

下層 2 層流の実験 (1)

—流速分布と連行係数—

加 藤 始*・池 田 高 則**

1. ま え が き

河口密度流の混合形態は一般に弱混合型、緩混合型、強混合型の3つに分けられるが、Simmons¹⁾はこの形態を支配する第1の要因として河川流量とタイダルプリズムとの比を挙げ、この比が大きいときは弱混合型、小さいときは強混合型になるとしている。この Simmons の説に従うと、上層2層流に比べて下層2層流の方が2層界面での混合を生じやすいのではないかという疑問が生じるが、これまでにそのような事実が指摘されたことはないようである。

従来、上層2層流の実験はかなり行なわれているが、下層2層流についてはこれまで Lofquist²⁾の実験結果があるのみで上記の点は明らかでないの、著者らはこの疑問の解明を1つの目的として下層2層流の実験に着手した。上記の Lofquist はかなり詳しい実験を行なっているが、その場合、界面付近の流速分布や乱れの性質についてはあまり明確にされていない。一方、2層流の密度界面は固定壁と類似の効果を持ち、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 Csanady³⁾ や日野⁴⁾により指摘され、日野他^{5), 6)}は上層2層流の実験でその適用性を調べたが、界面せん断力は直接測定ができないため、これらが十分に解明されたとはいえない。

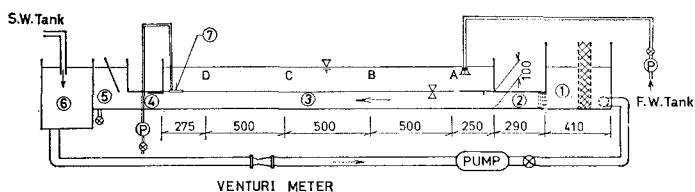
われわれの実験では、上記対数法則の適用性の検討も行なうため、界面付近での流速分布の正確な測定を試みた。また一般に密度界面での連行係数はリチャードソン数の関数になると考えられているが(例えば文献 7) 参照)、最近、連行係数に上層流のもつ乱れが顕著に影響する例⁹⁾が発表されているので、今回の実験では下層流のもつ乱れが連行係数に及ぼす影響についても調べた。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験に使用した水路は幅 15 cm、深さ 30 cm、全長約

3.1 m のアクリル製で、その略図を 図—1 に示す。中央の測定部 ③ は長さが 2.0 m であるが、その上層部 20 cm は真水の貯水槽で、下層部 10 cm だけが接続部 ②、④ を介して流入部 ① と流出部 ⑤ に通じている。水路の下流端には 25×30×40 cm の塩水槽 ⑥ があり、ここの塩水をポンプで ① へ環流させることにより、測



図—1 水路概略図

定部では真水の下に塩水を流せるようになっている。真水と塩水とはそれぞれ別の貯水タンクから実験中でも補給できるようにしてあり、2層界面での連行により生じた中間層は測定部下流端においた中間層吸出口 ⑦ から必要に応じ排水すると共に、界面位置の調整を行なっている。

今回述べる実験では 図—1 の ②~④ の部分に仕切壁を設けて水路幅を 5 cm に縮めており、幅方向の流速分布を均一化するため ① と ② の間に 1 mm メッシュのステンレス金網を多数入れてある。このため下層流の乱れは非常に小さくなっている。

水路は底面が水平になるように木製の架台の上に設置されている。実験時には2層界面に勾配がつくので、測定部 ③ の上流端には 図—1 に示したような導流板をつけ、流入部の流れを平滑化している。

(2) 測定方法

流速の測定には DISA のホットフィルム流速計を用い、本体出力はリニアライザー 55R25 を通して、流速に完全に直線的になった出力を使っている。また塩分濃度の測定には電気抵抗式塩分濃度計を使用し、鉛直方向のトラバースには高さの設定精度が 0.1 mm の自動昇降装置を使用した。流速や塩分濃度のデータは直接 A-D 変換後 MT に記録して後の処理を行なった。

