

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岩本 薫

本論文は、”高レイノルズ数壁乱流の摩擦抵抗低減制御に関する研究”と題し、6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、直接数値シミュレーション(DNS)を用いた過去の研究で明らかにされている。しかし、従来の乱流制御アルゴリズムに関する研究は、低レイノルズ(Re)数 $Re_\tau \sim 100$ ($Re_\tau = u_\tau \delta / \nu$, u_τ は壁面摩擦速度, δ はチャンネル半幅, ν は動粘性係数)でのみ行われている。これに対して、実際のアプリケーション、例えば航空機において等価な Re 数を見積もると、 $Re_\tau \sim 10^5$ となるが、このような高 Re 数壁乱流に対して DNS 等で構築された制御を適用した場合の効果は不明である。本論文では、DNS を用いて Re 数の異なるチャンネル乱流を模擬し、可視化、Proper Orthogonal Decomposition (POD)を用いて、制御効果に影響を与える乱流構造の Re 数効果を定性的・定量的に解析している。また、摩擦抵抗低減を目的とする高 Re 数壁乱流フィードバック制御に関する検討を行っている。

第一章は序論であり、壁乱流フィードバック制御に関する従来の知見を概観し、なかでも四つの重要な側面、則ち、ハードウェア開発、計算機の発達、制御理論と流体力学の融合、乱流準秩序構造の基礎的知見の蓄積について述べている。また、現実に適用可能な制御アルゴリズムの構築へ向けた課題点を列挙し、特に重要な課題点の一つである乱流制御の Re 数効果に関して議論している。また、制御効果に大きく影響を及ぼす乱流準秩序構造を定性的・定量的に DNS を用いて解析し、高 Re 数壁乱流制御の効果に関する検討を行う必要があると論じている。

第二章では、DNS を用いて中 Re 数のチャンネル乱流を模擬し、壁近傍および、外層の乱流準秩序構造の物理メカニズムについて考察している。まず、チェビシェフ多項式の微分操作に伴う丸め誤差を除去する方法を新たに開発し、また、地球シミュレータにおいて512個のCPU・約600GByteのメモリを用いて超並列化・ベクトル化を行うことにより、高精度スペクトル法を用いて、世界最大の Re 数チャンネル乱流大規模DNSを計算することを可能としている。その結果、高 Re 数チャンネル乱流では、内層に縦渦構造・ストリーク構造の再生成メカニズムが存在すると共に、内外層の間に新たな乱流大規模構造生成メカニズムが存在することを示している。また、大規模構造はアクティブに乱れを生成し、縦渦構造の階層的クラスター構造化(壁近傍では低・高ストリーク構造の間に存在し、壁から離れると低速大規模構造内でクラスター化する)など縦渦構造・ストリーク構造の再生成メカニズムにも影響を及ぼすことを明らかにしている。

第三章では、乱流準秩序構造がレイノルズ応力、壁面摩擦に与える影響、及び準秩序構造間の相互作用について、定量的解析を行うことができる POD を用いて検討を行っている。その結果、Re 数が増加すると、壁から離れる方向への構造間でのエネルギー輸送が減少し、壁に向かう方向へのエネルギー輸送が増加し、壁から離れた構造($20 < y^+ < 100$)の壁近傍の力学への貢献度が增加することを定量的に示している。また、外層構造($y^+ > 100$)と内層構造($y^+ < 100$)との直接の相互作用は、より高い Re 数でも弱いことが定量的に示された。これらの結果は、壁乱流準秩序構造間の非線形相互作用による影響を定量的に評価した世界で初めての結果であり、POD を用いたことによる最大の利点であると報告している。

第四章では、前章までに得られた乱流構造の知見を基に、壁近傍の渦を打ち消す既存制御アルゴリズムの Re 数効果を DNS を用いて評価している。 $Re_\tau = 110 \sim 650$ で一定の制御効果をもたらすが、同じ制御効果を得るための制御エネルギーは Re 数の増加とともに大きく増加すると述べている。この主要因は、壁面圧力変動の増加であり、より高 Re 数ではさらに圧力変動が増加すると予測されることから、高 Re 数で制御エネルギーを抑えるためには、圧力変動と関連の小さい制御入力が有効であると論じている。

第五章では、レイノルズ応力と壁面摩擦係数の関係式を新たに導出し、高 Re 数での制御効果を検討している。実際のアプリケーションとほぼ等価な Re 数において、既存制御アルゴリズムの制御効果は低 Re 数の場合より減少するが、同じオーダの制御効果を得ることができると述べている。また、壁近傍を対象とした制御アルゴリズムの理想的な最大制御効果を示す理論式を導出している。その結果、壁極近傍の速度変動を完全にダンピングした場合、Re 数が増加しても、大きな制御効果を得ることができ、高 Re 数においても壁ごく近傍の乱れのみを抑制することで、大きな摩擦抵抗低減効果を得ることができることを定量的に示している。よって、その抑制対象となる壁近傍の圧力変動・速度変動に影響を及ぼす縦渦構造・ストリーク構造、及び、大規模構造の壁面近傍成分を制御対象とする制御アルゴリズム開発によって、より大きな制御効果が得られると結論付けている。

第六章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている

以上、本論文では、まず摩擦抵抗低減を目指した高 Re 数壁面せん断乱流の高効率で自在な制御の効果に大きな影響を及ぼす乱流準秩序構造のレイノルズ効果を評価している。その際、誤差を除去する方法を新たに開発し、超並列化・ベクトル化を行うことにより、世界最大の Re 数チャンネル乱流 DNS を行っている。評価手法として、可視化・低次統計量だけでなく、乱流構造の定量的解析を行うことができる POD を用いて、壁乱流準秩序構造の一般的な力学機構・輸送機構について新たな知見を加えている。また、壁近傍を対象とした制御アルゴリズムの理想的な最大制御効果を検討し、高 Re 数においても壁ごく近傍の乱れのみを抑制することで大きな摩擦抵抗低減効果を得ることができることを定量的に示している。これらの知見は、フィードバック制御の実用的な Re 数での有効性を示したもので、将来の新しい機械システムの設計に有用な指針を与えるものである。

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。