

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01320

研究課題名(和文) 津波荷重と津波規模評価の高度化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the advancement of tsunami load and tsunami scale evaluations

研究代表者

松富 英夫 (Matsutomi, Hideo)

秋田大学・名誉教授・名誉教授

研究者番号：20134083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：水理実験に基づいて、津波氾濫水密度の簡易評価法の考案、氾濫水密度と波周期のRC造建築物に作用する津波荷重(水平力と鉛直力)への影響の実証、津波規模評価に関する津波の遡上距離、土砂堆積距離、土砂堆積厚の氾濫水密度への依存式の提示を行い、津波荷重と津波規模評価の高度化へ貢献している。

津波氾濫水密度の簡易評価法の考案過程において、多種多様である移動床下の氾濫流(非定常流)の抵抗則を論じ、津波荷重と津波規模評価のさらなる高度化への糸口を示している。津波遡上に的を絞り、遡上距離や遡上高、遡上過程への氾濫水密度の影響を理論的に評価(水理実験規模の影響を排除)する道筋も示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多種多様である移動床下の氾濫流の抵抗則の解明に挑戦し、津波氾濫水密度の簡易評価法の考案、氾濫水密度の視点からの津波荷重と津波規模評価の高度化へつなげている。この氾濫水密度の視点からの高度化は荷重評価において氾濫水密度の重要性を認識させ、河川氾濫流の荷重評価などへ波及する可能性がある。また、津波荷重と津波規模評価の高度化は津波の防災・減災の向上に確に資する。

津波の遡上距離や遡上高、遡上過程の精度よい評価には氾濫水密度と抵抗則の連動が必要であることを理論的に示している。この理論は想定津波や歴史津波の再現などで利用する数値解析技術の検証に活用でき、数値解析技術の高度化につながる。

研究成果の概要(英文)：Based on hydraulic experiments, development of a simple method for evaluating the density of tsunami inundation water, verification of influences of the density of inundation water and wave period on the tsunami load on RC building, presentation of expressions for the dependencies of the run-up distance, sediment deposit distance and mean sediment deposit thickness on the density of inundation water are conducted, which contributes to an advancement of tsunami load and tsunami scale evaluations.

In the process of developing the method for evaluating the density of tsunami inundation water, friction law for inundation flow with a large variety under a movable bed condition is examined, and a clue to further advancement of the tsunami load and tsunami scale evaluations is shown. A way is also paved to theoretically evaluate effects of the density of inundation water on the run-up distance, run-up height, run-up process and so on to avoid scale effects of hydraulic experiments.

研究分野：水工学

キーワード：津波 氾濫水密度 遡上 土砂堆積 波力 実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 津波氾濫水の密度 ρ または比重 ρ/ρ_w は、例えば運動量理論から明らかなように ($F=\rho Qu$)。ここで、 F は津波荷重 (波力)、 Q は流量、 u は氾濫流速)、津波避難ビルなどの建築物を含めた陸上構造物へ作用する津波荷重に対して線形的に影響を及ぼす。米国連邦緊急事態管理庁 (FEMA) は、氾濫水の平均土砂濃度を 10% として、最大密度 1.2 t/m^3 を採用するよう「建築物へ作用する津波荷重に関するガイドライン」において推奨しているが、その根拠を示していない。氾濫水の最大密度 (=土砂の飽和濃度) に関しては津波に比べて比較的身近な洪水の場合でさえも定説がない。2011 年の東日本大震災後、防波堤や陸上の胸壁には全静水圧の 5~20% の全動水圧が作用するとして津波荷重の見直しが行われている。以上の状況や概算であるが氾濫水密度の津波荷重への影響度 (= $1.2/1.03=1.17$ 倍) を考えれば、氾濫水の最大密度の評価は喫緊の課題と言えるが、定性的な実験的検討にとどまっている。

(2) 津波の氾濫水密度は津波荷重だけでなく、津波の遡上距離や土砂堆積状況、例えば津波遡上距離に対する土砂堆積距離の比や土砂堆積厚にも影響を及ぼす。したがって、氾濫水密度は津波の再現計算・想定計算や土砂堆積距離を基礎データとして評価される歴史津波の規模にも影響する。これまで、津波の入射波条件 (入射波数を含む)、土砂粒度や土砂供給位置などによる土砂堆積状況の違いに関する実験的研究はあるが、遡上距離や土砂堆積距離、土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性は定性的な実験的検討にとどまっている。

