

九州大学工学部 正会員 平野崇夫
九州大学工学部 正会員 岡田野繁義
九州大学大学院 学生員 外村健司

1. 緒言

泥水密度流の流動について近年活発な研究が行われ、多くの知見が得られている。しかしながら、その多くは粒子の効果を浮遊状態での extra density に対してのみ考慮しており、粒子のまき上げや沈積に対しては考慮していない。粒子がたとえまき上がることは、運動量保存則から明かなように全体の流れに対して減速の効果をもつ反面、浮遊粒子の濃度したがって密度流の motive force を増大させ、加速の効果をもつ。

本研究は、粒子のまき上げおよび沈積を考慮して密度流先端部の挙動について簡単な解析を行ない、これらが先端部の流動特性に及ぼす効果を概観しようとするものである。

2. 理論

Fig. 1 に示すような2層モデルで考える。基礎方程式は底面($y=r_b$)から内部界面($y=r_b+\delta$)までの間の流動体に関する体積保存則、質量保存則および運動方程式であり、それぞれ次のように書かれる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial \delta}{\partial x} = V_e + r_* - r_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} (V_e + r_*) + \frac{\partial}{\partial x} r_* - \frac{\partial \rho}{\partial x} r_f \quad (2)$$

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

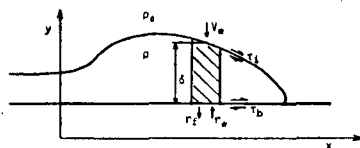


Fig. 1 Notation for the front of a turbidity current.

ここに、 V_e は周囲水の進行速度、 r_* および r_f は単位時間に単位面積の河床で起こる粒子のまき上がりおよび沈積の量(体積)、 $\delta = \int_{r_b}^{r_b+\delta} u dy$ 、 θ は x 軸と水平との角、 $S = \sigma - \rho_0$ 、 $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ 。その他は慣用記号である。今、式(3)を次のように変形する。即ち、左辺の変形にあたり、連続式 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ および式(1)を用いて積分を行なう段階では ρ を一定として扱い、その後密度の違いを考慮する。結局式(3)は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = & -\frac{1}{\delta} \bar{u}^2 \left[\frac{\rho_0}{\rho} (1-k_1) \frac{V_e}{\bar{u}} + \frac{\sigma}{\rho} (1-k_2) \left(\frac{r_*}{\bar{u}} - \frac{r_f}{\bar{u}} \right) + \frac{1}{2} (f_i + f_b) \right] \\ & + \frac{\Delta \rho}{\rho} g \sin \theta - \frac{1}{\rho \delta} g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \rho \delta^2 \right) \end{aligned} \quad (3')$$

ここに、 $k_1 = u(r_b+\delta)/\bar{u}$ 、 $k_2 = u(r_b)/\bar{u}$ 、 $f_i = \frac{1}{2} f_i \rho \bar{u}^2$ 、 $f_b = \frac{1}{2} f_b \rho \bar{u}^2$ であり、運動量補正係数は前報と同様 1.0 とした。結局、式(1)、(2)および(3')を δ 、 $\Delta \rho$ 、 $\bar{u}$ について解けばよい。

粒子のまき上げや沈積のない場合、密度流先端部はほぼ相似な形状を保ちつつ流下し、かつ先端部最大厚さは流下方向にほぼ一定の割合で増大していくことが示されている。著者らは特性曲線法による展開においてこの事実を利用して、先端部最大厚さの断面に注目して先端部の流動特性を解析した。ここでもそれと同様の扱いにより解析を進める。式(1)は特性曲線 $dx/dt = \bar{u}$ 上で $d\delta/dx = (V_e + r_* - r_f)/\bar{u} - \delta/\bar{u} \cdot \partial \bar{u}/\partial x$ となるが、簡単なため前報と同様 $d\delta/dx = m$ (一定) とすると $\delta = m(x-x_0) + \delta_0$ 。また、式(2)および(3')も同一の特性曲線上で考え、 $X = x/\delta_0$ 、 $R = \Delta \rho/\Delta \rho_0$ および $U = \bar{u}/\bar{u}_0$ とおけば、無次元形で次のように書かれる。

$$\frac{dR}{dx} = -\frac{R(E_1+E_2)}{\delta/\delta_0} + \frac{3}{\Delta\rho} \frac{E_2}{\delta/\delta_0} - \frac{R}{\delta/\delta_0} \frac{w_0}{\bar{u}_0 U} - \frac{\Delta\rho}{S} \frac{R^2}{\delta/\delta_0} \frac{w_0}{\bar{u}_0 U} \quad (5)$$

$$\frac{dU}{dx} = -\frac{U}{\delta/\delta_0} K + \frac{R}{\rho/\rho_0 + R} \sin\theta \cdot \frac{\delta_0}{\bar{u}_0^2} \frac{1}{U} \quad (6)$$

