

II-222 表層密度噴流の連行特性の代数的応力モデルによる解析

大阪大学工学部 学生員 中辻陽一  
 大阪大学工学部 正員 中辻啓二  
 大阪大学工学部 正員 室田 明

1. まえがき

表層密度噴流は密度差の異なる流体を水表面放出したときに観られる現象である。この流動は浮力とせん断力の影響を受けると同時に、自由水表面と密度境界面の二つの境界面に挟まれている。密度境界面における混合の強さはこれまで連行速度という概念によって表現されてきた。噴流などの自由乱流において連行速度は流量の変化率で定義される。表層密度噴流においては、混合は安定成層効果により強く影響を受けることが知られている。本研究では、代数的応力モデル（ASM）を用いて計算した表層密度噴流の連行速度とリチャードソン数との関係について考察する。

2. 代数的応力モデル

代数的応力モデル（ASM）の表層密度噴流への適用については第33回水講（1989）において詳述した。ASMは $k-\epsilon$ 方程式モデルにおいて考慮し得ない非等方性の強い成層せん断流場にも適用できるという特徴がある。計算方法および計算内容は室田・中辻（1986）と同様である。放流口条件は実験結果に基づいて水深 $H_0 = 2.5\text{cm}$ 、平均流速 $U_0 = 10\text{cm/s}$ 、一様平均浮力 $B_0$ とし、 $B_0$ を4.44、1.11、0.49 $\text{cm}^2/\text{s}$ と変えることによって密度フルード数 $F_d$ の値を3.0、6.0、9.0と変化させた。k および $\epsilon$ は $k_0 = 0.0025U_0^2\text{cm}^2/\text{s}^2$ 、 $\epsilon_0 = k_0^{3/2}/H_0\text{cm}^2/\text{s}^3$ の一様分布を与えた。

3. 計算結果とその考察

図-1は $F_d = 9.0$ の場合の連行流況を示す。実線群は下流端において放した粒子が描く流跡線を示す。 $x/H_0 = 120$ 付近で流跡線はハンプ状を呈しているが、これは内部跳水の発生によるものと推定できる。周囲環境水の表層噴流への連行加入は主として内部跳水以前の領域（ $0 \leq x/H_0 < 90$ ）で生じているのが確認できる。

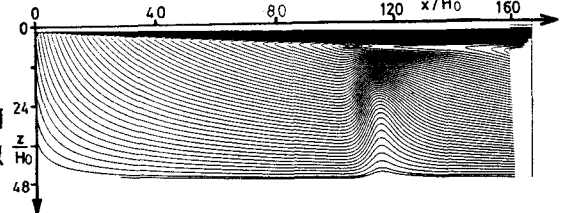


図-2は放流口からの流下距離 $x/H_0 = 10, 40$ における鉛直方向流速 $W$ の鉛直方向分布を示す。放出口密度フルード数 $F_d$ が大きい、つまりせん断効果が大きいほど、 $W$ の絶対値は大きく、鉛直上向きの移流が活発である。流下するにしたがって $W$ の値は小さくなる。また、 $W$ の値は矢印で示した無流面（ $U = 0.0$ ）より上方で0.0となり、無流面より僅かに下方で最大となる。この最大値 $W_{max}$ は、後述する連行速度 $Ve$ と線形の関係にあり、 $W_{max} = 1.27Ve$ である。

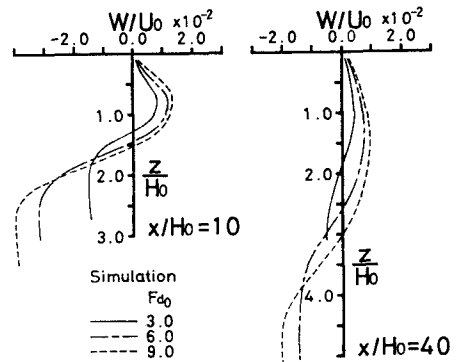


図-3は層平均リチャードソン数 $Riu (= B \cdot Hu / U^2)$ と連行率 $Ve/U$ との関係を示した。連行速度 $Ve$ は断面積分した表層流量の流下方向変化率 $dQ/dx$ で算定した。また、上付きバーは表層平均量を示す。リチャードソン数の増加は浮力効果の増大を示し、成層安定化が強まることを意味する。その結果、鉛直方向への運動量の乱流輸送が抑えられ、連行率

図-2 Wの鉛直方向分布

が低減することが知られている。計算結果はこの低減傾向を良好に再現し、室田・中辻(1984)やEllison-Turner(1959)の実験結果と合致している。また、計算結果は図中に破線で示す著者等の理論曲線とも一致する。

