

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 岩本 薫

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剪断乱流であり、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)数でのみ行われている。実用的な場でのより高いRe数では、乱れのスペクトルが拡大するとともに、乱流準秩序構造の複雑化が起こり、既存の制御アルゴリズムでは制御効果が減少するため、高Re数で効果的な制御アルゴリズムを構築する必要がある。本研究では、DNSを用いてRe数の異なるチャンネル乱流を模擬し、摩擦抵抗低減を目的とするアクティブ・フィードバック制御のRe数効果について調べる。また、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可視化、Proper Orthogonal Decomposition (POD)を用いて、定性的かつ定量的検討を行い、乱流力学的メカニズムの解明の一役を担うことを目的とする。

まず、乱流準秩序構造のRe数効果を調べるために、DNSで世界最大のRe数($Re_\tau = u_\tau \delta \nu = 1160$, 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)までのチャンネル乱流DNSを行った。地球シミュレータにおいて512個のCPU・約600GByteのメモリを使用し、超並列化・ベクトル化を行い、並列化率99.997%、実行性能約1.4Tflops、理論性能の約35%、ベクトル化率99.36%、ベクトル長約235、速度向上率504倍を達成した。また、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しく開発し、高精度のスペクトル法を用いた大規模DNSを可能にした。渦構造は、壁近傍ではRe数に依存せず、縦渦構造として高速・低速ストリークの間が存在する確率が高い。また、Re数が増加すると、壁から離れた領域において、低速大規模構造内に存在する確率が高くなり、階層的クラスター構造として観察される。また、ストリーク構造はRe数に依存せず、壁近傍のみで存在することが分かった。大規模構造はRe数が増加すると、チャンネル中央から壁近傍まで存在し、特に低速大規模構造は渦構造を内包するため、チャンネル全域で高速大規模構造よりレイノルズ応力が若干大きいことを示した。また、壁近傍以外でレイノルズ応力を主に生成しているのは、縦渦構造ではなく、大規模構造の持つ大スケールの上昇・下降流であり、壁近傍の縦渦構造に依らず自立性を有することが明らかになった。高Re数乱流場では、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し、大規模構造は、壁近傍($y^+ \sim 15$)において、Re数の増加に伴う流れ方向乱れ成分の増加に寄与し、壁近傍統計量にも影響を与えている。また、高Re数では流れ方向速度変動分布の内外層間に第二のピークが存在するが、この主要因はスパン方向波長 $\lambda_z / \delta \sim 1.2$ の大規模構造であることが分かった。

次に、PODを用いて、上記の可視化・統計量から得られた知見を定量的に評価した。壁面せん断応力変動への寄与率が高い乱流準秩序構造は、Re数に依らず、粘性長さでスケールされる壁近傍の縦渦構造である。平均壁面せん断応力についてもこれらの構造の寄与が大きい。Re数が増加すると壁から離れた構造の貢献度が増加し、大規模構造も壁近傍の統計量に影響を及ぼす可視化・統計量の結果と一致する。また、 $Re_\tau = 110 \sim 650$ において、壁近傍の力学は、 $y^+ < 100$ の構造に支配される。 $Re_\tau = 110$ の場合、壁から離れた構造($30 < y^+ < 100$)から壁近傍の構造($y^+ < 30$)への逆方向のエネルギー輸送は

小さいが、 $Re_\tau = 650$ ではより大きくなり、縦渦の再生成がしばしば発生する、縦渦上流側の壁から離れた領域、および下流側の壁面側領域に存在する。また、 Re 数が増加すると、壁近傍の縦渦構造とチャンネル半幅 δ でスケーリングされる大規模構造との非線形相互作用は減少するが、 $Re_\tau = 650$ において、 $y/\delta \sim 0.5$ に存在する大規模構造は、生成した乱れエネルギーの約 50% を他の構造に輸送し、壁近傍以外においてアクティブに乱れを生成する新しい乱流エネルギー輸送機構を有していると考えられる。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研究成果であり、POD を用いたことによる最大の利点である。

