

## 氾濫水密度の時間変化を考慮した津波遡上\*

中央大学研究開発機構 松富英夫

### 1. はじめに

津波荷重や歴史・想定津波規模評価の高度化の視点として氾濫水密度 $\rho$ 、氾濫流の非定常性、移動床下の氾濫流（非定常流）の抵抗則などが考えられる<sup>1)</sup>。

松富ら<sup>2)-7)</sup>は津波氾濫水密度 $\rho$ の入射フルード数 $F_n$ や底質土砂粒径（中央粒径 $d_30$ ）への依存性を小規模移動床実験に基づいて検討している。松富<sup>8)</sup>は移動床下の津波氾濫流の抵抗則を上記実験のデータを用いて検討している。松富・有川<sup>9)</sup>は氾濫水密度の津波遡上への影響を理論的に検討している。前二者は実験データ量が少ない状況下での、後者は氾濫水密度として遡上過程平均<sup>10)</sup>を想定した時間的に不変な条件下での検討である。

以上を背景に、本研究は氾濫水密度実験と土砂を含む氾濫流の遡上実験を新たに行って実験データ量（範囲）を増やし（拡げ）、既報の氾濫流の摩擦損失係数 $K$ や氾濫水密度の評価実験式<sup>8)</sup>を検証するとともに、摩擦損失係数だけでなく、氾濫水密度の時間変化をも考慮することで、既報の津波遡上理論<sup>9)</sup>の高度化を図ることを目的とする。

### 2. 泛濫水密度実験と泛濫流遡上実験

#### (1) 実験方法

##### a) 実験水路

実験水路は、簡易に高シールズ数を得るために、幅0.3 mのすべり台状の直線開水路とした。ただし、すべり台斜面の下端には土砂を敷くために透明塗装ビニール板製の水平部、その下流端には土砂を巻込んだ氾濫流先端部の氾濫水（土砂水）量を調節して採水するために表面塗装した合板製の短く緩い上り斜面部。さらに氾濫流遡上実験ではその短く緩い上り斜面部に続けて表面塗装し、粒径0.85～2 mmの砂を貼付けた合板製の同じ勾配を持つ斜面部を設けた。実験水路の概略、後述する測定器具などの配置と諸記号の定義などを図-1に示す。図中、 $h_D$ は水平部の底面からすべり台上端に水平に設置した貯水槽（高さ0.5 m、幅0.3 m、長さ1.7 m）の底面までの高さ、 $h_U$ は貯水深、 $L_U$ は貯水長、 $S_1$ はすべり台斜面の勾配、 $L_S$ は水平部の初期土砂層域長、 $h_I$ は初期土砂層厚、 $h_S$ と $S_2$ は短く緩い上り斜面部の水平部底面からの上端高さと勾配である。

津波氾濫流はゲート急開流れで模擬した。ゲートはすべり台斜面上端の直ぐ背後に位置する。

##### b) 水理量の測定

初期土砂層域の上・下流端における入射氾濫水深の経

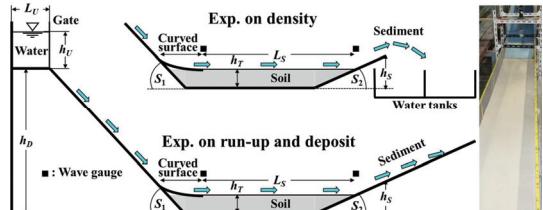


図-1 実験水路の概略(水路側壁は省略)、水路写真(右端)、測定器具などの配置と諸記号の定義。曲面で水平流を確保

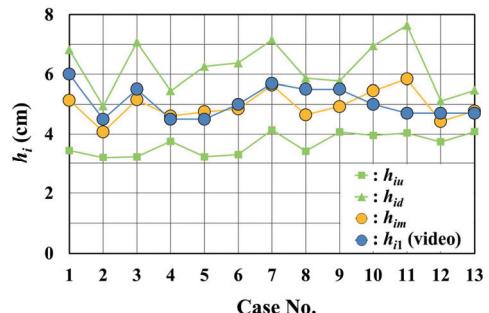


図-2 両方法による入射氾濫水深 $h_i$ の比較例

時変化を測定するため、上・下流端に超音波式水位計（KEYENCE社製、UD-500）を設置した(図-1参照)。水位計間の距離は3.01 m、各水位計位置の水路底面位は同じで、水位のサンプリング時間間隔は0.01 sである。

水平部における流況観察と氾濫流先端移動速度（ $\approx$ 入射氾濫流速 $u_i$ と仮定）、初期土砂層域中心部における氾濫流到達後の氾濫水深を評価するため、水平部の両側壁天端と片側壁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。

