

泥水密度流先端部の流動特性

東京工業大学 正会員 福岡捷二

○ 同 上 “ 水村和正

同 上 学生員 加納敏行

ま え が き

微細粒子を多量に混入する濁水が貯水池内に流入するとき、貯水池内の濁度物質の挙動は流入水のもつ運動量と粒子濃度によって2つの型式に大別される。第1は貯水池内を浮遊拡散する場合、第2は貯水池底付近を密度流として流動する場合である。前者については著者らの1人¹⁾が固一液混相噴流として濁度物質の挙動を扱っている。後者の泥水密度流に関しては、Stefan²⁾、芦田、江頭³⁾らによる研究がある。これらの研究では密度流の定常部の抵抗のみつもり主眼がおかれている。一方、非定常性の強い密度流の先端部の流動機構についての定量的な研究は、著者らの知る限り存在しないようである。密度流先端部は、先端の前面と下面から周囲の密度の小さい流体を混入する⁴⁾。その結果、定常部に比して不安定となり内部に強い過運動があらわれ、運動の様子は明らかに定常部と異なる。また貯水池底面からの微細粒子の巻きこみも先端部で多く、貯水池底に堆積した微細粒子の再浮上にも先端部は強いかわりがある。更に重要なことは、貯水池が比較的狭い場合には、貯水池底をほう泥水密度流が対岸にぶつかると段波を形成し濁度が貯水池内に拡がり、貯水池水の濁水化を引起こすことがある。泥水密度流先端部の挙動は塩水くさび先端部の挙動と酷似しており、Ippen⁵⁾とKeulegan⁶⁾は塩水くさび先端部の形状について定性的な考察を行なっている。また泥水密度流は地球物理学の分野でみられる dust storm や海底の泥水流、寒冷前線の移動など密度差に起因する運動と共通点はきわめて多く、泥水密度流先端部の問題の解明はこの種の gravity current の力学機構の理解を深めることになるであろう。

1. 理 論 Plapp と Mitchell⁷⁾は海底で起こる泥水密度流の流下方向への発達境界層と似ていることに着目し泥水流に境界層理論を適用した。最初に Plapp らの理論を示し問題点を指摘する。図-1 に示すように座標軸をとると積分した境界層の方程式は

$$\rho_0 \frac{d}{dx} \int_0^{\delta_s} u^2 dy = g \sin \theta \int_0^{\delta_s} \Delta \rho dy - \tau_b \quad (1)$$

で表わされる。ここで δ_s は泥水層厚、 $\Delta \rho$ は泥水と周囲の流体の密度差、 τ_b は底のせん断力である。流速 u と泥水層厚 δ_s 、密度差 $\Delta \rho$ にそれぞれ次のような相似形を仮定する。

$$\begin{aligned} u &= u_{max}(x) F(\eta) = u_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^a F(\eta) \\ \delta_s(x) &= \delta_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^\beta \\ \Delta \rho &= \Delta \rho_{max}(x) H(\eta) = \Delta \rho_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^\gamma H(\eta) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $\eta = y/\delta_s$ 、subscript 0 は基準点の物理量を示す。さらに底面せん断力 τ_b にブラジウスの滑面乱流の抵抗則を用いるものとする。

$$\tau_b = 0.0564 \rho_0 u_{max}^2(x) \left\{ \frac{\nu}{u_{max}(x) \delta_s(x)} \right\}^{1/4} \quad (3)$$

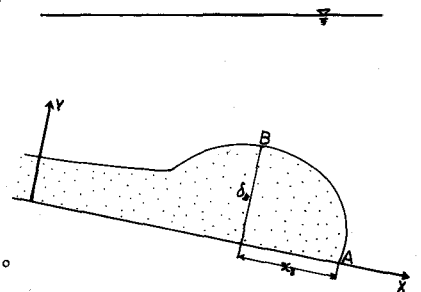


図-1 座 標 系

(1)式に(2)、(3)式を代入して(2)式の指数に関して得られた式が任意の x で常に成立しなければならないという条件から次の関係式を得る。

$$\alpha + 5\beta = 4 \quad (4)$$

$$r = 2\alpha - 1 \quad (5)$$

しかし、上式は未知数3個に対し式が2本であるため指数を決定することができない。そこで Plapp らは水平床の場合に対し、(このとき(1)式の右辺第一項は零となり(5)式は意味を持たない) 1929年のニューファンドランド沖で起った Grand Bank turbidity current の実測値にもとづいて、 $\alpha = -1$ 、 $\beta = +1$ を決定した。しかし、Plapp らの方法では解析的には α 、 β 、 r の値を決定することはできない。