(3) 津波荷重は理論的には氾濫水の密度に線形的に依存するが、実際の場合では構造物前面における土砂堆積により荷重を受ける面積が減少するなどして、清水の場合と比べて津波荷重が最終的に大きくなるかどうかは不明である。それにもかかわらず、これまで土砂を含む氾濫水の津波荷重に関する検討 (氾濫水密度への依存性を含む) は実験的にも行われたことがない。研究代表者は建築物へ作用する土砂を含まない氾濫水の波力実験を長年行ってきており、土砂を含む氾濫水の津波荷重の研究はこれまでの研究の発展版となる。

2. 研究の目的

津波の氾濫水密度は津波荷重に対して線形的に影響を及ぼすが、氾濫水密度の変化特性や最大値は判っていない。津波の遡上距離、土砂堆積距離や土砂堆積厚にも影響を及ぼし、土砂堆積距離を基礎データとして評価される歴史津波の規模に影響するが、これらの氾濫水密度への依存性は定性的な実験的検討にとどまっている。実際の場合では構造物前面における土砂堆積により津波荷重を受ける面積が減少するかもしれない、清水の場合と比べて津波荷重が大きくなるかどうかは不明である。

本研究は、津波荷重と津波規模評価の高度化への寄与を目指し、工夫した水理実験に基づいて主に以下の検討を行う。

- (1) 津波氾濫水密度の変化特性 (水理量への依存性)
- (2) 津波の遡上距離、土砂堆積距離、土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性
- (3) 津波荷重の氾濫水密度への依存性

3. 研究の方法

「津波氾濫水密度の変化特性」、「津波の遡上距離、土砂堆積距離、土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性」、「津波荷重の氾濫水密度への依存性」に関する検討は実験水路を自作し (図1)、2011 年東北地方太平洋沖地震津波で被災した仙台海岸などの実海岸における土砂を用いて実験的に行う。

(1) 「氾濫水密度の変化特性」に関する検討は高シールズ数を確保するため、すべり台状の実験水路を用いて行う (図1上段)。ただし、すべり台斜面 (勾配 S_1) の下端に水平水路部を設け、水平水路部の下流端に高さの低いジャンプ台 (勾配 S_2) を接続する。

氾濫流はすべり台斜面の上端 (高さ h_D) にゲート付きの貯水槽を設置し、ゲート急開により発生させる。氾濫流はすべり台斜面を流下し、水平水路部に敷かれた土砂 (中央粒径 d_{50} 、土砂層長 L_s 、初期土砂層厚 h_T) を巻き込んで水平水路部下流端の低いジャンプ台を駆け上がり、空中に飛び出す。飛び出した土砂水は落下点域に斜め (勾配 S_4) に設置されたメスシリンダー群に飛び込む。あらかじめ各メスシリンダーの重さを量り、土砂水が飛び込んだ後の各メスシリンダーの重さを量れば、土砂水の体積はメスシリンダーから直接読み取れるので、メスシリンダー内の土砂水の密度 (=氾濫水密度) が評価できる。水路幅は 0.3 m に固定し、すべり台斜面の上端高さ、貯水槽の長さ、貯水深 h_U 、すべり台斜面の勾配、水たたき部の曲面長、水平水路部の長さ、低いジャンプ台の高さ h_S と勾配 S_2 、メスシリンダー群の設置位置 (水平距離 L_G 、鉛直高 L_P) と設置勾配 S_4 は試行錯誤して決定する。

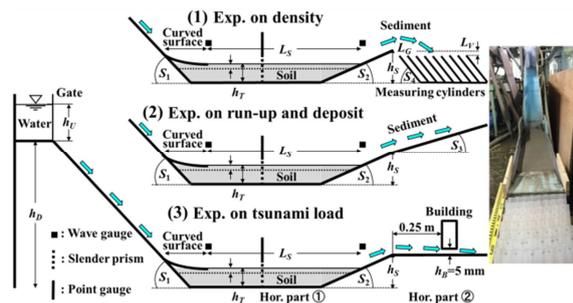


図1 実験水路，測定器具などの配置と諸記号の定義

水理量評価のため、土砂層域の上下流端付近に水位計（高精度超音波式変位センサー）を設置する。また、土砂層域の中心部に設置したポイントゲージで氾濫流表面にマッハ波を形成させ、上方からのビデオ撮影によりマッハ角、側方からのビデオ撮影により土砂層域中心部における入射氾濫水深を評価して、入射氾濫流のフルード数 F_{ri} や氾濫流速を評価する。