実験における2層界面の位置としては、従来の研究と同様に密度が上・下層の値の平均値になる高さとして定

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部長

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

義する。実験中は連行量の測定の場合を除いて、測定部上流端につけた導流板の先端に目視で界面が一致するように調整し、界面位置が安定した後で流速分布などの測定を行った。しかし界面位置の微小な変化は避けられないので、流速分布の測定時にはC点の界面付近に於いた塩分濃度計の出力を同時に記録し、界面付近の鉛直濃度分布(図-8 参照)を用いて微小な界面変位量の補正を行なった。図-2 にそのモニター記録の1例を示す。

界面での連行量は、いっさいの水の出し入れを止めた状態でB点での界面の上昇速度を測定することにより求めた。この場合にも昇降装置に取付けた塩分濃度計の出力を利用しており、図-3 にその測定例を示す。

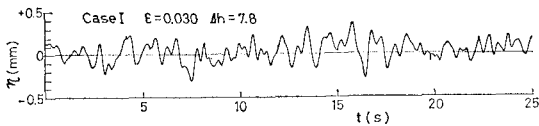


図-2 2層境界面のモニター記録

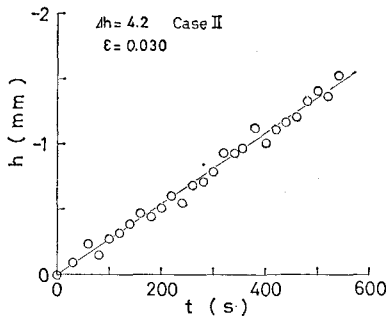


図-3 連行速度の測定例

(3) 実験ケース

今回の実験ケースを乱れの大・小により分類すると表-1 のようになる。ケース I が基本となる場合で、整流金網の効果で下層流の乱れは非常に小さくなっている。

これに対し、下層流の乱れを大きくしたのがケース II と III で、まず径 5mm のストローによる 2cm 間隔の格子を図-1 の接続部 ② の金網の下流におき、長さ 8mm の突起を ③ の入口の導流板の下面につけた場合がケース II である。さらに乱れを大きくするため底面に高さ 19mm のアルミ山形を流れと直角に 10cm および 20~30cm 間隔につけたのがケース III-a および III-a'、測定部入口に高さ 4cm のアクリル板を下層部の高さの中央に幅いっぱいにつけたのがケース III-b である。

実験における上層水としては水道水、下層水としては密度が $\rho_2=1.020\sim1.050$ の塩水を使っている。流れの

調整はベンチュリーの差圧 Δh (cm) を指標としてバルブ操作によって行なった。流量 Q (cm³/s) と Δh との間には $Q=128.3\sqrt{\Delta h}$ の関係がある。

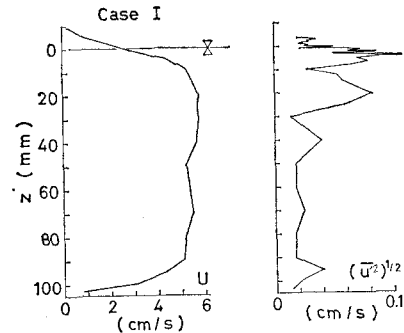
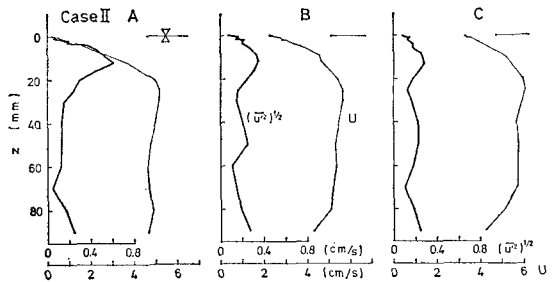
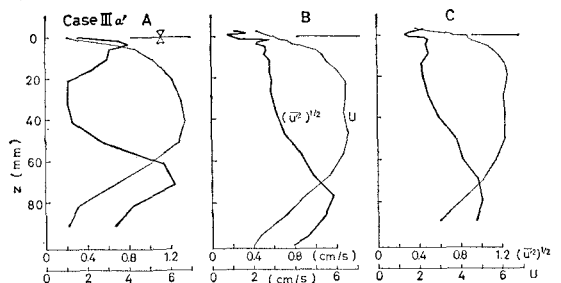
3. 実験結果と考察

