末吉遼大
2. 発表標題 格子配列タンク群における後方タンクへの作用波圧に関する検討
3. 学会等名 平成29年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂口凌雅
2. 発表標題 規則的に配列されたタンク群へ作用する津波波力に関する水理模型実験
3. 学会等名 平成29年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 田中友崇
2. 発表標題 防波堤前面勾配が 津波ジェット流の流動特性に与える影響
3. 学会等名 平成29年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 影内高洋
2. 発表標題 湾内直下型地震津波による鹿児島湾西部におけるエッジ波生成の検討
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020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
研究協力者	末吉 遼大 (Sueyoshi Ryodai)		
研究協力者	坂口 凌雅 (Sakaguchi Ryoga)		
研究協力者	田中 友崇 (Tanaka Tomotaka)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	影内 高洋  (Kageuchi Takahiro)		