

直円管内旋回乱流の直接数値計算

Direct Numerical Simulation of Swirling Flow in a Straight Pipe

森西 洋平, 名工大, 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, E-mail : morinisi@cfm.mech.nitech.ac.jp

中林 功一, 名工大, 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, E-mail : nakabayashi@cfm.mech.nitech.ac.jp

○ 中島 伸吾, 名工大院, 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, E-mail : nakajima@cfm.mech.nitech.ac.jp

Youhei Morinishi, Dept. of Mech. Eng., Nagoya Inst. of Tech., Gokiso-cho Showa-ku Nagoya 466-8555, JAPAN
Koichi Nakabayashi, Dept. of Mech. Eng., Nagoya Inst. of Tech., Gokiso-cho Showa-ku Nagoya 466-8555, JAPAN
Shingo Nakajima, Dept. of Mech. Eng., Nagoya Inst. of Tech., Gokiso-cho Showa-ku Nagoya 466-8555, JAPAN

A turbulent swirling flow is one of the significant turbulent flows in engineering and practical applications. We investigated a turbulent swirling flow in a straight pipe by using the direct numerical simulation of the Navier-Stokes equations. A swirling flow is generated so as to impose a tangential body force in a section corresponding to the swirl generator. Reynolds number Re_m is 5300 based on the mean axial velocity and the pipe radius, and swirl intensity Ω is about 0.7 at the downstream end of the swirl generator. Typical turbulence statistics such as the mean velocity, turbulent intensity, Reynolds stress and its budget at several sections will be presented.

1. 緒言

円管内の旋回乱流は工学および工業上非常に重要で興味深い流れ場であり、この流れに対してこれまで数多くの実験的研究や乱流モデリングに関する研究が行われてきた。乱れの非等方性が非常に強いため、乱流解析に広く用いられている標準 $k-\varepsilon$ モデルでは旋回乱流の予測は困難なことが知られている（小林、依田（1987））⁽¹⁾。このため、西島（1997）は非等方 $k-\varepsilon$ モデル等により、島ら（1998）は応力方程式モデルにより旋回乱流の予測を試みている。しかしながら、これらの乱流モデルに使用されているモデル定数を正確に定めるためには現状の実験データでは不十分と考えられる。そこで本研究では、旋回乱流に対する詳細な乱流統計平均量を算出することを目的に直円管内旋回乱流の DNS を試みる。

2. 数値計算手法および計算条件

空間的にはスタガード格子系の 2 次精度完全保存形差分スキームを、時間的には粘性項に Crank-Nicolson 法および対流項には 3 次精度の Runge-Kutta 法を使用して、円筒座標系 (z, r, θ) の Navier-Stokes 方程式を離散化する。円筒座標系の特異点は Verzico & Olramdi (1995)⁽²⁾ の方法により回避されている。連続の式と運動方程式とのカップリング・アルゴリズムには Dukowicz & Dvinsky (1992) のフラクショナル・ステップ法を用いる。圧力のポアソン方程式は周期方向に高速フーリエ変換法および半径方向に 3 重対角行列解法 (TDMA) を導入する直接法で解かれている。計算対象の概念図を Fig.1 に示す。円管の半径を R として、軸方向の周期計算領域 L を $30R$ 、また $(L, R, 2\pi)$ 内の格子数を $(384, 64, 96)$ と設定している。周期的な直円管内に旋回流を発生させるため、ランキン渦型の周方向速度と相似な分布形状を持つ周方向体積力を計算領域の一部（長さ $L_f = 3R$ ）に加え、旋回発生装置を模擬する。旋回発生装置直後の断面において旋回強度（無次元角運動量） Ω は 0.7 となっている。軸方向平均速度 U_m と R に基づくレイノルズ数 $Re_m = U_m 2R / \nu$ は 5300 に設定されている。

3. 計算結果

Fig.2 に半径位置 r/R に対する軸方向平均速度 U および周方向平均速度 W を示す。以下の図には比較のため $Re_m \cong 5300$ の円管内ボアズイユ乱流の計算結果も示されている。Fig.2(a) の軸方向平均速度分布では強い旋回乱流の特徴である円管中心部での逆流は生じていないが、これは円管中心部の軸方向速度分布が旋回発生装置

に依存することによる（Kitoh(1991))⁽³⁾ と考えられる。また本計算の格子解像度および計算領域が不足している可能性も考えられる。Fig.2(b) の周方向平均速度分布においては自由渦領域と強制渦領域の二つが存在し軸方向に旋回強度も減衰しており、旋回乱流の特徴が再現されている。

