

円筒容器回転円盤による旋回流の力学的特性と渦構造の発達様式

Process of Vortex Development and Dynamical Property of Swirl Flow by Rotating Disk in Cylindrical Casing

- 遠藤壮真, 名大院, 名古屋市千種区不老町, endou@vi.cs.is.nagoya-u.ac.jp
- 渡辺崇, 名大, 名古屋市千種区不老町, takashi@is.nagoya-u.ac.jp
- 坂井友一, 名大院, 名古屋市千種区不老町, sakai@vi.cs.is.nagoya-u.ac.jp
- Soma ENDO, Graduate School of Information Science, Nagoya University, Nagoya 464-8603
- Takashi WATANABE, Graduate School of Information Science, Nagoya University, Nagoya 464-8603
- Yuichi SAKAI, Graduate School of Information Science, Nagoya University, Nagoya 464-8603

The swirl flow generated by the rotating disk in a cylindrical casing which have radial and axial gap are investigated by the numerical simulation. Vortex forms variety structure by the difference of the Reynolds number and the disk geometrical condition. This study investigates the effect of the axial gap which change the variety of the rotating disk thickness to vortex in the radial gap. In the flow which completely developed, the vortices can be divided into 4 patterns. At these 4 vortex patterns, we shows the development scenario of vortex around the rotating disk which develop completely using visualization of the disk meridian cross-section. These flow modes influence velocity gradient in axial gap and the dynamics of swirl flow is changed. Approximation formula which depicts generally the torque at the disk bottom is derived.

1. 結論

円筒容器内で回転する円盤による旋回流は、静止円盤と回転円盤の軸方向隙間に生じる流れと、静止円筒と回転円筒における半径方向隙間に生じる流れを共に持つ構造である。このような流れは、ターボ機械や化学反応用攪拌装置、フライホイール式エネルギー貯蔵装置などの工業的応用において重要とされ⁽¹⁾⁽²⁾, その流れ構造や、動力学特性は以前より研究されてきた⁽³⁾. 静止回転二円盤による流れに関して、円筒形容器内で回転する軸を持たない円盤を対象に Schouveiler ら⁽⁴⁾ は実験的に研究を行い、スパイラル状の渦や乱れ点など、軸方向隙間に現れる特徴的な構造を明らかにしている。また彼らは、半径方向に隙間を持つ場合についても、一部実験を行っている。Lauder ら⁽⁵⁾ は回転円盤半径と容器内径が等しい構造において、ハブの存在による半径方向隙間の影響について展望を示した。本研究は、静止回転二円盤間流れと同様の軸方向隙間と、二重円筒と同様の半径方向隙間を共に持ち、軸を有する円盤が円筒形の容器の中で回転している構造を対象に研究を行った。同様の構造を扱った先行研究⁽⁶⁾において、回転円盤の半径方向隙間にテイラー渦が現れ、半径方向隙間の変化とレイノルズ数の違いによって、複数の種類の渦構造が出現することが報告されている。本研究は、軸方向隙間の変化が、完全発達した流れに与える影響を明らかにすることを目的とし、本報では、テイラー渦が最終構造に至るまでの遷移過程を、Q 定義⁽⁷⁾を用いた可視化によって明らかにする。さらに、旋回流の動力学特性把握のため、旋回流による円盤下面にかかるトルクに対し、軸方向隙間によらず

Table 1 Disk system.

Disk	r_c [mm]	r_d [mm]	h_c [mm]	h_d [mm]	Γ
1	0.142	0.127	0.04	0.020	0.50
2	0.142	0.127	0.04	0.022	0.55
3	0.142	0.127	0.04	0.024	0.60
4	0.142	0.127	0.04	0.026	0.65
5	0.142	0.127	0.04	0.028	0.70
6	0.142	0.127	0.04	0.030	0.75
7	0.142	0.127	0.04	0.032	0.80
8	0.142	0.127	0.04	0.034	0.85

統一的に表現できる近似式を導いた。

2. 計算条件

本研究で対象とする流れ場の概略図を図 1 に示す。ここでは比較対象となる実験⁽⁸⁾との対比のため、作動流体は動粘度 $\nu = 4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であるグリセリン水溶液を用いたとし、円筒容器半径 $r_c = 142 \text{ mm}$, 円盤半径 $r_d = 127 \text{ mm}$ を用いる。円盤と容器の間の半径方向隙間 $(r_c - r_d) = 15 \text{ mm}$ である。円筒容器は厚さ $h_c = 40 \text{ mm}$ で、回転円盤は軸半径 $r_s = 10 \text{ mm}$ の軸をもち、円筒形容器内壁までつながっている。軸方向隙間の影響を調べるため、回転円盤の厚さ $h_d = 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34 \text{ mm}$ と計 8 パターン計算を行う。円盤厚さによって円盤上下の軸方向隙間 $h_d, h_u = 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 \text{ mm}$ と変化する。軸方向隙間比 $\Gamma = h_d/h_c$ と定義し、 $\Gamma = 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85$ となる。表 1 に、幾何条件のまとめを示す。計算領域は円筒座標系 (r, θ, z) で定義されている。円盤角速度を ω とし、レイノルズ数 Re は代表長さを円盤半径 r_d にとり、代表速度を回転円盤端面部での周方向速度 ωr_d を用いて $Re = \omega r_d^2/\nu$ と定義した。

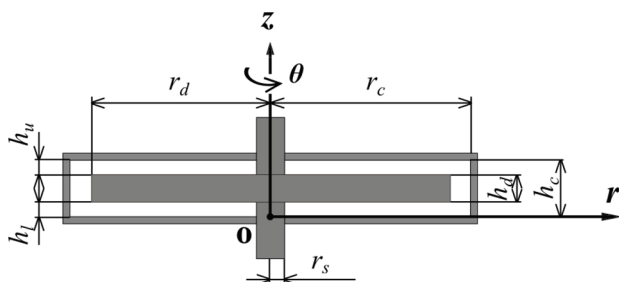


Fig. 1 Coordinate system of the flow.

