

氏 名	フク ドメ コウ ジ 福 留 功 二
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博第863号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学 位 論 文 題 目	低レイノルズ数ポアズイユ乱流の大規模構造とその維持機構 (Large-Scale Structure and Sustenance Mechanism in Turbulent Poiseuille Flow at Low Reynolds Number)
論文審査委員	主 査 准教授 飯 田 雄 章 教 授 田 川 正 人 教 授 森 西 洋 平

## 論文内容の要旨

発達した壁面乱流の再層流化過程を解明することは、乱流による壁面摩擦抵抗増大のメカニズムを理解し、さらに効率的な摩擦抵抗低減の戦略を模索するうえで、重要な方法の一つである。乱流の摩擦抵抗を人工的に低減させる方法は数多く提案されているが、いずれの場合にもレイノルズ数を減少させた乱流と層流との中間領域に現れる構造と類似していることが知られている。本研究では、低レイノルズ数により乱流が一様に維持できず、乱流領域と非乱流領域（準層流領域）が空間的に同時に生じるポアズイユ乱流の直接数値シミュレーションを従来に比べ大規模な計算領域のもとで行っている。計算にはスペクトル法を用いた。空間的な間欠構造を有するため、流れ場は乱流－層流パターンと呼ばれる興味深い縞状の模様を生じた。この縞状の模様の発生は、科学的興味のみならず、上述の工学的観点からも近年活発に研究がなされている。本論文では、計算領域の大小による乱流－層流パターンの人工的な除去、時空間的な条件平均、スパン方向を中心軸としたチャネル全体の回転の3つの方法により、乱流－層流パターンが維持されるメカニズムについて考察がなされている。本論文は以下のとおり全6章より構成される。

第1章は緒言であり、低レイノルズ数の再層流化過程を明らかにすることの工学的背景、先行研究を議論し、本研究で乱流の直接数値シミュレーションにより低レイノルズ数ポアズイユ

乱流を解析する目的、および論文の章の構成について記述されている。

第2章では、スペクトル法によるポアズイユ流の直接数値シミュレーションの計算手法が詳細に記述されている。

第3章では、乱流一層流パターンと呼ばれる大規模な運動状態を、計算領域の大小により十分に捉えられる場合と、捉えられない場合での乱流構造の相違と統計量への影響が詳細に議論されている。計算領域が小さい場合、レイノルズ数の低下に伴いバルクレイノルズ数  $Re_m$  (流量) と壁面摩擦係数  $C_f$  が大きく振動する。このとき、 $C_f$  の増加過程では縦渦の集中する領域が斜め方向に傾斜する傾向が得られ、 $C_f$  の減少過程では縦渦の集中する領域の流れ方向の傾きが小さくなる傾向が得られた。一方、大規模な運動状態を捉えられる大きな計算領域では、 $Re_m$  と  $C_f$  に振動は見られず、縦渦の集中する乱流領域とあまり見られない準層流領域が帯状に明確に配列する状態 (乱流一層流パターン) が現れ、チャンネルの両壁面で対称的に生じることを確認した。さらに、この乱流一層流パターンの発生によりレイノルズ応力の増大、乱れエネルギー生成の活発化、乱流拡散による壁面へのエネルギー輸送が大きくなることが明らかにされた。

第4章では、乱流一層流パターンの移流速度が定量的に求められている。さらに、速度場を時空間的に条件平均することで、乱流一層流パターンと関連する大規模な流れの3次元構造を明らかにし、流れが維持されるメカニズムが考察されている。すなわち、乱流領域を取り巻く上流の高速流体と下流の低速流体により再分配が生じ、スパン方向速度が発生する。このスパン方向速度は、流れ方向渦度と壁面垂直方向渦度を有する大規模な二次流れ (循環) を形成し、平均せん断の傾斜と関連して乱流一層流パターンが維持されることが本研究により示された。また、パターンの移流速度がどの高さでも一定であることや局所平均で定義した摩擦レイノルズ数、バルクレイノルズ数の分布から、乱流領域上流で流速が増加し乱れの活発化、下流で流速が減少して再層流化することが考察された。

