

傾斜密度流の流動について

九州大学工学部 正会員 平野 宗夫
山口大学工学部 正会員 羽田野 義典
九州大学大学院 学生員 松尾 俊洋

1 まえがき

傾斜密度流は浮力流体の供給が連続的であるか、不連続であるかにより *plume* と *thermal* に分類されている。本稿では、漸拡散を流下する傾斜密度流の流動、特にふくらみ係数と進行係数についての実験結果について述べ、これらの値の関係から *plume* と *thermal* の相違を明らかにする。

2 理論

漸拡水路における下層密度流の2層流モデルによる取扱いが平野ら¹⁾により示されており、その概要は以下のようである。図-1に示すようなモデルで考え、下層流体に関する体積保存則、質量保存則およびx方向の運動方程式を特性曲線 $d\delta/dt = \bar{u}$ 上で表示すると、

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

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = 2 \frac{\rho}{\rho_0} g \sin \theta - \frac{2}{\rho_0} g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} (\pm \rho \delta^2) - 2 \frac{\bar{u}^2}{\delta} \left\{ E(1-k) + f_1 + 2 \frac{\delta}{b} f_2 \right\}$$

$$+ 2 \frac{\bar{u}^2}{b} \frac{db}{dx} (1-k) + 2(\beta-1) \left\{ \frac{\bar{u}}{\delta} \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\delta) - \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right\} - 2 \bar{u}^2 \frac{\partial \beta}{\partial x} \quad \dots (3)$$

ここに、 E は進行係数、 $m = E - \delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u}/\partial x$ 、 $\bar{u}$ は断面平均流速である。水路幅と底面勾配が一定の場合、先端部の形状が相似であり、かつ最大厚さが流下距離に対してほぼ直線的に増大することから、最大厚さの断面を対象とし、 m および E を一定とすると、式(1)および(2)より

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \left\{ \frac{1}{2} m (X-X_0)^2 + m B (X-X_0) + B \right\} / \left\{ i (X-X_0) + B \right\} \quad \dots (4)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{b \delta}{b_0 \delta_0} \right)^{-E/m} \quad \dots (5)$$

ここに、 $B = b_0/\delta_0$ 、 $X = x/\delta_0$ 、 $i = db/dx$ であり、添字0は初期値。

3. 実験結果と考察

(1) ふくらみ係数 m

m は進行と速度差による流動厚さの増加割合であり、式(1)より得られる次式

$$m = \frac{d\delta}{dx} + \frac{\delta}{b} \frac{db}{dx} \quad \dots (6)$$

に δ の実験値を適用して得られる。その結果が図-2と3に示

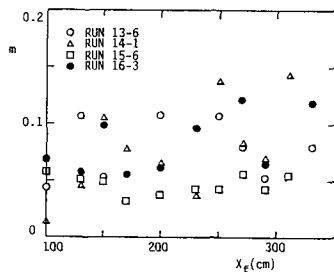
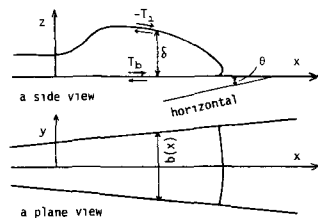
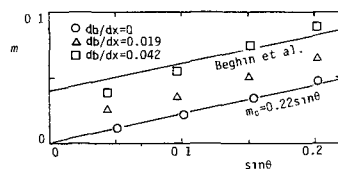
図-2 $m \sim x_f$ の関係

図-1 モデル

Thermal salinity 10000ppm				
RUN	V(T)	db/dx	sinθ	b ₀ (cm)
5-1,2,3,7 4,5,6,8,9,10	2 5	0	0.052	7.1
6-1,2,3,7,10,11 4,5,6,8,9	2 5	0	0.102	7.1
7-1,2,3,7 4,5,6,8,9,10	2 5	0	0.155	7.1
8-1,6 2,3,4,5	2 5	0	0.203	7.1
11-1,2,3,11 4,5,6,7,8,9,10	2 4	0.019	0.045	8.2
12-1,2,5 3,4,6,7,8	2 4	0.019	0.098	8.2
13-1,2,5,6,9 3,4,7,8	2 3	0.019	0.152	8.2
14-1,2,5,6,7 3,4,8,9	2 3	0.019	0.203	8.2
15-1,2,5,9 3,4,6,7,8	2 3	0.042	0.045	7.1
16-1,2,5,9,10 3,4,6,7,8	2 3	0.042	0.098	7.1
17-1,2,5,6,7,10 3,4,8,9	2 3	0.042	0.152	7.1
18-1,2,5,6,7,10 3,4,8,9	2 3	0.042	0.203	7.1

