

B331 修正型壁面モデルを適用した LES による静止直円管内旋回乱流の数値解析

Application of boundary the numerical simulation of the turbulent swirling flow in a stationary straight pipe by LES with the modified wall model

○小林克年 (東大生研), 谷口伸行 (東大情報基盤), 小林敏雄(東大生研)

Katsutoshi KOBAYASHI*, Nobuyuki TANIGUCHI* and Toshio KOBAYASHI*

*IIS., University of Tokyo, Tokyo 106-8558, Japan

The differential equations model of wall stress models have been proposed to reduce the CPU time required in LES and to predict with a good accuracy. We improved the 0 equation model of the turbulent eddy viscosity in the differential equations model using the gradient Richardson number. In this model we calculated the turbulent swirling flow in a stationary straight pipe. The improved model predicted the axial and tangential mean velocity and three turbulent intensities and Reynolds shear stresses with a good accuracy. The CPU time of this model is not more than 50% of that of LES with the no-slip boundary condition at the wall. The improved model predicted the axial and tangential wall shear stresses more precisely than the no-improved model.

1. 緒言

旋回乱流は各種燃焼器, 流体機械などで見られる乱流場であり CFD により旋回乱流を高精度で数値予測することは重要な課題である。LES は複雑非定常な乱流場を数値解析できる最も有力な計算手法であるが計算負荷に問題がある。LES の計算負荷を低減するための手法として壁境界条件に壁面応力モデル¹⁾を適用する方法が提案されているが, 著者らはその中でも微分式モデルの検証を行ってきた²⁾。静止直円管内旋回乱流では流線曲率による遠心力により壁近傍では平行流に比べ乱れが促進され流れの構造が変化する³⁾。So は乱れエネルギー方程式の解析から曲率を持つ面上の流れにおけるレイノルズ剪断応力を勾配リチャードソン数により修正した⁴⁾。鬼頭は So が導いた式を用いて対数則を修正し静止直円管内旋回乱流の壁近傍の速度分布を修正した対数則により表現できることを示した⁵⁾。ここでは同様に微分式モデルに適用されている 0 方程式モデルを勾配リチャードソン数により修正した。本論文ではこの修正型微分式モデルを壁境界条件に用いた LES により静止直円管内旋回乱流の数値解析を行いその予測精度や計算時間について検証を行なう。

2. 支配方程式

流れ場の支配方程式は円筒座標系に変換された瞬時場の Navier-Stokes 方程式と連続の式に格子平滑化操作を施した式である。SGS モデルには Smagorinsky モデルを適用した。Smagorinsky 係数は 0.1 である。LES の壁境界条件として壁面応力モデルの 1 種である微分式モデルを適用する。著者らはこれまで壁近傍において以下の境界層方程式を解き得られた速度場から壁面剪断応力を算出し LES の壁境界条件に与える手法を検証してきた²⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(UU)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rVU)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(WU)}{\partial \phi} \quad (1)$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r u v}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \nu \frac{\partial U}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial(UW)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rVW)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(WW)}{\partial \phi} + \frac{WV_r}{r} \quad (2)$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \phi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2 \overline{v w}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W}{r} \right) \right)$$

$$\int_0^r \frac{1}{r} \frac{\partial r V_r}{\partial r} dr = - \int_0^r \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \phi} \right) dr \quad (3)$$

$$-\overline{uv} = \nu_t \frac{\partial U}{\partial r}, \quad -\overline{vw} = \nu_t r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W}{r} \right) \quad (4)$$

$$\nu_t = \kappa u_\tau y \left[1 - \exp \left(-\frac{y^+}{A} \right) \right]^2 \quad (5)$$

乱流渦粘性係数は Johnson-King の 0 方程式モデルによりモデル化されている⁶⁾。モデル係数 κ, A はそれぞれ 0.4, 19 である。以後この微分式モデルを WM と略す。静止直円管内旋回乱流の壁近傍では流線曲率による遠心力効果により乱れが促進される⁵⁾。このことを考慮するため勾配リチャードソン数を用いて Johnson-King の 0 方程式モデルを以下のように修正した。

$$-\overline{uv} = \nu_{t,x} \frac{\partial U}{\partial r}, \quad \nu_{t,x} = \kappa u_\tau y \left(1 - \frac{1}{2} \beta_x Ri \right)^{3/4} \left[1 - \exp \left(-\frac{y^+}{A} \right) \right]^2 \quad (6)$$

$$-\overline{vw} = \nu_{t,\theta} r \frac{\partial W / r}{\partial r}, \quad \nu_{t,\theta} = \kappa u_\tau y \left(1 - \frac{1}{2} \beta_\theta Ri \right)^{3/4} \left[1 - \exp \left(-\frac{y^+}{A} \right) \right]^2 \quad (7)$$

