

# 漂流物を伴う氾濫流の実験とモデル化

秋田大学 学生員 ○藤井 碧  
正 員 松富英夫

1. はじめに 2004 年スマトラ島沖地震津波では、Banda Aceh における多量の漂流物を伴った氾濫流が話題となった。防災・減災上、漂流物を伴う氾濫流とその衝突力の評価は緊急の課題である。

前年の研究では、瓦礫等の漂流物を海水とは密度の異なる仮想流体と見立て、定常段波の考えを適用し、漂流物を伴う氾濫流の簡易理論を示した。実験との比較から、油や「瓦礫＋流体」の様な流体状漂流物の場合は上記理論が有用であるが、固体漂流物の場合は漂流物による塞き止め効果により適用できないことを確認した。

本研究では新たに実験を行い、塞き止め現象を理解・モデル化し、上記理論の拡張を図り、実験との比較を通し拡張理論の有用性を検討する。

2. 実験 実験装置の概略と諸記号の定義を図-1 に示す。氾濫流はゲート急開流れで模擬し、漂流物には漂流物間の空隙率  $e$  の評価が容易な一辺  $1.8\text{cm} \times 1.8\text{cm}$ 、長さ  $L_w$  が  $1.8\text{cm}$  の 1, 3, 6 倍の米ツガ材を用いた。ゆえに、 $h_0$  は  $1.8\text{cm}$  となる。実験中に密度に変化がないように、漂流物は実験前に予め 30 分間水に浸された（湿潤時比重=0.73）。湿潤時と乾燥時のツガ材間の静止摩擦係数は各々  $1.49$  と  $0.43$  であった。

漂流物の初期配置はゲート上・下流域の全域とし、貯水深  $h_1$  と空隙率  $e$  をそれぞれ 3 通り変化させた。

測定項目は観察断面での超音波式変位計による氾濫流水深  $h_2$ 、上方と側面からのビデオ撮影による漂流物移動速度、漂流物堆積層長、その断面積、空隙率である。

3. 理論 定常段波を考える。段波下流域に瓦礫や油等を想定し、任意の密度を持つ均質な仮想静止流体と見立てる。本研究のモデルを図-2 に示す。本図は仮想流体の密度が海水の密度よりも小さい場合を考えている。本モデルは、段波先端部で漂流物が積み上げられ、その漂流物間の動または静止摩擦（摩擦係数は  $\mu_0$  で、不明）による全抵抗が段波に反作用として働き、段波上流域の漂流物は下流域での分布状態を維持し、空隙部に海水が入り込むという簡易モデルである。但し、段波先端部で積み上げられた漂流物層と下流側の

