C210

偏心二重円筒間に発生する Taylor 渦の非定常挙動

飯盛 勇人[○](早大院), 太田 有(早大),
柴崎 光治(東京電力), 山田 敦(三菱重工)Unsteady Behavior of Taylor Vortex Flow
in Eccentric Rotating Cylinder

Hayato ISAKAI, Yutaka OHTA, Koji SHIBASAKI and Atsushi YAMADA

ABSTRACT

Taylor vortices generated between eccentric rotating cylinder and outer cylinder were investigated by experiments and by three-dimensional incompressible Navier-Stokes simulation. The focus of the research is to elucidate effective cooling method for inner fluid material by the jet injections from outer cylinder wall. In case of concentric rotating cylinder, Taylor vortex cells show steady behavior, so that it takes long time to become a uniform temperature. In contrast, eccentric rotating cylinder which causes unsteady behavior Taylor vortex flow and transition easily, accomplishes thermally homogeneous fast. Numerical results seem to agree well with those of experiments. As a result, many useful information concerning flow and temperature fields within rotating cylinders was able to be acquired by applying an artificial disturbance.

Keywords: Taylor Vortex Flow, Unsteady Flow, Cooling, CFD, Flow Visualization

1. 緒言

内円筒が回転する二重円筒間の Taylor 渦流れに関してはセルの分岐現象や内部流れ構造, 内円筒に作用する流体力の挙動に着目した研究が数多く報告⁽¹⁻⁵⁾されているが, その殆どは同心二重円筒間流れを対象としており, 偏心した場合の流れ場を扱った例は極めて少ない。また, Taylor 渦列の非定常熱伝達特性はジャーナル軸受の潤滑油冷却とも関連し, 工学上有用であるにもかかわらず, これまでにほとんど研究報告は行われていない。

著者らは既に, 二重円筒間に発生する Taylor 渦流れに関して, その初生, 成長過程を実験的および数值的に解明するとともに, 外円筒からの噴流印加によってセル数を制御する試み⁽⁶⁾を行った。本研究では, 内円筒が回転する同心および偏心二重円筒間に発生する Taylor 渦流れに関して, 温度差を与えた噴流を印加した際の非定常挙動を実験および数値解析により調査した。

同心二重円筒間には安定した Taylor 渦が生じ, 冷噴流印加直後は噴流印加口付近の領域のみが急激に冷却され, セルの崩壊と同時に全領域に熱が拡散し, 分岐後は徐々に温度が均一になることが確認された。さらに, 偏心二重円筒間では偏心率が大きくなるほど不安定な Taylor 渦流れが生じ, 全領域が冷却されるまでに要する時間が短くなることが確認され, Taylor 渦の安定性と熱伝達の関連性を見出すことができた。

2. 実験装置および解析方法

2.1 実験装置および計測方法

Fig. 1 に本研究で用いた装置の概略を示す。内円筒(図中①)はジュラルミン製で直径 $2R_1 = 90$ [mm], 外円筒②は透明アクリル製で直径 $2R_2 = 120$ [mm], 内外円筒間隙 $L = R_2 - R_1 = 15$ [mm] で, 内外円筒半径比 $a = 0.75$ である。偏心率は任意に設定が可能である。数値計算結果と比較するため, 軸方向高さを $H = 90$ [mm], アスペク

①. Rotating Inner Cylinder. ②. Fixed Outer Cylinder.
③. Working Fluid. ④. Heat Insulator. ⑤. Jet Injection Nozzle.
⑥. Jet Injection Nozzle. ⑦. Motor. ⑧. Tank. ⑨. Over Flow Tank.
⑩. Pump. ⑪. Tank. ⑫. Pump. ⑬. Heater.

Fig. 1 Experimental Apparatus.