初期土砂層域中心部における入射氾濫水深 $h_i$ と入射フルード数 $F_n$ は2方法で評価した。第1法はビデオ撮影から得られる最大入射氾濫水深 $h_{il}$ と氾濫流先端移動速度 $u_i$ を用いる方法<sup>2)-7)</sup>、第2法は初期土砂層域の上・下流端に設置した超音波式水位計から得られる最大入射氾濫水深( $h_{iu}$ ,  $h_{iv}$ )を平均した入射氾濫水深 $h_{im}$ とビデオ撮影から得られる氾濫流先端移動速度 $u_i$ を用いる方法である。本研究の実験では第2法を採用し、既報の実験で採用した第1法は第2法のチェックに用いる。図-2に第1法と第2法で評価した入射氾濫水深 $h_i$  ( $h_{il}$ ,  $h_{im}$ )の比較例を示す。両方法がほぼ同じ入射氾濫水深を与えてることが判る。

\*Tsunami run-up considering time variation of density of inundation water by Hideo MATSUTOMI

表-1 実験条件

| 実験<br>ケース | $h_D$<br>(m) | $L_U$<br>(m) | $h_U$<br>(m) | $S_1$<br>(°) | $L_S$<br>(m) | $h_f$<br>(m) | $h_S$<br>(m) | $S_2$<br>(°) | $M_{SD}$<br>(kg) | 備<br>考 |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------|
| Case1     |              |              |              |              |              |              |              |              | 828              |        |
| Case2     |              |              |              |              |              |              |              |              | 888              | 珪砂     |
| Case3     |              |              |              |              |              |              |              |              | 848              |        |
| Case4     |              |              |              |              |              |              |              |              | 355              | シルト    |
| Case5     | 0.34         | 1.7          | 0.25         | 5.1          | 301          | 0.06         | 0.11         | 7.4          | 852              |        |
| Case6     |              |              |              |              |              |              |              |              | 824              |        |
| Case7     |              |              |              |              |              |              |              |              | 730              | 天然砂    |
| Case8     |              |              |              |              |              |              |              |              | 872              |        |
| Case9     |              |              |              |              |              |              |              |              | 962              |        |
| Case10    |              |              |              |              |              |              |              |              | 828              | 珪砂     |
| Case11    | 0.34         | 1.7          | 0.25         | 5.1          | 301          | 0.06         | 0.11         | 7.4          | 852              |        |
| Case12    |              |              |              |              |              |              |              |              | 824              | 天然砂    |
| Case13    |              |              |              |              |              |              |              |              | 131              |        |
| Case14    |              |              |              |              |              |              |              |              |                  |        |
| Case15    | 0.34         | 1.7          | 0.25         | 5.1          | 301          | 0            | 0.11         | 7.4          | 0                | 清水     |
| Case16    |              |              |              |              |              |              |              |              |                  |        |

表-2 実験結果

| 実験<br>ケース | $d_{50}$<br>(mm) | 均等<br>係数 | 曲率<br>係数 | $h_f$<br>(cm) | $F_n$<br>(-) | $P$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $L_R$ | $L_{RW}$ | $L_{RS}$ |
|-----------|------------------|----------|----------|---------------|--------------|-----------------------------|-------|----------|----------|
| Case1     | 0.16             | 1.55     | 0.90     | 5.14          | 2.19         | 1.134                       | -     | -        | -        |
| Case2     | 0.76             | 1.96     | 0.90     | 4.08          | 2.50         | 1.024                       | -     | -        | -        |
| Case3     | 0.29             | 2.62     | 0.73     | 5.16          | 2.23         | 1.112                       | -     | -        | -        |
| Case4     | -                | -        | -        | 461           | 236          | 1.077                       | -     | -        | -        |
| Case5     | 0.21             | 1.92     | 0.87     | 4.75          | 2.28         | 1.128                       | -     | -        | -        |
| Case6     | 0.23             | 2.00     | 0.76     | 4.85          | 2.22         | 1.121                       | -     | -        | -        |
| Case7     | 0.11             | -        | -        | 5.65          | 2.20         | 1.110                       | -     | -        | -        |
| Case8     | 0.22             | 2.08     | 0.85     | 4.65          | 2.19         | 1.105                       | -     | -        | -        |
| Case9     | 0.50             | 2.08     | 1.03     | 4.93          | 2.26         | 1.042                       | -     | -        | -        |
| Case10    | 0.16             | 1.55     | 0.90     | 5.46          | 2.02         | -                           | 207.0 | 198      | -        |
| Case11    | 0.21             | 1.92     | 0.87     | 5.84          | 1.99         | -                           | 185.5 | 174      | -        |
| Case12    | 0.23             | 2.00     | 0.76     | 4.43          | 2.40         | -                           | 196.5 | 177      | -        |
| Case13    | 0.50             | 2.08     | 1.03     | 4.78          | 2.42         | -                           | 241.6 | -        | -        |
| Case14    | -                | -        | -        | 3.61          | 3.44         | -                           | 242.2 | -        | -        |
| Case15    | -                | -        | -        | 3.55          | 3.43         | -                           | 250.4 | -        | -        |
| Case16    | -                | -        | -        | 3.49          | 3.48         | -                           | 250.3 | -        | -        |

