

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560155

研究課題名(和文) 回転流れ場における攪乱成長過程のシナリオ抽出と制御

研究課題名(英文) Control and extraction of flow development scenario in the rotating flow field

研究代表者：渡邊 崇 ( Takashi Watanabe )

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40182927

研究成果の概要(和文)：

円柱容器内で回転する円板まわりの流れを、可視化実験と数値解析の融合研究により解明を進めた。特に、円板が有意な厚みを持つ場合の、円柱容器側壁と円板リムの間に半径方向隙間で発達する流れについて調べた。その結果、半径方向隙間が流れの発達に大きく影響を及ぼすことを示した。この流れでは、従来の回転による横流れのみならず、半径方向隙間の攪乱が、最終的な流れを作るまでの過程についてのシナリオを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

We carried out combined studies of the experimental and numerical approaches on the flow around a rotating disk in a cylindrical casing. Especially, the focus was placed on the flow developing in the radial gap between the finite-thickness disk and the side wall of the cylindrical casing. The result shows the great effect of the radial gap on the flow structure. It also represents the scenario of the developing process of the flow to the final well formed flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学・数値流体力学

キーワード：回転流, 分岐, 渦流れ, 回転円板, Landau モデル, 計算流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

回転する円板まわりの流れや旋回流中の平板上の流れは、3次元流の不安定性の立場

より、理論的に注目されてきた。また、ケーシング内で回転する物体まわりの流れは、流

体機器や化学反応機器など、多くの実用的な場に現れ、その挙動の解析、制御は、重要なテーマとなっている。

理論的立場では、理想的な基本流の存在を前提として、2円板間のバチェラ形の流れに対してや、線形安定性解析が行われてきた。

実際の流れのモデルとしては、ケーシングの円形端面である静止円板と回転円板の間の流れや、2枚の回転円板間の流れが調べられてきた。例えば、流体機械としての攪拌槽などを対象に、円板の回転抵抗やトルクなどを見積られた。一方、この流れでは、回転円板や静止円板における境界層まわりなど、複数の様式の構造的な渦が形成される。このため、流体工学の立場からは、これらの渦流れが調べられてきた。

このような研究で対象とされた流れと、実用的な流れとの異なる点は、ケーシングや円板の大きさの有限性のある。つまり、これまでの多くの研究では、無限に広がる円板を想定し、円板の有限性は、無限を理想とした場合の近似とみなされてきた。一方で、有限のケーシングの場合には、無視できない付加的な流れが現れ、実用的な流れにおいて有限性の影響は無視できるものではない。

## 2. 研究の目的

ケーシング（有限長さの円筒容器）内で、有限の半径と厚さをもち回転する円板まわり流れを取り上げ、静止状態から回転を始める円板まわりに形成される構造的な渦流れに対し、初期段階のLandau形攪乱以降の小規模の渦から、発達した構造に至るまでのシナリオの系統を、数值的、実験的に調べるとともに、最終的な発達流で最適な流動状態を実現するための、幾何形状条件や回転円板の始動条件について明らかにすることを目的とする。この流れは、工学的には、各種機器の流動抵抗や非定常の振れ回り運動の問題を含

む。応募者らは、ケーシング内で回転する円柱まわりの流れで、静止状態からの円柱の増速率により、最終的な発達流の様式が、カタストロフィ的に変化することを示し、その形成過程を分類した。また、回転円板まわりの流れでも、非一意的な渦流れ様式が存在することを見出した。本研究では、回転円板およびケーシング壁面から発達する流れの相互干渉効果が影響する、構造化した渦流れの発達過程に注目した。

