

泥濁密度清に関する基礎的研究

京都大学防災研究所

正員 茅田和男

同 上

正員 高橋 保

同 上

正員 江頭進治

1. 緒言: 本研究は貯水池での土砂礫の輸送・堆積に重要な問題も投げかけると考えらる泥濁密度清に関して実験を行ない、ほぼ等清状態の下層清の存在を見出すとともに、その形成過程と清の特性について理論的・実験的考察を加えたものである。

2. 実験概要: 実験水路は幅および高さが50cm, 全長20mの循環式で、これを図-1に示す。実験は、下清端のゲートをしめ切り、水路に適量の水濁となるまで清水も供給し、上清端から比重 $\sigma = 2.66$, 沈降速度 $W_{50} = 0.021 \text{ cm/s}$ (20.5°C) のポールクレイの泥水も一定清量で清入させて行なった。後方に成層清を形成しながら下清するフロントが下清端に到達した時の水位も一定に保つたままにゲートを開けると、図-2のような下層清が形成されるが、

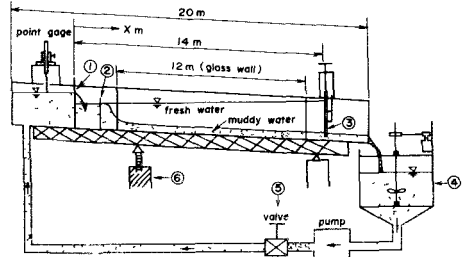


図-1 実験装置: ① 四角型 ② 循環式 ③ ノールゲート ④ 混合水機 ⑤ ポンプ

水の等清状態: 見わたる領域 (zone of negligible entrainment) には、清水と泥濁との密度差が非常に小さいため、清水と泥濁との混合がほとんど行なわれず、清水と泥濁との境界が明確に現れる。この領域は、清水と泥濁との混合がほとんど行なわれず、清水と泥濁との境界が明確に現れる。

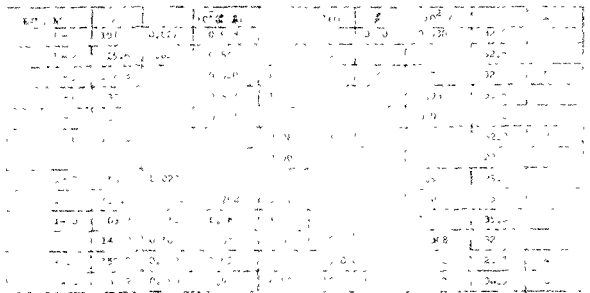


図-2 水理学的

3. 解析理論: 図-1 等清と見わたる領域の形成、その考察、図-2の方向 (X) の清の状態で実験観察と理論的考察に基づいて模式的に示したものである。plunging point からある清下距離までは entrainment のため、観察される層厚ははだいに増加するが、それより下清では清水と泥濁との混合がほとんど行なわれず、清水と泥濁との境界が明確に現れる。この領域は、清水と泥濁との混合がほとんど行なわれず、清水と泥濁との境界が明確に現れる。

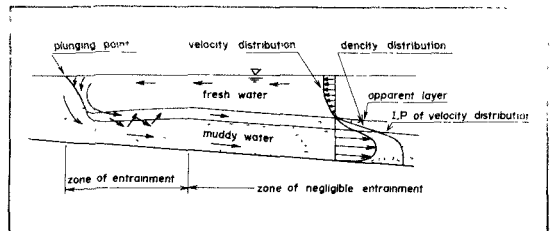


図-2 清下方向清の模式図

および質量保存則はそれぞれ(1),(2)式で示される。

$$Ri_* = \Delta p(x) g h(x) / \rho_m U(x)^2 \quad (1)$$

$$\Delta p g = \Delta p(x) U(x) h(x) = \text{const.} \quad (2)$$

つまり、 $\partial Ri_* / \partial x$ は $\frac{d}{dx} \{ \Delta p(x) U(x) h(x) \} = 0$ の関係を代入し、
 オーク比較によつて、

$$\partial Ri_* / \partial x \doteq -3g \Delta p(x) h(x) / \rho_m U(x)^3 \cdot \partial U(x) / \partial x \quad (3)$$

の関係が得られる。ここに、 $\rho_m = \rho_f + \frac{1}{2} \rho(x)$ である。

wall jet の拡散から類推すれば、 $\partial U / \partial x < 0$ が期待される
 ので Ri_* は流下方向に増加し、entrainment が無視できる
 領域(管流域)の形成が考えられる。

