

芝浦工業大学 菅 和利
東京大学工学部 玉井 信行

1. はじめに

河口密度流現象の解析においては、連続的な密度勾配の存在する実際現象と不連続な密度勾配を有する2層あるいは3層に分けて取り扱う¹⁾。従って界面は必ずしも物質面ではなく、平均流および乱れにより界面を横切る流質が存在するものと考えられる。界面に立ってこの事象を観察すると2層間の粒子移動の集合平均が存在し、この両者の総和として全体の移流量が決定されると考えるのが妥当である。

本報告では下層塩分の時間的、空間的变化の存在する緩混合状態の塩水くさびを対象として、相互の連行速度について検討したものである。

2. 界面の定義の仕方

緩混合状態であっても塩分が水面近くまで拡散していることは稀で、上層厚さの2割程度の中間層が発達していることが多い。従って2層としてよりもむしろ3層と考える方が実際現象に近い。従来は界面として、可視化界面、密度分布形の偏曲点、水面と底面の密度の $\frac{1}{2}$ となる点等 κ が取られて来た。本研究では、測定が容易で精度の良い密度分布より統一的に以下のように定義する²⁾。

第1界面 $\rho = \rho_0 + (\rho_0 - \rho_b) \times 0.1$, 第2界面 $\rho = \rho_0 + (\rho_0 - \rho_b) \times 0.9$ の密度の位置

ここに ρ_0, ρ_b は水面、底面での密度である。2層流として取り扱う場合には第2界面を界面とし、3層流として取り扱う場合には第1、第2界面の間を中間層として考える。

3. 連行速度 W_e の記述の仕方

不均質な場において体積保存則が近似的に成立することが知られているので、体積保存則、質量保存則を用いて連行速度を記述する。連行速度は運動する界面から流質が分離して他の層へ混入する速度を表わし、このような流体粒子に着目すると、たとえば第2界面での鉛直速度は $W_e = \partial z_2 / \partial t + U_2 \partial z_2 / \partial x + (W_{e32} - W_{e23})$ と書くことができる。 x 軸は水平に、鉛直上向きに z 軸を取り、 z_2 は第2界面の z 座標、 U_2 はその高さでの水平流速である。 W_{e32} は第3層から第2層への移流速度、 W_{e23} は第2層から第3層への移流速度を表わす。又流質はそれぞれ出発する層の代表的な物理量(密度、流速)を保持して他の層へ移流して行くと考え、体積保存則、質量保存則を各層内で積分し、層平均量で記述すれば次式が得られる。添字は上層より第1、第2、第3層とした時の各層内の平均量を示し、 D_1, D_2, D_3 は密度分布、流速分布に基づく分散項である³⁾。

$$\partial h_1 / \partial t + \partial (U_1 h_1) / \partial x = W_{e21} - W_{e12}, \quad \partial \rho_1 / \partial t + U_1 \partial \rho_1 / \partial x = (\rho_2 - \rho_1) W_{e21} / h_1 - D_1 \quad (1)$$

$$\partial h_2 / \partial t + \partial (U_2 h_2) / \partial x = -W_{e21} + W_{e12} + W_{e32} - W_{e23}, \quad \partial \rho_2 / \partial t + U_2 \partial \rho_2 / \partial x = (\rho_1 - \rho_2) W_{e12} / h_2 + (\rho_3 - \rho_2) W_{e32} / h_2 - D_2 \quad (2)$$

$$\partial h_3 / \partial t + \partial (U_3 h_3) / \partial x = -W_{e32} + W_{e23}, \quad \partial \rho_3 / \partial t + U_3 \partial \rho_3 / \partial x = (\rho_2 - \rho_3) W_{e23} / h_3 - D_3 \quad (3)$$

流速分布、密度分布を測定すれば、式(1)~(3)より連行速度を知ることができる。2層モデルとして取り扱う場合には式(1)、(3)を用いれば良い。質量保存の式と体積保存の式とを比較すれば解るように、この記述方法によると、体積型と質量型の連行速度を統一的に記述することができる。

