

## 自軸回転円管内旋回流の LES

Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in an axially Rotating Pipe

富樫盛典\*・小林敏雄\*

Shigenori TOGASHI and Toshio KOBAYASHI

## 1. 旋回流の研究現状

サイクロン分離器や旋回ディフューザのような流体機械および電子材料の結晶引き上げプロセスでは旋回流を生じている。また、種々の燃焼器では流れに旋回を加えることによって混合や燃焼を促進することが多く、それらの現象の理解のためには旋回流の基礎的特性を知る必要がある。ここで旋回流を大きく2つに分類すると次のようになる。(1) 静止円管内～自由渦と剛体渦が共存して複雑。

(2) 自軸回転円管内～剛体渦のみで簡明な旋回流。

静止管の旋回流の場合、軸方向流速  $U$  がかなり下流域においても管中心軸近くでくぼんだ分布となること、周方向流速  $W$  は管中心軸近くで剛体渦的分布、周辺部で自由渦的分布となるのが特徴である。この流れを標準  $k-\epsilon$  2 方程式モデルで計算すると、せん断応力の過大評価のため、軸方向流速  $U$  のくぼんだ分布が下流で維持されず、平坦な分布になってしまうこと<sup>1)</sup>が知られている。これに対して、吉沢ら<sup>2),3)</sup>は、ヘリシティという新しい物理量を導入した  $k-\epsilon-H3$  方程式モデルを用いて、軸方向流速  $U$  のくぼんだ分布の再現に成功している。軸方向の速度と接線方向の速度からくる渦度によって作られるヘリシティはエネルギーカスケードを絞り込み、この効果が渦粘性の仮想的減少をもたらす、秩序だったコヒーレントな旋回流の構造を維持させることができるものと考えられている。

一方、自軸まわりに回転している直管内を充分発達した乱流が流下する場合には管壁の摩擦によって周方向の運動が発生し、静止管とは異なった簡明な旋回流になる事が知られている。菊山ら<sup>4)</sup>および山田ら<sup>5)</sup>は、上流静止管内で充分発達させた乱流を回転管に導くと軸速度分布は管回転が高まるにつれて層流時の分布(放物線)に近づくことを明らかにした。流れが層流化するこの現象は、流れ中の乱

れが周速度分布による遠心力場内で抑制されるため起こると考えられている。平井ら<sup>6)</sup>および河村ら<sup>7)</sup>は標準  $k-\epsilon$  2 方程式モデルを用いて、自軸まわりに回転したときに発生する管内旋回流を計算したところ、旋回が強くなるにつれて流れが層流化する現象、さらに周方向の流速分布がレイノルズ数や旋回の強さによらずほぼ二次曲線状の分布になることの2つの特徴を再現することができないことを指摘している。このような状況の中で本研究では複雑な旋回流である静止円管内旋回流解析の前段階として、LES を自軸回転円管内で起こる簡明な旋回流に適用して層流化現象のシミュレーションを試み、管壁近傍でのストリーク構造とせん断応力との関係を考察し、旋回流に対する LES の適応性を検証する。

## 2. LES 数値解析法

物理反変速度成分を用いた一般座標系の基礎方程式および一般座標系格子と円筒座標系格子を併用した手法の詳細については文献<sup>8),9)</sup>を参照されたい。圧力解法は HSMAC 法、時間進行法は2次精度のアダムスバッシュフォース法を用いており、空間の離散化は2次の中心差分を用いた。数値計算領域は流れ方向には半径の6.4倍に相当する  $6.4R$  としている。また、スマゴリンスキー定数  $C_s$  は0.1として計算した。入口と出口とでは周期境界条件を課した。菊山ら<sup>4)</sup>の実験では、充分発達した乱流が自軸回転の円管に入ってきた場合、乱流が弱められ層流化するが、管径の約150倍の助走区間を過ぎると速度分布は変化しないことが示されているので、この領域を数値計算領域とすれば入口と出口とで周期境界条件を課することができるものと考えられる。数値計算は  $Re=10000$  で行われ、摩擦速度  $u_\tau$  と半径  $R$  で定義されるレイノルズ数を  $Re_\tau=420$  とし、壁面境界条件は Non-slip 条件を採用している。時間刻みは  $\Delta t=0.0001$  とし、格子数は  $40 \times 40 \times 80$  である。旋回速度と平均

