

下層2層流の実験(2)

——連行係数, 内部波および乱れの特性——

加藤 始^{*}・中野 晋^{**}・池田高則^{***}

1. ま え が き

2層流体の界面における連行現象は, 風による温度躍層の破壊や内湾での水質予測の問題とも密接な関係があるため, 最近, 注目されている問題の一つである. これらの実験は, 一般に攪拌槽型のものとせん断流型のものとに分類され¹⁾, せん断流型の各実験における連行係数は層平均リチャードソン数の関数で表わされているが, その場合の速度のスケールには摩擦速度 u_* が用いられる場合と平均流速 $\bar{U}$ が用いられる場合がある. Price²⁾ は u_* ではなく $\bar{U}$ を用いると連行係数の統一的表現がえられるとしているが, Deardorff³⁾ はこの Price の説を疑問視しており, 連行係数の表現についてはまだ統一的な知識はえられていない.

ところで河口密度流の混合形態を支配する第1の要因として, Simmons⁴⁾ は河川流量とタイダルプリズムとの比を挙げているが, この説に従うと通常の上層2層流に比べて下層2層流の方が2層界面での連行係数は大きいのではないかという疑問が生じる. 従来, 上層2層流の実験はかなり行われて, 内部抵抗係数, 内部波, 乱れの性質等についていろいろ研究されているのに対し⁵⁾, 下層2層流についてはこれまで Lofquist⁶⁾ の実験結果がある程度で, その性質については不明な点が多い. 著者らは連行係数に関する上記疑問点の解明ならびに下層2層流の一般的性質の把握を目的として実験を行っており, 前報⁷⁾ では水路幅を 5 cm に縮小した場合の実験結果について, 下層流の乱れの大きさにより連行係数の大きさが変ることを指摘し, また密度分布や流速分布の特性を調べた. ただこの場合には, 基本となるケースでの乱れが非常に小さかったことと, 水路幅が狭いため側壁の影響が実験結果に入っていることが懸念された. そこで今回は水路幅を 15 cm に改善して実験を行うと共に, 新たに内部波や下層流の2方向乱流成分の測定も行って, 前報

では不明確であった点を含め下層2層流の性質のいくつかを調べたのでそれを報告する.

2. 実験概要

(1) 実験装置

実験に使用した水路は前報で述べた 図-1 のようなア

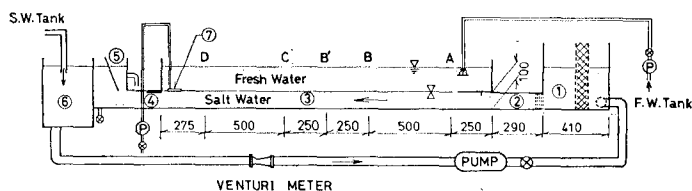


図-1 水路概略図

クリル製のものであるが, 今回の実験では仕切壁は設けず, 塩水槽 ⑥ を除いて水路幅は 15 cm で一定である. 実験方法は前報と同様なので詳細は省くが, 実験は図-1 の測定部 ③ で静止した真水層の下に塩水を流して行っている. 今回は ⑦ からの中間層水の排水量は常にモニターして必要最低限度に保った.

(2) 測定方法

前回の実験と同様に, 流速の測定には DISA のホットフィルム流速計を, 塩分濃度と連行係数の測定には電気抵抗線式塩分濃度計を使用した. また内部波の測定には 1.5 mm 間隔に固定した 0.5 mmφ の白金線 2 本をセンサーとする内部波高計を使用した.

実験における2層界面の位置は, 密度が上・下層の値 ρ_1, ρ_2 の平均値になる高さとしている. この界面に沿って下層流の方向に x 軸, 界面から鉛直下向きに z 軸をとり, x, z 方向の流速変動成分を u', w' とする.

(3) 実験ケース

今回の実験では, 前回の実験での問題点を改善するため水路幅は 15 cm のままとし, 流速分布調整用の金網も 1 枚だけとして, 下層流の乱れが大きくなるようにした. この基本となる場合をケース B と呼ぶが, この場合の流速 U と乱れの幅方向分布を図-2 に示す.