二に、 $K = \rho_0/\rho \cdot (1-k_1) E_1 + \sigma/\rho \cdot (1-k_2) (E_2 - \gamma/\bar{u}) + \frac{1}{2} (f_i + f_b)$, δ_0 , $\Delta\rho$ および $\bar{u}_0$ はそれぞれ $x=x_0$ における δ , $\Delta\rho$ および $\bar{u}$ の値, $E_1 = V_0/\bar{u}$, $E_2 = \gamma_0/\bar{u}$, w_0 は粒子の沈降速度, C は粒子の体積濃度で, $\gamma = C w_0$ とした。また、最大厚さの断面で考へ式(3)'の右辺第項は無視した。 δ を式(4)'で与え、上二式を解析的に解くことは困難であるのでここでは数値計算により求める。

3. 計算

式(5)および(6)において、断面勾配を $\sin\theta = 0.02$, $\sigma/\rho_0 = 2.65$, 初期条件を $\bar{u}_0 = 5.0 \text{ m/s}$, $\delta_0 = 5.0 \text{ m}$, $\Delta\rho_0 = 0.076 \text{ g/cm}^3$ とした時、 R と U の特性がパラメーター E_2 および w_0 によりどのように変化するかを調べた結果が Fig. 2~5 に示されている。

1) 既報より $m = 0.30 \sin\theta$, またそれと同じ理由から $k_1 = k_2 = 0$ とし, $E_1/m = 2/3$ および 1.0 について計算した。 $f_i = 1.0 \times 10^{-5}$, $f_b = 1.0 \times 10^{-3}$ とした。パラメーター E_2 および w_0 は流場の特性や粒径などにより変化し、特に E_2 については現時点で明確な結論が得られておらず、これらに適當な値を与えて計算を行なった。

それによると、全部の図に共通して $E_1/m = 2/3$ とした計算が 1.0 としたものに比して増大の傾向が著しいことがわかる。また、パラメーターと初期値などとの兼ね合いもあるが、Fig. 2・3 より他の条件を一定として E_2 を変えた時、 $R \cdot U$ とともに $E_2 = 0$ の場合を除き一旦減少してから増加するが、 E_2 が大きい程、初期の減少およびその区間が小さく、後の増大も著しい。また、 w_0 を変化させた時、 R は常に減少関数となり、 w_0 が大きい程減少が著しい (Fig. 4)。このとき U は一旦減少してから増大するが、 w_0 が小さい程初期の減少およびその区間が小さく、のちの増大も著しい。

以上、 E_2 および w_0 を適当に与えて考えたが、これらを水理量との関連でおさえるため、基礎的な実験を始めている。

参考文献 1) 平野・羽田野, 土木学会論文集, 314号, 1981. 2) Ippen・Harleman, Nat. Bur. of Standard Cir. 521, 1952. 3) 福岡・水村・加納, 第21回水理論文集, 1977.

4) 水理公式集, 1971. 5) 井元, 九州大学卒業論文, 1980.

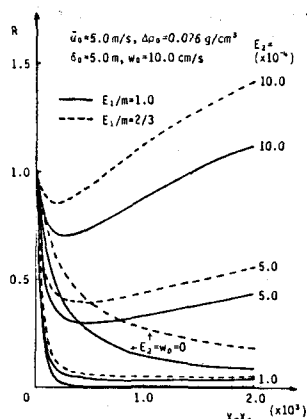


Fig. 2 Change in the property of dimensionless density difference when E_2 is varied.

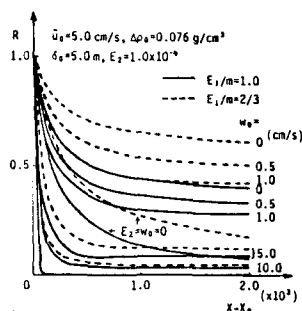


Fig. 4 Change in the property of dimensionless density difference when w_0 is varied.

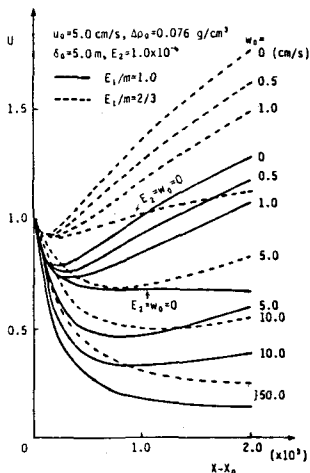


Fig. 5 Change in the property of dimensionless velocity when w_0 is varied.