

II-58

上層流における界面近傍の流れ

九州工業大学 正員 楠 勝
九州大学工学部 正員 橘 東一郎
九州大学工学部 正員 松永 信博
九州大学大学院 学生員 〇並川 正

1. はじめに

2層密度流における連行速度および界面応力を定量的に評価するため、界面波やその近傍の流れに関する研究が数多くなされている。しかしながらそれらに関する特性量と普遍表示する試みはほとんどなされていない。本報告の目的は、2層上層密度流における界面近傍の流れの特性量を直接それらを支配している内部パラメータで記述することにある。

2. 実験方法および実験条件

実験水路の詳細については前報¹⁾を参照されたい。濃度変動時系列をペン・レコーダーに出力させることにより、平均界面の位置を流下方向に求めていき界面勾配を測定した。界面勾配がほぼ一定になる範囲の中央付近で流速・濃度・界面変動の同時測定を行った。ポイントゲージに固定された流速計に濃度計を取り付け、同一点における流速・濃度を鉛直方向に測定した。実験条件としてFroud数($=U_m/\sqrt{g h_1}$)を0.15から0.65の範囲で変えた。ここに U_m : 上層断面平均流速, g : 浮力差, h_1 : 上層水深である。界面における摩擦速度(u_*)は水路側壁に働く摩擦力を考慮し界面勾配より算定した。実験方法ならびに実験条件に関する詳記は文献²⁾を参照されたい。

3. 実験結果および考察

以下では主として界面近傍の流れ特性について議論する。

(1) 平均流速と平均密度に関する特性諸量

図-1に平均流速(U)および平均密度(ρ)の鉛直分布に関する界面近傍の特性諸量を示している。図中の記号は

ρ_1 : 上層密度, ρ_2 : 下層密度,
 U_0 : 上層一様流速, U_m : 上層断面平均流速,
 u_i : 界面平均流速, h_1 : 上層水深, h_2 : 下層水深,
 h'_1 : 界面から $U=U_0$ になるまでの距離, h'_2 : 界面から $U=0$ になるまでの距離,

$\delta_p \equiv (\rho_2 - \rho_1) / (d\rho/dz|_{z=0})$,
 $\delta_m \equiv U_m / (dU/dz|_{z=0})$, $\delta_0 \equiv U_0 / (dU/dz|_{z=0})$ である

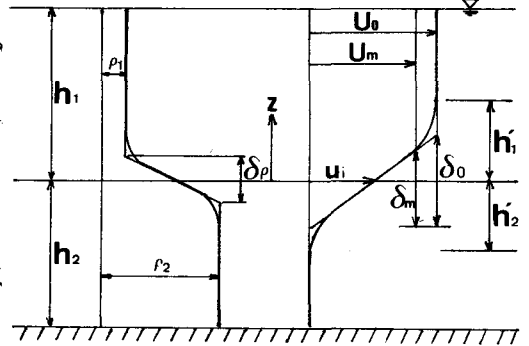


図-1 特性諸量

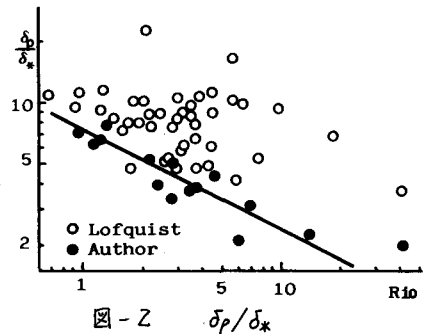
さらに $\delta_x \equiv u_* / (dU/dz|_{z=0})$ で定義される長さスケールを導入した。界面は $\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2$ となる位置と定義した。これらの量は局所フーリゲン数($K \equiv u_*^2 / g h_1$)と局所リチャードソン数($R_{io} \equiv -g(d\rho/dz|_{z=0}) / \{\rho_2(dU/dz|_{z=0})^2\}$)のいずれかの関数であると考え、 U_0/u_* , U_m/u_* , u_i/u_* , δ_0/δ_m , h'_1/δ_m , δ_m/δ_x を K と R_{io} に対してプロットしたところ、次式で示すようにほぼ一定値をもつことがわかった。

$$\left. \begin{aligned} U_0/u_* &= 15.6 \pm 3.3, & U_m/u_* &= 14.5 \pm 3.2 \\ u_i/u_* &= 6.2 \pm 2.2, & \delta_0/\delta_m &= 1.08 \pm 0.03 \\ h'_1/\delta_m &= 19.2 \pm 0.49, & \delta_m/\delta_x &= 14.5 \pm 3.2 \end{aligned} \right\} (1)$$

図-2はLofquist³⁾の下層密度流の測定結果とともに、 δ_p/δ_x を R_{io} に対してプロットしたものである。下層流に関してはあまり R_{io} の依存性はみられないが、上層流においては

$$\delta_p/\delta_x \sim R_{io}^{-1/2} \quad (2)$$

が成り立つ。


 図-2 δ_p/δ_x

ここで $u_e/U_m = \delta z/\delta_m = \text{const}$, $u_e \delta z/\nu \sim k^{1/2}$ なる関係と (2) 式を考慮すると,

$$R_{10} = -g(dp/dz|_{z=0}) / \{\rho_s(dU/dz|_{z=0})^2\} \\ = \frac{\varepsilon g \nu}{\rho_s \frac{\delta z^2}{U_m}} = \frac{\varepsilon g \nu}{\rho_s \frac{u_e \delta z}{\nu}} \frac{\delta z}{U_m} \\ (\text{ここには } \nu; \text{分子粘性係数})$$