## 3. 研究の方法

本研究は、数值的アプローチと実験的アプローチを融合した方法を用いた。

数值的アプローチにおいては、まず、既存の全体の流れを予測するプログラムを用いて、より広い、レイノルズ数、幾何形状パラメータの組み合わせにおける、流れの最終的な発達過程の様子を調べる。本研究の対象は、有限厚さを持つ円板の縁と、円柱ケーシングの間の半径方向隙間の流れにある。各流れの条件において、この半径方向の隙間に形成される、クエット・テイラー形の渦流れの存在、および、半径隙間で生成される攪乱が、半径方向主流により運ばれることによる、流れの様相を分類する。また、クエット流からテイラー渦流に発達する間の攪乱について、1次元のLandau形モデルで仮定して、その成長過程をフィッティング用いて、数值的の同定する。この同定には、時系列変化する速度成分の値を、最小二乗で近似する方法をとる。また、受動的物体を追跡するための画像処理技術の開発も進める。

実験的アプローチにおいては、各種形状の円板周りに現れる流れの分類と、その出現条件をまとめる。半径方向に隙間がある時は、円板厚さがケーシング高さに比べて大きな場合には、軸方向隙間が狭くなり、円板縁とケーシング内壁面の間で形成されるテイラ

一形の渦流れが、半径方向に閉じ込められ、ビーズ状の渦が形成される。一方で、円板厚さがケーシング高さに比べて小さな場合は、半径方向隙間の攪乱が、ケーシング端面に沿って内部に伝わり、負の角度を持ったスパイラル波が形成される。これらのビーズ状渦およびスパイラル波が形成される、幾何形状、レイノルズ数について、流れの観測を通して、新しい分岐図として決定する。

#### 4. 研究成果

実験においては、半径方向に隙間の無い場合、既に報告されている、円形波、正の角度を持つスパイラル波、乱流スパイラルの存在を確認した。また、円板が厚く、半径方向隙間のある場合に、円板周りに30個ほど現れる、ビーズ状の渦の存在条件を調べた。

数値計算結果から、スパイラル波から乱流スパイラル流に変遷する過程を、定量的に見積もる基準について検討した。そして、リカレントプロット、速度成分のQ値、4象限分布、レイノルズ応力などを調べた結果、Q値の等値面の乱れを定量化した積分量が、妥当な結果を与えることを示した。そして、半径方法隙間が存在しない場合の流れの不安定性を評価し、スパイラル波、乱流スパイラル流が発生する臨界レイノルズ数に目処をつけた。半径方向に隙間がある場合には、負の角度を持ったスパイラル波が発達する。これは、半径方向隙間での遠心力流れに起源する乱れが、円柱容器の端面を内側に伝達するために生成されるものであることを明らかにした。また、ビーズ状渦の存在条件が、実験結果と良く合うことを示した。

数値解から得られる速度成分の時系

列データを、Landau形攪乱成長としてとらえることで、静止状態から発達する初期段階の流れのシナリオ解析を行った。この場合には、外れ値によりill-posedな性質を持つ問題が現れることを見出した。このため、外れ値の影響を受けにくい平滑化法を導入することにより、Landau形攪乱発達にフィッティングさせるパラメータを決定するアルゴリズムを構築した。そして、半径方向速度成分、軸方向速度成分とも、独自の発達過程を持つことを明らかにした。

数値計算では、回転円板においては、ビーズ渦から、さらに新しい渦形態が現れることを示した。つまり、ビーズが合体し、5~8個の渦となるシナリオが存在することを明らかにした。この融合した渦流れは、軸方向から眺めると鎌状をしていることより、シッケル渦と命名した。ビーズ渦の発生時は、円板に働くトルクなどの変動は少ない。一方で、シッケル渦は、流れの対称性を崩し、回転円板に働くトルクに大きな変動をもたらすことを示した。また、シッケル渦は、比較的レイノルズ数で現れる。このため、流れがビーズ渦で留まる場合と、シッケル渦に遷移する場合の臨界レイノルズ数を、数値的に決定した。

以上の成果により、静止状態から完全発達状態に至るまでの回転円板周りの流れの発達段階を特定することができ、成長過程のシナリオ抽出に関しては、当初の目的を達成した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

