

審査の結果の要旨

氏名 吉野 崇

本論文は、「マイクロセンサ・アクチュエータ群を用いた壁乱流フィードバック制御システムの構築と評価に関する研究」と題し、6章より成っている。

自然界における流体现象の大半は乱流状態にあり、乱流およびそれに伴う輸送現象は、輸送機器や産業機器などの設計において、極めて重要な因子である。実現象において、乱流状態は、熱伝達、物質拡散、化学反応などを促進する一方、壁面摩擦抵抗や流体騒音の増大をもたらす。近年のエネルギー問題、環境問題に対する関心の高まりから、乱流制御に対する期待も大きい。特に、時々刻々の流れの状態をもとに適切な外力を加えて、人為的に流れを操作するフィードバック制御は、制御効果が高いことが数値シミュレーションにおいて報告されているが、実験的に実現した例は皆無である。本論文は、壁面変形ミニチュアアクチュエータ群、および、マイクロマシン技術で製作されたせん断応力センサ群を用いて、壁乱流のフィードバック制御システムを構築し、チャンネル風洞における乱流摩擦抵抗低減を試みたものである。制御アルゴリズムとしては、測定ノイズに強い遺伝的アルゴリズムを採用し、制御効果は、壁面せん断応力、乱流場の計測によって検討した。

第1章は序論であり、壁乱流に特徴的な準秩序構造、乱流制御手法の分類を概観し、本論文で取り扱うフィードバック制御について述べている。そのなかで、フィードバック制御の実現にはセンサ、アクチュエータ、コントローラの3つの要素が必要であること、センサ・アクチュエータに要求される時空間スケールは小さいためにマイクロマシン技術の利用が必要であることを述べている。また、従来研究が行われてきたマイクロ流れセンサ、アクチュエータ、制御アルゴリズムについて概観し、フィードバック制御の実験により抵抗低減を実現した例が皆無であることを指摘している。

第2章では、実験条件と制御システムの設計仕様を論じており、まず、制御評価に用いるチャンネル乱流風洞の流れ場の特性と基本的特性の評価結果について述べている。次にフィードバック制御システムの構築にあたり、壁乱流で中心的な役割を果たしている縦渦構造の時空間スケールに基づいて定めた、センサ、アクチュエータ、コントローラの設計仕様について述べている。さらに、本論文で構築する制御システムで実現可能な抵抗低減率の予測について論じている。

第3章では、マイクロ熱膜せん断応力センサの最適設計と特性評価について述べている。種々のセンサの特性について検討するため、マイクロ熱膜せん断応力センサの形状を模擬した一連の2次元数値解析の結果を示している。空気キャビティを持つセンサでは、

ダイアフラムに切り欠きを設けることにより面内を伝わる熱伝導を抑制可能であること、ダイアフラム長さを最適に選ぶことにより、消費電力を抑えつつ、流体中の温度分布の広がりを抑制し、動特性の向上が可能であることを明らかにしている。そして、熱解析で得られた知見をもとに、マイクロせん断応力センサを試作し、チャンネル乱流中で特性評価を行って、ゲインが半減する周波数が 270Hz から 500 Hz へ顕著な向上できることを明らかにしている。

第4章では、フィードバック制御のアルゴリズムとして採用した、生物の進化のプロセスを擬似的に再現する遺伝的アルゴリズムについて述べている。本論文で対象とする制御システムでは、最適化に用いる評価関数がせん断応力センサで計測されるため、測定値にランダムノイズが大きく、ノイズに強い最適制御アルゴリズムの提案と、ベンチマークテストの結果を示している。

第5章では、マイクロセンサ、アクチュエータ群を用いた壁乱流フィードバック制御システムを構築とその評価結果について述べている。センサ群については、せん断応力乱れのスパン方向2点相関がDNSの結果と良い一致を見せ、乱流構造をとらえることが可能であることを示している。アクチュエータ群については、共振周波数が 750 Hz、変位が約 50 μm であり、制御に十分な性能を持つことを示している。そして、192 個のセンサ、48 個のアクチュエータからなる制御システムを構築し、レイノルズ数 $Re_{\tau}=300$ のチャンネル乱流風洞において平均せん断応力が約 8 %低減したことを明らかにしている。また、流れ場の LDV 計測を行って、アクチュエータ上空の壁面近傍でレイノルズ応力が減少することを明らかにし、抵抗低減を裏付けている。さらに、本研究で得られた制御則の効果について、DNS データベースを用いた条件付き抽出により確認し、高速ストリークに対して、正の壁面速度を与え、乱流構造を変化させている可能性が高いことが明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている

以上、本論文では、乱流のフィードバック制御を目的として、マイクロせん断応力センサ群、壁面変形アクチュエータ群、遺伝的フィードバック制御アルゴリズムからなる大規模な制御システムを構築し、そのチャンネル乱流において評価を行った。数値シミュレーションにより、せん断応力センサの熱解析を行い、動特性向上の具体的な指針を獲得し、実際にマイクロセンサを試作して実験的にその効果を確認した。さらに、耐ノイズ性を有する遺伝的アルゴリズムを制御アルゴリズムとした大規模システムを構築し、フィードバック制御の実験室実験により初めて摩擦抵抗低減を実現している。従って、本論文は、乱流工学分野のみならず、様々なスケールの熱流体制御手法についての新たな知見を加えるもので、熱流体工学をはじめ機械工学の上で寄与するところが大きい。

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。