漂流物を伴う氾濫流の水理量評価法と基本特性

A Way to Estimate Hydraulic Quantities and Basic Characteristics of Inundated Flow with Floating Bodies

松富英夫¹•古戸貴大²

Hideo MATSUTOMI and Takahiro FURUTO

A method for estimating basic hydraulic quantities of inundated flow with floating bodies in the hydraulic experiments is presented and its validity is confirmed through examining quasi-steadiness of the flow, consistency among inundation depth of the flow, current velocity of the flow and void ratio of layer having floating bodies, and so on. Using the experimental data estimated by the presented method, applicability of the existing theory for estimating the moving velocity of floating bodies, i.e., the current velocity of inundated flow with floating bodies is examined, and it is concluded that the theory is useful in a practical situation. Fundamental characteristics of the inundated flow with floating bodies are also discussed through examinations of the experimental results and solutions of the theory.

1. はじめに

陸上に氾濫する津波は多かれ少なかれ雑多な漂流物を 伴う.その雑多な漂流物の中で、大きな流木や漁船等が 建物などに致命的な被害を与えるが、これらの衝突力の 評価には衝突速度を知る必要がある.つまり、漂流物を 伴う氾濫流の流速を知る必要がある.

松冨ら(2007)は漂流物を伴う氾濫流の流速が評価で きる簡易モデル(図-1参照.図中の諸記号の説明は順次 行う)を構築し,理論と実験の両面から対象氾濫流の基 本特性を検討した.しかし,理論の適用度やその検討の ための実験における水理量評価法が曖昧であった.

そこで、本研究は新たに実験を行い、対象氾濫流の実 験での水理量評価法とその合理性を示し、この方法によ る実験値を用いて既報理論の適用性及び実験値と既報理 論に基づいて対象氾濫流の基本特性を総合的に論じる.

2. 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 -2に示す.実験水路は水平に設置された両面ガラス張り 鋼製矩形水路で,氾濫流はゲート急開流れで模擬した.

漂流物には漂流物群間の空隙率e (=1-全漂流物の占 有面積/漂流物配置域の面積)が評価し易い断面1.8 cm ×1.8 cm,長さ L_* =1.8, 5.4, 10.8 cm (各々をL1, L3, L6 と記す)の白木材を用いた (図-3). 漂流物は実験中に その密度 ρ_0 が変化しないように、予め30分以上水に浸 して用いた.浸した後の漂流物の比重 (= ρ_0/ρ . ρ は 水の密度)の経時変化例を表-1に示す. なぜか,既報 (松富ら, 2007)と同じ漂流物でありながら、比重が既 報のものより小さめで、その傾向は大きい漂流物ほど強

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	前田道路㈱



図-1 漂流物を伴う氾濫流の簡易モデルと諸記号の定義



図-2 実験水路,測定機器の配置と諸記号の定義



図-3 実験で用いた漂流物模型

表-1 漂流物模型の比重の経時変化例

t (min)	0	1	3	5	10	30	60	90
比重 (L1)	0.47	0.50	0.51	0.52	0.56	0.61	0.61	0.61
比重 (L3)	0.45	0.48	0.49	0.51	0.54	0.58	0.59	0.59
比重 (L6)	0.44	0.46	0.48	0.49	0.51	0.55	0.56	0.56

表-2 実験条件

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

い. 気乾時と湿潤時の漂流物間(漂流物と水路底面間) の静止摩擦係数 µ₀は0.48(0.12)と1.05(0.13)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、それを流体と見立 てたとき(松富ら、2007)の水深加は1.8 cmということ なる.ゲート上流域の漂流物量は、ゲート操作の影響や 流れの非定常性が弱くなるゲートからの距離X=3.5 mの 観察断面において、準定常流時と初期ゲート下流域の空 隙率が同じとなるように、予備実験により決めた.

表-2に実験条件を示す. hは初期ゲート上流域の水深で,全部で27ケースあり,各ケース3回実験を行った.

測定項目は超音波式変位計(㈱キーエンス, UD-500) による観察断面での氾濫水深h,水路の上方と側面から のビデオ撮影による観察断面での漂流物移動速度(≅ 氾濫流速u₂)と空隙率e,水路側面からのビデオ撮影に よる氾濫流先端部の漂流物域層の縦断面積Aである.氾 濫伝播速度ωの評価と流れの準定常性の確認のため,観 察断面から1m下流にも超音波式変位計を設置した.

