

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560193

研究課題名(和文) 固定表面および自由表面を持つ回転流れ場における流動形態の解明と制御

研究課題名(英文) Investigation and control of the flow status in the rotating flow field with rigid and free surfaces

研究代表者

渡邊 崇 (Watanabe, Takashi)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40182927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：円柱容器内で回転する円板周りの流れ、および、上端面に自由表面を持つ鉛直回転二重円柱間の流れの発生メカニズムの解明と、目的に適した状態を得る流れの制御法の確立を目的とした。容器内回転円板周りの流れでは、半径方向隙間の存在により現れ、レイノルズ数や幾何形状に依存する、各種の流れを特定し、それらの分類を行った。また、高レイノルズ数における、半径方向隙間に生ずる攪乱と円板上のスパイラル渦等との干渉現象を調べた。鉛直回転円柱間の流れでは、奇数渦の二次モードから正規モードへの遷移分岐現象を明らかにした。これらの成果により、三次元回転流の解明に新知見を導入したとともに、好ましい流れを得るための指針を得た。

研究成果の概要(英文)：The flows around a rotating disk in a cylindrical casing and the flows between vertical coaxial cylinders are examined and the flow control method to obtain a optimal states is established. In the flow around the rotating disk, a variety of flow modes that originate from the radial clearance between the disk rim and the shroud and depend on the Reynolds number and the flow configuration are specified and classified. At the high Reynolds numbers, the interaction between the flow in the radial clearance and the spiral rolls in the disk region is investigated. In the flow between rotating cylinders, the transient Reynolds numbers at which the secondary flows transit to the primary flows are determined. These results give a new insight into the investigation of the dynamical mechanics in the three-dimensional rotating flows and contribute to provide control conditions to attain favorable flows.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：旋回流 分岐 遷移ダイナミクス 回転円板 回転円柱 自由表面 計算流体力学 実験流体力学

1. 研究開始当初の背景

回転流は、かつてより理論的な解析対象とされてきたとともに、多くの流体機械や化学反応器などに現れ、実用的な面からも重要な流れとなっている。本研究では、この回転流のうち、円筒容器内で回転する円板周りの流れと、鉛直同軸の回転二重円柱間の流れに注目した。

円筒容器内で回転する円板周りの流れは、比較的単純な幾何形状であるが、横流れによるねじれた三次元速度分布が現れ、通常の平板流などとは異なる挙動をとる。このため、これまでに、円筒容器の内半径と回転円板の半径がほぼ等しいとした場合や、回転円柱コンテナや円環キャビティの場合が調べられてきた。そして、円筒容器端面と回転円板の間の軸方向距離により、各種の流れが現れることが、実験的、数値的に明らかにされてきた。これらの流れでは、回転円板は、あくまで円筒容器内で周方向速度成分を発生させるために存在するものとされてきていた。一方で、通常の流体機械では、回転体とシュラウド間に不可避的な隙間が存在する。このため、単純な回転円板で流体機械をモデル化するとしても、この半径方向隙間で発生する流れと、円板上の流れとの干渉は、興味ある現象である。

回転二重円柱間の流れは、テイラーの理論的、実験的研究から始まり、トロイダル状のテイラー渦や、その周方向への波動化、変調化が調べられてきた。また、円柱の長さが有限の場合は、これらの流れの変化が不完全分岐により現れることも明らかにされてきた。鉛直の回転二重有限長円柱においては、円柱全体が流体に埋没している場合と、円柱の高さに対して流体の高さが低い場合が調べられている。前者の場合は、多くが円柱の長さが無限であることを仮定した実験が行われてきた。後者の場合は、円柱間上部の自由表面において、気泡の巻き込みが起こる流れと、起きない流れで、流れの形態が大きく変わってくる。気泡の巻き込みが起こる場合は、主に、トルクの減少効果などの工学的特性が調べられてきた。一方で、気泡が巻き込まない表面変動流れ、あるいは、気泡の巻き込みが起こる物理的現象は、これまでに詳細には説明されてこなかった。

