

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560147

研究課題名（和文）

内側壁面が回転する環状曲面拡大流路内乱流の瞬時 3 次元渦構造と熱伝達

研究課題名（英文）

Instantaneous Three-Dimensional Vortex Structure and Heat Transfer of Turbulent Flow in Expanding Concentric Annular Flow-Passage with Rotating Inner-Wall

研究代表者

村田 章 (Murata Akira)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60239522

研究成果の概要（和文）：

凹型，凸型，二円錐，二円筒，二円板流路という複数の不安定流れ要因が同時に作用する 5 流路での乱流場の挙動を LES (Large Eddy Simulation) と DNS (Direct Numerical Simulation) による数値解析と粒子画像流速計による速度場計測によって調べた。貫流レイノルズ数，内側壁回転数の無次元数であるテイラー数および流路形状が瞬時 3 次元渦構造，乱流統計量，熱伝達率に与える影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Five flow passages of concave, convex, conical, cylindrical, and disk types were examined for their turbulence behavior. In these passages, multiple flow-instability factors can simultaneously affect the flow. Large Eddy Simulation (LES), Direct Numerical Simulation (DNS), and Particle Tracking Velocimetry (PTV) measurement were performed. The effects of through-flow Reynolds number, Taylor number, and geometry of flow passages on instantaneous three-dimensional vortex structure, turbulence statistics, and heat transfer coefficients were clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2008 年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2009 年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学，可視化，不安定流れ，計算流体力学，粒子画像流速計，ラージエディシミュレーション，乱流

1. 研究開始当初の背景

内側壁面が回転する環状流路は遠心分離機，ジャーナル軸受，回転機械にみられ，工業的に重要である。この流路では，貫流によるせん断不安定に加えて，回転によるせん断

不安定，周方向流線曲率による遠心力不安定（テイラー渦），凹曲面上での貫流方向流線曲率による遠心力不安定（ゲルトラー渦）といった複数の不安定流れ要因が同時に作用する。これまでに単純形状である二重円筒流

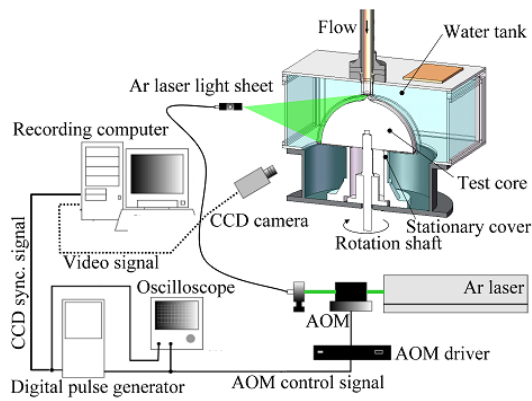


図1 実験装置概要

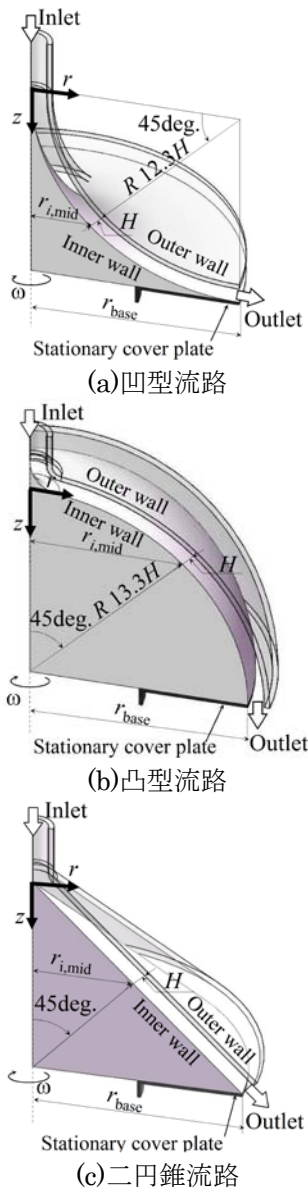


図2 実験で用いた環状拡大流路テストセクション($r_{base}=200\text{mm}$, $H=15\text{mm}$)