表-1 実験条件

図-3 $m \sim \sin \theta$ の関係

されている。図-2より、多少バラツキはあるものの、 m は流れ方向にほぼ一定とみなされる。また、その値は底面勾配と振幅率が大きい程大きい値を示している。なお、本実験における m の値は、一定幅水路における Beghin²⁾の値より小さくなっている。

(2) 連行係数

$E = \text{const}$ として式(2)を変形すると、

$$E = \frac{-\ln(\rho/\rho_0)}{\int_{x_0}^x dx/\delta} \quad \dots (7)$$

図-4は流動厚さと密度の測定値より上式の分母 分子を求めて示したものである。多少バラツキはあるが、 E は流れ方向にほぼ一定である。また、図-5は同一勾配・振幅率の plume と thermal の実験で得られた E の値の比を示したものである。thermal の連行係数は plume のものの2倍程度となっている。

(3) 連行係数とふくらみ係数の比

式(5)を変形すると、

$$\frac{E}{m} = \frac{-\ln(\rho/\rho_0)}{\ln(b\delta/b_0\delta_0)} \quad \dots (8)$$

上式に実験値を適用した結果が図-6および図-7に示されている。図より plume では $E/m < 1$ 、thermal では $E/m > 1$ となっている。このことは plume と thermal の本質的な違いを示している。すなわち、plume では後続流が head に比べて速いから head は連行と後続流の流入によりふくらむため $E/m < 1$ 、一方 thermal では逆に後続流があまり残されるような形となりため、 $E/m > 1$ となるのである。また、図-8は各実験条件での平均の m と E の値から $\delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u} / \partial x$ を求めて示したものである。その値は plume の場合に負、thermal の場合に正となっており、上述の plume と thermal の流れの特性を示している。

参考文献

- 1) 平野宗夫・羽田野繁義；漸次水路における密度流先端部の挙動，土木学会論文報告集 7332号，1993
- 2) Beghin, P., Hopfinger, E.J. and Britton, R.E. ; Gravitational convection from instantaneous source on inclined boundaries, J. Fluid Mech. vol. 107, 1981.

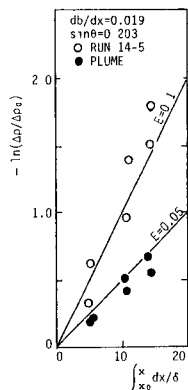


図-4 $-\ln(\rho/\rho_0) \sim \int_{x_0}^x dx/\delta$ の関係

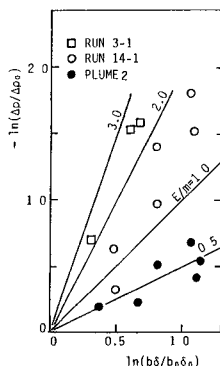


図-6 $-\ln(\rho/\rho_0) \sim \ln(b\delta/b_0\delta_0)$ の関係

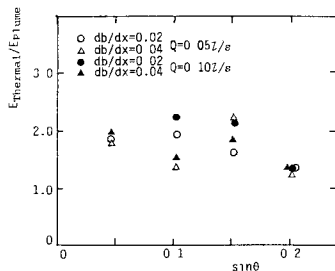


図-5 連行係数の比

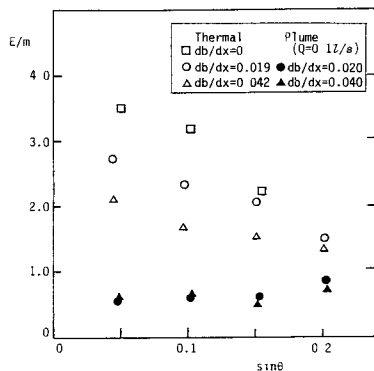


図-7 $E/m \sim \sin \theta$ の関係

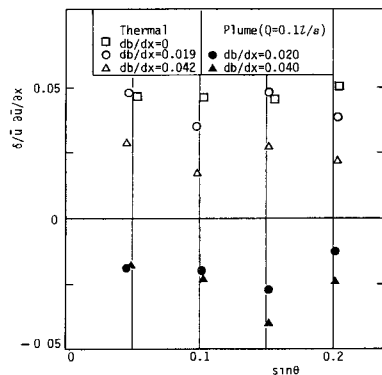


図-8 $\delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u} / \partial x \sim \sin \theta$ の関係