

重力密度流の連行について

九州工業大学 工学部 正 員○秋山 壽一郎 浦 勝
 // // 学生員 坂 本 浩 一 竹平 由美子

1. 序論

周囲水より重い流体が連続的に斜面上に放出されると、底斜面に沿って流下発達し、下層密度流を形成する。この現象は、自然界においても頻繁に観測される基本的かつ重要な密度流である。本研究は、流入条件及び底面傾斜角を様々に変化させ、同一条件下で繰り返し実験を行ない、重力下層密度流の連行量に関して統一的な知見を得ることを目的としたものである。

2. 実験

実験は二つの実験装置を用いて行った。実験装置 A は水槽(長さ9.0m, 深さ1.22m, 幅0.6m)内に水路(長さ9.0m, 深さ0.45m, 幅0.2m)を設けたもので、底面傾斜角(θ)が 5° , 5.71° , 8.13° , 10° 及び 20° の場合に用い、実験装置 B は水槽(長さ1.53m, 深さ1.48m, 幅1.33m)内に水路(長さ2.0m, 深さ0.36m, 幅0.22m)を設けたもので、 $\theta = 45^\circ$, 60° 及び 90° の場合に用いた。いずれの場合も塩水を淡水中に静かに流入させ、重力密度流を形成した。測定された特性量は、先端部では移動速度(U_{fe})及び先端部形状、後続部では層厚(h)である。これらの諸量はいずれも VTR の画像解析より求めた。また、 $\theta = 5.71^\circ$ および 8.13° の場合に限って、先端部及び後続部の流速(u_r, u)分布および密度(ρ_r, ρ)分布も測定した。流速は $\phi=3\text{mm}$ のマイクロプロベラ流速計(篠塚SV-33W)で計測し、密度は10点同時に採水可能な採水装置($\phi=2\text{mm}$ の銅管製)を使用し、試料を1点につき約10cc注意深く採取し、電気伝導度計によって塩分濃度を求めた。流入条件および周囲水の条件を揃えれば、流れの再現性は極めて良好であったので、同一条件下で VTR、採水装置、流速計を用いた実験を別々に繰り返し行った。

3. 実験結果

重力密度流は図1に示すように先端部と後続部より成り、流動特性が異なるため連行特性も異なる。以下、各部の連行係数について考察を加える。

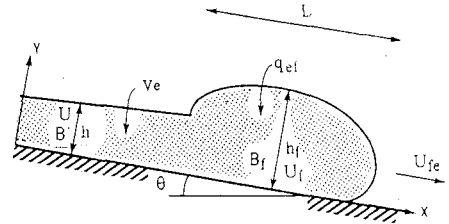


図1. Definition Sketch.

後続部の連行係数：重力密度流は、先端部の上端が砕けながら流下していくため、置き去られた流体塊は後続部で再連行されるが、置き去られた流体塊の密度差は極めて小さいため、後続部の連行特性は連続下層密度流と類似していることが予想される。連続下層密度流の連行係数(E_c)は連続の式より式(1)のように通常定義されるが、Ellison & Turner(1959)が指摘したように、初期浮力 flux ($=B_0 U_0 h_0$) が保存される保存性の連続下層密度流では、Overall Richardson 数 ($R_i = B_0 \cos \theta / U^2$) が流下方向へ一定となる“normalな状態”が存在する。この状態では、 R_i の定義から明らかなように、 U も一定となる。従って、“normal状態”では E_c は式(2)のように簡単になる。

$$E_c = \frac{1}{U} \frac{d}{dx} (Uh) \dots (1), \quad E_c = \frac{dh}{dx} \dots (2)$$

後続部と連続下層密度流が類似した流れかどうかを確かめるためには、後続部に対して“normalな状態”の存在性及び dh/dx の値の検討を行う必要がある。そこで、 $\theta = 5.71^\circ$ 及び 8.13° の場合のデータを用いてこれらの点について検証を行った。 R_i, U, h 及び B の流下方向への挙動を調べた結果、流入点よりある程度下流では $R_i = \text{一定}$, $U = \text{一定}$, $h \sim x$, $B \sim x^{-1}$ となり、その存在性が確認された。また、 $\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で dh/dx について調べた結果が図2である。同図から明らかなように、 dh/dx の値は E & T によって得られた連続下層密度流のそれとほとんど同一となる。このことより、後続部の連行係数に関しては、既存の関係式で十分に表現できると考えられる。そこで、本研究では Turner(1986) によって提案されている式(3)を E_c の関数形として採用した。

$$E_c = \frac{0.08 - 0.1R_i}{1 + 5R_i} \dots (3)$$

図3に今回得られた結果 ($\theta = 5.71^\circ$, 8.13° の場合) と式(3)との比較を示す。斜面上の密度流では底面傾斜角と連行係数との間に対応関係があるので、得られたデータの範囲は広くないが、式(3)は後続部に対してかなりの精度で成立するようである。