路については層流から乱流遷移域において

多くの研究がなされている。しかし、実際に工業的に利用される流路では流れは乱流であり、軸方向に流路面積が変化する場合が多い。この流路拡大の効果までを含めて乱流場を取り扱った研究例はこれまでにない。

2. 研究の目的

本研究は、複数の不安定流れ要因が同時に作用する内壁が回転する環状拡大流路内乱流の挙動を LES (Large Eddy Simulation) と DNS (Direct Numerical Simulation) による数値解析と粒子画像流速計 (PTV: Particle Tracking Velocimetry) による速度場計測によって調べ、(1) 各パラメータ (レイノルズ数、テイラー数、流路形状) の変化に応じて瞬時速度場 (渦構造) はどのような 3 次元空間分布・周期的構造を示すのか、(2) その時の乱流熱伝達率分布はどのような挙動を示すのか、を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

実験では、粒子画像流速計により凹型、凸型、二円錐流路について計測を行い、計算結果の信頼性確認を行う。流路全体の様子を調べる場合 (図 1) には、音響光学素子でシャッターリングしたパルス光を用いて CCD カメラでの撮影を行い、2 時刻法によって粒子追跡を行った。貫流方向下流域での乱流統計量を詳細に調べる場合には連続光照明と高速度ビデオでのシャッターリングを用い 4 時刻法での粒子追跡を行った。図 2 に実験で用いた 3 種類の流路を示す。貫流レイノルズ数を入口部流速 U_{in} を用いて $Re_{in}=U_{in}2H/\nu$ 、テイラー数を流路中央内壁半径 $r_{i,mid}$ を用いて $Ta=r_{i,mid}\omega H/\nu$ と定義した。実験では $Re_{in}=1000$, $Ta=0\sim 6000$ での計測を行った。

数値解析では、一般曲線座標系での 2 次精度差分法を用いた。LES の格子解像度以下の乱流輸送成分を表わす SGS (Subgrid Scale) モデルにはラグランジュダイナミック SGS モデルを用いた。但し、本研究の計算条件内では、SGS 渦粘度が動粘度の 1% を上回る体積は全体積の 2% 以下であり、ほとんど全ての乱流輸送を再現する計算条件になっている。実際にいくつかの条件については DNS での計算を行い、LES の結果と一致することを確認した。計算は東京大学情報基盤センターの HITACHI HA8000 を用い、最大 1024 コアでの MPI と OpenMP 併用による並列計算を行った。計算領域の周方向サイズは 90 度または 360 度とした。実験で用いたテストセクションと幾何学的にほぼ相似な形状 ($r_{base}H=13.3$ (実験), 13.5 (計算)) を用いた。また、二円筒流路の場合には二円錐流路での $r_{i,mid}$ と等しい内壁半径とした。最大の格子点数は貫流 (ξ), 流路高さ (η), 周 (ζ) 各方向に $512 \times 99 \times 1024$

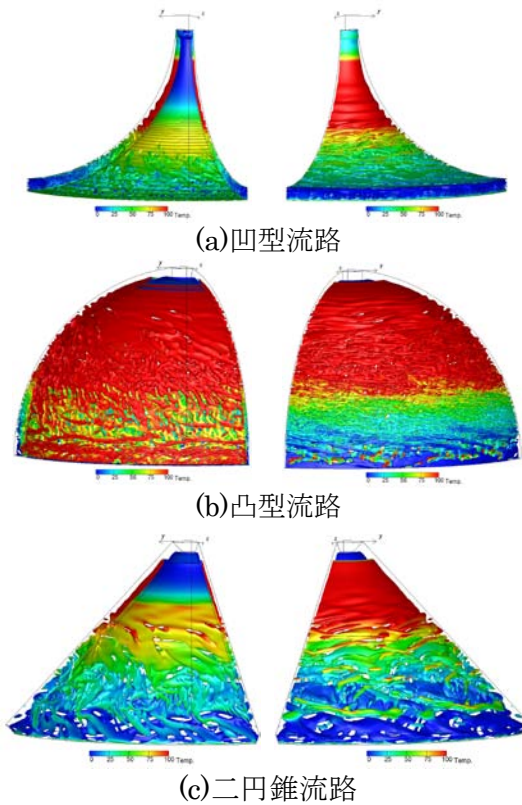


図 3 第二不変量等値面での瞬時 3 次元渦構造可視化結果 ($Ta=4000$, 色は温度を表わす)