## (2) 解析方法

### a) 泌濁水密度実験

泌濁水はすべり台を流下し、水平部に敷いた土砂を巻込んで下流端の短く緩い上り斜面を駆け上がり、空中に飛出す。飛出した泌濁水はその落下域に設置された立方体の水槽群（辺長30 cm、水槽板厚0.3 cm、秤量29.4×29.4×29.7=2.57×10<sup>4</sup> cm<sup>3</sup>）のものを流れ方向に2個、水路横断方向に2個の計4個、図-1参照）へ飛込む。あらかじめ各水槽の重量を量り、泌濁水が飛込んだ後の各水槽の重量を量れば、泌濁水の体積は水槽四隅の湛水深を測ることで評価できるので、泌濁水密度 $\rho$ が評価できることになる。

### b) 泌濁流遡上実験

水平部で土砂を巻込んだ泌濁流は一様勾配斜面部を遡上する。斜面遡上域は遡上先端の平面形が舌状の土砂堆積域とその高所側の泌濁水が斜面を汚す程度の領域に大別される<sup>4)</sup>。初期土砂層域下流端を起点として、前者の最大遡上距離を土砂堆積域距離 $L_{RS}$ 、後者の斜面横断平

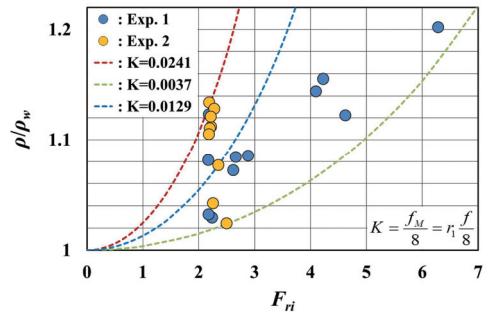


図-3 入射フルード数 $F_n$ と氾濁水密度 $\rho$ の関係（破線は実験結果によく適合する式(1)の簡易評価モデル曲線。K値はそのときの摩擦損失係数）

均遡上距離を遡上距離 $L_R$ （清水の場合 $L_{RW}$ ）とする。

### (3) 実験条件

実験条件を表-1に示す。表中、 $M_{SD}$ は氾濁水密度実験（Case 1~9）と氾濁流遡上実験（Case 10~13）で使用した土砂の全質量である。Case 4はシルトで粒径が不明（公表値あり）なため、参考実験とする。Case 13は斜面遡上域に3 cm厚の土砂を敷いている。実験は各ケース1回である。

使用土砂は市販の珪砂（シルトを含む）と秋田県にかけ市平沢<sup>10)</sup>などの砂浜海岸で採取した天然砂で、乾燥させたものを水路の水平部に投入し、水平に均した。実験ケース毎の実験前土砂の粒度特性例を表-2に示す。

### (4) 実験結果と考察

表-2に水槽群へ飛込んだ泌濁水の全量から評価した平均の氾濁水密度 $\rho$ 、一様勾配斜面を遡上した泌濁水の遡上距離 $L_R$ 、清水の遡上距離 $L_{RW}$ と土砂堆積域距離 $L_{RS}$ を示す。表から、既報<sup>2)-7)</sup>と同様、汜濁水密度が底質土砂粒径 $d_{50}$ に依存していることが判る。

図-3に既報実験データ（Exp. 1）<sup>2)-7)</sup>とともに本研究実験データ（Exp. 2）の入射フルード数 $F_n$ と汜濁水密度 $\rho$ の関係を示す。図中の $\rho_w$ は清水の密度で、実験データは土砂を敷いた水平部の底面が汜濁流で露出しない $h_f$ が6 cmの場合に限定している。図中には本研究実験の3実験値に対して、実験値によく適合する後述の式(1)の曲線（破線）とそのときの摩擦損失係数Kも示されている。図から、本研究実験における汜濁水密度の変域幅がこれまでよりも広い傾向にあることが判る。

汜濁流遡上実験結果については後述する（図-12参照）。

### 3. 摩擦損失係数と汜濁水密度の評価実験式

松富<sup>8)</sup>は掃流土砂と浮遊土砂を分離せずに全流送土砂を対象として移動床下の汜濁流による汜濁水密度 $\rho$ と入射フルード数 $F_n$ の関係として次式を導出した。

$$\frac{\rho}{\rho_w} = 1 / \left( 1 - \frac{f_M}{8} F_n^2 \right) = 1 / \left( 1 - r_i \frac{f}{8} F_n^2 \right) = 1 / \left( 1 - K F_n^2 \right) \quad (1)$$

ここで、 $f_M$ は移動床下の汜濁流の摩擦損失係数、 $f$ は移動

床下の定常流の摩擦損失係数、 $r_1$ は移動床下の氾濫流と定常流の摩擦損失係数比 $f_M/f$ 、 $K$  ( $\equiv f_M/8 = r_1/8$ ) は別定義<sup>9</sup>の移動床下の氾濫流の摩擦損失係数で、移動床下の定常流の抵抗則として次式を採用している。

$$\frac{8}{f} = \left( 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^2 \quad (2)$$

