

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05220

研究課題名(和文) 流れの遷移と乱流維持の物理的メカニズム

研究課題名(英文) Physical mechanisms to induce flow-transitions and to sustain turbulence

研究代表者

水島 二郎 (Mizushima, Jiro)

同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員

研究者番号：70102027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究計画では、2種混合流体および2層分離した流体中に振動熱対流が発生する機構、矩形断面容器中に生じるバスタブ渦の発生機構、急拡大部をもつ管路流れが振動流へ遷移する機構、平面ポワズイユ流が振動流へ遷移するときにトルミン・シュリヒティング波が励起される機構を明らかにし、遷移の条件と遷移後に生じる流れパターンを求めた。2種混合流体および2層分離流体中での振動熱対流とバスタブ渦の発生機構についての研究成果を有力専門誌に論文を公表した。平面ポワズイユ流の不安定機構については現在論文を執筆中であり、急拡大部をもつ管路流れの振動流への遷移については、信頼できる計算精度を得るために再計算中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流れの安定性は自然科学だけでなく工学的にも重要であるが、不安定性が生じる機構についてはほとんど調べられてこなかった。本研究計画では流れの不安定性を渦の生成という観点から見直し、不安定性による新たな振動と流れパターンの発生に着目して、代表的な流れの不安定性発生機構を明らかにした。特に、平面ポワズイユ流の不安定機構の解明の手法は幅広い分野の流れに応用できるので、今後の乱流遷移の研究に重要な研究方法となると期待される。矩形断面容器中の大規模渦の発生機構の解明は「バスタブ渦の発生原理」として、広く中学生、高校生、教員だけでなく、一般の市民の興味を集め、台風や竜巻などへの興味を引き出すことができた。

研究成果の概要(英文)：In the present research project, I have clarified physical mechanisms underlying instability and transitions of several major flows. The induction mechanisms of oscillatory thermal convection in two-component fluid and also in double-layered fluid were elucidated by evaluation of torques acting on the fluid. The appearance of a large-scale vortex, so-called 'bathtub vortex', in a rectangular vessel was found to be caused by pressure force exerted by the lateral walls. The flow through a channel with an expanded section was found to become oscillatory due to 'trapped instability'. The driving mechanism of Tollmien-Schlichting waves appearing in transition of the plane Poiseuille flow was found to be explained by mutual interactions between two flow fields defined by the real and imaginary parts of the eigen functions by analyzing the torques exerting on each flow field. From these investigations, I obtained many fruitful results and published or scientific papers to prominent journals.

研究分野：数物系科学

キーワード：流体 数値物理 計算物理 力学系 非線形物理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 流体流れは層流と乱流に大別される。その性質はレイノルズ数と呼ばれる無次元パラメータによって決まる。レイノルズ数は流体の粘性、流速、流れのスケールにより定義される。流速が遅く粘性の効果が大きいとき、レイノルズ数は小さく層流状態であり、流速が速く粘性の効果が小さくなると層流は不安定となり、別の層流あるいは振動流へ遷移し、やがて乱流となる。層流と乱流の性質は大きく異なるので、層流から乱流へ遷移する条件や遷移の機構を知ることが重要な課題となっている。流れの安定性の研究は 150 年ほど以前に始まり、初期の研究は 2 次元平行流の安定性を取り扱い、オア・ゾンマーフェルト方程式という方程式を解き、臨界条件である臨界レイノルズ数を求めることが中心であった。その安定性解析で調べられるのは局所安定性と呼ばれる。現在では、矩形容器中の熱対流や円柱まわりの流れなど非平行流れの安定性と遷移を調べることができ、それらは全体安定性と呼ばれている。例えば、円柱を過ぎる流れについては Jackson (1987) が初めて全体不安定性を調べ、急拡大部をもつ管路流れについては Mizushima, Okamoto and Yamaguchi (2000), Mizushima and Shiotani (2001) が研究を行った。最近では、Akinaga and Mizushima (2005) および Mizushima and Suehiro (2005) が 2 円柱を過ぎる流れの全体不安定性を調べて、注目されている。本研究計画研究代表者(水島)はこれまで主に**流れの安定性とパターン形成**について研究を行い、その成果を鳥取大学教授藤村薫氏と共著で「**流れの安定性**」として出版した。これまでに、流れの安定性解析は発展し、多くの流れについて、その臨界条件と遷移後の流れのパターンと振動数などが求められてきたが、不安定性の物理的な機構についてはほとんど解明されることはなかった。そのため、複雑な流れ場の一部を占める領域中の渦の盛衰を予測することは不可能であった。本研究計画では、流れの不安定性を新たな渦の出現と成長と見なし、流れの不安定性の物理的な機構を明らかにする。