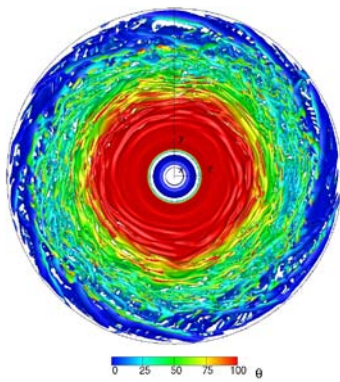


図 4 二円錐流路での全周 360 度での計算結果 ($Ta=4000$, 上部から眺めた図)

である。境界条件は、入口で放物型速度分布、出口で対流流出条件、周方向に周期境界条件とした。また、壁面ではすべりなし、等熱流束条件とした。凹型、凸型、二円錐、二円筒、二円板の 5 種類の流路について貫流レイノルズ数 ($Re_{in}=0, 1000, 2000$), テイラー数 ($Ta=0, 1000, 2000, 4000$) を変化させて計算を行い、瞬時 3 次元渦構造、乱流統計量、そして熱伝達率分布を調べた。以下代表的な結果として、凹型、凸型、二円錐流路の場合を中心に説明する。また、別途記載がない場合には $Re_{in}=1000, Ta=4000$ の条件の結果である。

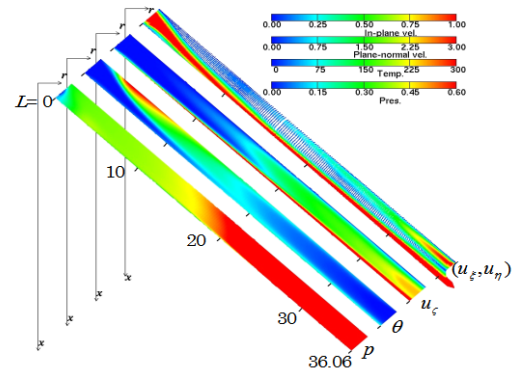


図 5 時間・周方向平均値の子午面内分布(二円錐流路, LES 解析結果, $Ta=4000$)

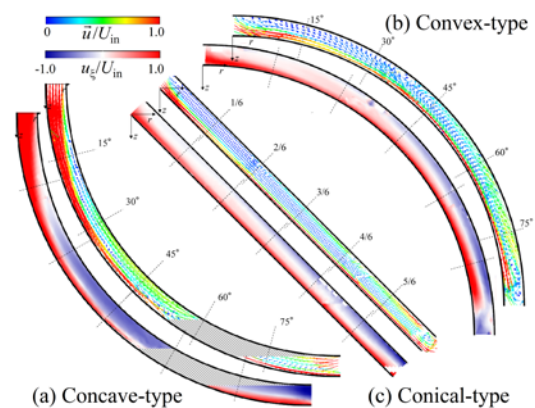


図 6 PTV 計測による 3 流路形状の子午面内平均速度分布 (貫流方向速度成分と面内速度ベクトル)

4. 研究成果

(1) 瞬時 3 次元渦構造

図 3 に 3 種類の流路での計算結果から瞬時 3 次元渦構造を速度勾配テンソルの第二不変量等値面で可視化した結果を示す。各形状で左図は内壁側から、右図は外壁側から眺めた結果である。幾何学的な形状変化によって、回転遠心力方向と貫流方向の相対的な角度そして流路拡大率が変化するので、流れ場・温度場も流路形状によって大きく変化する。また、渦構造は貫流方向、壁面垂直方向に変化をし、統計的に均質な周方向を含めて、瞬時渦構造は空間 3 次元分布を持つことがわかる。図は省略するが、回転数 (Ta 数) をゼロから増加させていくと、最初周方向に一樣な渦構造は次第に下流域でらせん渦構造を形成し、さらに Ta 数を増加させると図 3 に示すような複雑な渦構造となる。乱流遷移域を含む計算であるので周方向計算領域サイズが狭いと本来発現するはずの振動モードが排除されてしまう可能性がある。そこで

