

九州大学工学部 正員 平野宗夫
九州大学工学部 正員 羽田野繁義
熊谷組 K.K. 池田浩二

1. まえがき

泥水密度流先端部の運動機構について近年活発に研究がなされているが、それらの殆んどは二次元流に関するものであり、実際の貯水池が複雑な形状をしていることから、断面の変化も考慮した扱いが必要である。

本研究は、その最も簡単な場合として矩形断面をもち水路幅が流下方向に対して直線的に広がる場合について下層密度流の実験を行ない、また、二次元流に対して著者らが行った解析を拡張して先端部の運動を取扱ったものである。

2. 解析

断面の変化がゆるやかな場合、傾斜密度流も開水路新変流と類似の扱いが可能と考えられる。図-1に示すような二層モデルで考える。重い流体に関する体積保存則、質量保存則および近似的なx方向の運動方程式はそれぞれ次式となる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = g_* b \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} = - \frac{\rho g_*}{\delta} \quad (2)$$

$$\rho \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_0^\delta \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz dy = 4\rho g b \delta \sin \theta - g b \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho \delta^2 \right) + \tau_i - \tau_b \quad (3)$$

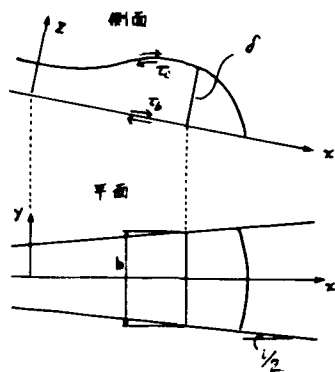


図-1. 模式図

ここに、 A は重い流体の流積、 Q は流量、 b は水路幅、 u 、 v および w はそれぞれ x 、 y および z 方向の流速成分、 g_* は周囲水の連行速度、 $\bar{u}$ は u の断面平均値、 ρ は密度差、 δ は重い流体の幅方向に平均の流動厚さ、 θ は底面の傾斜角、 τ_i および τ_b はそれぞれ界面および底面でのせん断応力である。式(1)、(2)および(3)を若干変形し、運動量補正係数を1.0とすれば同一の特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で考えることが可能となる。以下、上3式を特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で考え、先端部の運動に注目する。まず式(1)において $g_* = E\bar{u}$ 、 $db/dx = i$ とおくと特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で次式が成り立つ。

$$d\delta/dx = E - \delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u} / \partial x - i\delta/b \quad (1)'$$

水路幅が一定の場合、密度流先端部の形状が相似に保たれ、かつ先端部最大厚さが流下距離 x とともにほぼ直線的に増大するという実験結果から、 $d\delta/dx = E - \delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u} / \partial x (=m)$ を一定として扱った。ここでもそれを参考にし、これに水路幅の拡がりの効果を重ね合わせた形で考える。結局 δ は特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で

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

ここに、 $B = b_0/\delta_0$ 、 $X = x/\delta_0$ で添字0は初期値を示す。また ρ も m および E が一定の場合、同上の特性曲線上で

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left\{ \left(\frac{X - X_0}{2B/i(m)} + m \right) (X - X_0) + 1 \right\}^{-E/m} \quad (5)$$

速度については解析解を得ることは困難であるが、特性曲線上で成立つ次式を数値的に解くことは可能である。

$$\frac{dV^2}{dX} = 2F_0 \sin \theta \frac{\Delta \rho}{\rho_0} - 2 \left\{ (1-k)E + f \right\} \frac{V^2}{\left(\frac{g}{\rho_0} \right)} + \frac{1-k}{B + i(X-X_0)} V^2 \quad (6)$$

ここに、 $V = \bar{u} / \bar{u}_0$ 、 $F_0 = \bar{u}_0 / \sqrt{\frac{\rho_0}{g} \delta_0}$ 、 $k = u_0 / \bar{u}$ および $f = (\tau_0 - \tau_1) / (\rho \bar{u}^2)$ である。

3. 実験およびその結果と検討

実験に用いた水路は、下流端に高さ 0.7 m のせきをもつ長さ 4 m の可変勾配水路で、水路幅を途中（上流より 1.0 m）から直線的に狭げたものである。実験は振幅率 0, 0.02, 0.05, 0.09 の場合について前報と同様に行ない、新抜部を下層密度流が流下する時、先端部の発達、塩分濃度、移動速度について測定を行なった。