(2) 水平流体層を下から加熱したとき、熱伝導状態の不安定性により定常な対流であるベナール対流が発生する。このとき第 1 回目の分岐解として発生する対流は必ず定常流であるが、エタノールと水などのように 2 種混合流体やパラフィンと水などのように 2 層に分離した流体中では熱伝導状態の不安定性により発生する熱対流が振動熱対流となることがある。2 種混合流体 (Kolodner et al., 1986) と 2 層流体中 (Joseph & Renardy, 1993) に発生する振動熱対流の性質については良く調べられてきたが、不安定性により振動熱対流が生じる機構については未解明である。

(3) 一様流中に置かれた 1 本の円柱を過ぎる流れの遷移は流体力学の基本問題であり、その後流にはカルマン渦列と呼ばれる 1 対の渦列ができる (von Karman, 1911)。カルマン渦列ができる条件を円柱後流の安定性解析により調べると (Taneda, 1963)、臨界レイノルズ数は実験結果と解析結果の間には 10 倍程度の相違があることが分かった (Taneda, 1963)。その相違は非平行な流れの安定性を直接に調べることににより解決された (Jackson, 1987)。平行流近似に基づく局所不安定性と全体不安定性をつなぐ理論として、絶対不安定性と対流不安定性の概念が導入され、流れ場の中の絶対不安定領域で振動が生み出され、その振動が対流不安定性によって下流へ運ばれる結果、カルマン渦列のようなきれいな流れパターンが生じると考えられるようになってきた (Huerre and Monkewitz, 1990)。これに対して、本研究計画の代表者らはアクティブ不安定性とパッシブ不安定性という新しい概念を発表した (Takemoto and Mizushima, 2010)。しかし、未だに絶対/対流不安定性の概念とアクティブ/パッシブ不安定性の概念のいずれが正しいか結論は得られていない。この結論を得るためには円柱を過ぎる流れと物理的に近い問題として急拡大管をもつ管路流れ (Mizushima and Shiotani, 2001) の場合で検証する必要がある。

(4) 平面ポワズイコ流の不安定性は流体力学の基本問題であり、線形安定性を支配するオア・ゾンマーフェルト方程式が解析的 (Lin, 1945) あるいは数値的 (Thomas, 1953) に解かれ、問題は解決されたかのように考えられてきた。しかし、不安定性を生じる物理的な機構には十分な関心が向けられず、未だに解明されていない。代表的な流れの一つである平面ポワズイコ流の不安定性の機構を明らかにすることが不可欠である。