3. 水理量評価法と実験結果

(1) 水理量評価法

実験での氾濫流先端から漂流物域層が一層となる点ま での漂流物域層の縦断面形例(塗りつぶし部分)を図-4 に示す. 図中のメッシュ間隔は5 cmで,漂流物域層が一 層となる点が何れもX=3.5 mの観察断面位置(図の左側 部分の太い縦実線)に達したときのものである.実際の 漂流物域層は図-1に示すモデルのように矩形ではない. 理論と対比するため,実験の漂流物域層長 L_{ep} は,漂流 物域層の縦断面積A(塗りつぶし部分)とこのときの観 察断面での氾濫水深 h_c を用いて, $L_{ep}=A/h_c$ で評価する. 漂流物域層の縦断面積はビデオ画像を紙に出力し,プラ ニメータで評価する.また,漂流物移動速度と空隙率は このときの観察断面でのもので,漂流物移動速度はビデ オのコマ送り数と漂流物移動距離から評価する.

観察断面とその1m下流(X=4.5 m)での氾濫水深の 経時変化例を図-5に示す.図には氾濫流先端が観察断面 (図の左部分の太い横線)に達したとき($t=t_1$)と観察断 面(図の右部分の太い横線)で漂流物域層が一層となっ たとき($t=t_2$)の平面写真, $t=t_1$ のときの氾濫水深 h_{2ep} (太い矢印),氾濫伝播速度の評価に用いる時間($=t_5-t_1$. t_5 は氾濫流先端がX=4.5 mに達したときの時間),漂流物 域層の縦断面形の評価例(図-4参照)も示されている. 図から,①氾濫水深の経時変化に平坦部が認められ,2



図-4 漂流物域層の評価例(塗りつぶし部分)



図−5 実験での氾濫水深h,漂流物移動速度u,氾濫伝播速 度ωと漂流物域層の縦断面積Aの評価法

測点でのその高さがほぼ同じ, ②漂流物移動速度と空隙 率を同時評価したときの氾濫水深が平坦部のそれとほぼ 同じことが判る.よって,準定常性が満たされ,準定常 部分の氾濫水深,漂流物移動速度と空隙率を評価してい ることから,この水理量評価法は合理的であると言える.

(2) 実験結果

上述の水理量評価法に基づいた実験結果を示す.

図-6は漂流物長L-と貯水深hをパラメータとしたときの氾濫水深hと空隙率eの関係である.図にはStoker理論(1948)による氾濫水深も示されている.図から,氾濫水深は基本的にStoker理論より大きいことが判る.これは、漂流物域層による抵抗により氾濫流が堰上げられるためで,水理量評価法が妥当であることも示している. 空隙率が大きいときはStoker理論よりやや小さい.これは、氾濫距離が十分でないためか,漂流物域層の堰上げ効果が弱く、漂流物を伴わないサージフロントの性質が残っているためと考えられる.また、貯水深(氾濫流の規模)が大きく、空隙率が小さくなれば、氾濫水深は大きくなる.これは既報と同じ傾向であるが、漂流物長の氾濫水深への影響は、既報と異なり、認められない.

図-7と8に漂流物移動速度u₂と氾濫伝播速度ωの空隙 率との関係を示す.これらの図から,①漂流物移動速度 と氾濫伝播速度の実験値が常にStoker理論によるそれら の値より小さい,②氾濫伝播速度が漂流物移動速度より





大きく(27例中2例を除く),漂流物を伴う氾濫流は段波 の性質を持つ,③貯水深と空隙率が大きいほど,漂流物 移動速度と氾濫伝播速度は大きいことが判る.①は堰上 げ効果やエネルギー損失の点から当然のことで,これも 水理量評価法が妥当であることを示している.②は42が 漂流物移動速度であることに注意を要する.③は既報の 傾向と同じであるが,漂流物長の漂流物移動速度と氾濫 伝播速度への影響は,既報と異なり,認められない.