また、松富<sup>8)</sup>は $r_1$ として次の暫定実験式を提示している。

$$r_1 = 0.234 F_{ri}^{-1.05} \left( \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{0.94} = 0.083 F_{ri}^{-1.05} \left( \frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.94} \quad (3)$$

式(3)に本研究実験データ(Exp. 2)を含めた場合の実験範囲( $2.18 < F_{ri} < 6.29$ ,  $54 < h/d_{50} < 513$ )の上・下限値を代入して全実験データと比較したもの(破線)を図-4に示す。図中には次章の理論解析に適用可能かつ式(3)と同程度の評価精度を持つ次式によるもの(実線)も示されている。

$$r_1 = 0.327 F_{ri}^{-1} \left( \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{0.807} = 0.135 F_{ri}^{-1} \left( \frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.807} \quad (4)$$

図から、式(3)は一部の実験値が破線に挟まれた範囲外となるが、実験値をよく説明していると言える。理論解析で採用予定の式(4)は式(3)に比べてやや劣るが実験値を比較的よく包含していると言える。より適切な式を目指して新実験式を提示することも考えられるが、実験データ量が少ない現状では無闇に提示することは止めておく。

式(4)を採用する場合、移動床下の氾濫流の摩擦損失係数 $K$ は次式となる。

$$\begin{aligned} K &= f_M/8 = r_1 f/8 \\ &= 0.327 \left( 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{-2} F_{ri}^{-1} \left( \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{0.807} \\ &\approx 0.00442 F_{ri}^{-1} \left( \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{0.5} = 0.00255 F_{ri}^{-1} \left( \frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、これまでの実験範囲( $54 < h/d_{50} < 513$ )に対して適用できるものとして次の近似式を用いている。

$$\left( 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{-2} \approx 0.0135 \left( \frac{h_i}{3d_{50}} \right)^{-0.307} \quad (6)$$

式(6)の近似程度を図-5に示す。決定係数 $R^2$ は0.999である。

したがって、式(1)と(5)から氾濫水密度 $\rho$ の簡易評価実験式として次式を得る。

$$\frac{\rho_w}{\rho} = 1 - 0.00255 F_{ri} \left( \frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (7)$$

式(1), (2), (3)と(6)からは次式を得る。

$$\frac{\rho_w}{\rho} = 1 - 0.00158 F_{ri}^{0.95} \left( \frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.633} \quad (8)$$

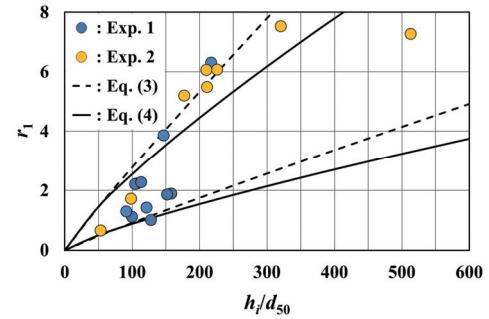
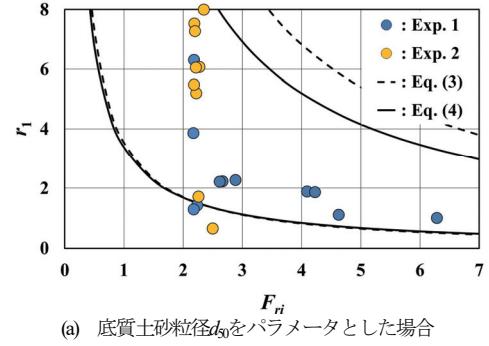


図-4 摩擦損失係数比 $r_1$  ( $= f_M/f$ ) の実験値と各式の比較

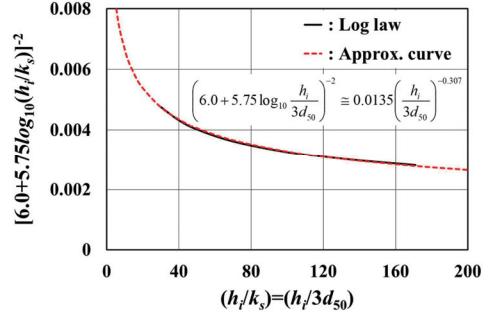


図-5 移動床下の定常流の抵抗則(黒実線)に対する近似曲線(赤破線)