式(6), (7)中のモデル係数 β_x, β_θ はそれぞれ 12, 6 である。勾配リチャードソン数の定義の説明は紙面の都合上割愛する。参考文献を参照されたい⁴⁾⁵⁾。以後この修正された微分式モデルを MWM と略す。本論文では壁境界条件に微分式モデル WM, MWM と滑り無し境界条件を適用した LES により鬼頭の静止直円管内旋回乱流³⁾の検証を行なう。

3. 計算手法

空間に関しては 2 次精度中心差分, 時間進行に関しては 3 次精度 Runge-Kutta 法を用いて離散化した。円管の中央領域では周方向の対流項と拡散項, 壁近傍では半径方向の対流項と拡散項を陰的に解く, Zonal 的な陰解法を適用した。圧力は Fractional Step 法で求め, 行列解法には ICCG 法を用いた。MPI による並列化コードを構築し, ICCG 法は PBO 法(Parallel Block Ordering method)による領域分割を適用して並列化した。

4. 計算条件

レイノルズ数は円管直径, 管断面平均速度, 動粘性係数で無次元化した値で 50000 である。本論文では旋回強度 0.83 を検証した。計算領域は軸方向の長さが直径で無次元化した値で 12 であり計算格子数は WM, MWM に関しては軸, 半径, 周方向にそれぞれ 200, 10, 64 の 128000 点, 滑り無し境界条

件に関しては 200,24,64 の 307200 点とした。流入条件は実験データと正規乱数を用いて生成した。流出部では対流流出境界条件を適用した。

5. 計算結果

図 1,2,3 にそれぞれ旋回強度、軸方向、周方向壁面剪断応力の軸方向減衰分布を示す。滑り無し境界条件は旋回強度の減衰率、壁面剪断応力を過大評価している。WM,MWM は旋回強度の減衰を正確に予測している。しかし WM は軸方向、周方向の壁面剪断応力を過小評価している。図 4,5 にそれぞれ勾配リチャードソン数、乱流渦粘性係数の分布を示す。MWM は勾配リチャードソン数により式(6),(7)の乱流渦粘性係数が WM に比べ大きくなる。この乱流渦粘性係数の増大により WM に見られた軸方向、周方向の壁面剪断応力の過小評価が改善される。また旋回のない円管内乱流の場合、勾配リチャードソン数はほぼゼロであり WM, MWM の間に予測結果の差異がないことを確認している。即ちここで修正した微分式モデルは旋回のない円管内流れと静止直円管内旋回乱流においてモデルの普遍性が成り立っている。軸方向、周方向平均速度に関して MW,MWM,滑り無し境界条件の間に結果の違いはほとんど見られず実験値を十分に予測している。2 次の乱流統計量に関して MW,MWM の間に結果の違いはほとんど見られず実験値を十分に予測している。滑り無し境界条件は 2 次の乱流統計量を実験値よりも過大評価する。紙面の都合上、軸方向、周方向平均速度、2 次の乱流統計量のグラフは割愛する。壁境界条件に WM,MWM を適用した LES は滑り無し境界条件を適用した LES に比べ計算時間を約 50% 以下に低減することができた。

6. 結論

壁境界条件に WM,MWM,滑り無し境界条件を適用した LES により静止直円管内旋回乱流を数値解析し以下のことがわかった。WM,MWM は滑り無し境界条件に比べ約 50% 以下の計算時間で軸方向、周方向平均速度、2 次の乱流統計量を十分な精度で予測することができた。MWM は軸方向、周方向壁面剪断応力の減衰分布を WM よりも適切に予測できた。

