

# 円管内旋回流の直接数値解析

大木 武志 (15416515)

指導教員 森西 洋平

## 1 緒言

円管内に発生する旋回流として回転円管内乱流および静止円管内旋回流が挙げられる。回転円管内乱流の研究はこれまでに実験や数値計算 (RANS, LES および DNS) によるものがあるが、この流れは工学・工業上多く見られる平均流の軸方向変化を伴う旋回流の本質を解明するには適していない。一方、軸方向変化を伴う静止円管内旋回流に対しては実験的研究<sup>(1)</sup>は行われているものの、乱流モデルを用いた数値計算では円管中心付近の速度分布や乱れ強さの挙動を高精度に予測することは困難であることが報告されている。信頼性の高い乱流モデル構築のためには DNS データの利用が有効であるが、これまでに静止円管内旋回流に対する DNS の報告は見られない。

そこで本研究ではまずはじめに、円筒座標系 NS 式に対する数値計算手法 (特に移流項の離散化および極の取り扱い方法) がデカルト座標系ものものと比べて十分に整備されていないことを踏まえ、新たな円筒座標系用完全保存形差分スキーム<sup>(2)</sup>を提案する。そして提案した差分スキームを使用して、静止円管内旋回流として直円管内に旋回流発生装置が周期的に配置された周期的旋回流の DNS を実行し詳細な乱流統計平均量を算出する。さらに回転円管内乱流および円管内ポアズイコ流に対する DNS も同時に実行し、得られた結果を比較することにより旋回流の特徴を考察する。

## 2 計算手法

### 2.1 DNS の概要

本研究では非圧縮性流体を仮定し、円筒座標系における連続の式および NS 式を基礎方程式に用いる。基礎方程式の空間離散化には本研究で提案する高精度完全保存形中心差分スキームを使用し、移流項に関しては周期方向 (軸および周方向) に 8 次精度 (半径方向には 2 次精度)、粘性項に関しては全方向 2 次精度の差分法で離散化する。円管中心における極の取り扱いには極上で半径方向速度成分  $u_r$  の運動方程式を解き、さらに極上での単価性を保障するために  $u_r$  の再構成を行っている。時間進行に関しては粘性項の周方向 2 階微分項を陰的 (Crank-Nicolson 法)、その他全ての項を陽的 (3 次精度 Runge-Kutta 法) に取り扱い、速度と圧力のカップリング・アルゴリズムには Dukowicz & Dvinsky (1992) タイプの Fractional step 法を用いている。

### 2.2 計算対象

#### 周期的旋回流

計算対象とする静止円管内旋回流は旋回流発生装置が周期的に配置された周期的旋回流 (Fig.1) である。旋回流は計算領域  $L_x (= 35R)$  内の  $L_f (= 5R)$  の領域に旋回流発生装置に相当する周方向体積力  $f_\theta$ ,

$$f_\theta = 0.5 \times \frac{U_m^2}{R} \quad (2.1)$$

を与えることにより発生させる<sup>(3)</sup>。また、旋回流発生装置付近での数値振動を抑制するため、旋回流発生装置内 ( $L_f = 5R$ ) のみに UTOPIA スキームに対応する 3 次の数値粘性を与える。

#### 回転円管内乱流および円管内ポアズイコ流

周期的旋回流との比較のために、回転円管内乱流 (Fig.2) および円管内ポアズイコ流 (Fig.3) に対する DNS も実行する。回転円管内乱流に関しては壁面速度  $u_{\theta|w}$  とバルク速度  $U_m$  の比で表される回転数  $N$  を、

$$N = \frac{u_{\theta|w}}{U_m} = 1 \quad (2.2)$$

に設定して自軸回転を加える。

なお周期的旋回流、回転円管内乱流および円管内ポアズイコ流いずれもバルク速度  $U_m$  と円管半径  $R$  によって定義されるレイノルズ数  $Re = 2U_m R / \nu$  が 5300 (流量一定) となるように時間ごとに圧力勾配を与えている。それぞれの DNS における計算領域 ( $L_x, L_r, L_\theta$ ) および格子数 ( $N_x, N_r, N_\theta$ ) を Table.1 に示しておく。

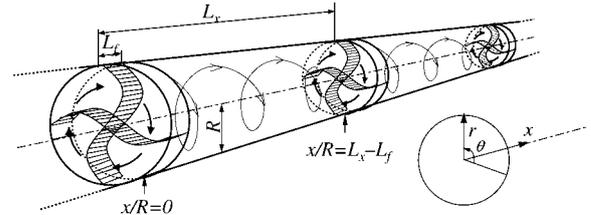


Fig. 1: Periodic swirling turbulent flow in a straight pipe.