さて泥水層に(1)式の代りに次の運動量方程式を用いることにする。

$$\rho_0 \frac{d}{dx} \int_0^{\delta_0} u^2 dy = g \sin \theta \int_0^{\delta_0} \Delta \rho dy - \frac{d}{dx} \int_0^{\delta_0} \rho g y \cos \theta \cdot dy - \sigma_w' \quad (6)$$

ここで $\sigma_w' = \tau_b - \tau_i$ 、 τ_i は内部境界面に働くせん断力である。 σ_w' をブラジウス形に仮定する。

$$\sigma_w' = \text{const} \cdot \rho_0 u_{\max}^2(x) \left\{ \frac{\nu}{u_{\max}(x) \delta_0(x)} \right\}^{1/4} \quad (7)$$

(2)、(7)式を(6)式に代入し、 $\xi = x/x_0$ とおくと

$$\begin{aligned} \frac{\rho_0 \delta_0 u_0^2}{x_0} \frac{d}{d\xi} \left[\xi^{\beta+2\alpha} \int_0^1 F(\eta) d\eta \right] &= g \sin \theta \Delta \rho_0 \delta_0 \int_0^1 H(\eta) d\eta \cdot \xi^{r-\beta} \\ &- \frac{g \cos \theta \Delta \rho_0 \delta_0^2}{x_0} (2\beta + r) \xi^{2\beta+r-1} \int_0^1 \eta H(\eta) d\eta - \text{const} \cdot \rho_0 \nu^{1/4} u_0^{7/4} \xi^{7\alpha/4} \delta_0^{-1/4} \xi^{-\beta/4} \end{aligned}$$

となる。 ξ のべき数が等しくなければならないので

$$\alpha = -1, \quad \beta = 1, \quad r = -3 \quad (8)$$

を得る。(2)式と(8)式から泥水密度流の流速は基準位置からの距離に逆比例し、高さはその距離に比例し、密度差はその距離の3乗に逆比例することを知る。

2. 実験装置と実験方法

実験装置を図-2に示す。水路は長さ5.7 m、巾0.21 m、高さ1 mのもので、1/10勾配の底板を敷いた片面ガラス張り開水路である。泥水としてはベントナイト水溶液を用いた。一定濃度の泥水を貯水槽につくり、これをポンプで攪拌器を取りつけた一定ヘッド水槽に導き、流量

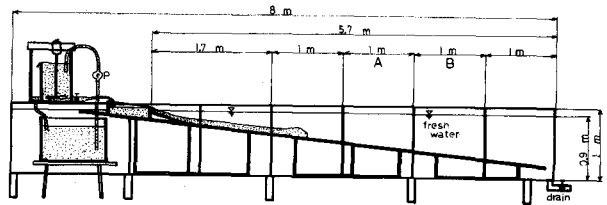


図-2 実験装置

検定用バルブを通過した水をさらに矩形ゼキを備えたタンクから越流させて静水中へ静かに流下させた。矩形ゼキから静水中に流下直後の泥水の希釈を小さくするためにゆるやかな傾斜板をとりつけ、泥水が滑らかに底板上を流下するようにした。流速分布は直径5 mmの2本の超小型プロベラ式流速計を上流端から3.2 mの位置に設置し、各点の流速をビシグラフで読み取った。泥水の流量と比重を正しく調整しさえすれば、流れの再現性は非常に良かったので繰り返し実験を行ない、泥水最先端からの種々の距離の流速分布を求めた。泥水最先端からそれぞれの距離の濃度分布はサイフォン原理を用いて以下のように測定した。水路区間④で採水器を泥水先端から一定の距離を保つように泥水先端部と同じ速度で移動させ断面内で10点同時に採水し測定した。実験条件を表-1に示す。泥水密度流先端部と塩水くさび先端部の運動の比較も行なうために濁度

