J011023

回転円盤周りのビーズ渦に関する実験的研究

棚橋 健亮^{*1}, 杉山 恭平^{*1}, 古川 裕之^{*2}

Experimental study of "bead-like vortex" around a rotation disk in a casing

Kensuke TANAHASHI^{*1}, Kyohei SUGIYAMA^{*1} and Hiroyuki HURUKAWA^{*1} Meijo Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Shiogamaguchi 1-501, Tenpaku-ku, Nagoya, Aichi, 468-8502 Japan

In a study of a flow caused by a rotating disk in a casing, as for many of past studies, most of the form of the rotating disk is not considered. However, it became clear by the study of late years that a radial gap affected the flow between the casing base and rotating disks greatly. In this study, we used 7 different rotating disks and changed the size of the gap in the cylinder casing and tested it about the influence that the radial gap gave to the flow near the fixed disk. As a result, it has been observed that "bead-like-vortex" is generated in one of seven disks. "Bead-like-vortex" is investigated in detail and the result of the experiment is shown in this paper.

Key Words : Bead-like-vortex, Rotating disk

1. 緒 言

容器内の回転物体により引き起こされる流れは、遠心ポンプや水車など、羽根車の回転によって流体にエネルギーの授受を与える流体機械に見られ古くから Bödewadt⁽¹⁾らによって多くの研究がなされてきている。両円盤間の隙間が大きい場合、分離境界層を持つ流れであり、この場合は Batchelor⁽²⁾によって研究された。

しかし、これまでの多くの研究では回転円盤は単に周速度成分を与えるものとしてしか用いられておらず、形状はほとんど考慮されていない。ところが、半径方向の隙間が容器底面の固定円盤と回転円盤間の流れに大きく影響を与えていることが知られている⁽³⁾。この半径方向の隙間が容器底面と回転円盤間の流れに与える影響を端面効果と呼ぶ⁽⁴⁾。

これまでの研究では、形状の異なる回転円盤を用い、円筒容器内の隙間の大きさを変え、半径方向隙間が容器内ディスクロータ流れに及ぼす影響について実験され、その結果、円盤寸法の違いから、各円盤において異なる流動様相が確認されている。そこで本研究では、端面効果に着目し、寸法の異なる円盤を用い、その流動様相の解明を目的として実験を行う。

^{*1} 学生員, 名城大学院 理工学研究科

^{*2} 正員, 名城大学 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501)
E-mail: furukawa@meijo-u.ac.jp

2. 実験装置

2・1 実験装置主要部

図1に実験装置主要部を示す。供試流体を含む円筒容器は、上下二枚の固定円盤と、それに挟まれる内径 142.0 mm、厚さ 40.0 mm の円筒形の枠によって構成されている。固定円盤、円筒枠は共に、アクリル樹脂製である。特に、枠の接触部については、Oリングで供試流体の漏止めをしている。回転円盤は回転軸に取り付けられ、軸直径は 20.0 mm である。回転円盤と固定円盤の間の流動様式である両円盤間流れにおいて、回転円盤を挟み容器内空間を対称にするために、円盤締結部は、回転軸と同様の直径 20.0 mm である。

Fig.1 Main part of experimental device

2・2 実験装置周辺

容器内部に設置する回転円盤の寸法は半径 $r_d=127.0$ mm、厚さ $h_d=30.0$ mm（これを円盤 f と呼んでいる）である。実験装置はアクリルケーシング（三和機器製作所）キセノンスリット光源（500W, KS2000-30, カトウ光研）、インバータ（三菱電機株式会社）、デジタルタコメータ（三菱電機株式会社）その先に取り付けられている実験装置主要部から構成されている。撮影には2台のデジタルビデオカメラ（SONY）を用いる。デジタルビデオカメラ（HDR-SR11）は動画撮影の有効画素数が 381 万画素（16：9 時）で、本研究ではフレームレート 30fps、平均ビットレート 7Mbps、解像度は 1440×1080pixel の設定で撮影する。もう1台のデジタルビデオカメラ（HDR-CX560V）は動画撮影の有効画素数が 614 万画素（16：9 時）で、本研究ではフレームレート 60fps、平均ビットレート 28Mbps、解像度は 1920×1080pixel の設定で撮影する。録画された映像は、コンピュータによりデジタル処理することができる。ビデオやカメラで撮影された流動状態の映像や画像は、編集ソフトを用いることで、より明確に可視化される。スリット光源は照射位置が水平になるように円筒容器の真横に配置し、実験装置は外からの光を遮断するために暗室内にある。また必要な回転数を得るため、モータを無段変換モータに取り替えてある。モータの回転数の制御は、インバータで行い、デジタルタコメータによって軸の回転数を確認する。

3. 実験方法

3・1 供試流体と可視化

供試流体には蒸留水とグリセリンを所定の質量比でよく混ぜ合わせたニュートン流体を用いる。本研究では供試流体の水とグリセリンの割合は 3:2 で行う。供試流体の動粘度 ν を求めるため、比重計（日本計量器工業 K.K）により比重 s を調べた。また粘度 μ は、SV 型粘度計（SV-10, 株式会社エー・アンド・ディ）を用いて測定を行う。

