

境界埋め込み法により栈粗度形状を表現した LES 解析

神戸大学大学院 学生員 ○吉村 英人 神戸大学工学部 正会員 藤田 一郎
NTT 西日本 非会員 江見 崇 神戸大学大学院 学生員 松原 隆幸

1. はじめに

近年、直交格子を用いて任意の境界形状を簡単に扱うことの出来る境界埋め込み法^{1), 2)}が開発され、利用されるようになってきている。本研究では LES に境界埋め込み法を組み込み、栈粗度を設置した流れ場の再現を試みた。また、PIV を用いた可視化流体解析を行い比較し精度の検証を行った。

2. 数値解析概要

(1) 境界埋め込み法

境界埋め込み法は速度の境界条件を外力項に取り入れることによって直交格子を用いて任意の境界形状を現す方法である。境界埋め込み法には Peskin などによるフィードバック法¹⁾や Mohd-Yusof による直接強制法²⁾などがあるが、本研究では計算が簡単かつ安定的である後者を用いることにした。フィルタを施した非圧縮性流れの N-S 方程式に外力項 f を導入し前進差分で時間的に離散化した式を以下に示す。

$$\frac{\bar{u}_i^{n+1} - \bar{u}_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (1)$$

$$f_i = -RHS^n + \frac{U_i^{n+1} - \bar{u}_i^n}{\Delta t} \quad (2)$$

x_i : i 方向座標 ($i = 1, 2, 3$), $\bar{u}_i$: グリッド成分の i 方向速度, ν : 動粘性係数, ν_t : 渦動粘性係数

ここで、 RHS^n は式(1)における右辺の第 1 項から第 4 項の和である。また、渦動粘性係数 ν_t の算出には稲垣らにより提案された MTS SGS モデル³⁾を用いた。この MTS SGS モデルは時間スケールとして、乱れの SGS 成分のもつ時間スケールと歪み速度の大きさから与えられる時間スケールとの調和平均を用いることにより、壁面近傍で自動的にダンピングがかかる効果を取り入れることが出来る。式 (2) における U_i^{n+1} は境界近傍格子における速度であり、その隣接格子点上の速度と壁面上のゼロ速度を補間する事により求める。

(2) 計算条件

計算領域は、主流方向 x 、壁垂直方向 y 、及びスパン方向 z にそれぞれ $(25d, 4.5d, 10d)$ とし流入部より $5d$ 、 $11d$ の地点に栈粗度を設置し、実験と同様に相対粗度間隔 $L/d=6.0$ となるようにした。格子数はそれぞれ $(250, 60, 50)$ とし、 z 方向には等間隔格子を用い、 x 方向及び y 方向には $\tanh$ 関数で粗密をつけた不等間隔格子を用いた。流入境界の流速分布は対数分布とし、流出境界には対流流出条件、スパン方向には周期境界条件、上部境界にはすべり条件、底面境界にはすべりなし条件を適用した。また、水理条件は実験と同じとした。

3. 可視化水理実験

実験には水路長 4.0m、水路幅 0.2m のアクリル製の直線開水路を用い、流れの可視化には粒径 $1.0 \mu\text{m}$ のトレーサーを用いた。また、開水路中流部に粗度高さ $d=0.9\text{cm}$ の正方形栈粗度を相対粗度間隔 $L/d=6.0$ として二つ設置し、その流れの鉛直断面を高速ビデオカメラで撮影し (110Hz)、PIV により解析を行った。表-1 に水理条件を示す。

キーワード 境界埋め込み法, LES, 栈粗度, PIV

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL/FAX 078-803-6439

表-1 水理条件

流量： $Q(\text{cm}^3/\text{s})$	616
勾配： I	1/500
水深： $h_1(\text{cm})$	4.0
栈粗度高さ： $d(\text{cm})$	0.9
相対粗度間隔： L/d	6.0
流入平均流速： $U_m(\text{cm/s})$	7.7
フルード数： Fr	0.123
レイノルズ数： Re	3067