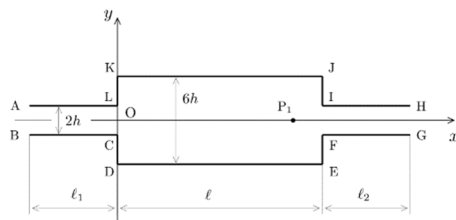
(5) 流れの遷移においてはほとんどの場合に新たに渦が発生する。気象現象では台風や大規模なトルネードは、北半球では反時計回りに回る渦が発生し、南半球では時計方向に回る渦が発生する。類推としてバスタブ内の水が排水されるときにも台風と同じ方向に回る渦が発生するとされる研究もある (Shapiro, 1962)。この問題は容器が円形断面をもつ場合は Mizushima, Abe and Yokoyama (2014) により、調べられ、系が軸対称であるときには、地球回転の効果であるコリオリ力が渦の回転方向に影響を与え、台風と同じ方向に回転するが、軸対称性がない系では不安定性により、渦が発生するという結果が得られている。しかし、このような大規模渦が発生する条件と機構については未だ十分に解明されていない。

2. 研究の目的

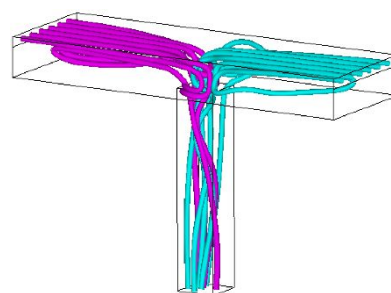
(1) 流れの安定性と遷移の研究は、複雑な流れを大きく分類し、流れの性質と特徴を見つけることにも役立つ。不安定性と遷移については実験や数値シミュレーションなどでも詳しく調べられているが、具体例の現象を議論することが大部分を占め、それらの現象に共通する物理的な機構はあまり解明されていない。本研究計画では、層流が不安定となって乱流へと遷移する過程を新たな渦の発生と捉えることにより、不安定性と遷移の機構を明らかにする。これまで流れの不安定性解析では流れ場全体の性質のみを調べることが可能であったが、このような捉え方をすれば、流れ場中の渦を含む一部の領域のみの不安定性を議論することも可能となる。ただし、流

れの不安定性の機構はすべての流れについて同じではないので、すべての流れを共通の性質をもついくつかに分類し、その中に含まれる流れに共通した性質を調べる必要がある。本研究計画では分類された流れの中で代表的な流れを選んで調べることで、その分類された流れに共通した性質を導き出す。そのため、体積力に駆動されて生じる流れの例として、熱対流とバスタブ渦流れを選び、面積力である圧力によって駆動される流れとして、平面ポワズイユ流と急拡大部をもつ管路流れを選ぶ。

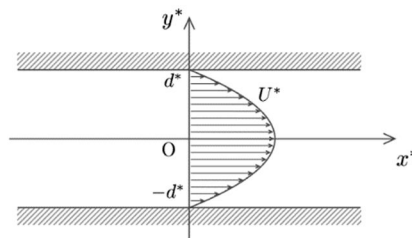
(2) 振動熱対流の発生機構を調べるため、矩形容器中に満たされた2種混合流体と2層流体をとりあげる。矩形断面をもつ容器中に満たされたエタノールと水の混合溶液中における2重拡散対流の発生とその遷移について、線形安定性理論および数値シミュレーション・分岐解析等により調べる。また、矩形断面容器中の2層流体中に発生する振動対流については線形安定性解析と各層に生じる渦に働くトルクを同時に評価することにより、不安定性の発生機構を調べる。



(3) 急拡大部をもつ対称な管路流れが不安定性となって非対称定常流へ遷移する機構について調べる。対称定常流が振動流へと遷移する機構については、攪乱方程式の初期値問題を数値シミュレーションの方法で解くことにより、振動流が発生する機構と振動を持続する機構を調べる。このとき、一様流中に置かれた円柱まわりの流れが振動流へ遷移する機構と比較し、その物理機構の違いについて考察する。



(4) 矩形断面容器中でのバスタブ渦の発生と形状依存性については、対称定常流の線形安定性解析と数値シミュレーションを併用して、対称定常流が不安定となる機構を調べる。また、流れ場がもつ対称性に注目することにより、流れの遷移と対称性の破れについて議論を行う。



