

テイラー渦流れのモード形成と分岐に関する数値的研究

Numerical Study on Bifurcation Phenomena and Mode Formation in Taylor Vortex Flow

学 古川裕之(名大) 正 渡辺 崇(名大)

前田俊介(日本特殊陶業)

Hiroyuki FURUKAWA, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

Takashi WATANABE, Nagoya University

Syunsuke MAEDA, NGK Spark Plug Co., Ltd., Takatsuji-cho, Mizuho-ku, Nagoya

Taylor vortex flows between cylinders of finite length are classified into three modes: primary mode, normal secondary mode and anomalous mode. 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. In this study, the numerical investigation is carried out on the decelerating Taylor vortex flows. The governing equations are unsteady Navier-Stokes equations and they are solved by the finite difference methods. Bifurcations from the normal secondary modes to the primary modes are observed and the range of the Reynolds numbers in which flow modes exchange is determined. In the flow with anomalous cells, extra cells near the end wall of cylinder merge with each other and the flow mode becomes normal. The result agrees quite well with experimental evidences.

Key Words : Computational Fluid Dynamics, Stability, Fluid Transients, Axisymmetric Flow, Finite Difference Method, Taylor Vortex Flow, Decelerating 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、主モード、2次正規モードそして2次変異モードの存在を示した Benjamin⁽¹⁾らの研究以後、多くの数値的研究が行われてきた。本研究では減速するテイラー渦流れのモード変化について、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、および連続式である。円筒高さ h と内外円筒すきまの比をアスペクト比 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。圧力ポアソン方程式の解法には SOR 法と ILUCGS 法を併用する。壁面境界条件として、速度にはすべりなし条件を、圧力にはノイマン形条件を与える。また、初期条件としては、非一意の2次モード流れの生成を目的とする場合には静止状態を、その他の場合にはクエット流を仮定する。内円筒半径とすきまの比である間げき比は 2.0 とする。

3. 結 果

2次正規モードから主モードへの分岐が起こるモード変化点を図1に示す。図には、中村ら⁽²⁾が準定常的な実験により決定した結果も示す。結果は実験との定性的な一致を示している。また、10セルから8セルへの変化は実験的には確認されていないものである。6セルの正規2次モードから4セルの主モードへの遷移の例として、アスペクト比 4.6 においてレイノルズ数を 150 から 140 に変化させた場合の (r, z) 断面内の速度ベクトル図の変化を図2に示す。まず、 z 方向の中心断面の下側にあ

り、境界で外円筒側から内円筒側への流れをもつペアのセルが次第に弱まる。そして、そのペアは、隣接するセルに覆われて最終的に消滅する。これらの変化は必ずしも軸方向に対称な現象ではない。

アスペクト比 5.4、レイノルズ数 700 の場合、6セルの変異2次モードの流れが現れる。この流れをレイノルズ数 80 まで変化させた場合の速度ベクトル図の変化を図3に示す。この変異2次モードは円筒端面にエクストラ渦を持つ。内円筒周速度の減速中における円筒端面近くの速度ベクトル図および流れ関数 ψ の等値線図を図4に示す。図5は円筒両端壁面上の半径方向ひずみ速度成分の半径方向分布である。図4の $t = 3003$ における変異2次モードでは、内外円筒両方にエクストラ渦が発生している。図5の $t = 2940$ では、ひずみ速度の値の正負より、内円筒近傍と外円筒近傍の両方で外円筒側から内円筒側に向かう流れがある一方で、中央部では、内円筒側から外円筒側に向かう流れがあることが分かる。内円筒周速度がさらに減少すると、内外両側のエクストラ渦は発達し、ついには融合して、流れは8セルの正規モードとなる。さらに内円筒速度が減少すると、融合してできたセルの隣に存在し、外円筒から内円筒に向かう流れを境界とするセルのペアが弱まり始める。そして、最終的にはこれらのペアのセルが消滅して4セルの主モードの流れとなる。