3-2 流速分布および平均流速 z軸を水路底面から
 鉛直上向きに、x軸を $x=d-z$ とする。さらに以下用い
 る記号を図-3に示すが、 $z=d$ ($x=0$) は流速および濃度(密度)
 分布の変曲点の位置である(図-10参照)。 $z=d$ において、
 せん断力は極大値をとることが予想されることや、実験値に
 おいて、 $g \doteq \bar{u} d$ (4)

の関係が成立することからこの位置を境界面と呼ぶことにする。ここに $\bar{u} = \frac{1}{d} \int_0^d u(z) dz$ である。

i) $0 \leq z \leq d_1$ の領域において、図-10に示すように濃度が変化しないという実験結果を重
 視すれば、せん断力の分布は、 $\tau(z) = (\rho_0 - \rho_f) g d_1 (1 - z/d_1)$ (5)

とおける。流速分布は図-4に示すように対数分布にしたがうので、混合距離を、

$$l(z) = K_1 z (1 - z/d_1)^{1/2} \quad (6)$$

とし、プラントルの運動量輸送理論と(5),(6)式より、流速分布および平均流速は

$$u(z)/u_{*b} = Ar + \frac{2.3}{K_1} \log_{10} \frac{z}{l(z)} \quad \dots (7) \quad , \quad \bar{u}/u_{*b} = Ar + \frac{1}{K_1} (2.3 \log_{10} \frac{d_1}{l_0} - 1) \quad \dots (8)$$

と求まる。ここに、 $u_{*b} = \sqrt{(\rho_0 - \rho_f) g d_1 / \rho_0}$ (9) である。

ii) $0 \leq z \leq d_2$ ($d_1 \leq z \leq d$) の領域においては、境界面近傍における非常に大きな密度こ
 う配による重力の効果のため、鉛直方向の拡散は無視できるほど小さいが、拍括としては
 分子粘性に比して運動量輸送によるものが卓越すると考えて、境界面において混合距離 l_0
 を仮定し、混合距離の分布を、 $l(z) = l_0 + K_2 z$ (10)

とする。さらに運動量輸送理論と流速の連続条件とから、流速分布および平均流速は

$$\frac{u_{d_1} - u(z)}{u_{*d}} = \frac{2.3}{K_2} \log_{10} \frac{l_0/d_2 + K_2}{l_0/d_2 + z/d_2} \quad (11)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_{*d}} = \frac{u_{d_1}}{u_{*d}} + \frac{1}{K_2} \left\{ \frac{2.3}{K_2} \frac{l_0}{d_2} \log_{10} \frac{l_0/d_2 + K_2}{l_0/d_2} - 1 \right\} \quad (12)$$

となる。ここに、 $u_{*d} = \sqrt{(\bar{\rho}_2 - \rho_f) g d_2 / \bar{\rho}_2}$ (13) , $\bar{\rho}_2 = \frac{1}{d} \int_0^{d_2} \rho(z) dz$ 。

3-3 密度(濃度)分布 境界面近傍における拡散は小さいので、密度分布の時間的
 場所的変化も小さいと見なすことができる。いま、gradient form Richardson 数(Ri)²⁾

$$Ri = g \cdot d\rho/dz / \rho_m (du/dz)^2 \quad \dots (14)$$

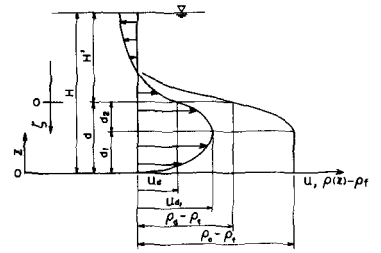


図-3 記号説明図

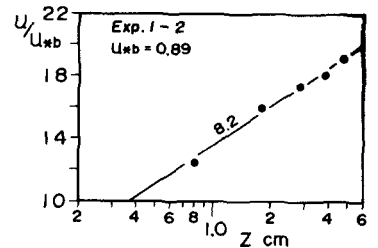


図-4 流速分布 ($2.3/K_1 = 8.2$)

