

## 博士学位論文審査要旨

2008年2月12日

論文題目 回転2円板間流れの不安定性と遷移

学位申請者 三浦 知仁

### 審査委員

主査 同志社大学工学研究科 教授 水島 二郎

副査 鳥取大学工学部 教授 藤村 薫

副査 同志社大学工学研究科 教授 平田 勝哉

### 要 旨

一般に、空間的に対称的な境界内を流れる流れは、流速が小さいとき境界と同じ対称性を有する定常流であるが、流速が大きくなると不安定性により対称性を失って、より複雑な空間構造をもつ非定常流へと遷移する。流れの層流状態から乱流状態への遷移は、このような不安定性が繰り返し生じることによって起こるものと考えられているが、その詳細については未だ解明されていない。このような乱流遷移は流体物理学の重要な研究課題の1つであるが、流体工学においても乱流の発生は振動や騒音の原因となることより、工学的にも重要視されている。

本論文では、静止円筒内で回転する2枚の円板間流れの不安定性と乱流への遷移を、理論および実験により詳細に調べている。理論では、数値シミュレーション・解の分岐理論・流れの安定性理論を用いて流れのパターンとその遷移を調べ、実験ではレーザー・ドップラー流速計による流速測定および粒子画像計測法(PIV)による流速分布計測を行い、流れの性質を調べている。

この流れは、円板の回転速度が小さいときは、回転軸について軸対称で、2円板間隔中心面についても反転対称な層流である。しかし、円板の回転速度を大きくしていくと流れは不安定となり、その対称性を順次失って、より複雑な空間構造をもつ流れとなり、不規則な乱流へと遷移する。本論文は、軸対称な層流流れが不安定性により、多角形パターンをもつ複雑な流れへと遷移する物理的機構とその遷移の道筋を明らかにしたものである。

本論文は、第1章から第6章までで構成されている。第1章では、回転2重円筒間流れと回転2円板間流れについてのこれまで行われてきた研究の総括をし、本論文の研究目的を述べている。

第2章では、軸対称性を仮定した流れ場において、子午面内流れパターンが反転対称性を失う原因とその物理的機構を明らかにしている。第3章では、流れ場の軸対称性の破れについて線形安定性解析および可視化実験を用いて調べた結果を示し、反転対称流の非軸対称攪乱に対する線形安定性を調べた結果、第2章で示した反転対称性を破る分岐が生じる臨界レイノルズ数より低いレイノルズ数で、第一次不安定性としてホップ分岐が生じ、多角形パターンが現れることを明らかにし、この多角形パターンをもつ流れはシフト反転対称性を有することを示した。第4章は、数値シミュレーションにより流れの遷移過程を調べた結果を示しており、第一次不安定性として超臨界ホップの発生とシフト反転対称型の非軸対称流への遷移を確かめている。また、この遷移とは別に、超臨界ピッチフォーク分岐が生じ定常な非反転対称流が現れた後、さらに超臨界ホップ分岐が起こり、非反転対称型の多角形パターンが生じるような遷移ルートも存在することも明らかにした。第5章では、可視化実験およびPIV測定を行って、シフト反転対称型の非軸対称流と非反転対称型の非軸対称流に対して、最も支配的な空間モードをもつ速度変動成分の分布をPIV測定により調べた結果、シフト反転対称流は外壁境界層の不安定性、非反転対称型の非軸対称流は内部境界層の不安定性が、これらの流れの発生する主要因となっていることを示した。第6章は、第2章から第5章より得られた結果についての総括である。

この結果は、回転流体機械内部流れの基礎研究として、機械工学の分野で高く評価されているだけでなく、回転系流体の層流から乱流への遷移機構を解明したものとして、流体物理学の分野でも高く評価されている。よって、本論文は博士（工学）（同志社大学）としての価値を十分に有するものと認める。

## 総合試験結果の要旨

2008年2月12日

論文題目 回転2円板間流れの不安定性と遷移

学位申請者 三浦 知仁

### 審査委員

主査 同志社大学工学研究科 教授 水島 二郎  
副査 鳥取大学工学部 教授 藤村 薫  
副査 同志社大学工学研究科 教授 平田 勝哉

本論文提出者は、2004年4月から本学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程(後期課程)に在学し、各年度において優れた研究成果を挙げている。また、英語の資格試験に合格し、ドイツ語についても十分な能力があると認定されている。