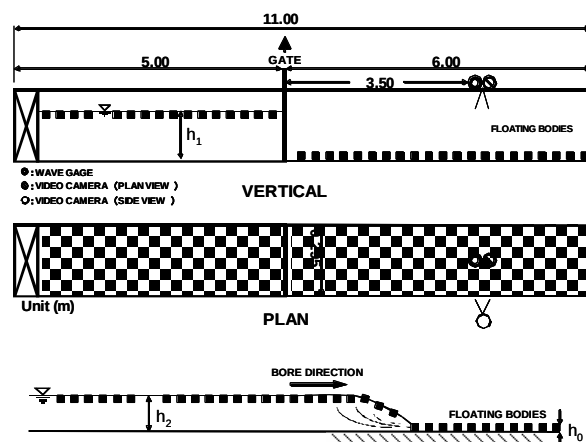


図-1 実験水路の概要

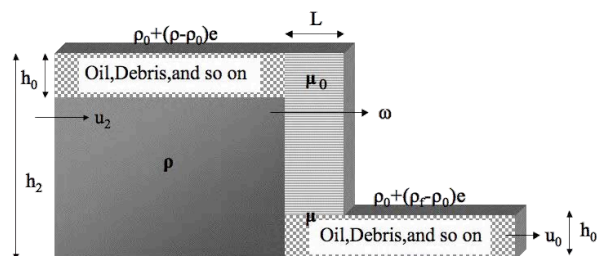


図-2 漂流物を伴う氾濫流のモデル

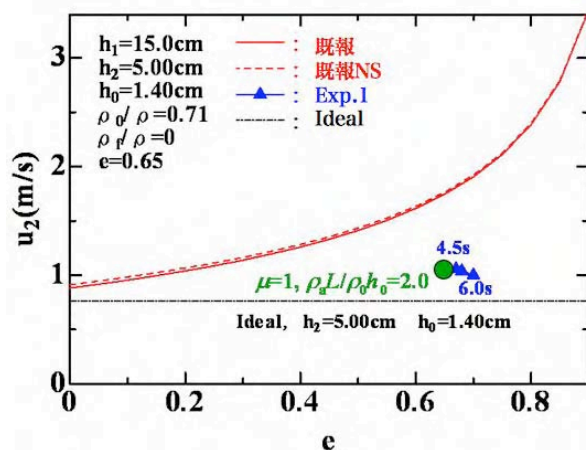


図-3 本理論と既報実験結果との比較

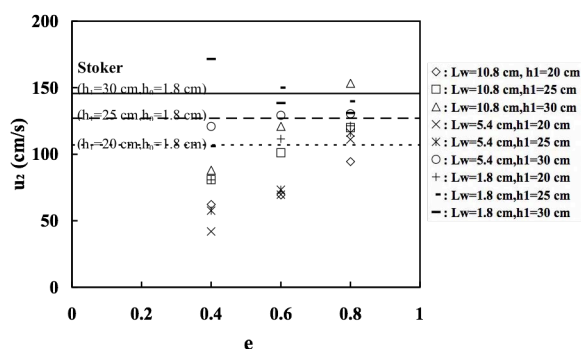


図-4 漂流物の移動速度と空隙率の関係

仮想流体間の摩擦係数は $\mu$ とする。漂流物堆積域の長さやその密度は漂流物の種類により異なると考えられる。

(1) 連続式 本モデルの質量保存則は次式となる。

$$\begin{aligned} & \left[ \left\{ \rho_0 + (\rho - \rho_0)e \right\} h_0 + \rho(h_2 - h_0) \right] (\omega - u_2) \\ & = \left\{ \rho_0 + (\rho_f - \rho_0)e \right\} h_0 (\omega - u_0) \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $\rho$  は海水の密度、 $\rho_0$  は漂流物の密度、 $\rho_f$  は段波下流域の空隙部の密度（空気の場合は零）、 $e$  は段波下流域の漂流物分布の空隙率、 $h_2$  は段波上流域の水深、 $u_2$  は段波上流域の流速、 $h_0$  ( $=1.8\text{cm}$ ) は段波上・下流域の漂流物層の厚さ、 $u_0$  は段波下流域の流速（一般的には零）、 $\omega$  は段波伝播速度である。式(1)において、 $\rho_0 = \rho_f = \rho$  とすれば、理想段波理論の質量保存則となる。

(2) 運動方程式 静水圧分布を仮定したときの運動量保存則は次式となる。

$$\begin{aligned} & \left[ \left\{ \rho_0 + (\rho - \rho_0)e \right\} h_0 + \rho(h_2 - h_0) \right] (\omega - u_2) u_2 \\ & - \left\{ \rho_0 + (\rho_f - \rho_0)e \right\} h_0 (\omega - u_0) u_0 \\ & = \frac{1}{2} \rho g (h_2 - h_0)^2 + \left\{ \rho_0 + (\rho - \rho_0)e \right\} g h_2 h_0 \\ & - \frac{1}{2} \left\{ 2(1-e)\rho_0 + (\rho + \rho_f)e \right\} g h_0^2 - \mu \rho_a g L (h_2 - h_0) \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 $g$  は重力加速度、 $\rho_a$  は段波先端部の漂流物域の密度、 $L$  は段波先端部の漂流物層長である。式(2)において、 $\rho_0 = \rho_f = \rho$  かつ  $\mu_0 = L = 0$  とすれば、理想段波理論の運動量保存則となる。

簡易的には、① $\rho_a = \rho_0 + (\rho_f - \rho_0)$ （段波に取り込まれる仮想流体の密度）と見立て、 $\mu$ 、 $L$  または  $\mu L$  を調整する方法、② $\rho_a = \rho_0$ （漂流物が蓄積され、段波先端部が漂流物で満たされる）として、 $\mu$  は経験値を用い  $L$  を調節する方法、③ $\mu$  は経験値、 $L$  は実験値として  $\rho_a$  を調節する方法等が考えられる。①で得られる  $\mu$  は合成摩擦係数、①と②で得られる  $L$  は漂流物が流れ方向に  $n$  個蓄積されたときと捉える必要がある。