\*東京大学生産技術研究所 第2部

速度の比として定義される旋回比は  $N=0.5$  として計算した。これらの数値計算は FACOM VP-100 を用いて行われ、1 ステップあたりの計算時間は約 3 秒であり、無次元時刻で  $t=38$  まで計算を進めた。

### 3. 数値解析結果と考察

図 1 は主流方向平均速度分布であり、横軸は円管半径を無次元化して 1 にしたときの値を示しており、また縦軸は主流方向平均速度を円管内断面の平均速度で無次元化した値を示しており、シンボル○は円管が静止している場合の LES の計算結果であり、実線は Laufer<sup>10)</sup> の充分発達した円管内乱流の実験結果である。シンボル△は円管が回転している場合の LES の計算結果であり、破線は菊山ら<sup>4)</sup> の自軸まわりに回転する円管内乱流の実験結果である。LES の結果は円管が自軸まわりに回転すると流れが層流化の方向に進む傾向をとらえており、実験結果ともよく一致していることがわかる。図 2 は主流方向平均速度分布であり、横軸は無次元長さ  $y^+$  を示しており、縦軸は無次元速度  $u^+$  を示しており、シンボル○と△は静止円管と回転円管の LES の計算結果であり、実線は粘性底層と対数速度領域を示している。円管が静止している場合の LES の計算結果は対数速度領域にほぼ一致した結果となっているが、円管が回転している場合は流れが層流化しているため、対数速度領域から上方へずれていっていることがわかる。図 3 は周方向および半径方向の、図 4 は流れ方向の乱流強度分布を示しており、実線は円管が静止している場合の LES の計算結果であり、図 3 中で上の実線は周方向の乱流強度分布、下の実線は半径方向の乱流強度分布である。また、破線は円管が回転している場合の LES の計算結果である。この結果より、円管が回転している場合は、周方向、半径方向および流れ方向ともに乱流強度が減衰し層流化していることがわかる。図 5 はレイノルズせん断応力の分布である。計算結果は GS 成分に SGS 成分を足しあわせたものを示している。実線は円管が静止している場合の LES の計算結果、破線は円管が回転している場合の LES の計算結果である。円管が回転している場合は、せん断応力が約 4 割程度減衰して、菊山らの実験結果の傾向を再現していることがわかる。図 6 は周方向の平均速度分布を示しており、縦軸は周方向の平均速度を円管の回転速度で無次元化した値を示している。菊山らの実験では周方向の平均速度分布は、円管の回転速度によらずほぼ放物線上にのることがわかっており、今回の計算でも、放物線上にのる傾向を示している。図 7 は回転がない場合の、図 8 は自軸回転の場合の圧力変動  $p'$  の円管断面および流れ方向断面図をそれぞれ示している。図中の実線のコンターは正值、

破線のコンターは負値を示している。2 つの図を比べて見ると明らかなように、自軸まわりに回転している場合には遠心力の効果が入っているため、圧力の等値線が円管壁近傍に密集して、回転がない場合とはかなり違った分布になっていることがわかる。また図 9 は回転がない場合の、図 10 は自軸回転の場合の円周長さの  $1/4$  断面における  $y^+=5.0$  でのストリーク構造をそれぞれ示している。実線のコンターは高速ストリーク、破線のコンターは低速ストリークを示している。2 つの図より円管壁近傍には縦渦構造が存在していることがわかるが、回転がない場合にはストリーク構造が流れ方向に細長くのびていてかなり密集しているのに対して、自軸まわりに回転している場合には、周方向回転の影響でストリーク構造が周方向に引き伸ばされ、その向きも回転方向にずれてらせん状に近い分布になっていて回転がない場合とは異なっていることがわかる。すなわち自軸回転は、円管壁近傍でのストリーク構造を破壊する作用があり、そのためにせん断応力が減少し流れが層流化していったものと考えられる。

