

大阪大学工学部 正 員 平田 健正

大阪大学工学部 正 員 室田 明

1. はじめに; 混合し得る流体がある相対速度と密度差をもって運動する時, その水質混合はレイノルズ数, あるいはリチャードソン数等が基本的な要素となり, 複雑な現象を呈する。中でも本研究が対象とする弱混合型の成層密度流は微弱な密度差であっても明瞭な界面を形成することに特徴づけられ, その界面に内部波が発生・発達する。勿論, 内部波のスケールにより混合機構は異なると考えられるが, 著者らは界面不安定理論にもとづく内部波の発生機構とは別途の方法で, 計測機器の開発も兼ね実験的に研究を進めてきた。¹⁾特に, シュリーレン装置を用いた可視化実験により混合の初期には通常の下層から上層への混合のみならず internal capillary wave (i.c.波) の trough の砕波により淡水が塩水中に輸送され界面下に混合層が発達すること, さらに密度界面での混合の本質は小規模な internal ripple (i.r.波) の砕波であること等が判明している。この i.r.波の発達が混合量に大きく反映するものと考えられる。本研究はこれら可視化実験結果から成層界面での混合機構について述べ, つぎに1個の i.r.波が発生した際, 1個の i.r.波が混合量に寄与する割合, つまり混合の発生原単位に着目し, 成層密度流での混合量の算定を試みる。

2. 混合機構; i.c.波のシュリーレン像を写真-1(a),(b),(c)に示している。中央の黒い band は界面であり, 白く輝いている部分は混合状態を表わす。この i.c.波は上・下層静止の状態から上層を流動させるとき, 界面に最初に発生する界面張力を復元力とする内部波であり, 発達するに伴ない(写真-1(a)→(b)) trough は深く下層側に侵入する。最終的には写真-1(c)に見られるように上層の淡水が塩水中に封入され, trough で砕波現象を呈する。i.c.波の砕波つまり淡水を塩水中へ輸送する効果により界面下に混合層が発達して行く過程が理解できる。混合層が発達する限り, 界面下にも一種の波動が観察されたが, 本実験の範囲では安定であった。また i.c.波自身砕波を伴うため, その寿命は短かくより大スケールの重力波に発達することなかった。つぎに i.c.波がトリガーとなり2種の i.r.波が発生する。一つは crest で砕波を伴う cusping ripple であり, 今一つは i.c.波の発達する界面を内部重力波が通過する時, i.c.波が著しい変形をうけて発生する bursting ripple である。成層界面での混合が促進されるに従い cusping ripple から bursting ripple の領域へと遷移する。発生機構は異なるが, いずれの i.r.波も砕波して上層へ混合・拡散する過程から察してこれら2種の i.r.波が成層界面での混合の本質と結論できる。スペクトル解析によると i.c.波は first peak ($0.2 \sim 0.3 \text{ Hz}$) に, i.r.波は second peak ($1 \sim 2 \text{ Hz}$) に対応する。さらに second peak より高周波側には-5条の平衡領域が存在するが, 明確な慣性領域は見られず second peak がその領域に相当するものと考えられる。従って, 動力学的には i.c.波の砕波により, まず密度場のポテンシャルエネルギーに変換され, 周波数帯は狭いが慣性中間領域に相当する i.r.波の砕波により高周波変動成分が生成され混合・拡散していくと結論できる。

3. 混合量の算定; 可視化実験によると乱流拡散による大規模な混合形態は観測されていないことから, i.r.波の発達が界面混合量に大きく反映すると予想される。そこで, 16mm シネフィルムに記録したシュリーレン像から映写画面上の基線を通る i.r.波の個数を丹念に計測した。混合層が発達している界面近傍は乱流部