図-9と10に漂流物域層の縦断面積Aと空隙率,漂流物 域層長Leveと空隙率の関係を示す.これらの図から,① 空隙率が小さくなるにつれて,漂流物域層の縦断面積と 漂流物域層長は大きくなり,それらへの漂流物長の影響 度が増加すること,②漂流物長が短くなるにつれて,そ れらが小さくなることが判る.

図-11に無次元漂流物域層長L_{ep}/h₂と空隙率の関係を示 す.図にはL_{ep}=跳水長としたときのSafranez(1933)の 跳水長の実験式も示されている.図から、①貯水深が大





きくなるにつれて,無次元漂流物域層長は短くなる,② 空隙率が大きくなるにつれて,無次元漂流物域層長は減 少し,一定値(≅6)に収束することが判る.①は氾濫 流(段波)が強くなるので,常識的な結果である.②の 一定値は無次元跳水長の値とほぼ同じで,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を示している.

4. 理論の適用性

既報理論の適用性を検討するため、氾濫水深h₂と漂流 物域層長Lに実験値を用い、実験と理論の氾濫伝播速度 ωを一致させたときの実験と理論の漂流物移動速度u₂の 比較を図-12、実験と理論の漂流物移動速度を一致させ たときの実験と理論の氾濫伝播速度の比較を図-13に示 す. 各図には両者の差が25%となる線も示されている.

図-12の漂流物移動速度については理論値が大きめで、 その傾向は空隙率が小さいときに顕著である.これは、 一般に氾濫流速>漂流物移動速度であり、空隙率が小さいときは漂流物域層の水路底面との接触面積はほぼ一定 (氾濫水深は準定常)であるが、漂流物域層長の非定常 性により、この傾向が強くなるためと考えられる。

図-13の氾濫伝播速度については実験値が大きめであ る. これは,実験の漂流物移動速度が氾濫伝播速度の割 に小さめであることに対応したもので,漂流物を伴う氾 濫流が段波の性質を持つことを示していると言える.

とは言え、空隙率<0.6のときを除き、現実的な空隙 率のときは既報理論の適用性が非常によいことが判る.

5. 基本特性

本研究の水理量評価法で得られた実験値と既報理論を 用いて,対象氾濫流の基本特性を総合的に検討する.

理論において、氾濫水深 h_c と漂流物域層長Lは実験値 を用い、漂流物移動速度 u_c と氾濫伝播速度 ω は実験値と 理論値が比率で同程度に一致するようにして決めた総合 抵抗係数 $\mu o_a L/\rho_0 h_0$ と空隙率eの関係を**図**-14に示す. 図 から、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、総合抵抗係数は6以下である、②空隙率 が大きいほど、また貯水深が小さいほど、総合抵抗係数 が小さいことが判る. ①の総合抵抗係数値は既報の約2 倍である. ②は既報と同じであるが、漂流物長の総合抵 抗係数への影響は、既報と異なり、認められない.

総合抵抗係数値は次のように考えて概略説明できる.

空隙率がほぼ1の場合を考える.氾濫流に取り込まれ る時間あたりの漂流物量は少ないが,取り込まれたもの は氾濫流先端部に蓄積され,漂流物域層を形成し,氾濫 現象が定常になるとする.静水圧分布,漂流物間の静止 摩擦係数 μ_0 =1.0としたとき,運動量方程式は次式とな る.

 $\frac{1}{2}\rho g h_2^2 = \mu \rho_a g L h_2 \tag{1}$

ここで、gは重力加速度、 μ は合成摩擦係数、 $\rho_a(=\rho_0 \sim \rho)$ は氾濫流先端部の漂流物域層の密度である.このときは氾濫流速と氾濫伝播速度は同じ($u_2=\omega$) である.