第5章では、チャンネル全体にスパン方向の剛体回転を負荷した場合の低レイノルズ数ポアズイユ乱流の統計量、大規模構造について議論されている。低レイノルズ数では、回転の影響が増大することで壁面近傍のスウィープが減少し、乱流拡散による乱れのエネルギー輸送が抑制される。一方、壁面近傍で生成された乱れエネルギーはチャンネル中央へと輸送され、平均速度分布に大きな変化が生じる。すなわちチャンネル中央で平均速度勾配の符号が逆転する現象が本研究により明らかにされた。さらに回転数が増大すると圧力拡散により壁面近傍にエネルギーが輸送され、散逸率も増大した。このとき、チャンネル中央での平均速度勾配の符号がさらに逆転することも確認した。また、剛体回転を加えた場合、乱流一層流パターンは消滅し、流れ方向にほぼ様な乱流構造が生じることも本研究により明らかになった。この場合、レイノルズ数を増減させ変化させても乱流一層流パターンは現れなかった。これにより、剛体回転が乱流一層流パターンの発生を抑制していると考察された。

第6章は総括であり、本研究で明らかになったことがまとめられている。

## 論文審査結果の要旨

本論文では、乱流一層流パターンと呼ばれる乱流領域と非乱流領域が空間的に同時に生じる低レイノルズ数ポアズイユ流について、大規模な計算領域のもとスペクトル法を用いた直接数値シミュレーションにより解析が行われている。論文の背景として、低レイノルズ数の再層流化過程を解析することで、乱流による壁面摩擦抵抗増大のメカニズムを理解し、効率的な摩擦抵抗低減の戦略を模索することが挙げられている。なお、論文の目的は、計算領域の大小による乱流一層流パターンの人工的な除去、時空間的な条件平均、スパン方向を中心軸としたチャンネル全体の回転の3つの方法により、乱流一層流パターンが維持されるメカニズムを明らかにすることと記述されている。本論文は全5章より構成されている。

第1章は緒言であり、低レイノルズ数の再層流化過程を明らかにすることの工学的背景、先行研究を議論し、本研究で乱流の直接数値シミュレーションにより低レイノルズ数ポアズイユ乱流を解析する目的、および論文の章の構成について記述されている。

第2章では、スペクトル法によるポアズイユ流の直接数値シミュレーションの計算手法が詳細に記述されている。

第3章では、乱流一層流パターンと呼ばれる大規模な運動状態を、計算領域が十分に捉えられる場合と、捉えられない場合での乱流構造の相違と統計量への影響が詳細に議論されている。計算領域が小さい場合、レイノルズ数の低下に伴いバルクレイノルズ数  $Re_m$  (流量) と壁面摩擦係数  $C_f$  が大きく振動する。このとき、 $C_f$  の増加過程で、縦渦の集中する領域が斜め方向に傾斜する傾向が得られている。一方、 $C_f$  の減少過程は、縦渦の集中する領域の流れ方向の傾きが小さくなる傾向が見られた。また、大規模構造を捉えられる大規模な計算領域では、 $Re_m$  と  $C_f$  に振動は見られず、縦渦の集中する乱流領域とあまり見られない準層流領域が帯状に明確に配列する状態 (乱流一層流パターン) が現れた。さらに、チャンネルの両壁面に対称的に生じることが確認されている。運動量輸送に関しては、乱流一層流パターンの発生によりレイノルズ応力が大きくなり、乱れエネルギー生成が活発化し、さらに乱流拡散による壁面へのエネルギー輸送も大きくなることも明らかにされている。

第4章では、乱流一層流パターンの移流速度が定量的に求められている。さらに、速度場を時空間的に条件平均することで、乱流一層流パターンと関連する大規模な流れの3次元構造を明らかにし、流れが維持されるメカニズムが渦度方程式から考察されている。また、パターンの移流速度がどの高さでも一定であることや局所平均で定義した摩擦レイノルズ数、バルクレイノルズ数の分布から、乱流領域上流で流速が増加し乱れの活発化、下流で流速が減少して再層流化することが考察されている。

第5章では、チャンネル全体がスパン方向に剛体回転する場合の低レイノルズ数ポアズイユ乱流の統計量、大規模構造について議論されている。このことから、剛体回転を加えた場合、乱流一層流パターンは消滅し、流れ方向にほぼ一様な乱流構造が生じることが明らかにされている。

第6章は総括であり、本研究で明らかになったことがまとめられている。

以上、本論文の内容は、科学的興味のみならず、乱流の摩擦抵抗低減という工学的観点からも興味深い内容であり、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認められる。