(5) 平面ポワズイユ流が不安定となって、流れ場中にトルミン・シュリヒティング波が励起される機構について調べ、トルミン・シュリヒティング波が流れ場中に持続的に維持される機構を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 矩形断面容器中に満たされた2種混合流体中に発生する振動対流の発生を調べるにあたっては、熱伝導状態の線形攪乱方程式を適切な境界条件のもとに数値的に解き、線形増幅率と振動数を算出し、攪乱場に生じる渦がもつ角運動量と渦領域の流体に働くトルクの浮力成分、圧力成分、粘性応力成分を評価する。求めたトルク成分と角運動量を比較することにより、振動熱対流の発生する物理機構を考察する。2種混合流体中の振動熱対流は非線形性が大きくなると定常熱対流に遷移する。その理由を調べるために、弱非線形安定性解析と基礎方程式の数値シミュレーションを行い、解の分岐構造を明らかにする。2層流体中に発生する熱対流が不安定となって振動熱対流ができる機構については線形攪乱方程式を解き、その解を用いて上下2層のそれぞれの層にできる渦がもつ角運動量とそれらに働くトルクを評価することにより振動熱対流が発生する物理的な機構を明らかにする。

(2) 急拡大部をもつ管路流れにおける対称流から非対称流への遷移については各レイノルズ数における対称流を求め、対称流に対する線形攪乱方程式を解くことにより、線形増幅率と固有関数を求め、得られた固有関数を用いて、攪乱を構成する渦に働くトルクを評価し、不安定性機構を調べ、数値シミュレーションの結果と比較検討する。対称流が振動流へ遷移する振動不安定性については、対称定常流を求めた後、得られた対称定常流にパルス型の攪乱を人為的に加え、攪乱の発展を数値シミュレーションにより調べ、攪乱が波束を形成しながら成長し、やがて流れ場全体が振動流へ遷移する過程を解析する。

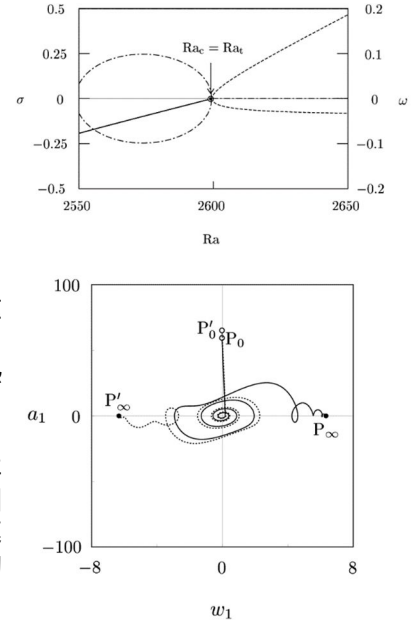
(3) 矩形断面容器内の流体を排水するとき発生する大規模渦(バスタブ渦)の発生条件とその物理機構を調べるにあたっては、数値シミュレーションの方法の他に対称性定常解を数値的に求め、対称定常流に加えられた攪乱に対する線形方程式を数値シミュレーションの方法で解き、渦の発生条件およびその発生機構を調べる。

(4) 平面ポワズイユ流の不安定機構を調べるにあたっては、線形攪乱方程式であるオア・ゾンマーフェルト方程式をチェビシェフ多項式展開により数値的に解き、その固有関数を求める。攪乱であるトルミン・シュリヒティング波に含まれる渦がもつ角運動量と渦に働くトルクの圧力成分、粘性応力成分、角運動量移流成分をそれぞれ評価し、その結果から、平面ポワズイユ流が不安定となる機構を明らかにする。