(1) 連行係数

2 層界面における連行量を表わすには連行係数 E

$$E = W_e / U_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わす。ここに W_e は界面の連行速度であり、 U_2 としては下層流の最大流速値を用いる。従来、せん断流型の実験では、 E は層平均リチャードソン数 $R_{t*} (=gsh_2/U_2^2)$ 、 h_2 : 主流の高さ、 $\epsilon=\Delta\rho/\rho$ のみの関数として表わされてきた⁷⁾。しかし最近 Kit 他⁸⁾は上層2層流の連行係数に上層水の乱れが顕著に影響する例を示しており、今回の実験では前記の表-1 のように、下層流の乱れを3段階に変えて連行係数の測定を行ってみた。図-4、

図-4 乱れと U 分布 (ケース I)図-5 乱れと U 分布 (ケース II)図-6 乱れと U 分布 (ケース III-a')

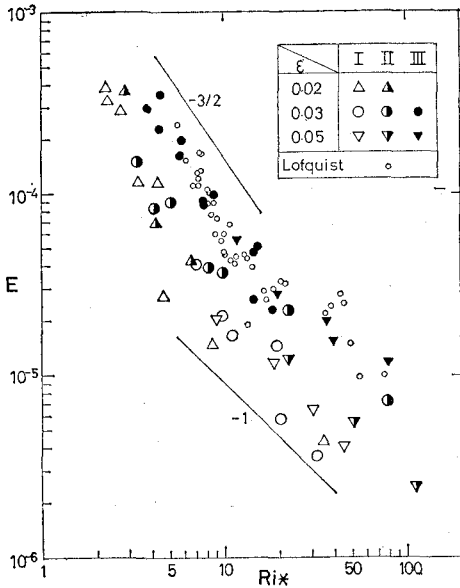


図-7 連行係数 E と Ri_*

5, 6 に流量がほぼ $\Delta h=4.0$ cm の場合のケース I, II, III-a' での乱れと平均流速の分布を示す。 z は界面から下向きにとった鉛直座標である。

図-7 には連行係数 E の測定結果を Lofquist²⁾ の測定値 (U_{max} による表現に換算) と共に層平均リチャードソン数 Ri_* に対してプロットしてあるが、今回のケース I, II, III における連行係数 E の大きさは明らかに

$$E_I < E_{II} < E_{III}$$

となっており、下層流の乱れが大きいほど連行係数も大きくなることを示している。また、ほぼ $Ri_* > 10$ の範囲では各ケースとも

$$E \propto Ri_*^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

のような変化を示すが、ほぼ $Ri_* < 10$ では

$$E \propto Ri_*^{-3/2} \dots\dots\dots (3)$$

と Ri_* に対する変化が急になっている。これとほぼ同様のことは 図-7 に示した Lofquist²⁾ のデータについてもいえる。また今回のケース III の値は Lofquist の結果とほぼ一致しており、Lofquist の実験ではかなり乱れが大きかったものと推定される。

(2) 密度分布

今回の実験では連行量の測定時を除いて上・下界面のすぐ上にしやすい中間層を排除したので、界面付近の密度分布は非常に安定であった。 図-8 にその 1 例を示しているが、この図のように界面付近の塩分濃度の出力は深さに対し直線的に変化しており、この直線の勾配がほぼ最大密度勾配 $(\partial\rho/\partial z)_m$ に対応している。Lofquist²⁾ にならって密度分布の特

