

審査の結果の要旨

氏名 焼野 藍子

本論文は、「摩擦抵抗低減制御下の壁乱流準秩序構造の力学機構に関する研究」と題し、5章より成っている。

省エネルギーや環境負荷軽減の観点から、摩擦抵抗低減、伝熱促進、騒音低減などを目指した乱流の高効率で自在な制御技術への要請が高まっている。工学上対象となる流れ場の多くは壁面に沿うせん断乱流であり、優れた制御を達成するには、壁面近傍の縦渦構造に適切な作用を施すことが有効であることが、近年の研究で明らかにされている。一方、様々な乱流制御法の中で、壁面の横幅(スパン)方向の周期振動が、顕著な抵抗低減効果を達成することが知られている。比較的単純な制御則ではあるものの、抵抗低減機構には未解明の部分が多く、最適化、実用化に向けてさらに詳細な解析が必要である。本論文では、基本的な壁面乱流のひとつとして二次元チャンネル乱流を取り上げ、線形安定解析のひとつである過渡安定解析、そして直接数値シミュレーションと条件付き抽出法を通じて、制御下の乱流準秩序構造の力学機構に対して新たな知見を得ることを試みたものである。

第一章は序論であり、従来の関連研究を概観している。特に、壁面に沿う乱流の維持に主たる役割を果たすとされる準秩序構造の自立的な維持機構について、現在の知識をまとめている。また、自立機構の中の攪乱の増幅過程に対し、流れの安定性の観点から、ポアズイユ流の線形安定性あるいは過渡的安定性について行われた従来の理論的な研究を紹介している。さらに、本論文の解析対象とする、スパン方向壁面振動による乱流摩擦抵抗低減に関する研究をまとめ、最適な周期や振幅についての知見をまとめている。その上で、模擬的な乱流場に対する過渡応答解析と、直接数値シミュレーション(DNS)データの条件付き抽出法から、力学機構の詳細を論ずるとしている。

第二章では、壁面の周期振動を伴うチャンネル乱流場の解析の詳細を示している。チャンネル内の層流と発達乱流に相当するせん断流の速度分布において攪乱の時間的増幅率を調べる過渡安定解析について、さらに基礎方程式と固有モード分解による数値計算スキームについて触れている。

第三章では、過渡安定解析による結果を示し、その物理的な示唆を探っている。まず、非制御下のポアズイユ流と乱流の各速度分布形状を有する層流において、スパン方向波長の大小によって攪乱の過渡成長率に差があることを明らかにしている。さらに、乱流速度分布と渦粘性を仮定した場合においては、発達乱流の内層ストリーク構造($\lambda_x^+ = 1000$, $\lambda_z^+ = 100$)と外層大スケール構造($\lambda_y/\delta = \infty$, $\lambda_z/\delta = 4$)に対応する二つの攪乱モードにおいて、過渡成長率が極大値を取る事実を明らかにしてい

る。乱流速度分布の形状が、こうした二つの典型的な攪乱モードに対して特異な増幅率を与えることは、流体力学的に重要な指摘である。さらに、スパン方向壁面振動によりストークス層が重畳する場合には、ポアズイユ層流では増幅率は増大する傾向にあり流れの安定化に向かわないこと、一方、乱流速度分布では内層構造に対応するモードの増幅率は減少し、外層構造に対応するモードは振動周期によって増減する場合があることなどが示されている。しかし、これらの解析結果は、次章で論じられる摩擦低減をもたらす最適振動周期などと、一貫した整合関係にはないとしている。

第四章では、DNS と条件付き抽出法による解析結果を示している。まず、制御下における基礎的な統計量を求めている。解析は、平均、位相平均、乱れの 3 成分分解に基づいている。その結果、乱れ成分から生じるレイノルズ応力が最大となる位置に存在する縦渦構造は、その秩序構造をある程度維持しているものの、制御によるより大きな時間スケールの位相変動の影響を受けていることを指摘している。

次に、縦渦構造の条件付き抽出の結果から、抵抗低減に伴う二つの主要な構造変化を指摘している。第一に、どの振動周期においても、縦渦構造周りでレイノルズ応力を生じる運動モードである(低速流体の壁から離れる)Q2 イベントが、縦渦構造の傾き角度の変化に伴って変形を受け、ある特定の位相で顕著に減衰することである。第二に、比較的長い振動周期において、もうひとつの応力生成の運動である(高速流体の壁に近づく)Q4 イベントが強化され、結果として抵抗低減率が低下すること、それは縦渦構造の傾き角度、内部の圧力ひずみ相関に基づくエネルギー再分配過程の変化と関係していることを指摘している。そして、これらの二つの相反する効果が重畳することから、最適な制御周期が決定されるとしている。

第五章は結論であり、本論文で得られた主要な成果をまとめている。第一に、チャンネル流の過渡安定解析において、ポアズイユ型層流にスパン方向壁振動を与えることは流れの安定性に寄与しないこと、渦粘性を有する乱流型の速度分布においては内外層特有の二種の乱流構造に対応すると考えられる攪乱モードの増幅率が顕著であること、さらに壁振動によって有意な影響を受けるものの、その事実を壁振動による摩擦抵抗低減機構に直接関係づけることは難しいことを指摘している。第二に、壁振動制御によって壁近傍の渦構造の傾き角度、変形度、渦内部のエネルギー再分配機構などが影響を受け、レイノルズ応力の Q2, Q4 イベントの有意な増減が生じ、乱流摩擦抵抗の増減、ひいては最適条件が決定されると結んでいる。

以上、本論文では、壁面の横方向の周期的振動によって、壁面せん断流の安定性や乱流特有の渦構造がどのような変化を生じるかに焦点を当て、理論解析、数値シミュレーションを行い、新たな知見を得たものである。これらは、乱流制御法の最適化、実用化に向けて有用であり、乱流工学および熱流体工学の発展に寄与するものである。

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。