

大阪大学大学院 正員○尹 鍾星
大阪大学工学部 正員 中辻啓二
大阪大学工学部 正員 村岡浩爾

1. はじめに

吹送流の水平・鉛直方向への物質輸送や密度界面の挙動に及ぼす影響を把握することは、沿岸域の水環境の維持や管理の上で重要である。尹ら¹⁾は下流端が閉じた水路を用いて吹送密度流の水理実験を行い、密度界面が水面まで湧昇する限界範囲はWedderburn数（以下、We数と称する）が4以下であることを示した。We数はリチャードソン数と水路のアスペクト比の積で表現される。しかしながら、尹らの実験結果は流動や拡散過程が非定常であることから、定性的且つ概念的把握にとどまざるを得なかった。吹送密度流の流動、鉛直混合や湧昇現象を解明するためには定量的な検討が必要である。そこで、本研究では吹送密度流の水理実験の実験諸元¹⁾に合わせた数値実験を実施し、本モデルの適用性を検証するとともに、吹送密度流の流動や密度界面の運動特性、混合・湧昇現象に関して定量的な評価を行った。

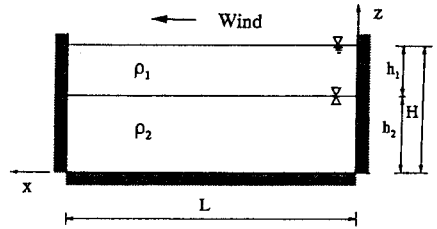


図-1 流動場の座標軸および模式図

2. 数値実験の内容

本研究で対象とする二成層密度場の座標系は、風上端部の底面に原点をとり、流下方向にx軸、鉛直上向きにz軸とする（図-1）。吹送密度流を支配する方程式は、連続方程式、二方向運動方程式ならびに密度の保存式である。ここで、非圧縮性ならびにブーシネ近似を仮定した。圧力の計算を行う際に、非静水圧モデルを導入しており、本研究では境界条件の取り扱いが比較的容易であり、計算の安定性も優れていると言われるSIMPLE法²⁾を用いることにした。また、吹送密度流の流動や混合現象が乱流輸送に支配される現象であることから、 κ - ϵ モデルを採用して乱流輸送項を完結させた。³⁾

計算領域は、x方向に540cm、z方向に30cmとし、離散化間隔は $\Delta x = 7.5\text{cm}$ 、 $\Delta z = 1.0\text{cm}$ の等間隔格子（ $72\Delta x \times 30\Delta z$ ）を用いた。つまり、計算上のアスペクト比 $L/H = 18$ となる。以上の物理量に基づいて基礎方程式および既往の水理実験条件¹⁾を用いて、時間

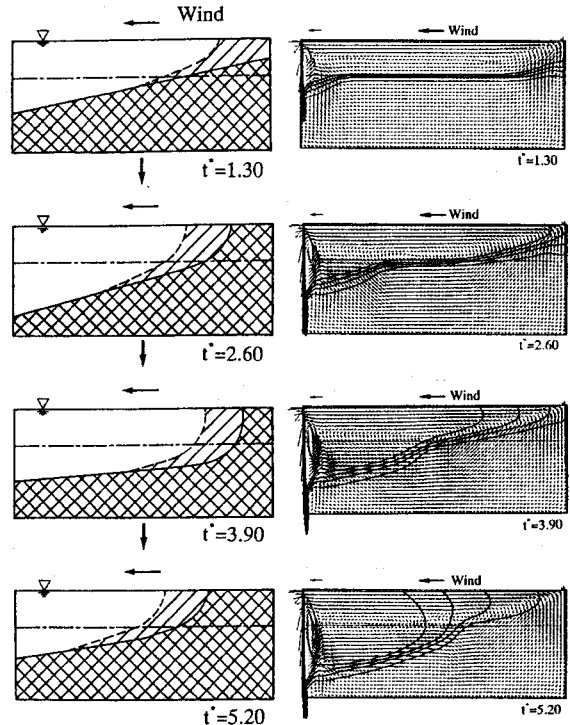


図-2 送風開始後の風応力による流動および混合特性（We=3.4の場合、左図は計算結果、右図は実験結果）

発展型の数値実験を行った。

3. 数値実験の結果とその考察

図-2はそれぞれ $We=3.4$ の実験ケースに対する数値実験による送風開始後の流動場(左図)と水理実験による密度界面の経時変化と混合現象の概要図(右図)を示している。各図の右下に示した数値は送風開始後の無次元経過時間 t^* を表す。左図中の細い直線および右図中の一点鎖線は初期密度界面を示しており、

