

特集 11
研究速報

LES によるチャンネル内立方体障害物周辺の乱流解析

LES of Turbulent Flow around a Surface-Mounted Cubical Obstacle in a Channel

朴 南 燮*・小林 敏 雄*・谷 口 伸 行*

Namseob PARK, Toshio KOBAYASHI and Nobuyuki TANIGUCHI

1. はじめに

LES は非定常、高 Reynolds 数の乱流場に対する数値解析の最も有力な手法として期待されているが、いままでの LES の適用はチャンネル流れ等の比較的簡単な形状の乱流場に限られていた。しかし、近年、計算機性能の向上やコンピュータ資源の拡充に伴い、LES の工学上有用な複雑形状を有する乱流場への適用が期待されている。そのような背景を元に本研究は、LES によりチャンネル内立方体障害物周辺の乱流場の3次元解析を行い、複雑な流れ場に対する LES の工学的応用を試みたものである。解析対象は (図 1)、3次元の形状を持ち、剝離、循環、乱流混合、再付着等を含む複雑な流れであるため、一般的な剝離乱流場における LES の有効性の検証として適当と考えられる。

本研究は LES の基本モデルとして Smagorinsky モデル⁴⁾を用い、チャンネル内立方体障害物周辺の乱流場の3次元解析を行い、その流れ場の諸量を Matinuzzi らの実験結果¹⁾と比較したものである。複雑な流れ場に対する LES の工学的実用性を考え、計算負荷を少なくするため比較的粗い計算格子を用い、立方体の高さ H 、流入部の体積平均速度 U_b に基づく Reynolds 数 40,000 に対して計算を行った。LES では、grid scale の量の直接計算では空間離散化に中心差分を使うことが多いが、中心差分は計算格子を十分小さく分割しないと不安定な数値振動が生じてしまう。計算の安定のため対流項の空間離散化には風上差分を採用した計算例もみられるが数値粘性の評価が問題となっている。本計算では空間離散化に2次精度中心差分を採用した場合、対流項のみ3次精度の風上差分を採用した場合、また、物体前面の角部分領域の対流項のみ局所的に風上差分を導入した場合の三つのケースに対して計算を行い、そ

*東京大学生産技術研究所 第2部

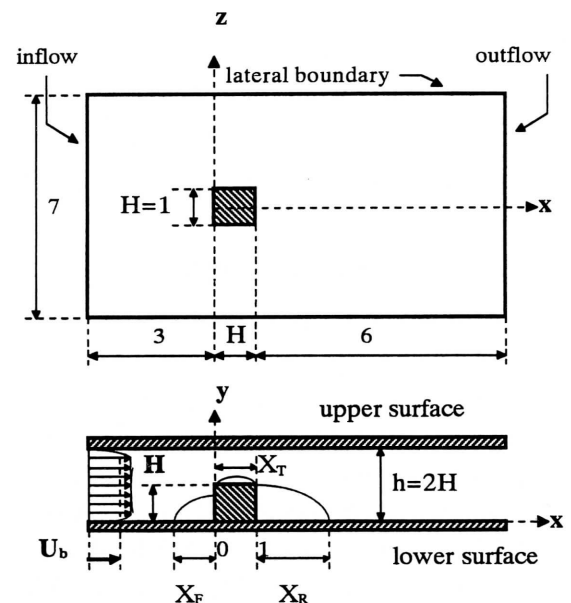


図1 チャンネル内立方体障害物周辺の流れの解析対象

れら进行评估した。

2. 基礎方程式

非圧縮性流れに対する LES の基礎方程式は filtering 操作を施した Navier-Stokes 方程式および連続の式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{u}_i \bar{u}_j + \left(\frac{1}{\text{Re}} + \nu_{SGS} \right) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

SGS モデルとして、Leonard 項と Cross 項の和をゼロと

研究速報
し、Reynolds 項には式 (3) のように渦粘性近似を行っている Smagorinsky モデル⁵⁾を採用する。

$$v_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\Delta = f \cdot (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3}$$