ト比を $\Gamma = H/L = 6$ とした。内円筒は減速比 10 のギアボックスを介して接続されたブラシレス DC モータ⑦により駆動され、パーソナルコンピュータに接続される専用コントローラにより加速度および回転数を制御した。内円筒回転数は 0 から 300 [rpm] の範囲で連続可変である。

Fig. 2 に噴流口および温度測定位置を示す。外円筒に設けた制御用ノズルは 12 個、ノズル口径は $\phi = 3$ [mm] である。噴流は上端より 4 番目のセルを崩壊させるように印加するため、下端から 45 [mm] の位置に噴流入口(噴流口 I)を、30 [mm] の位置に噴流出口(噴流口 II)を設けた。偏心時に最も狭くなる周方向位置を $\theta = 0$ [deg] とし、60 [deg] ごとに噴流口 I、II を一対として 6 方向に設けた。噴流口の設置による流れへの影響は殆ど見られなかった。噴流の流量はポンプ直後に設置された弁により調整するが、タンクの液位低下によるポンプ揚程への影響を極力抑えるため、ポンプ上部にオーバーフロータンク⑨を設置した。内部流れ構造の可視化にはデジタルビデオカメラを用いた。温度場測定には、周方向 $\theta = 90, -90$ [deg]、軸方向は各セルの高さの中央に位置するように、熱伝対温度計を設置した。また、感温部の位置は外円筒壁面より半径方向で 13 [mm] とした。

作動流体は混合重量率 70 [%] のグリセリン水溶液を用いた。可視化には平均粒径 45 [μm] のアルミ粉を混合し、界面活性剤として無リン洗剤を数滴添加した。内円筒を回転させた後、Taylor 渦流れが安定し、アスペクト比に相当する安定なセル数 ($\Gamma = H/L = 6$) で定常流れとなった時点でポンプを起動して噴流を印加した。

Fig.2 Position of Jet Injection Nozzle, and Temperature Measuring Instrument.

2.2 数値解析法

数値計算では以下に示す無次元化した積分形の非圧縮性連続の式(1)、Navier-Stokes 方程式(2)、エネルギー方程式(3)を基礎方程式とする。各計算で最終的に到達する内円筒速度を代表速度、内円筒隙間を代表長さとして式を無次元化した。空間には二次精度中心差分、時間発展にはオイラー陽解法を用いて有限体積法により式の離散化を行い、HSMAC 法に基づく圧力補正法を行った。

$$\int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{v} dV + \int_S \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \frac{1}{Re} \text{grad} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS - \int_S p \mathbf{n} dS \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V T dV + \int_S \mathbf{v} T dS = \int_S \frac{1}{Pr Re} \text{grad} T \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \frac{Ec}{Re} \Phi dV \quad (3)$$

Fig. 3 に計算対象の概略図を示す。内円筒が偏心した場合の計算をするため、計算格子は一般座標系のコロケート格子とした。格子点数は周方向 362、半径方向 32、軸方向 150 で、総格子点数は約 170 万点である。偏心させた際に最も流路の狭くなる周方向位置を $\theta = 0$ [deg] とした。数値計算では内外円筒半径比 $a = R_1/R_2 = 0.75$ 、アスペクト比 $\Gamma = 6.0$ とし、偏心率 $e = e/(R_2 - R_1)$ を変化させている。偏心率は $e = 0.0, 0.4$ で行った。内円筒速度は静止状態から一定の加速度で増加させ $Re = 1000$ となったところで回転数を一定に保った。

外円筒壁面からの噴流は、上端から 4 番目のセルが崩壊するように上端から 3, 4 番目のセル間に外円筒から内円筒方向の噴流、および 4, 5 番目のセル間に内円筒から外円筒方向の噴流(ノズル口から流出)を印加した。また、噴流口は軸方向に 2 箇所一対で外円筒に設け、流体を流入出させるものとし、 $\theta = 0$ [deg] から周方向に 60 [deg] ごとに 6 箇所配置して計算を行った。この条件は前述した実験条件と同一である。噴流出口断面では均一な速度分布を仮定し、外円筒および両端面は静止壁とした。無次元時間 $t^* = 500$ における定常 6 セル流れに対し、ステップ状に流体を噴出し、その後は一定状態を保った。

一方、エネルギー方程式の解析では、粘性散逸によって発生する熱を噴流で冷却する試みを行なった。対象流体は水を仮定し、101.325 [kPa]、293.15 [K] の状態量から

Fig.3 Computational Domain.