2. 研究の目的

円筒容器内で回転する有限に厚さを持つ円板周りの流れと、重力の影響が大きい自由表面を持つ鉛直回転二重円柱間の流れを研究対象とした。

回転円板周りの流れでは、円筒容器の内半径に比べ円板の半径が小さく、円板リムと円柱容器シュラウドの間に、有意な半径方向隙間に注目した。そして、円板厚さ、半径などにより異なる流れ場を設定した。これにより、半径方向隙間で発生する、遠心力不安定性と、従来から調べられてきた円柱容器端面と円

板表面の流れの不安定性の相互作用を解明することを目的とした。

鉛直回転二重円柱間の流れでは、円柱高さより流体の高さが小さい場合を取り上げた。そして、自由表面で起こる波動状態の解析と、流体内部で発生する渦構造の特定を目的とした。このため、重力効果、表面張力効果が異なる流れ場を設定した。

これらの流れにおいて、回転円板周りの流れ、および、自由表面を持つ鉛直回転二重円柱周りの流れに対する、幾何形状、外的作用、および回転の効果調べること、これらの流れの流動状態の俯瞰、流動状態が形成される流体力学的特性、および、望ましい流れを得るための回転運転制御法についての知見を得ることも目的とした。

3. 研究の方法

回転円板まわりの流れは、数値的、実験的アプローチで調べた。数値的には、非定常三次元支配方程式に基づく直接計算を行った。実験においては、円柱容器の内半径と高さは142mmと40mm、円板半径は122mm, 127mm, 132mm、円板厚さは30mm, 10mmを中心として、流動状態を三次元的に観測するための装置を作成した。そして、子午線断面と軸に垂直な断面を同時に照射するダブルスリット光を用いた可視化とPIVにより、測定を行った。

鉛直回転二重円柱間の流れについては、主に数値的な解析を行った。計算対象は、実験を進めている内円柱半径40mm、外円柱半径60mmの装置であり、作動流体は、グリセリン水溶液である。自由表面を持つ計算のコストを考慮し、非定常二次元支配方程式に基づく計算を行った。また、内円柱半径が400mm、外円柱半径が600mmの実験装置を新たに導入し、重力効果が大きな場合の表面波動の観測を行った。

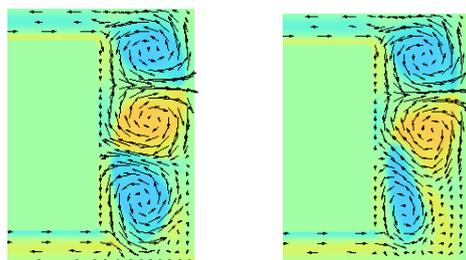
両流れにおいて、主に、幾何形状と、回転角速度に基づくレイノルズ数による、流れの分岐図を決定した。

4. 研究成果

円筒容器内で回転する円板周りの流れにおいては、半径方向隙間で発生する流れの、円板回転各速度に対する影響を見積もった。実験結果として、半径127mm、厚さ30mmの場合を例に、その分岐過程を述べる。円板角速度が遅く、レイノルズ数が小さい場合は、子午線断面に4個の安定したテイラー渦が発生する。角速度が速くなり、レイノルズ数が増すに従い、この4個の渦の流れは不安定となり、3個の渦の流れが現れる。この3個の渦の流れも、よりレイノルズ数が小さいときには安定した定常流が、よりレイノルズ数が高いときには変調流が現れる。このうち、定常流では、回転円板周りに30個ほどの小さな渦構造(ビーズ渦)を持つ。一方、変調流では、数個の多角形の渦が表れるようになる。さらにレイノルズ数が増すと、子午線断面で