それよりやや太い線は等密度線 $\Delta\rho$ を10%から20%間隔で示す。送風時間の経過とともに密度界面が大きく変形する様子が数値実験においても、水理実験においても明瞭にとらえることができる。とくに、 $t^*=3.90$ で密度界面が両者ともに水表面まで到達していることが分かる。図には示さないが、この実験ケースより成層度強い場合の計算結果においては密度界面の湧昇がみられなかったことから判断すれば、本モデルによる計算結果は風上側の密度界面の湧昇限界範囲が $We\leq 4$ であることを示している。この結果は水理実験結果とも合致している。水表面に達した密度界面はフロントを形成しながら下流側へと進行する。水理実験ではそのフロント部は前進・後退の運動を示しているが、数値計算結果ではフロント部は続けて混合しながら前進していることが分かる。水理実験では、時間経過とともに鉛直・水平混合によって固有周期を持ちながら内部セイシュが生じるが、数値実験の結果にはそのような運動は認められなかった。しかしながら、風応力による密度界面の応答特性を良好に再現していることから、送風時間に伴う流動場の様子がよく理解できる。

一方、図-3はそれぞれ $We=3.4$ の場合の水槽中央部における平均流速および乱れ強度の計算値と実験値を比較したものである。図中の縦軸の z は水深を、 h_1 は各測定時の上層水深を示す。また、横軸は平均流速 U_m および乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ を摩擦速度 u_* で無次元表示している。図中で $z/h_1=0.0$ は密度界面を、 $z/h_1=1.0$ は水表面を示す。実験結果との比較により、本モデルは逆流部の平均流速をやや過小評価しているものの、閉鎖性水域に対する平均流速をうまく再現していると判断できる。また、乱れ強度の分布を見ると、上層内での乱れ強度分布を概ね再現していることが分かる。しかしながら、水表面および密度界面の近傍の境界層での乱れ強度は計算値と実験値で差異が認められる。適用した $\kappa-\epsilon$ モデルでは局所等方性の過程に基づいていることから、水表面や密度界面の近傍における非等方性乱流を厳密に表現できなかったことに原因していると思われる。

4. まとめ

二成層場における吹送密度流の内部流動や湧昇機構の特性を定量的に評価することを目的として、吹送密度流に関する2次元非静水圧数値モデル($\kappa-\epsilon$ モデル)を用いて、既往の水理実験の水理諸元に合わせた数値実験を実施した。数値モデルは閉鎖性水域における成層吹送密度流の平均流速および密度界面の変動に関する水理実験結果についてほぼ良好に再現でき、水理実験ではできなかった定量的な考察が可能になった。

参考文献 1) 尹 鍾星他(1993): 水工学論文集、第37巻、pp.285-292. 2) Patankar, S.V.(1980): Numerical heat transfer and fluid flow. 3) 道奥康治ら(1993): 水工学論文集、第37巻、pp.293-298.

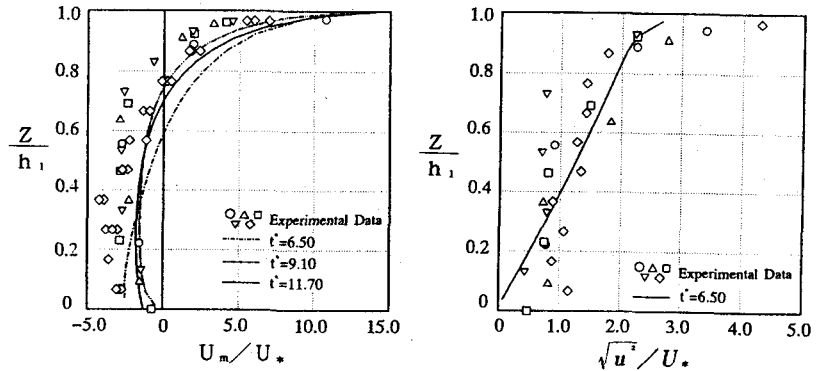


図-3 平均流速分布(左図)および水平方向乱れ強度(右図)の計算値と実験値との比較