本計算では、Smagorinsky 定数はチャンネル乱流で最適値と言われている $C_s = 0.10$ とした。また、壁面近傍での長さスケールの減少による渦粘性係数の変化を補正するため、フィルター幅 (又は SGS の長さスケール) に Van Driest 型⁶⁾の減衰関数 f を乗じている。

$$f = 1 - \exp(-y^+/25) \quad (4)$$

$$y^+ = u_\tau y / \nu, \quad u^+ = u / u_\tau, \quad u_\tau^2 = \tau_w / \rho$$

ここで、 y は壁からの距離、 u は y 点の速度、 ν は動粘性係数、 u_τ は壁面摩擦速度、 τ_w は壁面摩擦応力、 ρ は密度である。

3. 数値計算方法概要

基礎方程式の離散化は、有限体積法 (Schumann, 1975) に基づいて行う。計算は三つのケースに対して行われた。Case 1 では不等間隔の staggered grid を用いて、空間スキームには 2 次精度中心差分を、時間スキームには 3 次精度 Runge-Kutta 法 (Williamson, 1980)⁷⁾ を採用した。CASE 1 の計算では数値振動が生じたので、CASE 2 では計算の安定性のため、対流項のみ 3 次精度の風上差分の一種である QUICK スキームを採用し、他には CASE 1 と同じ条件で計算した。また、CASE 3 では風上差分による数値誤差の最小化を考へて、数値振動の発生振源地である物体前面の角部分領域の対流項のみ局所的に QUICK スキームを導入し、他の領域では 2 次中心差分で計算を行った。図 2 に計算格子を示す。物体前面の角部分の太い線で囲まれている領域が CASE 3 の場合の局所的に QUICK を導入した領域である。非定常の非圧縮流れの差分アルゴリズムとして半陰解法である SMAC 法を使用する。流入条件の計算のために入口に $2H \times 3H \times 7H$ の領域を持つ Driver を設け、本体部と並行して計算を進める。計算格子数は、本体部の $10H \times 2H \times 7H$ の計算領域に対して 109,296 点 (= $66 \times 36 \times 46$)、Driver 部には 33,120 点 (= $20 \times 36 \times 46$) で、総格子数は 142,416 点である。格子サイズは、 $\Delta x = 0.10 \sim 0.35H$ 、 $\Delta y = 0.0625H$ 、 $\Delta z = 0.1 \sim 0.29H$ である。無次元計算時間刻み幅 Δt は 0.01 である。境界条件は、入口の流入部では Driver により生成

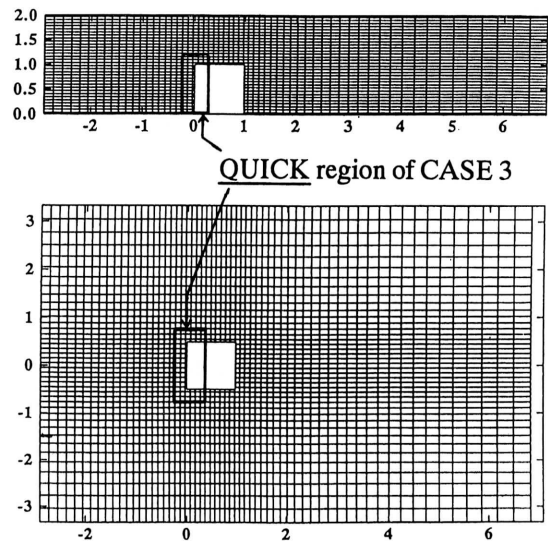


図 2 計算領域及グリッド分割 ($66 \times 36 \times 46 = 109,296$ 点)

