

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 伊藤 宗嵩

深刻化する環境・エネルギー問題を背景に、高速輸送機器の燃費向上などを目的とした、壁面摩擦抵抗低減のための乱流制御手法の確立が求められている。乱流フィードバック制御は、高効率な制御が可能である一方、既存制御則による抵抗低減効果は限定的であるのが現状であり、革新的フィードバック制御則の開発が長く望まれている。一方、最適制御理論の枠組みでは、制御目的を表すコスト関数を必ず減少させる制御入力が見られる利点があり、既往研究でも低Reynolds数乱流の再層流化が可能であることが報告されている。したがって、最適制御入力の乱流抑制機構を明らかにすることで、優れたフィードバック制御則への展開が期待できる。本論文では、新たな壁乱流摩擦抵抗低減手法の創出に繋がる知見を獲得することを目的に、チャンネル乱流に対して最適制御を行い、その制御効果や制御機構に関する検討を行う。具体的には、壁面吹出し・吸込みを制御入力とし、チャンネル乱流の乱流エネルギーの最小化を目的とした最適制御を行う。さらに、工学応用上重要な高Reynolds数流れの制御を念頭に、最適制御で得られる制御効果および制御機構のReynolds数依存性を調査する。

第2章では、最適制御計算に必要な随伴解析ソルバーの開発を行った。流れ場および随伴場の計算手法と、最適制御計算の詳細を述べる。ソルバー開発では、オブティマイザ一部を含めたコード全体を並列化することで、膨大な計算資源を必要とする随伴解析への対応を図った。これにより、先行例の無い摩擦Reynolds数が1000程度の流れでの最適制御計算を行うことが可能となった。

第3章では、低Reynolds数流れでの最適制御機構を解明することを目的として、タイムホライズン長を変化させた場合の制御効果や制御入力および応答の変化を調査した。タイムホライズン長を短く設定した場合、制御入力は壁近傍の主流方向速度変動と強い正の相関を持つ制御入力を得られ、短期的な最適制御機構が主流方向速度変動の直接的な打消しであることが示唆された。このことは、主流方向速度変動に比例した制御入力を与えるu-controlを行い、高い制御効果が得られたことから支持された。タイムホライズン長を長く設定した場合、瞬時の流れ場と制御入力の相関は不明確となり、制御入力が流れ場の時間発展に強く依存する可能性が示された。また、低速ストリークが細分化されたのち、乱れが著しく減少することが確認され、最適制御入力がストリーク構造の操作を行っていることが示唆された。これを確認するため、低速ストリークの過渡成長（STG）を再現した流れ場で最適制御を行った。その結果、最適制御は低速ストリーク揺動の節の位置で吸込みを印加することで低速ストリークを切断し、その結果、細分化された低速構造が千鳥状に配置する流れ場が得られた。これは通常のチャンネル流の応答と類似しており、両者に同様の制御機構が働いていることが示唆された。揺動を利用したストリークの細分化による乱流抑制はこれまで提案されたことが無く、ストリークの挙動を予測しながら制御を行うことで、高い制御効果が得られる可能性が示された。

第4章では、ストリーク細分化が比較的大きい空間スケールの制御入力で実現可能である可能性が示唆されたことを受け、制御入力の空間スケールに制約を加えて最適制御を行い、制御効果が得られるか検証した。その結果、制御入力に含まれるモードの最小波長が、STG解析での領域サイズとおおよそ同様か小さい場合、流れが再層流化されることが明らかになった。また、制約を加えた場合でもストリーク細分化が生じることが確認された。収支解析を軸として検討を行った結果、二つの制御機構を明らかにした。(1) 圧力拡散項による Reynoldsせん断応力の壁側への輸送とそこでの圧力歪み相関項による破壊、(2) 圧力歪み相関項による壁垂直方向速度変動から主流方向速度変動への再分配の促進。以上のことから、ストリーク細分化による乱流抑制機構が通常のチャンネル乱流でも働くことが示唆された。さらに、応用上望ましい単純な制御入力によって、極めて高い制御効果が得られることが示され、今回の制御入力と流れ場の対応関係を明確化することで、実用性の高いフィードバック制御則が構築できる可能性が示された。

第5章では、工学応用上重要な高Reynolds数流れでの制御を念頭に、摩擦Reynolds数が300, 650, 1000 の流れで最適制御を行い、制御効果や制御機構のReynolds数依存性を調査した。その結果、最適制御による乱流抑制効果はReynolds数の増加とともに低下し、いずれのケースでも流れが再層流化しないことが明らかになった。制御機構に関する検討の結果、壁面近傍の乱れは大きく抑制された一方、乱流エネルギーの収支が大

大きく変化するのはバッファ層までに限られ、壁から離れた領域の乱流運動は大きく影響されないことが明らかになった。一方、壁面近傍の乱れが抑制されたことで、Reynoldsせん断応力は流れ場全体で大きく減少し、高い抵抗低減効果が維持された。また、Reynolds数を増加させた場合でも、低Reynolds数の場合と同様に、ストリーク構造の細分化による乱流抑制機構が働いていることが示唆された。このことから、高Reynolds数流れでも、ストリーク構造の細分化を意図した制御により、壁面近傍の乱れの抑制とそれに伴う摩擦抵抗低減が実現できる可能性が示された。

以上の解析を通じ、本論文では壁乱流の最適制御における乱流抑制機構を調査した。その結果、最適制御入力には壁近傍の低速ストリーク構造を、その揺動を利用して細分化することで、乱流生成を抑制することを初めて提示した。このような指針に基づいて新たな制御則を設計することで、高い制御効果が得られる可能性があり、今回得られた知見は工学上重要である。