

漂流物を伴う氾濫流の基礎実験とモデル化

Experiments and Development of a Model on the Inundated Flow with Floating Bodies

松富英夫¹・藤井 碧²・山口 健³

Hideo MATSUTOMI, Midori FUJII and Takeshi YAMAGUCHI

Inundated flow with floating bodies was videotaped in Banda Aceh at the time of the 2004 Indian Ocean Tsunami, and attracted public attention. In light of the circumstances, this study presents a model for estimating the moving velocity of floating bodies, i.e., the current velocity of inundated flow with floating bodies in a steady state. The model adopts the notion of the bore theory regarding the floating bodies as a hypothetical fluid, and takes account of the resistance due to the floating bodies piling up at the surge front of inundated flow. Experiments are carried out to grasp the behavior of floating bodies at the surge front. Through examinations of the experimental results and the solutions of the model, it is concluded that the model is useful to estimate the inundated flow with floating bodies.

1. はじめに

2004 年インド洋津波では, 北スマトラ Banda Aceh 市中心部の大モスク前の例を代表として, 漂流物を伴う氾濫流が話題となった。防災・減災上, 漂流物を伴う氾濫流やその衝突力の評価は緊急な課題と考えられる。

松富ら (2005) は, 瓦礫などの漂流物を海水とは密度の異なる仮想的な流体と見立て, 定常段波の考えを適用して, 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」のような流体状漂流物の場合には上記理論が有用であるが, 個体漂流物の場合には, 漂流物と底面や漂流物間の摩擦などに起因する氾濫流の塞き止め効果により, 適用できないことを確認した (松富・山口, 2006)。

そこで, 本研究は新たに水理実験を行い, 対象氾濫流先端部における漂流物の塞き止め現象を理解・モデル化し, 既報理論の拡張を図り, 実験との比較を通して拡張理論の有用性と対象氾濫流の基本特性を検討するものである。

2. 実験とその結果

(1) 実験

実験装置の概略, 測定機器の配置と諸記号の定義を図-1 に示す。実験水路は長さ 11.0 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路である。氾濫流はゲート急開流れで模擬し, 貯水深 h_1 は 20, 25, 30 cm の 3 通りとした (表-1)。

漂流物には漂流物群間の空隙率 e ($=1 - \text{全漂流物の占有面積} / \text{漂流物配置域面積}$) が評価し易い断面 $1.8 \text{ cm} \times 1.8 \text{ cm}$, 長さ $L_w = 1.8, 5.4, 10.8 \text{ cm}$ の立方体や

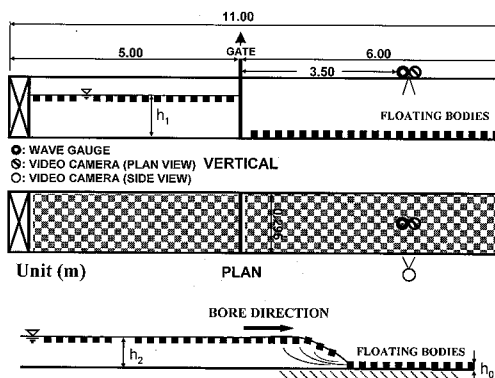


図-1 実験水路, 測定機器の配置と諸記号の定義

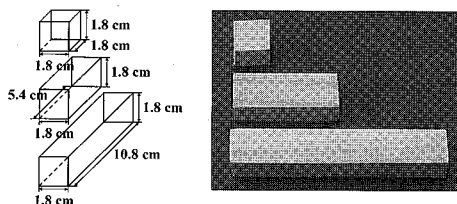


図-2 漂流物模型

表-1 実験条件

h_1 (cm)	L_w (cm)	e	初期配置
20	1.8, 5.4, 10.8	0.4, 0.6, 0.8	一層, ランダム
25	1.8, 5.4, 10.8	0.4, 0.6, 0.8	一層, ランダム
30	1.8, 5.4, 10.8	0.4, 0.6, 0.8	一層, ランダム