参考文献

- 1)W. CABOT et al.: Flow, Turb. Comb.,63, 1991, 269-291
- 2)小林ら：機論(B編), 66:651, 2000, 2780-2787
- 3)OSAMI KITO: *J. Fluid Mech.*, 225, 1991, 445-479
- 4)RONALD M. C. SO: *J. Fluid Mech.*, 70, 1975, 37-57
- 5)鬼頭：機論(B編), 54:497, 昭 63, 65-71
- 6)W. CABOT: CTR. 1991, 41-50

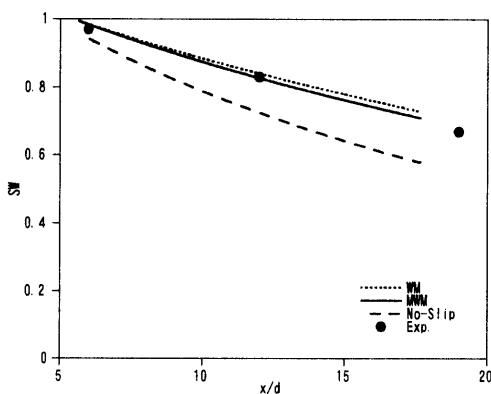


図 1 旋回強度の軸方向減衰分布

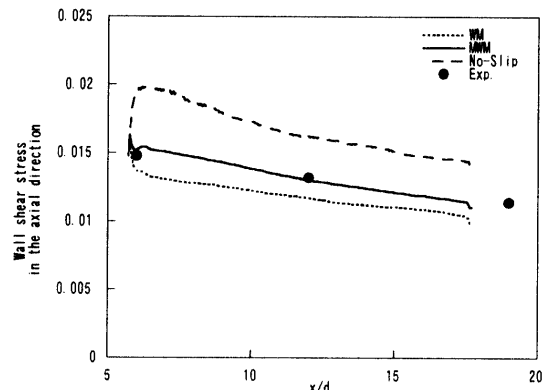


図 2 軸方向壁面剪断応力の軸方向減衰分布

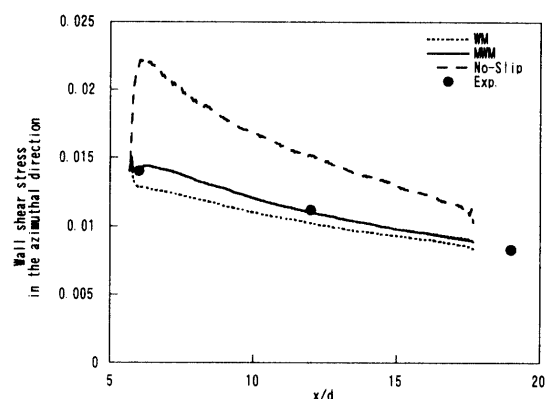


図 3 周方向壁面剪断応力の軸方向減衰分布

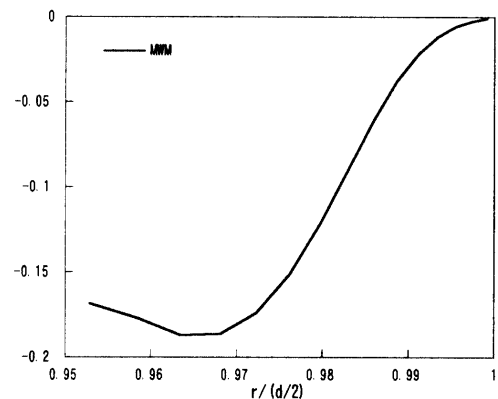


図 4 勾配リチャードソン数

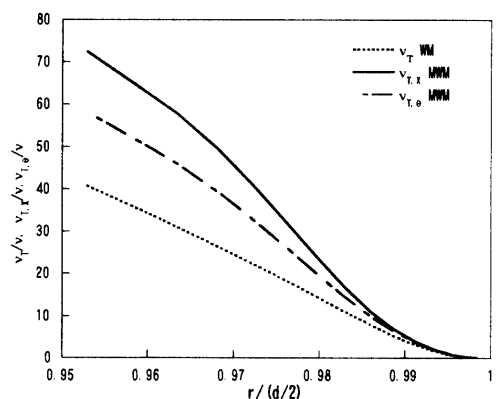


図 5 乱流渦粘性係数