Fig.4 Visualization of Bifurcation Process of Taylor Vortex Cells.

Fig.5 Vorticities and Secondary Flow Vectors.

算出されるプラントル数 $Pr = 7.02$, エッカート数 $Ec = 0.26$ を用いた. 代表温度差は同心条件における $Re = 1000$ となる無次元時間 $t^* = 125$ の最大温度と初期温度に仮定した 0 [K] との差を用いた. 軸方向端面は共に固定端とし, 壁面条件は断熱とした. 噴流の無次元温度を -2 に設定し, 無次元時間 $t^* = 500$ から流体を流入出させて計算を行った.

3. 実験装置および解析方法

3.1 偏心率 0.0

内円筒の始動に伴い上下両端よりセル状の Taylor 渦

が発生し, 分岐を繰り返して安定した 6 セル流れになる. Fig. 4 にセルの噴流印加による分岐過程を示す. 噴流印加後, 第 4 セルが噴流によって縮小され, 第 1 セルと第 2 セルが拡大した(Fig. 4 (ii)). 続いて, 第 3 セルも縮小し, 第 1 セル第 2 セルがさらに拡大した(Fig. 4 (iii)). その後, 第 3 セルと第 4 セルの境界に波動が生じ(Fig. 4 (iv)), 瞬時に全領域に渡って流れが乱れ, 4 セルに分岐した. 分岐した時点では結合した第 3 セルが大きく各セルの大きさは不均一となっているが, 時間の経過によりセルの大きさが均一となり, 安定した流れとなった. また, 噴流を停止しても 6 セルに戻ることはなく, 4 セル

構造を維持し続けた。数値計算結果を Fig. 5 に示す。噴流印加によって、実験同様に第 4 セルが縮小し、第 1 セルおよび第 2 セルが第 3 セルを下方に押し出しながら拡大した。その後、縮小した第 4 セルが崩壊し、第 3 セルと第 5 セルが結合し、安定した 4 セル流れとなった。

温度測定結果を Fig. 6 に示す。冷噴流印加中では、印加口付近の中央部の熱が急激に低下した。その後、中央部の温度が緩やかに上昇すると同時に上下両端部の温度が緩やかに低下し、軸方向温度が均一になった。数値解析でも同様な結果を得られた。Fig. 7 に断面の温度分布を示す。冷噴流印加開始直後、第 3 セルの温度が急激に低下した(Fig. 7 (ii))。第 3 セルが崩壊したことにより、分岐後の第 2 セル第 3 セルに熱が拡散したが、上下両端のセルの温度は特に変化せず(Fig. 7 (iii))。セル同士では熱の伝達がほとんど行われなことがわかる。また、第 2 セルに注目すると、冷噴流印加停止直後にセル外周部が冷却され中心部の温度が高いこと(Fig. 7 (iv))。温度が均一になる過程にセル外周部の温度が中心部に比べ高いことより、セル内部の熱伝達もあまり行われな。

3.2 偏心率 0.2

内円筒始動後、偏心率 0.0 の場合と同様の挙動をとるが、6 セル流れへの分岐に要する時間は短い。特に最大流路 $\theta = 180$ [deg] では、セルの境界が非定常に波打ち、流れが不安定なため、容易にセル構造が崩壊している。噴流印加によって偏心率 0.0 の場合と同様に 4 セル構造に分岐するが、分岐に要した時間は短かった。

Fig.6 Temperature Fluctuation.

温度測定結果を Fig. 8 に示す。偏心率 0.0 の場合と同様に円筒中央部が急激に冷却されるが、全領域の温度が均一になるまでに要した時間が短かった。また、縮小流路 $\theta = 90$ [deg] での円筒中央部と両端部の温度差が拡大流路 $\theta = 270$ [deg] よりも小さい結果が得られた。従って、熱の軸方向への拡散が最大流路での不安定なセルで促され、同様な 4 セル流れである偏心率 0.0 の結果と差が生じたと考えられる。

3.3 偏心率 0.4

内円筒の始動に伴い、最小流路 $\theta = 0$ [deg] では 6 セル

Fig.7 Temperature and Secondary Flow Vectors.