数値計算における支配方程式は三次元非定常非圧縮ナビエ・ストークス方程式および連続の式である。支配方程式は有限差分法によって離散化し、解法は MAC 法に基づく。計算格子はスタガード格子を用い、各格子点数は、半径方向に 265、周方向に 338、軸方向に 81 と設定した。数値計算において、周方向速度 ωr_d と円盤半径 r_d によって全てのパラメータを無次元化する。

3. 結果と考察

3. 1 渦の分類

半径方向に隙間を持つ回転円盤による旋回流には、回転円盤側面にテイラー渦が発生する。この時、円筒形容器上下の端面で内向きの流れを持つ渦と、外向きの流れを持つ渦が現れることがあり、前者を正規セル、後者を変異セルと呼ぶこととする。円盤側面に現れるテイラー渦は、軸方向隙間、レイノルズ数、円盤増速率によってさまざまな形態を示すが、十分に時間発達した流れではそれらは大きく 4 つの流れモードに分類できる。

- (1) 正規 2 セルモード：半径方向隙間に 2 つの正規セルが出現。
- (2) 変異 2 セルモード：半径方向隙間に 2 つの変異セルが出現。
- (3) 変異 3 セルモード：半径方向隙間に正規セルと変異セルを 1 つずつ持つ 3 つのセルが出現。
- (4) 正規 4 セルモード：半径方向隙間に 4 つのセルが出現。

これら 4 つの流れモードのうち、(1), (4)をまとめて正規モードとし、(2), (3)をまとめて変異モードとする。

数値計算によって得られた流れモードを表 2 にカラーマップによって示す。軸方向隙間が比較的狭い場合、主に正規 2 セルモードが見られる。軸方向隙間が広くなるに従い、高いレイノルズ数で変異 2 セルモードおよび変異 3 セルモードが出現する。さらに軸方向隙間が広くなるにつれ、低いレイノルズ数でも変異モードが出現するようになり、 $\Gamma=0.55$ 以下では、最終的に低レイノルズ数でも変異 2 セルモードが出現し、高レイノルズ数まで 2 セルモードのみが出現する。これは、軸方向隙間が広くなることで、流れが多様な構造を持つ自由度が大きくなり、比較的不安定な流れである変異モードが出現しやすくなるためと思われる。変異 3 セルモードおよび正規 4 セルモードは、正規 2 セルモードの出現する条件と、変異 2 セルモードの出現する条件の境界付近で出現する。以下では出現した各流れモードを詳細に説明し、その遷移過程を明らかにする。

Table 2 Flow mode diagram.

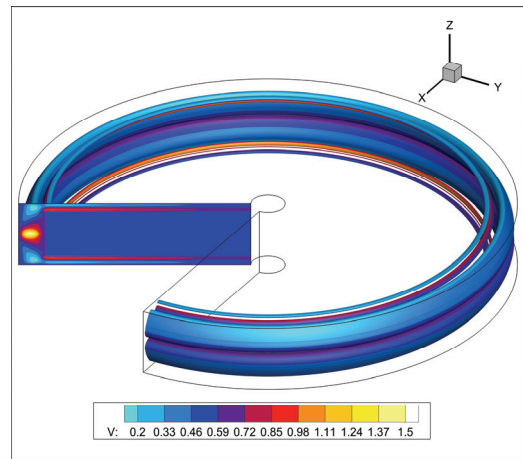
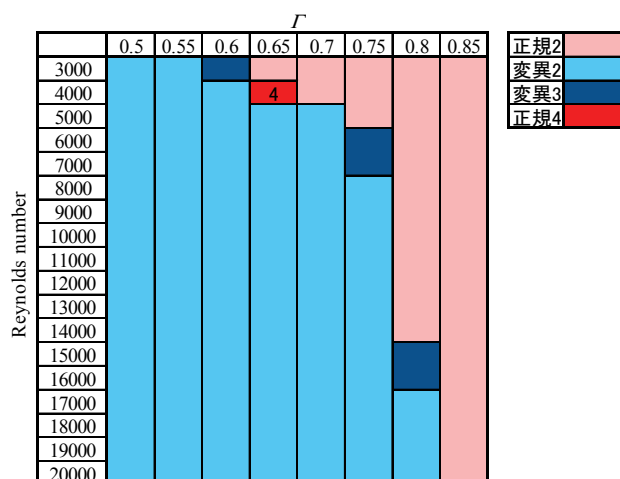


Fig. 2 Normal 2-cell mode. Iso-surface of $Q=1$ shows the vortical surfaces colored by the azimuthal velocity component. The $r-z$ surface shows the radial velocity component ($\Gamma=0.75, Re=5000, Q=1$).

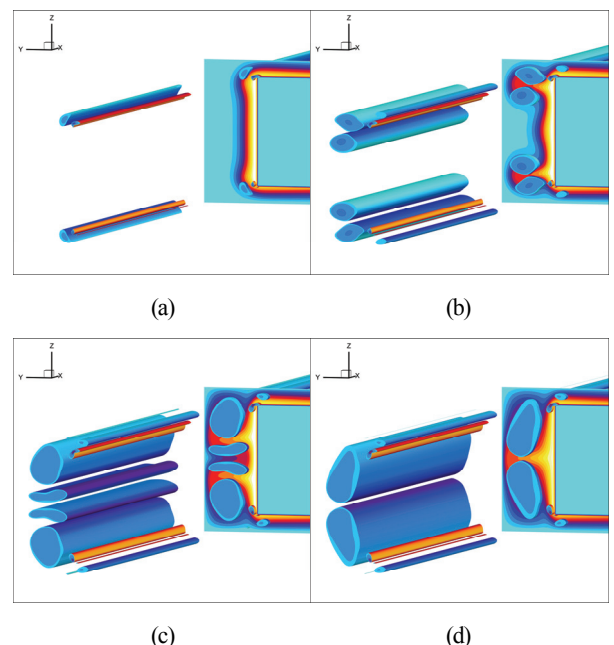


Fig. 3 Process of development of normal 2-cell mode vortices.