図-4はせん断層リチャードソン数 $Rih$ ( $=Bs \cdot h/Us^2$ )と連行率 $Ve/Us$ との関係を示す。ここに、 $h$ は $Us/(\partial u/\partial z)_{max}$ で定義される最大勾配厚であり、添字"s"は水表面における水理量を示す。室田・中辻(1984)によると、実験値からも分かるように、 $Rih$ の増加に伴って、連行率の低減勾配は $Rih = 0.12$ 近傍で変わり、せん断が連行を支配する領域から浮力が支配する領域へと遷移すると考えられている。計算結果はこの遷移を実験値ほど明瞭に再現はしていないものの、実験値との合致度は良好である。

室田・中辻は表層密度噴流の積分モデルおよびフォーストプリーユムの微分積分混成モデルにおいて、連行速度 $Ve$ はレイノルズ応力 $\overline{uw}$ と線形関係にあることを導いた。そこで、連行率 $Ve/\bar{U}$ と断面最大レイノルズ応力 $\overline{uw}_{max}/\bar{U}^2$ との関係を調べたのが図-5である。 $Ve/\bar{U}$ と $\overline{uw}_{max}/\bar{U}^2$ の関係は明らかに線形関係である。同図で特筆すべき点は、 $Fd_0 = 6.0, 9.0$ の計算結果が勾配の異なる二つの領域に分けることができることである。この勾配の急激な変化は、図-4に示す連行形態の変化と強く関連していると考えられる。そこで、勾配が遷移する点でのせん断層リチャードソン数 $Rih$ の値を求めると、その値は上端で0.05、下端で0.08であった。 $Rih = 0.08$ は初期安定性理論の観点から求まる組織構造間の相互干渉や合併融合の理論的上限值(Hazel, 1972)である。実験的には0.12~0.15(Koop-Browand, 1979)の範囲である。乱流計算結果が理論および実験から得られた遷移リチャードソン数 $Rih = 0.08$ と一致するのは興味深い。一方、 $Fd_0 = 3.0$ の計算結果にはこのような遷移領域は現われない。Chu-Baddour(1984)は $Fd_0 \leq 3.0$ の表層密度噴流では混合層から噴流へと発達せず、成層せん断流へと遷移することを実験から報告している。彼等の指摘と本計算結果の傾向は定量的によく一致する。

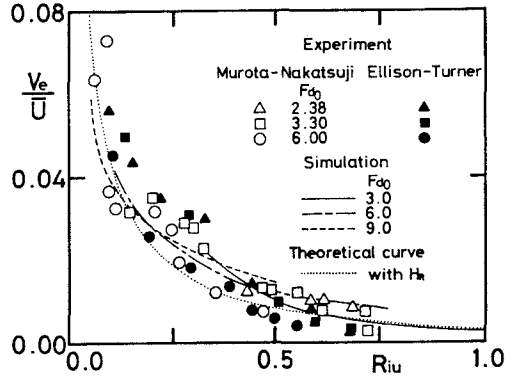


図-3  $Ri_u$ と $Ve/\bar{U}$ の関係

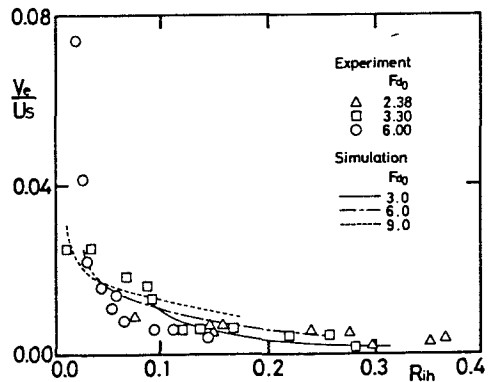


図-4  $Rih$ と $Ve/Us$ の関係

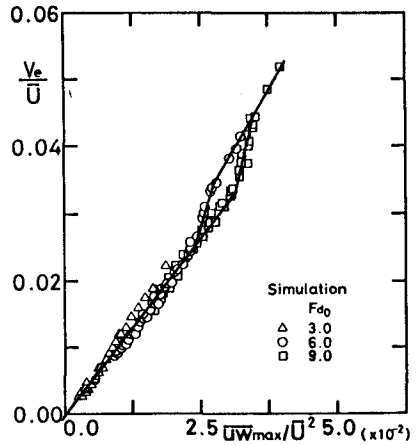


図-5  $\overline{uw}_{max}$ と $Ve$ の関係

参考文献 1)Chu-Baddour(1984):J.Fluid Mech.,Vol.138, pp.353-378. 2)Ellison-Turner(1959):J.Fluid Mech.,Vol.6, pp.423-448. 3)Hazel(1972):J.Fluid Mech.,Vol.51, pp.39-61 4)Koop-Browand(1979):J.Fluid Mech.,Vol.93, pp.135-159. 5)室田・中辻(1984):土木学会論文報告集、第351号/II-2、pp.101-110.6)室田・中辻(1986):土木学会第30回水理講演会論文集、pp.715-720. 7)室田・中辻(1989):第33回水理講演会論文集、pp538-588.