

回転 2 重円筒管内流れのモード情報推移に対する内円筒増速率の影響

Effect of Inner-cylinder Acceleration on Mode-information Transition of Flows
between Two-concentric Rotating Cylinders

学 櫻本 実 (名大院) 正 渡辺 崇 (名大)
正 戸谷 順信 (長野高専)

Minoru KASHIMOTO, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya
Takashi WATANABE, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya
Yorinobu TOYA, Nagano National College of Technology, Tokuma 716, Nagano

Key Words: Taylor-Couette Flow , Mode Formation Process , Accelerating Flow ,
Flow Visualization , Three-Dimensional Flow

1. まえがき

有限長さの回転 2 重円筒管内に発達するテイラー渦流れは、初期の静止状態から流れが発達する場合、円筒の長さや最終的なレイノルズ数が同じであっても、異なった流れパターンが現れる非一意性が存在し、また、最終モードが同じであっても、そこに至る形成過程は異なる場合があることが知られている⁽¹⁾。しかし、その解析は軸対称に限られてきた。本研究では、初期の静止状態から流れが発達する場合において、レイノルズ数を 700 とし、アスペクト比を 3.0 から 6.0、内円筒増速時間を様々に変化させ、それにより達成される最終モードの同定と、各最終モードに至る異なるモード形成過程の分類を、新たに時間依存の 3 次元数値計算により調べる。

2. 支配方程式と計算条件

内外円筒の半径比 β 、内外円筒間のすきまと円筒高さの比をアスペクト比 A とし、内外円筒の半径比を 0.667 とする。レイノルズ数 Re は、すきまを代表長さ、計算中に達成される最大の内円筒周速度を代表速度と定義する。初期条件として、全領域で、速度ゼロとし、内円筒周速度は、代表長さ h と代表速度により無次元化した時間 T の間に、定められたレイノルズ数に達するように増速する。支配方程式は、円筒座標系 (r, θ, z) の Navier-Stokes 方程式と連続の式である。支配方程式の離散化は MAC 法に基づく。境界条件として壁面ですべりなしの条件を与える。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

流れを可視化するために、以下の式で規定される関数 u を用いる。

$$u = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

3. 解析結果

3-1. 内円筒増速率の違いによる最終モードの予測

Table 1 に、最終レイノルズ数を 700 に固定し、アスベ

クト比が 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 の場合に、内円筒の無次元増速時間 T を変化させたときの最終モードを示す。表の最上段が内円筒増速時間 T であり、その下段が各アスペクト比における最終モードである。 n 個の渦をもつ、正規 n セルモードを Nn 、変異 n セルモードを An と表す。最終モードの定義として、各壁面でのトルクの時間的相対変動が 10^{-4} 未満で落ち着くものを軸対称の流れ、トルクの時間的相対変動が 10^{-4} 未満で必ずしも落ち着かないものを非定常流れとする。 $\beta = 3.0$ の場合、 T が 0.0 から増加するに伴い、正規 2 セルモード、変異 2 セルモード、正規 4 セルモードの 3 つの異なるモードが形成される。多くの場合、正規 2 セルが形成されるが、 $T = 25.2$ で変異 2 セルモード、 $T = 42.0$ で正規 4 セルモードが形成される。 $\beta = 4.0$ は、変異モードは形成されず、2 つの異なるモードが現れる。 $\beta = 6.0$ 、 $T = 0.0, 25.2, 75.6$ において最終モードが非定常流れであることを確認した。発生するモードの種類については、中村ら⁽²⁾の可視化実験や、古川ら⁽¹⁾の 2 次元数値計算の結果とほぼ一致するが、2 次元数値計算との結果の比較において、同アスペクト比、同レイノルズ数、同内円筒増速時間での最終モードは完全には一致していない。