先端部の連行係数：先端部の連行量(q_{ei})については、例えば平野・羽田野(1981)及び秋山・浦(1991)によって連行係数としてある程度評価されているが、統一的な見解は得られていないのが実情である。これは、(1) 各研究者によって連行係数の定義が異なること、(2) 各研究者の実験条件が非常に限定されていること、(3) モデルの逆算によって連行係数を求めていることなどが主な理由として挙げられる。そこで、本研究では先端部の連行量に関して統一的な知見を得るために、様々に実験条件を変化させ、連行量を $q_{ei} = \Delta A / \Delta t$ より直接求めた。ここに、 ΔA = 先端部の面積変化量、 Δt = 経過時間である。図4は式(4)及び式(5)で定義される連行係数と θ との

関係を調べたものである。

$$E_{dL} = \frac{q_{ef}}{LU_{fe}} \dots (4), \quad E_{dR} = \frac{q_{ef}}{RU_{fe}} \dots (5)$$

ここに、 R =先端部を半楕円として仮定したときの周囲長 $(=\pi/2^{3/2})(4f^2(\theta)+1)^{1/2}L)$ 、 L =先端部長さ、 U_{fe} =先端移動速度。

次に、 E_{dL} を秋山ら(1991)が与えた式(6)の先端部の体積保存式に基づき推定してみる。

$$E_{dL} = S(\theta) \frac{dh_f}{dx} - f(\theta) \left[\left(\frac{U}{U_{fe}} - 1 + k_v \right) \left(\frac{h}{h_f} \right) - k_v \right] \dots (6)$$

ここに、 $S(\theta)$ =断面面積比 $(=A/h_f L)$ 、 $f(\theta)$ =断面アスペクト比 (h_f/L) 、 dh_f/dx 、 dh/dx =先端部及び後続部の層厚変化率、 U_{fe}/U =先端部と後続部の平均流速比、 k_v =先端部後方の混合層へ流出する平均流速 (U_m) に関する係数 $(=1-U_m/U_f)$ 、 A =先端部断面面積、 h_f =先端部最大層厚、 h =後続部層厚、 U =後続部平均流速、 U_m =混合層平均流速、 U_f =先端部後端での移動速度である。

著者らによる実験研究により、 $\theta=5^\circ \sim 90^\circ$ に対して、以下のような経験式が既に得られている。

$$S(\theta) = 0.75; f(\theta) = 0.0053\theta + 0.23; dh_f/dx = 0.0038\theta; dh/dx = 0.001(\theta + 5)$$

また、 U_{fe}/U に関する関係式も半理論的に求められているので(詳細は省略)、これらの関係式を式(6)に代入し、 k_v を0.4として計算すると E_{dL} は θ の関数として求められる。 θ の高次項の係数は極めて小さいので、これを無視し、線形近似式で表わすと式(7)が得られる。実験より得られた E_{dL} の各底面角に対する平均値を図5に示す。同図より、 E_{dL} は θ の単調増加関数として与えられるようである。

$$E_{dL}(\theta) = 0.0057(\theta + 1.30) \dots (7)$$

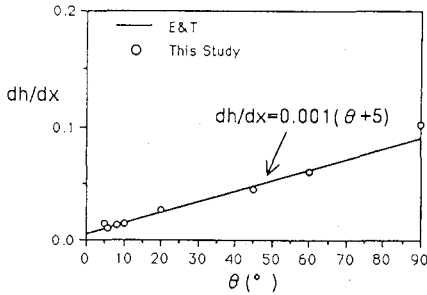


図2. dh/dx vs. θ .

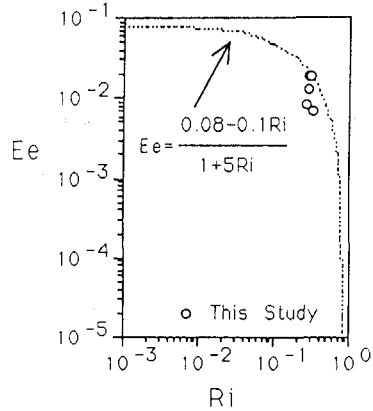


図3. E_e vs. R_i .

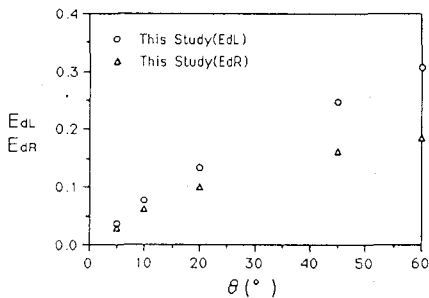


図4. E_{dL} , E_{dR} vs. θ (Exp.).

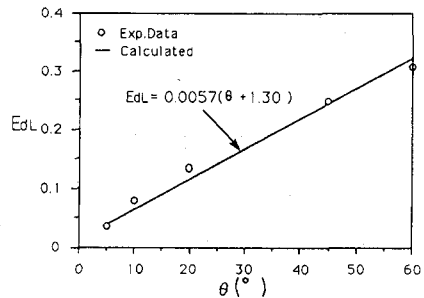


図5. E_{dL} vs. θ (Cal.).

4. 参考文献

- 秋山ら(1991), 水工論文集 第35巻
 秋山・浦(1991), Int'l Symp. on Env. Hyd. Vol.1
 Ellison & Turner(1959), J.F.M.
 平野・羽田野(1981), Memoirs of the Faculty of Eng., Kyusyu Univ., Vol.41, No.4
 Turner(1986), J.F.M