表-2 漂流物模型の比重経時変化

t (min.)	0	1	3	5	10	15	30	60	90
比重	0.49	0.51	0.56	0.64	0.71	0.72	0.73	0.73	0.73

直方体の白木材 (ミツガ) を用いた (図-2)。実験中に漂流物の密度 ρ_0 が大きく変化しないように, 予め 30 分以上水に浸して使用した。このときの比重は 0.73 で, その経時変化例を表-2 に示す。気乾時としばらく水に浸した後の白木材間の静止摩擦係数は各々 0.43 と 1.49

1 正会員 工博 秋田大学工学資源学部附属地域防災力研究センター長
2 日立公共システムサービス
3 JR 東日本コンサルタンツ

(>1.0)であった。

漂流物はゲート上・下流域の全域に配置し、その向きはランダムとした。漂流物層は一層で(仮想流体の水深 h_0 は1.8 cmということになる)、予備実験により、ゲート操作の影響や非定常性が弱くなるゲートから3.5 mの観察断面において準定常流時の空隙率と初期ゲート下流域の空隙率が同じになるように、初期ゲート上流域の漂流物量を決めた。初期ゲート下流域の空隙率は0.4, 0.6, 0.8の3通りとした。

表-1に実験条件をまとめて示す。各条件3回ずつ実験を行った。

測定項目は超音波式変位計((株)ケネック, UH1000)による観察断面での氾濫水深 h_2 、水路上方と側面からのビデオ撮影による観察断面での漂流物移動速度 u_2 ($\equiv$ 氾濫流速)と空隙率、および氾濫流先端部の漂流物域層長 L_{exp} である。漂流物移動速度は氾濫流先端部の漂流物域層背後直後のもので、ビデオのコマ送り数と漂流物移動距離から評価した。準定常性の確認などのため、観察断面から2 m下流にも超音波式変位計を設置した。

(2) 結果と考察

図-3に貯水深 h_1 と漂流物長 L_w をパラメータとして、漂流物移動速度 u_2 と空隙率 e の関係を示す。図中には参考としてStoker (1948)の理論値も示されている。図から、①実験値が全般的にStokerの理論値より小さいこと(漂流物が「瓦礫+流体」のような流体状の場合は、逆に実験値の方が大きい(松富・山口, 2006)), ②漂流物配置が密な(空隙率が小さい)ほど、また漂流物が長い(大きい)ほど、漂流物移動速度が小さい傾向にあること、③貯水深、ひいては氾濫水深が大きいほど、氾濫水深に対して漂流物が相対的に小さくなるためか、Stokerの理論値との差が小さい傾向となることが判る。これらは、固体漂流物に氾濫流を塞ぎ止める効果があり、その要因が多岐であることを示している。

図-4に氾濫水深 h_2 と空隙率 e の関係を示す。図から、漂流物配置が密なほど、また漂流物が長いほど、氾濫水深が大きい傾向にあることが判る。この傾向は、上述の漂流物移動速度の変化傾向と質量保存則から推測つき、道理にかなったものである。さらに、各空隙率における最大値で規格化したデータの値域幅は氾濫水深の方が狭く、漂流物の影響は漂流物移動速度に比べて氾濫水深に鈍いことが判る。

図-5と6に氾濫流先端部での漂流物域層長 L_{exp} と空隙率、無次元漂流物域層長 L_{exp}/h_2 と空隙率の関係を示す。ここで、漂流物域層長は跳水における跳水長に相当するもので、氾濫流先端からその背後の漂流物層が一層となる点までの漂流物域層の縦断面積をプランニメータで求め、それを氾濫水深で割ったものと定義している。