Run No.	流量(l/sec)	濁度の種類	濁水の比重	流れの状態
1	0.2	ベントナイト	1.0095	plume
2	0.4	"	1.0095	plume
3	0.2	"	1.0205	plume
4	0.4	"	1.0095	thermal
5	0.2	塩	1.0095	plume
6	0.2	"	1.0205	plume

表-1 実験条件

としてペントナイト（比重 2.42，中央粒径 0.8μ ）の水溶液と塩水の 2 種類を用いた。Run No. 4 は濁水を 21 秒間通水したあととストップしたときの泥水先端部の動きを調べるために行なったものである。

3. 実験結果と考察

3.1 泥水を連続的に供給した場合（Inclined plume）

泥水密度流形状の写真を図-3 と 4 に示す。図-5 は泥水層厚が流下距離とともにどのように変化するかを濁度が及んでいる最大高さを指標にし、実験的に検討したものである。これより高さ δ_0 は x とともに増加し、2. で導いた理論結果と符号する。図-6 は Run No. 3 で測定された最先端から種々の距離での流速分布である。用いたプロベラ流速計は微流速（3 cm/sec 以下）では信頼性に乏しいので内部境界面付近の流速を点線で示す。下層流の流速は比較的小さいために上層の静止流体中にはプロベラ流速計で測定し得るほどの逆流は生じなかった。しかし肉眼でみると明らかに上層と下層の境界付近の濁度は上流に向かってるのが認められた。最先端部から 30 cm までの距離の流速分布の測定値にはかなりのバラツキがあったが図-5 の実線は測定値の中心を通るようにひいたものである。測定点のバラツキは先端部から上流に進むにつれて小さくなる。

これは図-7 で模式化して示したように最先端部では前面と下面より密度の小さい周囲の水の混入があり、その結果泥水層は不安定となりスケールの大きい混合があらわれるためと思われる。このことは流速分布が先端部でかなり一様化していることから明らかであり、したがって先端から x_0 までは流速分布の最大値のあらわれる位置は明確ではない。一方 x_0 より大きい距離では底面の近くに流速の最大が現われている。これらの図から泥水密度流の発達の様子をみることができる。この先端部に続く部分は流速も泥水層厚さもほぼ一定で流れは定常になっている。図-6 の場合には最先端からほぼ 1.3 m で定常であった。先端部と定常部が生じるのは定常部では内部フルード数が 1.0 以上、先端部では 1.0 以下となり两部分の間に内部移動跳水を生じているためである。本実験では两部分の内部フルード数が 1.0 をはさんで接近していたために内部跳水がそれほど明確には観測されなかった。次に先端部の移動速度を考えてみる。移動速度に最も寄与するのは第一義的には泥水の重さの流れ方向成分であると考

えられる。ここでは最先端から最大厚さの点までの距離をとるものとする。今、上層と下層をそれぞれ完全流体であらわされるものと仮定し、図-1 の A 点と B 点の間に Bernoulli の式を適用すると先端部の移動速

