

京都大学 防災研究所 正会員 中川 一
京都大学 防災研究所 正会員 芦田 和男
京都大学 防災研究所 正会員 江頭 進治

1. はじめに 定常密度流に関する知見は、貯水池密度流や海底で発生する乱泥流の問題を扱ううえで有用であるが、実際の密度流は貯水池への洪水流入や海底陸棚の崩壊などに伴って形成されるため、非定常性の強い現象である。著者らはこれまでに非定常給水時に形成される密度流、すなわち冷水塊や泥水塊の挙動に関する研究を進めてきており、多くの知見を得てきた。本報では、とくに泥水塊の挙動に焦点を絞り、流塊の支配方程式を提案するとともに、先端部における密度分布式および運動方程式を誘導して、実験結果と比較することにより、理論の適用性を検討する。

2. 支配方程式 流塊は、混合が容易で流動層の厚い先端部と、流動層がしだいに薄くなるといふ後方部とからなっており、流動機構は先端部と後方部とではかなり異なつて特性を示す。そこで、流塊を先端部分と後方部分に分割し、先端部の流下速度を移動する移動座標系 ($\xi = z - s(t)$; $s(t)$: 先端の位置) からみれば流塊の一次元体積、質量および運動量保存則をたると、つぎの(1)~(3)式となる。 体積保存則: $\partial h_f / \partial t - U_f \partial h_f / \partial \xi + \partial (U_f h_f) / \partial \xi = W_e$ (1)

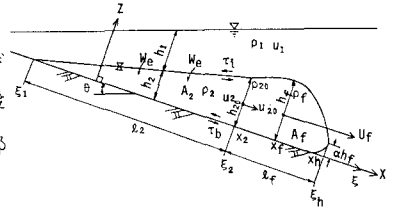


図-1 座標系および流塊の模式図

質量保存則: $\partial (C_f h_f) / \partial t - U_f \partial (C_f h_f) / \partial \xi + \partial (C_f U_f h_f) / \partial \xi = C_f W_e + \beta \omega_0 C_f$ (2)
運動量保存則: $\partial (U_f h_f) / \partial t - U_f \partial (U_f h_f) / \partial \xi + \partial (U_f^2 h_f) / \partial \xi = \Delta \rho_f / \rho_0 \cdot g \sin \theta - 1/2 \cdot \partial (1/2 \cdot \Delta \rho_f g h_f^2 \cos \theta) / \partial \xi - 1/2 \cdot \partial E / \partial \xi \cdot h_f + (\bar{z}_i - \bar{z}_b) / \rho_0$ (3)
ここに、 h_f : 先端部の表高、濃度および流速、 W_e : 連行速度、 U_f : 先端部移動速度、 C_f : 上層濃度、 $\beta \omega_0 C_f = -\{E_2 \partial C / \partial z|_{z=0} + \omega_0 C|_{z=0}\}$ 、 ω_0 : 沈降速度、 E_2 : 振動係数の z 成分、 β : 侵食および堆積の効果を考慮した係数、 $\Delta \rho_f$: 先端部の密度差、 g : 重力加速度、 θ : 路床の傾斜角、 ρ_0 : 基準密度、 E : 静水圧からの偏差圧力、 $\bar{z}_i$: 界面および底面でのせん断応力である。

表-1 実験条件

Exp. No.	Q (cm ³ /s)	Q_0 (cm ³ /s)	i	t_1 (sec)	T_1 (°C)	C_1 (%)	$\Delta \rho_1$ (g/cm ³)
15-47-I	1455	29.10	1/100	60	20.9	0.338	0.00211
II	"	"	"	60	22.2	0.338	0.00211
15-48-I	"	"	"	40	22.0	0.414	0.00268
II	"	"	"	40	22.2	0.534	0.00353
15-49-I	"	"	"	20	18.2	0.321	0.00200
II	"	"	"	20	18.5	0.317	0.00198
15-50-I	1455	29.10	1/80	60	20.0	0.380	0.00237
II	"	"	"	60	21.0	0.396	0.00248
15-51-I	"	"	"	40	21.4	0.580	0.00361
II	"	"	"	40	22.0	0.580	0.00361
15-52-I	"	"	"	20	17.8	0.316	0.00197
II	"	"	"	20	18.1	0.314	0.00196
15-54	1455	29.10	1/60	* 22.9	22.9	0.320	0.00199
15-53-I	1455	29.10	1/60	60	20.9	0.310	0.00193
II	"	"	"	60	22.9	0.310	0.00193
15-55-I	"	"	"	40	22.8	0.356	0.00222
II	"	"	"	40	22.9	0.348	0.00217
15-56-I	"	"	"	20	17.5	0.468	0.00304
II	"	"	"	20	18.2	0.352	0.00219
15-57-I	1455	29.10	1/200	60	20.2	0.346	0.00216
II	"	"	"	60	19.5	0.322	0.00201
15-58-I	"	"	"	40	22.0	0.506	0.00315
II	"	"	"	40	20.5	0.472	0.00294
15-59-I	"	"	"	20	17.8	0.322	0.00201
II	"	"	"	20	18.6	0.320	0.00199
15-60	1455	29.10	1/200	* 20.2	20.2	0.318	0.00198

