

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05791

研究課題名(和文) 回転場における流れモードの競合現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of mode competition phenomena in rotating flows

研究代表者

渡邊 崇 (Watanabe, Takashi)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：40182927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000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と、回転する2円板間の流れに現れる流動モードを研究した。また、自由表面を持つ鉛直回転二重円柱間の流れのモードを調べた。これらの流れ場は、軸方向および半径方向に有限の境界を持ち、境界近くの層内の流れと干渉と遠心力効果は、複雑な3次元流れ構造を与える。静止状態から発達する流れは、各層で発生する初期渦と不安定の効果を受け、様々な過程を経て成長して、最終的な多彩なモードを形成する。回転円板周りの流れでは、これらの多彩なモードが現れるシナリオを明らかにした。回転円板間の流れと自由表面を持つ回転流では、可視化情報、画像処理から、流れのモードの分類を行った。

研究成果の概要(英文)：The flow modes found in the flows around a rotating disk in a cylindrical casing and the flow between two rotating disks are studied. The modes of the free surface flows between vertical two rotating cylinders are also investigated. The flow field has limited boundaries in the axial and radial directions, and the interaction among the flows in the layers near the boundaries and the centrifugal effect make a complex three-dimensional flow structures. The flows starting from a stationary state are affected by the initial vortices appearing in these layers and the instability and they are led the final state via various developing processes. The scenario describing the flow evolutions is clarified in the flows around a disk. In the flow between two disks and the flow in the vertical cylinders, the visualization information and image processing are used to classify the flow modes.

研究分野：流体工学

キーワード：回転流 流れモード モード競合 分岐 回転円板 回転円柱

1. 研究開始当初の背景

有限容器内で回転する物体の周りの流れは、流体機械や化学反応器、バイオリアクタを含む様々な場で現れ、その解明は、実用的、応用的な面から重要であるばかりでなく、流動現象の解明においては、学術的にも有用である。本研究では、有限の円柱容器内で回転する有限の円板周り流れを対象とした。この流れ場は、比較的単純ではあるが、半径方向や軸方向の寸法の幾何学的拘束により、各種の境界層流れが現れるとともに、遠心力や横流れによる不安定性が加わることにより、複雑な流れ構造を与える。本研究では、特に、3次元流れ構造のモードと、その発達過程に注目した。

回転円板周りの流れでは、円板と、それを覆う円柱容器の半径が、ほぼ等しい場合の、円板の軸方向隙間における横流れ不安定性のモデル流や、回転円柱キャビティ、回転円環キャビティの流れが対象とされてきた。円板表面と容器端面の間隔が広い場合には、円形渦、スパイラル渦や乱流構造が現れやすい一方で、間隔が狭い場合には、安定性は高くなるものの、乱流構造が局所的、突発的になることが示されてきた。円柱キャビティ、円環キャビティの流れでは、子午線断面内の2次流れ構造が調べられてきたとともに、中心の静止、回転ハブの存在が、流れ場全体に与える影響が見積もられてきた。

回転円板の厚さが大きい時、円柱容器内の円板周りの流れは、回転2重円柱の半径方向隙間に現れる流れの様相を示す。2重円柱の流れでは、円柱クエット流に加え、遠心力不安定性に伴い発生するテイラー渦、波動テイラー渦、変調テイラー渦、乱流テイラー渦が知られている。また、軸方向の固定境界面上の流れの半径方向速度成分の正負により決まる、変異モードと正規モードの出現や、同じ幾何形状、物理条件にも関わらず、複数の流れ構造の出現が示されてきた。また、静止状態から円柱が回転を始める場合に、回転円柱側面上で圧力勾配不安定性により発生する渦の挙動が観測されてきた。

円柱容器内で回転する円板周りの流れでは、容器端面と円板表面の間の軸方向隙間と、容器側面と円板縁の間の半径方向が現れる。そして、容器の端面と側面、および、円板の表面と縁面に、せん断層が発達し、これらがお互いに干渉するとともに、主流の周方向流れとも干渉する。このため、多様な3次元構造を持つと考えられる流れの構造の詳細を特定することは重要である。また、円板が静止状態から回転を始める場合の流れでは、固体壁面近くのせん断層で発生する初期渦の競合を引き起こし、この競合から、どのような過程を経て、最終的な流れ構造が形成されるかは、未解決な問題の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、まず、円柱容器内で回転する

有意な厚さを持つ円板周りに発達する流れモードの特定と、その構造解析を目的とした。また、回転円板周りの流れの解析方法を派生させ、中心のハブを共有し共回転する2円板間の流れ構造の特定を進めた。さらに、軸を鉛直に持つ、回転2重円柱間に発達するテイラー・クエット流れを対象とした。