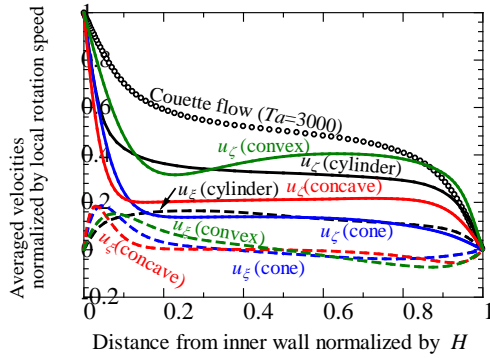


図7 時間・周方向平均速度分布（貫流方向全長の83%位置での値）

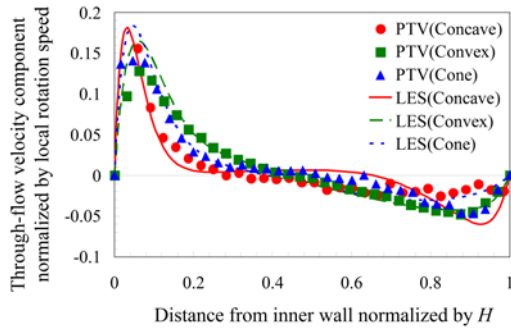


図8 貫流方向平均速度成分における PTV 計測と LES 解析の結果比較（貫流方向全長の67%位置での値）

図4に示すように、いくつかの条件については格子解像度を落とさずに全周360度での計算を行い、周方向計算領域サイズが計算結果に影響を与えないことを確認している。

(2) 時間・周方向平均値（乱流統計量）

流れの様子を説明するために図5に二円錐流路の場合の時間・周方向平均した子午面内速度、温度、圧力分布を示す。内壁回転によって内壁近傍流体は周方向速度成分を増加させ、その結果遠心力が半径方向に作用する。二円錐流路では遠心力方向が貫流方向から45度傾いているが、遠心力の作用により内壁側流体は貫流方向に加速される。回転半径は下流に行くほど大きいので、この遠心加速は下流ほど顕著になる。一方出口部外壁側では質量保存を満足するために逆流入が生じる。計算では流入流体の無次元温度を0としているので、下流部外壁側での流体温度は低下する。圧力は流路拡大による減速によって貫流方向に上昇する。貫流方向と遠心力方向がなす角度は凹型、凸型流路では貫流方向位置によって変化し、また、流路拡大率も貫流方向位置によって変化するので、その流れ場は流路形状に大きく依存する。図6に PTV 計測による子午面内速度分布を示す。図中灰色で塗りつぶした部分は照明の影となり計測できない領域である。計算で再現された基