3-2. 最終モードが 2 セルモードの場合の形成過程の違い

最終モードが同じ場合でも、形成過程が異なる場合がある。正規 2 セルモードでは、Figs. 1, 2, 3, 4 に示す 4 つの異なる形成過程が得られる。これらは、方位角 60° 断面における、 r - z 断面での関数 u 等値線図である。横軸、縦軸はそれぞれ円筒座標系の r 方向と z 方向であり、左端は回転する内側円筒壁面、右端は外側円筒壁面を示す。Figs 1, 2 では、 $\beta = 3.0$ 、 $Re = 700$ 、 $T = 0.0$ と 50.4 であり、Figs 3, 4 では、 $\beta = 4.0$ 、 $Re = 700$ 、 $T = 0.0$ と 50.4 で生ずる正規 2 セルモードの形成過程を示している。渦の減少過程には 2 種類ある。1 つは、2 つの卓越したセルが 1 つに融合して、間に挟まれた小さなセルを消滅させるセルの取り込みであり、もう 1 つが、発達する渦によって小さくなった渦が押しつぶされる渦の減衰である⁽³⁾。

Fig 1 に示す正規 2 セルモードの形成過程では、頭初、上

Table 1 Final modes of the Taylor vortex flow. ($Re = 700$)

T	0.0	8.4	16.8	25.2	33.6	42.0	52.4	58.8	67.2	75.6	84.0
Mode($\beta=3.0$)	N2	N2	N2	A2	N2	N4	N2	N2	N2	N2	N2
Mode($\beta=4.0$)	N2	N4	N4	N2	N4	N2	N2	N2	N4	N4	N4
Mode($\beta=5.0$)	N6	N6	N6	N6	N4	N6	N4	N4	N6	N6	N6
Mode($\beta=6.0$)	N8	N6	N6	N8	N6	N6	N6	N6	N6	N8	N6

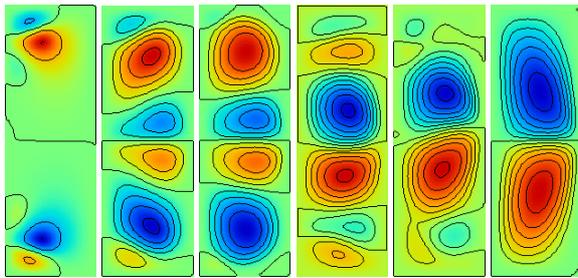


Fig. 1 Flow development from rest to normal two-cell mode
($\beta = 3.0, Re = 700, T = 0.0$)

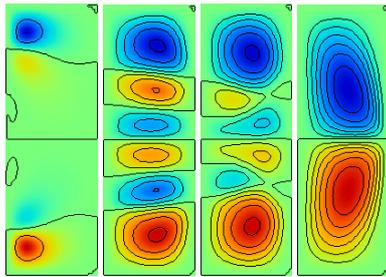


Fig. 2 Flow development from rest to normal two-cell mode
($\beta = 3.0, Re = 700, T = 50.4$)

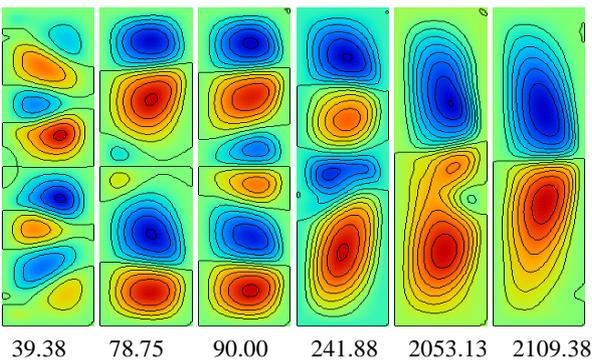


Fig. 3 Flow development from rest to normal two-cell mode
($\beta = 4.0, Re = 700, T = 0.0$)

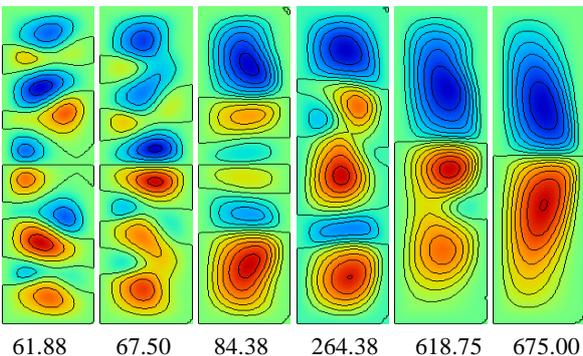


Fig. 4 Flow development from rest to normal two-cell mode
($\beta = 4.0, Re = 700, T = 50.4$)