回転円板周りの流れでは、円柱容器との間の軸方向と半径方向のそれぞれの隙間で形成される流れと、それらの流れの干渉により形成される流れモードの観測による類別、および、数値解析による構造の解明を目的とした。回転によるレイノルズ数の効果に加えて、円板の厚さを、流れの制御パラメータとして導入し、軸方向と半径方向隙間の間の流れの干渉の度合いの効果を、円板に働くトルクなども考慮し、見積もることとした。また、観測動画を参考にしつつ、非定常数値解析により、静止状態から発達流に至るまでの流れの発達シナリオの特定を行うこととした。

共回転する2円板間の流れにおいては、これまで実験的に観測されている、軸方向断面内の多角形渦モードと、子午線断面内の定常・非定常渦モードを、数値計算により調べることが目的とした。特に、回転する渦の形と、その周りの流れの様子の解明を進めた。

自由表面を持つ鉛直回転2重円柱間の流れでは、自由表面の液位の時系列変動の計測を行い、そのデータの統計処理を通して、回転する自由表面流のモードを特定することを目的とした。同時に、画像データより、自由表面の形態を調べることにした。

これらの軸対称物体の回転によって生ずる流れのモードと、その発達過程を調べることににより、流れの制御についての知見を得ることも視野に入れた。

3. 研究の方法

円柱容器内の回転円板周りの流れは、研究代表者が構築した数値計算法を用いた方法と、研究協力者とともに行った実験的方法を適用した。実験で業績がある円柱容器と円板の幾何学的寸法を参考に、容器の高さと内径を40 mm、142 mmと固定した。円板の寸法では、半径が112 mmから132 mm、厚さが20 mmから36 mmの場合を、主な数値解析の対象とした。これにより、軸方向隙間間隔と半径方向隙間間隔の様々な組み合わせを実現した。また、円板の静止時からの増速率を、流れの制御パラメータとすることで、初期渦の発達速度に変化を持たせ、多彩な流れモードの発達を促した。

回転2円板間の流れでは、既存の研究報告を参考に、円板の半径および縁面周速度を代表値としたときに、中心の回転ハブ径を0.11と固定し、レイノルズ数は10,000程度まで、2円板間の隙間は0.1から0.3を対処とした。数値解析にあたり、まず、この流れに適切な対流項の定式化法、および、乱流モデルを検討し、安定的に計算できるソルバを選定した。

そして、軸方向断面内、子午線断面内の渦構造から流れのモードを確認するとともに、回転系での流線図を得ることで、流れモードの詳細を調べた。

鉛直回転2重円柱では、回転内円柱半径が200 mm、静止外円柱半径が300 mmの装置を用いた。作動流体はグリセリン水溶液であり、対象としたレイノルズ数は、600程度から7000程度である。自由表面液位は、数msの時間解像度のある変位計で測定した。この変位計を、円柱間隙間100 mmの間で設置し、各半径位置での測定を行った。同時に、観測動画データを画像処理することにより、表面の状態を分類した。また、子午線断面の流れをトレーサで可視化し、正規モード、変異モードの存在を調べた。

4. 研究成果

円柱容器内で回転する円板周りの流れのモードを、既存の、回転内円柱・静止外円柱間でのテイラー・クエット流れ、および、静止・回転円板間の軸方向隙間での流れに関する研究における分類に則して、述べる。

軸方向隙間においては、2セル(2渦、以下同様)、3セル、4セル、6セルのモードが見出され、偶数セルにおいては、容器端面での流れが半径方向内向きの正規モードと、半径方向外向きの変異モードが確認された。円板半径が小さな場合は、正規の2セルモードが現れ、円板半径が大きくなると、より多くのセルが現れるようになる。正規モードは、レイノルズ数が小さい場合、および、軸方向隙間が狭い場合に現れやすい傾向がある。これは、軸方向隙間が大きくなると、回転円板上で発生する半径方向外向き流れの影響が大きくなることによる。変異モードは、円板半径が大きくなることにより出現しやすくなることも明らかになった。Fig. 1は、子午線断面内での速度ベクトルをつなぐことで表した、半径方向隙間での流れを示す。大