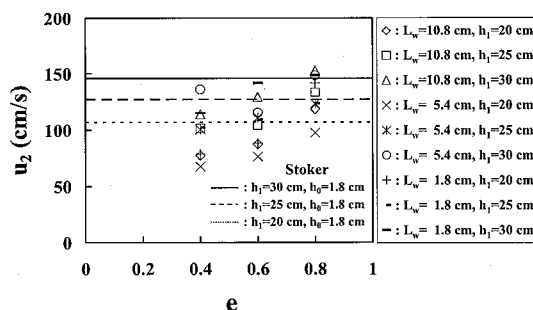


図-3 漂流物移動速度と空隙率の関係

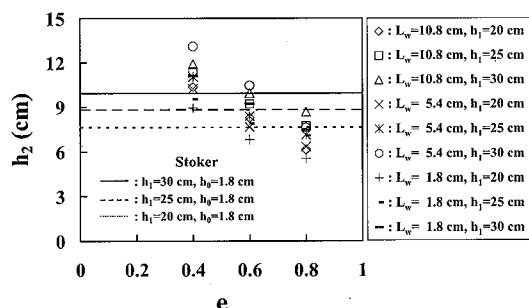


図-4 氾濫水深と空隙率の関係

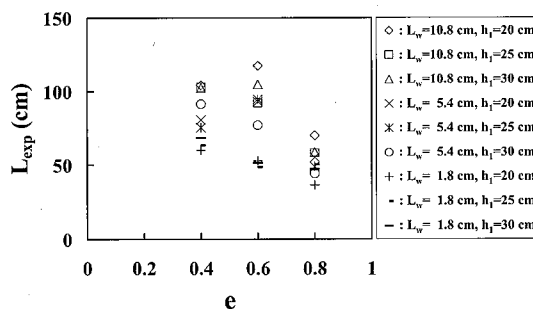


図-5 漂流物域層長と空隙率の関係

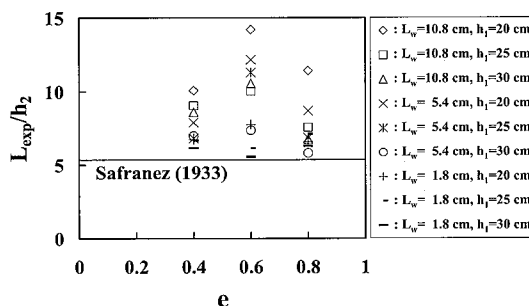


図-6 無次元漂流物域層長と空隙率の関係

図-7に漂流物域層の縦断面形例を示すが(背後の網目間隔は5 cm)、漂流物層が一層となる点の判定に個人差が考えられ、漂流物域層長の精度はあまりよくないと思

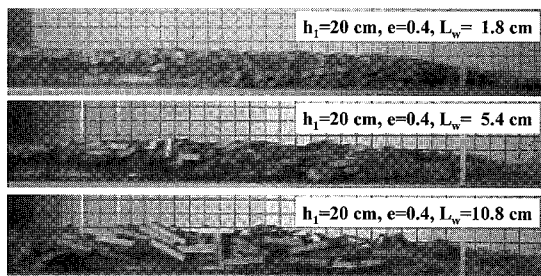


図-7 氾濫流先端部での漂流物域層の縦断面形状例 (ビデオ画像)

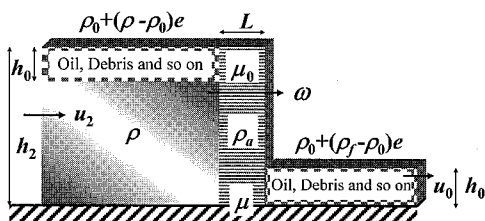


図-8 漂流物を伴う氾濫流の新モデル

われる。図-5 から、漂流物配置が密なほど、また漂流物が長いほど、さらに敢えて言えば貯水深が小さいほど、漂流物域層長が長い傾向にあることが判る。図-6 中の実線は Safranez (1933) の跳水長に関する実験式である。図から、固体漂流物を伴うと、漂流物域層を矩形で表現しているにもかかわらず、跳水の場合より不連続部が長くなることが判る。