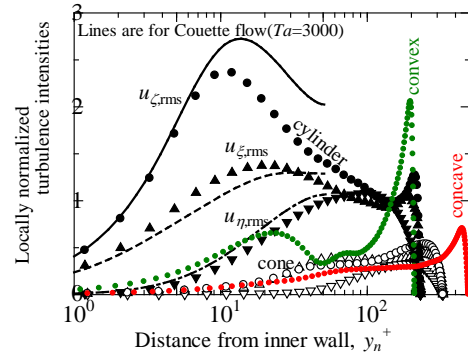


図9 乱れ強度分布（貫流方向全長の83%位置での値。凹型、凸型流路は周方向成分だけを表示）

本的な流れの様子（遠心力による貫流方向加速、出口部外壁側からの逆流入等）が計測できている。

図7に流路全長の83%位置（下流域）での周方向（ u_θ ）、貫流方向（ u_z ）速度成分の分布を示す。周方向速度成分（実線）をみると、二平板間クエット流れ（○印）では内・外壁で点対称分布になるのに対し、環状流路では内壁回転は Taylor-Couette 不安定を誘起するので内壁側でより速度勾配が急になっている。貫流方向速度成分（破線）は回転遠心力方向と貫流方向が直交する二円筒流路を除いて、他の流路では内壁近傍の領域で正の値を持つ。また、貫流方向速度成分が正の値をもつ領域サイズは遠心力方向と貫流方向が出口で一致、直交する凹型、凸型流路の場合にそれぞれ最も狭く、広くなる。図8は貫流方向速度成分の PTV と LES の結果を流路全長の67%位置で比較したものである。流路形状変化に応じて貫流方向速度成分が正の値をもつ領域サイズ変化の様子が PTV 計測でも捕えられている。

図9は流路全長の83%位置（下流域）での局所摩擦速度を用いて整理した乱れ強度分布である。二円筒の場合には二平板間クエット流の値に近い値をとる。一方、回転遠心力による貫流方向加速がある他の流路では内壁側で値が非常に低い。周方向成分で比較すると、遠心力方向と貫流方向が近づくほど加速損失の影響で乱れ強度が減衰することがわかる。

(3) Nusselt 数分布

図10に内外壁上での瞬時局所 Nusselt 数分布を示す。図5、図6に見られたように上流域では貫流は内壁側に偏るので、流路上流域では内壁、外壁で Nusselt 数はそれぞれ高く、低くなる。また、出口部では外壁側から低温流体の逆流入があるので、その近傍での Nusselt 数は高くなる。図11は二円錐流路で

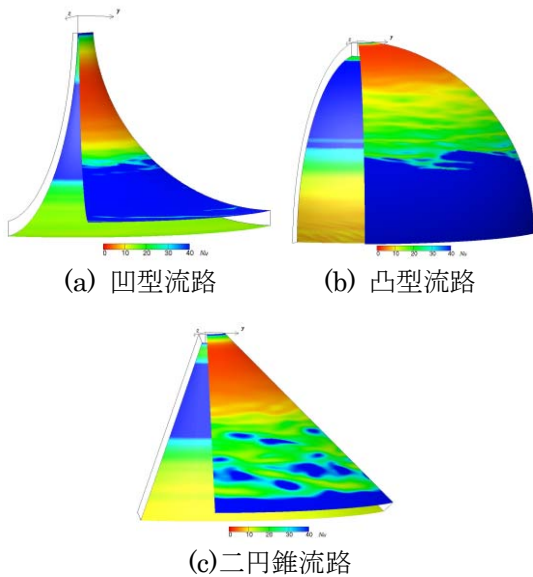


図 10 瞬時局所 Nusselt 数分布 ($Ta=4000$)

の時間・周方向平均 Nusselt 数分布である。静止 ($Ta=0$) の場合には、入口部で貫流が外壁から剥離し、内壁側に偏るので、内壁で Nusselt 数は一度極大値 ($L=9$ 辺り) をとる。さらに下流では流路拡大の効果で内壁から貫流が剥離し、今度は外壁側に偏るのでそこで極大値をとる ($L=18$ 辺り)。内壁を回転させると遠心力によって内壁側流体は貫流方向の運動量を与えられるので、内壁からの剥離はなくなる。また、出口部近傍外壁側では低温流体の逆流入があるのでそこでの Nusselt 数は非常に高くなる。逆流入が生じる場合には出口での対流流出条件が結果に与える影響を調べる必要がある。図 11 で線なしの小さな記号は出口部に長さ $5H$ の延長部 (静止, 断熱条件) を設けた場合の結果である。逆流入は低温流体を運び込むので、出口延長部の導入は速度場よりも Nusselt 数に対する影響が大きい。しかし、図 11 に示すように定性的結果は変わらないことがわかる。