また今回の実験でも下層流の乱れを変えるため, 金網を追加して乱れ $(\bar{u'^2})^{1/2}$ を約 1/2 に小さくした場合の実験も行ったが, これをケース B' と呼ぶ.

^{*} 正会員 工博 茨城大学教授 工学部建設工学科

^{**} 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

^{***} 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

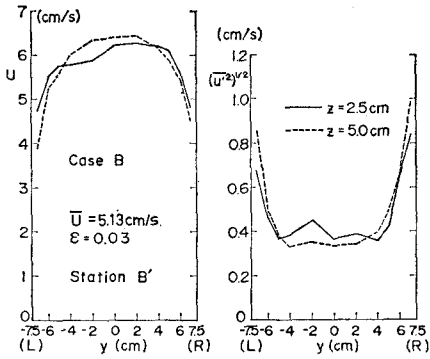


図-2 幅方向流速分布 (Case B)

さらに密度分布の特性長が下層流の高さ h によってどう変わるかを調べるため、図-1の②と④の部分の上半分をふさいで、下層流の高さを約 1/2 に縮小した場合の測定も一部行ったが、この場合をケース C とする。ケース C での U と乱れの測定例を図-3に示す。

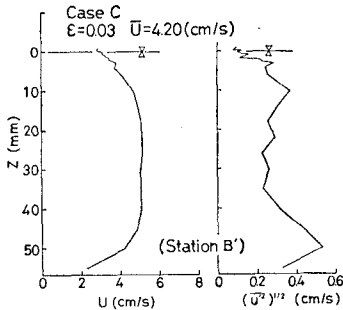


図-3 乱れと U 分布 (Case C)

3. 実験結果と考察

(1) 密度分布と内部波

2 層流の性質を表わすのに、流れを代表する単一の無次元量である式 (1) の層平均リチャードソン数 Ri_* が有効なことが一般に知られている。

$$Ri_* = \varepsilon g h / \bar{U}^2 \quad (1)$$

ここに $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$, g は重力の加速度, h は主流の高さ, $\bar{U}$ は主流の平均流速であるが, $\bar{U}$ の代りに摩擦速度 u_* が使われる場合もある。

図-4 には密度分布の測定例を示すが、この密度分布

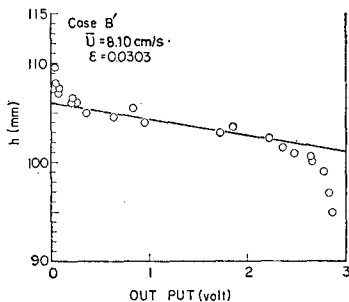


図-4 密度分布の例

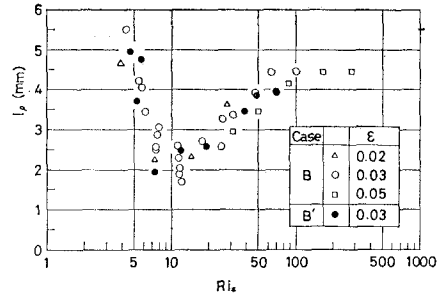


図-5 l_p の変化 (Case B, B')

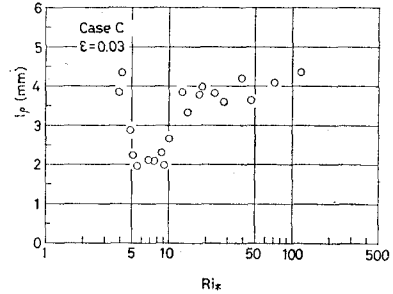


図-6 l_p の変化 (Case C)

の特性長 l_p を前報と同様に次式によって求める。

$$l_p = \frac{4\rho}{(\partial\rho/\partial z)_{\max}} \quad (2)$$

ここに $(\partial\rho/\partial z)_{\max}$ は図-4に示した直線の勾配として求めている。図-5はケース B および B' での l_p の値を Ri_* に対してプロットしたものであるが、ケース B では $Ri_* \approx 12$ において、ケース B' では $Ri_* \approx 8$ 前後において l_p は最小となり、全般的に前報の幅 5 cm での実験結果とよく似た結果がえられた。図-6には下層流の高さ h を約 1/2 に縮小したケース C における l_p の測定結果を示しているが、同じ平均流速 $\bar{U}$ に対して l_p の値はケース B や B' とほとんど変わらず、 Ri_* だけが 1/2 に縮小された形となった。ケース B とケース C における u_* も比較してみたが大差がないので、 Ri_* の定義で $\bar{U}$ の代りに u_* を使って整理しても図-5と図-6の違いは説明できず、 Ri_* 以外に l_p を支配する要因が何であるかは明らかにできなかった。