以上より、対象氾濫流の理論構築においては、①漂流物間の相互作用、②その相互作用を氾濫流の塞き止め効果へ反映させるために、漂流物と底面の相互作用を考慮する必要があると言える。

3. 理論の構築

氾濫流の下流域に瓦礫などを想定し、それらがある密度の均質な流体(以下、仮想流体と呼ぶ)と見立てる。氾濫流はこの仮想流体中を伝播し、定常段波を形成すると仮定する。漂流物間の相互作用は漂流物間の摩擦によるとする。この摩擦は便宜的に静止摩擦とし、その係数を μ_0 として、本研究では 1.0 を採用する。これは、漂流物の自重がそのまま下の接した漂流物に伝えられると考えていることになる。漂流物間の相互作用を氾濫流の塞き止め効果へ反映させるために、漂流物と底面の相互作用を考えねばならない。この相互作用も摩擦によるとし、その係数を μ とする。この μ は、本来は未知である μ_0 をも取込んだ合成摩擦係数と捉えるべきものである。

本研究のモデルを図-8 に示す。本図は仮想流体の密度が海水の密度 ρ より小さい場合のものである。既報

モデル(松富ら, 2005)との違いは、氾濫流先端部に矩形で表現した漂流物域層を設けていることである。本モデルは、氾濫流先端部で漂流物が積み上げられ、積み上げられた漂流物間及び漂流物と底面間の摩擦による抵抗が氾濫流に反作用として働いて氾濫流を堰上げ、氾濫流上流域の漂流物は氾濫流下流域の分布状態を維持し、その空隙部に海水が入り込むというものである。

(1) 連続式

本モデルの質量保存則は次式となる

$$[\{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}h_0 + \rho(h_2 - h_0)] \times (\omega - u_2) = \{\rho_0 + (\rho_f - \rho_0)e\}h_0(\omega - u_0) \quad (1)$$

ここで、 ρ_f は氾濫流下流域の漂流物群空隙部の密度(空気の場合は零)、 h_2 は氾濫流上流域の水深(氾濫水深)、 u_2 は氾濫流上流域の流速(氾濫流速=漂流物移動速度)、 h_0 は氾濫流上・下流域の漂流物層の厚さ、 u_0 は氾濫流下流域の流速(一般には零)、 ω は氾濫伝播速度である。式(1)右辺の中括弧内の密度が仮想流体の密度である。

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

仮想流体層と海水層の両層で静水圧分布を仮定し、漂流物間の静止摩擦係数 $\mu_0 = 1.0$ としたときの運動量保存則は次式となる。

$$\begin{aligned} & [\{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}h_0 + \rho(h_2 - h_0)](\omega - u_2)u_2 \\ & - \{\rho_0 + (\rho_f - \rho_0)e\}h_0(\omega - u_0)u_0 = \frac{1}{2}\rho g(h_2 - h_0)^2 \\ & + \{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}g h_2 h_0 \\ & - \frac{1}{2}\{2(1 - e)\rho_0 + (\rho + \rho_f)e\}g h_0^2 - \mu_0 \rho g L h_2 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 g は重力加速度、 $\rho_a (= \rho_0 \sim \rho)$ と L は各々氾濫流先端部の漂流物域層の密度と長さである。

式(2)において、 $\rho_0 = \rho_f = \rho$ かつ $\mu = L = 0$ とすれば、理想段波理論の運動量保存則となる。

式(2)では氾濫流下流域の仮想流体の静水圧を考慮している。瓦礫などの固体漂流物を想定した場合、この静水圧は無視できると考えられ(Matsutomi et al., 2006)、式(2)は次式となる。

$$\begin{aligned} & [\{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}h_0 + \rho(h_2 - h_0)](\omega - u_2)u_2 \\ & - \{\rho_0 + (\rho_f - \rho_0)e\}h_0(\omega - u_0)u_0 = \frac{1}{2}\rho g(h_2 - h_0)^2 \\ & + \{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}g h_2 h_0 \\ & - \frac{1}{2}\{\rho_0 + (\rho - \rho_0)e\}g h_0^2 - \mu \rho a g L h_2 \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