Fig.8 Temperature Fluctuation.

を形成するが、上流からの乱れが伝わりセルの崩壊と形成を繰り返す不安定な流れとなった。また、最大流路では、円筒中央部にセルの境界が確認できるが、外円筒壁面の流れが乱れており、形成されたセル数の計測は不可能であった。Fig. 9に噴流印加後のTaylor渦流れを示す。噴流印加後、最小流路において、 $\theta = -45 \sim 0$ [deg]の上流側では4セル流れ、 $\theta = 0 \sim 45$ [deg]の下流側ではアスペクト比が高い $\theta = 0$ [deg]付近の流路を通過したため8セル流れを形成するが、非定常に乱れが生じセルの形成と崩壊を繰り返した。最大流路においては、4セルを形成したが常にセルの境界は波打ち不安定な流れとなった。分岐に要した時間は偏心率0.2に比べ短く、最大流路での流れがさらに不安定になり、これが分岐を促進していることがわかった。数値解析では、内円筒始動後は分岐を繰り返し6セル流れとなり、アスペクト比が小さい $\theta = 120 \sim 200$ [deg]の領域では、渦度が低く不安定であることがわかる。噴流印加直後は、最小流路では8セルに増加した(Fig. 10 (ii))が、第5セルと第7セルが結合(Fig. 10 (iii))し、第1セルと第3セルが結合して4セル流れに分岐した(Fig. 10 (iv))。噴流印加後は、安定せず、

4セル流れと6セル流れを交互に繰り返していった。最大流路では、まず第1セルおよび第2セルが拡大し、それに伴い第3セルおよび第4セルが縮小した(Fig. 10 (ii))。第4セルが崩壊し、第3セル第5セルが結合し、渦度が低く不安定な4セル流れとなった(Fig. 10 (iv))。

温度場測定では、偏心率0.2と同様に縮小流路での軸方向の温度差が拡大流路よりも小さい結果を得られ、さらに、偏心率0.2に比べ、軸方向の温度差の減少、ならびに温度が均一になるのに要した時間が短いことも確認された。Fig. 11に温度分布を示す。最小流路付近では、噴流印加開始直後に中心部のセルに熱が保持され(Fig. 11 (i))、その後も各セルが熱を保持していることが確認された(Fig. 11 (v))。それに対し、最大流路付近では冷噴流による冷却が広範囲に及んでおり(Fig. 11 (v))、渦度が低く不安定な領域があるTaylor渦は熱の拡散が促進されることが確認された。従って、偏心率が大きくなるにつれ、流路最大部での流れが不安定になり分岐が促進されること、ならびに不安定なTaylor渦の領域で熱の伝達が行われることにより、全領域の冷却に要する時間が短くなることがわかった。

(i) $t = 4.0$ sec
 $\theta = 0$ deg

(ii) $t = 4.0$ sec
 $\theta = 180$ deg

(iii) $t^* = 600$
 $\theta = 270$ deg

Fig.9 Visualization of Bifurcation Process of Taylor Vortex Cells.

Fig.10 Vorticities and Secondary Flow Vectors.

Fig.11 Temperature and Secondary Flow Vectors.

4. 結言

二重円筒間に発生する Taylor 渦流れへ噴流を印加した際の影響を実験および数値計算の両面より検討した。

安定した Taylor 渦は熱を保持し、外部および内部への熱伝達がほとんどおこなわれないことが確認された。また、偏心二重円筒間に発生した不安定な Taylor 渦流れでは分岐が容易に行われることによる熱の拡散、不安定な Taylor 渦の領域でのセル同士の熱の伝達が確認された。

参考文献

- 1) 東 他2名:機論, 58-555(1992-11), p. 3245.
- 2) 東 他2名:機論, 57-535(1991-3), p. 905.
- 3) 戸谷 他3名:機論, 56-532(1992-12), p. 3617.
- 4) 古川 他3名:機論, 66-643(2000-3), p. 665.
- 5) 山田 他3名:機械学会年次大会講演(2001-8), p. 59.
- 6) 辻井 他2名:機械学会流体工学部門講演会, (2006-10), p. 218.