

審査の結果の要旨

氏名 伊藤 宗嵩

本論文は「壁乱流における最適制御機構の解明と新しい制御則への展開」と題し、6章より成り立っている。

平滑な壁面に沿って流れる乱流（壁乱流）は、工学的に広く見られる流れであると共に、その単純な幾何学形状にも拘らず、乱流の持つ本質的な複雑性を内包しているため、これまで広く基礎研究の対象とされてきた。壁乱流を対象として様々な乱流制御則の開発が行われてきたが、その大部分は、乱流の持つマルチスケール性、強非線形性のために、研究者の直感に基づいており、多くの試行錯誤を必要としている。これに対して2000年代に入り、最適制御理論を乱流に応用し、制御入力の時空間分布の最適化を行う試みが行われ、低レイノルズ数乱流の再層流化や圧力損失を抑えつつ伝熱のみを促進させる非相似伝熱促進など、顕著な制御効果が報告されている。しかし、その制御機構に関する知見はほとんど得られておらず、高レイノルズ数流れに最適制御を応用した例もない。本研究では、低レイノルズ数域における最適制御を再考し、最適制御の制御機構を解明し、制御指針を得ることを目的としている。さらに、最適制御を高レイノルズ数流れに適用し、制御効果を明らかにすると共に、高レイノルズ数域において顕著となる外層の大規模構造と壁近傍の内層構造の力学的相互作用に関する新たな知見を得ることを目的とする。

第1章では、上述の研究背景および本研究の目的が述べられている。第2章では、大規模並列計算を実現するための壁乱流の順解析と随伴解析のコード開発を行い、過去の乱流統計量データベースとの比較を通じて、本研究で開発された計算コードの検証を行っている。

第3章では、低レイノルズ数壁乱流に対して最適制御を適用し、制御対象期間の長さが制御入力と制御効果に与える影響を明らかにしている。具体的には、制御対象期間が短い場合、瞬時の主流方向速度を打ち消すような最適入力を得られる一方、制御対象期間が長くなるにしたがい、制御効果は向上するものの、最適制御入力と瞬時場の関係性が不明確となることを示した。瞬時の流れ場と

最適制御入力との関係を明らかにするため、壁乱流が維持される最小の計算領域（ミニマムチャンネル）を用いて最適制御を行った結果、将来、低速ストリークが揺動する箇所に制御入力が入ることにより、ストリークが分断され、最終的に乱流が減衰することを明らかにしている。上記のストリークの分断は、大きな計算領域においても確認されるため、最適制御における普遍的な制御機構と結論づけている。

第4章では、前章の結果に基づき、ストリークの制御に必要な大きな波長の制御入力のみを許す最適制御を行い、粘性スケールで200程度以上の波長のみを持つ制御入力により、低速ストリークが分断され、再層流化が実現できることを明らかにした。また、制御の付与により、まずレイノルズ応力が減衰し、これに伴い、主流方向速度変動、壁垂直方向速度変動が減衰することを示した。さらに、収支解析を通じて、圧力歪み相関項、圧力拡散項を介して、レイノルズ応力が抑制されることにより抵抗低減が生じることを明らかにした。

第5章では、摩擦レイノルズ数で1000までの壁乱流に対して、最適制御を行い、低レイノルズ数で見られた最適制御によるストリーク構造の分断・崩壊に伴う、乱流抑制効果が高レイノルズ数においても確認できることを可視化、およびスペクトル解析により明らかにしている。一方で、レイノルズ数の増加に伴い制御効果が減少する傾向も明らかになった。また、高レイノルズ数流れにおいては、内層構造と外層構造の制御には相反する効果があること、壁近傍のみの運動エネルギーを抑制するように最適制御を行うことにより、より高い制御効果が得られることを示している。更に、大規模構造を仮想的に減衰させた乱流場に対して最適制御を行うことにより、大規模構造の有無によらず高レイノルズ数では制御効果が低減することを示し、内層構造に対するレイノルズ数効果に関して、壁乱流物理の観点からも興味深い知見を得ている。第6章では、本論文の結論が纏められている。

以上のように、本論文ではこれまで未解明であった最適制御による乱流抑制機構を詳細に調査すると共に、最適制御を高レイノルズ数乱流場へ適用し、その制御効果を明らかにした点で新規性が高い。本論文で明らかにされた制御機構は、過去に提案された制御機構とは大きく異なり、新しい乱流制御則の構築に重要な知見を与えており工学的意義も大きい。更に、最適制御を通じて、外層構造と内層構造の力学的相互作用に対するレイノルズ数効果についても、興味深い結果が得られており、壁乱流物理の理解においても重要な貢献がある。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。