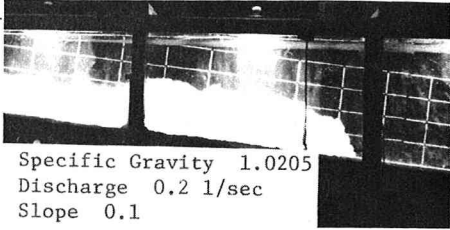


図-3 泥水密度流（側面図）



図-4 泥水密度流先端部（正面図）

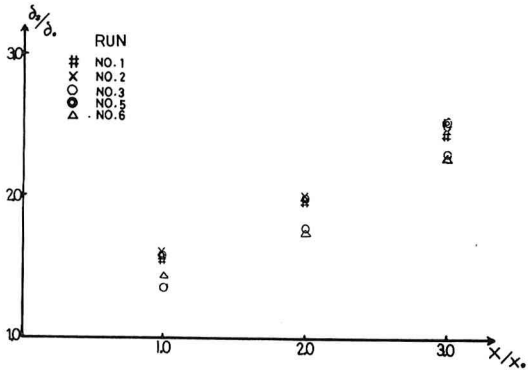


図-5 $\frac{\delta_0}{2}$ と $\frac{x}{x_0}$ の関係

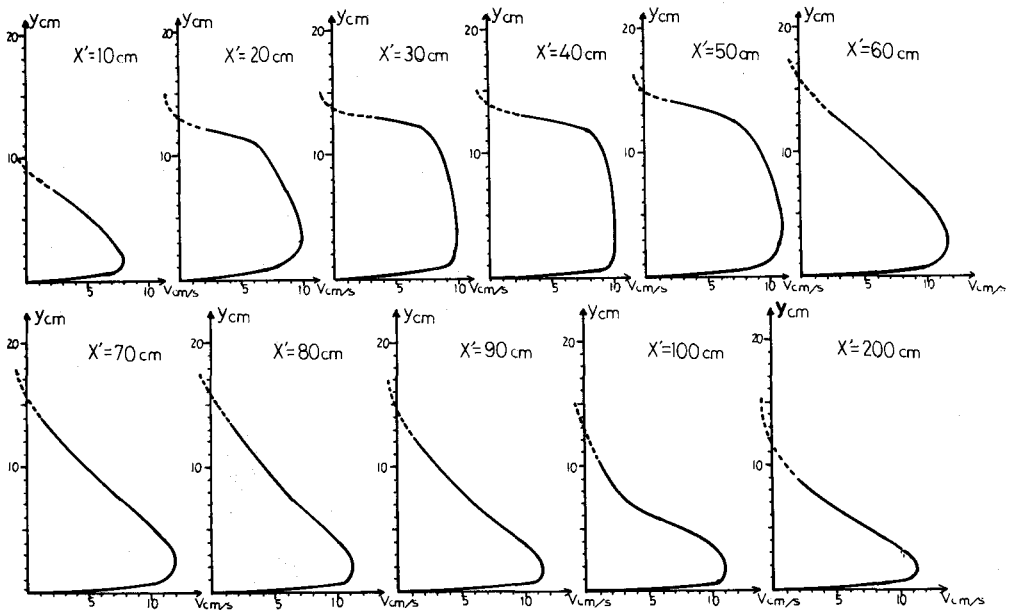


図-6 流速分布 Run No. 3

度は

$$V = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_0} 2g(\delta_s + x_\delta \sin \theta)} \quad (9)$$

となる。ここに $\Delta \rho$ は対象とする volume 内の平均密度である。(9)式と先端移動速度の実測値の比較を表-2に示す。計算値は実測値の2倍程度大きい、これは底面と境界面の摩擦を無視していることや、先端付近の大きな渦運動や、最大厚さの点より後方に生じる渦によるエネルギー損失などを無視していること、更には先端の移動速度に泥水のどの部分までが寄与するかが不明なことによるためと思われる。この点に関しては、さらに深い考察を必要とする。

つぎに泥水流の濃度分布の測定値を図-8 (Run No. 1), 図-9 (Run No. 3)に示す。ここで注目すべきことは、先端部の濃度が定常部の濃度分布を代表する $x' = 200$ cmの濃度よりも底付近を除いて高いことである。これは上流から輸送されてきた濁度が先端部分に貯留されていることを示す。すなわち、図-6が示すように定常部の最大流速は底付近に生じており、この付近で泥水濃度が最大である。先端部の移動速度は定常部の最大流速より小さく、したがって絶えず高濃度の濁水が先端部に送りこまれその結果、先端部形状が流下につれて生長する。

Run NO.	計算値 (cm/s)	実測値 (cm/s)
1	9.6	4.7
2	12.5	5.9
3	11.9	6.7
4	9.6	5.6
5	9.1	5.0
6	10.9	6.4

表-2 泥水と塩水先端部の移動速度の計算値と実測値の比較

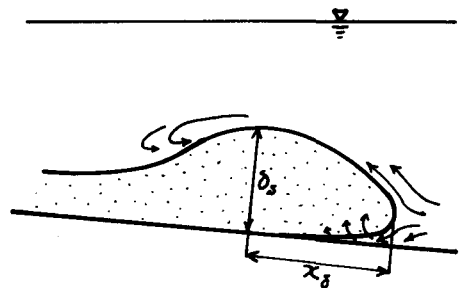


図-7 泥水流先端部の流況

もちろん先端付近からの清水の混入も先端部の成長に関係することはいうまでもない。

Run No. 1 では $x=40\sim 50\text{ cm}$ で断面最大濃度が表われているが、Run No. 2 では更に前方で最大となっている。

この違いは上流より持ちこまれる運動量の差に関係があると思われるが明確ではない。各点濃度を最大濃度で、底からの高さをその点の泥水層厚さで無次元化すると、泥水層の最先端部からほぼ最大厚さまでの距離 x_0 とそれ以後では濃度の分布型