4. 研究成果

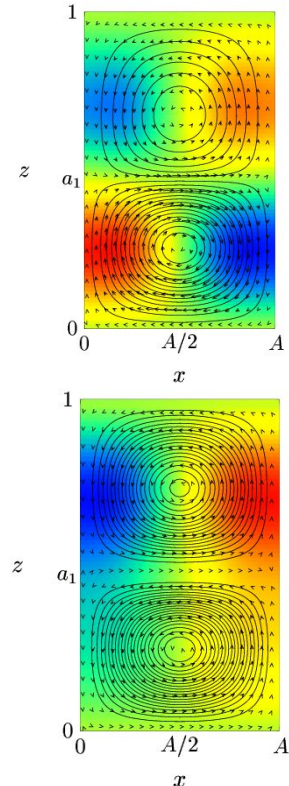
(1) 矩形断面容器中に発生する2重拡散対流

矩形断面容器に満たされたエタノールと水の2種混合流体を下から加熱するとき発生する2重拡散対流の発生条件と発生機構について、数値シミュレーション、線形安定性解析、非線形解の分岐、弱非線形安定性解析の方法で調べた結果、パラメータの値に依存して定常熱対流と振動熱対流のいずれかが発生することが分かった。振動熱対流と定常熱対流が入れ替わるパラメータの値は余次元2点と呼ばれる。右上図の点線は線形増幅率であり、一点鎖線は振動数を表す。また、矢印で示される点は余次元2点である。矩形容器のアスペクト比が $A=1$ のときの流れ場では1つの渦が領域全体を占有している。2重拡散対流はほとんどの場合に定常熱対流となるが、余次元2点のごく近傍において振動熱対流が現れる。本研究では振動熱対流が発生する機構を、渦に働くトルクを評価することにより振動熱対流が発生する機構を説明できることを明らかにした。余次元2点から離れると、定常熱対流となる理由について弱非線形安定性解析を行い、代表点の流速と加速度を用いた位相図(右下図)で説明できることが分かった。2重拡散対流の流速が小さいとき(原点近く)熱対流の位相図は楕円形となり振動熱対流を表しているが、振幅が大きくなると楕円形から抜け出して、 $\pm P$ で表される定常解に近づく。この研究結果を Journal of the Physical Society of Japan の論文として公表した。



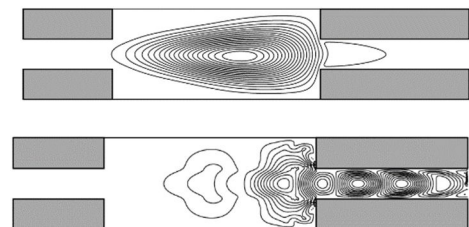
(2) 矩形断面容器中に発生する2層熱対流

矩形断面容器内で2層に分離した2種の流体層(パラフィンと水の層)を下から加熱したときに発生する熱対流について線形安定性解析により調べた。その結果、2つの流体層の厚さおよび2流体の物性値に依存して、定常攪乱に対して不安定になる場合と振動攪乱に対して不安定になる場合があることを見いだした。例えば、右上図では上の層の流体中では反時計回りの渦(対流)が生じており、下の層では時計回りの渦ができています。赤色で表されているのは高温部で、青色は低温部である。このような上下層の対流の状態は力学的結合と呼ばれている。上下層で同じ向きに循環し、上下層で高温部と低温部が同じ水平位置にあるときの状態を熱的結合という。右下図では、上下層ともに反時計回りの渦が生じ、右側が高温部で、左側が低温部となっている。定常熱対流が生じるときには上下層共に反時計回りの渦ができる場合と時計回りの渦ができる場合があるが、振動熱対流は、力学的結合と熱的結合が交互に繰り返し生じることにより実現される。このような振動熱対流の発生機構を、上下渦のそれぞれがもつ角運動量とそれらに働くトルクを評価することにより、明らかにした。また、定常熱対流と振動熱対流の発生する条件の違い、すなわち容器のアスペクト比、2流体の熱膨張率比などのパラメータに依存して、発生する熱対流の違いを詳しく調べた。さらに、振動熱対流が発生するときの位相図は2重拡散対流と同様であることを確認した。これらの結果を Journal of the Physical Society of Japan に論文として公表した。