された発達した乱流が流入する。側面の境界では反復周期境界条件を、流出部では粘性対流境界条件⁸⁾を使用している。壁面速度境界条件については、次のような Spalding 則による人工的壁面境界条件³⁾を採用する。

$$F(u^+, y^+) = u^+ - y^+ + e^{-\kappa B} \left[e^{\kappa u^+} - 1 - (\kappa u^+) - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} \right] = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\kappa = 0.4$ 、 $B = 5.5$ である。このとき、瞬時の壁面摩擦応力は次式と定義する。

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{\nu y^+}{u^+ y} \frac{u}{y} \quad (6)$$

4. 計算結果および考察

本計算結果、CASE 1 は無次元計算時間で 50 (0.01×5000 step) 計算してから、無次元計算時間で 50 から 60 の間の統計量を、CASE 2 は無次元計算時間で 60 から 120 の間の 60 の統計量を、CASE 3 は 60 から 140 の間の 80 の統計量を出したものである。図 3 はチャンネルの対称面、 $Z = 0.0$ の中心断面での主流方向の平均速度 $\langle \bar{U} \rangle$ の等値線図を Matinuzzi ら実験値²⁾と比較したものである。図 4 はチャンネル中心断面での時間平均速度分布 $\langle \bar{U} \rangle$ を示している。図 5 には中心断面での時間平均速度分布 $\langle \bar{U} \rangle$ を示す。図 6 は Reynolds 応力、 $-\langle u'v' \rangle$ の分布 (GS + SGS) を示している。中心差分を採用している CASE 1

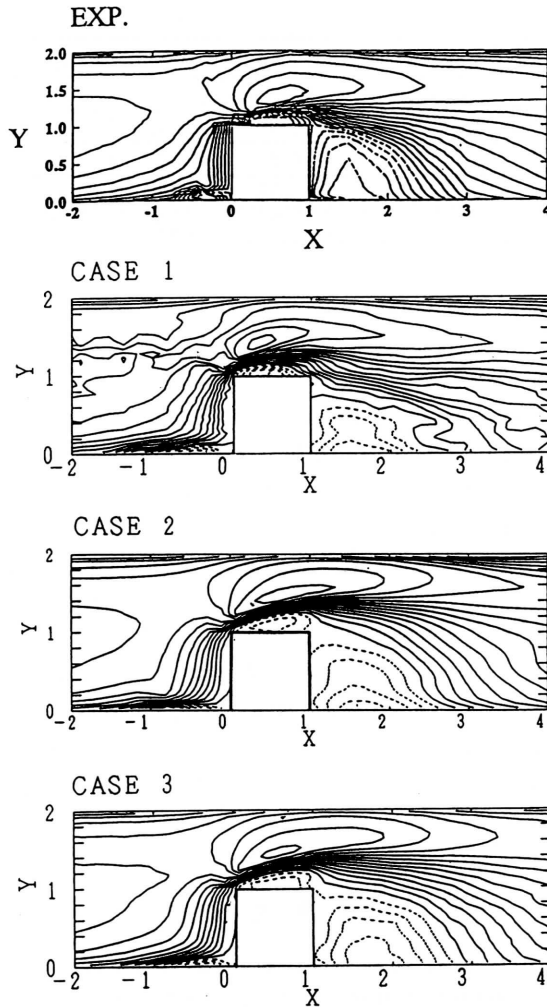


図3 中心断面での平均速度 $\langle \bar{U} \rangle$ の等値線図 (MIN=-0.5, MAX=1.5, Numb=20)

の計算では、物体前縁の角部分から数値振動が生じ、上流側の方に伝播されて行って上流側の流れに大きい影響を及ぼしていることが分かった。対流項に QUICK を採用した CASE 2 では、不安定な数値振動が抑えられて、上流側の平均速度分布は定量的に一致しているが、Reynolds 応力は全体に過大に評価されており、これは数値粘性の影響のためと考えられる。そこで、物体前面の角部分領域の対流項のみ局所的に QUICK を採用した CASE 3 では、上流側の数値振動は抑えられて CASE 2 と同様の速度分布が得られる。また、CASE 3 では Reynolds 応力も CASE 1 と同等に実験値に近い分布が再現された。しかし、風上差分の導入によって上流側の速度分布は CASE 1 より改善する一方で、物体の上段部の再付着領域が大きく評価され、これが原因で後流側の速度分布に影響を及ぼ