は、円筒容器端面で外向きの流れを持つ、変異二渦流れが表れるようになる。

回転円板周りの流れにおける実験的に決定された上記の流れの分岐は、数値計算でも確かめられた。数値計算では、その結果を詳細に可視化、解析することにより、30個ほどの小さな渦の発生機構を調べた。その結果、変異渦に伴い、円筒容器端面とシュラウドの角部に現れるエクストラ渦が、周方向に変動して形成されるものであることを明らかにした。また、数個の多角形の渦は、一旦、ビーズ渦が円板周りに現れた後に、それらが融合して形成される渦であることが示された。ビーズ渦、多角形渦が表れる場合の半径方向隙間子午線断面の流れのスナップショットを、それぞれ図1(a)、(b)に示す。ビーズ渦では、安定した3個のセルが現れる一方で、多角形渦では、形状が崩れた渦構造が現れている。流れ場全体の速度変動とトルクを調べ



(a) ビーズ渦 (b) 多角形渦

図1 子午線断面内の渦構造

たところ、レイノルズ数に関わらず、多数の小さな渦が表れる流れは、時間的にも安定している一方で、多角形渦が現れる流れは、大きな変動を伴う。これは、多角形渦が現れるような運転モードでは、化学反応器などにおいては、反応促進となる一方で、通常の流体機械においては、動力の変動、触れ回りなどを示唆するものである。さらにレイノルズ数が増すと、回転円板が存在する半径位置の、円筒容器端面に、スパイラル状の渦が現れるようになる。レイノルズ数が低い場合は、このスパイラル渦は、半径方向隙間で生ずる変動流れが、円筒容器端面上の内向き流れによって運ばれることにより生成される。このため、このときのスパイラル渦は、円板の回転方向に対して負の角度を持つ。一方で、高レイノルズ数においては、通常の半径方向隙間が存在しない場合に発生する、速度変曲点不安定性、横流れ不安定性による流れが現れた。つまり、例えば、軸方向距離が小さい場合、端面上と円板上に発達する境界層が融合し、円板の回転に対して、流れが乱流化しにくいものの、高レイノルズ数で、流れ方向に対して小さな角度を持つ密なスパイラル渦や、間欠的に発生する乱流スポットが発生する。軸方向距離が大きい場合には、比較的低レイノルズ数で、大きな角度を持つスパイラル渦が現れることが示された。これらの渦が出現す

る臨界レイノルズ数は、従来の半径方向隙間のない実験的結果と良い一致を示した。この結果は、回転円板の横流れ不安定性と、半径方向隙間での不安定性の相関性が低いことを意味している。また、円板厚さを変えることで、奇数渦の片側のみのビーズ、偶数渦の両側ビーズ、偶数渦の中心ビーズ渦の存在を確かめた。これらの結果は、回転場を持つ複雑な流れに対して、より深い力学的知見を与えるものである。また、攪乱の多い流れや、駆動トルクの低い流れを実現するための円板運転法を規定するために有用となる。

鉛直回転二重円柱間の自由表面を持つ流れの解析では、非定常軸対称計算結果の時間収束性と、実験における表面派動の観測結果より、三次元性発現のレイノルズ数を見積もった。そして、アスペクト比が2.0以下で現れる3個の渦の流れから1個の渦の流れに変化する遷移レイノルズ数、および、アスペクト比4.2以下における、5個の渦の流れから3個の渦の流れとなる遷移レイノルズ数を見積もった。あわせて、一定のレイノルズ数、アスペクト比に対しても、非一意の流れが現れることを示した。このとき、渦の数が少ない流れは、渦の多い流れより大きなエネルギーを持ち、流れを維持するための動力も大きくなるとともに、この傾向は、アスペクト比が小さくなるほど顕著になることを明らかにした。変異モードとして、偶数個の渦を持つ流れは、固定下端面において、変異渦が現れ、対称系と同様に、エクストラセルを持つことを明らかにした。さらに、より大きなアスペクト比における流れを調べ、7個の渦を持つ2次モード流れが、主モードに変遷するレイノルズ数を、図2に示すように数値的に決定