### 4. ま と め

本研究では LES を自軸回転円管内旋回乱流に適用した。その結果、主流方向平均速度と乱流強度分布およびせん断応力分布はいずれも、自軸回転の効果により減衰しており、層流化現象が起こっていることが確認できた。また周方向の平均速度もほぼ放物線上にのることが確認でき、実験結果と一致した。一方、円管壁近傍でのストリーク構造はせん断応力生成に密接に関係しており、自軸回転によりストリーク構造が変化してせん断応力が減少し流れが層流化していく挙動をとらえることができた。今後はさらに複雑な旋回乱流である静止円管内旋回乱流の LES による 3 次元数値シミュレーションを試みることにする。

(1994年11月2日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 平井ら, 機論 B, 54巻, 504号 (1988), p. 1962.
- 2) 吉沢, 横井, 生産研究, 44巻, 2号 (1992), p. 10.
- 3) 横井ら, 生産研究, 45巻, 1号 (1993), p. 25.
- 4) 菊山ら, 機論 B, 48巻, 432号 (1982), p. 1431.
- 5) 山田, 今尾, 機論 B, 46巻, 409号 (1980), p. 1662.
- 6) 平井ら, 機論 B, 52巻, 476号 (1986), p. 1608.
- 7) 河村, 三島, 機論 B, 57巻, 536号 (1991), p. 49.
- 8) 富樫, 小林, 第 7 回 CFD シンポ (1993), p. 287.
- 9) Togashi and Kobayashi, Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference, (1994), p. 102.
- 10) Laufer, NACA Report (1954), No. 1174.