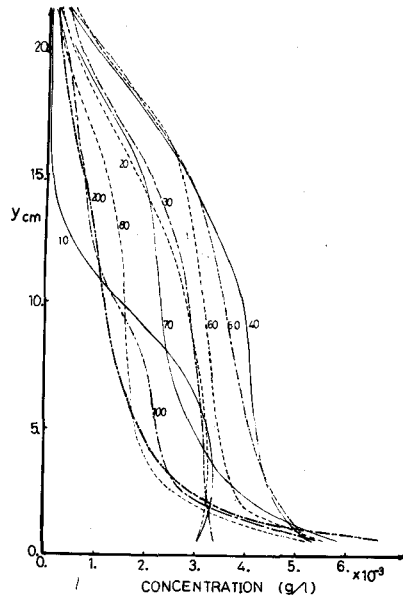


図-8 濃度分布, Run No. 1

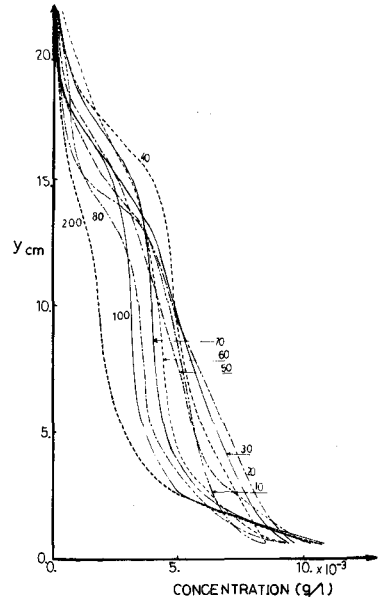


図-9 濃度分布, Run No. 3

が異なる。すなわち、 x_0 より上流では濃度分布はほぼ相似型となり y 方向に急激に減少する定常な泥水流の分布に近い。一方、先端部から x_0 までは流体の混合が活発で濃度分布型は、流速分布と同様にかなり一様化されている。泥水と底面の間からの清水の混入は濃度分布の実測値に興味ある結果を示している。すなわち、図-8 と図-9 を比較すると、濃度が低い Run No. 1 では最先端から 10, 20 cm の濃度分布は他の断面と異なり最大濃度が底面から 2~3 cm で起っている。これは濃度が約倍の Run No. 3 では認められない。泥水濃度を更に小さくすると清水の混入による希釈効果は相対的に顕著になってくる。

3.2 Inclined thermals

周囲の流体に対し密度差のある流体に $t=t_0$ の時刻まで運動量が与えられ、それ以後運動量の供給を絶った時の密度差に起因する運動を通常 thermal と呼ぶ。実験 No. 4 は先端部が形成されるまで泥水を通水し、21 秒後に先端が水路の上流端より 1.2 m に達した時に泥水の供給を止め、その後の運動を調べたものである。上流より高濃度の泥水の供給がないために、泥水層の発達 は 3.1 の場合よりも緩慢である。実験水路内での移動速度は一定であったが、十分に長い水路で観測すれば清水の混入のため先端部の密度は減少し、大きさは増大する。その結果、移動速度はしだいに小さくなるものと思われる。図-10 と図-11 は thermal の先端からの種々の距離での濃度分布、流速分布を示す。濃度分布は運動量の供給がないので当然のことながら供給がある場合と異なり thermal の先端から tail の方向へ次第に濃度が減少している。すなわち、濃度の高い部分が重力の作用で前方へ移動し低い部分は相対的に取り残されていることになる。図-11 の流速はこの事実を明確に示している。thermal の前部では濃度、流速が高く後方では濃度、流速が低く、長い距離の流下後に 1 つの thermal から 2 つにわかれる可能性がある。