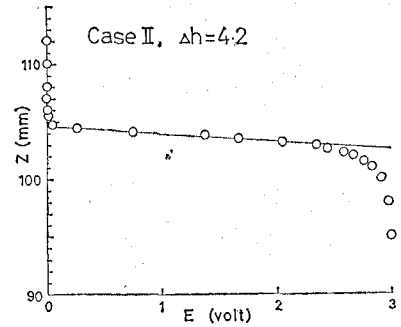


図-8 密度分布

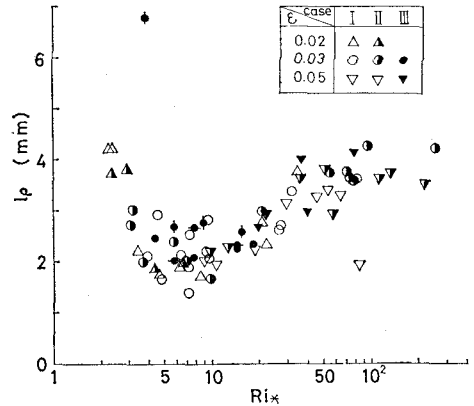


図-9 l_p の変化

性長 l_p , すなわち

$$l_p = \frac{\Delta\rho}{(\partial\rho/\partial z)_m} \dots\dots\dots (4)$$

を求め、 Ri_* に対してプロットすると 図-9 のようになる。Lofquist の実験における l_p は平均値が 5.3 mm, 標準偏差 0.082 mm で流速によってあまり変化していない。これに対し 図-9 に示した今回の結果では全体的に Lofquist の結果より l_p が小さく、かつ $Ri_*=7$ 前後で l_p は最小となっている。これは流速の増加とともに界面がシャープになって l_p は減少するが、 $Ri_*=7$ 前後になると界面に内部波が立ち始め、それ以上の流速では密度勾配がゆるやかになるため l_p が大きくなったとい

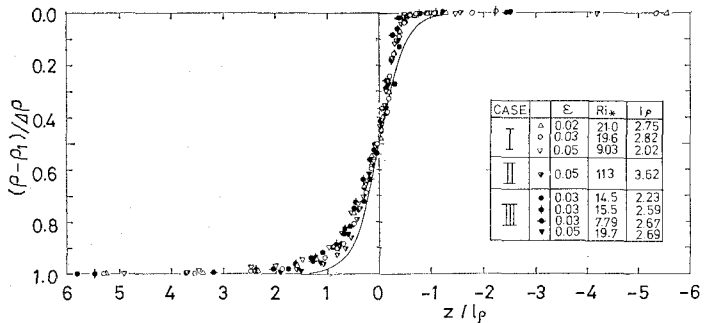


図-10 無次元化した密度分布

える。Lofquistの実験で今回と同様の傾向がみられない理由は不明である。図-10にはいくつかのケースにおける密度分布を、 l_p と上・下層の密度差 $\Delta\rho$ を使って無次元化した形で示している。Lofquistは彼の実験における密度分布を表わす式として次の関係

$$\frac{\rho - \rho_1}{\Delta\rho} = \frac{1}{2} [1 + \tanh(2z/\bar{l}_p)] \quad \cdots \cdots (5)$$

を求めている。比較のため $\bar{l}_p$ の代りに l_p を用いたときの(5)式の関係を図-10の中に曲線で示してあるが、今回の実験結果と比較すると、上層部($z < 0$)では今回の密度分布の方がやや勾配が大きい、下層部($z > 0$)では今回の密度分布の方がややゆるやかな変化をしている。これは今回の実験における l_p の値が、下層よりもむしろ界面付近から上層にかけての密度分布に基づいて決定されているため、今回の l_p の値とLofquist²⁾の $\bar{l}_p$ の値との差を考慮に入れると、下層の密度勾配の絶対値は2つの実験であまり差はないといえる。

(3) 流速分布

界面付近を詳しく測定したB点での下層流の流速分布4例を片対数紙にプロットしたのが図-11, 12であるが、図-12では上・下2つの分布に対して少しずらした別のタテ座標が使っている。いずれの場合も界面から1.5~2mm以上の距離で対数的分布をしており、その部分を対象に図中に直線が引いてあるが、一方それより界面に近い部分の流速は、この直線から大きくはずれる。これら4つのRunの界面のごく近傍の流速分布を普通日盛で示したのが図-13であるが、この図からわかるようにいずれの場合も界面をはさむ3~5mmの層で流速は深さに対し直線的に変化している。