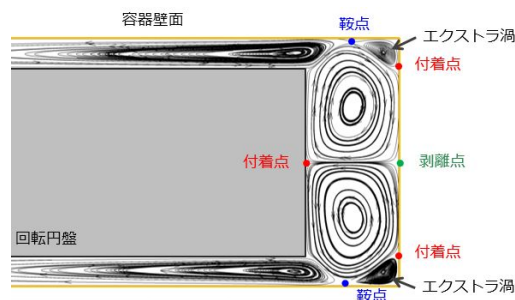


Fig. 1 変異2セルの流れ構造

きな2つの渦は、上下の容器端面で半径方向外向きの流れを持ち、それに伴い、右上、右下には、2次的なエクストラ渦が現れている。また、円板上下面での伸びた渦構造も見られる。エクストラ渦、および、円板面上の伸びた渦構造は、それぞれ、従来のテイラー・クエット流れと静止・回転円板間流れの研究で

も指摘されていたが、Fig. 1に示す流れは、半径方向隙間の流れと軸方向隙間の流れが干渉して生じた者であり、その発生過程は異なる。

軸方向隙間では、円形渦モード、多角形渦モード、ビーズ状渦モード、正のスパイラル渦モード、負のスパイラル渦モードなどが見出された。このうち、多角形渦モード、ビーズ状渦モードは、半径方向隙間の流れが変異モードであり、多角形、ビーズ状の渦は、Fig. 1に示したようなエクストラ渦が、周方向に大きさが変わり現れることを確かめた。Fig. 2は、円板半径を127 mmに固定し、円板厚さとレイノルズ数が張る空間で、円形、多角形、正・負のスパイラルモードが現れる領域を示す相図である。円板が薄く、軸方向隙間が大

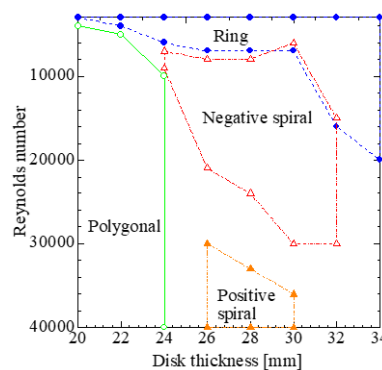


Fig. 2 軸方向隙間モードの存在領域

きい場合は、多角形渦モードが現れやすくなり、円板が厚くなるに従い、負・正のスパイラル渦モードが発生する。円板がさらに厚くなると、低レイノルズ数側の領域に抑えられていた円形渦モードの範囲が拡大する。軸対称な円形渦モードに対して、他のモードは非軸対称であり、流れに振動をもたらす。Fig. 2の相図は、振れ回りなどを抑えた装置の設計や、反応を促進するようリアクタの設計においても有用となる。

静止状態から回転を始める円板周りの流れの発達を表すシナリオの特定においては、まず、半径方向の流れモードに注目して、シナリオの登場対象を選定した。そして、初期の状態のエクマン渦等から、中間の正規4セルモード、変異2セルモードを経て、最終的な流れモードに至るルートを選定した。

円板に働くトルクについては、レイノルズ数と円板厚さから受ける影響を調べた。その結果、トルクは、レイノルズ数、および、円板厚さの容器長さに対する比のべき乗則で与えられる一つの式で表されることを示した。また、半径方向隙間の存在により、従来の静止・回転円板間のトルク則とは異なる式となることを示した。本研究で導かれたべき乗則は、各種の回転流体装置の損失見積もりにも貢献する。

回転円板周りの流れの研究から派生させた、回転2円板間流れの研究においては、直

接数値計算法と Large Eddy Simulation(LES) の2つの方法により解析を行った。そして、2円板間の隙間が小さな場合は、2つの方法とも既存の実験との良い一致を示すことを確認した。隙間が大きな場合は、直接計算では実験と比べてよい結果を与えるが、高レイノルズ数の計算が困難になること、LESでは実験との差が現れやすい結果が得られた。実験結果との良い一致を示した計算結果からは、流れの詳細を明らかにすることができた。Fig. 3は、円板の回転角速度に対して0.7程度の角速度で回転する系からみた速度ベクトルから構成した流れ構造を示す。中心部を

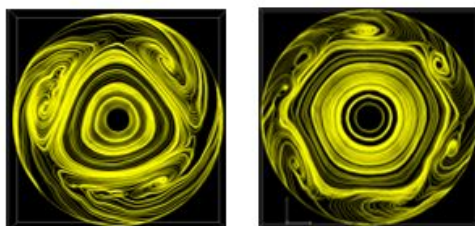


Fig. 3 回転2円板間流れの多角形構造

取り囲み、周辺に、左図では3個の渦、右図では6個の渦が現れている。また、周辺渦で、強く回転している渦と弱く回転している渦が、多角形構造に及ぼす影響を見ることができる。回転2円板間の流れでは、子午線断面内でも、定常、非定常の比較的大きな渦を持つ流れモードを確認できたとともに、小さな渦が混在する新しいモードを見出すことができた。