変異セルは、エクストラ渦が発達、融合することにより円筒端面から引き離される。これを確かめるために、外円筒側、内

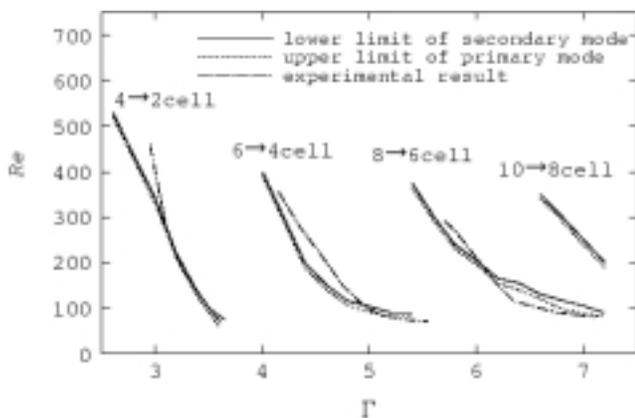


Fig.1 Bifurcation from secondary normal mode to primary mode

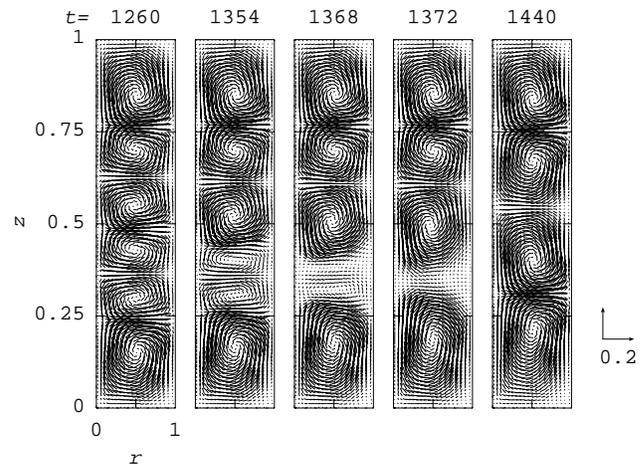


Fig.2 Development of flow field from secondary normal mode to primary mode ($\Gamma = 4.6, Re = 150 \rightarrow 140$). Deceleration starts at $t = 450$ and ends at $t = 900$

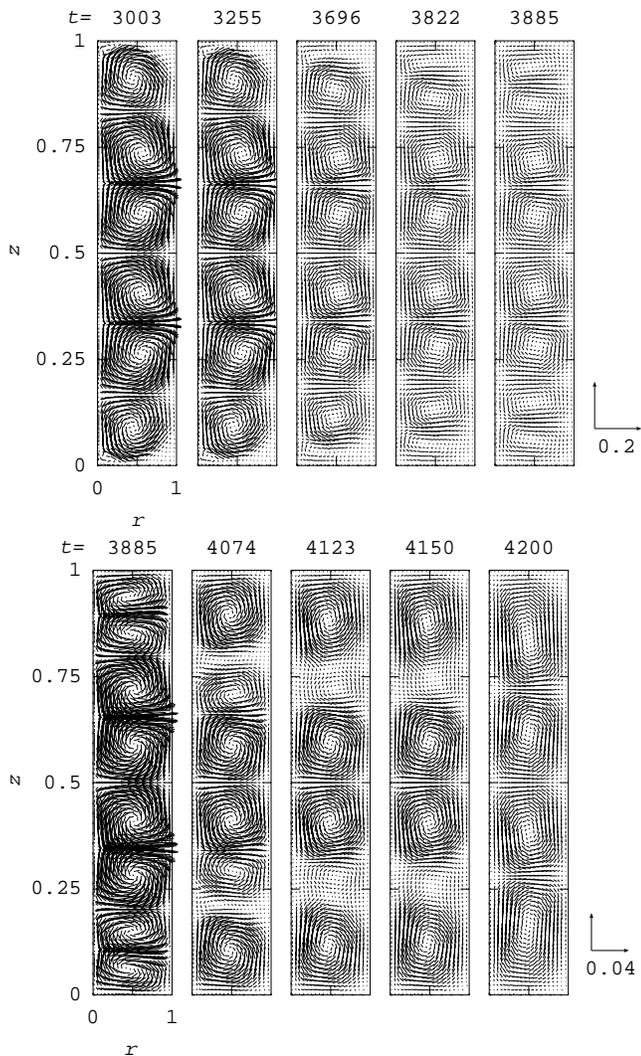


Fig.3 Development of flow field from secondary normal mode to primary mode ($\Gamma = 5.4, Re = 700 \sim 80$). Deceleration starts at $t = 2100$ and ends at $t = 4200$

円筒側の両エクストラ渦に捕らえられている粒子がたどる流跡線を図6に示す。外円筒側のエクストラ渦が半径方向への大きさを増し、内円筒側のエクストラ渦を取り込む形で1つのセルになっていく様子がうかがえる。