図-7はケース B において $\bar{U}$ を 4.4~6.8 cm/s と変えたときの B' 点における内部波のスペクトルの変化を示している。流速が大きくなって内部波のパワーが大きくなると、そのスペクトルの高周波数部分は、後で述べる u' スペクトルについての -13/3 乗則⁹⁾と同様の変化をしており、これは内部波が流速変動に誘起されて生じていることを示すものと考えられている⁹⁾。

図-8はケース B と B' における内部波の波高を界面変化 $\eta(t)$ の rsm 値で表わし、 Ri_* に対してプロットしたものである。この図は、同じ流速に対しては乱れが小さいケース B' の方が内部波の波高も小さいことを示し

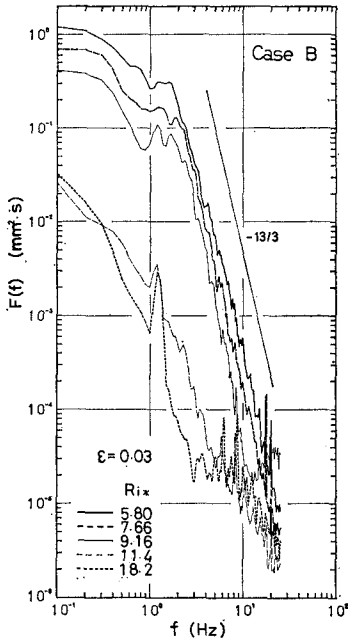


図-7 内部波のスペクトル

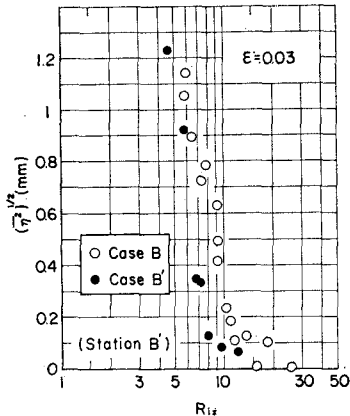


図-8 内部波の波高の変化 (Case B, B')

ている。また、流速がしだいに増加したとき、ケース B では $R_{i*} \approx 12$ くらいから、ケース B' では $R_{i*} \approx 8$ 程度から急激に内部波は増大することを示している。この R_{i*} の値はまさしく 図-5 に示した l_p が最小となる R_{i*} の値に対応しており、内部波の発生と共に l_p が増大し始めるという前報で述べた推定を裏づけている。

図-9 はケース C における内部波の波高の測定結果を示しているが $R_{i*} \approx 6$ くらいから $(\eta^2)^{1/2}$ の値は急激に増大しており、これも 図-6 に示したケース C の l_p が最小となる R_{i*} の値とよく対応している。

(2) 連行係数

今回の実験の連行係数 E は、平均流速 $\bar{U}$ を用いて

$$E = W_e / \bar{U} \quad (3)$$

によって計算する。図-10 はケース B およびケース B' における連行係数の測定結果を示したものである。まず

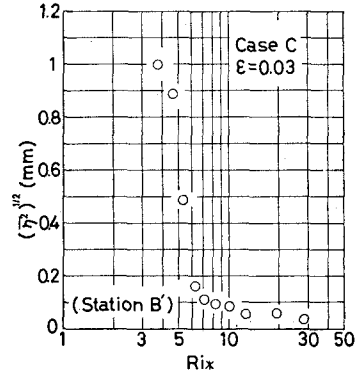


図-9 内部波の波高の変化 (Case C)

