

(II-43) 密度差によって駆動される流れの直接数値計算とその室内可視化実験

長岡技術科学大学 学生会員 中島 慶人

長岡技術科学大学 学生会員 塩野 知巳

長岡技術科学大学 正会員 細山田得三

長岡技術科学大学 正会員 福岡 祐介

1. はじめに

地球上において密度流は無数に存在しており、様々な場所において観測される。その現象を理解するには基礎方程式に基づく数値計算を実施する事が最も有力な方法であるが、その妥当性が室内実験によって確かめられている事例は少ない。従来、数値シミュレーションに比して室内実験は得られる情報が少なかったが、近年、画像処理技術に基づき数値計算に見合う高空間分解能のデータも計測できるようになってきている。本研究では、密度差によって駆動される流れについて数値シミュレーション及び室内実験を実施し、PIV法による画像処理を行い数値シミュレーションとの比較検討を行った。

2. 基礎方程式と数値計算法

本研究で用いた支配方程式は、2次元のブジネスク近似を用いたNS方程式、非圧縮性の連続式、及び密度偏差の移流拡散方程式であり、それぞれ式(1)～(4)に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1), \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\left(1 + \frac{\rho'}{\rho}\right)g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3), \quad \frac{\partial \rho'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + v \frac{\partial \rho'}{\partial y} = A \left(\frac{\partial^2 \rho'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho'}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

ここに、 x 、 y は直交座標で、 x は水平軸、 y は鉛直軸を示す。 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の流速成分、 p は圧力、 ρ は密度、 ρ' は密度増分、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数、 t は時間、 A は密度の拡散係数を表す。NS方程式は、差分法により離散化して時間積分した。また、移流項の離散化は、解の精度と計算の安定を考え、重みをつけて風上差分と中央差分の両方で計算した。圧力場は流速と共に連続式を満たす緩和計算を行うことによって求めた。計算は一様粘性モデルとLES乱流モデルの両方を行った。

3. 実験及び計算対象

実験と計算は、図1に示すアクリル水槽を対象として行った。数値シミュレーションに用いた差分メッシュと画像処理に用いたピクセルとを一致させることにより両者を詳細に比較する事ができる。実験の初めに、仕切り板の右側に塩水、左側に淡水を入れる。可視化するため淡水側にプラスチック粒子、塩水側にアルミニウム粉末を一樣に混入する。その後、仕切り板を引き抜いて密度流を発生させデジタルビデオカメラで撮影し、PIV法による画像処理によって流速ベクトルを算出する。

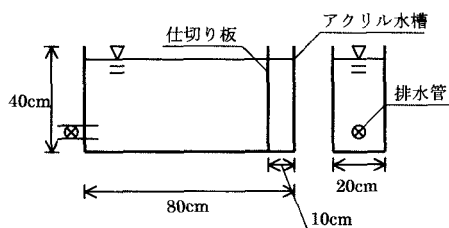


図1 アクリル水槽

キーワード：密度流、差分法、SOLA法、室内実験、PIV法

連絡先：長岡市上富岡町1603-1 長岡技術科学大学 建設環境系 TEL：0258-47-9621

4. 実験と計算結果

以下に実験結果と計算結果の密度分布図、流速ベクトル図を示す。

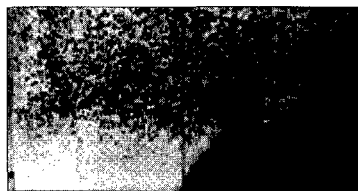


図 2-1 実験画像

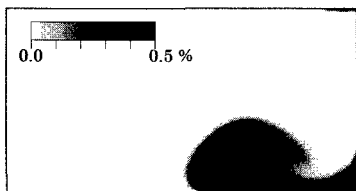


図 2-2 一様粘性モデル

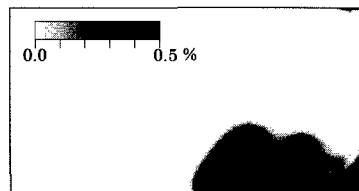


図 2-3 LES 乱流モデル

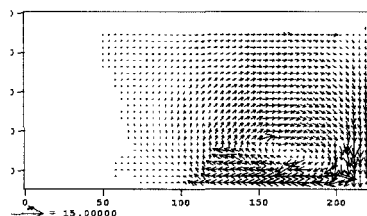


図 2-4 実験ベクトル

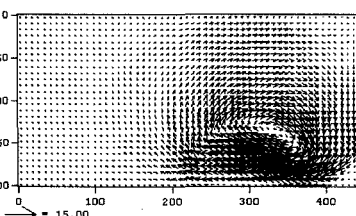


図 2-5 計算ベクトル(一様粘性モデル)

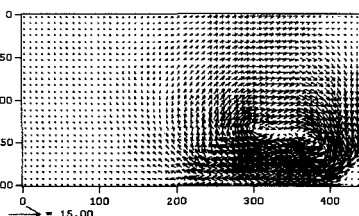


図 2-6 計算ベクトル(LES 乱流モデル)

上の図が密度流、下の図が流速ベクトル図である。それぞれ左から順に実験、一様粘性モデル、LES 乱流モデルの結果である。粘性係数が一様なモデルは、乱流を考慮して粘性係数 ν を0.2とした。乱流モデルは、LES モデルにより計算を行った。放出された密度流はカルマンヘッドを形成しながら進行していく。密度流フロント部で周囲水を連行しながら巻き上げが生じ、後方で周囲水を連行しながら巻き込みが生じている。密度流の形状に関しては、実験結果と計算結果を比較すると LES モデルの方がよりよく一致し、渦の形状が実験と近いと思われる。また計算結果に着目すると、一様粘性モデルと LES モデルでは、渦の発生の仕方や形状に違いが出ていると思われる。

5. 考察

図 3-1~3-2 は、計算と実験結果の流速ベクトルの大きさを詳細に比較したもので、密度流の先端位置を実験と計算で一致させて比較している。実験と数値計算の先端移動速度を比較すると計算の方が多少速くなっている。密度流の形状や渦の発生の違いなどの影響でデータのばらつきが現れているものの概ね妥当である。また、LES 乱流モデルの方が粘性係数を一定としたモデルよりも良好である。

6. 結論

本研究では、密度流先端のカルマンヘッド付近の流れについて計算と実験を行った。両者は形状については概ね一致していると言えるが、流速についてはかなりのばらつきも認められた。その原因は、現象を表現する最適な計算パラメータの同定の他に画像処理の信頼性が挙げられる。今後は、計算のさらなる高度化とともに画像処理システムの改良を行っていきたいと考えている。

「参考文献」

- 1) 赤堀良介・清水康行・中山卓：鉛直方向に密度境界面を持つ流体の混合に関する数値計算、水工学論文集、第 43 巻、1999 年 2 月。

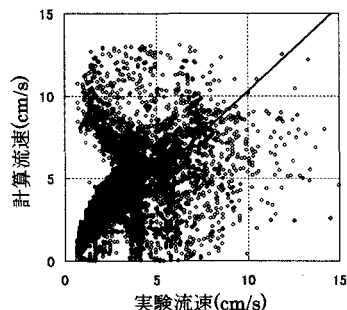


図 3-1 流速比較(一様粘性)

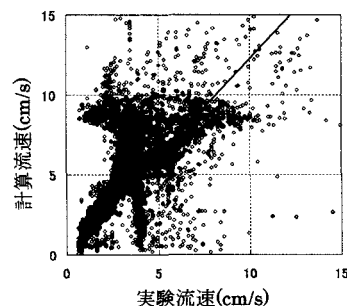


図 3-2 流速比較(LES)