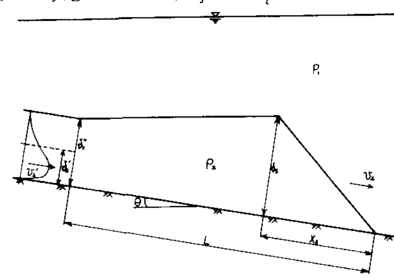
II-187　濁水密度流先端部の形成と流動機構

東京工業大学　学生員　加納敏行
日本テトラポット　正員　水村和正
東京工業大学　正員　福岡捷二

まえがき　濁水が清水中を密度流として進入する場合，非定常性の強い先端部が形成される。この先端部については著者らがすでに定量的測定を行ない，興味ある結果を得ている[1]。本研究はその後の成果をまとめたもので，密度流先端部の発達に関する理論的考察と内部境界面に発生する渦について検討したものである。

先端部の形成機構　前報で報告したように[1]，定常部の底面付近では流速は先端部移動速度より速い。また濃度は水路底付近で最大となっている。従って先端部には定常部より高濃度の濁水が絶えず流入し，流入濁水は先端部に貯留され，先端部の盛り上がり高さ，長さ及び移動速度を決定している。このような先端部の形成機構は無色の塩水密度流中にトレーサーとしてこれと等濃度の着色塩水を加え，トレーサーを追跡する事によって確かめられた。

先端部移動速度と盛り上がり高さの理論的考察　理論解析にあたって次の仮定をおく。(1)映画撮影による実測データの解析から，先端部形状は図－1のような三角形部分と，それに続く水面に平行な内部境界面をもつ台形部分からなるものとする。この時，先端部長さ L は $L=\frac{\delta_s-\delta_s''}{\tan\theta}+X_\delta$ で与える事ができる。実測値の範囲では $a\equiv X_\delta/\delta_s$ はほぼ1.8である。(2)先端部からの清水の混入は無視し，濃度は一定とする。また先端部内の流速は一様とする。(3)濁水は先端部流速よりも速い流速をもつ δ_s' 部分より先端部に流入する。(4)先端部の移動に伴なう全抵抗を次式で表わす。$F_D=C_D\frac{\rho}{2}v_2^2\delta_s$ ------①



図－1　先端部形状のモデル化

以上の仮定のもとで，非定常運動量方程式と連続方程式は次式となる。

運動量方程式

$$\Delta\rho g\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\sin\theta+\frac{1}{2}\Delta\rho g\,\delta_s''^2+\rho_2\delta_s'(v_2'-v_2)^2-\frac{1}{2}C_D\rho_1\delta_s v_2^2$$
$$=\rho_2\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\frac{dv_2}{dt}+\rho_2 v_2\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\text{ ---------------- ②}$$

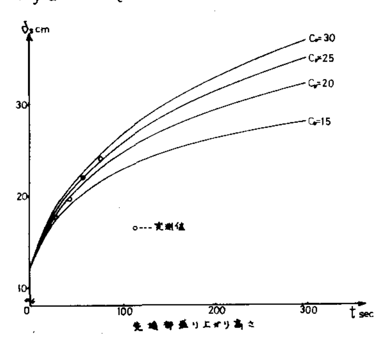
連続方程式

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\delta t=\left(v_2'-v_2+\frac{dL}{dt}\right)\delta_s'\,\delta t\text{ ----------------------- ③}$$

②,③式を整理して

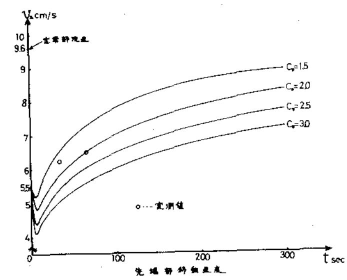
$$\frac{\rho_2(\delta_s-\delta_s')}{\delta_s'}\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)\frac{d^2\delta_s}{dt^2}+\left\{\rho_2\frac{(\delta_s-\delta_s')^2}{\delta_s'}\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)^2-\frac{1}{2}C_D\rho_1\delta_s\frac{(\delta_s-\delta_s')^2}{\delta_s'^2}\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)^2\right.$$
$$\left.+\frac{\rho_2}{\delta_s'}\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)+\rho_2\delta_s\frac{\delta_s-\delta_s'}{\delta_s'}\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)\right\}\left(\frac{d\delta_s}{dt}\right)^2+\left\{C_D\rho_1\delta_s v_2'\frac{\delta_s-\delta_s'}{\delta_s'}\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)\right.$$
$$\left.-\rho_2 v_2'\delta_s\left(\frac{1}{\tan\theta}+a\right)\right\}\frac{d\delta_s}{dt}+\Delta\rho g\left(\frac{\delta_s^2-\delta_s''^2}{2\tan\theta}+\frac{a}{2}\delta_s^2\right)\sin\theta+\frac{1}{2}\Delta\rho g\,\delta_s''^2$$
$$-\frac{1}{2}C_D\rho_1\delta_s v_2'^2=0\text{ -------- ④}$$