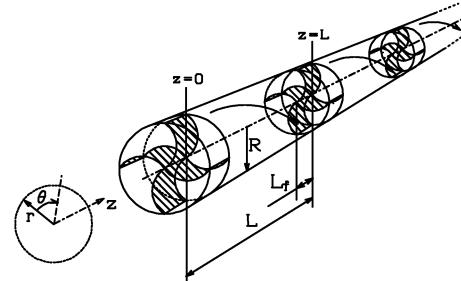
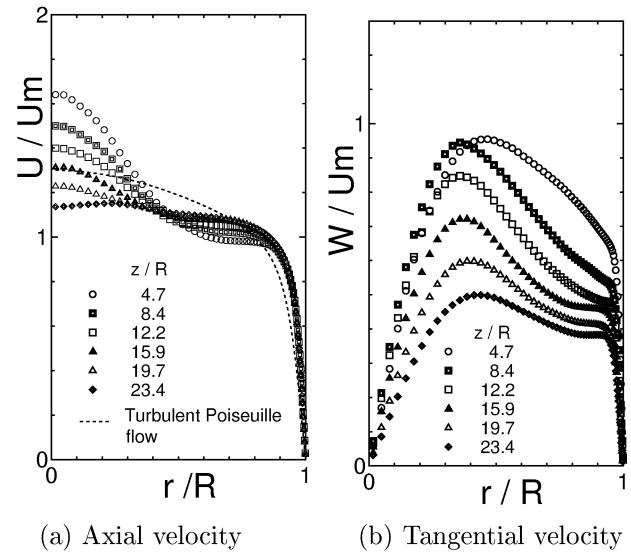


Fig.1 Periodic swirling flow in a straight pipe



(a) Axial velocity

(b) Tangential velocity

Fig.2 Mean velocity profiles

次に平均速度分布が Kitoh による実験結果⁽³⁾ と定性的に一致する断面 $z/R = 23.4$ での諸量を示す。この断面における旋回強度は $\Omega = 0.24$ である。参照として用い

た実験データの旋回強度は $\Omega = 0.18$ である. Fig.3 に半径位置 r/R に対する軸方向および周方向平均速度分布, Fig.4 に乱流強度分布, Fig.5 にレイノルズせん断応力分布を示す. これらの計算結果は実験データと定性的に一致しており, 本数値計算は旋回乱流の特徴をある程度再現しているものと考えられる.

次にレイノルズ応力の非等方テンソル b_{ij} を算出して流れ場の解析を行う. b_{ij} は次式で定義される.

$$b_{ij} = \overline{u'_i u'_j} / \overline{u'_k u'_k} - 1/3 \delta_{ij} \quad (1)$$

非等方テンソルの特性方程式とその 3 つの不变量は,

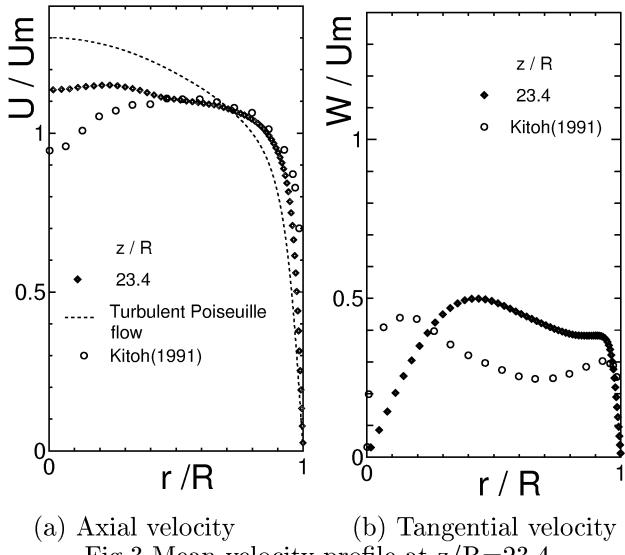
$$\lambda^3 - III_b \lambda^2 + II_b \lambda - I_b C = 0 \quad (2)$$

$$I_b = b_{ii} \quad (3)$$

$$II_b = -1/2 b_{ij} b_{ji} \quad (4)$$

$$III_b = 1/3 b_{ij} b_{jk} b_{ki} \quad (5)$$

で表される. これらを用いて b_{ij} の不变量マップ (AIM) を描き Fig.6 に示す. 比較のため示されている円管内ポアズイユ乱流では壁面のごく近傍で 2 次元的であるが壁から離れるにつれ乱流構造が引き伸ばされて 1 次元的になる. さらに管中心に近づくにつれ軸対称流(拡大)の線に沿って 3 次元等方状態に近づく. 一方, 旋回乱流の場合には壁面のごく近傍では 2 次元的であるが乱流構造の引き伸ばし(1 次元化)は弱く, $III_b = 0$ に沿って 3 次元等方状態に近づく.