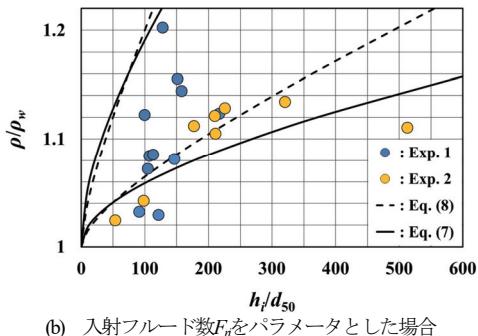
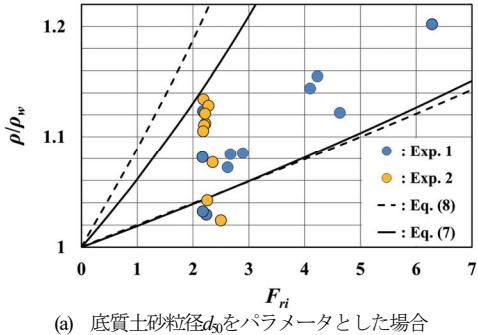
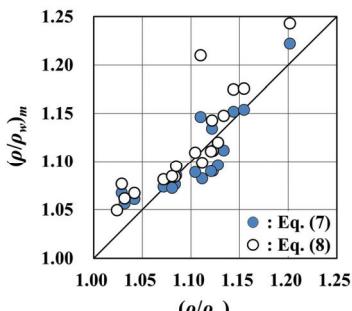
式(7)は $\rho$ が入射氾濫流速 $h_i$ と $d_{50}$ で決まるることを示す。

図-6に両式の比較を実験値とともに示す。図-4と同様に各パラメータの値として実験範囲の上・下限値を採用している。一部の実験値が各式の線に挟まれた範囲外となるが、両式は比較的よい氾濫水密度の評価式と言える。

図-7に両式による評価値 $(\rho/\rho_w)_m$ と実験値 $(\rho/\rho_w)_e$ の比較を示す。両式と実験値の一一致度は必ずしもよくないが( $R^2$ は式順に0.709と0.739)、両式は同程度の一一致度と言える。

#### 4. 泛濫水密度の時間変化を考慮した遡上理論

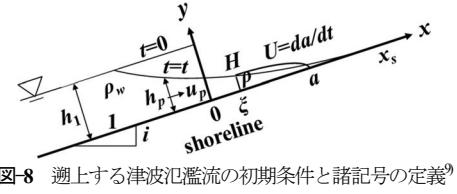
底質土砂粒径 $d_{50}$ が一定を前提に、摩擦損失係数 $K$ は時

図-6 淹濫水密度 $\rho$ の実験値と各式の比較図-7 淹濫水密度 $\rho$ の実験値 $(\rho/\rho_w)_e$ とモデル評価値 $(\rho/\rho_w)_m$ の比較

間変化するが、氾濫水密度 $\rho$ は一定（遡上過程平均）とした遡上理論はすでに提示した<sup>9)</sup>。本研究ではより実際的である土砂粒径のみが一定で、摩擦損失係数と氾濫水密度の両方が時間変化するとした遡上理論を展開する。

図-8に遡上対象の一様勾配斜面地形、座標系、遡上モデルと諸記号の定義を示す。この場合の静水圧近似における基礎式はすでに提示しており<sup>9)</sup>、次式である。

$$\left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right)^3 t \frac{d^2 a}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{\rho_w}{\rho} \left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right)^4 + i g \left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right)^3 t + K g \left\{ a - \left( \frac{3}{2} \frac{da}{dt} - c_1 + i g t \right) t \right\} \left( \frac{da}{dt} \right)^2 = 0 \quad (9)$$

図-8 遡上する津波氾濫流の初期条件と諸記号の定義<sup>9)</sup>

ここで、 $c_1 = \sqrt{g h_i}$ 、 $g$ は重力加速度、 $h_i$ は初期の貯水深（＝汀線における入射段波高）、 $a(t)$ は氾濫流先端位置、 $t$ は時間、 $i$ は斜面勾配である。

式(9)中の $\rho_w/\rho$ （式(11)の中にも含む）を入射氾濫水深 $h_i$ を氾濫流先端部の後端水深 $H$ とした式(7)、その $H$ と式(9)中の摩擦損失係数 $K$ をそれぞれ次式を用いて書き直せば、

$$H = \frac{1}{g} \left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right)^2 \quad (10)$$

$$K = \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \frac{1}{F_r^2} = \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \frac{(2c_1 - da/dt - i g t)^2}{4(da/dt)^2} \quad (11)$$

式(12)を得る。

$$\begin{aligned} & \left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right) \frac{d^2 a}{dt^2} - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{0.00255 da}{\sqrt{g d_{50}}} \right) \frac{da}{dt} * \left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right)^2 \\ & + i g \left( c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} i g t \right) + \frac{0.00255 g}{\sqrt{g d_{50}}} \left\{ a - \left( \frac{3}{2} \frac{da}{dt} - c_1 + i g t \right) t \right\} \frac{da}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)は土砂粒径 $d_{50}$ に依存する本研究の基礎式で、 $\rho/\rho_w$ を一定とした既報理論<sup>9)</sup>より普遍的と言えるものである。また、式中の添字\*が付いた項は $\rho/\rho_w=1$ の清水ではなくなり、これは以下の式でも同じである。

式(12)を解くにあたり次の無次元量を導入する。

$$\alpha = \frac{1}{h_i} \left( 2c_1 t - \frac{1}{2} i g t^2 - a \right), \quad \tau = \sqrt{g/h_i} t \quad (13, 14)$$