(2) 「遡上距離、土砂堆積距離、土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性」に関する検討は、水平水路部下流端のジャンプ台に陸域を模した緩斜面水路（勾配 S_3 ）を接続し（**図1**中段）、水平水路部の底面を上昇させる（例えば水平水路部の点線位置）ことにより初期土砂層厚 h_T を変化させて、氾濫水密度を強制的に調整して行う。

実験条件毎の氾濫水密度の評価も行う必要があり、緩斜面水路の有無を除き、同じ条件下の実験を2回行う。測定項目は上記(1)の水理量の他に、陸域の緩斜面における氾濫流の遡上距離、土砂堆積距離と土砂堆積厚の空間分布である。土砂を含まない清水での実験も行う。

(3) 「津波荷重の氾濫水密度への依存性」に関する検討は、水平水路部下流端のジャンプ台に陸域を模した水平水路を接続し（**図1**下段）、陸域に設置した直方体で開口部のないRC造建築物模型へ作用する津波荷重（水平力と鉛直力）を対象として行う。

ゲート急開により発生させる氾濫流は上記(2)と同じとし、土砂を含まない清水での実験も行う。測定項目は上記(1)の水理量の他に、模型前面位置における入射氾濫水深、模型の前面と背面の2位置における氾濫浸水深、分力計による水平力と鉛直力である。模型周辺の流況把握のため、水路の上方と側方からビデオ撮影も行う。

4. 研究成果

(1) 津波の氾濫水密度に関しては、土砂の中央粒径をパラメータとして氾濫流の入射フルード数（ \propto シールズ数）と氾濫水密度の関係を実験的に検討し、入射フルード数が大きくなれば、また中央粒径が小さいほど、氾濫水密度が高くなることを確認した（**図2**）。したがって、氾濫水の最大密度は入射フルード数と土砂粒径に依存することになる。

(2) 津波氾濫水密度の簡易評価法を考案した（**図2**）。本評価法は氾濫水断面平均の土砂濃度（ \propto 氾濫水密度）を対象とし、掃流土砂と浮遊土砂を分離せずに全流送土砂で論じている点に特徴がある。氾濫水断面平均の土砂濃度を測定する水理実験や推定する現地調査を実施するならば、本評価法は津波氾濫流に限らず土砂を含むいろいろな氾濫流、例えば河川氾濫流にも適用可能である。

(3) 津波の再現計算・想定計算や歴史津波の規模評価に関係する津波の遡上距離、土砂堆積距離と土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性を水理実験に基づいて検討した。氾濫水密度が高くなるにつれて、土砂水の遡上距離/清水の遡上距離、土砂堆積距離/土砂水の遡上距離、平均土砂堆積厚/土砂堆積距離の各比は順に急激からゆっくりと減少、ゆっくりと単調的に減少、急激からゆっくりと増加することを実証し、各々の関係近似式を提示した。

(4) 氾濫水密度と波周期のRC造建築物に作用する津波荷重（水平力と鉛直力）への影響を水理実験に基づいて検討した。実験データおよび実験結果の比較・検討法が限定的であるが、氾濫水密度と波周期がRC造建築物に作用する津波荷重へ影響することを実証し、建築物前面浸水深や前面浸水深係数（前面浸水深/入射氾濫水深）が同じ場合、①水平力は、氾濫水密度が高くなれば、波周期に関係なく大きくなり、波周期が長くなれば、次第に増大率が落ちるが大きくなること、②鉛直力は、氾濫水密度が高くなれば、波周期が長い場合には大きくなり、波周期が短い場合には建築物周りの土砂堆積の状況次第で小さくなる（土砂堆積が影響する）場合があること、③建築物周りの土砂堆積は建築物前面の水平力を受ける面積に影響しないことを示した。

(5) 津波氾濫水密度の簡易評価法の考案過程において、多種多様である移動床下の氾濫流の抵抗則を論じ、氾濫水密度に関する水理実験で得られた諸データを用いて移動床下の氾濫流の摩擦損失係数を例示した。例示した摩擦損失係数は平均的に移動床下の定常流におけるものの2倍程度であった。

(6) 現地調査で得られる氾濫浸水深や土砂堆積厚などのデータを用いて氾濫水断面平均の土砂濃度や密度を概算する方法を2018年7月の西日本豪雨による倉敷市真備町地区の洪水氾濫域における現地調査を通して考案し、その有用性を2019年10月の台風第19号豪雨による長野県

