

## 津波氾濫水密度の諸水理量への依存性

秋田大学 学生員 ○千葉裕太 三上輝 正員 松富英夫

1. はじめに 著者らは津波荷重評価や津波規模評価の高度化を目指して津波氾濫水密度 $\rho$ （～比重）の津波入射フルード数 $F_H$ への依存性を実験的に検討してきた<sup>1)4)</sup>。しかし、その依存性は津波周期が短く、入射フルード数が大きいものに偏っていた。そこで、本研究は実験水路を改造し、実際的な周期と入射フルード数に近づけた実験を新たに実施し、既報実験データの妥当性の検証とともに、氾濫水密度の入射フルード数への依存性を検討する。

2. 実験 2.1 土砂 予備実験後の「本実験」における土砂は宮城県仙台市と岩沼市の砂浜海岸（前浜に近い後浜域）で採取したものを使用した。表-1に「本実験」における実験ケース毎の実験前土砂の粒度特性例を示す。

2.2 実験方法 実験水路は簡易に高シールズ数を得るためにすべり台状の開水路とした。ただし、すべり台斜面の下端には土砂を敷詰める水平水路部を設け、水平水路部の下流端には土砂を含んだ氾濫水（土砂水）を制限して捕捉するために高さの低い上り勾配斜面とその斜面上にゲート急閉装置を設けた。また、すべり台斜面と水平水路部を滑らかに接続するため、両者の接続部に曲面部を設けた。実験水路の概略（水路側壁は省略）、測定器具（メスシリンダー群、水位計、ポイントゲージ、微小角柱、ゲート急閉装置）の配置などを図-1に示す。

津波氾濫流はすべり台上端の水平部にゲート付きの貯水槽を設置し、ゲート急開流れで模擬した。ゲートはすべり台上端水平部の斜面開始点直ぐ背後に位置する。その水平部の高さ $h_D$ は水平水路部の底面から0.38m、水路幅は全域で0.3m、貯水槽の諸元は高さ0.5m、幅0.3m、奥行1.7m（周期に関係）とし、貯水深 $h_U$ やすべり台斜面の勾配 $S_1$ 、すべり台斜面と水平水路接続部の曲面部の長さ、水平水路部の初期土砂層域長 $L_S$ 、初期土砂層厚 $h_T$ 、上り勾配斜面の高さ $h_S$ と斜面勾配 $S_2$ 、上り勾配斜面下流端とメスシリンダー群先端間の水平距離 $L_G$ と鉛直距離 $L_V$ 、メスシリンダー群の傾き $S_4$ は予備実験を行って決定した。

水理量評価のため、初期土砂層域の上下流端に超音波式水位計（（株）KEYENCE, UD-500）を設置した（図-1参照）。水位計間の距離は3.2mで、各水位計位置の水路底面位は同じである。また、氾濫流にマッハ波を形成させ、マッハ角から入射氾濫流のフルード数 $F_H$ （以下、入射フルード数）や氾濫流速を評価するため、初期土砂層域中心部の土砂層表面から4.0cm上方にポイントゲージ先端とその真横の水路側壁に横幅0.2cm、奥行0.4cmの水路底面まで達する微小角柱を設置した（図-1参照）。さらに、水平水路部や緩斜面における流況観察と氾濫流先端移動速度、ポイントゲージ設置位置における非先端部の氾濫水深、マッハ角を評価するため、水平水路部と

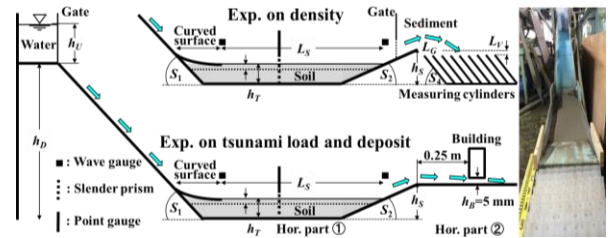


図-1 実験水路の概略、測定器具の配置と諸記号の定義

表-1 「本実験」における実験前土砂の粒度特性例

| 実験ケース  | 土砂採取地     | 中央粒径 $d_{50}$ (mm) | 均等係数 | 曲率係数 |
|--------|-----------|--------------------|------|------|
| Case 1 | 仙台市荒浜海岸   | 0.23               | 1.47 | 0.94 |
| Case 2 | 岩沼市下野郷浜海岸 | 0.34               | 1.64 | 1.14 |