鉛直な2重円柱間の流れでは、装置の幾何寸法が大きいため、重力の効果が大きい静止外円柱近くの領域と、慣性力の効果が大きい回転内円柱近くの領域が現れた。これらの領域は、自由表面の形状により区別することができ、外側では盛り上がり部分、内側では平坦部分として区別できる。この外側の部分と内側の部分の面積を、上側からの自由表面の動画データを画像処理することにより定量的に決定し、各面積と回転レイノルズ数等との関係を求めた。また、自由表面の時系列変位を、円柱間の各半径位置で測定した。その結果、時系列変動は、必ずしも正規分布では表現できないということが分かった。また、変位の半径方向の変化には、数個の様相モードが存在することが見られた。

本研究では、回転流が示す流れのモードの存在と、モードが形成される過程の解明を対象としてきた。そして、回転円板周りの流れでは、新しいモードの特定と、発達過程のシナリオを構成するとともに、モードに関する相図やトルクの算出式を示すことができた。同様なモードの特定とその詳細構造の解明は、回転2円板間の流れにおいても進めた。自由表面を持つ流れでは、動画データや変位データを後処理することにより、流れのモー

ドが特定できることが示された。これらの成果は、回転流自体の性質の解明や回転機械の設計、制御などで利用できるとともに、単純な形状ではあるが複雑なモード形態を持つ流れを調べるための方法論としても、有用な情報を与える。

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8件)

T. Watanabe, S. Endo, Flow developing around a finite rotating disk enclosed by a cylindrical casing, Materials Science and Engineering, 査読有, Vol 297, 2018, pp. 1-10.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/297/1/012066>

DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/297/1/012066>

H. Furukawa, A. Wada, T. Watanabe, Experimental study of clarification of vortex structure by changing disk acceleration time, World Journal of Mechanics, 査読有, Vol. 7, No. 8, 2017, pp. 185-194.

DOI: <https://doi.org/10.4236/wjm.2017.78017>

DOI: <https://doi.org/10.4236/wjm.2017.78017>

平田 勝哉, 千葉 哲郎, 有光 政人, 津川 昇平, 渡辺 崇, 前田 毅, 谷川 博哉, ケーシング内の共回転二円板間の多様な流れのPIV計測と数値計算, ターボ機械, 査読有, 45巻, 2号, 2016, pp. 361-370.

<http://www.turbo-so.jp/>

[kaishi.html#menu1](http://www.turbo-so.jp/kaishi.html#menu1)

T. Yoshida, T. Watanabe, Numerical simulation of flow over an open cavity with self-sustained oscillation mode switching, Open Journal of Fluid Dynamics, 査読有, Vol. 6, No. 4, 2016, pp. 361-370.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2016.64027>

DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2016.64027>

戸谷 順信, 大井 伸天, 渡辺 崇, 回転二重円筒間を巡回する互いに混和しない二液界面の波動現象, 日本機械学会論文集, 査読有, 82巻, 835号, 2016, pp. 15-00621-1-13.

DOI: <https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00621>

DOI: <https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00621>

T. Watanabe, H. Furukawa, S. Fujisawa, S. Endo, Effect of axial clearance on the flow structure around a rotating disk enclosed in a cylindrical casing, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 査読有, Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 1-2.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jfcmv.2016.41001>

DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jfcmv.2016.41001>

H. Nishikawa, K. Matsumura, S. Okuno, T. Watanabe, F. Suds, Detection of the

chaotic flow instability in a natural convection loop using the recurrent plot analysis and the nonlinear prediction, Journal of Thermal Science and Technology, 査読有, Vol. 10, Issue 2, 2015, pp. 15-00236-1-12.

DOI: <https://doi.org/10.1299/jtst.2015jtst0028>

S. Hara, T. Watanabe, H. Furukawa, S. Endo, Effects of a radial gap on vortical flow structure around a rotating disk in a cylindrical casing, Journal of Visualization, 査読有, Vol. 18, Issue 3, 2015, pp. 501-510.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s12650-015-0292-z>

[学会発表](計 24 件)

上西 亮輔, 西田 尚史, 渡辺 崇, 平田 勝哉, 実験と数値解析によるケーシング内共回転二円板間の流れの解明, 日本機械学会関西支部第 93 期定時総・講演会, 2018 年 3 月.

吉田 尚史, 渡辺 崇, 二次元オープンキャビティ流れの異なる振動モードの底面駆動能動制御, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018, 3 月.

鈴木 智洋, 吉田 尚史, 渡辺 崇, 開いたキャビティを過ぎる非圧縮流れの三次元渦構造の数値解析, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018, 3 月.