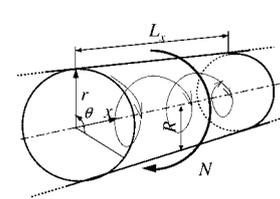


Fig. 2: Turbulent flow in a rotating pipe.

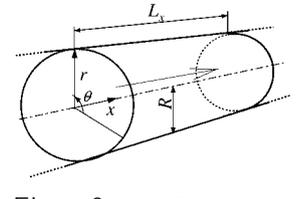


Fig. 3: Turbulent Poiseuille flow in a straight pipe.

Table 1: Computational region and grid number

	$L_x, L_r, L_\theta$	$N_x, N_r, N_\theta$
Periodic swirling turbulent flow	$35R, R, 2\pi$	512, 96, 128
Turbulent flow in a rotating pipe	$4\pi R, R, 2\pi$	256, 96, 128
Turbulent Poiseuille flow	$4\pi R, R, 2\pi$	256, 96, 128

## 3 計算結果

本研究では周期的旋回流、回転円管内乱流および円管内ポアズイコ流に対して DNS を実行し詳細な乱流統計平均量を算出した。その中でも本発表では RANS などの乱流モデルを用いた数値計算では高精度な予測が困難である円管中心付近での平均速度分布および乱流強度分布、さらには旋回流中心のふれ回りについて考察する。

### 3.1 平均速度分布

Fig.4, Fig.5 にそれぞれ周方向平均速度分布、軸方向平均速度分布を示す。なお、 $x/R$  は円管半径  $R$  で無次元化された軸方向位置であり、旋回流発生装置出口位置を  $x/R = 0$  に設定している。

Fig.4 より周期的旋回流の周方向平均速度分布は全ての断面において円管中心付近で強制渦形、円管壁側で自由渦形となるランキン渦形であることが確認できる。また、下流に向かって周方向平均速度のピーク値が円管中心に移動しながら減少している。一方、回転円管内乱流では壁面近傍で直線分布、他の領域で 2 次曲線状分布となっており、周期的旋回流の分布とは大きく異なっている。

次に Fig.5 より周期的旋回流の軸方向平均速度は強い凹型分布となっており、この領域 ( $x/R \geq 15.0$ ) では下流に向かって円管中心付近の軸方向平均速度は増加していることが分かる ( $x/R \leq 15.0$  では減少)。この軸方向平均速度分布の挙動は、円管内ポアズイコ流に比べ円管中心部の軸方向速度が壁面の回転により増加する回転円管内乱流とは逆の挙動である。

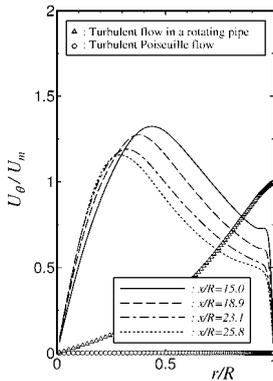


Fig. 4: Tangential mean velocity profiles.

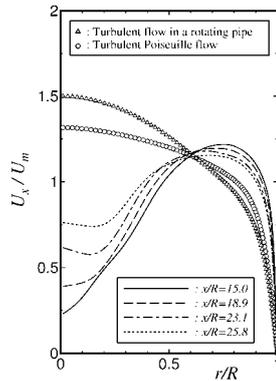


Fig. 5: Axial mean velocity profiles.

この軸方向速度の凹型分布が生じるメカニズムを運動量の収支より調べる．Fig.6 に半径方向運動量の収支を示す（円管内ポアズイコ乱流については省略）． $T_r$  は乱流拡散項， $\Pi_r$  は圧力拡散項， $D_r$  は粘性拡散項， $C_r$  は移流項である．両流れとも移流項  $C_r$  によって運動量が半径方向へ輸送されているが，回転円管内乱流での輸送は曲率によるものでありその値は小さい．一方周期的旋回乱流では移流によって半径方向へ多くの運動量が輸送されていることが分かる．これは壁面の粘性による流れの減衰によって半径方向への移流項が卓越するためである．中心軸付近で移流により半径方向へ輸送される運動量は軸方向成分の移流や乱流拡散によって補われる（紙面の都合で軸および周方向運動量の収支は省略する）．

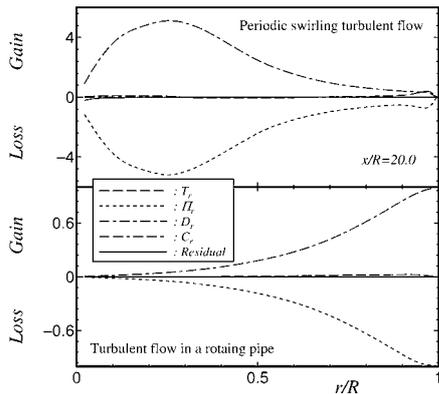


Fig. 6: Budget of radial momentum.