これらの導入と $0.00255 \sqrt{h_i/d_{50}} = \beta$ と置くことにより、式(12)は次式となる。

$$\begin{aligned} & -\tau \frac{d\alpha}{d\tau} \left( \frac{d^2 \alpha}{d\tau^2} - \frac{1}{4} \left( \frac{d\alpha}{d\tau} \right)^2 + \beta \left( \frac{d\alpha}{d\tau} \right)^2 \left( 2 - i \tau - \frac{d\alpha}{d\tau} \right) * \right. \\ & \left. + 2\beta \left\{ -\alpha + \frac{3}{2} \tau \frac{d\alpha}{d\tau} \right\} \left( 2 - i \tau - \frac{d\alpha}{d\tau} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

さらに、次の変数変換を行う。

$$p = d\alpha/d\tau, \quad \tau = f'(p) = df/dp \quad (16, 17)$$

$p \geq 0$ で、この変換により次の関係式を得る。

$$d^2 \alpha / d\tau^2 = 1/(d^2 f / dp^2), \quad \alpha = pf' - f \quad (18, 19)$$

したがって、式(15)は次の $f$ に関する常微分方程式となる。

$$-pf' - \frac{1}{4} p^2 f'' + \frac{\beta}{4} (p^2 * + 8f + 4fp)(2 - if' - p)f'' = 0 \quad (20)$$

式(20)を解くにあたり $f$ に関して $p$ の級数解を仮定する。

$$f(p) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n p^n \quad (21)$$

初期条件  $t=0$  ( $t=0$ ,  $p=0$ ) のとき,  $\alpha=da/dt=0$  から,  $b_0=b_1=0$  を得る。これらを考慮し, 式(21)を式(20)に代入すれば、最終的な恒等式として次式を得る。

$$\begin{aligned} & - (10b_2 + 18b_3 p + 28b_4 p^2 + 40b_5 p^3 + 54b_6 p^4 + \dots) p^2 \\ & + \beta (1_* + 16b_2 + 20b_3 p + 24b_4 p^2 + 28b_5 p^3 + 32b_6 p^4 + \dots) \\ & \times \left\{ \begin{array}{l} 4b_2 + (12b_3 - 2b_2 - 4b_2^2)p \\ + (24b_4 - 6b_3 - 18ib_2b_3)p^2 \\ + (40b_5 - 12b_4 - 32ib_2b_4 - 18ib_3^2)p^3 \\ + (60b_6 - 20b_5 - 50ib_2b_5 - 60ib_3b_4)p^4 + \dots \end{array} \right\} p^2 = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)から例えれば係数  $b_2 \sim b_6$  として次式群が得られる。

$$b_2 = \frac{5-2\beta_*}{32\beta} \quad (23)$$

$$b_3 = \frac{\beta(1_* + 16b_2)(1 + 2ib_2)b_2}{2\beta(3_* + 68b_2) - 9} \quad (24)$$

$$b_4 = \frac{\beta(3(1_* + 16b_2)(1 + 3ib_2) - 20(6b_3 - b_2 - 2ib_2^2)b_3)}{12\beta(1_* + 20b_2) - 14} \quad (25)$$

$$b_5 = \frac{\beta \left( \begin{array}{l} (1_* + 16b_2)(6b_4 + 16ib_2b_4 + 9ib_3^2) \\ + 60(1 + 3ib_2)b_3^2 + 24(1 + 2ib_2)b_2b_4 - 384b_3b_4 \end{array} \right)}{4\beta(5_* + 94b_2) - 20} \quad (26)$$

$$b_6 = \frac{\beta \left( \begin{array}{l} 5(1_* + 16b_2)(2b_5 + 5ib_2b_5 + 6ib_3b_4) \\ + 20(6b_4 + 16ib_2b_4 + 9ib_3^2)b_3 \\ - 24(12b_4 - 3b_3 - 9ib_2b_3)b_4 \\ + 28(1 + 2ib_2)b_2b_5 - 568b_3b_5 \end{array} \right)}{2\beta(15_* + 272b_2) - 27} \quad (27)$$

以上から、任意の一定な  $h_l$ ,  $i$ ,  $d_{30}$  に対する氾濫流の先端位置  $a(t)$  と先端部における氾濫流速  $U$  ( $=da/dt$ ) の級数解としてそれぞれ式(28)~(30)が得られる。

$$a = 2c_l t - \frac{1}{2}igt^2 \quad (28)$$

$$- h_l(b_2 p^2 + 2b_3 p^3 + 3b_4 p^4 + 4b_5 p^5 + 5b_6 p^6 + \dots)$$

$$U = da/dt = 2c_l - igt - c_l p \quad (29)$$

$$t = \sqrt{\frac{h_l}{g}} (2b_2 p + 3b_3 p^2 + 4b_4 p^3 + 5b_5 p^4 + 6b_6 p^5 + \dots) \quad (30)$$