式(1)を変形すると、次の総合抵抗係数の式を得る.

$$\mu \frac{\rho_a L}{\rho_0 h_0} = \frac{1}{2} \frac{\rho_b h_2}{\rho_0 h_0}$$
(2)

実験での氾濫水深は7~12 cmで (図-6), $h_c/h_o=3.9~$ 6.7となる.実験での = ρ_0/ρ =0.56~0.61である (表-1). これらの値を式(2)に代入すると, $\mu\rho_a L/\rho_0 h_0$ = 3.2~6.0 を得る. この下限値は図-14での下限値とほぼ同じであ る. これは,上記の考えが妥当であり,氾濫流の時間あ たりの漂流物取込量が少なくても,取り込まれたものは 氾濫流先端部に蓄積され,漂流物域層を形成することを







図-13 氾濫伝播速度の実験値と理論値の比較



図-14 総合抵抗係数の空隙率への依存性(µ₀=1.0)



図-15 氾濫水深の総合抵抗係数への依存性(μ₀=1.0)

示している.これを実験で確認するには長い水路が必要 である.

図-15に氾濫水深の総合抵抗係数への依存性を示す. 図から、データのまとまりが非常によく、氾濫水深に対して総合抵抗係数はよいパラメータであることが判る. 氾濫水深が判れば、この図からμρ_aL/ρ₀h₀が評価でき、



図-16 漂流物移動速度の総合抵抗係数への依存性(μ₀=1.0)



図-17 氾濫伝播速度の総合抵抗係数への依存性(μ₀=1.0)



図-18 合成摩擦係数の漂流物域層長への依存性(μ₀=1.0)



図-19 合成摩擦係数の空隙率への依存性(µ₀=1.0)

ρ や ρ₀, h₀, eは一般に既知なので, 漂流物移動速度と 氾濫伝播速度が理論的に評価できることになる.

図-16と17に漂流物移動速度と氾濫伝播速度の総合抵 抗係数への依存性を示す.図から、データのまとまりが 悪いことが判る.この理由として、①これらの速度は実 験条件の差に敏感である、②図-12や13と異なり、これ らの速度の実験値と理論値が比率で同程度に一致するよ うに総合抵抗係数が決定されていることが考えられる.

評価された総合抵抗係数において、 $L=L_{ap}$ とし、 $\rho_{a}=\rho_{0}$ と ρ (各々合成摩擦係数の上下限値を与える)としたときの合成摩擦係数と漂流物域層長の関係を**図-18**に示す.合成摩擦係数の変化傾向は既報と同じであるが、その値は0.03~0.13で、既報の0.02~0.05に比べて約2.3倍となった.上限値の0.13は湿潤漂流物と水路底面間の静止摩擦係数値と同じであり、興味深い.

合成摩擦係数も理論的に検討してみる.式(2)に図-11 で得られた結果L_{ex}/h₂=6を代入すると,次式を得る.

$$\mu \frac{\rho_a}{\rho} = \frac{1}{12} \tag{3}$$

 $\rho_a \rho = \rho_0 / \rho \sim \rho / \rho = 0.56 \sim 1.0$ と考えられ,式(3)から $\mu = 0.08 \sim 0.14$ (平均0.11)を得る.この値は、図-19に 示すように、空隙率が小さくなれば、 μ がやや小さくな ることを考えると、e=0.8のときの $\mu = 0.05 \sim 0.13$ (0.09) やe=0.4のときの $\mu = 0.03 \sim 0.13$ (0.08)とよく対応して いる.

6. おわりに

漂流物を伴う氾濫流の水理量評価法を提示し、その方 法に基づく実験値と既報理論を用いて対象氾濫流の基本 特性を検討し、次の結果を得た.

①提示した水理量評価法は合理的で,実験値のまとまりが既報に比べてよくなった.

②氾濫伝播速度 ω は漂流物移動速度(\cong 氾濫流速 u_2) より大きく,漂流物を伴う氾濫流は段波の性質を示す.

③空隙率e<0.6のときを除き,現実的な空隙率のとき は既報理論の適用性が非常によいことを確認した.

④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6以下,合成摩擦係数 μ は0.03~0.13で,各々既報の約2倍と2.3倍になった.

謝辞:本研究にあたり,平成20年度の文部科学省科学 研究費一般研究(C)と北東北国立3大学連携推進研究プ ロジェクトの補助を受けた.記して感謝の意を表する.

参考文献

- 松冨英夫・藤井 碧・山口 健(2007): 漂流物を伴う氾濫 流の基礎実験とモデル化,海岸工学論文集,第54巻, pp.226-230.
- 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, Communi cations on Pure and Applied Mathematics, Vol. 1, pp. 1-87.