表-2 「本実験」の条件

| 実験ケース  | $h_D$ (m) | $h_U$ (cm) | $S_1$ (°) | $L_S$ (m) | $h_S$ (cm) | $S_2$ (°) | $S_4$ (°) | $L_G, L_V$ (cm) | $h_r$ (cm) | $M_{SD}$ (kg) |
|--------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------------|------------|---------------|
| Case 1 | 0.38      | 25         | 7         | 3.0       | 9.5        | 6         | 60        | 2, 4            | 6          | 73.0          |
| Case 2 |           |            |           |           |            |           |           |                 |            | 95.5          |

緩斜面沿いにスケールを配置し（図-1の右端参照）、上方や側方からビデオ撮影を行った。

2.3 解析方法 氾濫水はすべり台を流下し、水平水路部に敷詰めた土砂を巻込んで下流端の高さの低い上り勾配斜面を駆け上がり、空中に飛出す。空中に飛出した土砂水のかんりの部分は土砂水の落下域において平かつ格子状に傾けて設置したメスシリンダー群（外径42mm、内径40mm、秤量250cm<sup>3</sup>のものを流れ方向の列（Column）に8本、水路横断方向の行（Row）に8本の計64本）へ飛込む。あらかじめ各メスシリンダーの重量を量り、土砂水が飛込んだ後の各メスシリンダーの重量を量れば、土砂水の体積はメスシリンダーから直接読み取ることができるので、メスシリンダー内の土砂水の密度とその平面空間分布（土砂水の鉛直密度分布を反映）が評価できる。ただし、本研究では氾濫土砂水量が多いため、ゲート急閉装置で流入土砂水量を制限した。

入射のフルード数と氾濫流速は3方法で評価する。第1法はビデオ撮影から得られる津波到達後の最大水深と氾濫流先端移動速度（≒氾濫流速と仮定）を用いる方法、第2法はビデオ撮影から得られるマッハ角（ポイントゲージ）と津波到達後の最大水深を用いる方法、第3法はビデオ撮影から得られるマッハ角（微小角柱）と津波到達後の最大水深を用いる方法である。本研究は既報<sup>1)4)</sup>との一貫性から第1法を採用し、第2と3法は第1法のチェックに用いる。

2.4 実験条件 「本実験」の条件を表-2に示す。表中、 $M_{SD}$ は実験において水平水路部に敷詰めた土砂の全質量で、他の記号については図-1を参照されたい。実験では炉乾燥後に自然放置して冷ました土砂を水平水路部に普通の方法で敷詰めた。実験回数は各ケース1回である。

キーワード：氾濫水密度、津波、実験

連絡先（〒010-8502 秋田市手形学園町1-1 TEL 018-889-2363）

### 3. 実験結果と考察

**3.1 氾濫水深と入射フルード数** 図-2に初期土砂層域の上下流端における氾濫水深 $h$ の経時変化を示す。経時変化は同期されており、時間 $t=0$ は任意に決めている。図から、下流端の氾濫水深はゲート急閉により急上昇し、欠測となること、上流端の氾濫水深は3.5cm程度であることが判る。したがって、シーلز数評価に既報<sup>3)</sup>の方法（氾濫水深=上下流端最大水深の平均）が利用できない。

**表-3**に前述の3方法に基づく本実験の入射フルード数の評価結果を示す。表から、①既報<sup>1)4)</sup>に比べて、入射フルード数が小さいためか、3方法による差が小さい、②側壁からのマッハ角で評価したものは水路中央表面部のマッハ角で評価したものより小さいことが判る。②は水路側壁の影響によりそこでの氾濫流速が小さくなっていることと、水路中央表面部の底面部に比べて流速が大きいところで形成されたマッハ波であることが考えられる。