(3) 急拡大部をもつ管路流れの振動流への遷移

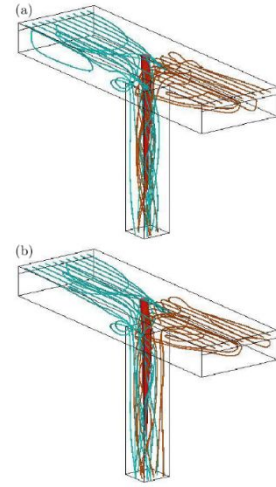
急拡大部をもつ管路流れでは定常攪乱に対して不安定となる場合と振動攪乱に対して不安定となる場合があることが知られている(Mizushima and Shiotani, 2001)。本研究では両方の場合について対称定常流が不安定となって、非対称定常流あるいは振動流へ遷移する機構のそれぞれを明らかにした。対称流が非対称流へ遷移する機構については、数値計算により対称流を求め、その線形安定性を調べることにより、不安定性の機構を調べているが、現在も計算中である(右上図)。対称流が振動流へ遷移する機構を調べるために、対称定常流を数値的に求め、対称定常流に波束形の攪乱を加え、攪乱の時間発展を数値シミュレーションの方法で調べ、攪乱波束の伝播と成長を解析することにより、不安定機構を調べた(右下図)。計算結果より、管路の上流に加えられた攪乱は下流へ伝播するが、急拡大部の下流端で捕捉され、その近傍に留まることにより、管路全体に振動が広がっているということがわかった。これらの成果を公表するため、十分な精度を得るため計算を継続中である。



対称流が振動流へ遷移する機構を調べるために、対称定常流を数値的に求め、対称定常流に波束形の攪乱を加え、攪乱の時間発展を数値シミュレーションの方法で調べ、攪乱波束の伝播と成長を解析することにより、不安定機構を調べた(右下図)。計算結果より、管路の上流に加えられた攪乱は下流へ伝播するが、急拡大部の下流端で捕捉され、その近傍に留まることにより、管路全体に振動が広がっているということがわかった。これらの成果を公表するため、十分な精度を得るため計算を継続中である。