3. 2. 1 正規 2 セルモード

正規 2 セルモードは、円盤端面と円筒容器端面との半径方向隙間に正規セルが 2 つ出現する流れである。図 2 に、正規 2 セルモードの生じる例である、 $\Gamma=0.75, Re=3000$ での可視化図を示す。この図では、 $Q=1$ で渦を可視化し、その表面に周方向速度で色付けをした。子午線断面は半径方向速度の等値図を示してある。 $r-z$ 平面で見ると、2 つ出現するセルの上のセルは、時計回りに回転し、下のセルでは反時計回りに回転する。この 2 つの渦の間では、半径方向外向きの流れが生じている。

この流れモードの遷移図を図 3 に示す。この図は、図 2 の円盤先端を拡大した図である。まず図 3(a)のように円盤の回転開始と共に、円盤表面から流れが生じる。この流れによって半径方向隙間に流れが供給され、円盤角部に渦が生じる。次に図 3(b)に示すように、図 3(a)で生じた渦によって円盤端面に逆向きの流れが生じ、一時的に 4 つのセルが生じる。この 4 つのセルのうち、最上部と

最下部のセルは、回転円盤上の境界層である Ekman 層より供給される流れにより生じる Ekman セルと呼ばれ、中央の 2 セルは円盤端面と円筒容器端面の間の半径方向隙間に生じるテイラーセルと呼ばれる。この 4 つのセルがそれぞれ円盤端面全域に発達する。図 3(c)では、中央の 2 つのテイラーセルが縮小し、上下の Ekman セルが発達する。最終的に、図 3(d)に示すように、上下の Ekman セルが円盤端面全域に発達し、正規 2 セルモードで完全発達流となる。

3. 2. 2 正規 4 セルモード

正規 4 セルモードは、半径方向隙間に 4 つのセルが出現する流れである。図 4 に、正規 4 セルモードの生じる例である、 $\Gamma=0.60$, $Re=4000$ での可視化図を示す。この流れモードは正規 2 セルと同じセルが最上部と最下部に 1 つずつ出現し、その間に 2 つのセルが出現する流れである。

図 5 にこの流れモードが完全発達に至るまでの過程を示す。まず図 5(a)のように、正規 2 セルモードの遷移過程と同様に円盤角

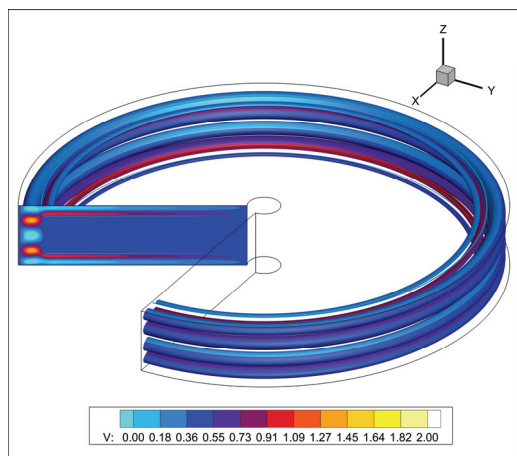


Fig. 4 Normal 4-cell mode. Iso-surface of $Q=1$ shows the vortical surface colored by the azimuthal velocity component. The r - z surface shows radial velocity component ($\Gamma=0.75$, $Re=5000$, $Q=1$).

部より渦が出現する。図 5(b)では、図 5(a)で出現した渦によって円盤端面に逆向きの流れを持つ渦を誘発する。次に図 5(c)に示すように、図 5(a), (b)で出現した 4 つのセルがそれぞれ円盤端面全域に発達する。最終的に、図 5(d)のように、正規 4 セルモードで完全発達に至る。この 4 つのセルのうち、一番上と一番下のセルが Ekman セルで、中央の 2 セルはテイラーセルである。

3. 2. 3 変異 2 セルモード

変異 2 セルモードは、半径方向隙間に変異セルが 2 つ出現する流れである。図 6 に、変異 2 セルモードの生じる例である、 $\Gamma=0.75$, $Re=8000$ での可視化図を示す。この流れモードでは、 r - z 断面において上のセルが反時計回りに回転し、下のセルが時計回りに回転する。2 つの変異セルの間では、半径方向内向きの流れが生じる。円筒容器角では、変異セルと逆向きの回転を持つセルが出現する。この渦はエクストラ渦と呼ばれ、周方向に変化のないリング渦、周方向に周期的に変動するビーズ渦などの形態をとる。

図 7 に、変異 2 セルモードの流れが完全発達に至るまでの過程

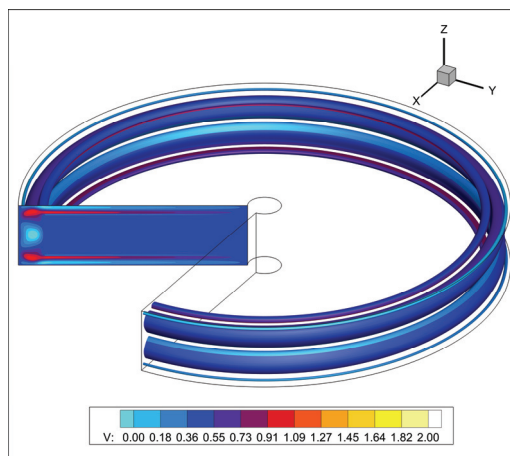


Fig. 6 Anomalous 2-cells mode. Iso-surface of $Q=1$ shows the vortical surface colored by the azimuthal velocity component. The r - z surface shows radial velocity component ($\Gamma=0.70$, $Re=5000$, $Q=1$).