その他、氾濫流上流域で漂流物が鉛直方向に一様分布する場合、仮想流体より密度の小さい流体が氾濫する場合などへ本理論を拡張することは容易である。

(3) 氾濫流速と氾濫伝播速度

式(1)と(2)から、氾濫流速 u_2 と氾濫伝播速度 ω として各々次式を得る。

$$u_2 = \frac{\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} - \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e + \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right) \right] \omega + \left[1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right] u_0}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right] + \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right)} \quad (4)$$

$$\omega = u_0 + \sqrt{\frac{g \left[\frac{\rho_0}{\rho} + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) e \right] h_0 + h_2 - h_0}{\left\{ 1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \left\{ \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) e + \frac{h_2}{h_0} - 1 \right\}}} \times \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right)^2 + \left\{ 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \frac{h_2}{h_0}} - \frac{1}{2} \left[2(1-e) + \left(\frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) e \right] - \mu \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{L}{h_0} \frac{h_2}{h_0}} \quad (5)$$

式(1)と(3)から、氾濫伝播速度として次式を得る。

$$\omega = u_0 + \sqrt{\frac{g \left[\frac{\rho_0}{\rho} + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) e \right] h_0 + h_2 - h_0}{\left\{ 1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \left\{ \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) e + \frac{h_2}{h_0} - 1 \right\}}} \times \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{h_2}{h_0} - 1 \right)^2 + \left\{ 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right\} \frac{h_2}{h_0}} - \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) e \right] - \mu \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{L}{h_0} \frac{h_2}{h_0}} \quad (6)$$

このときの氾濫流速は式(4)でよい。

本理論では、ドライ・ベッドへの氾濫であっても氾濫流速と氾濫伝播速度が異なったものとなる。これは氾濫流が下流域の漂流物(仮想流体)を取込むことによる。

4. 基礎特性

式(5)の根号中の最終項の合成摩擦係数 μ 、漂流物域層の密度 ρ_a とその長さ L は漂流物の種類、大きさ、形状や氾濫流の規模(氾濫水深)などに依存すると考えられる。これらの評価には水理実験が必要であるが、それでも個々の評価、特に合成摩擦係数と漂流物域層の密度の評価は容易でない。そこで、本研究ではこれらを一体とした $\mu \rho_a L / \rho_0 h_0$ の無次元形で用いて(以下、総合抵抗係数と呼ぶ)、対象氾濫流の基礎特性を論じることとする。

図-9に漂流物移動速度 u_2 に関する実験値(3回分)と理論値の比較例を示す。ただし、静止摩擦係数 μ_0 を1.0とし(以下でも同じ)、氾濫水深 h_2 を含めて実験値と理論値が一致するように総合抵抗係数を決めている。

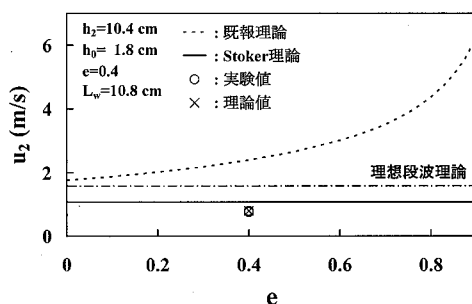


図-9 漂流物移動速度の実験値と理想値の比較例 ($h_1=20\text{cm}$, $\mu_0=1.0$, $\mu \rho_a L / \rho_0 h_0=2.4$)