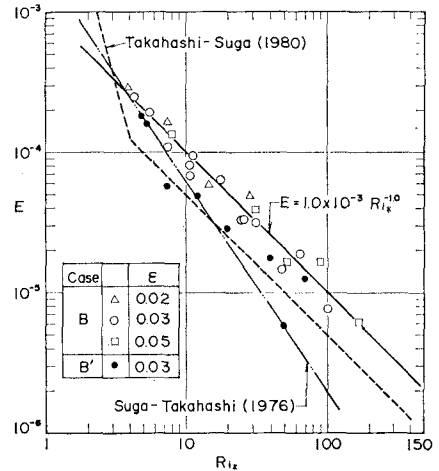


図-10 連行係数の測定結果

一般的な実験条件に近いケース B での結果のみに注目し、直線分布として最小 2 乗法で係数を求めると

$$E = 1.00 \times 10^{-3} R_{i*}^{-1.00} \quad (4)$$

となり、この関係は 図-10 の中に実線で示してある。従来の上層 2 層流の研究でえられた式 (3) の形の連行係数の代表的なものとしては須賀・高橋¹⁰⁾あるいは高橋・須賀¹¹⁾の提案式があり、それらも 図-10 の中に示してあるが、われわれの実験値はそれらに比べてやや大きめである。Lofquist⁶⁾の測定結果 ($7 \leq R_{i*} \leq 100$) は今回は図から省略したが、全体的には今回のケース B での E の値は Lofquist の結果とほぼ同じである。

次にケース B とケース B' の結果を比較すると、明らかに乱れの大きいケース B での値の方が大きく、前報で述べた連行係数に及ぼす乱れの影響が再確認される。

(3) 乱れ特性

ケース B における乱流成分 $\overline{u'^2}$, $\overline{w'^2}$, $-\overline{u'w'}$ の鉛直分布の測定例を 図-11, 12 に示す。図-12 の黒四角の点は別の Run の $-\overline{u'w'}$ の結果である。 $-\overline{u'w'}$ の分布は下層全体としては管路などの分布とよく似ているが、界面にそれほど接近しない $z = 10 \sim 15$ mm 付近から界面へかけて $-\overline{u'w'}$ の値が減少するのは管路などの結

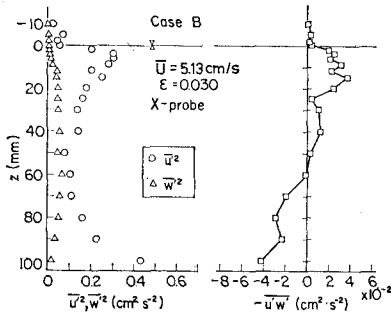


図-11 2方向乱れ成分の測定例

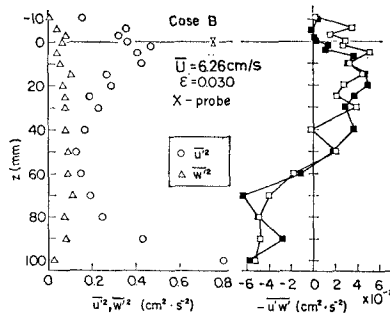


図-12 2方向乱れ成分の測定例

果とは少し異っており、界面近くで浮力効果が顕著になる影響ではないかと考えられる。

次に u' , w' スペクトルの測定例を図-13~15に示す。これらは図-12のRunの $z=2, 10, 50$ mmの各点での結果で、それぞれ密度勾配の大きい点、中間領域、均一密度領域でのものに対応している。

椿・小松⁸⁾は均一流体の乱れエネルギースペクトルの粘性領域について $-13/3$ 乗則を理論的に導き、実験結果でその妥当性を示しているが、図-13~15のスペクトルの高周波数領域もこの $-13/3$ 乗則に合った変化を示している。日野ほか¹²⁾は等方性乱流の1次元スペクトル $F_w(f)$, $F_w(f)$ が f^{-n} に比例するとすれば、

$$F_w(f) = \frac{1}{2}(1-n)F_w(f) \quad (5)$$

の関係が成立つことを指摘しているが、図-15の高周波数部分はこれに対応して $F_w(f) > F_w(f)$ となっている。式(5)で $n = -13/3$ とおくと

$$F_w(f)/F_w(f) = 8/3 \quad (6)$$

となる。図-15のスペクトルの $f=5 \sim 10$ Hz における $F_w(f)/F_w(f)$ の値は $1.6 \sim 3.6$ の範囲にあり、平均値は約 2.4

