

早稲田大学 大学院 学生員 齋見 元宏
早稲田大学 大学院 学生員 阿部 達也
早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫

1. はじめに

現在の密度流研究は、平均流速、平均密度等の平均量を用いて、内部摩擦係数、連行係数、連行係数等の工学的に重要な要素と実用に応える範囲で算定可能な段階にきている。しかしながら、界面における混合の複雑なメカニズムの把握になると、密度及び流速測定が困難さを伴って今日に不明な点が多い。本研究では、波形床上の成層密度流（下層流、浸塩二層流）の実験を行ない、断面の非一様性が界面付近の流れにどのような影響を与えるかを調べる。

2. 実験方法

実験用水路は、幅15cm、高さ40cm、水路長3mのアクリル樹脂製開水路に $\eta = a \cos \frac{2\pi}{L} x$ ($a = 2.5 \text{ cm}$, $L = 50 \text{ cm}$) の波形床を設けた。水路勾配は、 $i = 0$ 及び $1/42$ とした。実験は、ポンプで下層流を作り、比較的稳定な状態になったら測定を行なった。密度測定は電気伝導度計を用い、流速分布は水素気泡法により写真から読みとった。なお、実験では下流側で混合層を合わせて脱き取るので、上層に全水深が一定になる様に浸水を補給した。

3. 実験結果と考察

今回の実験は、すべて内部フルード数 Fi が1より小さい範囲であった。流況はFig. 1に示す様に凸部を過ぎた場所ではく離を生じている。このく離は、 Fi 数、 Fi 数に関係なく、ほぼ同一の地点で起こる事が確認された。 $Fi < 1$ というのは、一層流における常流に対応しており、界面形状は、水路床に対しほぼ逆位相の波形になった。実験開始直後では、 Fi のかなり大きな流れも存在するようであるが、数回の混合や連行、凸部における一種の堰上げの効果等のために、下層水深が上昇し、 Fi を小さくしてその後安定する。

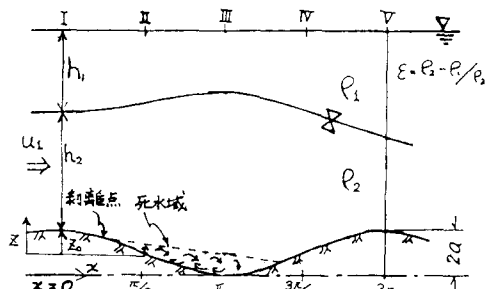


Fig. 1 流況の模式図（界面の位置は $\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ となる位置とする）

流速分布について 波形凹部では、く離域が存在するために、下層流速分布はかなり大きく時間的に変動し安定しない。また凸部付近では、流れが湾曲するため遠心力が生じ、流速分布は一様化される傾向がある。これらの要因のため波形床水路において、一般的流速分布則を求める事は困難である。

Fig. 2 に界面から上の局所的な流速分布の例を示す。 δ' は界面から $u = 0$ となる位置までの厚さ、 z は界面を原点とした鉛直座標である。同図を見ると $kx = 0, 2\pi$ で傾きが非常に小さくなっている。すなわち、界面から上で急激に流速が減少しているのである。また $kx = \pi, \frac{3}{2}\pi$ では直線分布に近くなっている。この様な傾向は、他のケースにも見られた。これは、下層水深

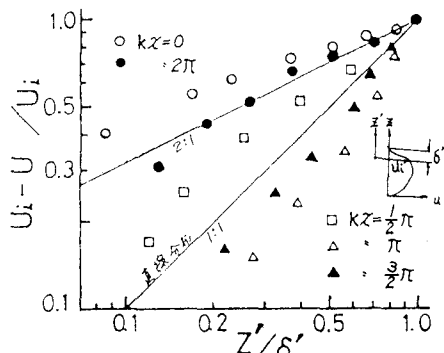


Fig. 2 界面より上の流速分布 (Ex. 29)

の変化に従って界面の流速が大きく変動し、また粘性によってその変動が伝達される領域が比較的に深いためと考えられる。 $KZ=0, 2\pi$ では界面流速が速くなるので、界面の近くでは加速状態にあり、結果として流速分布は界面から離れるにつれて鋭く減少した形になる。 $KZ=\pi$ については反対の事が言える。この様な界面付近の流速分布の変化は次に述べる局所リチャードソン数の値に大きく影響して来る。