研究速報

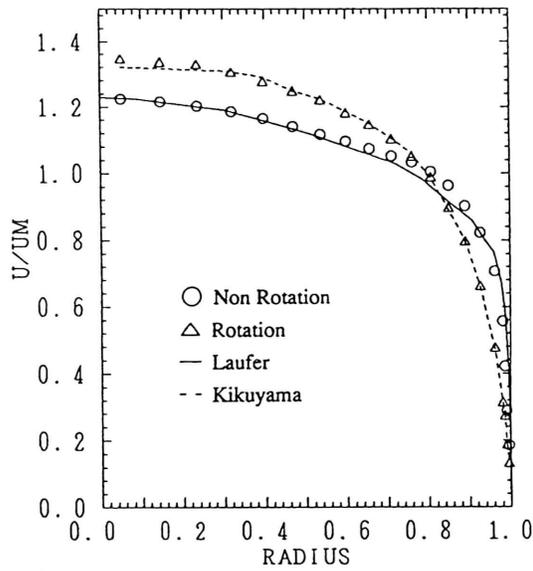


図1 主流方向平均速度分布

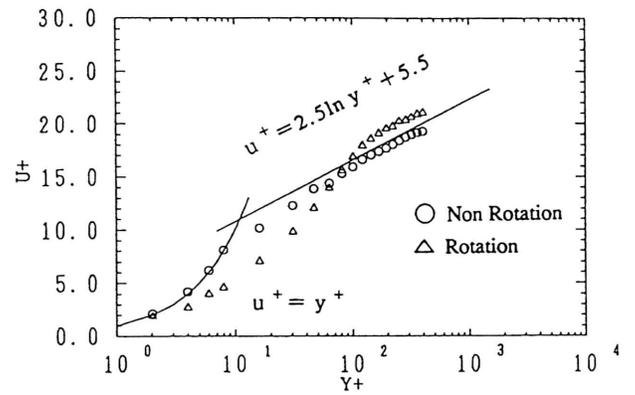


図2 主流方向平均速度分布

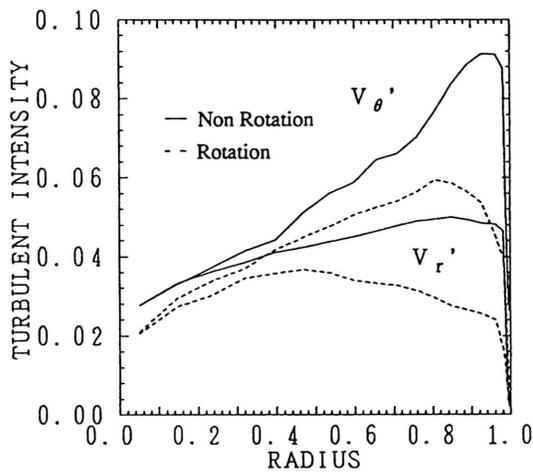


図3 周方向および半径方向乱れ分布

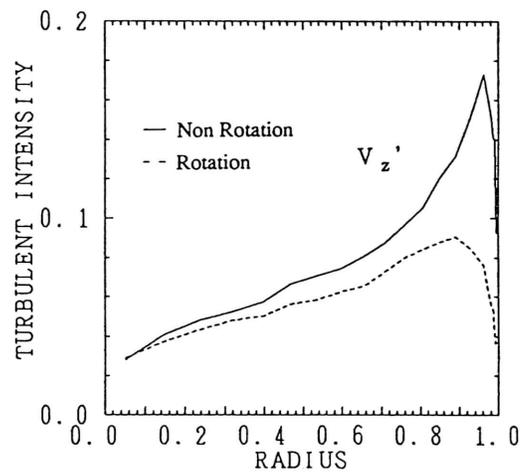


図4 主流方向乱れ分布

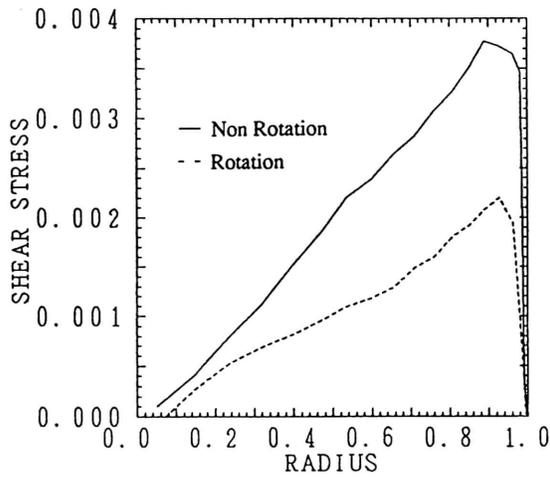


図5 せん断応力分布

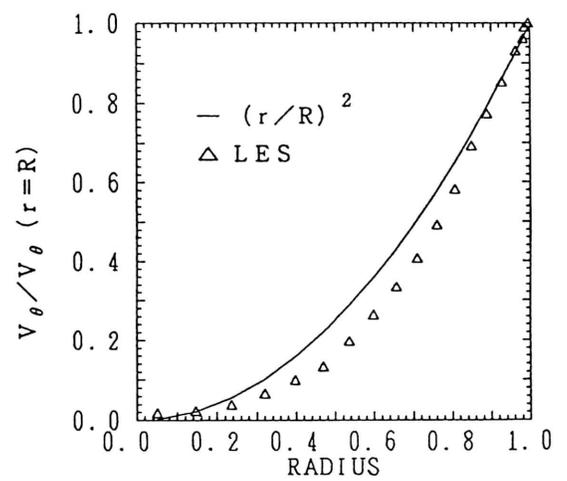