を得る。数値計算を行ない，δ_s と v_2 を求めた。流れは $Q=0.2\ l/sec$，流入時の比重は1.0205 数値計算は $(\delta_s)_{t=0}=12cm$，$(v_2)_{t=0}=5.5cm/sec$，$\delta_s'=5.5cm$，$\delta_s''=12cm$ $v_2'=9.6cm$，$\rho_2=1.0038\ g/cm^3$，$\rho_1=1.0000\ g/cm^3$，$\tan\theta=0.1$ の条件について行なった。計算結果を図－2，図－3に示す。図中にこの条件のもとで測定された実測の δ_s，v_2 も示す。測定区間長に制限があるため測定数は十分とはいい難い。④式の C_D の決め方は明らかでないが，解析の中でなされた仮定を認めれば，実測値との対応が



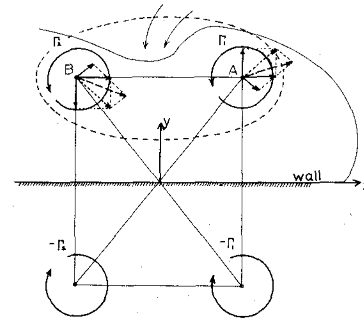
図－2　盛り上がり高さと時間の関係

らC_D＝2.0～2.5の範囲をとると考えられる。ここでは運動に伴なうすべての抵抗が④式で表わされているので、今後はこの抵抗の内容について検討を要する。

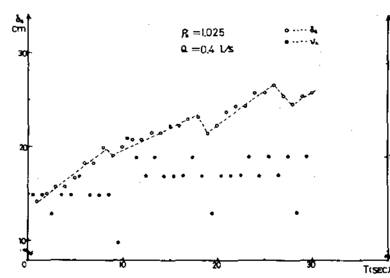


図－3　先端部移動速度と時間の関係

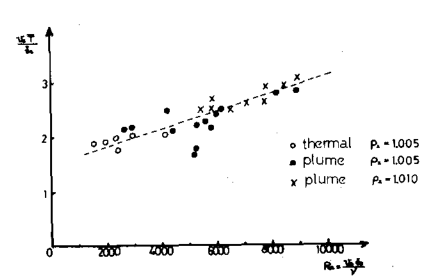
先端部に形成される大きな渦運動の特性　先端部が形成され、移動するとき、一定時間間隔ごとに界面に大きなくびれが観察される。これは境界面の強いシアーと最先端下面からの清水流入によって起こされる不安定性の2つの原因から起こる渦が、互いに影響しあって大きな渦運動を形成するためである。すなわち、最先端から一定間隔で発生した渦は界面沿いに上流に移動し、次第に接近する。図－4はこの状態に相当する。壁での境界条件を満たすためには鏡像の位置に渦を置く。渦A（循環Γ_1）の中心には自分以外の3つの渦によって太い破線の方向（左上向き）に流れが誘起され、渦B（循環Γ_2）には同様に右下向きに流れが起こる。その結果、2つの渦を囲むように点線で示した回転運動が現われる。この時、渦Aの中心付近では界面が盛り上がり、渦Bの中心付近では界面が下がり、図のような界面形状が出現する。このような2つの渦の合体によって生じた大きな渦はほぼ静止状態にあり、その後、先端部から移動してくる渦がある距離まで近づいてくると再び相互作用が現われる。このようなプロセスを一定周期で繰り返し、先端部は盛り上がり高さδ_sと長さLを増大しながら進行する。図－5は撮影した映画から一秒間隔に読み取ったδ_sと移動速度V_fの一例を示している。δ_sは平均的には時間（距離）と共に直線的に増大するが、一定時間ごとにδ_sの値にギャップが現われる。この時間は2つの渦の相互作用が最も強い時（渦の合体時）に対応し、渦の合体が周期的に起ることを示している。前報で[1)]一定条件のもとでは、先端の移動速度は平均的に一定であることを示した。しかし図－5を詳しく検討すると、2つの渦の合体によって形成された大きな渦が、先端の流下によって先端部から置き去りにされる瞬間に、先端部に抵抗が働らき、移動速度が減ずる。離れてしまうと直ちに移動速度を回復する。従って渦の合体によって形成される大きな渦運動は、先端部の運動に対する抵抗としてはさほど重要でなく、界面と底面の抵抗が支配的であると考えてよい。しかし渦の合体が周囲水の混入に果たす役割りが重要である。すなわち、2つの渦が合体すると強い回転運動が生じ、渦の間からかなりの量の周囲水の混入がみられる。次にこのような渦の合体の周期について考察する。2つの渦が合体し、界面が最もくびれる時間間隔を映画とストップウオッチを用いて肉眼で読み取った。このようにして求めた平均周期$\bar{T}$とδ_s、V_fからなるストローハル数の逆数 $1/S_t = V_f\bar{T}/\delta_s$ とRe数$V_f\delta_s/\nu$の関係を図－6に示す。$10^3 < Re < 10^4$の範囲で$1/S_t$は僅かに増大の傾向を示すが、平均値はほぼ一定で2.5である。



図－4　渦の相互作用



図－5　盛り上がり高さと先端速度



図－6　ストローハル数とレイノルズ数の関係

参考文献　1)福田，水村，加納　"泥水密度流先端部の流動特性"

第21回水理講演会論文集　　1977年　2月