日野・萩原⁵⁾は塩水楔の上の流速分布について第一と

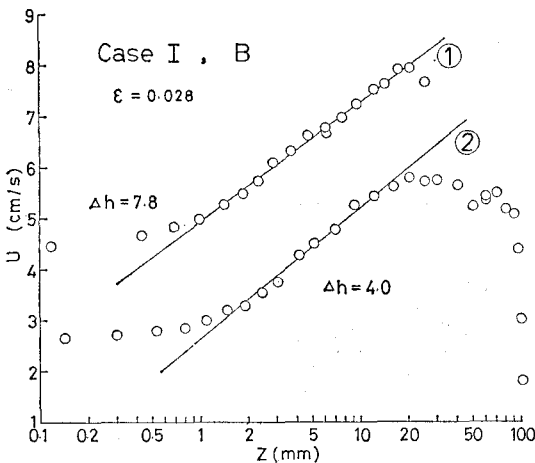


図-11 流速分布

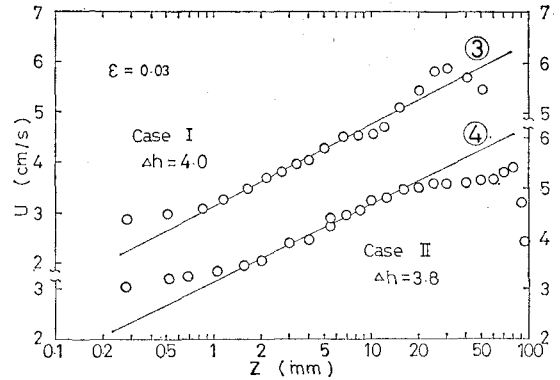


図-12 流速分布

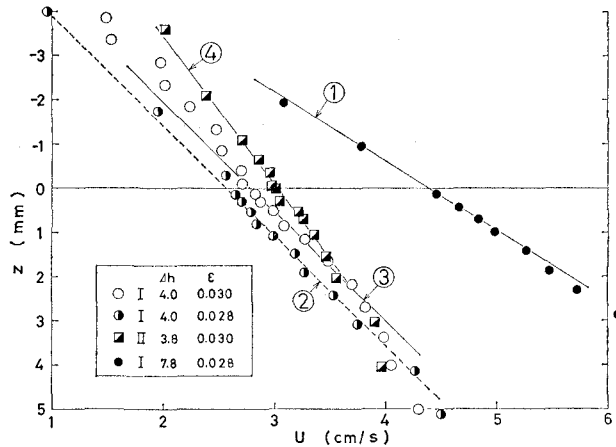


図-13 界面付近の流速分布

二の2つの対数領域の存在を示唆したが、今回の下層流第の流速分布に関しては上記の界面に近い方の第一対数領域は存在しない。日野他⁶⁾は第二対数領域は単純対数則

$$U(z) = \frac{(1+\beta)u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad \cdots \cdots (6)$$

の形に表わされ、それまでの遷移領域全体に Monin-Obukhov 理論から導かれる log+linear 則

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} + \frac{\beta}{L} (z - z_0) \right] \quad \cdots \cdots (7)$$

が成立するような u_* が存在するとしている。

一方 Csanady³⁾は Lofquist²⁾の実験結果を再整理して、界面近くの流れにおいては有効動粘性係数 ν_e が分子動粘性係数より大きくなり、 u_*z/ν_e が十分大きいとき流速分布は普通の対数法則

$$u/u_* = (1/\kappa) \ln(u_*z/\nu_e) + B \quad \cdots \cdots (8)$$

(B : 定数)に従うとしている。そこで図-11, 12に示した Run ①~④の直線にこの対数法則をあてはめて求めた u_* の値を u_{*1} として表-2に示す。

