

交換密度流の混合特性に関する実験

京都大学防災研究所 正員 村本嘉雄

京都大学防災研究所 正員 大久保賢治

銭高組

正員 ○北村 等

1 はじめに 交換密度流は密度流研究の一契機となった現象であるが、二流体の混合問題まで検討した例は少なり。本研究では、新しく試みた可視化法の利点を生かし、混合層の特性に重点をおいて検討を加えた。

2 可視化法 本研究で用いたのは、従来の着色法や光学的方法ではなく、アルカリとpH指示薬を用いたもので

写真-1 ($H=14\text{cm}$, $\epsilon=0.010$)

ある。すなわち、淡水中にフェノールフタレイン、塩水中に水酸化ナトリウムを加えると、二流体の混合部分のみが赤く発色し、これにより、混合層厚や界面波の様子などが観察できる。例を写真-1に示す。また、連行現象観察のために淡水区間を二分し、塩水から遠い部分にフェノールフルー、近い部分にフェノールフタレインを加え、二色二段階で発色する可視化法も併用した。なお、実験に用いた水槽は幅10cm、長さ4mであって、水深4~18cm、密度差 $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-2}$ で実験を行った。

3 フロント部での流れ 上記の可視化法で得られる層厚データに、Simpson & Britter¹⁾のモデルを適用し、フロント部の流速を算定した。彼らの基礎式のすべての項を考慮した繰返し計算²⁾により、下層流速は上層流速の2.5倍程度となった(図-1)。これは非混合モデルによる結果とは異なる。後続流部の上下層平均流速比がどのように変化するかは興味深い。Abraham & Eysinkの流速測定³⁾の結果では、その比は1に近づく。

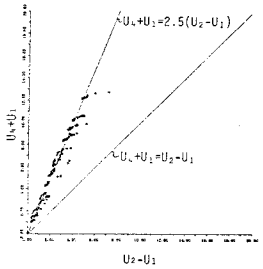


図-1

4 内部抵抗係数の評価 内部抵抗係数 f_i は層流域ではReynolds数のみで決まり、乱流域ではそれにFroude数の効果が加わるといわれている⁴⁾。

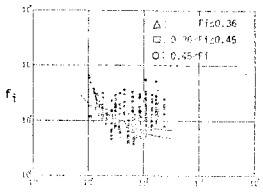


図-2

Abrahamらは $Fi = U/\sqrt{gH} = 0.405$ のデータについて交換密度流の f_i を算定している³⁾。本研究ではこの方法を他の Fi についても拡張した。すなわち、層流域のデータから $K_c \sim K_u$ 曲線²⁾を求め、これを乱流域のデータに用いた。

結果を図-2に示す。比較のために芦田・江頭の式⁴⁾を用いると同じデータについての f_i が斜線部の範囲に集まる。 $Fi > 0.45$ では前者の f_i が大きい、 $Fi \approx 0.45$ では定常流に関する後者の式とよく一致している。実際に

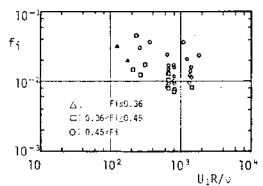


図-3

下界面勾配を讀取り、 f_i を求めると図-3のようになり、交換密度流全般に関しては、前者の算定法でよく説明できるようである。

5 連行機構に関する考察 平均混合層厚 δ を後続流部の70~100cm区間で読取った。 δ の急激な変化は $Fi > 0.45$ で起こり、その後はあまり変化しないことが予想された。 δ が形成されるまでの時間 T を $Fi = 0.45$ となるまでの時間とする。初期の連行率 E は $(\delta/T)/u_1$ で表される。またRichardson数として $g\delta^3/\omega u_1^2$ を用いると Ri_0 と E は図-4のようになる。Reynolds数が大きいとき現れる大