**3.2 密度** 表-4に飛込み土砂水（土砂水体积 $5\text{cm}^3/\text{本}$ 以上、 $\rho \geq 1$ を有意な実験値と定義）の全量から評価した平面空間平均の氾濫水密度（以下、氾濫水密度）に関する実験結果を示す。()内はメスシリンダー毎に評価した氾濫水密度を平均した値で、飛込み土砂水の全量から評価したものに比べて小さい。この傾向は既報<sup>1)4)</sup>と同じであり、実験の再現性が認められる。表から、①既報実験（ $h_T=6\text{cm}$ に限定）に比べて流勢が弱い（すべり台の高さが $2.0\text{m}^1$ 、 $1.2\text{m}^2$ 、 $1.0\text{m}^3$ 、 $0.5\text{m}^4$ から $0.38\text{m}$ に減少した）にもかかわらず、氾濫水密度が既報実験の $1.18 \sim 1.23\text{g/cm}^3$ <sup>1)</sup>、 $1.09 \sim 1.16\text{g/cm}^3$ <sup>2)</sup>、 $1.14 \sim 1.16\text{g/cm}^3$ <sup>3)</sup>、 $1.07 \sim 1.09\text{g/cm}^3$ <sup>4)</sup>に比べて $1.08 \sim 1.12\text{g/cm}^3$ とやや高い傾向にあることが判る。この理由として、貯水槽の奥行きが $0.3\text{m}^1$ 、 $0.2\text{m}^2$ 、 $0.45\text{m}^3$ 、 $0.4\text{m}^4$ から $1.7\text{m}$ と長くなったこと、ゲート急閉により氾濫流上層の低濃度土砂水の流入量を制限したことが考えられる。

**3.3 密度とフルード数の関係** 図-3に2015年～2018年<sup>1)4)</sup>の実験データも含めて入射フルード数 $F_{ri}$ と氾濫水密度 $\rho$ の関係を示す。実験データは氾濫流で水平水路部の底面が露出しない $h_T=6\text{cm}$ の場合に限定している。入射フルード数は既報との一貫性から全て第1法で評価したものを採用している（表-3参照）。図中の実線はこれまでの実験において高い方の氾濫水密度を包絡する暫定的な実験曲線<sup>3)</sup>である。図から、①2019年の実験値は入射フルード数の割にこれまでのものと比べて大きい傾向にある、②土砂粒径への依存傾向はこれまでのものと同じで、土砂粒径が小さいほど氾濫水密度は大きいことが判る。①の理由として、3.2で述べたように、貯水槽の奥行きが長くなったこととゲート急閉により氾濫流上層の低濃度土砂水の流入量を制限したことが考えられる。

**3.4 密度とシーلز数の関係** 図-4に2017年<sup>3)</sup>と2018年<sup>4)</sup>の実験データも含めてシーلز数 $u_*^2/sgd_{50}$ と氾濫水密度 $\rho$ の関係を示す。摩擦速度 $u_*$ は相当粗度として $3d_{50}$ 、氾濫水深として $F_{ri}$ と同じもの、氾濫流速として波形伝播速度（図-2参照）、抵抗則として広矩形開水路定常流粗面則を用いて評価している。図から、流入エネルギー流束が