式 (4) を本実験に適用したものの一例を示したのが図-2 である。図より、多少のばらつきはあるものの、0.065 程度のほぼ一定の m で割合よく一致するようである。二次元の場合、先端の発達率、即ち式 (4) 中の m は勾配によって変化する^{2), 3)}ことが最近明らかにされており、この勾配では二次元の場合の m （これを m_0 とする）は 0.065 よりも小さい値である。これをさらに詳細に調べるために、同一条件にて何回も実験をくり返して m の値を求めた。その結果の一例を示したのが図-3 である。それによると二次元の場合と同様、 m は底面勾配とともに増大していることがわかる。この m の値を実験条件ごとにその平均値を求め、二次元の場合の m_0 との差をとりこれを db/dx に対してプロットしたのが図-4 である。図より $m - m_0$ は db/dx とともに増大することがわかる。 m の大半は連行によると考えられるが、上述の事実は新抜水路における傾斜密度流の連行係数が二次元の場合より大きな値になるという福岡らの実験結果⁴⁾と対応している。また、密度および先端速度の実測値と計算値を比較したのが図-5 および 6 である。

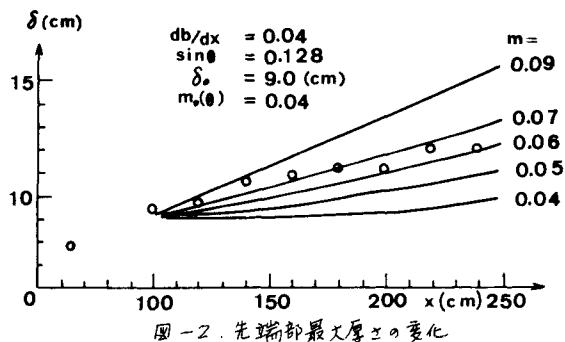


図-2 先端部最大厚さの変化

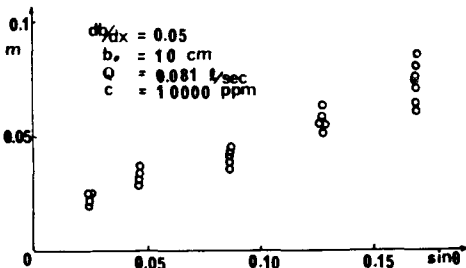


図-3 $m \sim \sin \theta$

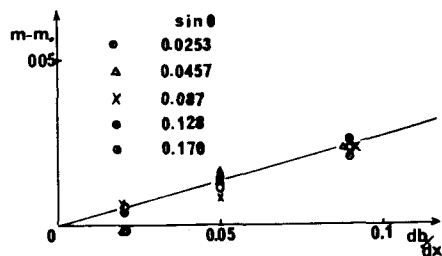


図-4 $m - m_0 \sim db/dx$

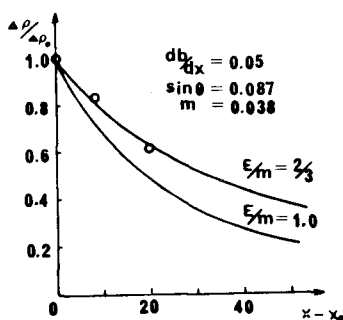


図-5 密度の変化

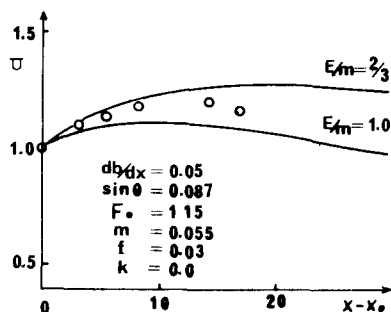


図-6 速度の変化

(参考文献)

- 1) 平野・羽田野・赤司：泥水密度流先端部の挙動について，九大工学集報，オ51巻オ4号，1978.
- 2) 平野・羽田野・高倉：泥水密度流先端部の挙動について（オ2報），オ35回土木学年講，1980.
- 3) R. E. Britter and P. F. Linden: The motion of the front of a gravity current travelling down an incline, J. F. M. vol. 99, Part 3, 1980.
- 4) 福岡・福嶋・宮本：三次元貯水池に流入する濁水の流動機構，東工大土木工科学研究報告，No. 26, 1980.