*: 定常給水

図-1において、先端部の面積を A_f 、周囲水との平均密度差を $\Delta \rho_f$ ($\Delta \rho_f = \text{const} \times \Delta C_f$, ΔC_f : 先端部平均濃度差)、先端部長さを l_f 、オーバーハング高さを αh_f とする。(1)~(3)式を z_2 から z_3 まで積分することにより先端部に関する支配方程式を得る。

体積保存則: $\frac{dA_f}{dt} = -r g_0 + g_e$ (4) 質量保存則: $A_f \frac{d\bar{\rho}_f}{dt} = r \bar{\rho}_f (1 - \frac{\Delta \rho_f}{\rho_0}) g_0 - \Delta \rho_f g_e + \beta \omega_0 \bar{\rho}_f$ (5)
運動量保存則: $A_f \frac{dU_f}{dt} = \frac{4}{3} r g_0 \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho_f}{\rho_0} g_0 \cos \theta + r (U_f - U_{20}) g_0 - \frac{1}{2} C_0 h_f U_f^2 - U_f g_e + (\bar{z}_i - \bar{z}_b) h_f / \rho_0$ (6)

ここに、 $r = U_f / (U_{20} + \partial z_2 / \partial t \cdot U_{20} - 1)$ 、 $U_{20} = U_f(z_2)$ 、 $g_0 = U_{20} h_{20}$ 、 $h_{20} = h_f(z_2)$ 、 g_e : 先端部における連行量で、 $g_e = \int_{z_2}^{z_3} W_e dz$ 、 $\bar{\rho}_f = \Delta \rho_f / (z_3 - z_2)$ 、 C_0 : 形状抵抗係数であつて、 $C_0 = 2 / (U_f h_f) \cdot \int_{z_2}^{z_3} (\partial \rho_f / \partial z) h_f dz$ 、 $\bar{z}_i$ 、 $\bar{z}_b$: z_2 と z_3 の区間の平均値である。

先端部の解析を行うにあたり、つぎのような定義および仮定を行う。

- (1) $k_{22} = l_f / h_f$, $k_{34} = A_f / h_f^2$ (2) $ku = U_{20} / U_f$, $kp = g_0 / g_f$ (3) $dA_f / dt = 2 k_{34} h_f \frac{dh_f}{dt} + h_f^2 \frac{dk_{34}}{dt} = 0$ (4) 連行量をオーバーハング高さとの間における周囲水の取り込み量で評価し、 $g_e = \alpha h_f U_f$ とする。(5) 界面、底面および形状の抵抗係数をそれぞれ A_f / Re , A_b / Re および A_0 / Re とおく。(6) 沈降速度の影響を無視する。

以上のことを考慮し、(4)~(6)式を解くと次式のような先端部に関する密度分布式および運動方程式が得られる。
 $\bar{\rho}_f(z) / \bar{\rho}_f(t_0) = \exp[-k_{34} / k_{34} h_f \{x_3(t) - x_3(t_0)\}]$ (7) $\dot{x}_* = -b_1 \dot{x}_*^2 - b_2 \dot{x}_* + b_3 \exp(-b_4 x_*)$, ($\dot{x}_* = dx_*/dt$) (8)

ここに、 $b_1 = k_{34} / k_{34}$, $b_2 = \nu / 2 h_f^2 \{A_0 / k_{34} + k_{22} / k_{34} \cdot (A_f / A_b)\}$, $b_3 = g_0 \bar{\rho}_f(t_0) / h_f \rho_0 \{ \sin \theta + \frac{1}{k_{34}} (\frac{\alpha}{1 - k_{34}}) \}$, $b_4 = k_{34} / k_{34}$, $x_* = x_3(t) / h_f$

で、 $X_f(t)$ および $\Delta\rho(t)$ は、時刻 t における先端部の位置および密度差であり、 $X_f(t_0)$ および $\Delta\rho(t_0)$ は、基準時刻 t_0 における値である。

3. 実験 実験水槽は、長さ13.1m、幅0.5m、深さ0.5mの長方形断面を有する勾配可変水槽で、両面ガラス張りである。水槽に水道水を蓄しておき、比重2.66、 $d_{50}=0.03\text{mm}$ のパールクレイを用いて作った泥水を、上流端より一定流量 Q 、一定時間 Δt だけ流入させ、その後、給水を止めて泥水塊を発生させた。