容器内の三次元流れについて、アルミニウム粉を用いて二次元平面的に可視化を行う。アルミニウム粉による可視化は、格子幅 $20\mu\text{m}$ の篩いにかけてたものを供試流体中に混合する。混合割合は供試流体 2l に対して 55mg である。また、この時点で供試流体の表面張力でアルミニウム粉が浮くのを防ぐため、 0.75ml の家庭用中性洗剤を混合する。

この供試流体を容器の中に注入し、キセノンスリット光をあてると流れが可視化され、観察できるようになる。この光源に対し、 $r-\theta$ 断面と $r-z$ 断面を同時刻で撮影することが可能となるようなスリットを当て、撮影を行う。

可視化する箇所は円盤半径方向 r 軸と円盤回転方向 θ 軸の作る平面 $r-\theta$ 断面と、 r 軸と軸方向 z 軸の作る平面 $r-z$ 断面で、 $r-\theta$ 断面には幅 2mm のスリット、 $r-z$ 断面には幅 10mm のスリットを用いている。 $r-\theta$ 断面と $r-z$ 断面を同時刻で撮影することが可能となるようなスリットを当て、撮影を行う。

4. 実験結果

4・1 円盤 f 特有の端面効果

流れの指標としてはレイノルズ数 $Re=\omega r_d^2/\nu$ を用いた。 ω は回転円盤の角速度であり、円盤回転数 N から算出する。全ての回転円盤は反時計回りに回転している。

図 2 の半径方向隙間にある小さなビーズ状の渦が円盤 f 特有の端面効果である。この渦の事を円周ビーズ渦とし、今後、「ビーズ渦 (bead-like vortex)」と呼ぶ。これまでの研究で回転の与え方によってはビーズ渦が発生する場合としない場合がある事が分かっている。目的の回転速度まである一定の加速度を与え、目的の回転速度まで上げる事を **spin up** 法と呼び、この場合においてビーズ渦が発生する。また、ビーズ渦が観察された後に渦が崩壊することがあるが、円筒容器の側面に沿って鎌状の渦が観察されることがある。この鎌状の渦のことを「シッケル渦 (sickle-like vortex)」と呼ぶ。

4・2 時間変化による $r-\theta$ 断面・ $r-z$ 断面の発生条件

実験は、任意のレイノルズ数までの回転数の上げ方は最小とし、加速時間をインバータで設定できる最小値で目的のレイノルズ数に達するように設定した。観察するレイノルズ数はビーズ渦の変化が著しい $Re=5000\sim 10000$ まで 500 刻みで実験を行った。

$r-\theta$ 断面方向では何も発生しない・ビーズ渦・シッケル渦・ビーズ渦と螺旋渦の混合の 4 種類が観察された。このシッケル渦を合わせた 4 種類の渦を図 2 に示す。

Fig.2 Fluid condition in cross-section $r-\theta$ ($r_d=127\text{mm}$ $h_d=30\text{mm}$)

r - z 断面軸方向では図 3 のように 2 セル・3 セル・4 セルの渦の様相が観察された。2 セルに関しては上層が右回り下層が左回りの様相(2 セル a)と上層が左回り下層が右回りの様相(2 セル b)の二種類が観察された。また、3 セルに関しては層となっている(3 セル a)と上層の 2 セルがねじれ状態の渦の様相(3 セル b)の 2 種類の渦が観察された。よって、この 5 種類の渦に分類する。

Fig.3 Fluid condition in cross-section r - z ($r_d=127\text{mm}$ $h_d=30\text{mm}$)

表 1 は r - θ , r - z 断面別の Re 数の違いによる流動様相の結果をまとめたものである。

Table.1 Results for different Reynolds numbers in cross-section r - z and cross-section r - θ .

Re	cross-section	fluid condition
5500	r - θ	vortex is not generated
	r - z	4cell→2cell a
8500	r - θ	Instability→bead-like vortex→sickle-like vortex
	r - z	Instability→3cell a→3cell b
9000	r - θ	bead-like vortex and spiral roll
	r - z	2cell b

レイノルズ数 5000 までは円盤の回転速度が低速であるために渦が発生しなかったのではと考えられる。またレイノルズ数 9000 以上でも R 軸方向が 2 セルという上下対象の渦流れであったため、安定してビーズ渦が発生し続けた。5500～8500 の間では 3 セルという上下対象でない非常に不安定な渦流れが発生したため、ビーズ渦も時間経過と共にシックル渦へと推移していったのではないかと考えられる。

5. 結 言

可視化実験、及び解析結果から以下の結果を得た。

4・2 より、低いレイノルズ数では渦が発生しなかったのに対して、高いレイノルズ数では安定したビーズ渦が観察され、5500～8500 の間では上下対象でない不安定な渦流れが発生したため、ビーズ渦も時間経過と共にシックル渦へと推移していく傾向がみられた。

文 献

- (1) Bödewadt. U. T., Die Drehströmung über festem Grunde, Z. Angew. Math. Mech, 20 (1940) pp.241-253.
- (2) Batchelor. G. K., Note on a class of solutions of the Navier-Stokes equations representing steady rotationally symmetric flow, Q. J. Mech. Appl. Maths, 4, (1951) pp.29-41.
- (3) E.Serre, E.Crespo Del Arco, P.Bontoux, Annular and spiral patterns in flows between rotating and stationary disk, J.Fluid Mech, 434(2001) pp.65-68
- (4) 筒井, 容器内回転円盤流れの遷移パターンに関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2004.11.25-26, 北九州), CD523, pp.1-4.