丸山 巧, 戸谷 順信, 相馬 顕子, 渡辺 崇, 回転二重円筒間を旋回する粘性流体の表面波動 (FFT 解析), 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018, 3 月.

平林 直斗, 戸谷 順信, 相馬 顕子, 渡辺 崇, テイラー渦流れの不安定性に関するカオス理論による数値解析, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018, 3 月.

R. Uenishi, T. Watanabe, H. Tanigawa, K. Hirata, Multi-flow modes between co-rotating disks in casing by numerical analysis and experiment, the 8th International Conference on Mechanical Engineering, 2017, Dec., Bangkok.

M. Minari, T. Watanabe, Experimental study of temperature rise near the flow in lecture room with air-conditioner and fan operation, the 9th JSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conference, 2017, Oct., Okinawa.

上西 亮輔, 西田 尚史, 渡辺 崇, 谷川 博哉, 平田 勝哉, 実験と数値解析によるケーシング内共回転円盤間の流れモード, 第 79 回ターボ機械協会講演会, 2017 年 9 月.

H. Nishikawa, T. Watanabe, Chaos analysis of transition flow in a natural convection loop, the 7th International Symposium Bifurcation and Instabilities in Fluid Dynamics, 2017, Jul., the Woodlands, TX.

山田 真生, 渡辺 崇, 畳み込みニューラルネットワークの特徴マップ選択によるトラッキング, 情報処理学会第 79 回全国大会, 2017 年 3 月.

R. Uenishi, S. Tsugawa, T. Maeda, M. Uesaka, T. Watanabe, H. Tanigawa, K. Hirata, Visualization of diverse flow between co-rotating disks in casing by numerical analysis and experiment, the 7th International Conference on Mechanical Engineering, 2016, Dec., Chaing Mai.

上坂 守彦, 津川 昇平, 平田 勝哉, 渡辺 崇, ハブを共有し円柱容器内で回転する二円板間流れの数値解析, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016 年 12 月.

上西亮輔, 津川 昇平, 上坂 守彦, 渡辺 崇, 谷川 博哉, 平田 勝哉, ケーシング内の二円板間に複雑流れの数値解析と実験による可視化, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 2016 年 9 月.

H. Furukawa, A. Wada, T. Watanabe, Vortex structure depending on disk acceleration time in cylindrical casing, the 27th International symposium on transport phenomena, 2016, Sep., Honolulu.

T. Watanabe, S. Endo, Y. Toya, Numerical estimation of the flow around a rotating disk in a cylindrical casing, the 12th World Congress on Computational Mechanics, 2016, Jul., Seoul.

Y. Toya, T. Watanabe, Chaotic numerical analysis for instability of the Taylor vortex flow, the 12th World Congress on Computational Mechanics, 2016, Jul., Seoul.

坂井 友一, 渡辺 崇, 遠藤 壮真, 回転円盤周りの渦構造とレイノルズ数効果に伴うトルクとの関係の予測, 日本機械学会東海支部 65 期総会講演会, 2016 年 3 月.

上坂 守彦, 津川 昇平, 平田 勝哉, 渡辺 崇, ハブを共有し回転する二円板間の流動形態の予測, 日本機械学会東海支部 65 期総会講演会, 2016 年 3 月.

遠藤 壮真, 渡辺 崇, 坂井 友一, 円筒容器内回転円盤による旋回流の力学特性と渦構造の発達過程, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 2015 年 12 月.

遠藤 壮真, 渡辺 崇, 坂井 友一, 円筒容器内で回転する円盤まわりに現れる渦

構造の発達過程，可視化情報全国大会（京都 2015），2015 年 10 月。

- 21 坂井 友一，渡辺 崇，遠藤 壮真，回転円板周りの渦発達に対する円盤増速率の効果，可視化情報全国講演会(京都 2015)，2015 年 10 月。
- 22 遠藤 壮真，渡辺 崇，原 詳太，円筒容器内回転円板の増速率による渦構造の変化，日本機械学会 2015 年度年次大会，2015 年 9 月。
- 23 渡辺 崇，中村 育雄，二重矩形領域内流れの様相，日本機械学会 2015 年度年次大会，2015 年 9 月。
- 24 津川 昇平，有光 政人，前田 毅，谷川 博哉，渡辺 崇，平田 勝哉，ケーシング内の二円板間の流れの PIV 計測と数値解析，ターボ機械協会第 73 回総会講演会，2015 年 5 月。

〔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/>

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

(4) 研究協力者

古川 裕之 (Furukawa Hiroyuki)