ところで Lofquist²⁾に従うと界面に働くせん断力は次の関係から求められる。

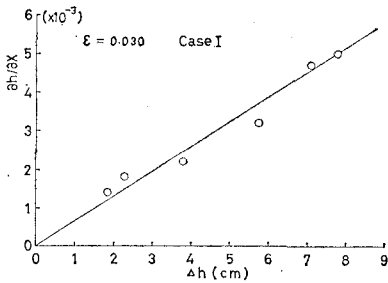
$$\tau = \int_{h_0}^{z'} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_w}{b} + \rho \bar{u} \right) dz' \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\partial p / \partial x = g(\partial h / \partial x)(\rho - \rho_1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_w = 5.11(10^{-3} b \bar{u} / \nu)^{-1/4} \rho \bar{u}^2 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\bar{u} = -\frac{\bar{u}^2}{h} \frac{\partial h}{\partial x} - W_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial z'} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに z' は底面から上向きにとった座標, $z'=h_0$ は $\tau=0$ の高さ, $\partial h / \partial x$ は界面勾配, τ_w は側壁に働くせん断力, b は水路幅の 1/2 である。



図—14 界面勾配の測定結果

表—2 u_* の比較

Run	δh	$10^2 \varepsilon$	u_{*1}	$10^3 f_i$	u_{*v}	u_{*2}
①	7.8	2.8	0.409	5.29	0.257	0.587
②	4.0	2.8	0.450	12.1	0.203	0.470
③	4.0	3.0	0.262	3.97	0.204	0.480
④	3.8	3.0	0.267	5.48	0.167	—

今回の実験のケース I, $\varepsilon=0.030$ の場合の界面勾配の測定結果を図—14 に示す。式 (9)~(12) に測定した $\partial h / \partial x$, W_e , $\rho(z)$ などの値を代入して計算した τ からえられる u_* の値を u_{*2} と表わして表—2 に示す。この表の u_{*1} と u_{*2} を比較するとたまたま Run ② では両者がよく一致しているが、これは Run ② の u_{*1} が異常に大きかったことによるようで、一般に $u_{*1} < u_{*2}$ でその差は 40~60% にも及ぶ。

界面近傍でのレイノルズ応力を無視し、図—13 の速度勾配から求めた界面での粘性応力に対応する u_* を u_{*v} として表—2 に示しているが、いずれの Run についても u_{*v} は対数法則から求めた u_{*1} よりかなり小さい。表—2 には u_{*1} から求めた内部抵抗係数 $f_i (=2u_{*1}^2 /$

$U_2^2)$ の値も参考を示してあるが、従来の測定値⁴⁾に比べると Run ② の f_i の値だけはやや大きく、この場合の u_{*1} が過大であるとの判断を支持している。

表—2 に示した結果だけからでは結論しにくい、日野他⁵⁾の結果を参考にして、今回の図—11~13 の流速分布をくわしく検討すると、Run ② のような例外はあるが、流速分布に対数法則を適用して求めた u_{*1} はかなり妥当な値を与えるといえるであろう。また上述の $u_{*v} < u_{*1}$ という結果は、界面付近では有効粘性係数が大きくなるという Csanady³⁾の主張を支持しているといえる。また Lofquist の式で求めた u_{*2} が過大になった原因の 1 つに、今回の水路幅が 5 cm と小さかったことが考えられるが、この点については今後水路幅を広くして調べる予定である。

謝辞: 今回の実験と論文の作成に当っては、海洋水理部水理研究室の方々にいろいろな面で協力して頂いたが、特に中野晋研究官には本論文作成上重要な作業を担当して頂いた。ここに記し、深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Simmons, H. B.: Field experience in estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics, A. T. Ippen ed., McGraw-Hill, New York, pp. 637~690, 1966.
- 2) Lofquist, K.: Flow and stress near an interface between stratified liquids, Phys. of Fluids, Vol. 3, pp. 158~175, 1960.
- 3) Csanady, G. T.: Turbulent interface layers, J.G. Res., Vol. 83, No. C5, pp. 2329~2342, 1978.
- 4) 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.
- 5) 日野幹雄・萩原 克: 塩水楔の流速分布における Monin-Obukhov 理論の適用性について, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 549~553, 1979.
- 6) 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.
- 7) 日野幹雄: 成層流の乱流, 乱流 (谷 一郎編), 丸善, pp. 177~219, 1980.
- 8) Kit, E., E. Berent & M. Vajda: Vertical mixing induced by wind and a rotating screen in a stratified fluid in a channel, J. Hydraul. Res., Vol. 18, pp. 35~58, 1980.