

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 製 滋 義

清水建設K.K. 正 員 外 村 健 司

九州大学大学院 学生員 〇 松 尾 俊 洋

1. まえがき

底面に沿って流下する下層密度流は、後続流を伴う plume と後続流のない thermal に分けられる。本報は水路幅が流下方向に直線的に広がる場合の thermal について実験的、理論的に検討したものである。

2. 理論

現象を非定常な下層密度流と考へ、図-1のような2層流モデルとして取り扱う。下層の密度の大きな流体に関する体積保存則、質量保存則およびx方向の運動方程式と特性曲線法で解くことにより、特性曲線 $d\hat{x}/dt = \hat{u}$ 上で、次の3式がそれぞれ得られる。

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

$$\frac{d\Delta\rho}{d\hat{x}} = -\frac{\Delta\rho E}{\hat{\delta}} \quad (2)$$

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

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

ここに、 b は水路幅、 ρ および ρ_s はそれぞれ下層流体および上層流体の密度、 θ は底面傾斜角、 S は境界の長さ、 u は x 方向の流速成分、 δ は下層流の流動厚さ、 E は進行係数、 $m = E - \frac{\hat{\delta}}{b} \frac{db}{d\hat{x}}$ である。水路幅および底面勾配が一定の場合、密度流先端部の形状がほぼ相似を保たれ、かつ、最大厚さは流下距離に対してほぼ直線的に増大するという実験結果より、最大厚さの断面を対象とすると、 m を一定とすることができ、 E 、 m および拡散率 $\lambda = \frac{db}{d\hat{x}}$ を一定とすると、式(1)、(2)は積分されて、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\hat{\delta}}{\hat{\delta}_s} = \left\{ \frac{\lambda m}{2} (X - X_0)^2 + mB(X - X_0) + B \right\} / \left\{ \lambda (X - X_0) + B \right\} \quad (4) \quad \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0} = \left(\frac{b\hat{\delta}}{b_0\hat{\delta}_0} \right)^{-\frac{E}{m}} \quad (5)$$

ここに、 $B = b/\hat{\delta}_s$ 、 $X = \hat{x}/\hat{\delta}_s$ 、 $\lambda = \frac{db}{d\hat{x}}$ であり、添字0は初期値を示している。速度については、最大厚さの断面では $d\hat{\delta}/d\hat{x} = 0$ であり、密度流先端部内において $\Delta\rho$ の x 方向の変化量が十分小さいと考えると、式(3)右辺第2項以外の項に比べて一般に無視される。これを考慮すると、結局式(3)は無次元形で次式のように表せる。

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

ここに、 $F_0 = \hat{u}_0 / \sqrt{\Delta\rho_0 g \hat{\delta}_s / \rho}$ および $U = \hat{u}/\hat{u}_0$ である。

3. 実験結果とその考察

(1) 実験 実験水路の上流端より1mの所から水路幅を直線的に広げ、水道水を満たした後、上流端より着色塩水(濃度10000ppm)を所定の体積だけ投入し、塩分濃度(採水位置 $X = 120, 180, 260, 320\text{cm}$)、先端部の発達および先端移動速度を測定した。拡散率 $\lambda = \frac{db}{d\hat{x}} = 0, 0.019, 0.042$ 、水路勾配は $\sin\theta = 0.045, 0.098, 0.152, 0.203$ について実験を行った。

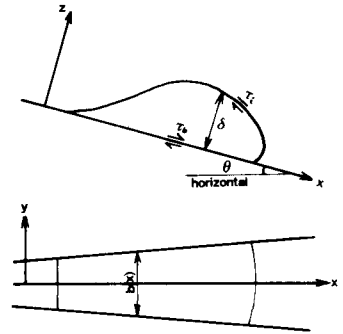


図-1 解析モデル

(2) 実験結果および考察

a) ふくらみ係数 m m は周囲水の連行と速度のひずみによる流動厚さの増加割合を示すもので、 δ の測定値を式(1)に適用することにより求められる。図-2 はその結果の例であるが m の値は流れ方向にほぼ一定と見なして良いようである。

b) 連行係数 E 式(2)を $E = \text{const.}$ として積分すると次式になる。

$$E = -\ln(\rho/\rho_0) / \int_{x_0}^x dx/\delta \quad (7)$$
 同一の勾配および振幅率での thermal と plume の実験で得られた流動厚さと密度の測定値より $-\ln(\rho/\rho_0) \sim \int_{x_0}^x dx/\delta$ の関係をプロットしたのが図-3で、 E の値は thermal の場合の方が、plume の場合より大きく、ほぼ2倍程度になっている。次に、連行係数 E を $\sin\theta$ に対してプロットすると、図-4のように E は勾配が大きくなるに従って増大し、振幅率が大きくなると若干大きくなる。

