

津波氾濫水密度に関する定量的実験*

秋田大学 今野史子 松富英夫 後村晃基 今藤晃太

1. はじめに

津波氾濫水の密度 ρ は津波荷重に対して線形的に影響を及ぼし、津波荷重評価の重要因子である。しかし、その最大密度は定性的な実験的検討に止まっており¹⁾、よく判っていない。密度は津波の遡上距離（遡上高）、土砂堆積距離と遡上距離の比や土砂堆積厚（分布）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、これらの密度依存性も定性的な実験的検討に止まっている²⁾。

本研究は、津波荷重評価や津波規模評価の高度化への寄与を目指して、津波氾濫水密度の各種水量への依存性を工夫した水理実験に基づいて定量的に検討することを目的とする。

2. 実験

2.1 土砂

土砂は図-1に示す秋田県にかほ市の平沢海水浴場で採取したものを「予備実験」と「本実験」の両方で使用した。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。粒径加積曲線は後に示す（図-6参照）。

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む氾濫水



図-1 実験土砂の採取地（一部の出典はGoogle earth）

表-1 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 (mm)	均等係数	曲率係数
Case 1	平沢	0.25	2.08	0.92
Case 2	海水浴場	0.25	2.15	0.89

*Quantitative experiments on the density of tsunami flooding water by Fumiko KONNO, Hideo MATSUTOMI, Koki ATOMURA and Kota KONDO

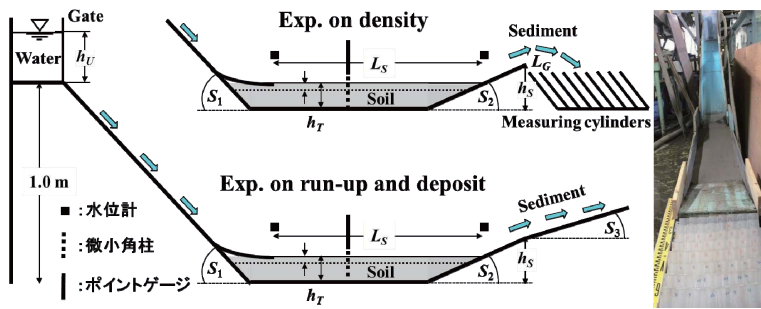


図-2 実験水路と測定器機の配置

を制限して捕捉するために高さの低い上り勾配のジャンプ台を設けた。さらに、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）、測定器機（メスシリンダー群や水位計）の配置などを図-2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の水平部の斜面開始点直背後に位置する。その水平部の高さは水平水路部底面から1.0 m、水路幅は0.3 m、貯水槽の諸元は高さ0.5 m、幅0.3 m、奥行0.45 mとし、貯水深 h_U やすべり台の斜面勾配 S_1 、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長 L_S 、初期土砂層厚 h_T 、上り勾配のジャンプ台の高さ h_S と斜面勾配 S_2 、ジャンプ台下流端とメスシリンダー群の先端間の距離 L_G は「予備実験」を通して決定した。

水理量の定量的評価のため、初期土砂層域の上下流端に水位計（高精度超音波式変位センサー）を設置した（図-2参照）。水位計間の距離は1.65 m（Case 1は1.50 m）で、上下流端の底面高は同じである。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_r や氾濫流速 u を評価するため、初期土砂層域中心の土砂層表面から1.5 cm上方にポイントゲージの先端とその横の水路側壁に幅0.2 cm、奥行0.4 cmの微小角柱を設置した。さらに、水平水路部や緩斜面部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、水路沿いにスケールを配置し、上方と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られた土砂を巻込んで下流端の低いジャンプ台を駆け上がり、空中に飛出す。空中に飛出した土砂を含む氾濫水（土砂水）のかなりの部分は土砂水の落下域に手前側へ傾けて（1行目は鉛直に対して 20° 、2行目以降は 35° ）格子状に密に設置したメスシリンダー群（1行目は幅88 mm、奥行75 mm、秤量 $1,250 \text{ cm}^3$ の自作したものを水路横断方向に4本、2行目以降は直径40 mm、秤量 250 cm^3 のものを流れ方向の列（Column）に6本、水路横断方向の行（Row）に8本の計48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空間分布（土砂濃度の鉛直分布を反映していると考えられる）が評価できることになる。

入射氾濫流のフルード数と氾濫流速は上方からのビデオ撮影により得られるマッハ角（ポイントゲージと微小角柱）、氾濫流先端移動速度と上下流端の水位計から得られる平均氾濫水深または側方からのビデオ撮影により得られる非先端部の氾濫水深を用いて評価する。フルード