図-9に氾濫流先端位置  $a(t)$  の級数解である式(28)と(30)の収束性の検討例を示す。図から、係数  $b_6$ までの第5次近似を採用すれば、級数解が十分に収束（第4と5次近似の差は最大遡上距離  $a_m$  で 2.4%）することが判る。したがって、以下の計算例では第5次近似を示す。

図-10に氾濫流先端位置  $a(t)$  と摩擦損失係数  $K$ 、氾濫水密度  $\rho$  の経時変化例を示す。省略されているが、初期の氾濫水密度  $\rho$  と最大遡上距離  $a_m$  時の摩擦損失係数  $K$  はともに無限大である。図から、摩擦損失係数と氾濫水密度が

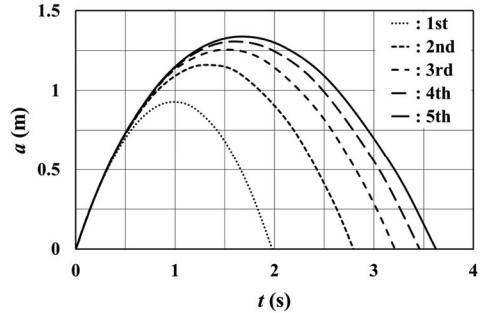


図-9 泛濫流先端位置  $a(t)$  に関する級数解式(28)と(30)の収束性の検討例 ( $h_l=0.09$  m,  $i=0.05$ ,  $h_l d_{30}=300$ )

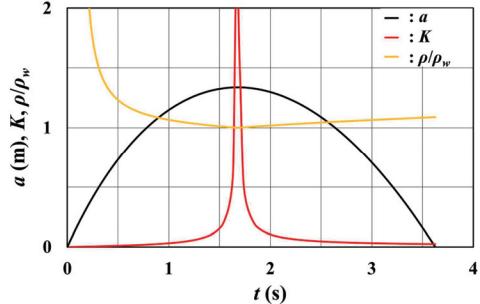


図-10 泛濫流先端位置  $a(t)$  と摩擦損失係数  $K$ 、氾濫水密度  $\rho$  の経時変化例 ( $h_l=0.09$  m,  $i=0.05$ ,  $h_l d_{30}=300$ 。第5次近似)

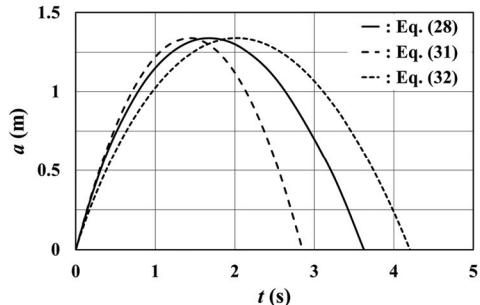


図-11 各理論に基づく泛濫流先端位置  $a(t)$  の比較例 ( $h_l=0.09$  m,  $i=0.05$ ,  $h_l d_{30}=300$ ,  $\rho/\rho_w=1.055$ ,  $K=0.0034$ )

時間変化していることが判る。

図-11に最大遡上距離  $a_m$  (または遡上高) を同じとした場合の本理論（級数解）と既報理論<sup>9</sup>（解析解と級数解）による氾濫流先端位置  $a(t)$  の比較例を示す。既報理論の解析解と級数解はそれぞれ式(31)と式(32)～(38)である。

$$a = 2c_l t - \frac{1}{2}igt^2 - 4 \frac{(1-\rho_w/\rho)}{(4+\rho_w/\rho)} g t^2 \quad (31)$$

$$a = 2c_l t - \frac{1}{2}igt^2 \quad (32)$$

$$- \frac{h_l}{K} (3b_4 p^4 + 4b_5 p^5 + 5b_6 p^6 + 6b_7 p^7 + 7b_8 p^8 + \dots)$$

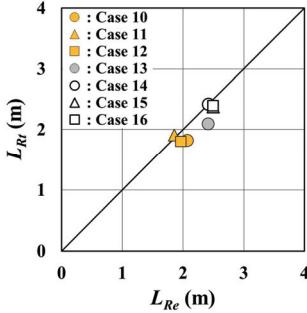


図-12 遷上距離 $L_R$ に関する実験値 $L_{Re}$ と理論値 $L_{Rw}$ の比較例（第5次近似）

$$t = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{h_i}{g}} (4b_4 p^3 + 5b_5 p^4 + 6b_6 p^5 + 7b_7 p^6 + 8b_8 p^7 + \dots) \quad (33)$$

ここで、

$$b_4 = \frac{1}{1,152} \left( 4 + 3 \frac{\rho_w}{\rho} \right) \quad (34)$$

$$b_5 = \frac{1,152 b_4^2}{(3,264 b_4 - 5 - 5 \rho_w / \rho)} \quad (35)$$

$$b_6 = \frac{64(9b_4^2 - 102b_4b_5 + 70b_5^2)}{(12 + 15 \rho_w / \rho - 8,832b_4)} \quad (36)$$

$$b_7 = \frac{32(51b_4b_5 - 276b_4b_6 - 140b_5^2 + 370b_5b_6 - 288b_4^3 i / K)}{(14 + 21 \rho_w / \rho - 11,520b_4)} \quad (37)$$

$$b_8 = \frac{8 \left( 69b_4b_6 - 360b_4b_7 + 35b_5^2 - 370b_5b_6 + 474b_5b_7 + 240b_6^2 + 24b_4^2(6b_4 - 49b_5)i / K \right)}{(4 + 7 \rho_w / \rho - 3,648b_4)} \quad (38)$$