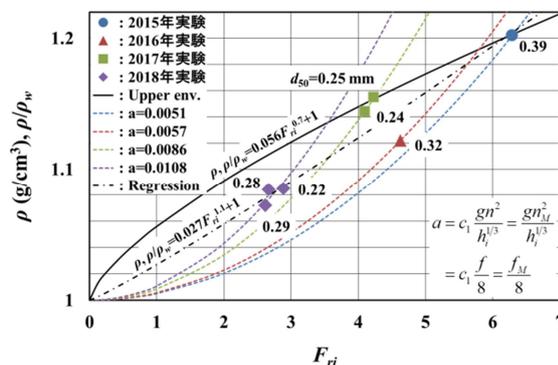


図2 簡易評価モデル曲線(破線)とそのときの a 値

の千曲川と宮城県の吉田川の洪水氾濫域における現地調査を通して確認した。

(7) 津波遡上に的を絞る、遡上距離や遡上高、遡上過程などへの氾濫水密度の影響を理論的に検討する道筋を示した。また、摩擦損失係数を一定にした土砂を含む津波の遡上解析では（数値シミュレーションを含む）、遡上距離や遡上高を精度よく評価できても、遡上継続時間などの遡上過程を精度よく評価できない可能性があり（逆も真）、氾濫水密度と摩擦損失係数を連動させることが必要であることを実証するとともに連動式の例を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 松富英夫	4. 巻 54
2. 論文標題 定常・非定常流実験による建築物への津波荷重に対する一考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 25～30
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 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 松富英夫	4. 巻 75
2. 論文標題 津波氾濫水密度の簡易評価法	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 385～390
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 松富英夫，三上 輝，千葉裕太	4. 巻 75
2. 論文標題 氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響	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 397～402
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 松富英夫，鎌滝孝信	4. 巻 75
2. 論文標題 2018年7月西日本豪雨による真備町氾濫域における土砂堆積の実態と氾濫水密度の概算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1（水工学）	6. 最初と最後の頁 1477～1482
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 松富英夫	4. 巻 56
2. 論文標題 津波遡上への氾濫水密度の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 57-62
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 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 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子	4. 巻 74
2. 論文標題 RC造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験	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 265-270
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 松富英夫, 小泉拓也, 照井裕介, 加藤広之, 岩瀬浩之	4. 巻 74
2. 論文標題 定常と非定常実験の違いが胸壁越流後の津波の氾濫流やRC造建築物への波力に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 1225-1230
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 Matsutomi, H. and Konno, F.	4. 巻 36
2. 論文標題 Experiments on the density of tsunami inundation water and its influence on the tsunami run-up and deposit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of Intl. Conf. on Coastal Eng.	6. 最初と最後の頁 paper 41
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 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 松富英夫, 柚木園睦, 大島尚也	4. 巻 15
2. 論文標題 建築物前面における津波による反射段波と跳水の発生境界条件	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第15回日本地震工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 1284-1290
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 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 松富英夫	4. 巻 55
2. 論文標題 津波氾濫水密度の簡易評価モデル	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 13-18
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 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 松富英夫, 今野史子, 後村晃基, 今藤晃太, 鎌滝孝信, 渡邊一也	4. 巻 73
2. 論文標題 津波氾濫水密度とその遡上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験	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 373 ~ 378
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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Matsutomi, H.
2. 発表標題 An Evaluation Model for the Density of Tsunami Inundation Water
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松富英夫
2. 発表標題 津波遡上への氾濫水密度の影響
3. 学会等名 東北地域災害科学研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsutomi, H.
2. 発表標題 Experiments on the density of tsunami inundation water and its influence on the tsunami run-up and deposit
3. 学会等名 36th Intl. Conf. on Coastal Eng. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松富英夫
2. 発表標題 建築物前面における津波による反射段波と跳水の発生境界条件
3. 学会等名 第15回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松富英夫
2. 発表標題 津波氾濫水密度の簡易評価モデル
3. 学会等名 東北地域災害科学研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松富英夫
2. 発表標題 津波氾濫水密度の簡易評価モデル
3. 学会等名 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 千葉裕太, 松富英夫
2. 発表標題 津波氾濫水密度の諸水理量への依存性
3. 学会等名 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 松富英夫
2. 発表標題 定常・非定常流実験による建築物への津波荷重に対する一考察
3. 学会等名 東北地域災害科学研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保田友寛, 松富英夫
2. 発表標題 津波氾濫水密度のフルード数と土砂粒径への依存性
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今野史子, 松富英夫
2. 発表標題 津波の遡上高や土砂堆積厚などのシールズ数への依存性
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
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