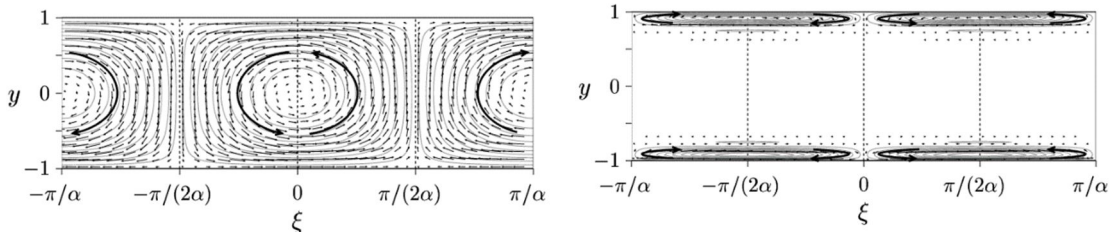
(4) 矩形断面容器中でのバスタブ渦の発生機構と容器断面アスペクト比効果

円形断面容器内の流体が容器底面中心に設けられた排水口から排水されるときには、流体中に残留渦度がなければ大きな規模の渦は発生しないことは既に明らかになっている (Yokoyama, Maruyama, Mizushima, 2012)。一方、矩形断面容器中の流体が容器底面中心の排水口から排水されるときには対称流れの不安定性として大きな規模の渦が生じる (Mizushima, Abe, Yokoyama, 2014)。本研究では、それらの研究の延長として、矩形容器中での対称流れの不安定性によって発生した渦を含む流れがさらに大きなレイノルズ数において再び不安定性を生じ、対称性を失いながら非対称渦流れおよび振動流へと遷移する過程とその条件および不安定性を生む機構を調べた。不安定性の物理的な機構については、容器中の流体がもつ角運動量と流体に働くトルクを評価した結果、最初の不安定性で生じるバスタブ渦は側壁から受ける圧力によるトルクにより駆動されていることが判明し、トルクは側壁近傍に生じる小さな 2 つの渦が存在することにより発生することも明らかになった。さらに、定常なバスタブ渦が容器排水口中心軸のまわりに振動する現象について、その振動発生条件、振動数などを詳しく調べた。これらの結果を 2017 年に Physical Review Fluids に論文として公表した。また、容器の矩形断面のアスペクト比が流れの不安定に及ぼす影響を線形安定性解析により調べ、アスペクト比がおよそ 2 よりも小さくなると対称流れは安定であり、不安定性によるバスタブ渦の発生は生じないことを明らかにした。その結果を 2018 年に Fluid Dynamics Research に論文として公表した。

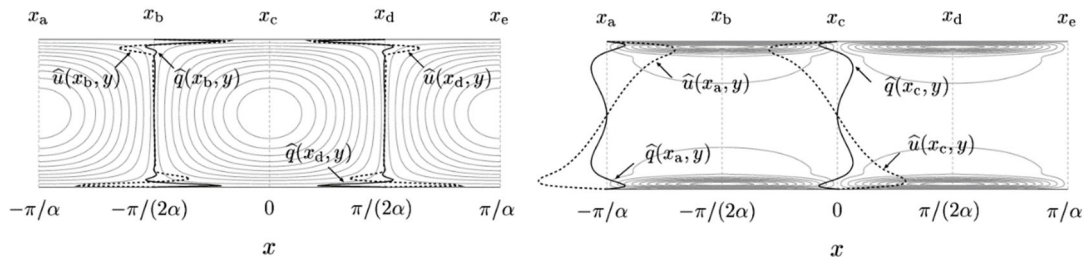


(5) 平面ポワズイユ流の不安定性発生機構

平面ポワズイユ流は厳密解が知られている数少ない流れであり、流れの安定性解析における中心的問題としてその不安定性を調べる研究はおよそ 100 年前から行われ、およそ 50 年前には線形安定性はすべて調べ尽くされたときみなされてきた。しかし、これまでに報告されてきたのは、線形固有値問題の解としての固有値と固有関数のみで、不安定性を起こす物理的な説明は明らかにはなっていない。本研究計画では、平面ポワズイユ流が不安定となって発生するトルミン・シュリヒティング波が下図左側の中央渦と右側の境界渦から成り立っていることに着目し、これらの渦領域がもつ角運動量とそれぞれの渦領域の流体に働くトルクを評価することにより



渦の成長率を計算すれば、固有値問題における線形増幅率を得られることを明らかにした。また、単位時間に中央渦領域と境界渦領域に流入する角運動量流量を評価することにより、トルミン・シュリヒティング波を励起する原動力は平均流速と波の位相速度の差で運ばれる角運動量移流によるということを示し、平面ポワズイユ流が不安定となるのは中央渦と境界渦が互いに角運動量を送り合うことによるということを示した。下図左側の実線は境界渦が中央渦に送る角運動量であり、右図の実線は中央渦が境界渦に送る角運動量である。この研究成果を論文として公表するために現在論文を執筆中である。