(3) 流速と段波伝播速度 式(1)と(2)から流速  $u_2$  と段波伝播速度  $\omega$  として各々次式を得る。

$$u_2 = \left[ \left\{ \left( \frac{\rho}{\rho_0} - \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e + \frac{\rho}{\rho_0} \left( \frac{h_2}{h_1} - 1 \right) \right\} \omega + \left\{ 1 + \left( \frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} u_0 \right] / \left[ \left\{ 1 + \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e + \frac{\rho}{\rho_0} \left( \frac{h_2}{h_1} - 1 \right) \right\} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \omega = & \frac{g \left[ \left\{ \frac{\rho_0}{\rho} + \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) e \right\} h_0 + h_2 - h_0 \right]}{\left\{ 1 + \left( \frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \left\{ \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) e + \frac{h_2}{h_0} - 1 \right\}} \\ & \times \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} \left( \frac{h_2}{h_0} - 1 \right)^2 + \left\{ 1 + \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \frac{h_2}{h_0} - \frac{1}{2} \left\{ 2(1-e) + \left( \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e \right\} - \mu \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{L}{h_0} \left( \frac{h_2}{h_0} - 1 \right) + u_0^2} \quad (4) \end{aligned}$$

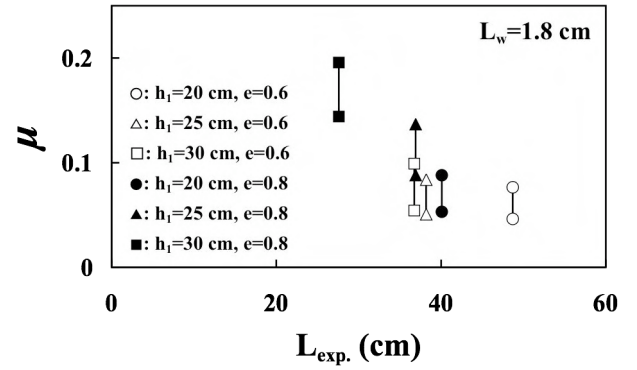


図-5 摩擦係数と漂流物堆積長の関係

4. 結果と考察 図-3 に氾濫流速と空隙率に関する本理論と既報実験結果（山口・松富，2006）の比較を示す。理論値と実験値が一致する様に本理論の無次元抵抗値を決めた。本図から、既報理論では実験値の説明が出来なかったが、本理論では実験値の説明が可能であることが判る。

図-4 に本実験での漂流物の移動速度と空隙率の関係を示す。横棒で示されているのは  $h_1 = 30\text{cm}$ 、縦棒は  $25\text{cm}$ 、無印は  $20\text{cm}$  の場合であり、これは図-5 も同様である。図から、空隙率が小さくなるにつれて実験値のばらつきが大きくなり、全体的には Stoker 理論と同じか小さい傾向で、小さい傾向は流木が長くなるにつれて強くなることが判る。

図-5 は漂流物堆積域と下流側の漂流物層との摩擦係数  $\mu$  と実験から求めた漂流物堆積長  $L_{exp}$  の関係を示す。この  $\mu$  は  $u_2$  の実験値と理論値が一致するように調節されて得られている。全体的に  $\mu$  が小さくなるにつれて  $L_{exp}$  が大きくなること、また  $h_1$  が大きくなるにつれて  $L_{exp}$  が小さくなることが見てとれる。

5. おわりに 本研究での主な知見は次の通りである。

①新たに水理実験を行い、氾濫流の塞き止め現象の理解とそのモデル化により、既報理論を改良した。②実験との比較を通して、改良理論の有用性を確認した。③漂流物を伴う氾濫流の基礎特性を検討した。

#### 参考文献

- 1) Matsutomi et al.: Aspects of Inundated Flow due to the 2004 Indian Ocean Tsunami, *CEJ*, pp.167-195, 2006.
- 2) 松富・山口：インドネシアとタイにおける津波氾濫流の諸相，第12回日本地震工学シンポジウム，pp.1554-1557, 2006.
- 3) 山口・松富：漂流物を伴う津波氾濫流の基礎的研究，土木学会東北支部研究講演概要集，pp.252-253, 2006.