測定項目は、泥塊の形状、先端部の移動距離と時間との関係、濃度分布および流速分布である。なお、流速分布は、冷水塊と泥水塊とでは流れの構造がほぼ同一であると考えられるので、冷水塊の実験を行い、水素気泡によって測定した。形状は、泥塊を8mmおよび16mmムービーカメラを用いて撮影し、フィルム解析により求めた。先端部移動距離と時間との関係は、目視によって計測された。濃度分布についてはつぎのような方法がとられた。水槽上に置かれた2台の台車に自動昇降装置を固定し、光電管式濃度センサーを取り付け、先端部の移動速度で台車を移動させると同時に、自動昇降器を上下させることにより、ある断面の鉛直濃度分布を計測した。そして、同一条件の実験を2回行って先端部から0.5, 1.0, 2.6および3.1m後方の計4断面の濃度分布を得た。実験条件は表-1のとおりである。ここに、 Q : 流量、 q : 単位幅流量、 i : 路床勾配、 Δt : 給水時間、 T_a , T_{in} : 周囲および流入水温、 C_{in} : 流入水濃度、 $\Delta\rho_{in}$: 流入水密度である。

泥塊の形状、密度および流速分布の一例を図-2, 3および4に示す。これらの図より、先端部高さの時間的変化は殆んどみられず、密度および流速分布は、 $X_f - X = 0.5\text{m}$ のものを除き、ほぼ相似形であることがわかる。

4. 支配方程式による泥塊の解析 図-5には、先端部密度に関し、(7)式の結果とExp.15-49および冷水塊の実験結果が示されている。冷水塊の実験(Exp.15-6~Exp.15-26)においては、密度の減少が泥水塊のそれらに比べて大きい。これは、水槽側面、底面および表面と泥塊との間における熱の交換によるものと推察される。そこで、泥水塊の実験に着目すると、両者はよく一致しており、(7)式はかなり一般性のある推定式であると思われる。図-6は、先端部の移動特性(X_f , $\dot{X}_f$, $\ddot{X}_f$)に関し、(8)式による結果と実験値とを比較したものである。ここで、 b_1 , b_2 , b_3 , b_4 は実験結果を参考にして設定されている。これらの図より、泥塊の挙動特性は、(7)および(8)式によってかなり適切に説明されることがわかる。

5. むすび 泥水塊の挙動特性を理論的・実験的に考察し、ここで提案した(7)および(8)式が、泥塊先端部の挙動特性をよく説明することを明らかにした。今後、仮定を導入した運行情の評価、各パラメータおよび係数 $b_1 \sim b_4$ などについては、実験的・理論的にさらに詳細に究明する必要がある。

最後に、本研究は一部文部省科学研究費(代表者 足立昭平 名古屋大学教授)の補助を受けた。ここに記して感謝いたします。

参考文献 1) 岸田・江頭・中川: 二次元水路における冷水塊の挙動に関する研究, 昭54年建設省研究報告

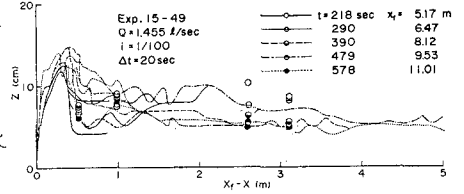


図-2 泥塊の形状と界面高さ

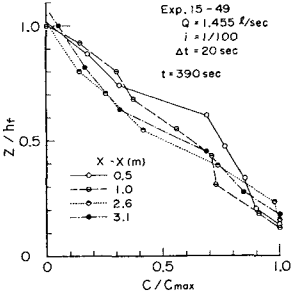


図-3 濃度分布

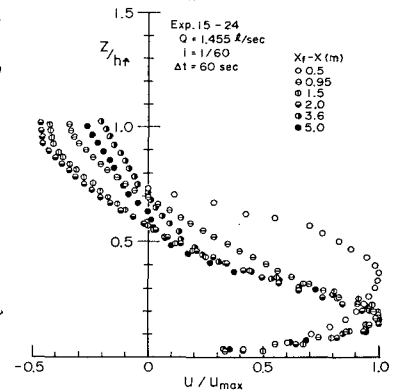


図-4 流速分布

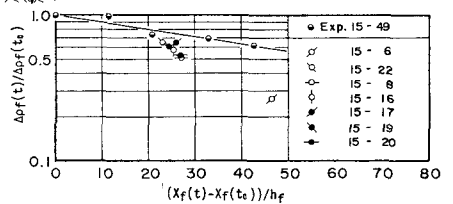


図-5 先端部密度の場所的变化

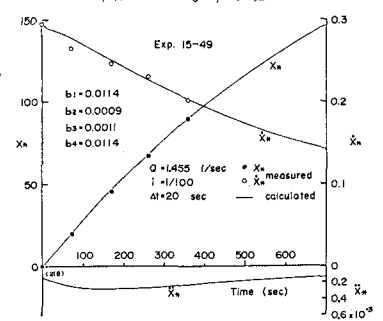


図-6 先端部の移動特性