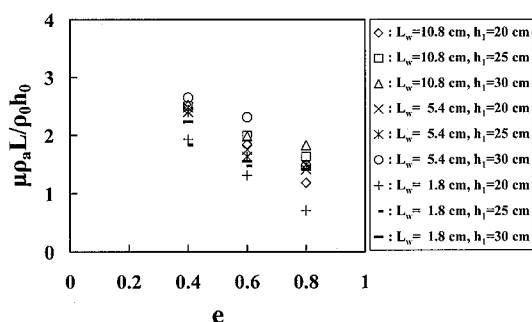


図-10 総合抵抗係数の空隙率への依存性 ($\mu_0=1.0$)

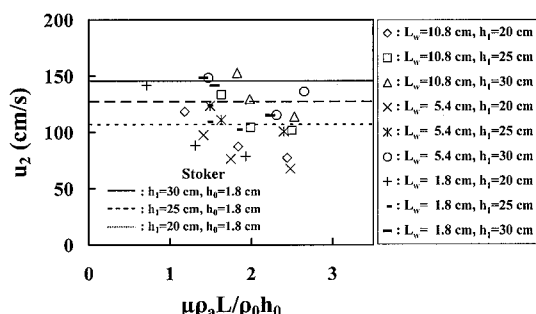


図-11 漂流物移動速度の総合抵抗係数への依存性 ($\mu_0=1.0$)

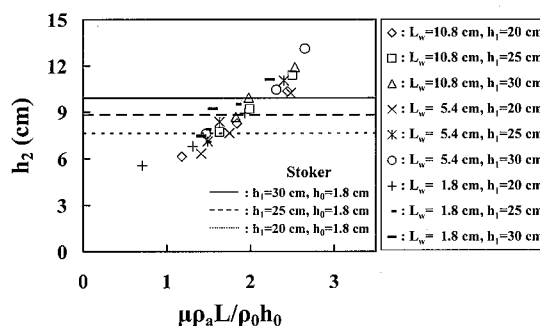


図-12 氾濫水深の総合抵抗係数への依存性 ($\mu_0=1.0$)

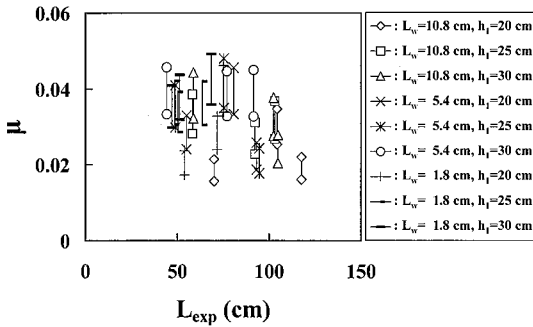


図-13 合成摩擦係数の漂流物域層長への依存性 ($\mu_0=1.0$)

図中には破線で既報理論 (松富ら, 2005), 一点鎖線で理想段波理論, 実線で Stoker 理論が示されている。図から, 既報理論や理想段波理論, Stoker 理論は実験値の説明ができないが, 本理論は, 総合抵抗係数が適切に選択されれば, 実験値の説明が可能であることが判る。総合抵抗係数の変化特性の検討や評価法の開発などは今後の課題としたい。

上述のように実験値と理論値を一致させたときの総合抵抗係数と空隙率の関係を図-10 に示す。図から, ①大きさと形が整い, 細長比が小さい木材からなる漂流物では, 総合抵抗係数は3程度以下であること, ②漂流物配置が密なほど, また漂流物が長いほど, 総合抵抗係数が大きい傾向にあること, ③氾濫流の規模が小さいほど, 総合抵抗係数が小さい傾向にあることが判る。②の傾向は図-3 や 4 における考察と整合する。③の傾向は, 漂流物域層長は長くなる傾向にあるものの (図-5), 流れが穏やかになり, 漂流物と底面の接触も穏やかになるためかもしれない。