以上の知見を基に、アクティブ・フィードバック制御の Re 数効果について検討を行った。壁近傍の渦を打ち消す制御アルゴリズム(V-control)では、本研究で検討を行った Re 数範囲で一定の制御効果をもたらすが、さらに Re 数が増加すると、摩擦抵抗低減率は徐々に減少すると予測される($Re_\tau = 100000$ において摩擦抵抗低減率約 13%)。この主要因は Re 数の増加とともに壁から離れたレイノルズ応力の摩擦抵抗への寄与が増加することである。また、高 Re 数では制御投入エネルギーも大きく増加($Re_\tau = 100000$ においてポンプ動力の約 3%)する。その主要因として、 Re 数の増加とともに増加する壁面圧力変動による投入エネルギーの増加が挙げられる。 Re 数の増加とともに制御投入エネルギー増加する主要因は、圧力変動の増加である。また、圧力変動の増加は流れ方向波長 $200\nu / u_\tau < \lambda_x < 8\delta$ の寄与が大きく、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。よって、高 Re 数で投入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あるという指針が得られる。

また、壁面摩擦係数とレイノルズ応力との関係式を新たに導き、壁からの距離の重み付き(壁面で 1、チャンネル中央で 0 の直線関数)レイノルズ応力の積分量が壁面摩擦係数に直接寄与していることが分かった。よって、低 Re 数では、壁近傍のレイノルズ応力抑制が摩擦抵抗低減に有効であるが、高 Re 数では、壁から離れたレイノルズ応力の摩擦抵抗への寄与が増加することが言える。また、壁近傍のレイノルズ応力を負にすることが摩擦抵抗低減に有効であり、層流化以上の摩擦抵抗低減も可能であることも分かる。

最後に、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、またその Re 数効果を調べるために、壁近傍のみの乱れ成分を仮想的にダンピングしたチャンネル乱流を解析した。壁近傍のダンピング層厚さ $y_d^+ = 60$ で一定の場合、低 Re 数では 70% を超える大きな摩擦抵抗低減率を得る。また $Re_\tau = 100000$ においても約 55% の摩擦抵抗低減率を得ることができる。この場合ダンピング層の厚さ y_d はチャンネル半幅 δ に対し、 $y_d / \delta = 0.06\%$ とごく壁近傍のみである。この主要因は、壁近傍の乱れをダンピングした場合、ダンピング層内では層流分布となり、ダンピング層上限での速度が大きな値となる。また、流量一定条件下では、ダンピング層上限位置での局所せん断応力は大きく減少する。よって、ダンピング層以外の乱流場の Re 数も大きく減少することとなり、結果としてダンピング層以外の部分でのレイノルズ応力も大きく減少することとなる。上述のように、高 Re 数乱流で摩擦抵抗低減を得るためには、壁から離れた位置でのレイノルズ応力を減少させる必要があるが、壁近傍の乱れを完全に抑制することで、結果として壁から離れた位置でのレイノルズ応力も大きく減少させることが可能と言える。以上、高 Re 数流れにおいても、壁面ごく近傍のみの乱れを抑制すれば大きな摩擦抵抗低減効果が得られることを定量的に示すことができた。但し、ここで壁面摩擦抵抗低減率を求める際に、制御投入エネルギーは考慮していないことを明記しておく。前述のように高 Re 数 DNS の乱流準秩序構造の解析より、高 Re 数においては、壁面近傍の乱れ成分にも大規模構造の影響が大きくなっていくため、より大きな制御効果を得るためには、制御対象として壁近傍の縦渦構造・ストリーク構造だけでなく、大規模構造までも取りこみ、乱れを大きく減少させる必要がある。これらの知見は、アクティブ・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的设计に有用な指針を与えるものである。

以下に結果を総括する. 高 Re 数チャネル乱流では, 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. 大規模構造はアクティブに乱れを生成し, 壁近傍乱れ, 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. また, 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が, 縦渦構造だけでなく大規模構造も壁近傍圧力変動・速度変動への影響が大きく, これらを制御対象とする制御アルゴリズムが必要不可欠である.

(以上)