c) $\delta/\hat{u} \cdot \partial \hat{u} / \partial x$ の値 式(1)における連行係数 E とふくらみ係数 m に各実験条件での平均値を用いて $\delta/\hat{u} \cdot \partial \hat{u} / \partial x$ の値を計算し、 $\sin\theta$ に対してプロットしたのが図-5である。図より、この値は $\sin\theta$ によらずほぼ一定となっていること、plume では負の値となることなどがわかる。

d) ふくらみ係数と連行係数の比 E_m 式(5)より次式が導かれる。 $E_m = -\ln(\rho/\rho_0) / \ln(b\delta/b_0\delta_0)$ (8)
 これに実験値を適用して、 E_m を求め $\sin\theta$ との関係のプロットしたのが図-6である。thermal の場合 $E_m > 2.0$ で、plume の場合 $E_m < 1.0$ となっている。また、 E_m の平均値と $\sin\theta$ の関係を示すと図-7のようになり、振幅率が同じ場合、 E_m の値は水路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い。

4. 実験値と計算値の比較

式(4), (5)より、密度と速度の実験値と計算値の比較を行な、たのが図-8および図-9である。ここで、初期条件は最上流の密度測定点とした。両者は $E_m = 2.0$ のとき比較よく一致し、式(8)での E_m と同じ結果になっている。

〈参考文献〉

1) 平野宗夫・羽田野繁義; 土木学会論文報告集, No.332, 1983.4

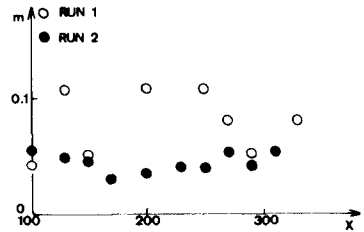


図-2 m の局所的な値

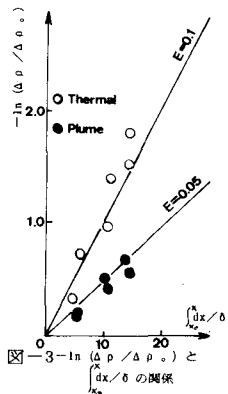


図-3 E と $-\ln(\rho/\rho_0) / \int_{x_0}^x dx/\delta$ の関係

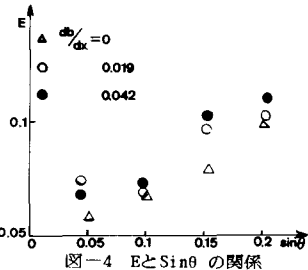


図-4 E と $\sin\theta$ の関係

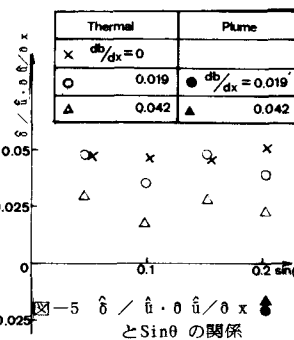


図-5 $\delta / \hat{u} \cdot \partial \hat{u} / \partial x$ と $\sin\theta$ の関係

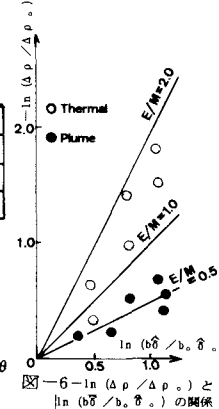


図-6 E_m と $-\ln(\rho/\rho_0) / \int_{x_0}^x dx/\delta$ の関係

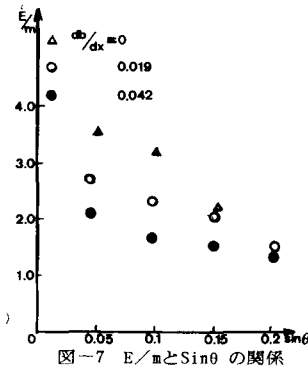


図-7 E_m と $\sin\theta$ の関係

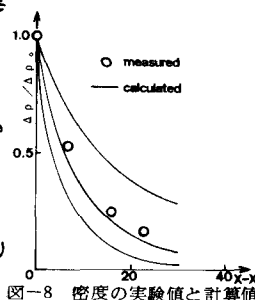


図-8 密度の実験値と計算値

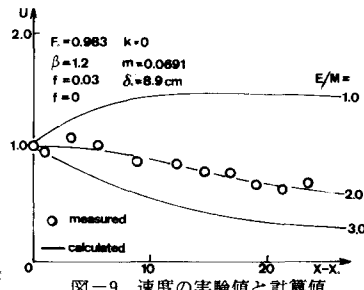


図-9 速度の実験値と計算値