

要約

本論文は壁面剪断流の遷移過程において発生する層流乱流パターン形成普遍性とロバスト性を議論することにより、パターンの特徴と維持機構の解明を目的として、直接数値シミュレーションにより環状ポアズイユ流・粗面クエット流・回転平面ポアズイユ流の三つの系に対するパターンの変化に関する研究成果をまとめたものである。本論文は以下の 7 章で構成されている。

第 1 章は序論で、乱流遷移現象に関する研究の意義をまとめて研究目的を述べる。流動挙動は粘性と慣性力の比で表されるレイノルズ数に依存して層流と乱流に大別される。層流は規則的な定常流れで、摩擦損失が少なく流体輸送に適する。乱流は不規則で非定常な流れとなり、エネルギーや運動量輸送に優れ、熱伝達特性が高くなる利点がある。この層流乱流間には遷移領域が存在し、層流と乱流とでは流れの様相が大きく異なることから、両状態を横断する遷移域において発生する流動現象の予測と制御は熱流体力学における重要課題の一つとなる。壁面剪断流における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層流乱流パターンが発生する。この遷移域とパターンに対する先行研究をまとめ、研究対象及び研究目的について述べる。

第 2 章では研究手段である直接数値シミュレーションの解析手法及び解析パラメータを記述している。

第 3 章では環状ポアズイユ流の解析により得られた結果を示し、系に対するパターン形成普遍性に着目して議論する。環状ポアズイユ流は、円筒比（内円筒半径÷外円筒半径）によって周方向に閉じた系として流動形状が決定する。その形状は円筒比がゼロに漸近する場合円管内流に近似でき、反対に円筒比が大きく 1 に漸近する場合、平面ポアズイユ流とみなせる。本研究では円筒比が小さい場合、円管内流で発生する乱流パフに類似した主流方向にのみ局在化したパターンが発生し、大きい場合は平行平板間流で発生する縞状パターンに類似した層流乱流界面で傾きを有する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、乱流パフと螺旋乱流両方の特徴を有する螺旋パフが発生することで、異なる系において発生するパターンを繋げることを明らかにした。

第 4 章では粗面クエット流を用いて、粗さ影響下に対するパターン形成ロバスト性に関する結果をまとめている。両壁面または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、特に粗さ高さとのレイノルズ数依存性に着目して調査を行った。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、乱流の自己維持過程が強化され、縞状パターンは粗さ高さ増加に伴い乱流域が肥大してチャンネル全体が特徴のない乱流状態となることを明らかにした。しかし、両壁面粗さでは、平滑面での臨界値付近より低いレイノルズ数では如何なるパターンも発生しないことを示した。これに対して、片壁面粗さでは流動系の非対称性から様々な変調したパターンが

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。

第 5 章では複雑な流動場におけるパターンのロバスト性を評価するため、スパン方向軸に対して回転する平面ポアズイユ流の解析を行った結果をまとめている。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。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。

第 6 章では第 3 章から第 5 章で得られた結果をもとに、パターンの特徴と維持機構に関して統合的に議論する。特に縞状パターンの維持機構に着目して議論することで、縞状パターンは大規模流れと小規模流れの異なるスケールの流れによって特徴づけられることを示した。小規模流れは、秩序的な乱流運動であるストリークと渦構造に対応し、内層スケールによって特徴付けられパターンの乱流域内部の構造に相当する。これに対して大規模流れは、外層スケールで特徴付けられ、パターンの大域的な水平方向のサイズを表す。パターン形状は大規模流れの有無によって変化し、大規模流れが維持される場合は層流乱流域界面で傾きを有する無限長の縞状パターンが発生する。これに対して、大規模流れが減衰することで有限長の縞状パターン、そして傾きを有さない一次元的構造である乱流パフへとパターン形状が変化する。傾きを有するパターンは平衡状態となり、同状態を常に維持し続ける。これに対して傾きが消失し、流れ方向に対する局在性を有すると分裂や結合等、時間的な変化が現れ、パターン形状によって特性が変化する。つまり、大規模流れが平均流として存在することで持続的に小規模流れの維持に寄与し、平衡状態を保つことが可能である。しかし、大規模流れは小規模流れが存在しない限り発生・維持することが出来ない。従って、小規模流れはパターン形状に大規模流れを通して間接的に影響を及ぼす。また、小規模流れは直接的には層流乱流領域の流れ場に対する含有率に作用する。小規模流れの自己維持過程が弱い場合、それに付随して大規模流れが消失してパターンが崩壊する。これに対して小規模流れの活性化により、パターンの肥大化を引き起こし、最終的には流れ場全体が発達した乱流状態となることを明らかにした。

第 7 章は本論文の総括であり、得られた結果及び議論の内容を要約している。壁面剪断流における遷移域の全容を明らかにし、層流乱流パターンはパターン形状によって特徴が決まり、パターン形成は大規模流れと小規模流れによって特徴づけられることを明らかにした。この成果は層流と乱流を分類する臨界値の特定及び、流動状態の制御に役立つものであると考えられる。