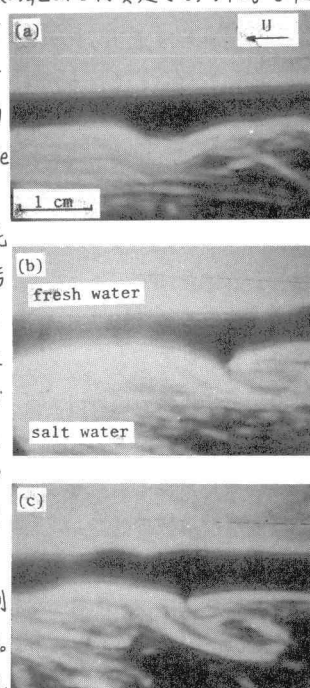


写真-1 シュリーレン像

分と非乱流部分が交互に出現し、乱流でも非乱流でもない中間のモードを形成していると考えられるが、混合はi.r.波の砕波によるものであり界面そのものはかなり明瞭であるため上層のレイノルズ数 $Re = U_1 h_1 / \nu$ で流れの場を代表させる。 (U_1, h_1) はそれぞれ上層の平均流速と水深である。)まず、i.r.波の発達状況について述べると、 Re 数が3000程度ではi.c.波そのものも水路全域ではなく、局所的に連なって存在し、前述のcusping rippleが間歇的に通過する。 Re 数の増加に従い(3000~5000)通過個数に卓越した周期成分が現われ、徐々にbursting rippleの領域へと移行する。この時通過個数の自己相関関数にも3~4秒の周期成分を確認している。つぎに、単位時間に通過するi.r.波の個数 n/T (T は計測時間、 n は T 時間に通過するi.r.波の個数)を Re 数に対して示せば図-1となり、図中のシンボルは密度差を表わしている。 $(E = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1, \rho_1, \rho_2)$ はそれぞれ上・下層の密度)予想された通り密度差による差は顕著ではなく、 n/T は Re 数に対して敏感に応答し、 Re 数が3000~5000で1オーダー大きくなる。このi.r.波の発達過程は混合量 g_e と上層の平均流速 U_1 との関係にも明瞭に現われている。そこで、i.r.波の発生頻度を単位時間当りのi.r.波の通過個数 n/T で評価し、波形を三角形近似とする。さらに、波長 λ および波高 H を平均値で代表すると混合量 g_{ei} は $g_{ei} = \frac{1}{2} \rho H_{50} L_{50} (n/T) \propto g_e$ (1) と表現できる。ここに、 g_e は実測の混合量である。i.r.波の波速 C_r は U_1 と正の相関を持つことから $L_{50} = C_r T_{50} \propto U_1 T_{50}$ とおくと、 $g_{ei} / \rho U_1$ で定義される連行係数 E_i は $E_i = \frac{1}{2} \beta \cdot H_{50} \cdot T_{50} (n/T) \propto E$ (2) となる。ここに、 T_{50} はi.r.波の平均周期、 $E = g_e / \rho U_1$ で、 β はi.r.波が1個発生した時、i.r.波の全volumeのうち混合量に寄与する割合つまり発生原単位である。 β を推定するため砕波を伴うcusping rippleについてのみ、total volumeと混合しているmixing volumeの関係を図-2に示す。total volumeの増加に伴ないmixing volumeも増加の傾向を示し、図中の実線より平均的な β を求めると本実験の場合0.15となる。この値を用いて(2)式より E_i を試算し実測の E と図-3に比較している。 E_i は E より1オーダー大きい値を示すが、これは本来3次元的なi.r.波に対し、2次元的に求めた β を用いたためと考えられ、i.r.波自体そのスケールに分布をもち、外的刺激に敏感な密度界面に発達することを考慮すれば内部波の砕波形態にもとずいた混合量算定の可能性を示唆するものと言える。

界面抵抗係数 f_i について従来提案されている公式より求めると $\psi^{-1} (\psi = f_i^2 Re)$ に比例し、i.r.波のrégimeによる差は認められなかった。また、界面での混合が著しくなると下層塩水の混入に伴ない運動量の損失が増加し、混合による付加摩擦抵抗係数 f_{ia} が支配的と考えられる。本実験で得られた f_i と f_{ia} ($=2E$)の関係を示せば図-4となり、 f_{ia} は f_i の減少に伴ない増加する。すなわち、付加摩擦抵抗係数の全抵抗に占める割合が増加し、bursting rippleの領域では、 f_{ia} で界面抵抗が評価できる。

参考文献 1)室田・平田；第32回年講

2)室田・平田；第22回水理講演会論文集

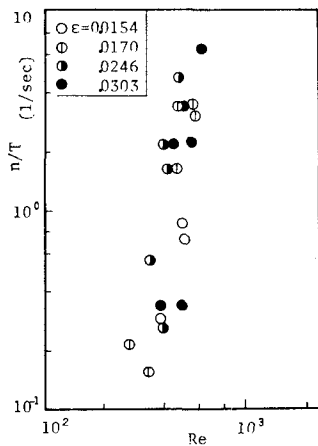


図-1 n/T と Re 数

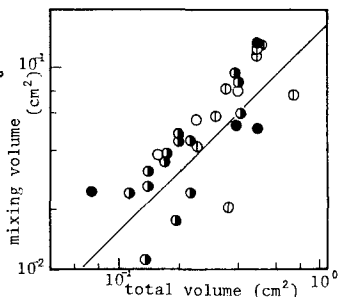


図-2 mixing volumeとtotal volume

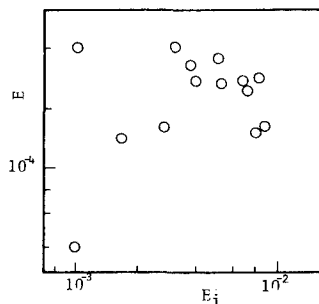


図-3 E と E_i

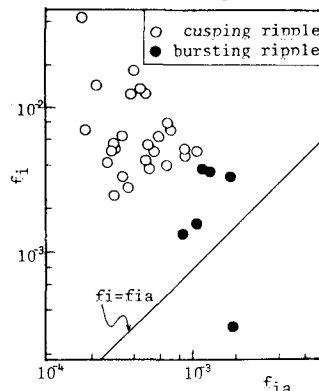


図-4 f_i と f_{ia}