図6 周方向平均速度分布

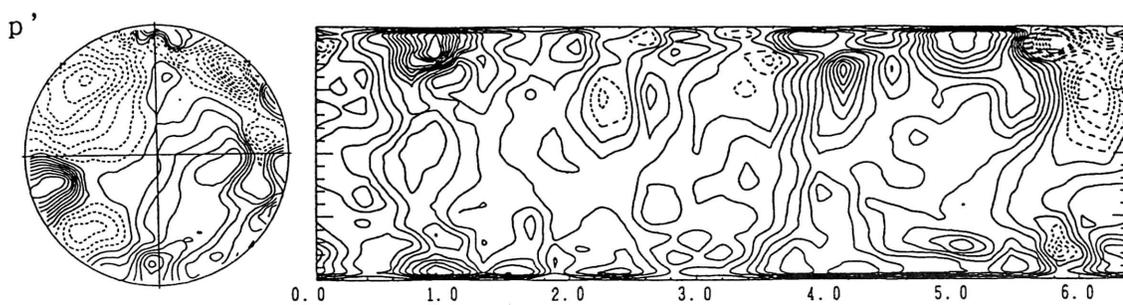


図 7 回転がない場合の圧力変動分布

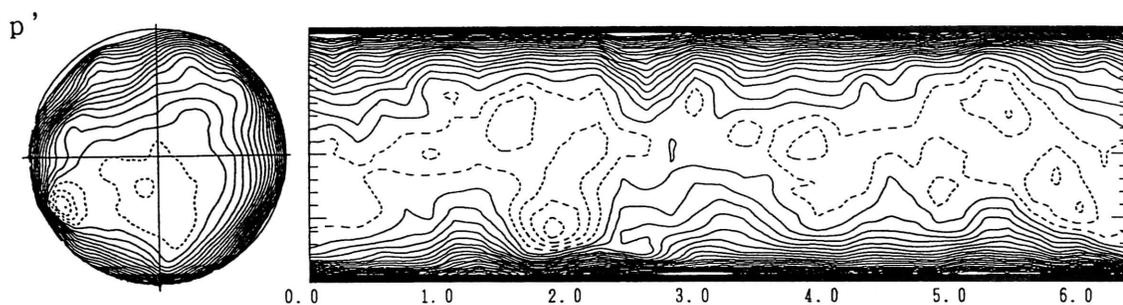


図 8 自軸まわりに回転している場合の圧力変動分布

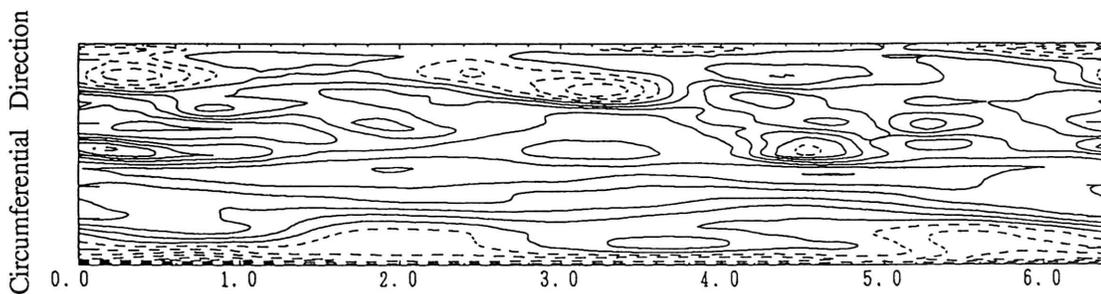


図 9 回転がない場合のストリーク構造  
( $y^+ = 5.0$ , 円周長さの 1/4 断面)

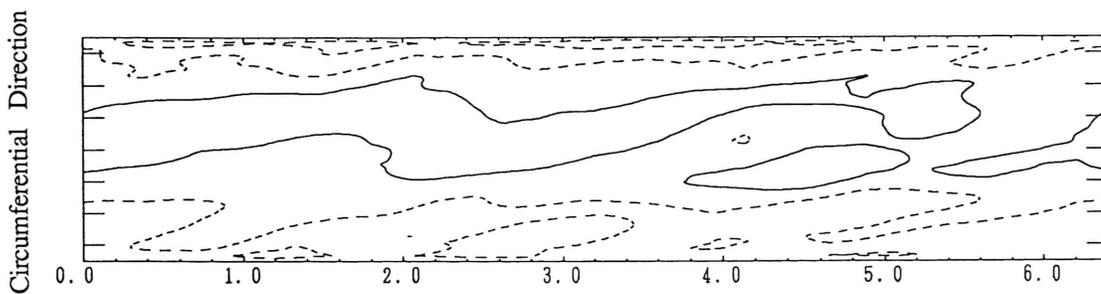


図 10 自軸まわりに回転している場合のストリーク構造  
( $y^+ = 5.0$ , 円周長さの 1/4 断面)