### 3.2 乱流強度分布

Fig.7 に乱流強度分布を示す．Fig.7 より周期的旋回流では下流に向かって壁面近傍の乱流強度は減衰しているが，円管中心付近ではそのような挙動とは逆で増加する傾向があり，その値も壁面近傍より大きくなっていることが分かる．この円管中心付近での乱流強度の増大をレイノルズ応力の収支により調べる．Fig.8 に軸方向レイノルズ垂直応力の収支を示す（円管内ポアズイコ乱流については省略）． $P_{xx}$  は生成項， $T_{xx}$  は乱流拡散項， $\Pi_{xx}$  は圧力拡散項， $D_{xx}$  は粘性拡散項， $\epsilon_{xx}$  は散逸項， $C_{xx}$  は移流項， $\Phi_{xx}$  は圧力歪み相関項である．Fig.8 より円管中心付近において，他方向から圧力歪み相関項を通して乱れが再分配されていることが分かる．紙面の都合でここでは省略するが，半径方向および周方向のレイノルズ応力収支では円管中心付近で乱流拡散項や圧力拡散項が正の値を持ち，圧力歪み相関項が負の値を持っていた．すなわち円管中心付近では半径方向および周方向から乱流拡散や圧力拡散により乱れが輸送されてくるが，その乱れは圧力歪み相関項を通して軸方向へと再分配されていることが分かる．このような円管中心付近での乱れの再分配輸送機構の存在により，円管中心付近の乱れは減衰することなく大きな値を持ったまま維持されることが理解される．

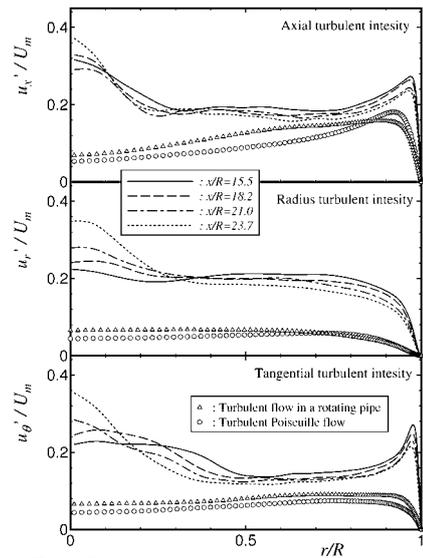


Fig. 7: Turbulent intensity profiles.

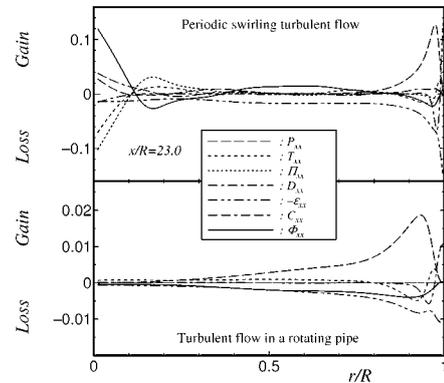


Fig. 8: Budget of axial Reynolds stress component.

### 3.3 旋回中心のふれ回り

圧力の可視化（発表時に示す）によってスワール数と旋回中心の関係が確認された．すなわちスワール数が小さくなると旋回中心のふれ回りは大きくなる．

## 4 結言

本研究ではまず極を含む完全保存形差分スキームを提案した．そして提案した差分スキームを使用して周期的旋回流，回転円管内乱流および円管内ポアズイコ乱流に対するDNSを実行し，詳細な乱流統計平均量を算出した．得られた結果を比較することにより，以下に示す周期的旋回流の特徴が分かった．

- 実験で得られている周方向平均速度のランキン渦形分布およびその軸方向への減衰，さらには軸方向平均速度分布の凹型分布およびその回復を再現することが出来た．
- 運動量収支を見ることにより，半径方向成分の移流項の卓越が軸方向平均速度の凹型分布の主要な原因であることが分かった．
- 円管中心付近の乱れは減衰することなく維持され，本DNS結果では逆に増加する傾向も見られた．これは円管中心付近での乱れの再分配輸送機構によるものである．
- スワール数が小さいと旋回中心のふれ回りは大きくなる．

### 参考文献

- (1) O. Kitoh, J.Fluid.Mech., 225(1991),pp.445-479.
- (2) Y. Morinishi, O. V. Vasilyev and T. Ogi, J.Comput.Phys., 197(2004),pp.686-710.
- (3) C. D. Pierce and P. Moin, AIAA J., 36(1998),pp.1325-1326.