が互いに変化しないと仮定し、先に求めた流速分布の結果を利用すれば、 $0 \leq z \leq d_2$ ($d_1 \leq z \leq d$) の領域における密度分布および平均密度はそれぞれ次の式で表される。

$$\rho_0 - \rho(z) = \frac{\rho_i \rho_m u_{*d}^2}{g d_2 K_2} \left(\frac{1}{l_0/d_2 + K_2 z/d_2} - \frac{1}{l_0/d_2 + K_2} \right) \quad (15)$$

$$\rho_0 - \bar{\rho}_2 = \frac{\rho_i \rho_m u_{*d}^2}{g d_2 K_2} \left(\frac{2.3}{K_2} \log_{10} \frac{l_0/d_2 + K_2}{l_0/d_2} - \frac{1}{l_0/d_2 + K_2} \right) \quad (16)$$

さらに、重量濃度 $C(z)$ は (17) 式で求められる。

$$C(z) \doteq \{\rho(z) - \rho_s\} / \rho_f \cdot \sigma / (\sigma - 1) \quad (17)$$

境界面より上方領域における輸送量 (図-10 参照) E を用いることにすると、泥質輸送の連続式は $(\rho_0 - \rho_s) Q = (\rho_0 - \rho_s) \bar{u}_1 d_1 + (\bar{\rho}_2 - \rho_s) \bar{u}_2 d_2 + E$ (18) と表わされる。

4. 境界面における抵抗係数: 3節で導入した理論式を適用する場合に必要な l_0 , R_i および $0 \leq z \leq d_2$ の領域での抵抗則について考察する。混合距離は境界面からの距離に依存することから l_0 は d_2 に依存することが推察され、さらに entrainment の現象から内部フルード数

$$Fr_2 = \bar{u}_2 / \sqrt{(\bar{\rho}_2 - \rho_s) g d_2 / \bar{\rho}_2} \quad (19)$$

にも関係することが考察されるが、図-5 はこのことをよく物語っている。つまり、オーガリングによつて R_i と Fr_2 の関係も調べると下記のようになる。つまり ρ/ρ_s および u/u_{*d} の $0 \leq z \leq d_2$ の領域におけるオーガーはそれぞれ、

$$(\bar{\rho}_2 - \rho_s) / d_2, \quad \bar{u}_2 / d_2$$

と考えられ、これを (19) 式に代入し、さらに比例定数を α とおくと、(20) 式の関係がえられる。

$$R_i = \alpha / Fr_2^2 \quad (20)$$

実験値についてこの関係を整理したのが図-6 であり、データ個数が少ないが、最小二乗法によつて $\alpha = 1.64$ をえた。つまり、(22) 式によつて表現される抵抗則に關して若干の考察を加える。

$\bar{u}_2 / u_{*d} = \sqrt{2/\xi'_2}$ とおき、(22) 式の右辺の u_{*d} と (16) 式を用いて消去し、 R_i は (20) 式の関係を使えば、

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{2}{\xi'_2}} &= \frac{Fr_2'}{Fr_2} \left\{ \frac{\alpha}{K_2} \left(\frac{2.3}{K_2} \log_{10} \frac{l_0/d_2 + K_2}{l_0/d_2} - \frac{1}{l_0/d_2 + K_2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &+ \frac{1}{K_2} \left(\frac{l_0}{d_2} \cdot \frac{2.3}{K_2} \log_{10} \frac{l_0/d_2 + K_2}{l_0/d_2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$Fr_2' = u_{d1} / \sqrt{(\rho_0 - \bar{\rho}_2) g d_2 / \rho_m} \quad (22)$$

となる。 Fr_2' は Fr_2 の関数であることが容易に推察されるが、実験値についてこの関係を示したのが図-7 であり、きつめて両者の相関はよい。図-5, 6, 7 の結果を (21) 式に代入し、 K_2 をパラメーターとして計算した曲線を図-8 に示す。河口二層端において求められ

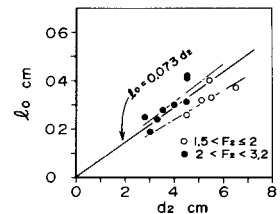


図-5 l_0 と d_2 の関係

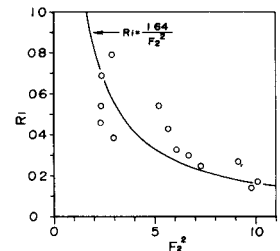


図-6 R_i と Fr_2 の関係

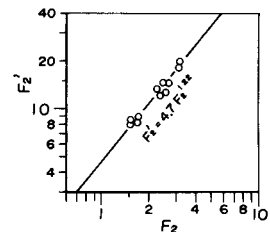


図-7 Fr_2 と Fr_2' の関係