3.3 泥水密度流先端部と塩水くさび先端部の運動の比較

表-1 の Run No. 5, 6 に示すように泥水密度流と同じ条件で塩水を用いて実験を行なった。最大高さの x 方向の変化、先端移動速度などくさび先端部の平均的な特性は、図-5 と表-2 に示すように泥水とほとんど同じである。又、先端からの種々の位置での濃度分布も底付近で濁水よりもやや一様化していることを

除いて図-8, 9と同様であった。したがって泥水密度流の先端部の力学機構の解明は塩水くさびの先端部の挙動の理解に有用な情報を与えるものと思われる。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費、自然災害特別研究（代表者、足立昭平名大教授）の援助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 吉川勝秀, 佐藤郁太郎, 第21回水理講演会論文集 1977年2月
- 2) Stefan H., Proc. 15 th Congress of IAHR Vol. 1, 1973.
- 3) 芦田和男, 江頭進治, 土木学会論文報告集, 第237号, 1975.
- 4) Simpson J. E., J. Fluid Mech. Vol. 53, Part 4, 1972.
- 5) Ippen A. T, Harleman, D. R. F, Natl. Bur. Standards (U.S.) Cir. 521, 1952.
- 6) Keulegan, G. H., Nail. Bur. Standards (U.S.) Rept. 5168, 1957.
- 7) Plapp, J. E., Mitchell, J. P., Jour of Geophy. Res. Vol. 65, No. 3, 1960.
- 8) Karman Von, T, Bull. Am. Math. Soc. 46, 1940.
- 9) Benjamin, T. B., J. Fluid Mech., Vol. 31, 1968.

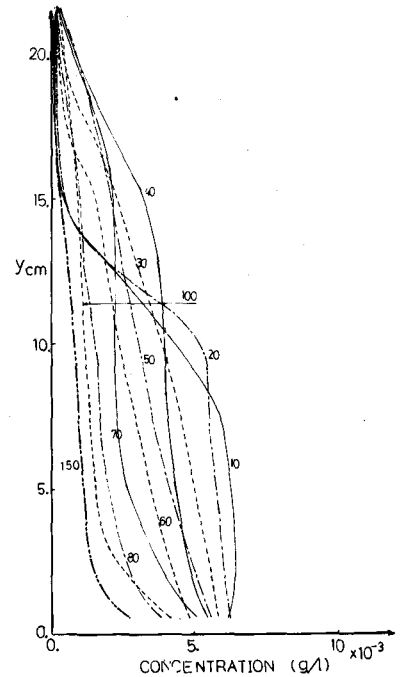


図-10 Inclined thermalの濃度分布, Run No. 4

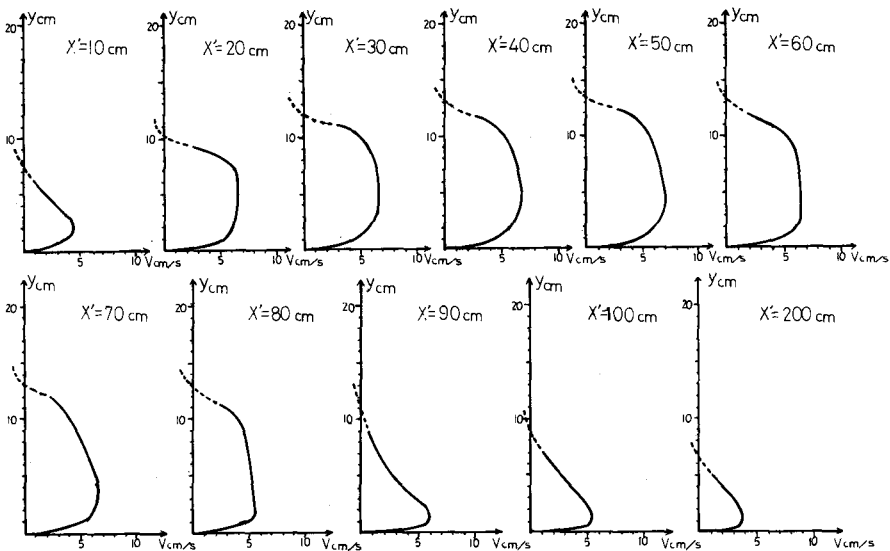


図-11 Inclined thermalの流速分布, Run No. 4