と表わされ、 $R_{10} \sim k^{1/2}$ なる関係が得られる。

結局、特性量を R_{10} でまとめることと k でまとめることは等価であり、以下では主に R_{10} に対して記述する。

図-3 は $u_e \delta z$ で定義される有効粘性係数 (ν_e) を用いて $(U-U_i)/u_e$ を $u_e z/\nu_e$ に対し

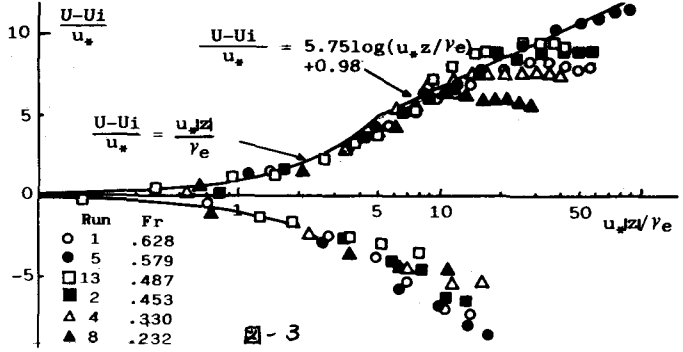


図-3

てプロットしたものである。上層の流速分布は $0 \leq u_e z/\nu_e \leq 5$ で壁面乱流の粘性底層で見られる直線分布形をしており、粘性底層が成り立つ範囲とも一致している。 $5 \leq u_e z/\nu_e \leq 10$ で対数分布則が成り立ち、カルマン定数を 0.4 とした時の勾配 (5.75) をもつ。 $u_e z/\nu_e \geq 10$ では流速は一樣となるが、その値は Fr 数が小さい程小さくなる傾向が見られる。下層では $-2 \leq u_e z/\nu_e \leq 0$ で直線分布となるが、それ以下では下層流は層流となり ν_e を用いて流速分布を議論することはできないであろう。従って、界面直傍の平均流速分布形は壁面乱流境界層内のそれとアナロジ的に

$$\frac{U-U_i}{u_e} = \frac{u_e z}{\nu_e} \quad (-2 \leq \frac{u_e z}{\nu_e} \leq 5) \\ \frac{U-U_i}{u_e} = 5.75 \log \frac{u_e z}{\nu_e} + 0.98 \quad (5 \leq \frac{u_e z}{\nu_e} \leq 10) \quad (3)$$

と記述することが出来る。

(2) 流速変動

図-4 に乱れ強度 u' の鉛直分布の代表例を示す。乱れ強度は界面で浮力効果のため減衰し、界面より少し離れると上、下層において極大値を生ずる。これは内部波によって引き起こされる流体運動のためであると考えられる。図-5 に界面における u'/u_e , v'/u_e の R_{10} 依存性を示す。乱れ強度は R_{10} に比例して減衰することがわかる。図-6 は u' の周波数スペクトル $E(f)$ を

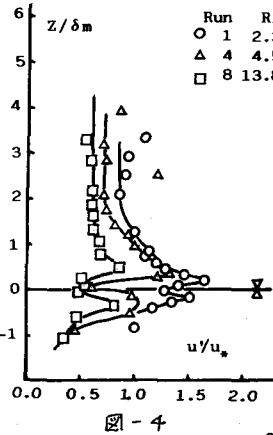


図-4

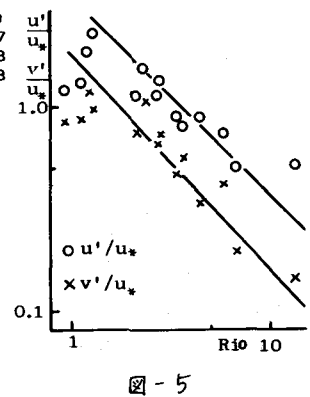


図-5

減衰することがわかる。図-6 は u' の周波数スペクトル $E(f)$ を

$$F^*(k^*) = E(f)/2\pi u^2 T, \quad k^* = 2\pi T \cdot f \quad (4)$$

を用いて無次元波数スペクトル $F^*(k^*)$ に変換したものである。ここで $T = E(0)/4u^2$ である。図中の実線は乱れの発生域から慣性小傾域において成り立つ式として Karman が提案した式

$$F^*(k^*) = \frac{2}{\pi} (1 + k^{*2})^{-5/6} \quad (5)$$

である。 u' のスペクトル形は基本的には (5) 式で示される形をとるが、界面近傍では L.P. 波、S.P. 波によって引き起こされる変動のためそれに対応した波数においてスペクトル形は (5) 式からはずれ、ピークを示す。

最後に有意義な助言をして下さった小松利光助教授、ならびにデータ整理に尽力下さった古賀俊行君に謝意を表します。

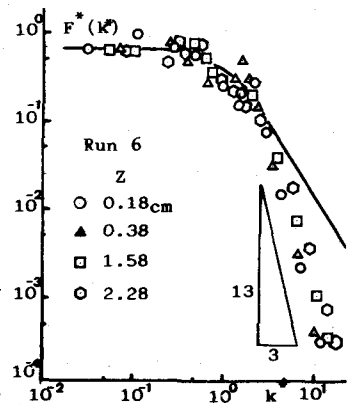


図-6

参考文献 1) 荒谷, 松永, 椿, 小松 : 土木学会西部支部研究発表会講演要集, 1983

2) 松永, 浦, 並川, 椿 : 第28回水理講演会論文集, 1984

3) Lofquist, K. : Physics of Fluids, vol 3, 1960