4. 結論

減速するテイラー渦流れのモード変化について、非定常数値計算に基づく解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) セルの数の減少を伴う正規モードの流れの変化は、外円筒から内円筒に向かう流れを持つ境界をはさんだペアのセルが次第に弱まり、消滅することにより進む。
- (2) 変異モードが持つ変異セルは、内円筒壁面と外円筒壁面のそれぞれと円筒端面にはさまれた領域に発達する2つのエクストラ渦を伴う。変異セルは円筒端面に達し、このため、端面に接する領域では内円筒側から外円筒側に向かう流れが生ずる。
- (3) 変異モードからの変化では、まず、変異セルに付随する2つのエクストラ渦が成長、融合して1つのセルとなる。その後、融合したセルが発達する一方で、このセルに対して円筒軸方向の内側にあり、外円筒側から内円筒側への流れを持つ境界をはさんだペアのセルが消滅する。

文献

- (1) Benjamin.T.B., Bifurcation phenomena in steady flows in a viscous flow – II. Experiment –, Proc. Royal Soc. Lond., A, 359 (1979), 27-43.
- (2) 中村, 戸谷, 山下, 植木, アスペクト比が小さいテイラー渦の実験, 機論, 56-522, (1990), 307-313.

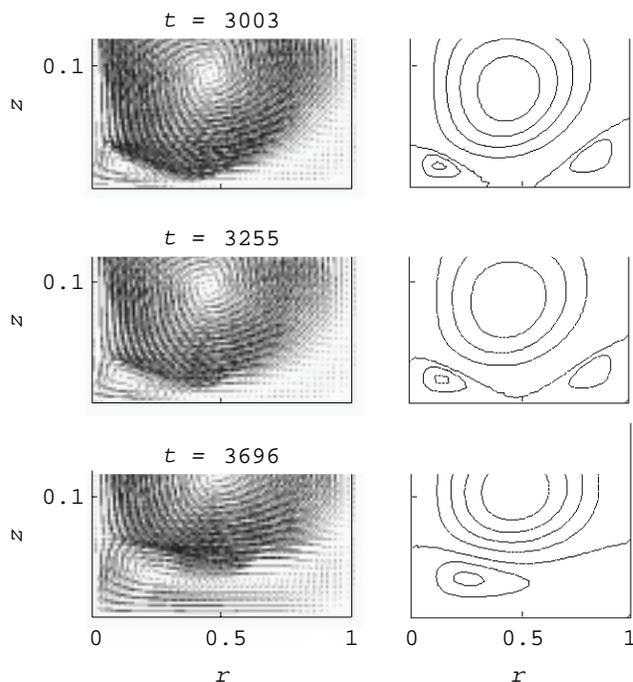


Fig.4 Velocity vectors and contours of stream function ψ near end wall with anomalous cell ($\Gamma = 5.4, Re = 700 \sim 80$)

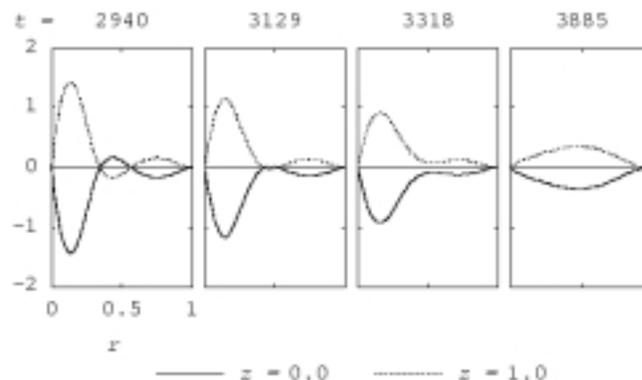


Fig.5 Radial rate of strain on end walls of cylinders ($\Gamma = 5.4, Re = 700 \sim 80$)

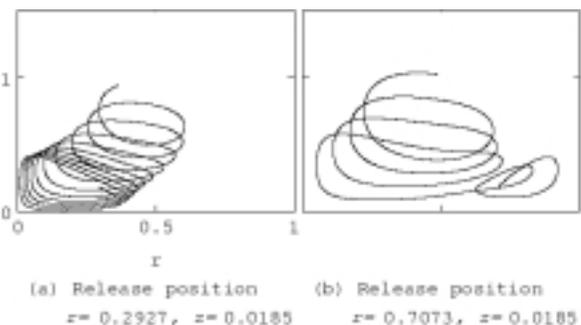


Fig.6 Path lines of particles released at $t = 3234$ and traced until $t = 3948$ ($\Gamma = 5.4, Re = 700 \sim 80$)