(a) Axial velocity (b) Tangential velocity
Fig.3 Mean velocity profile at $z/R=23.4$

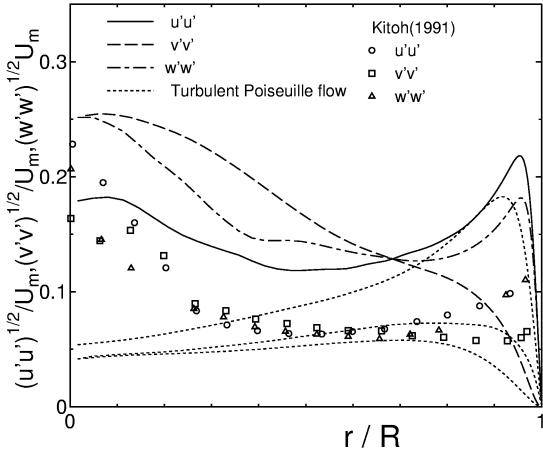


Fig.4 Turbulent intensities at $z/R=23.4$

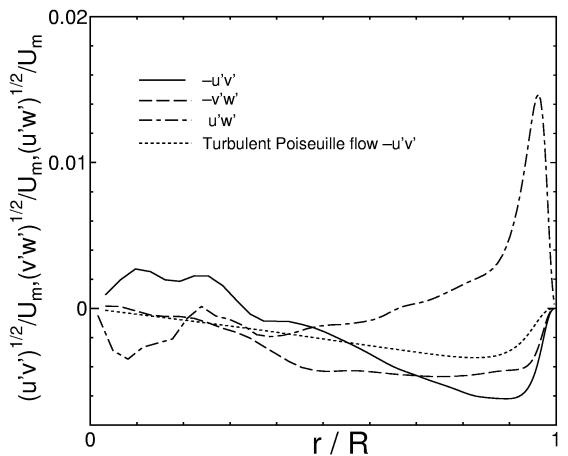


Fig.5 Reynolds shear stresses at $z/R=23.4$

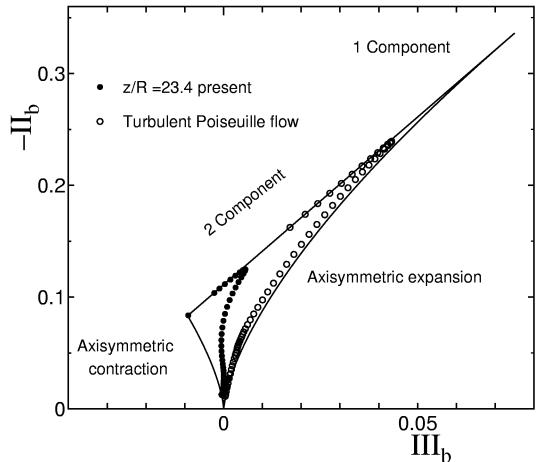


Fig.6 Anisotropy invariant map at $z/R=23.4$

4. 結言

本研究において示した方法により旋回乱流の直接数値計算を実行し, 以下の結果を得た.

- 平均速度および乱流強度分布の計算結果は旋回乱流の特徴を定性的に再現している.
- レイノルズ応力の非等方テンソル b_{ij} の不变量マップの結果から, 旋回乱流は円管内ポアズイユ乱流とはかなり異なる乱れ構造であることが確認された.

なお, 今後格子解像度を向上させた数値計算を実行し, 十分なアンサンブル平均をすることにより信頼性の高い旋回乱流のデータを構築して乱流構造の解析を行う予定である.

謝辞

本研究に関し, 日本原子力研究所平成 12 年度計算科学技術ソフトウェア研究開発からの補助を受けている. ここに記して, 感謝の意を表す.

参考文献

1. 小林, 依田, “直円管内旋回乱流の数値予測,” 日本機械学会論文集(B編), **52-481**(1986), pp. 3230-3236.
2. Verzicco, R. and Orlandi, P., “Finite-difference scheme for three-dimensional incompressible flows in cylindrical coordinates,” *J. Comput. Phys.* **123** (1996), pp402-414.
3. Kitoh, O., “Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe,” *J. Fluid Mech.*, **225**(1991), pp. 445-479.