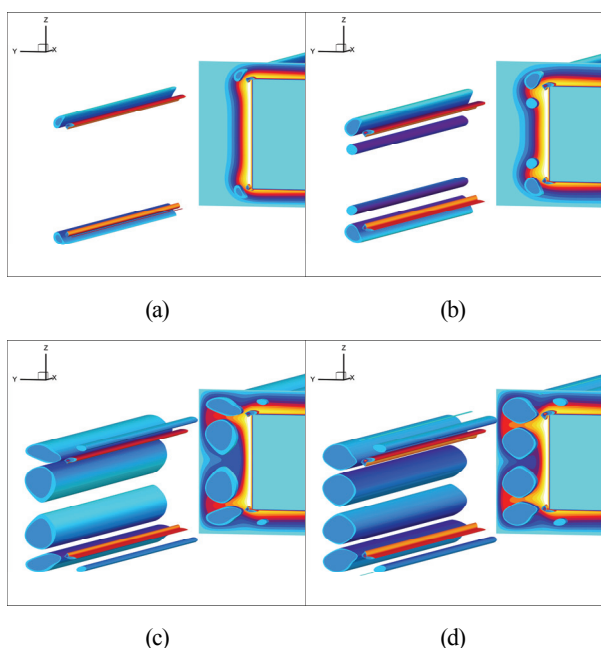


Fig. 5 Process of development of normal 4cells mode vortices.

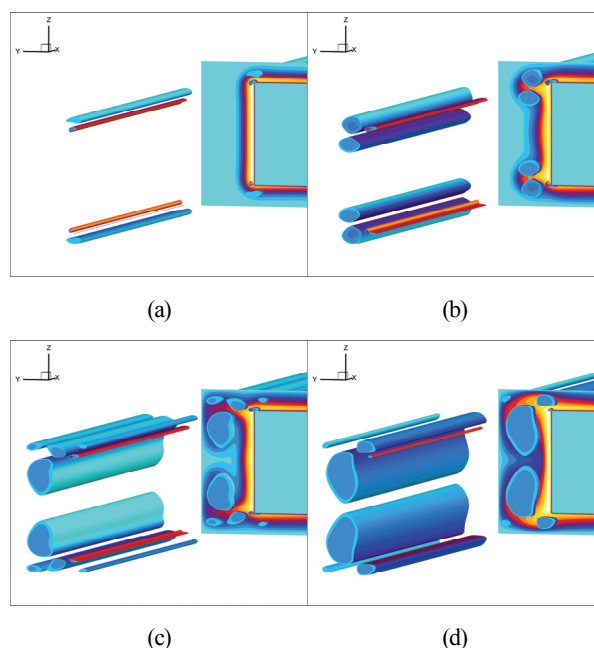


Fig. 7 Process of development of anomalous 2cells mode vortices.

を示す。まず図 7(a)のように、円盤回転開始と同時に Ekman 層から半径方向隙間に流れが供給され、円盤角部に渦が出現する。次に、図 7(b)では、図 7(a)で出現した渦により逆向きの流れを持つ渦が円盤端面に誘発され、一時的に 4 つの渦が生じる流れとなる。次に、図 7(c)に示すように、4 つの渦のうち一番上と下の渦が縮小し、半径方向に分断される。分断された外側のセルはエクストラ渦となる。最終的に図 7(d)中央の 2 セルは円盤端面全域に拡大し、変異 2 セルモードで完全発達する。

3. 2. 4 変異 3 セルモード

図 8 に変異 3 セルモードが生じる例である $\Gamma=0.75, Re=6000$ での可視化図を示す。3 つのセルが出現する条件であり、幾何形状やレイノルズ数によって、正規セル、変異セルの生じる場所が変化する。

図 9 に、変異 3 セルモードの遷移過程を示す。図 9(a)円盤回転開始と同時に円盤角部に渦が生じ、円盤端面に発達しつつ移動する。図 9(b)では、図 9(a)で出現した渦と逆向きの流れを持つ渦が生

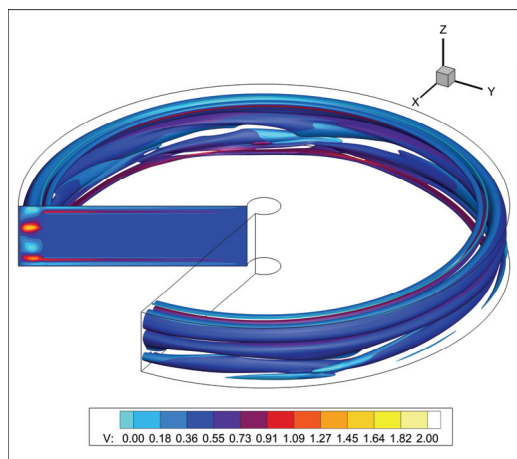


Fig. 8 Anomalous 3-cell mode. Iso-surface of $Q = 1$ shows the vortical surface colored by the azimuthal velocity component. The r - z surface shows radial velocity component ($\Gamma=0.75, Re=6000, Q=1$).