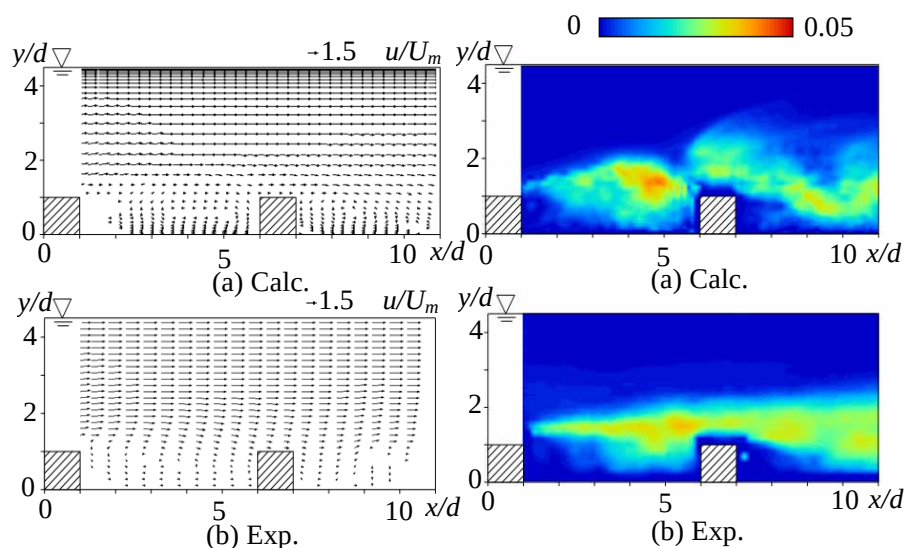


図-2 平均流速ベクトル

図-3 レイノルズ応力

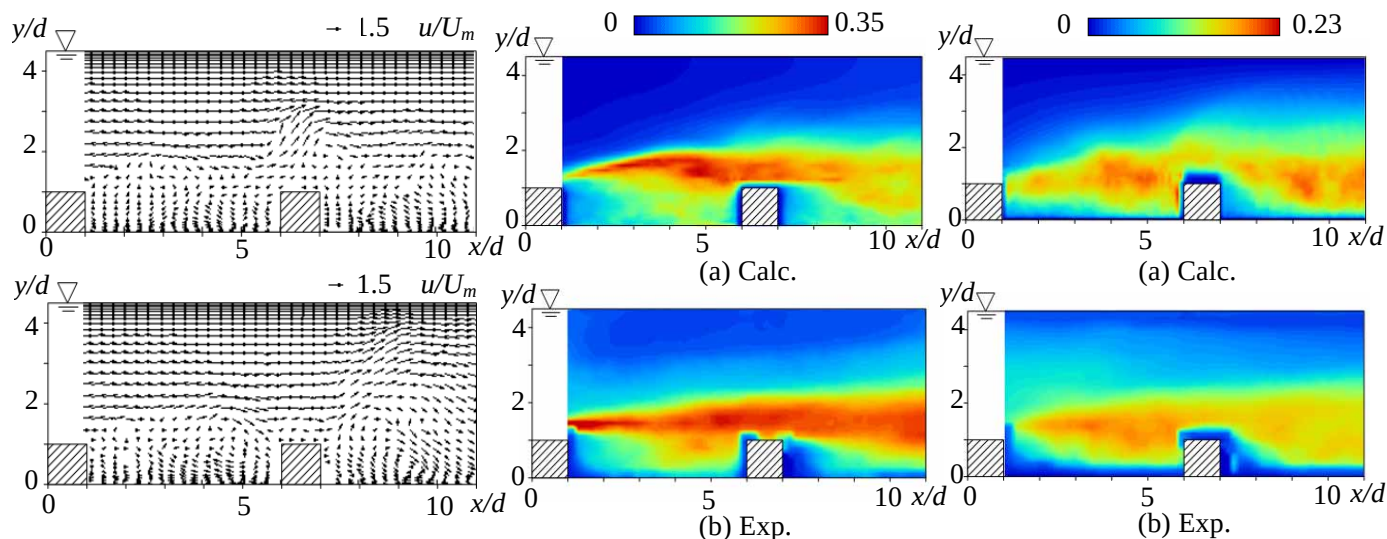


図-1 計算結果の瞬間流速ベクトル 図-4 主流方向の平均乱れ強度 図-5 鉛直方向の平均乱れ強度

4. 解析結果

計算結果の瞬間流速ベクトルを図1に示す。また、実験および数値計算により得られた平均流速ベクトルを図-2に、レイノルズ応力と各方向の平均乱れ強度の分布図を図-3、図-4、図-5にそれぞれ示す。2枚の瞬間流速ベクトルより発生した上昇流が水表面にまで達していることがわかる。平均流速ベクトルに着目すると粗度間に発生する循環渦が比較的良好に再現されている。また、レイノルズ応力や乱れ強度の分布図を見ると多少の違いは見られるものの概ね傾向は一致しているといえる。今後は、このような底面近くで発生する剥離渦の挙動について詳細に検討し、それらが水面変動に与える影響を明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) Fadln,E.,A., Verzicco,R., Orlandi,P. and Mohd-Yusof,J. : Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations, Journal of Computational Physics, 161-1, pp.35-60, 2000.
- 2) Peskin,C.S. : Numerical analysis of blood flow in the heart, *J.comput.Phys.*, 25, pp.220-252, 1997.
- 3) 稲垣昌英, 近藤継男, 長野靖尚 : 実用的な LES のための混合時間スケール SGS モデル, 日本機械学会論文誌, B68, 673, pp.2572-2579, 2002.