図-11では $h_i=0.09$  mと $\rho=0.05$ を共通とし、本理論の級数解（第5次近似）では $h_i/d_{50}$ を300、既報理論の解析解では $\rho/\rho_w$ を1.055、既報理論の級数解（第5次近似）では $\rho/\rho_w$ と $K$ をそれぞれ1.055と0.0034の一一定（ $\neq$ 遷上過程平均<sup>10)</sup>）としている。図から、本理論の氾濫流先端位置 $a(t)$ は既報理論のそれらの間であることが判る。土砂粒径 $d_{50}$ は混合粒径を想定しない限り時間的に不变で、本理論は3理論の中で最も実際的なものと考えられ、氾濫水密度一定の既報の解析解は遷上を早（高）めに、氾濫水密度と摩擦損失係数一定の既報の級数解は遅（低）めに評価する傾向と言える。

次に本理論の検証例を示す。完全に同じ条件下での実験と理論の比較は実験が難しく、現状ではできない。本理論における初期水深 $h_i$ は初期土砂層域下流端での入射氾濫水深 $h_{id}$ （図-2参照）に速度水頭を加えたものとする<sup>10)</sup>。速度水頭の速度として入射フルード数 $F_n$ を評価したときの氾濫流先端移動速度 $u_t$ を採用する。その速度は表-2から評価できる。土砂粒径 $d_{50}$ として遷上斜面に貼り付けた砂（粒径0.85~2 mm）の代表粒径（=相当粗度 $k_s$ ）1.0 mm<sup>9)</sup>（Case 13では $k_s=3d_{50}=1.5$  mm）を採用する。図-12に遷上距離 $L_R$ と $L_{Rw}$ に関する実験値 $L_{Re}$ （Case 10~16）と理論値 $L_{Rw}$

（式(28)と(30)）の比較例を示す。両者はよく一致しており、理論の有用性およびその初期水深 $h_i$ などの決め方の妥当性が確認されたと言える。

## 5. おわりに

- 本研究で得られた主な結果は次の通りである。
- 1) 新たに氾濫水密度実験と氾濫流遷上実験を行って実験データ量（範囲）を増やし（拡げ）、移動床下の氾濫流の摩擦損失係数 $K$ と氾濫水密度 $\rho$ に関する既報の評価実験式の妥当性を確認するとともに津波遷上理論の検証データ（表-2）を提供した。
  - 2) 底質土砂粒径（中央粒径 $d_{50}$ ）に依存し、摩擦損失係数と氾濫水密度が時間変化するより普遍性の高い津波遷上の理論解を提示した（式(28)~(30)）。
  - 3) 移動床下の清水（固定床下の清水とも言える）の場合を含めて、実験値との比較・検討を通して津波遷上の理論解（式(28)と(30)）の有用性を確認した（図-12）。

**謝辞：**本研究の遂行にあたり科学研究費（基盤研究(C), 20K05041, 代表：松富英夫）の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 松富英夫：津波荷重評価高度化への取り組み、漁港漁場漁村研報, Vol.48, pp4-7, 2020.
- 2) 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, pp355-360, 2015.
- 3) 松富英夫, 今野史子, 斎川聖, 鎌滝孝信, 渡邊一也：津波氾濫水密度の土砂堆積や遷上高への影響、土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.72, No.2, pp.397-402, 2016.
- 4) 松富英夫, 今野史子, 後村晃基, 今藤晃太, 鎌滝孝信, 渡邊一也：津波氾濫水密度とその遷上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験、土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017.
- 5) 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子：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、土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.74, No.2, pp.265-270, 2018.
- 6) 千葉裕太, 三上輝, 松富英夫：津波氾濫水密度の諸水理量への依存性、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, II-98, 2019 (CD-ROM).
- 7) 松富英夫, 三上輝, 千葉裕太：氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響、土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.75, No.2, pp.397-402, 2019.
- 8) 松富英夫：津波氾濫水密度の簡易評価法、土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.75, No.2, pp.385-390, 2019.
- 9) 松富英夫, 有川太郎：津波遷上への氾濫水密度の影響、土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.76, No.2, pp.391-396, 2020.
- 10) 松富英夫：氾濫流抵抗則の津波遷上への適用法、東北地域災害科学研究, 第58巻, 2022 (印刷中)
- 11) 松富英夫, 工藤崇, 池田正人：秋田県南部海岸での漂砂動向、海岸工学論文集, 第39巻, pp.341-345, 1992.