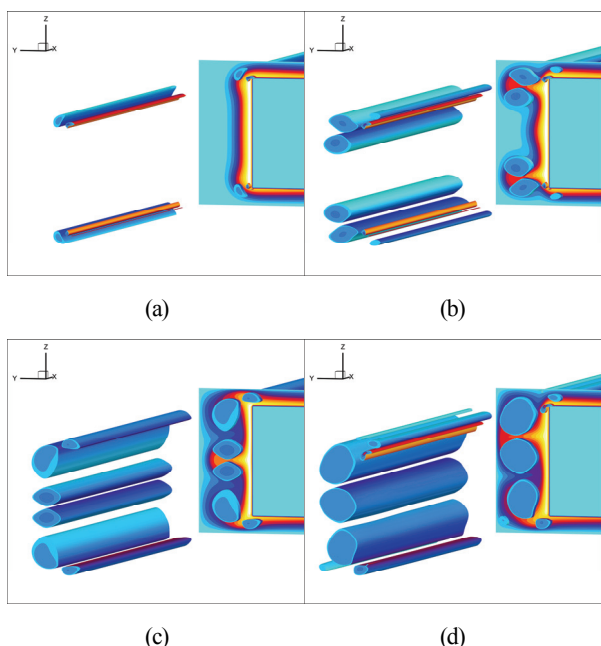
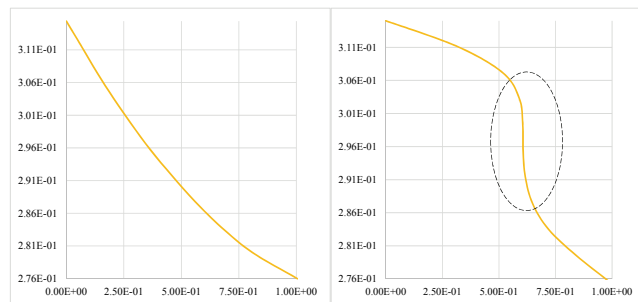


Fig. 9 Process of development of Anomalous 2-cells mode vortices.



(a) Margined boundary layer. ($\Gamma=0.75, Re=3000$)
(b) Separated boundary layer. ($\Gamma=0.75, Re=10000$)

Fig. 10 Azimuthal velocity profile at upper disk.

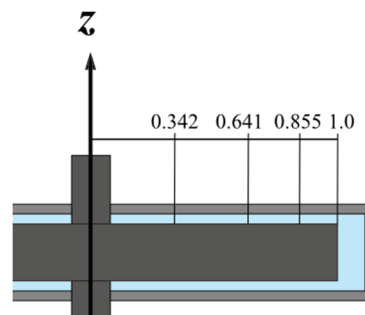


Fig. 11 Radial position used in Fig. 12

じ、一時的に 4 つのセルを持つ流れになる。この流れは正規 4 セルモードと同様の形態である。次に図 9(c)に示すように、図 9(b)での最上部と最下部のセルが縮小し、残った中央の 2 セルによってさらに渦の内側に逆向きの流れを持つセルが誘発され、変異セルを外側に持つ 4 セルモードとなる。最終的に図 9(d)では、条件によって異なるが、中央上もしくは下のセルが消滅し、変異 3 セルモードで完全発達する。

この流れモードは他の流れモードと比べ、不安定であり、周方向に渡って変動のない層流モードになりにくい。また、1 つのみ表れる変異セルは、他のセルと比べ乱れやすい傾向にある。

3. 3 軸方向隙間での速度分布

回転円盤の軸方向隙間では、回転流と静止壁の境界層である Bödewadt 層と、回転流と回転壁の境界層である Ekman 層が存在する。図 10 に、回転円盤先端における周方向速度分布を示す。図 10(a)は、境界層が結合した流れを示し、図 10(b)は、境界層が分離した流れを示す。図 10(b)では、黒い鎖線で囲った部分にコア領域と呼ばれる領域を見ることが出来る。比較的低レイノルズ数においては、Bödewadt 層と Ekman 層が結合し、円盤上から容器までの周方向速度分布は直線状になる。レイノルズ数が高くなるに従い、それぞれの境界層とコア領域が存在する流れとなる。以下では、周方向速度成分を用いて、軸方向隙間比やレイノルズ数の変化による境界層への影響を示す。

回転円盤と円筒容器の間の軸方向隙間において、無次元半径位置 $\eta = r/r_d$ と定義する。図 11 に示すように、回転円盤上面の $\eta = 0.342, 0.641, 0.855, 1.0$ の位置から周方向速度成分をとった。図 12 に、境界層流れを軸方向隙間比 $\Gamma=0.50, 0.75, 0.85$ での $Re=3000, 10000, 20000$ の周方向成分を用いて示した。速度成分は、円盤先端の周方向速度によって無次元化されているため、円盤端面での

周方向速度成分は1となり、静止壁に近づくにつれ0に漸近する。回転円盤の壁面に引っ張られ、周方向速度は半径位置が外側に向かうにつれ増加する。 $\Gamma = 0.50$ では、図 12(a)に示すように、 $Re = 3000$ では円盤先端における境界層が分離していることがわかる。図 12(b), (c)では、 $Re = 10000, 20000$ と Re が増加するに従い、円盤内側でも境界層が分離し、図 10(b)にあるようなコア領域が存在しているのがわかる。 $\Gamma = 0.75$ においては、図 12(d)に示すように $Re = 3000$ では、境界層が結合する流れであるのに対し、図 12(e)で示す、 $Re = 10000$ では $\eta_k = 1.0$ の流れは境界層が分離しているが、 $\eta_k = 0.855$ より内側では境界層が結合している。回転円盤外側では、回転中心から離れることにより周方向速度が大きくなるため、境界層が分離している。図 12(g), (e), (f)で示す、 $\Gamma = 0.85$ の $Re = 3000, 10000, 20000$ では、全て境界層が結合している。