Yoshio MURAMOTO, Kenji OOKUBO, Hitoshi KITAMURA

な界面波を混合層内に含めたために▲は△よりやや大きい。次にナモルブルを用いた可視化法のrunにつき混合層内への濃青色部分の降下速度から混入速度 W_{2u} が求められ、進行率 E が W_{2u}/u で得られる。これを図-4に併せて示す。このような進行率の算定法はかなり便宜的であるが図-5に示すように同時刻の f_i (界面勾配から求めたもの)とほぼ対応する。このように初期の大きな f_i は、進行機構を考えることによって説明できる。すなわち、初期に f_i が大きい範囲ではRichardson数は小さく不安定である。図-6は W_{2u} と f_i の関係である。Reynolds数の大きいとき平均的には $f_i \approx 0.2$ 程度となっている。 δ の形成が $Fr=0.45$ の時刻に完了するとすれば、このときの W_{2u} は0.25となる。ここまでの過程で初期不安定のために激しい混合が起こり、混合による付加摩擦項が卓越する。Reynolds数の小さい場合では、その後粘性項が卓越し、速度減少につながる。Yih⁶⁾の結果によると初期フロント速度 C_0 は $0.45\sqrt{H}$ で表されるが、これも安定限界で説明できる。 $Fr=0.45$ の状態はフロント形状が確定し、 δ が決定される特有の値であり、その後 $Fr<0.45$ で激しい混合は起こることなくなり f_i が定常流の式で見積られるようになる。

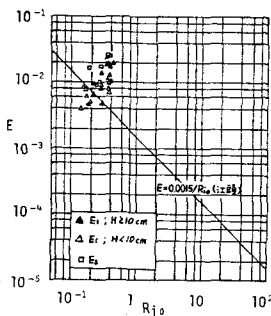


図-4

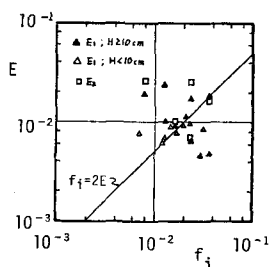


図-5

6 界面波の特性 交換密度流における界面波は三種類に区別できる。第一は極く初期に起こる連珠型の波動、第二はフロント形成後にその後部から連続的に発生する波列、第三はstokes波に似た三角波である。このような分類は室田・平田⁷⁾によって報告されている界面波のrégime分類に対応している。三種の発生条件を図-7に示す。第二の波は初期混合が完了し、フロント以外で安定となったことに相当し、この波が卓越しはじめるのはやはり $Fr=0.45$ からである。図中の記号はいずれも発生するFroude数の最大値を示し、○は第二の波、第三の波は $W_{2u}/C_0 < 0.45$ で現れ⁸⁾、△は碇波、▲は非碇波、▲は上下界面に碇波がみられるものである。この図から、界面波の発生条件はReynolds数とFroude数に関係しているようである。

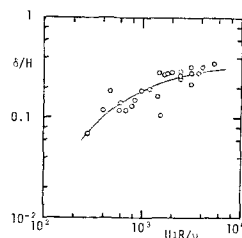


図-6

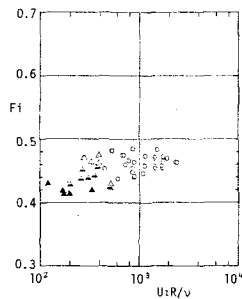


図-7

7 おわりに ここではよく知られた交換密度流を取上げ、フロントの進行特性、内部抵抗係数、進行率および界面波の特性が、混合層の形成過程を通じて互いに深く関連していることが明らかになった。今後、密度流研究において混合層の存在を考慮に入れた諸特性の定量的考察を行う必要があるだろう。

- 〈参考文献〉 1) Simpson & Britter; J.F.M., Vol. 94, 1979. 2) 北村等; 京都大学卒業論文, 1981.
3) Abraham & Eysink; J.H.R., Vol. 9, 1971. 4) 江頭・芦田; 京都大学防災研究所年報, 1979.
5) Turner; Cambridge Univ. Press, 1973. 6) Yih; Macmillan, 1965.
7) 室田・平田; 土木学会本誌, 1978. 8) Keulegan; N.B.S. rpt., Vol. 43, 1949