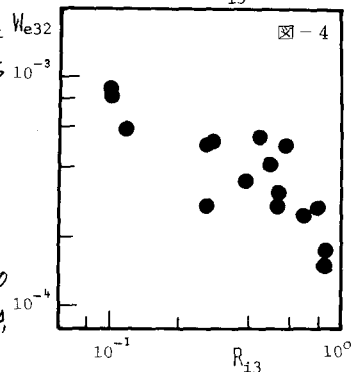
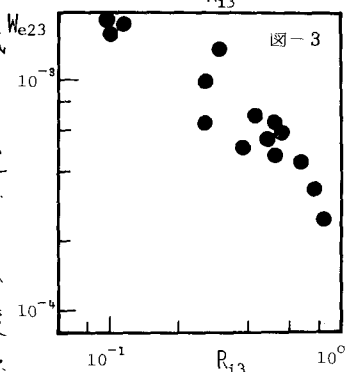
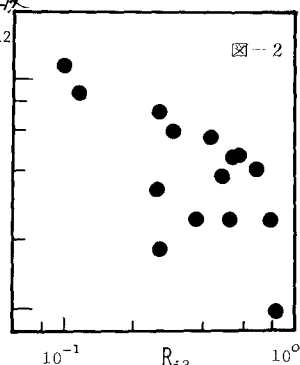
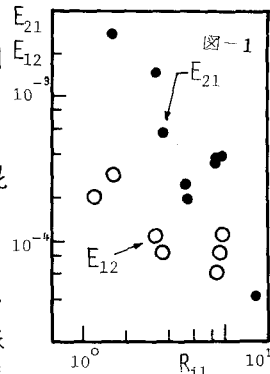
4. 定常な塩水くさび界面での連行速度

塩水くさびについての室内実験では、密度分布の測定に比して、流速分布の測定の精度が劣り、又界面はかな

り Sharp であるので2層モデルを用いて、第1層、第2層の密度変化より We_{12} , We_{21} を計算した。計算結果によると、くさび先端部付近では We_{12} は We_{21} の15~20%の大きさであったが、その他の領域では1~4%の大きさであった。経験的な進行係数を用いて We_{12} , We_{21} と $We_{21} = E_{21}|U_1|$, $We_{12} = E_{12}|U_2|$ と記述し、この進行係数 E_{21} , E_{12} を第1層の層平均 Richardson 数に対してプロットしたのが図-1である。図中黒丸は E_{21} を示し、白丸は E_{12} を表わす。進行速度 $We = E_{21}|U_1| - E_{12}|U_2|$ と従来の記述 $We = E|U_1 - U_2|$ と比較すると、近似的には $E_{21} = E_{12}$ に相当している。しかし、図-1より E_{12} と E_{21} は等しくなく、 E_{12} は相対的に小さいことが分かる。室内実験では弱混合の状態となり、逆進行は微少であるが、実際の河口部では緩混合の状態が多く、このような場合には正逆の進行を独自に評価すべきと考えられる。

5. 円筒水槽での下層密度流の進行速度

塩水くさびについての室内実験では界面が sharp となり、実際の現象と異なっている。そこで中間層の厚さの調節が容易な2重円筒回転水槽で緩混合状態での進行現象の実験を行った。塩水成層の存在する2重円筒水槽内で粗度を付した底板を一定速度で回転させ、せん断流を発生させ、密度分布の時間的な変化と測定した。実験の初期条件は、塩水の密度が1.001~1.012、塩水層厚さが3cm~10cm、底板の回転速度が2.5cm~6.8cmの範囲である。回転水槽であるので水平面内では一様で場所的变化は無く、時間変化のみを測定した。3層モデルとして取り扱うと式(1)~(3)を用いて、測定時間間隔内での平均の相互の進行速度とそれぞれ計算することができ、これらの結果を第3層の層平均 Richardson 数 R_{i3} に対してプロットしたのが図-2, 3, 4である。この場合には流速分布についての測定が無いので代表流速として回転板の回転速度を用いて R_{i3} を計算した。紙面の都合上掲載できなかったが We_{21} についても結果が得られており、 We_{32} , We_{21} は We_{23} , We_{12} のそれぞれ50~60%程度である。従って、流速の速い層への進行量の約半分程度の大きさの量が逆方向にも進行されていることが知られる。これらの結果は、塩水くさび先端部において日野ら²⁾によって示された結果とも定性的には一致している。中間層の発達した場合での前述した界面の定義によって分割した界面では、相互の進行速度が同じオーダーである。物質の移動を考える場合には、物質濃度で重みを付けた進行量を考えるべきであるので、層間の相互の進行速度を独自に評価すべきであることが分かる。今回の測定では流速分布についての測定がなされていないので、進行速度をこれらと結びつけることはできなかった。代表的な流速に結びつけて進行係数として評価する場合には、それぞれの進行速度は進行して行く層の水理量に支配されると考えるべきであり、今後種々の流きの組合せに対して、速度分布についても測定し、検討を加える所存である。



参考文献

- 1) 玉井 信行、菅 和利 : 第26 回水理講演会論文集, 1982
- 2) 玉井 信行 : 密度流の水理, 新体系土木工学第22巻, 技報堂, 1980
- 3) Hino, M. et al.: Second Int. Symp. on Stratified Flows, Vol. 2, 1980