1. Watanabe T., Furukawa H., The effect of rim-shroud gap on the spiral rolls

- formed around a rotating disk, Physics of Fluids, 査読有, 22 (2010), 114107-1-7.
2. 金井, 渡辺, オプティカルフローを用いた方向分類による人物動作の同期解析, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 76-771 (2010), 3272-3274.
  3. Watanabe T., Furukawa H., Flows around rotating disks with and without rim-shroud gap, Experiments in Fluids, 査読有, 48 (2010), 631-636.
  4. 戸谷, 渡辺, 中村, 回転二重円筒間を旋回する二液流体の界面の振動と混合現象 (第1報, 流れの可視化による二つの流体界面の基礎研究), 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 76-761 (2010), 42-48.
  5. 渡辺, 江間, 世界座標平面と画像座標平面の投影関係を用いた複数カメラ垂の外部パラメータの構成, 図学研究, 査読有, 43-3 (2009), 11-17.
  6. Watanabe T., Toya Y., Nakamura I., Mode formation of free surface rotating flow between concentric vertical cylinders, Journal of Physics : Conference Series, 査読有, 137 (2008), 012007-1-7.
- [学会発表] (計31件)
1. 藤澤, 渡辺, 容器内回転円盤周りに現れるビーズ・シックル状渦の発達過程, 第24回数値流体力学シンポジウム, F-8-1, 2010年12月21日, 横浜.
  2. 藤澤, 渡辺, 戸谷, 回転二重円柱間流れのGinzburg-Landau形成成長, 日本機械学会2010年度年次大会講演論文集(6), J0101-3-4, 2010年9月6日, 名古屋.
  3. 戸谷, 渡辺, テイラー渦流れの不安定性に関するエネルギー変動の評価, 日本機械学会2010年度年次大会講演論文集(6), J1010-3-3, 2010年9月6日, 名古屋.
  4. 渡辺, 古川, 容器内回転円盤周りのビーズ状渦発達過程の可視化, 日本機械学会2010年度年次大会論文集(6), J0101-203, 2010年9月6日, 名古屋.
  5. Watanabe T., Furukawa H., Visualization of new flow pattern found in the flow around a rotating disk, 14th International Symposium on Flow Visualization, 9A-1, 2010 Jun. 24, Daegu.
  6. Toya Y., Watanabe T., Instability between Taylor vortex flow and wavy Taylor Vortex flow, 14th International Symposium on Flow Visualization, 9A-2, 2010 Jun. 24, Daegu.
  7. Watanabe T., Toya Y., Fujisawa S., Visualized development of onset flow between two rotating cylinders, 14th International Symposium on Flow Visualization, 8A-1, 2010 Jun. 23, Daegu.
  8. Kanai K., Watanabe T., High accuracy calibration of multiple cameras by TAGUCHI method and multiple viewpoints tracking of human motion flows, 14th International Symposium on Flow Visualization, 6A-3, 2010 Jun. 23, Daegu.
  9. Furukawa, H., Watanabe T., Mode analysis of Taylor vortex flow using PIV method, 14th International Symposium on Flow Visualization, 4E-3, 2010 Jun. 22, Daegu.
  10. 猪飼, 渡辺, オプティカルフローを用いた複数人物間における同期動作の同定, 電子情報通信学会総合大会情報・システム講演論文集2, D-12-19, 2010年3月17日, 仙台.
  11. 猪飼, 渡辺, 人の特徴的動き情報を用いた群衆の実時間分類法, 電子情報通信学会総合大会情報・システム講演論文集1, DS-2-6, 2010年3月19日, 仙台.
  12. 中島, 渡辺, 有限長回転二重円柱間流れにおけるGinzburg-Landau形成成長渦の発達過程の同定, 第22回自律分散システムシンポジウム, 2010年1月31日, 275-280, 名古屋.
  13. 浅井, 渡辺, 人動作から物体移動検出のための広域な動的背景画像の作成, 第22回自律分散システムシンポジウム, 2010年1月31日, 331-336, 名古屋.
  14. 稲村, 吉田, 渡辺, キャビティを過ぎる三次元非圧縮流れの直接数値計算, 第23回数値流体力学シンポジウム, B9-1, 2009年12月18日, 仙台.
  15. 中島, 渡辺, 有限長さの回転二重円柱間で発達する渦のLandau形成成長, 第23回数値流体力学シンポジウム, C6-2, 2009年12月17日, 仙台.
  16. 中西, 吉田, 稲村, 渡辺, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の吹き出しと吸込みを用いた制御の数値解析, 日本機械学会流体工学部門講演論文集, 0107, 2009年9月7日, 名古屋.
  17. Furukawa H., Ohashi T., Watanabe T., Estimation of energy in Taylor vortex flow using PIV method, R'09 Twin World Congress and World Resource Forum, 233, 2009, Sep. 15, Nagoya-Davos.
  18. Minari M., Watanabe T., Flow field and temperature field affected by the