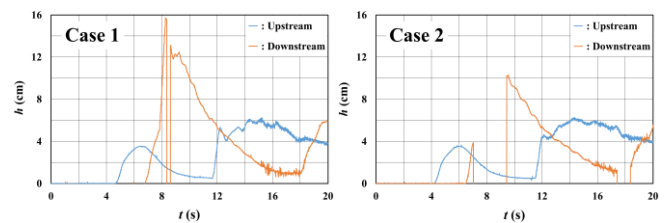


図-2 初期土砂層域の上下流端における氾濫水深 $h$ の経時変化

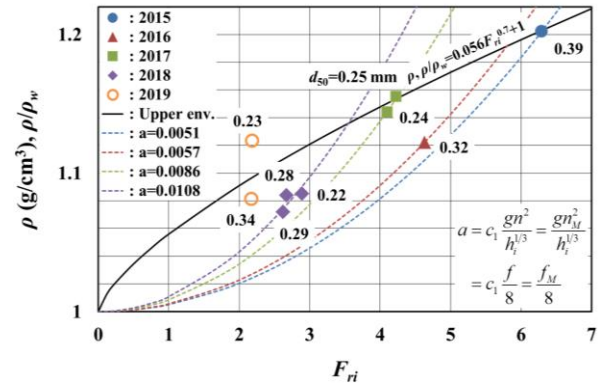


図-3 入射フルード数 $F_{ri}$ と氾濫水密度 $\rho$ の関係（ $h_T=6\text{cm}$ に限定。数値は中央粒径 $d_{50}$ 。aと破線については参考文献<sup>5)</sup>参照）

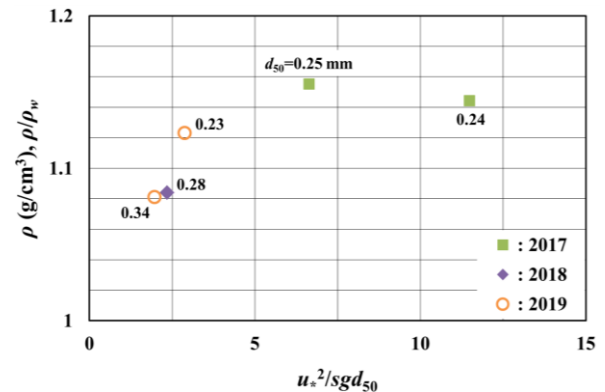


図-4 シールズ数 $u_*^2/sgd_{50}$ と氾濫水密度 $\rho$ （比重 $\rho/\rho_w$ ）の関係（ $h_T=6\text{cm}$ に限定。s=1.65は土砂の水中比重、gは重力加速度）

表-3 入射氾濫流のフルード数

| 実験<br>ケース | $h_T$<br>(cm) | 入射フルード数      |              |              | シー<br>ルズ<br>数 |
|-----------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|           |               | 先端移動<br>速度利用 | マッハ角<br>(中央) | マッハ角<br>(側壁) |               |
| Case 1    | 6             | 2.19         | 2.29         | 2.23         | 2.89          |
| Case 2    | 6             | 2.18         | 2.39         | 2.19         | 1.98          |

表-4 実験結果（()内はメスシリンダー毎の算術平均）

| 実験<br>ケース | $h_T$<br>(cm) | 飛込み土<br>砂水質量<br>(g) | 飛込み土<br>砂水体积<br>( $\text{cm}^3$ ) | 平均飛込み<br>土砂水体积<br>( $\text{cm}^3/\text{本}$ ) | 平均氾濫<br>水 密 度<br>$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|-----------|---------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Case 1    | 6             | 2412                | 2147.5                            | 79.5                                         | 1.123 (1.107)                               |
| Case 2    | 6             | 4254.8              | 3937                              | 135.8                                        | 1.081 (1.071)                               |

大きい程、シーلز数と氾濫水密度は大きいことが判る。

**4. おわりに** より実際的な条件の実験を追加し、既報実験の妥当性を検証するとともに、氾濫水密度の入射フルード数、中央粒径、シーلز数への依存性を再確認した。

**参考文献** 1) 松富, 川島: 土論集B2(海岸工学), Vol.71, pp.355-360, 2015. 2) 松富, 今野, 齋川, 他: 土論集B2(海岸工学), Vol.72, pp.397-402, 2016. 3) 松富, 今野, 後村, 今藤, 他: 土論集B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017. 4) 松富, 岡田, 久保田, 他: 土論集B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.265-270, 2018. 5) 松富: 東北地域災害科学研究, 第55巻, 2019. (印刷中)