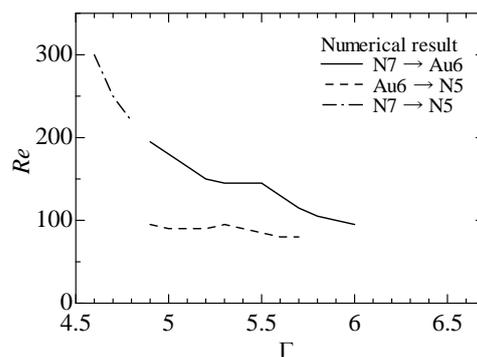


図2 数値的に決定した分岐線

した。この結果は、実験との良い一致を示した。数値結果により明らかにした流れの分岐図は、好ましい流れ状態を得るために流れの運転制御をするために有用となる。

本研究を遂行する間に、本研究に関連するいくつかの派生的な研究も進めることができた。

実験においては、流体中に混入した微小粒子を追跡する画像処理アルゴリズムの構成に取り組んだ。流体粒子の追跡では、まわり

の粒子の動きに沿わない運動をする粒子を排除することが大切である。このため、粒子追跡アルゴリズムを拡張し、群集の流れを捉え、異常行動を同定するシステムを構築した。これは、流体分野の研究が、情報科学分野を含んだ領域にも適用できる例を示したものであり、流体情報学の実現成果といえることができる。

回転二重円柱間の流れを解析するルーチンを用いて、渦の発達が1次元非定常のLandau方程式に基づく仮定することにより、渦が成長、減衰する場合の時定数を見積もった。その結果、減衰は成長よりも大きい時定数を持つこと、そして、その傾向は、アスペクト比が大きくなると、より顕著になることを示した。また、成長過程では、流れ場全体にわたり、時定数の変化が小さいことに対して、減衰過程では、円柱軸方向の中心領域では、大きな時定数を持つことが、解析的に示された。これらの結果は、流体機械等の回転を伴う流れが、定常過程に達するまでの時間を見積もるための有用な情報となる。

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5件)

- ① T. Watanabe, Y. Toya, Vertical Taylor-Couette flow with free surface at small aspect ratio, *Acta Mechanica*, 査読有, Vol. 223, 2012, pp. 347-353. DOI: 10.1007/s00707-011-0569-9
- ② 渡辺崇, 藤澤翔平, 半径方向に隙間を持ち円柱容器内で回転する円板周りの流れのレイノルズ数による遷移, *日本機械学会論文集(B編)*, 査読有, 78巻, 786号, 2012, pp. 244-253. <http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.78.244>
- ③ T. Watanabe, Time constants of the transition between onset and decay Reynolds numbers for the appearance of Taylor-Couette flow, *World Journal of Mechanics*, 査読有, Vol. 2, No. 2, pp. 77-83. DOI: 10.4236/wjm.2012.22009
- ④ 渡辺崇, 金井謙二, 人の歩行軌跡の累積に基づく異常行動の特定, *日本機械学会論文集(C編)*, 査読有, 78巻, pp. 1221-1225. <http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.78.1221>
- ⑤ T. Watanabe, Y. Toya, S. Hara, Development and flow modes of vertical Taylor-Couette system with free surface, *World Journal of Mechanics*, 査読有, Vol. 4, No. 3, pp. 90-96.

DOI: 10.4236/wjm.2014.43010

[学会発表] (計23件)