数については3種類の方法から得られるものをクロスチェックする。

2.4 実験条件

「予備実験」後の「本実験」の実験条件を表-2に示す。表中、 M_{SD} は初期に敷詰めた土砂の全質量で、その他の記号は図-2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敷詰めた。実験回数は各ケース1回である。

3. 実験結果と考察

3.1 密度

図-3に実験ケース毎の氾濫水の採水体積（左）と密度（右）の空間分布を示す。各図、左側（Row 1）が海側、右側（Row 7）が陸側である。1行目の採水体積が一定値となっている。これはメスシリンダーの秤量が $1,250\text{ cm}^3$ と大きく、メスシリンダーの採水体積が 250 cm^3 を超えているためである。表-3に主な実験結果をまとめて示す。()内の数値はメスシリンダー毎に評価した密度を算術平均した値で、採水した全量から評価したものに比べてやや小さい。これは密度が高く評価されたメスシリンダーの採水体積が平均より大きいことを示している¹⁾。これら

表-2 「本実験」の実験条件

実験ケース	土砂採取地	h_U (cm)	S_1 (°)	L_S (cm)	h_S (cm)	S_2 (°)	S_3 (°)	L_G (cm)	h_T (cm)	M_{SD} (g)
Case 1	平沢	25	16	145	23	12	7.3	0	6	40,000
Case 2	海水浴場	25	16	145	23	12	7.3	0	6	40,000

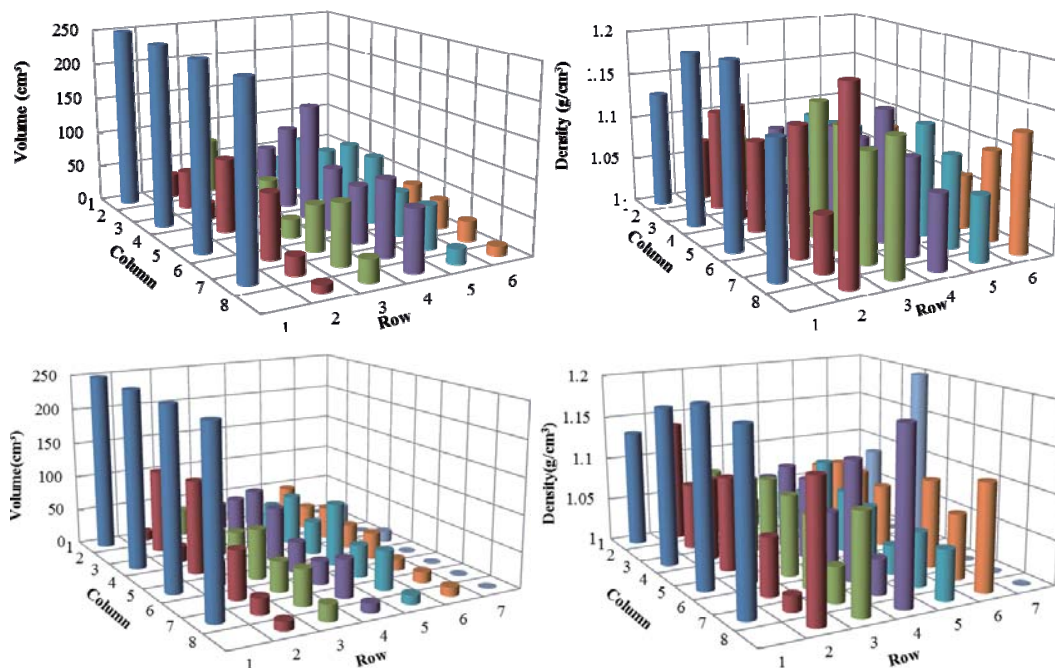


図-3 土砂を含む氾濫水の採水体積（左）と密度 ρ （右）の空間分布（上段：Case 1，下段：Case 2）

表-3 氾濫水密度 ρ に関する「本実験」の結果

実験 ケース	土砂 採取地	h_T (cm)	初期貯 水体積 (cm^3)	土砂 質量 (g)	飛込み土 砂水質量 (g)	飛込み土 砂水体積 (cm^3)	平均飛込み 土砂水体積 ($\text{cm}^3/\text{本}$)	平均氾濫 水密度 (g/cm^3)
Case 1	平沢	6	33,750	40,000	7,713	6744	156.8	1.144 (1.100)
Case 2	海水浴場	6	33,750	40,000	7,935	6,869	149.3	1.155 (1.093)

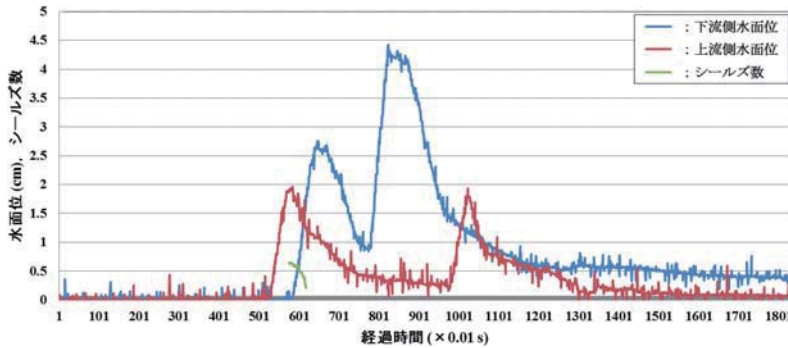


図-4 上・下流側の水面位とシールド数の経時変化例 (Case 1。水位計の設置位置の間違いにより下流側の水路底面位は上流側のものより0.6 cm低い)

の図表から、既報実験¹⁾に比べて流勢が弱いため、氾濫水密度は既報の平均値 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 程度に比べて低いことが判る。

3.2 シールド数

図-4に初期に敷詰め土砂層域の上下流端における水面位 (=水深) と両水面位の間位置におけるシールド数の経時変化例を示す。ここで、シールド数は上下流端の水面位を直線で結んだ線の勾配を水面勾配 I とし、その水面勾配と径深 R (広矩形を仮定し、上下流端の平均水深を採用) を用いて評価される摩擦速度 ($=\sqrt{gIR}$, g は重力加速度) から評価している。土砂の水中比重と代表粒径として採用した中央粒径 d_{50} は各々 1.65 と $240 \mu\text{m}$ としている。

これまでの津波を想定した土砂移動実験におけるシールド数の実現範囲は $0.4 \sim 9$ (藤井ら³⁾) や $0.2 \sim 5$ (高橋ら^{4), 5)} 程度である。これらに比べると著者らの実現範囲は $0.21 \sim 0.65$ 程度と小さく、狭い。図-4から評価される高さ 1 (1.5) cm位置の波形伝播速度は 2.46 (3.19) m/s程度で、この速度の割にシールド数が小さい。上述した水面勾配からシールド数を評価していることに問題があるのであろう。

3.3 密度とフルード数の関係

表-4に本実験における3種類の方法に基づいたフルード数を示す。表から、水路側壁の微小角柱から発生したマッハ波に基づく評価値がポイントゲージから発生したマッハ波に基づくものより小さく、意外にも⁶⁾、氾濫流の先端移動速度と水路側面からのビデオ撮影による非先端部の氾濫水深に基づく評価値が最小となることが判る。角柱からの評価値がポイントゲージからのものより小さい理由は側壁の影響により氾濫流速が小さくなるためと考えられる。矩形断面水路の定常流における水表面のマッハ波に基づくフルード数は流量と水深に基づくもの比べてやや大きいことが予備実験で確認されている⁷⁾。

表-4 各種方法に基づくフルード数

実験ケース	土砂採取地	マッハ角(側壁)	マッハ角(中央)	先端移動速度 (m/s)
Case 1	平沢	4.37	4.62	4.10
Case 2	海水浴場	4.26	4.85	4.23

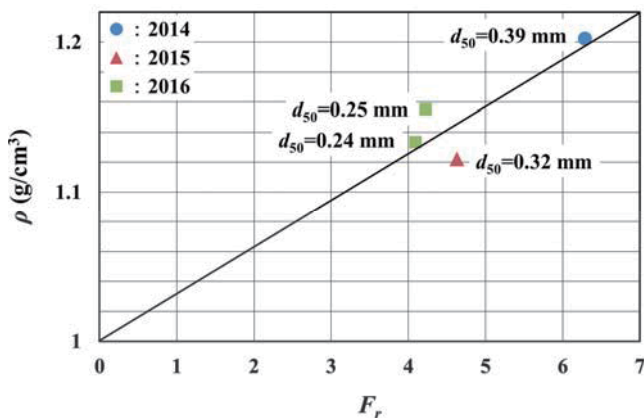


図-5 密度とフルード数の関係

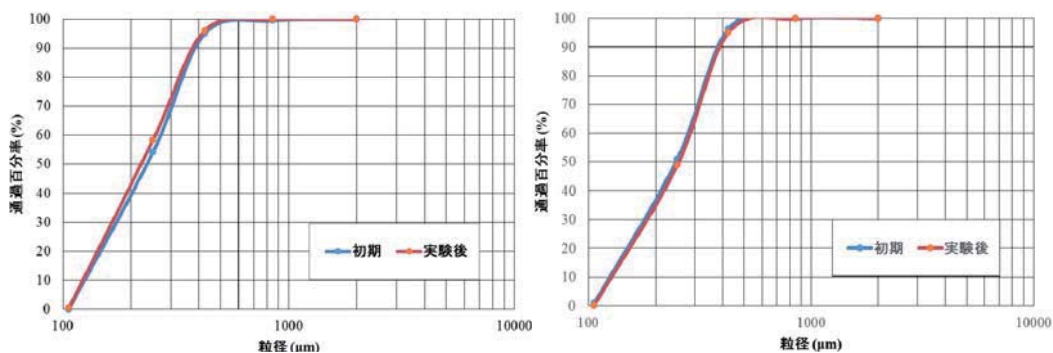


図-6 実験前土砂と氾濫水土砂（全メスシリンダーの土砂を集めたもの）の粒径加積曲線の比較例（左：Case 1，右：Case 2）

図-5に既報^{1), 2)}の実験結果も含めて氾濫水密度とフルード数の関係を示す。ここで、フルード数は一貫性から全て氾濫流の先端移動速度と非先端部の氾濫水深に基づいて評価したものが採用されている。図から、本実験の範囲内では、フルード数が大きくなるにつれて、密度も大きくなることが判る。式(1)が両者の近似関係である。

$$\rho = 0.0314F_r + 1 \quad (1)$$

2016年（本研究実験）の密度が、フルード数が小さいにもかかわらず、2015年のものより大きい。これは2016年の使用土砂の中央粒径が2015年のものに比べて小さいためと考えられる。したがって、氾濫水密度はフルード数ばかりでなく、土砂の粒径（分布）にも依存すると言える。

現段階では津波氾濫水の最大密度（最大飽和濃度）がどのくらいまで達するかは判らない。

3.4 粒径分布

図-6に実験前土砂（初期）とメスシリンダーで採取した氾濫水土砂（実験後）の粒径加積曲線の比較例を示す。図中、実験後のものは実験値として有意なメスシリンダー全ての土砂を集めて混合した場合に対するものである。図から、既報^{1), 2)}と同様、実験前土砂と氾濫水土砂の粒径加積曲線に大差がないことが判る。

4. おわりに

本研究の実験で発生させた氾濫流はシールズ数が0.65程度、フルード数が3程度で、まだ津波氾濫流とは言えないかもしれないが、主な結果として以下を得た。

- ①本実験でも既報²⁾と同程度の氾濫水密度 ρ を得た（図-5）。
- ②本実験の氾濫水密度に対するシールズ数とフルード数を評価した。
- ③氾濫水密度はフルード数（シールズ数と言ってもよい）ばかりでなく、土砂の粒径（分布）にも依存することを確認した。
- ④実験前土砂と氾濫水土砂の粒度に大差がないことを再確認した。これは土砂が氾濫流により粒径に関係なく移動し、メスシリンダーに捕捉されたことを示している。
- ⑤津波氾濫計算では、より正確な津波荷重や氾濫域の評価を行うため、これまでのように流体運動と土砂運動を分離して交互に計算するのではなく、両運動の連成計算（氾濫水密度の考慮とも言える）が必要な場合がある。

参考文献

- 1) 松富英夫, 川島 峻: 津波氾濫流の密度に関する基礎実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.355-360, 2015.
- 2) 松富英夫, 今野史子, 齋川 聖, 鎌滝孝信, 渡邊一也: 津波氾濫水密度の土砂堆積や遡上高への影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.397-402, 2016.
- 3) 藤井直樹, 大森政則, 高尾誠, 金山進, 大谷英夫: 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.376-380, 1998.
- 4) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔: 掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610, 1999.
- 5) 高橋智幸, 黒川貴博, 藤田将孝, 島田広昭: 津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.231-235, 2011.
- 6) Matsutomi, H. and Okamoto, K.: Inundation flow velocity of tsunami on land, Island Arc, Vol.19, Issue-3, pp.443-457, 2010.
- 7) 高尾駿介: 建築物前面における津波の反射段波発生条件, 秋田大学卒業研究論文予備資料, 2016.