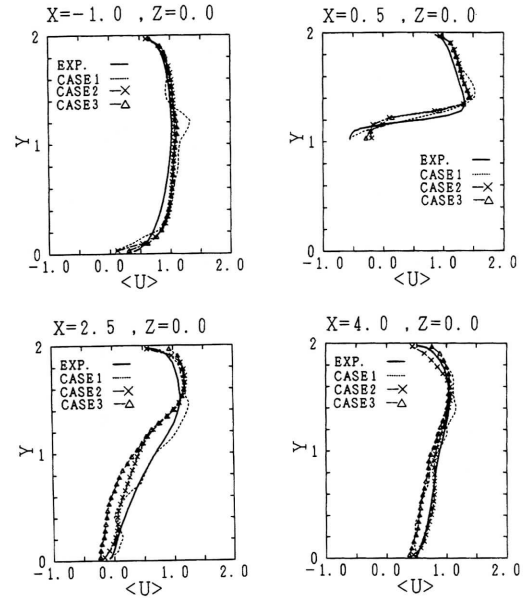


図4 中心断面での時間平均速度分布 $\langle \bar{U} \rangle$

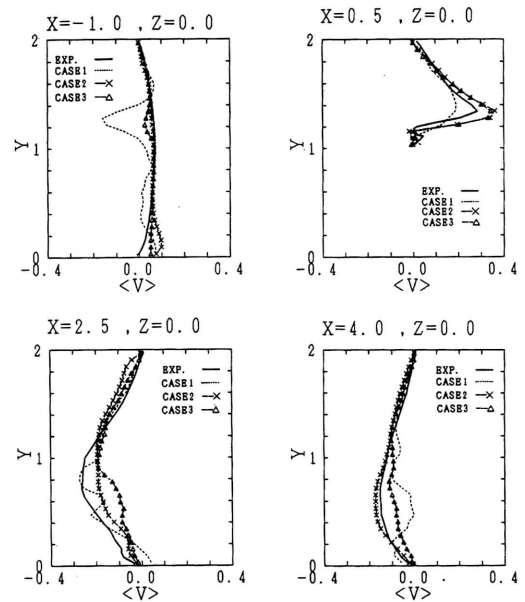


図5 中心断面での時間平均速度分布 $\langle \bar{V} \rangle$

して再付着領域 (X_R) が長くなっていると思われる。図7には CASE 3 の場合のチャンネル中心断面での $\bar{U}-\bar{V}$ の時間平均速度ベクトルを、また、図8にはチャンネル下壁面の表面での時間平均速度 $\bar{U}-\bar{W}$ の速度ベクトルを示す。チャンネル内立方体障害物周辺の流れは物体の周りとは上段面に剥離と再付着を持つ。表1はこれらの剥離と再付

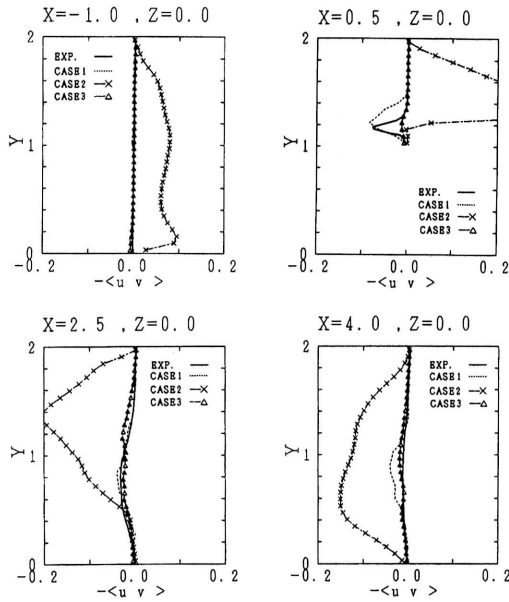


図6 中心断面での Reynolds 応力分布 $-\langle u'v' \rangle$ (GS+SGS)

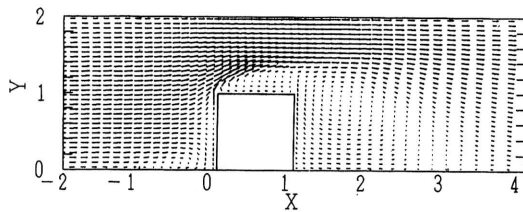


図7 中心断面での時間平均速度ベクトル (CASE 3)

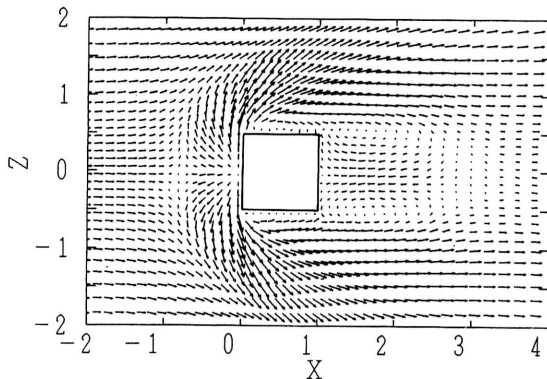


図8 チャンネル下壁面上の平均速度ベクトル (CASE 3)

表1 剥離と再付着距離

Separation and Reattachment Length			
Contrib.	X_F	X_T	X_R
Matinuzzi's exp.	0.90	0.75	1.61
CASE 1	0.82	0.75	1.62
CASE 2	0.95	(1.26)	1.62
CASE 3	0.70	(1.05)	1.79

着距離の実験及び計算結果を表している。

5. 結 論

Smagorinsky モデルを用いた LES によりチャンネル内立方体障害物周辺の乱流解析を試みた。空間離散化に2次中心差分を採用して計算する場合、物体前縁の角部分から数値的振動が発生して上流側の速度分布に影響を及ぼしていることがわかった。計算安定のため対流項に QUICK を採用した計算では、数値振動を抑えることはでき、上流側の平均速度分布の改善が得られるが、Reynolds 応力は過大に評価されるので、物体前面の角部分領域の対流項のみ局所的に QUICK を導入することにより、実験値に近い Reynolds 応力分布が再現できた。ただし、物体の上段部の再付着領域が大きく評価されて後流側の速度分布や再付着距離に影響を及ぼしていることが問題となる。

(1995年11月13日受理)

参 考 文 献

- 1) Matinuzzi, R. and C. Tropea, The Flow around surface-mounted, prismatic obstacle placed in a Fully Developed Channel Flow, J. of Fluids Engineering, vol.115 (1993).
- 2) Proc. Workshop on Large Eddy Simulation of Flows past Bluff bodies, (1995. 6, Tegernsee).
- 3) T. Kobayashi and Y. Morinishi, Large eddy simulation of backward-facing step flow, Proc. 1st symposium on Engineering Turbulence Modelling and Experiments, 279-286 (1990).
- 4) J. S. Smagorinsky, General circulation experiments with the primitive equations: Part 1, basic experiments, Monthly Weather Rev., 91 (1963) 99-164.
- 5) Deardorff, J. W., J. Fluid Mech. 41 part 2, pp. 453 (1970).
- 6) Van Driest, E. R., J. Aero. Sci. 23 (1956).
- 7) Williamson, J. H., Comp. Phys., 35, p 48, 1980.
- 8) Dai, Y., Kobayashi, T. and Taniguchi, N., Proceeding of 5th Inter. Symp. on CFD., Sendai, Japan, 1993.