- array of disks in the room with air-conditioning, R'09 Twin World Congress and World Resource Forum, 74, 2009 Sep. 15, Nagoya-Davos.
19. 渡辺, 古川, 容器内回転円板まわりの乱れ流れの可視化適評価, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集(6), J0104-1-4, 2009 年 9 月 14 日, 盛岡.
  20. Furukawa, H., Nakajima M., Ohashi T., Watanabe T., Experimental Study of effect circular walls around rotating disk, 16th Couette-Taylor Workshop, 2009 Sep. 9, Princeton.
  21. Watanabe T., Furukawa H., Evaluation of flow structure around a finite-thickness rotating disk in a cylindrical enclosure, 16th Couette-Taylor Workshop, 2009 Sep. 9, Princeton.
  22. 吉田, 中西, 井上, 稲村, 渡辺, 開いたキャビティを過ぎる自励振動流の吹き出しと吸込みを用いた制御の数値解析, 日本機械学会北陸信越支部第 46 期総会・講演会, 2009 年 3 月 7 日, 富山.
  23. Chiyomori, Y., Watanabe T., Influence of radial gap on flows around a rotating disc in a cylindrical casing and structures of spiral arms, 17th JSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conference, K313, 2009 Oct. 16, Sapporo.
  24. Minari M., Watanabe T., Effect of air-stirring fan on heating system of lecture room, 17th JSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conference, M133, 2009 Oct. 14, Sapporo.
  25. 千代盛, 渡辺, 容器内回転円板の半径隙間と螺旋流の崩壊過程の関係, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, J8-1, 2008 年 12 月 18 日, 東京.
  26. 吉田, 井上, 稲村, 渡辺, キャビティを過ぎる自励振動流の正方向底面駆動速度による制御の数値解析, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, G2-4, 2008 年 12 月 17 日, 東京.
  27. 井上, 吉田, 稲村, 渡辺, キャビティを過ぎる自励振動流の負方向底面駆動速度による制御の数値解析, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, G2-3, 2008 年 12 月 17 日, 東京.
  28. 稲村, 吉田, 井上, 渡辺, キャビティを過ぎる二次元非圧縮流れの振動モード変化の数値シミュレーション, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, G-2-2, 2008 年 12 月 17 日, 東京.
  29. 千代盛, 渡辺, 古川, 目視回転流れを数値結果から忠実に再現する方法, 日

本機械学会 2008 年年度年次大会講演論文集(6), 602, 2008 年 8 月 4 日, 横浜.

30. Furukawa H., Ohashi T., Kondo Y., Nomura A., Watanabe T., Quantitative comparison between CFD and EFD measured by PIV in co-axial rotating cylinders, 13th International Symposium on Flow Visualization, 76, 2008, Nice.
31. Watanabe T., Furukawa H., Visual estimation of effect of rim-shroud clearance on flows around a rotating disk, 13th International Symposium on Flow Visualization, 77, 2008, Nice.

[その他]

ホームページ等

<http://vi.cs.is.nagoya-u.ac.jp/watanabe-lab/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡邊 崇 (Takashi Watanabe)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 40182927

##### (2) 研究分担者(2008-2009)

吉田尚史 (Takashi Yoshida)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号: 90262857

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: