

氏名（本籍） いし だ たか ひろ 石 田 貴 大（新潟県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第944号
学位授与の日付 平成29年3月18日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 **Study on universality of laminar-turbulent
patterning to annular geometry of Poiseuille
flows and on robustness of the patterning to
roughness and rotation in plane channel flows**
(環形状に対するポアズイユ流の層流乱流パ
ターン形成普遍性と粗さ及び回転に対する平
行平板間流でのパターン形成ロバスト性に関
する研究)

論文審査委員 (主査) 教授 川口 靖夫
教授 岡田 裕 准教授 高橋 昭如
教授 二瓶 泰雄 教授 山本 誠

論文内容の要旨

流動挙動は粘性力と慣性力の比で表されるレイノルズ数によって規則的で定常な層流と不規則に変動する乱流に大別される。層流と乱流を二つの状態に完全に分類することは困難であり、その間には遷移域が存在する。この層流乱流間の遷移には超臨界と亜臨界の二つの過程が存在し、超臨界過程は比較的単純で無限小攪乱の振幅により層流は段階的に乱流へと遷移し、臨界値の決定も容易となる。これに対して亜臨界過程は本質的に非線形な問題で、有限長攪乱により乱流へと急激に遷移が進行し、臨界値の特定も困難となる。円管内流や平行平板間内流などの壁面剪断流の多くは亜臨界過程で特徴づけられ、乱流遷移の初期段階では層流と乱流状態が同時に現れる流動状態（層流乱流パターン）が発生する。円管内流では流れ方向に局在化した一次元的構造である乱流パフが発生し、近年の研究では乱流パフの維持可能時間と自己維持するための分裂時間との統計的平衡状態を得ることで乱流が維持し得る下限の臨界レイノルズ数の決定が可能となった。平行平板間内流は円管内流に対してスパン方向にも自由度を有するため、スパン方向二次流れを有す

る斜めに傾いた帯状の縞状パターンが発生する。この縞状パターンは寿命の有無など未解明な部分が多く、パフのような分裂現象が発生せず、円管内流れと同様の手法を用いることができないため臨界値も明らかではない。

遷移域に着目した研究は、円管内流や平行平板間流など個々の系それぞれに対する研究に留まっており、遷移現象を包括的に捉えた例がない。また、基礎研究という観点から物理的側面が強く理想的で単純な系での研究しか行われていないのが現状である。そのため本研究では壁面剪断流中で発生する層流乱流パターンに着目することで、パターンの普遍性と強固さを明らかにすることを目的とした。特に環状流路を用いることで、系に対する層流乱流パターン形成の普遍性を議論し、粗さ及び回転を伴う系において不安定性によるパターンの維持限界とその原因、及び様々なパターンの特徴を解析することでパターン形成の強固さを議論する。このために直接数値シミュレーションを用いて、二重円管内環状流、粗面クエット流、回転平面ポアズイユ流の三つの異なる系を選定して研究を遂行した。

二重円管内環状流は、円筒比（内円筒半径÷外円筒半径）によって周方向に対して閉じた系として形状が決定する。その形状は円筒比がゼロに漸近する場合、中心軸は残るものの円管内流に近似できる。反対に円筒比が大きく1に漸近する場合、曲率の影響が小さくなり、環状流は平面ポアズイユ流とみなせる。従って、各極限では円管内流で発生する乱流パフと平面ポアズイユ流で発生する縞状パターンの異なる層流乱流パターンの発生を推測して解析を行った。その結果円筒比が小さい場合、乱流パフに類似した主流方向に局在化した構造が、大きい場合は縞状パターンに類似した螺旋乱流の発生を明らかにした。また、中程度の円筒比において、円筒比が小さい場合と大きい場合の二つの構造の特徴を有する螺旋パフが発生することで極限同士を滑らかに繋げることを明らかにした。これら層流乱流パターンの変化は周方向二次流れの有無によって特徴付けられ、円筒比が小さくなり、周方向に対する自由度が減少することで螺旋状パターンを形成することが困難となり、主流方向局在化構造へと変化する。また、流れの特徴モードを抽出することで、パターン形状の変化は円筒比のみでなくレイノルズ数にも依存して変化することを明らかにした。これにより支配的モードを各パラメータにおいて調査し、その支配率を得ることで、レイノルズ数及び円筒比に依存した遷移現象の変化を定量的に捉えることに成功した。

粗面クエット流及び回転平面ポアズイユ流の解析により、粗さ及び回転影響下に対する層流乱流パターン発生の強固さを調査した。強固さはパターン発生の安定性を指し、粗さ及び回転の影響によるパターン発生の維持限界及び崩壊原因を明らかにする。

遷移現象に関する研究は実験的にも数値的にも十分平滑な壁面を考慮して研究が行われてきた。しかし自然界においては、完全に平滑な壁面はなく、工業的場面を考えても平滑な壁面を得ることは非現実的であり、何かしらの粗さを含む。そこで、両壁面また

片壁面に粗さを付与した平面クエット流を用い、粗面が縞状パターン等の秩序乱流構造へ及ぼす影響を調査した。本研究では先行研究により提唱された圧力抵抗に相当する粗さモデルを用いて数値的に解析を行った。特に粗さ高さとレイノルズ数依存性に着目して調査を行った。両壁面粗さを考えると、縞状パターンは粗さ高さ増加に従って乱流域が肥大し、速度変動の少ない層流域が徐々に狭まることで秩序パターンは消失してチャンネル全体が特徴のない乱流状態となる。粗さ付与によって、主流方向速度に変曲点が生じることで乱れを誘起し、乱流の自己維持機構が粗さの影響により強化されていることを明らかにした。これにより、平滑面では層流であったレイノルズ数でも粗さ付与時の流れ場では乱流状態が維持できることを明らかにした。平滑面における乱流状態は流れ方向に伸びた変動速度と微細構造の発生が確認できるのに対して、平滑な壁面における下臨界値付近よりも低いレイノルズ数での乱流は、秩序的な変動速度のみで微細構造が存在しない特異な流動状態となる。しかし、両壁面粗さでの場合は、平滑面での臨界値付近より低いレイノルズ数では縞状パターン等の間欠的構造は発生しないことが分かった。これに対して、片壁面粗さでは主流方向速度分布が壁面垂直方向に対して非対称になるため、様々な変調した層流乱流パターンが発生し、その形状はスパン方向二次流れの有無によって変化することを明らかにした。

複雑な流動場における層流乱流パターンの強固さを評価するため、スパン方向軸に回転をする平面ポアズイユ流の解析を行った。この系は壁面垂直方向に対して流れを不安定化させる圧力側と安定化させる負圧側が混在する流れとなる。特に圧力側においては、非回転時に層流状態であった流れ場でも、主流方向に対して伸びた大規模な交互渦であるロール・セルが発生することが知られている。先行研究によって流れ場全体が安定化する回転クエット流などにおいては縞状パターンの発生が明らかになっている。しかし、本研究で取り扱う安定と不安定側が混在する複雑な系での知見はないことから、コリオリ力が層流乱流パターンに与える影響を調査し、その構造の強固さを明らかにすることを目的とした。コリオリ力の効果の特徴づける回転パラメータが非常に弱い場合のみ縞状パターンの発生を圧力と負圧両側にて確認し、低回転においてはコリオリ力効果により縞状パターン特有のスパン方向二次流れが強化されることを明らかにした。これに対して高回転では負圧側で乱れの抑制効果によりパターンの再層流化が促され、圧力側ではロール・セルの発生による強い壁面垂直方向への流れが生じ、その影響が不安定側だけでなく安定側にまで及ぶことで縞状パターンを崩壊させることを明らかにした。

異なる系を用いることで外力や系に対する層流乱流パターン発生の強固さと、各構造に共通する特徴の普遍性を議論した。これにより、これまで個々の系で考えられてきた遷移域での現象を、周方向に対して閉じた系である二重円管を用いることで一つの現

象として捉えることを可能とした。加えて、粗さによる圧力抵抗と回転によるコリオリ力の影響する流動場に対する縞状パターンの強固さを評価し、壁面垂直方向に対する強い速度成分に対しては弱い構造であるが、粗さや回転を付与しても維持可能な構造であることを見出した。粗さ及び回転のない壁面剪断流での層流乱流パターンは壁面垂直方向に対して一様で、主流方向とスパン（周）方向に対して乱流の特徴的ストリーク構造よりも大規模なスケールによって特徴付けられる。層流における主流方向速度は乱流よりも速く、この主流方向速度差によって層流乱流界面で層流の乱流領域への衝突が生じる。これにより流れの方向転換が生じ、スパン方向二次流れが誘起される。環状流では円筒比が大きい場合は二次流れの発生によって螺旋乱流が発生するが、円筒比が小さい場合周方向長さが十分ではなく、小規模スケールと大規模スケールの境界がなくなる。このため周方向二次流れの形成が困難となり、壁面垂直方向に対する構造の一様性が消失することで流れ方向に局在化した構造へと変化する。壁面粗さは大規模構造そのものには影響せず、小規模構造であるストリークの生成過程を強化することで層流乱流パターンの乱流域の肥大化に貢献し、特徴のない乱流へと発達する。しかし、主流方向平均速度が壁面垂直方向に対して非対称となる片壁面粗さの場合、その非対称性から壁面垂直方向の速度成分が無視できないほど大きくなるため、傾きのない変調した層流乱流パターンを形成する。回転影響下では、異なる大規模構造であるロール・セルの発生により層流乱流パターンは崩壊する。これは他の系とも同様で、ロール・セル発生により強い壁面垂直方向に対する吹き上がりが生じ、スパン方向二次流れの維持が困難となるためである。これらにより間欠性を有する層流乱流パターンは層流乱流界面においてスパン方向二次流れの有無と流れ方向に対する局在化により特徴付けられることを明らかにした。

論文審査の結果の要旨

本論文は、平行平板間流れなどの規範的な壁乱流の亜臨界遷移で観察される大規模な間欠乱流パターン (laminar-turbulent patterning) 構造の理解に向けて、系に外力や制限を与えることでパターン形成の普遍性とロバスト性を明らかにしたものである。間欠乱流パターンとは、流れに層流と乱流が空間的に偏在し、局在乱流が規則的縞状パターンを呈した構造を指す。本論文では、それを乱流縞 (turbulent stripe) または螺旋乱流 (helical turbulence) と称している。既存研究により、流れの駆動方法に依らず平行平板間流れでは乱流縞が形成されること、さらに安定成層化を系に一様に与えると高レイノルズ数でも乱流縞が発生し間欠乱流となることが報告され、遍在するユビキタス構造として知られるようになった。しかし、より外乱や空間的制限のある系でのパターン形成の普遍性とロバスト性については不明であった。本論文の特徴は、基礎となる平行平板間流れに対して、スパン方向の有界性、強制的速度減衰により模擬された粗面、

または回転系のコリオリ力を付加することで、パターンを形成し得る条件を特定し、局在乱流の維持にはパターン (patterning)・大規模流れ (large-scale flow)・微小乱流渦 (small-scale flow) の3要素が必要であると明らかにした点にある。本論文は以下の7つの章より構成される。

第1章では、亜臨界遷移の工学的重要性を示している。先行研究に基づき、乱流を維持し得る臨界条件とパターン形成には強い関連があることを指摘し、本研究の意義を主張している。また、各解析対象の関連文献を示し、本研究の位置付けや目的を明らかにしている。

第2章では、第3～5章の解析で用いた計算手法と計算条件を説明している。本論文は、大型並列計算による直接数値解析 (DNS) の結果に基づいており、その支配方程式や粗面モデル、計算領域サイズや格子解像度などを明示している。

第3章では、同心環状流の亜臨界遷移過程について、円筒比依存性等の系統的な調査結果を示し、パターン形状や臨界レイノルズ数の円筒比依存性を明らかにした。円筒比1付近は、平行平板間流れの乱流縞に似た螺旋乱流を普遍的に形成し、完全な乱流状態に匹敵する高い壁面摩擦が生じることを見出した。円筒比0付近 (円管内流に漸近) では乱流パフとなり、中間的な円筒比 (0.2～0.3) では有限長の螺旋パフという特異なパターンを発見した。このパターン変化は、スパン (円周) 方向の有界性に由来し、狭領域がスパン方向の大規模流れを阻害し、螺旋モードからゼロモード (スパン方向に一様) に切り替わったと考察している。

第4章では、Navier-Stokes式に粗面の形状抵抗をモデル化した項を加えることで、流れに対して仮想的な速度減衰領域を壁付近に構築し、滑面とは異なる場合でのパターン形成のロバスト性について調査している。まず、当該系が線形安定であることを確認し、亜臨界遷移の形態として乱流縞が粗面上でも形成し得ることを見出したが、粗面高さが大きいと滑面では見られない乱流構造が支配的となることを示し、さらに、片壁粗面の場合には、スパン方向に対して傾斜のない大規模な帯状乱流構造を初めて発見した。これは第6章で論ずる乱流縞の形成メカニズムの解釈の一助となっている。

第5章では、回転系平面ポアズイコ流を対象に、パターン形成の普遍性とロバスト性を論じている。当該流れでは、およそチャンネル中心を境にしてコリオリ力による安定成層側と不安定成層側が共存する場となる。この様な状況下において乱流縞の変化を調査し、レイノルズ数と回転パラメータによる流動状態遷移図 (flow map) を作成している。強回転系では、不安定側のロールセルが支配的となり安定側の間欠乱流パターンが消失することを見出した。これも第6章で論ずる乱流縞の形成メカニズムの解釈において重要な知見となっている。

第6章では、第3～5章に基づき、パターン形成の普遍性とロバスト性について包括的議論し、形成の自己維持機構 (self-sustaining process) を提案している。まず、パターン形成には局在乱流領域に沿って生じた大規模二次流れが重要な要素であることを指摘し、質量平衡の観点から層流-乱流の斜行界面でスパン方向流れが生じた原理を検討している。スパン方向に領域が狭い場合や壁垂直方向の大規模流れが生じやすいと、上記のスパン方向大規模流れが発生し難くなり、その結果、厚い粗面や強回転系でのパターンの不在を考察している。

第7章にて、本論文全体を通してまとめている。本論文では、壁乱流の亜臨界遷移に生じる間欠乱流パターンの普遍性とロバスト性を調べ、形成メカニズムの解明まで貢献している。また、パターン形成はより低レイノルズ数での乱流延命をもたらすことから、当該知見は低レイノルズ数の混合・伝熱促進の制御指針にもなり、工学的な寄与も期待できる。

よって、本論文は博士 (工学) の論文として十分価値あるものであると認められる。