で式(6)の値に近く、この場合の乱れはほぼ等方性の性質をもっているといえる。一方、図-14の高周波数部分では $F_w(f)$ と $F_w(f)$ とがほぼ等しく、この $z=10$ mmでの乱れは等方性の性質を示していない。

密度成層場の乱れのスペクトルについては -3 乗則が導かれているが⁸⁾、図-13の $z=2$ mmでのスペクトルでは、内部波に

相当するパワーの山があるためか、 -3 乗則に対応するような変化は見られない。

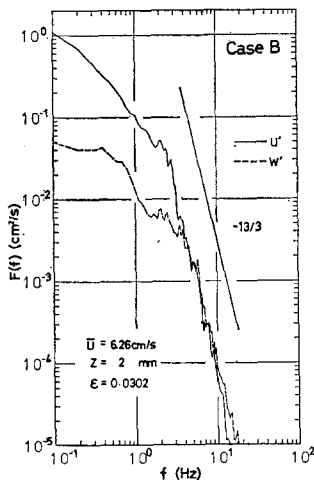
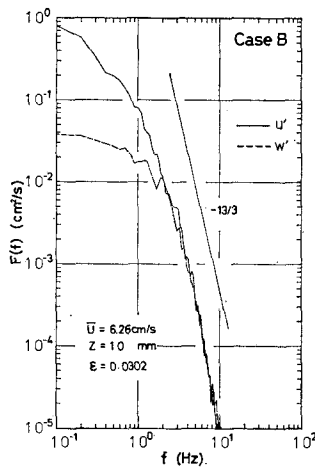
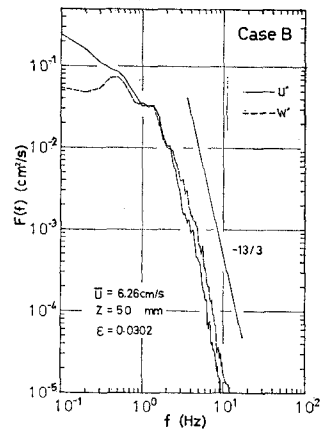
(4) 対数法則の適用性の再検討

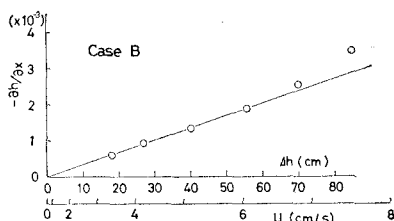
2層流の界面付近の流速分布に対数法則が適用できることが最近 Csanady¹³⁾ や日野他^{14), 15)}により指摘されている。著者らも前報で対数法則により求めた u_* と Lofquist⁶⁾の方法で計算した u_* との比較を試みたが、水路側壁の影響のためか後者の値の方が $40 \sim 60\%$ 大きく、十分な検証ができなかった。図-16は今回のケースBでの界面勾配 $\partial h/\partial x$ の測定結果であるが、同じ $\bar{U}$ に対する $\partial h/\partial x$ の値は前回の実験での値の約 $1/2$ に減少している。Lofquist⁶⁾によるせん断力 τ の式(前報または文献5)参照)で $\partial h/\partial x$ は主要項であるから、前報の場合 u_* が過大に計算されていたことがわかる。

ケースBにおける界面付近の流速分布の測定例を図-17に示すが、前回の実験と同様に対数的な分布をしている。図中に示した直線の勾配に対数法則¹³⁾

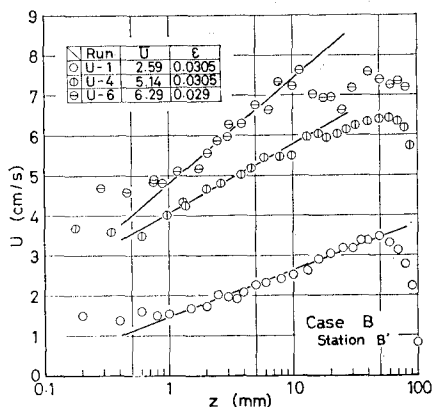
$$U/u_* = (1/\kappa) \ln(u_* z/\nu_e) + B_1 \quad (7)$$