本論文の主たる内容は Fluid Dynamics Research および Physics of Fluids の英文誌にそれぞれ1編の論文として出版されており、十分な評価を得ている。2008年1月12日午後1時より約1時間半にわたり提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開催され、種々の質疑応答がなされたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに、講演終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題について口頭試問を実施した結果、いずれも提出者が十分な学力を有することを確認することができた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 回転2円板間流れの不安定性と遷移

氏名： 三浦 知仁

## 要旨：

異なる半径をもつ2つの同軸円筒間に流体を満たし、内円筒を回転すると流体中にはきれいに整列したトーラス状の渦列を生じる。この流れが誘起される物理的機構はテイラー (G. I. Taylor) によって調べられ、非常に簡単な理論によりその生成機構が流れの不安定性によって説明できることが明らかとなり、流れの安定性理論の礎となった。現在では、第一次不安定性によって生じる流れはテイラー渦と呼ばれ、回転2円筒間流れの問題はテイラー問題と名付けられて、物理学の分野のみならず、気象学や工学など多くの分野において重要な問題の1つとなっている。

古典的なテイラー問題では回転軸方向に無限に長い流体層を考え、終端効果を無視する仮定のもとで研究が行われてきたが、近年では終端効果を考慮した研究も行われるようになってきた。この場合は円筒容器中で回転する2円板間流れとなっている。終端の影響を考えるとときには、境界条件の設定方法により、問題は多岐にわたることになる。外円筒と両端が静止している場合の流れではテイラー問題との関連に興味をもたれており、主に解の分岐構造について議論がなされてきた。一方で、終端が内円筒と共に回転する系での流れは回転2円板間流れとして捉えられ、両端が静止している場合とは異なる視点から研究されてきた。特に、静止外円筒に囲まれた内円筒と2円板が等しい角速度で回転する系は、遠心ポンプや流体軸受けなどの流体機械内部に多く見られ、回転流体機械の基本的な構造をもっているため、工学的な応用面で注目されている。円板が高速回転する状況においては、流れの中の振動が機械の振動や騒音などを誘起する可能性があり、それらの機械への影響を軽減するためにも、このような系内の流れの特徴を調べるのが非常に重要となる。

静止円筒内で回転する2円板間流れは主に工学的な応用を目的として研究が行われてきた。特に、円板間隔が2円筒の半径差よりもずっと小さい場合について、2円板の回転数が大きいときに生じる流れの中の振動に注目して、その流れの特徴や層流から乱流への遷移が調べられてきた。その結果、2円板回転数が大きい場合は、回転軸に垂直な断面内で特徴的な多角形パターンが現れ、流体層の子午断面のアスペクト比や円板回転数の変化に応じて、多角形の形がさまざまに変わることが明らかになった。回転軸に垂直な断面内で現れる多角形パターンは、流れの遷移を特徴づける一つの指標として多くの研究者の注目を集め、これまでに流れの遷移や、多角形パターンの発生機構について数多くの研究が行われてきたが、いずれの論文においてもその発生機構を明確に説明するには至っていない。

一般的に流れの乱流遷移は、層流が不安定化して、より複雑な構造をもつ別の層流が形成され、さらにその層流が不安定化するという過程を無限回あるいは幾度か繰り返すことにより起こると考えられている。流れの不安定性は支配方程式の解の分岐と密接に関係していることより、支配方程式の解の分岐構造を調べることで乱流への遷移過程を明らかにすることが可能となる。本研究では、流れの安定性理論を用いて、回転2円板間流れの遷移構造を明らかにすることが目的である。特に、その遷移過程を解き明かす鍵とされる多角形パターンの発生機構を明らかにすることがこの論文の中心課題である。具体的には、回転2円板間流れの問題を定式化し、支配方程

式系を数値的に解く数値シミュレーションおよび層流解の線形安定性解析を行い、解の分岐構造や層流の安定性について議論する。また、同時に流れの可視化実験および粒子画像流速測定(PIV: Particle Image Velocimetry)を行い、数値計算結果と比較・検討を行う。

本論文は、第1章から第6章までで構成されている。第1章では、回転2重円筒間流れと回転2円板間流れの歴史的な背景を振り返ることにより、これまでに明らかになっていることと明らかになっていない事柄を明確にし、本研究の目的を明示する。また、本論文の構成について説明を行う。