(6) 本研究課題から派生した著作と研究成果の解説

本研究計画を実行するにあたり、多くの数値計算法を新たに開発した。その成果を広く公表するため、既に出版済みの「理工学のための数値計算法 (第 2 版)」を改定し、新たな成果を追加した「理工学のための数値計算法 (第 3 版)」を 2019 年に数理工学社から出版した。さらに、流体力学的内容を 2017 年に「流体力学」として裳華房より出版した。渦と不安定性の関係については 2019 年に日本流体力学会機関誌「ながれ」に「渦のマジック」として公表した。流れの遷移と渦の関係についても 2019 年に「ながれ」に連載として 2 回公表し、現在も連載中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jiro Mizushima	4. 巻 87
2. 論文標題 Oscillatory instability in two-layer fluid contained in a rectangular cavity and its driving mechanism	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084401-1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.084401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jiro Mizushima, Rei Matsuda and Naoto Yokoyama	4. 巻 51
2. 論文標題 Dependence of instability to induce a bathtub vortex in a rectangular vessel on the aspect ratio of the horizontal cross section	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 025505-1-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1873-7005/aaf82e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jiro Mizushima, Kazuki Abe and Naoto Yokoyama	4. 巻 2
2. 論文標題 Sequential transitions of bathtub vortex flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.2.083903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Fujinaga, Masahiko Hashimoto, Kazuhiko Tsukagoshi, Jiro Mizushima	4. 巻 32
2. 論文標題 Consideration of inner and outer phase configuration in tube radial distribution phenomenon based on viscous dissipation in a microfluidic flow using various types of mixed solvent solutions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Analytical Sciences	6. 最初と最後の頁 455-461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiro Mizushima, Hayato Izumikawa, Kaoru Fujimura	4. 巻 85
2. 論文標題 Codimension two bifurcation with double-zero eigenvalue for two-dimensional double diffusive convection in a square container	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 044403-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi/10.7566/JPSJ.85.044403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Fujinaga, Masahiko Hashimoto, Kazuhio Tsukagoshi, Jiro Mizushima	4. 巻 48
2. 論文標題 Consideration of tube radial distribution phenomenon under laminar flow conditions based on the weber number	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 947-952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 水島二郎
2. 発表標題 急拡大列をもつ管路流れ場中における自励振動の発生
3. 学会等名 京大 数理研 RIMS共同研究(公開型)「乱流と遷移: 構造, 多重スケール, モデル」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水島二郎
2. 発表標題 急拡大部列をもつ管路流れの不安定性と遷移
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Mizushima
2. 発表標題 Oscillatory instability of double layers of immiscible fluids in a rectangular cavity heated from below
3. 学会等名 61st Workshop on "Investigation and Control of Transition to Turbulence" (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 水島二郎
2. 発表標題 2層流体中に発生する熱対流の遷移
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋期大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松田玲依, 水島二郎, 横山直人
2. 発表標題 矩形断面容器中でのバスタブ渦の発生と遷移
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2015
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 水島二郎
2. 発表標題 バスタブ渦発生の物理と数理
3. 学会等名 大阪大学 数理・データ科学セミナー 数理モデルセミナーシリーズ 第12回 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 水島二郎, 松田玲依, 横山直人
2. 発表標題 矩形断面容器中での正面向流の不安定性とバスタブ渦の発生
3. 学会等名 第60回「乱流遷移の解明と制御」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水島二郎
2. 発表標題 円柱・角柱を過ぎる流れの不安定性と遷移
3. 学会等名 数理解析研究所研究会：乱流を介した流体現象の数理（招待講演）
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 水島二郎, 藤村薫, 泉川勇人
2. 発表標題 2重拡散対流の余次元2分岐点近傍における不安定性と遷移
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2015
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Shouta Oku, Jiro Mizushima
2. 発表標題 Suppression of flow deflection in a duct with a sudden expansion
3. 学会等名 IWEC2013 (International Workshop on Energy Conversion 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 水島二郎、柳瀬眞一郎、百武徹	4. 発行年 2017年
2. 出版社 森北出版社	5. 総ページ数 231
3. 書名 流体力学	

1. 著者名 水島 二郎、石原 卓	4. 発行年 2019年
2. 出版社 数理工学社;サイエンス社 (発売)	5. 総ページ数 255
3. 書名 理工学のための数値計算法	

〔産業財産権〕

〔その他〕

水島研究室ホームページ http://www.ares.eonet.ne.jp/~jiro-jmizushima
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----