下端面から渦が発達し($t = 16.88$), 徐々に軸方向中央断面へ向けて渦を誘起する. 一時 6 セルの流れの状態を形成する($t = 50.63$)が安定せず, 上下円筒端面から 2 番目の渦が発達し, 上下端面に内側外側エクストラ渦を伴う変異 4 セルモードを形成する($t = 73.13$). 流れはしばらく安定するが, 上下端面

の内側外側エクストラ渦が発達し正規 6 セルモードを形成する($t = 618.75$). しかし, この 6 セルの流れは安定せず, 軸方向中央断面付近の一对の渦が上下端面方向へ発達し, その上下の渦を減衰させ($t = 630.00$), 流れは最終的に安定な正規 2 セルモードを形成する($t = 675.0$). レイノルズ数は異なるが, 東ら⁽⁴⁾も同様の変異 4 セルモードの形成過程を数値計算で示している.

Fig 2 に示す正規 2 セルモードの形成過程では, 上下端面から渦が発達し($t = 39.38$), 流れは正規 6 セルモードが形成される($t = 101.25$). その後, 上下端面の渦が軸方向中央断面方向へ発達し, 中央の 4 つのセルを減衰させ($t = 123.75$), 流れは最終的に安定な正規 2 セルモードを形成する($t = 168.75$).

Fig 3 に示す正規 2 セルモードの形成過程では, 上下端面から渦が発達し, 正規 8 セルモードを形成する($t = 39.38$). しかし, 安定せず上下端面付近のセルの覆い込みにより一時正規 4 セルモードが形成されるが軸方向中央断面より一对のセルが発達し($t = 78.75$), 正規 6 セルモードが形成される($t = 90.00$). この流れはしばらく安定しているが, 上端面より 4 つ目から 6 つ目のセル間の覆い込みにより, 正規 4 セルモードを形成する($t = 242.88$). 正規 4 セルモードは安定することなく, 上端面より 2 つ目から 4 つ目のセル間の覆い込み($t = 2053.13$)により, 流れは最終的に安定な正規 2 セルモードを形成する($t = 2109.38$).

Fig 4 に示す正規 2 セルモードの形成過程では, 上下端面から渦が発達し, 一時 10 セルの流れの状態が形成され($t = 61.88$), その後, 上下端面付近のセルの覆い込み($t = 67.50$)により, 流れは正規 6 セルモードを形成する($t = 84.38$). その後, 上端面より 2 つ目から 4 つ目のセル間の覆い込み($t = 264.38$)により, 正規 4 セルモードを形成する. しかし, 中央部の渦の大きさが変動する不安定な状態が続いた後, 上端面より 2 つ目から 4 つ目のセル間の覆い込み($t = 618.75$)により, 流れは最終的に安定した正規 2 セルモードを形成する($t = 675.00$).

本研究の範囲では, 内円筒の回転に伴い, 上下端面で最初の渦が現れた. これは, 2 次元計算において, 上下端面とともに軸方向中央付近からも渦が現れたことと異なる.

4. まとめ

有限長さの回転 2 重円筒管に発達するテイラー渦流れにおいて, レイノルズ数 700, アスペクト比 3.0 から 6.0 とし, 初期の静止状態から内円筒増速時間を様々に変化させたときの最終モードの同定とモード形成過程の分類を 3 次元数値計算により行った. 最終モードは, 可視化実験, 2 次元数値計算と同様, 同アスペクト比, 同レイノルズ数において内円筒増速時間に対する依存性は多様であることを確認した. また, 最終モードが同じでも, そこに至るまでのモード形成過程は, 非一意的で多様であることを示した.

本研究の一部は日本学術振興会研究費補助金によることを記し, 謝意を表す.

参考文献

- (1) 古川, 渡辺, 中村, 日本計算工学会論文集, 4(2002), 209-218.
- (2) 中村, 戸谷, 機論 B, 60-571(1994), 723-729.
- (3) 青木, 古川, 渡辺, 中村, 流体熱工学研究, 35-1(2000), 79-86, .
- (4) 東, 小河原, 飯田, 機論 B, 58-555(1992), 21-26.