第2章では、回転2円板間流れの定式化について説明と系を支配するパラメータの定義を行う。この流れの遷移を解明する第一歩として、軸対称性の仮定のもとで流れ場の数値シミュレーションおよび線形安定性解析を行う。その結果、流体層の子午面アスペクト比が小さいとき、すなわち平板間距離が円筒間隔に比べて小さい領域では、超臨界ピッチフォークが生じ、定常で2円板中心面に対して反転対称である流れから定常で非反転対称流に遷移するが、アスペクト比が大きくなると解の分岐構造が超臨界型から亜臨界型に変化することを明らかにしている。また、ある臨界アスペクト比を超えると第一次分岐が超臨界ホップ分岐となり、安定な軸対称振動流が現れることも示している。最終的に、これらの結果を流れの遷移図にまとめ、その遷移について議論を行う。

第3章では、流れ場に非軸対称性が誘起される機構について、線形安定性解析および可視化実験を用いて調べた結果を示す。軸対称性および反転対称性をもつ流れの非軸対称攪乱に対する線形安定性を調べ、第2章で示した軸対称分岐が生じる臨界レイノルズ数より低いレイノルズ数で、第一次不安定性としてホップ分岐が生じ、これにより軸対称性が破れることを明らかにする。このときに現れる非軸対称流は、アスペクト比の大小にかかわらず、周方向に半波長ずれると子午面内での流れ場が反転するシフト反転対称性をもっており、この不安定性は静止外周壁近傍の強い周方向速度勾配によって引き起こされることを示す。軸対称性を破るホップ分岐が生じる臨界レイノルズ数および臨界波数はそれぞれ、アスペクト比が小さくなるにしたがって大きくなることを示し、臨界波数の選択に関する物理的な説明も行う。また、可視化実験結果と線形安定解析によって得られた結果との比較を行い、他の研究者によって行われた過去の実験および数値シミュレーションの結果との相違点についても説明する。

第4章では、代表的なアスペクト比について、数値シミュレーションを行い、流れの遷移過程を調べた結果を示す。すなわち、第一次不安定性として超臨界ホップが生じ、定常な軸対称反転対称流からシフト反転対称型の非軸対称流に遷移することを明らかにする。また、軸対称反転対称流からシフト反転対称流への遷移ルートとは別に、超臨界ピッチフォーク分岐が生じ定常な非反転対称流が現れた後、さらに超臨界ホップ分岐が起こり、非反転対称型の非軸対称流が生じるような遷移ルートも存在することを明らかにする。このときには、水平断面内に明確な多角形パターンが現れることを示す。これらの結果を分岐図としてまとめ、流れの遷移について詳しい説明を行う。さらに、シフト反転対称型の非軸対称流を引き起こす不安定性と、非反転対称型の非軸対称流を引き起こす不安定性は、それぞれの場合について攪乱の空間構造を調べた結果、全く異なるものであることを示す。

第5章では、第4章で数値シミュレーションを行ったアスペクト比について、可視化実験およびPIV測定により流れの性質を調べる。レイノルズ数を徐々に高くする場合(ケース1)と急激に高くする場合(ケース2)の2つの場合について実験を行う。ケース1では定常な軸対称反転対称流

からシフト反転対称型の非軸対称流への遷移が起こり、ケース2では、定常な非反転対称流を経て、明確な多角形パターンを示す非反転対称型の非軸対称流が現れることを確認する。シフト反転対称型の非軸対称流と非反転対称型の非軸対称流に対して、最も支配的な空間モードをもつ速度変動成分の分布をPIV測定により調べ、その分布から、シフト反転対称流は外壁境界層型の不安定性から生じ、非反転対称型の非軸対称流は内部境界層型の不安定性より生じることを明らかにする。高レイノルズ数領域では、レイノルズ数の上げ方にかかわらず外壁境界層型の不安定性と内部境界層型の不安定性が同時に生じているような混合モード流れが現れることを可視化実験とPIV測定から明らかにする。この混合モード流れの特徴は、これまで他の研究者が可視化実験によって確認した非常に高いレイノルズ数で起こる流れと基本的な部分で一致していることを示す。

第6章は、第2章から第5章より得られた結果について総括である。