図 13 に、円盤端面における軸方向隙間での周方向速度分布の境

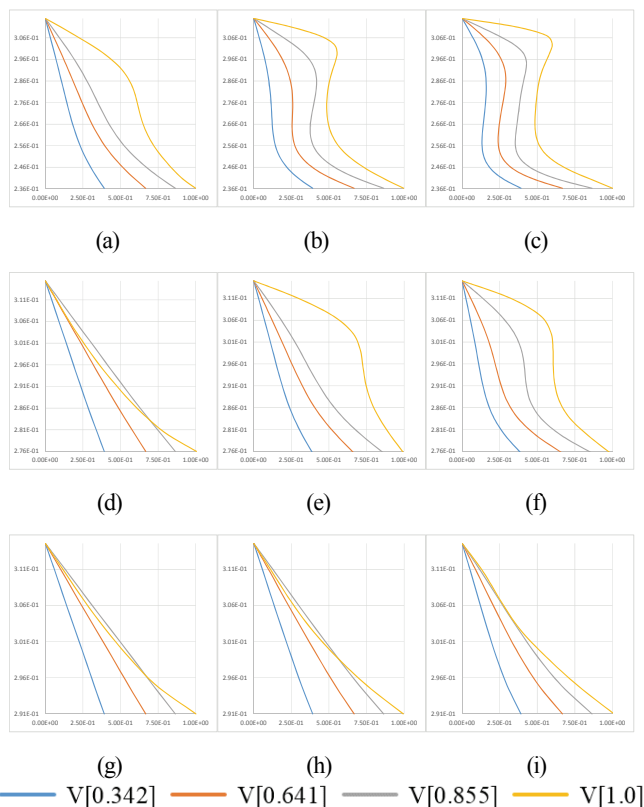
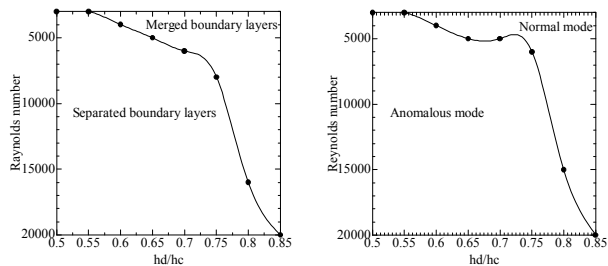


Fig. 12 Azimuthal velocity profile at upper disk.

(a) $\Gamma = 0.50, Re = 3000$. (b) $\Gamma = 0.50, Re = 10000$. (c) $\Gamma = 0.50, Re = 20000$.
 (d) $\Gamma = 0.75, Re = 3000$. (e) $\Gamma = 0.75, Re = 10000$. (f) $\Gamma = 0.75, Re = 20000$.
 (g) $\Gamma = 0.85, Re = 3000$. (h) $\Gamma = 0.85, Re = 10000$. (i) $\Gamma = 0.85, Re = 20000$.



(a) Boundary layer type. (b) Flow mode type.

Fig. 13 Diagrams of the boundary layer type and the flow mode.

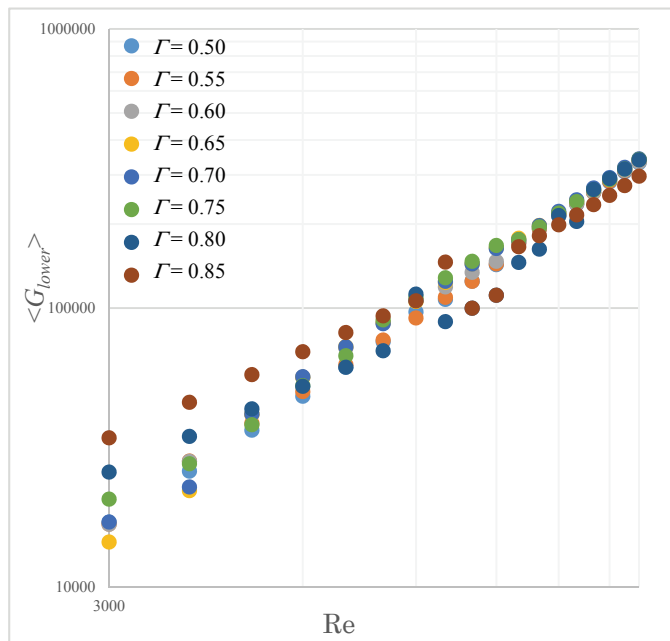


Fig. 14 Non-dimensional torque.

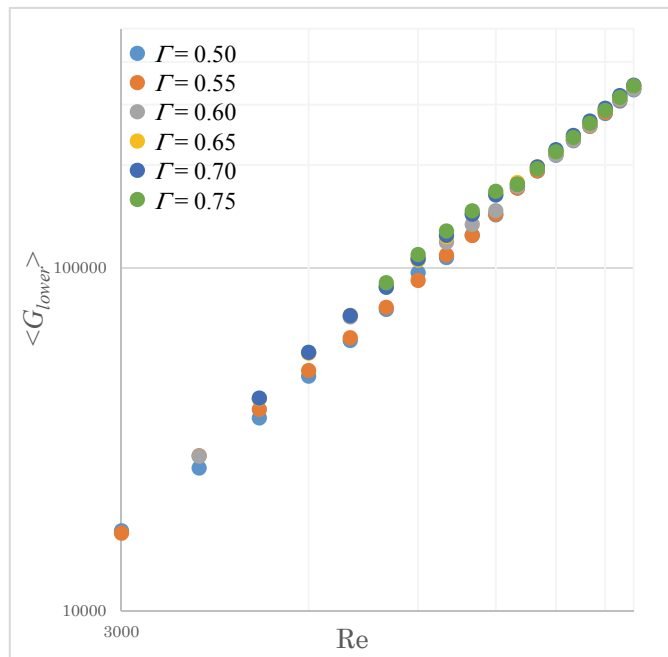


Fig. 15 Non-dimensional torque of anomalous 2-cell mode.