(4) まとめ

内壁が回転する環状拡大流路内乱流の LES/DNS 解析, PTV 計測を行い本研究での流路形状と条件において以下の結論を得た。

- ① $Ta=4000$ において瞬時 3 次元渦構造を有する流れ場が形成された。流路形状の違いは、回転遠心力方向と貫流方向のなす角度および流路拡大率を変化させ、流れ場と温度場を変化させる。
- ② 回転遠心力による貫流方向速度成分の加速は乱れ強度を大きく減衰させる。
- ③ 流路拡大による剥離と出口部外壁側からの逆流入によって Nusselt 数は複雑な分布となる。

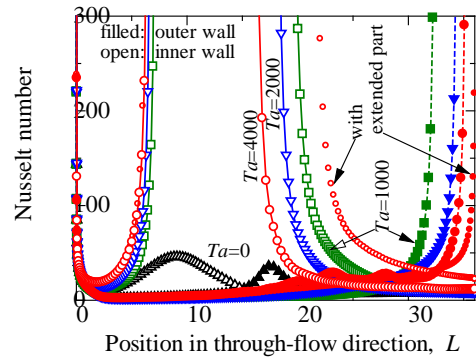


図 11 時間・周方向平均 Nusselt 数分布への Ta 数の影響 (二円錐流路)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Murata, A. and Iwamoto, K., Heat and Fluid Flow in Cylindrical and Conical Annular Flow-Passages with Through Flow and Inner-Wall Rotation, International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有, Vol. 32, 2011, pp. 378-391
- ② 齋藤 博史, 村田 章, 朴 俊輝, 岩本 薫, 貫流を伴う内壁が回転する凹型, 凸型, 円錐型環状流路内流れの 2 次元 PTV 計測, 第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 査読無, 2011
- ③ 齋藤 博史, 村田 章, 池谷 拓巳, 岩本 薫, 内壁回転と貫流が有る凹型, 凸型, 円錐型環状拡大流路内流れの 2 次元 PTV 計測, 第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 査読無, 2010, D221
- ④ Murata, A. and Iwamoto, K., Heat and Fluid Flow in Expanding Concentric Annular Flow-Passage with Rotating Inner-Wall, CD-ROM Prof. of 14th International Heat Transfer Conference, 査読有, 2010, IHTC14-22403
- ⑤ Saito, H., Murata, A., Ikegaya, T., and Iwamoto, K., 2D-PTV Measurement of Expanding Concentric Annular Flow with a Rotating Inner Wall, Journal of Flow Visualization and Image Processing, 査読有, Vol. 17, 2010, pp. 243-254
- ⑥ 池谷 拓巳, 村田 章, 齋藤 博史, 岩本 薫, 内側壁面が回転する環状曲面拡大流路内流れにおける流路形状の影響, 第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 査読無, Vol. 1, 2009, C1-133

- ⑦ Saito, H., Murata, A., Ikegaya, T., and Iwamoto, K., 2D-PTV Measurement of Expanding Concentric Annular Flow with Rotating Inner-Wall, CD-ROM Proc. of the 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 査読有, 2009, 22B-1

〔学会発表〕(計3件)

- ① 齋藤 博史, 村田 章, 朴 俊輝, 岩本 薫, 貫流を伴う内壁が回転する凹型, 凸型, 円錐型環状流路内流れの2次元PTV計測, 第48回日本伝熱シンポジウム, 2011/6 発表確定, 岡山
- ② 齋藤 博史, 村田 章, 池谷 拓巳, 岩本 薫, 内壁回転と貫流が有る凹型, 凸型, 円錐型環状拡大流路内流れの2次元PTV計測, 第47回日本伝熱シンポジウム2010/5/27, 北海道
- ③ 池谷 拓巳, 村田 章, 齋藤 博史, 岩本 薫, 内側壁面が回転する環状曲面拡大流路内流れにおける流路形状の影響, 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009/6/2, 京都

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 章 (Murata Akira)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：60239522

(2) 連携研究者

岩本 薫 (Iwamoto Kaoru)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：50408712

齋藤 博史 (Saito Hiroshi)
東京農工大学・工学府・技術専門職員
研究者番号：40401450