

九州大学工学部 正員 平野 宗夫
 山口大学工学部 正員 羽田野 繁彦
 九州大学大学院 学生員 松尾 俊洋

1. まえがき

泥水塊が河川等の傾斜底面上を流下していく下層密度流は、後続流の存在する plume と存在しない thermal に大別される。本報は、この両者を統一的に表現するために、水路幅が流下方向に直線的に拡張される場合の plume 実験を行い、前報¹⁾での thermal 実験の結果とを比較検討して、その流動特性を明らかにしようとするものである。

2. 理論

現象は非定常の下層密度流であると考え、解析に際して、図-1に示した2層流モデルを用いた。下層の流体に関する体積保存則、質量保存則およびx方向についての運動方程式を特性曲線法で解くと、 $\frac{dx}{dt} = \bar{u}$ 上で以下の式がそれぞれ得られる。

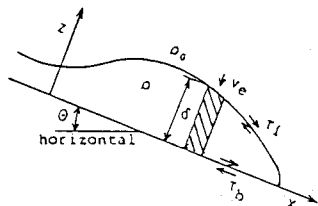


図-1 解析モデル

$$\frac{d\delta}{dx} = E - \frac{\delta}{\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} = m - \frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} \quad (1) \quad \frac{d\rho}{dx} = -\frac{\rho E}{\delta} \quad (2)$$

$$\frac{d\hat{u}}{dx} = 2 \frac{\rho}{\rho_0} g \sin \theta - \frac{2}{\rho \delta} g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho \delta^3 \right)$$

$$-2 \frac{\hat{u}}{\delta} \left\{ (1-k)E + f_1 + 2 \frac{\delta}{b} f_2 \right\} + 2 \frac{\hat{u}^2}{b} \frac{db}{dx} (1-k) - 2 \hat{u} (\beta-1) \frac{\hat{u}}{\delta} \frac{\partial}{\partial x} (\hat{u} \delta) - 4 \hat{u} (\beta-1) \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} - 2 \hat{u} \frac{\partial \beta}{\partial x} \quad (3)$$

ここに、 b は水路幅、 ρ および ρ_0 はそれぞれ下層流体と上層流体の密度、 θ は底面傾斜角、 $\bar{u}$ はx方向の流速成分、 δ は下層流体の流動厚さ、 β は運動量補正係数、 f_1 は内部界面と底面の間の抵抗係数、 f_2 は側壁の抵抗係数、 $k = \hat{u}|_{z=\delta} / \hat{u}$ 、 E は連行係数、 m はふくらみ係数($m = E - \frac{\delta}{\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$)である。 m 、 E および拡張率 i を一定とし、最大厚さの断面を対象とすると、式(1)~(3)は以下のように表わされる。

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \left\{ \frac{im}{2} (X-X_0)^2 + mB(X-X_0) + B \right\} / \left\{ i(X-X_0) + B \right\} \quad (4) \quad \frac{d\rho}{d\rho_0} = \left(\frac{b\delta}{b_0\delta_0} \right)^{\frac{E}{m}} \quad (5)$$

$$\frac{dU^2}{dx} = 2F_0^2 \frac{\rho}{\rho_0} \sin \theta - \frac{2U^2}{\delta \delta_0} \left\{ (1-k)E + f_1 + 2 \frac{\delta}{b} f_2 \right\} + \frac{2U^2}{b \delta_0} (1-k) \frac{db}{dx} + \frac{4U^2}{\delta \delta_0} (\beta-1) (m-E) - 2U^2 \frac{\partial \beta}{\partial x} \quad (6)$$

ここに、 $B = b_0/\delta_0$ 、 $X = x/\delta_0$ 、 $i = db/dx$ 、 $F_0 = \hat{u}_0 / \sqrt{4\rho_0 g \delta_0}$ 、 $U = \hat{u}/\hat{u}_0$ であり、添字0は初期値を示す。式(4)~(6)において E と m が現象を規定する重要なパラメータとなるので、以下これらについて実験的に検討する。

3. 実験結果とその考察

(1) 実験 実験水路は前報¹⁾のものを用い、head tankで所定の流量を流して plume を発生させ、塩分濃度、先端部の流動厚さおよび移動速度を測定した。実験条件は表-1に示すとおりである。

(2) 実験結果および考察

(a) ふくらみ係数 $m = \frac{d\delta}{dx} + \frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} \quad (7)$

ここで、 m は周囲水の連行と速度のむずみによる流動厚さの増加割合も含めたものである。図-2のように m は底面勾配に比例して増加するが、拡張率が同一の場合、plume と thermal の差は顕著ではなかった。

db/dx	Q (l/s)	$\sin \theta$
0.020	0.05	0.046
		0.103
		0.152
		0.202
	0.10	0.047
		0.102
0.040	0.05	0.153
		0.202
		0.047
		0.103
	0.10	0.152
		0.202

表-1 実験条件

(b) 連行係数 E 式(2)を $E = \text{const.}$ で積分すると

$$E = -\ln\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right) / \int_{x_0}^x \frac{dx}{\delta} \quad (8)$$

図-3は、式(8)で得られた plume における E の値と thermal における E の比を底面勾配に対してプロットしたものである。底面勾配による変化は明瞭ではないが、平均して thermal では plume の 1.7 倍程度となっている。