図-11 に漂流物移動速度の総合抵抗係数への依存性を示す。図から, データのパラツキが大きい, 総合抵抗係数が小さくなるにつれて, 漂流物移動速度が大きくなることが判る。

図-12 に氾濫水深の総合抵抗係数への依存性を示す。図から, ①氾濫水深は漂流物移動速度に比べて, データのまとまりがよいこと, ②漂流物移動速度とは逆に, 総合抵抗係数が小さくなるにつれて, 氾濫水深が小さくなること, ③総合抵抗係数が小さくなるにつれて, 漂流物を伴わないサージフロントとしての性質が強くなるためか, 氾濫水深が Stoker 理論より小さくなることが判る。

図-13 は, 漂流物移動速度と氾濫水深だけでなく, 漂流物域層長も実験値と理論値を一致させ, すなわち $L_{exp} = L$ とし, $\rho_a = \rho_0$ (μ の上限値が得られる) と $\rho_a = \rho$ (μ の下限値が得られる) としたときの合成摩擦係数と漂流物域層長の関係を示す。合成摩擦係数の上・下限値を実線で結んでおり, 実際の値はこれらの間となる。図から, ①合成摩擦係数は0.02～0.05程度で, 木材同士や木材

と鋼材の摩擦係数に比べて1オーダー程度小さいこと, ②漂流物域層長が長くなるにつれて, 合成摩擦係数が小さくなること, ③漂流物の長さが同じとき, 氾濫流の規模が大きくなるにつれて, 合成摩擦係数も大きくなる傾向であることが判る。①は, 流体が潤滑油の役割を果たしていると考えられ, 妥当な傾向と思われる。③の傾向は図-10 における考察と整合し, 氾濫流の規模が大きくなるにつれて, 氾濫流先端部での流体運動が激しくなり, 漂流物と底面の接触も激しくなるためかもしれない。

5. おわりに

新たに水理実験を行い, 対象氾濫流先端部における漂流物の塞き止め現象を理解・モデル化し, 既報理論を包含したものに拡張した。実験との比較を通して, 拡張理論の有用性も確認した。

対象氾濫流の基礎特性を検討し, 次の知見を得た。

- ①大きさや形が整い, 細長比が小さい木材からなる漂流物では, 総合抵抗係数 ($=\mu \rho_a L / \rho_0 h_0$) は3程度以下である。
- ②合成摩擦係数 μ は0.02～0.05程度で, 木材同士や木材と鋼材の摩擦係数に比べて1オーダー程度小さい。
- ③氾濫流の規模が小さくなるにつれて, 総合抵抗係数が小さくなる傾向にある。これは定常流の抵抗係数と逆傾向である。
- ④氾濫流の規模が小さくなるにつれて, 漂流物域層長は長くなる傾向にあり, 合成摩擦係数は小さくなる傾向にある。

謝辞: 本研究にあたり, 平成19年度文科省科学研究費一般研究(C) (代表: 松富英夫) の補助を受けた。実験にあたり, 秋田大学大学院博士後期課程 今井健太郎氏と秋田大学卒業研究生 岡本憲助君, 近藤洋平君, 伊藤史臣君の助力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 松富英夫・榊山 勉・Sindhu Nugroho・都司嘉宣・谷岡勇市郎・西村裕一・鎌滝孝信・村上嘉謙・松山昌史・栗塚一範(2005): Banda Aceh と周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1366-1370.
- 松富英夫・山口 健(2006): 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.
- Matsutomi, H., T. Sakakiyama, S. Nugroho and M. Matsuyama (2006): Aspects of inundated flow due to the 2004 Indian Ocean Tsunami, CEJ, Vol. 48, No. 2, pp. 167-195.
- Safranez, K. (1933): Length of hydraulic jump, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Munich, Vol. 28, No. 24, pp. 277-282.
- Stoker, J. J. (1948): The formation of breakers and bores, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 1, pp. 1-87.