(B_1 : 定数)を適用して求めた u_* を u_{*1} とし、一方、Lofquistに従って計算した u_* を u_{*2} とする。図-18は

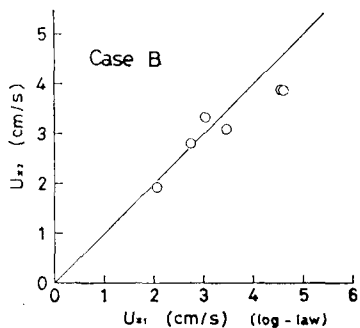
図-13 u' と w' のスペクトル ($z=2$ mm)図-14 u' と w' のスペクトル ($z=10$ mm)図-15 u' と w' のスペクトル ($z=50$ mm)



図—16 界面勾配の測定結果 (Case B)



図—17 流速分布の測定結果 (Case B)

図—18 u_{*1} と u_{*2} の比較 (Case B)

ケースBのいくつかの Run について求めた u_{*1} と u_{*2} の関係を示しているが、 u_{*1} と u_{*2} はかなりよく一致しており、今回の下層2層流に対しては式(7)の対数法則が適用しうることを示している。

4. あとがき

今回の論文では、前報⁷⁾からの課題であった密度分布

の特性長の性質と対数法則の適用性の検討を行い、さらに連行係数との関連を考えながら、主として内部波と下層流の乱れについて調べた。はからずも今回の研究で、内部波の発生特性は層平均リチャードソン数 Ri_* だけでは記述できないことが明らかになったが、内部波の発生は連行現象とも密接な関係があるはずであり、これらの問題についてはさらに研究が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 日野幹雄：成層流の乱流，乱流(谷一郎編)，丸善，pp. 177～219, 1980.
- 2) Price, J. F.: On the scaling of stress-driven entrainment experiments, J. Fluid Mech., Vol. 90, pp. 509～529, 1979.
- 3) Deardorff, J. W. & G. E. Willis: Dependence of mixed-layer entrainment on shear stress and velocity jump, J. Fluid Mech., Vol. 115, pp. 123～149, 1982.
- 4) Simmons, H. B.: Field experience in estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics, A. T. Ippen ed., McGraw-Hill, New York, pp. 637～690, 1966.
- 5) 水理委員会密度流研究小委員会：成層密度流の界面現象(1)，土木学会論文報告集，No. 242, pp. 73～90, 1975.
- 6) Lofquist, K.: Flow and stress near an interface between stratified liquids, Phys. of Fluids, Vol. 3, pp. 158～175, 1960.
- 7) 加藤 始・池田高則：下層2層流の実験(1)——流速分布と連行係数——，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 520～529, 1981.
- 8) 椿 東一郎・小松利光：成層密度噴流における乱れおよび密度変動のスペクトル特性，土木学会論文報告集，No. 268, pp. 63～74, 1977.
- 9) 椿 東一郎・小松利光・下田五郎：2層境界面における内部波と乱れに関する実験的研究，第25回水理講演会論文集，pp. 311～319, 1981.
- 10) 須賀寛三・高橋 晃：淡塩二層流の連行係数，土木学会第31回年次学術講演会講演概要，第II部，pp. 383～384, 1976.
- 11) 高橋 晃・須賀寛三：二層流における連行量の再評価，土木学会第35回年次学術講演会講演概要，第II部，pp. 508～509, 1980.
- 12) 日野幹雄・中山哲蔵・原 輝彦・宇賀田康男：交番振動流の乱れの素過程，第26回水理講演会論文集，pp. 475～482, 1982.
- 13) Csanady, G. T.: Turbulent interface layers, J. G. Res., Vol. 83, No. C5, pp. 2329～2342, 1978.
- 14) 日野幹雄：密度流の流速分布および界面抵抗について，第23回水理講演会論文集，pp. 347～353, 1979.
- 15) 日野幹雄・グエン ソン フン・中村健一・東江隆夫：塩水楔の流速分布における Monin-Obukhov 理論の適用性について——抵抗および連行係数——，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 414～418, 1980.