- ① Y. Toya, S. Hara, Y. Wada, T. Watanabe, Fluctuation of interface between fluids in the rotating cylinders, 11th Asian Symposium on Visualization, Jun. 6 2011, Niigata.
- ② T. Watanabe, Variation of time constant between the super-critical and sub-critical Taylor-Couette flow, 11th Asian Symposium on Visualization, Jun. 6 2011, Niigata.
- ③ T. Watanabe, S. Fujisawa, Three-dimensional flow structure around a finite disk rotating in a cylindrical casing, 11th Asian Symposium on Visualization, Jun. 7 2011, Niigata.
- ④ Y. Toya, S. Kuwabara, S. Nakazawa, 3-dimensional numerical analysis of Taylor flow and wavy Taylor flow, 11th Asian Symposium on Visualization, Jun. 8 2011, Niigata.
- ⑤ T. Watanabe, Bead-like vortex and sickle-like vortex found around a thick rotating disk in a casing, 17th International Couette-Taylor Workshop, Jul. 25 2011, Leeds, UK.
- ⑥ T. Watanabe, Time constant in the onset and decay flow of Taylor-Couette flow around critical Reynolds number, 17th International Couette-Taylor Workshop, Jul. 26 2011, Leeds, UK.
- ⑦ 渡辺崇, 流体工学と問題解決, *日本機械学会2011年度年次大会*, 2011年9月12日, 東京.
- ⑧ 藤澤翔平, 渡辺崇, 容器内回転円盤周りに現れる流れの遷移過程, *日本機械学会第24回計算力学講演会*, 2011年10月9日, 岡山.
- ⑨ 井関雄介, 渡辺崇, 回転二重円柱間流れに対する初期攪乱の数値解析, *日本機械学会第24回計算力学講演会*, 2011年10月9日, 岡山.
- ⑩ 渡辺崇, 円柱クエット流とテイラー流れの発達時定数の可視化, 第25回数値流体シンポジウム, 2011年12月20日, 大阪.
- ⑪ 藤澤翔平, 渡辺崇, 容器内回転円盤周りに現れる流れ形態の軸方向隙間による遷移, 第25回数値流体シンポジウム, 大阪.
- ⑫ H. Furukawa, H. Horikoshi, N. Ohazama, T. Watanabe, PIV analysis of mode bifurcation in Taylor vortex flow, 15th International Symposium on Flow Visualization, Jun. 25 2012, Minsk.
- ⑬ T. Watanabe, H. Furukawa, Bifurcation

- of flow around a rotating disk, 15th International Symposium on Flow Visualization, Jun. 27 2012, Minsk.
- ⑭ T. Watanabe, Visualization of people-flow path in environment and identification of outlier, 15th International Symposium on Flow Visualization, Jun. 28 2012, Minsk.
- ⑮ 渡辺崇, 回転円板周りの流れの可視化的形態変化, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢.
- ⑯ 三成雅子, 渡辺崇, VOF モデルと非反復時間進行アルゴリズムを用いたタンクスロッシング非定常問題の数値解析, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢.
- ⑰ 渡辺崇, 回転二重円柱間で発達・減衰する渦の時定数, 日本機械学会流体力学部門講演会, 2012 年 11 月 17 日, 京都.
- ⑱ 吉田尚史, 渡辺崇, キャビティ自励振動流の底面駆動法による能動制御の DNS による研究, 日本機械学会流体力学部門講演会, 2012 年 11 月 18 日, 京都.
- ⑲ 東矢俊介, 吉田尚史, 渡辺崇, 開いたキャビティを過ぎる三次元非圧縮流れにおける渦構造の解析, 日本機械学会北信越支部第 50 期総会・講演会, 2013 年 3 月 9 日, 福井.
- ⑳ 原詳太, 戸谷順信, 渡辺崇, 回転二重円筒間を旋回する二液流体の界面振動の画像解析, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 9 日, 岡山.
- 21 H. Furukawa, H. Horikoshi, T. Watanabe, Experimental study of Taylor vortex flow in non-Newtonian fluids, 18th International Couette-Taylor Workshop, Jun. 24 2013, Enschede, Netherlands.
- 22 T. Watanabe, Y. Toya, Y. Iseki, Mode control of flow in vertical Taylor-Couette system with free surface, 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Nov. 19 2013, Nara.
- 23 Y. Toya, T. Watanabe, S. Hara, Fluctuation of the interface between two immiscible fluids in the vertical rotating cylinders, 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Nov. 20 2013, Nara.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.vi.cs.is.nagoya-u.ac.jp/watanabe-lab/index.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 崇 (WATANABE Takashi)
名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：40182927

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

戸谷順信 (TOYA Yorinobu)
長野工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号：40180187