界層構造と、渦流れの構造を線図によって示す。図 13(a)は、境界層が結合している領域と、境界層が分離している領域を示している。図 13(b)は、変異渦モードの出現する領域と、正規渦モードの出現する領域を示している。これらの図より、分離境界層では変異渦モードが出現する傾向があり、結合境界層では、正規渦モードが出現する傾向があると思われる。

3. 4 円盤下面のトルク

半径方向隙間に現れるテイラー渦の流れモードは、軸方向隙間

における境界層流れと相関があると思われる。境界層内の流れは、円盤に作用するせん断速度に影響し、円盤の駆動にかかるトルクは変化する。旋回流による動力損失をみつめるため、円盤下面でのトルクを調べた。円盤下面でのトルクはせん断応力より求められる。式(1)に、せん断応力を求める式を示す。

$$\tau_{\theta z} = \mu e_{\theta z} = \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial z} \right\}$$

この式において、 $\tau_{\theta z}$ はせん断応力、 μ は粘性係数、 e はせん断速度を示している。式(1)によって算出されたせん断応力を用いて、円盤下面でのトルクは(円盤下面 $Z_{diskbottom}$) 以下のように見積もる。

$$G_{lower} = \int_{r_{shaft}}^{r_d} \int_0^{2\pi} r^2 \tau_{\theta z, diskbottom} d\theta dr \quad (2)$$

本数値計算では、全ての値が無次元化されているため、式(1),(2)によって求められるのは無次元トルクである。図14に円盤下面での無次元トルクを示す。図14は、両対数表示を用いており、横軸にレイノルズ数 Re を、縦軸に無次元トルク G_{lower} を表示した。図14より、 G_{lower} の増加傾向に注目してみると、正規渦モードが多く出現する $\Gamma=0.85, 0.80$ は、変異渦モードが多く出現する $\Gamma=0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70$ と比べると、無次元トルク G_{lower} の増加傾向が大きく異なっている。図15に示すように、以下では変異渦モードの条

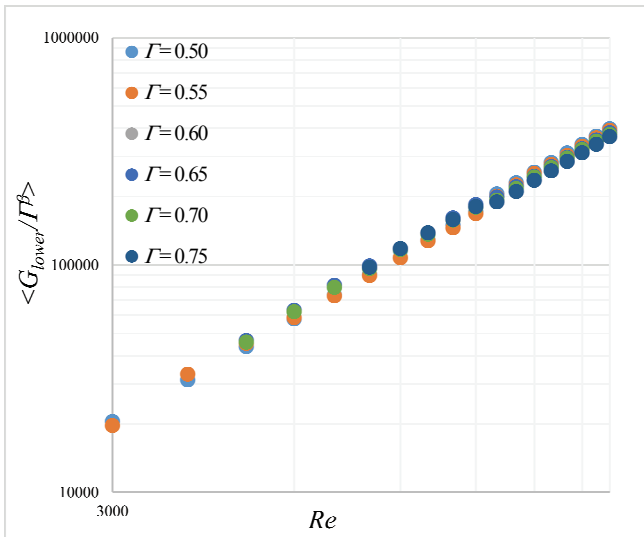


Fig. 16 Non-dimensional torque $G_{lower}/\Gamma^{0.26}$.

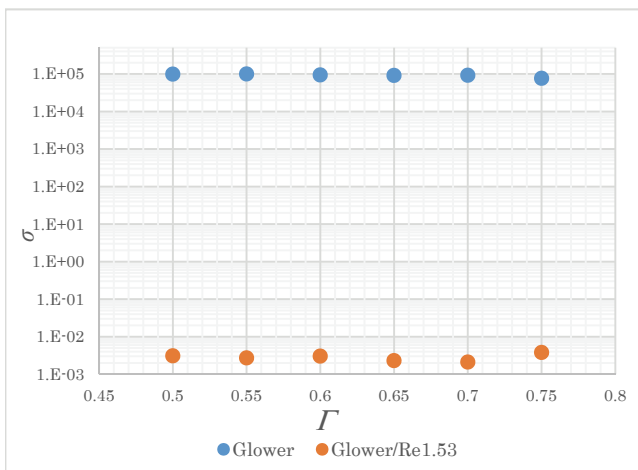


Fig. 17 Deviation σ of G_{lower} and $G_{lower}/Re^{1.53}$.

件に注目し、統一的に表現可能なトルクの近似式の導出を試みた。

無次元トルクである G_{lower} は、レイノルズ数の増加に伴い増加する傾向にあり、軸方向隙間によって値が異なる。二つのパラメータ Γ と Re を用いてべき乗近似を行った。近似式を以下に示す。

$$G_{lower} = 0.1 \Gamma^{0.26} Re^{1.53} \quad (3)$$

式(3)の $\Gamma^{0.26}$ による近似効果を確認するため、無次元トルク G_{lower} を $\Gamma^{0.26}$ で割った値を図16に示す。横軸にレイノルズ数を、縦軸に $G_{lower}/\Gamma^{0.26}$ を表示した。図15と図16を比べると、 G_{lower} を用いた時と比べ、図16では、 $G_{lower}/\Gamma^{0.26}$ を用いたことで、軸方向隙間 Γ による影響が少なくなっている。

式(3)の $Re^{1.53}$ の近似効果を確認するため、図17に、 G_{lower} の標準偏差と、 $G_{lower}/Re^{1.53}$ の標準偏差を示す。縦軸に Γ ごとの標準偏差を対数表示し、横軸に Γ を表示した。この図より、 $Re^{1.53}$ の効果により、 $G_{lower}/Re^{1.53}$ のほうが、レイノルズ数の差異によるバラつきが抑えられている。

図18に、式(3)の近似線を示し、表3に各 Γ の G_{lower} との近時の相関係数 R^2 を示す。式(3)による近似は、いずれの条件においても、近似の尺度を示す相関係数 R^2 が 0.99 以上となり、式(3)によって変異渦モードの表れる条件において、良好な近似を得られたことが確認できた。

Daily⁽⁸⁾によって、回転円盤にかかるトルクの近似式が提案されている。分離した境界層流れの場合、以下の式によって近似している。

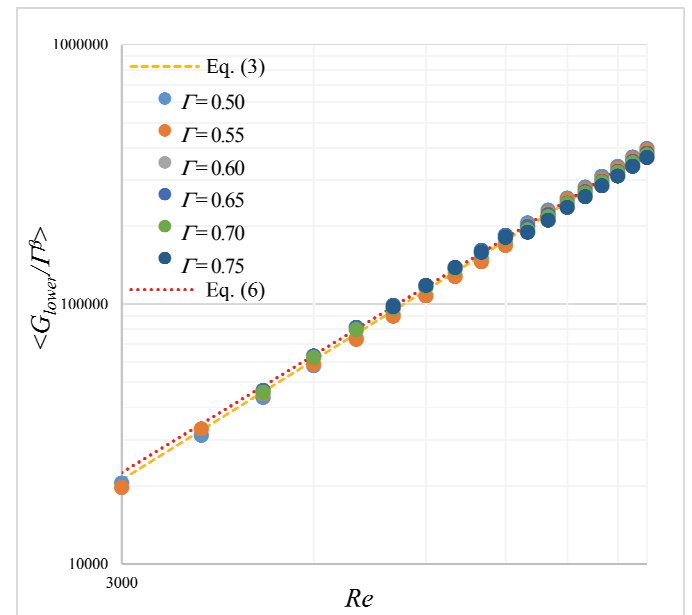


Fig. 18 Non-dimensional torque $G_{lower}/\Gamma^{0.26}$ and the profiles given by Eqs. (3), (6).

Table 3 R^2 value.

Γ	Eq. (3)	Eq. (6)
0.5	0.994450791	0.996655015
0.55	0.997531263	0.99391977
0.6	0.998428923	0.986704882
0.65	0.998163497	0.961463899
0.7	0.998732651	0.942350742

$$C_m = 1.85 G^{0.1} Re^{-0.5} \quad (4)$$

$$T_q = 0.5 C_m \rho \omega^2 r_d^5 \quad (5)$$

この式において、 C_m はモーメント係数であり、 G は隙間比、 ρ は作動流体の密度、 T_q はトルクである。式(4),(5)による近似は、有次元の値であるため、本研究と直接比較することは出来ない。そこで、無次元化操作を施す。

$$G_{lower} = \frac{T_q}{2\pi\rho v^2} \quad (6)$$

式(4),(5),(6)より求められた無次元化トルクと、式(3)より求められた無次元トルク G_{lower} の比較を図 18 に示す。表 3 に、各 Γ における式(3),(6)の R^2 値を示す。 $\Gamma=0.5$ 付近では両式共に良好に近似できているが、 $\Gamma=0.6$ 以上では式(6)は R^2 値が 0.99 を下回っている。本研究による近似式(3)は、全ての Γ において 0.99 を上回っているのと対照的である。Daily らによる式は、境界層構造や軸方向隙間比によって複数の式に分けているため、軸方向隙間比が大きくなった場合、近似が外れてしまったと考えられる。

4 結言

円筒容器内回転円盤による旋回流に表れる渦構造について、数値計算を用いて研究を行った。完全発達した流れにおいて、円盤側面に現れるテイラー渦は、軸方向隙間の変化によって構造が変化する。流れには 4 種類の渦流れモードが生じ、4 種類の流れモードは完全発達に至るまでの遷移過程において、それぞれ異なる遷移過程をとるが、どの流れモードも正規 4 セルモードを一時的に形成する。流れモードの差異によって、回転円盤上下面の周方向速度成分に影響を与えるため、回転円盤上下面の境界層であるの Ekman 層と、円筒容器壁の境界層である Bödewadt 層が結合する場合と、分離する場合がある。正規渦モードが生じる場合、境界層は結合し、変異渦モードが出現する場合、境界層は分離する傾向がある。これによって円盤下面に生じるせん断速度は変化し、円盤に作用するトルクは流れモードの影響を受ける。変異渦モードが生じる条件において、軸方向隙間比 Γ とレイノルズ数 Re を用いた近似式を導き、良好な結果を得ることが出来た。

- (1) T. Washizu, F. Lubisch, S. Obi, "LES Study of Flow between Shrouded Co-rotating Disks", *Flow Turbulence Combustion*, Vol. 91, (2013), pp. 607-621.
- (2) 山田昇, 藤森崇起, 若島振一郎, "小型フライホイールエネルギー貯蔵システムの機械損失予測", 日本機械学会論文集 B 編, 78 巻, 789 号, (2012), pp. 1095-1106.
- (3) W. Ge, Y. Zhang, J. Zakin, "Surfactant turbulent drag reduction in an enclosed rotating disk apparatus", *Experiments in Fluids*, Vol. 42, (2007), pp. 459-469.
- (4) L. Schouveiler, P. Le Gal, M. P. Chauve, "Instabilities of the flow between a rotating and stationary disk", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 443 (2001), pp. 329-350.
- (5) B. Launder, S. Poncet, E. Serre, "Laminar, Transitional, and Turbulent Flows in Rotor-Stator Cavities", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42, (2010), pp. 229-248.
- (6) T. Watanabe, H. Furukawa, "Flows around a rotating disks with and without rim-shroud gap", *Experiments in Fluids*, Vol. 48, No. 4, (2010), pp. 631-636.
- (7) J. Jeong, F. Hussain, "On the identification of a vortex" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 285 (1995), pp. 69-94.

- (8) Daily, J. W. and Nece, R. E., "Chamber Dimension Effects on Induced Flow and Frictional Resistance of Enclosed Rotating Disks", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 82, No. 1, (1960), pp. 217-230.