

有限アスペクト比のテイラー渦流れにおけるモード形成とモード遷移

Transient process of multiple mode in Taylor vortex flow with finite aspect ratio

准 古川 裕之 (名大院) 正 渡辺 崇 (名大)
正 中村 育雄 (名大院)

Hiroyuki FURUKAWA, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya
Takashi WATANABE, Nagoya University
Ikuo NAKAMURA, Nagoya University

Taylor vortex flows between two concentric rotating cylinders of finite length is analyzed numerically. With the characteristic length being the gap between cylinders, the Reynolds number is defined by the rotation speed and the aspect ratio is a non-dimensional length of cylinders. They are dominant parameters which determine modes of Taylor vortices. When the rotation speed of the inner cylinder decelerates, the mode transition between normal two-cell mode and anomalous one-cell mode and the transition from twin-cell mode to anomalous one-cell mode are found. Even though the aspect ratio and the Reynolds number are fixed, the final mode of flows developing from rest depends on the acceleration rate of the inner cylinder. The range of the acceleration rate in which each flow mode appears is determined at uniform aspect ratio, and the formation processes of the anomalous six-cell mode and the normal six-cell mode are observed.

Key Words : Computational Fluid Dynamics, Fluid Transients, Axisymmetric Flow, Finite Difference Method, Taylor Vortex Flow, Decelerating Flow, Accelerating Flow, Mode Exchange, Bifurcation

1. ま え が き

両端に固定端面を持ち、内円筒が回転する有限長さの同心2重円筒内に発達するテイラー渦流れについては、多くの研究が行われている⁽¹⁾。本研究では、テイラー渦の非一意性についての東ら⁽²⁾、中村ら⁽³⁾の研究を踏まえ、内円筒速度を減少させた場合に生ずるテイラー渦流れのモード変化と、静止流体から内円筒速度を増速させる割合を変化させた場合のモード形成過程について数値的に明らかにすることを目的とする。

2. 計 算 条 件

内外円筒すきまを代表長さ、内円筒周速度を代表速度として物理量を無次元化する。支配基礎方程式は、軸対称非定常非圧縮の Navier-Stokes 方程式、および連続の式である。円筒高さの内外円筒すきまに対する比をアスペクト比 Γ とする。支配方程式の離散化は MAC 法に基づき、格子分割はスタガード格子である。壁面における境界条件として、速度にはすべりなし条件を、圧力には運動方程式に基づくノイマン形条件を与える。初期条件として、全ての領域にわたり速度成分の値に 0 を規定する。増速率の違いによるモード形成過程を調べる場合は、それぞれの増速時間で、レイノルズ数を 0 からその条件の値まで線形に増加させる。それ以外の場合には、計算開始とともにレイノルズ数を 0 からその条件の値までステップ的に上げる。なお、物理的には内円筒半径 20mm、外円筒半径 30mm の場合を想定する。

3. 解析結果および考察

3.1 モード間の非定常な推移 ある一定のレイノルズ数で十分に発達した流れにおいても、レイノルズ数が変化すると、異なるモードの流れに移ることがある⁽⁴⁾。本計算では $\Gamma = 0.1 \sim 1.6$ の範囲において、レイノルズ数を次第に減少させることにより、正規 2 セルモード、変異 1 セルモードおよびツインセルモードの間でのモード変化を確認した。

モード変化の例として、アスペクト比 0.8、レイノルズ数を無次元時間 $t_1=3000$ における 1000 から $t_2=6000$ における 600 まで直線的に減少させた場合の、ツインセルモードから変異 1 セルモードへの変化を図 1 に示す。これ以降の図はすべて同様だが、図の左側が回転する内円筒側で、右側が静止している外円筒側である。無次元時間 t が 3000 の時点では、セルの境界の端が上下端面に到達しているツインセルモードである。レイノルズ数が減少し始めると、内円筒側で付加的な小さな渦が現れる端面とは反対の端面上で、ツインセルの境界が次第に外円筒側に移動し、やがて、端面から外円筒壁面に移ることで変異 1 セルモードへと変化して落ち着く。