(c) $\partial \hat{a} / \partial x$ この値は E と m の平均値を式(1)に適用して求められ、図-4に底面勾配に対してプロットしてみたが、thermal では正、plume では負の値をそれぞれ示した。これは plume の場合、後流から先端部への流入があるため、流速が先端部に比べ大きく $\partial \hat{a} / \partial x < 0$ で、thermal の場合、初期の供給の影響がなくなると先端部への流入がなくなり、逆に後方にとり残されるので $\partial \hat{a} / \partial x > 0$ となるためである。

(d) ふくらみ係数と連行係数の比 E/m 式(5)より、

$$\frac{E}{m} = -\ln\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right) / \ln\left(\frac{b\hat{s}}{b_0\hat{s}_0}\right) \quad (9)$$

上式より、 E/m の平均値を求め、底面勾配との関係を示すと図-5のようになる。thermal の場合 $E/m > 1.0$ 、plume の場合、 $E/m < 1.0$ で、また、thermal では振幅率が同一であれば底面勾配とともに減少し、同一勾配では、振幅率が大きいほど小さくなっている。一方、plume では振幅率にあまり関係せず、底面勾配が変化しても、ほぼ一定という結果が得られた。

4. 実験値と計算値の比較

式(4)~(6)の適合性をみるため、密度と速度の実験値と計算値を比較すると図-6になる。thermal では $E/m = 2 \sim 3$ で両者が一致し、plume では密度は $E/m = 1$ 程度で、速度は $E/m = 1 \sim 2$ で一致している。

<参考文献>

- 1) 平野・羽田野・外村・松尾；泥水密度流先端部の挙動について（第5報）第38回年次講演会 1983.9
- 2) 平野・羽田野；土木学会論文報告集 No. 332, 1983.4

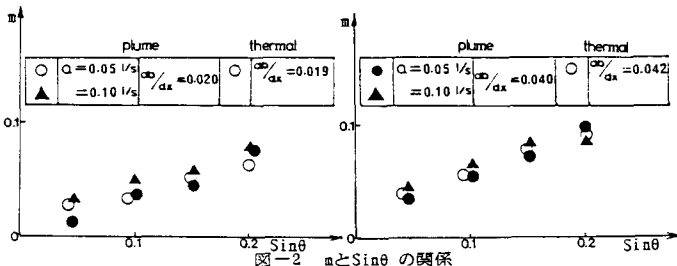


図-2 m と $\text{Sin } \theta$ の関係

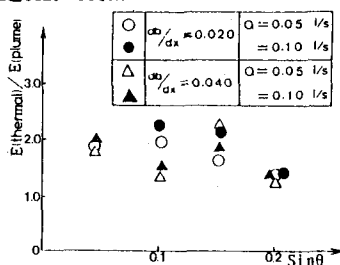


図-3 $E_{\text{thermal}}/E_{\text{plume}}$ と $\text{Sin } \theta$ の関係

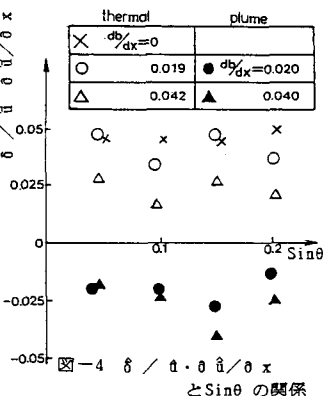


図-4 $\delta / d \cdot \partial \hat{a} / \partial x$ と $\text{Sin } \theta$ の関係

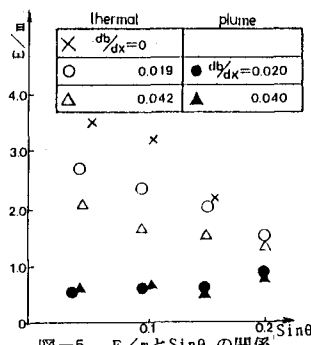
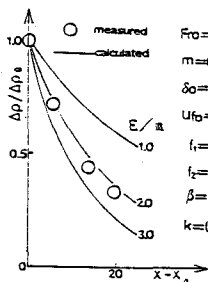
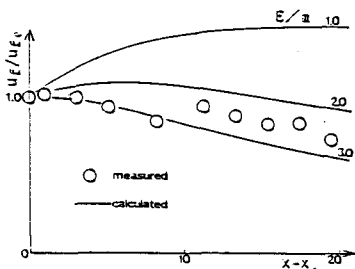


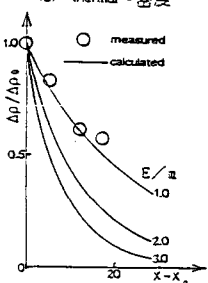
図-5 E/m と $\text{Sin } \theta$ の関係



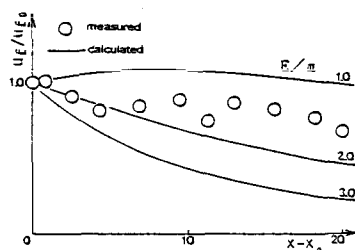
(a) thermal-密度



(b) thermal-速度



(c) plume-密度



(d) plume-速度

図-6 密度・速度の実験値と計算値