局所リチャードソン数 Ri_* 界面の安定・不安定及び拡散の度合を調べる場合に重要なパラメータである局所リチャードソン数 Ri_* の中間層内における分布の例と Fig.3 に示す。中間層は密度分布より決定し、その厚さを 2δ とした。 Ri_* の定義は次式である。

$$Ri_* = - \frac{g \cdot \partial \rho / \partial z}{\rho (\partial u / \partial z)^2}$$

同図より、次の様な事が言えるであろう。(1) Ri_* は界面付近にピークを持ち、界面から離れるにつれて小さな値になる。(2) 波形状底部と凹部と比較した場合、相対的に Ri_{*max} は凹部で大きな値になる。(3) Fi が大きくなるにつれて、 Ri_{*max} の値は小さくなる。(4) さらに Fi が大きくなると、 Ri_* の分布は明確なピークを持たなくなる。さて、 Ri_* が大きいという事は局所的に安定している事を意味するので、(2)(3)の特徴は、言い換えれば、(2)波形状凹部比凸部は不安定である。(3) Fi が大きくなるにつれて不安定になる。今回の測定結果においても勾配をつけて Fi を大きくした場合には、界面の塩分濃度の時間変化が小さく、周期の短い細かい変動が増える事が確認されており(3)と一致する。オーバーオールのリチャードソン数 Ri と取り扱った場合には、速度勾配が考慮されていないので(2)のような傾向は現れない。局所リチャードソン数の分布についての研究報告は従来あまりなされていないが、今回の様に界面の流速が場所的に大きく変化する場合には重要な意味を持つであろう。また、界面における拡散、内部波の破滅、内部渦などの種々の要因による混合現象を Ri_* と関連づけて評価するのの一つの方法ではないかと思われる。

Ri と拡散係数 D オーバーオール Ri と拡散係数 D の関係と Fig.4 に示す。拡散係数 D は密度分布から求めた中間層厚の変化から次式より求めた。

$$D = \frac{1}{26.52} (\delta_2^2 u_{m2} - \delta_1^2 u_{m1})$$

ここに δ は中間層厚の1/2、 u_m は下層平均流速、 δ_1, δ_2 は対応する二断面を表わし、1は上流2は下流側の断面がある。同図より、 Ri が小さくなると D が大きくなるという傾向が分かる。また波形状水路では、水平床に比較し D の値は大きくなるようである。

最後に本研究にあたって実験を助けてもらった、早稲田大学 坪田 恵介氏に感謝いたします。

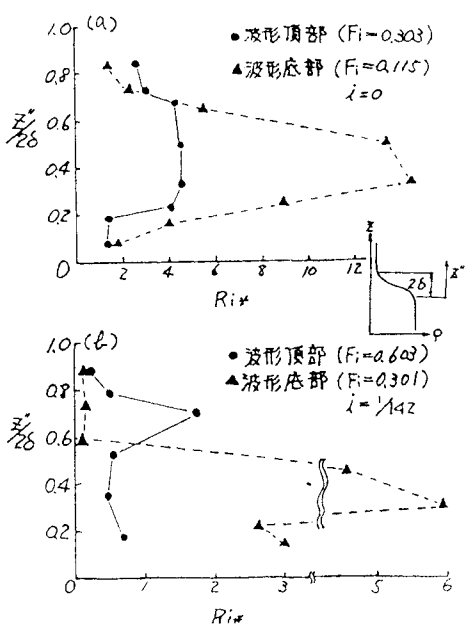


Fig.3 中間層内の Ri_* の分布

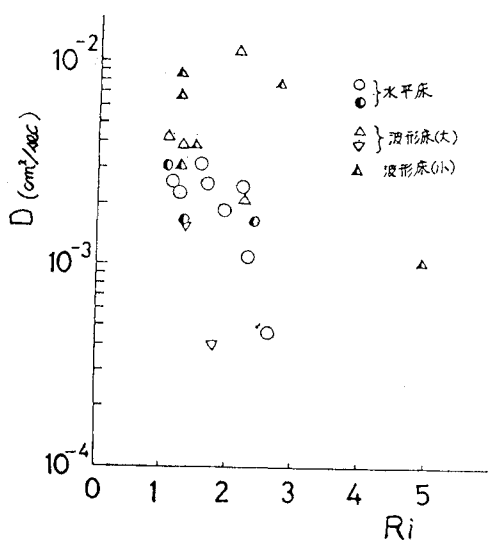


Fig.4 D と Ri の関係