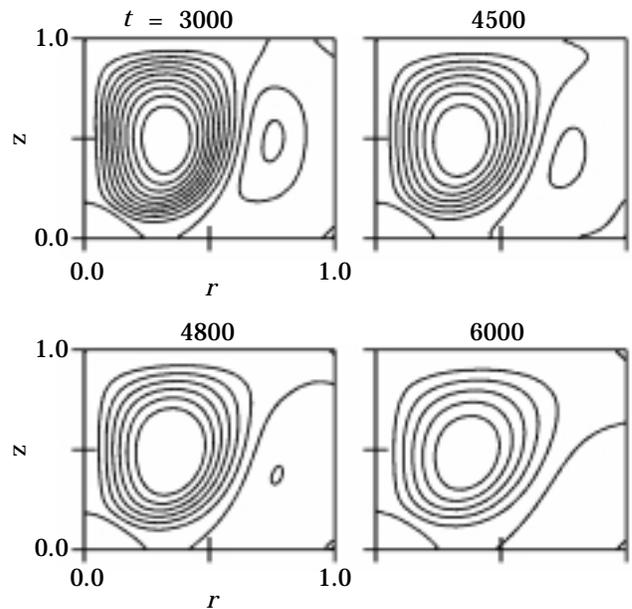


Fig. 1 Development of flow field from twin-cell mode to anomalous one-cell mode ($\Gamma=0.8$, $Re=1000$ 600, $t_1=3000$, $t_2=6000$)

3.2 内円筒増速率の違いによるモード形成 静止流体からの内円筒速度の増加割合により、形成されるモードが異なる。 $\Gamma = 2.6$ として、最終的なレイノルズ数を 500, 550, 600 とした場合に、内円筒増速割合に対して生成されるモードを表 1 に示す。図中、 T は有次元の増速時間であり、無次元増速パラメータ St は、最終的な内円筒角速度 ω に対して、 $1/T\omega$ として与える。また、A3 は変異 3 セルモード、N2 は正規 2 セルモードを示す。

表 1 (a) の $Re = 500$ では、 $St = 0.1026$ までは二次モードである変異 3 セルモードが現れる。そして、 $St = 0.1026$ と 0.0952 の間でモードが変化し、 $St = 0.0952$ 以降は主モードである正規 2 セルモードが現れる。表 1 (b), (c) の $Re = 550$, 600 の場合には、モード境界点が $St = 0.0808$ と 0.0758 , $St = 0.0741$ と 0.0694 の間にあり、高レイノルズ数ほど変異モードがゆっくりとした増速の場合にも現れる傾向にある。

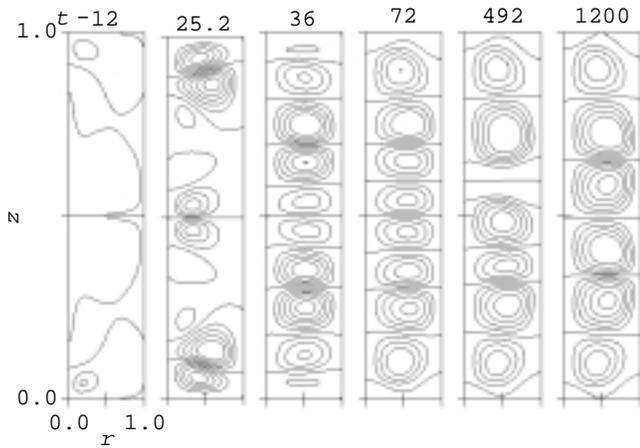
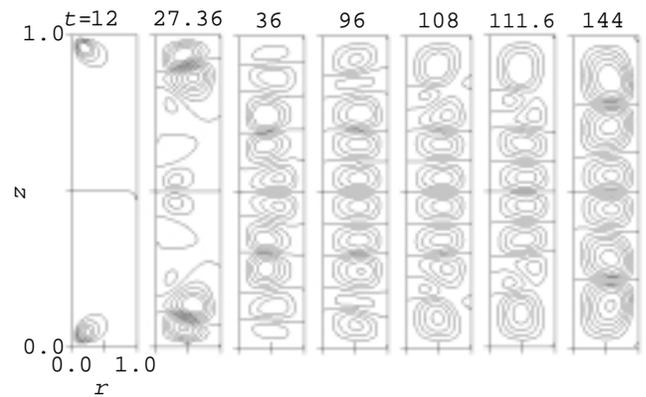
同様な計算を、 $\Gamma = 4.0$ として、 $Re=500$, 650, 700, 800, 1000 のそれぞれのレイノルズ数でも行った。しかし $\Gamma = 4.0$ の

Table 1 Acceleration of inner cylinder and final flow mode

(a) $\Gamma = 2.6, Re = 500$								
$T[s]$	0.20	0.40	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	1.00
St	0.3333	0.1667	0.1111	0.1026	0.0952	0.0889	0.0833	0.0667
Mode	A3	A3	A3	A3	N2	N2	N2	N2

(b) $\Gamma = 2.6, Re = 550$								
$T[s]$	0.20	0.40	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	1.00
St	0.3030	0.1515	0.1010	0.0932	0.0866	0.0808	0.0758	0.0606
Mode	A3	A3	A3	A3	A3	A3	N2	N2

(c) $\Gamma = 2.6, Re = 600$								
$T[s]$	0.20	0.40	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	1.00
St	0.2778	0.1389	0.0926	0.0855	0.0794	0.0741	0.0694	0.0556
Mode	A3	A3	A3	A3	A3	A3	N2	N2

Fig. 2 Flow development from rest to anomalous six-cell mode ($\Gamma=5.0, Re=400, t_{ac}=4.8, St=0.42$)Fig. 3 Flow development from rest to normal six-cell mode ($\Gamma=5.0, Re=400, t_{ac}=9.6, St=0.21$)

場合は、 $\Gamma = 2.6$ の場合のように増速割合と形成されるモードの関係が明確には現れなかった。

東ら⁽²⁾は、正規 2 セル、正規 4 セル、変異 4 セルモードの発生機構を明らかにしているが、本節では、正規 6 セルモード、変異 6 セルモードの発生機構について述べる。

$\Gamma = 5.0, Re = 400$ で、 $St=0.42, 0.21$ のそれぞれの場合に形成される変異 6 セルモード、正規 6 セルモードの形成過程を図 2, 3 に示す。静止流体からレイノルズ数を線形に増加させる無次元増速時間 t_{ac} はそれぞれ 4.8, 9.6 である。

図 2 では、 $t=12$ の時点で内円筒と上下端面の角で小さな渦が発生する。内円筒の増速はこの時点ですでに終了しており、流れは $Re=400$ で一定である。この角の渦は半径方向に広がり、 $t=25.2$ の時点では、これらの渦の軸方向内側に新たな渦が形成される一方で、軸方向中央断面付近に、2 つのセルが発生する。やがて、軸方向全体に渡ってセルが形成され、 $t=36$ の時点では軸方向に 10 個のセルが形成されている。しかしこの流れは安定せず、上下端面に接しているセルの勢力が弱くなり、隣り合うセルに押し潰されて、 $t=72$ の時点では、変異 8 セルモードへと移行している。しばらくはこのまま安定するが、 $t=492$ の時点で、軸方向中央断面よりすこし上側にあり、境界で外側から内側への流れをもつペアのセルが消滅し、隣り合うセルに押し潰されることにより、流れは変異 6 セルモードへと移行する。

図 3 では、内円筒と上下端面の角で小さな渦が発生し、やがて軸方向全体に渡って 10 個のセルが形成されるまでは、図 2 と同様である。しかし、図 2 では上下端面で変異セルが発生したのに対し、図 3 では上下端面に接するセルの軸方向内側のセルが、その上下のセルに挟まれるようにして弱まる。この弱まる

セルの上下のセルは同じ方向に回転しているので境界を接することができず、弱まるセルの軸方向内側に隣接するセルが減衰し、流れは正規 6 セルモードへと移行する。

4. 結 論

両端に固定端面を持ち、内円筒が回転する有限長さの同心 2 重円筒内に発達するテイラー渦流れを数値的に解析し、以下の結論を得た。

- (1) アスペクト比が 1 のオーダの場合で、内円筒速度を減少させることにより、モード間での分岐を予測し、その発生機構を明らかにした。
- (2) 内円筒増速割合、およびレイノルズ数が形成されるモードに及ぼす影響の傾向を示した。
- (3) 増速割合の違いによる、モードの発生機構の差異を示した。

文 献

- (1) Koschmieder, E.L., Benard Cells and Taylor Vortices, Cambridge Univ. Press, (1993).
- (2) 東尚史・小河原加久治・飯田誠一, テイラー渦流れの変異モード発生機構に関する数値的研究, 機論, 58-555, B (1992), 3245-3250.
- (3) 中村育雄・戸谷順信, 多重解テイラー渦におけるモードの形成条件, 機論, 60-571, B (1994), 723-729.
- (4) 渡辺崇・前田俊介・古川裕之・中村育雄, 減速するテイラー渦流れにおけるモード変化, 機論, 65-630, B (1999), 521-527.