

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 焼野 藍子

エネルギー資源制約を受ける 21 世紀の地球環境時代を迎え、省エネルギー技術の開発は極めて重要である。航空機などの輸送機器における流体力学的摩擦抵抗は、運航時の消費エネルギーの半分以上になるため、乱流制御による摩擦抵抗低減技術への期待は大きい。時空間周期性を有する制御入力によるプレデターモード制御は、一般に高い摩擦抵抗低減率を得られることが知られている。特にスパン方向壁振動制御は、スパン方向に壁面を時間周期振動させることで、顕著な摩擦低減が得られることが知られている。しかし、実用化には投入エネルギーを抑えつつ正味のエネルギー利得を向上させることが重要である。そうした技術目標を達成するには、制御下でレイノルズ応力の低減を生み出す壁近傍の準秩序構造の変化の詳細に関する知識が必要である。従来、スパン方向壁振動制御下の乱流場を対象として、乱流統計量を用いて壁乱流の自立機構の変化を摩擦低減の主たる原因とする推測がなされて来た。しかしながら、実際に自立機構を司る流体安定性や乱流制御下での縦渦構造の変化を具体的に解析した研究例は無い。

本論文ではまず、非制御時において、基本流としてポアズイユ流と乱流の平均速度分布をおいた流れ場の過渡安定性解析を行った。その結果、最大過渡成長率は、スパン方向波長が比較的短いモードは乱流平均速度分布の方が高いが、比較的長いモードはポアズイユ流の方が高いことを示した。次に基本流に乱流平均速度分布をおき、さらに乱流粘性による線形近似を施すと、最大過渡成長率は、スパン方向波長がおおよそ $\lambda_z^+ = 100$ 付近と、 $\lambda_z/h = 4.0$ 付近において、二つの極大値が確認された(図 1 参照)。これらのスケールは、平行平板間流れの直接数値計算で見られる内層構造(ストリーク構造)のスケールと、チャンネル幅規模の外層構造(大規模構造)のスケールに一致している。この事実は、ストリーク構造と大規模構造の形成にエネルギー過渡成長過程と類似の過程が関与している可能性を示唆している。

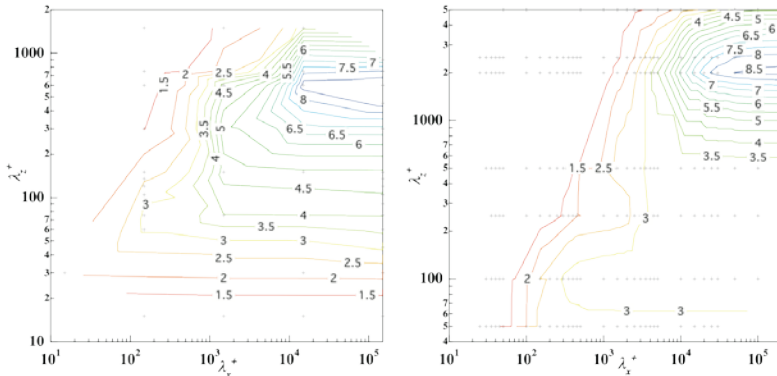


図 1 平行平板間乱流速度分布の過渡安定性解析による最高エネルギー成長率の分布(左は $Re_\tau = 150$ 、右は $Re_\tau = 500$)

次に、ポアズイユ流にストークス層が重畳する場では、エネルギー過渡成長率は顕著に増加する。従って、ポアズイユ流にストークス層を加えることは、流体力学的安定性を増すことに繋がらないことを示した。一方、基本流に乱流平均速度分布を設定し、攪乱方程式に乱流粘性近似を施した場合は、ターゲット時間に依存して、過渡成長率の変化の様子が変わる。前述の内層スケールモードは $\tau^+ > 30$ ではいずれの制御周期でも最大過渡成長率は減少する($\tau^+ = 60$ 付近で、 $T^+ = 50$ では 50%、 $T^+ = 250$ では 5%減少、図 2 参照)。しかし外層スケールモードは $\tau^+ > 800$

で $T^+ = 50$ では減少し、 $T^+ = 250$ では初期位相によって発散する場合がある(図3参照). これらの結果から、ストリーク構造と大規模構造の生成はスパン方向壁振動により影響を受ける可能性が示唆される. しかしながら、直接数値計算で見られる摩擦抵抗低減と攪乱の過渡成長率の低減の間に、関係性を見いだすことは出来ていない.

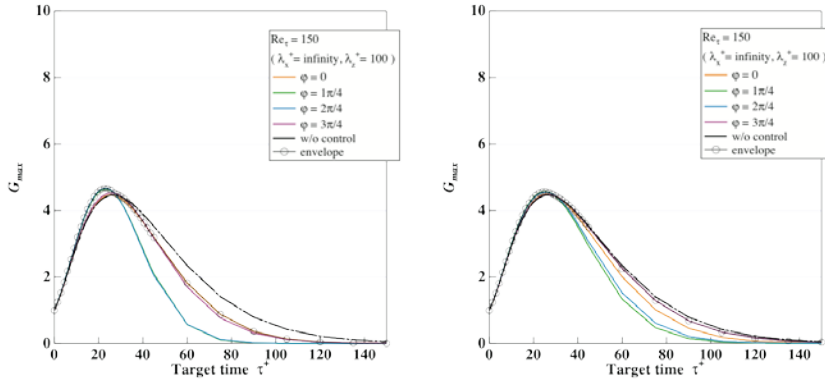


図2 ストリーク構造に相当する波長モードのストークス層重畳下の最高過渡成長率($\lambda_x^+ = \infty, \lambda_z^+ = 100$)

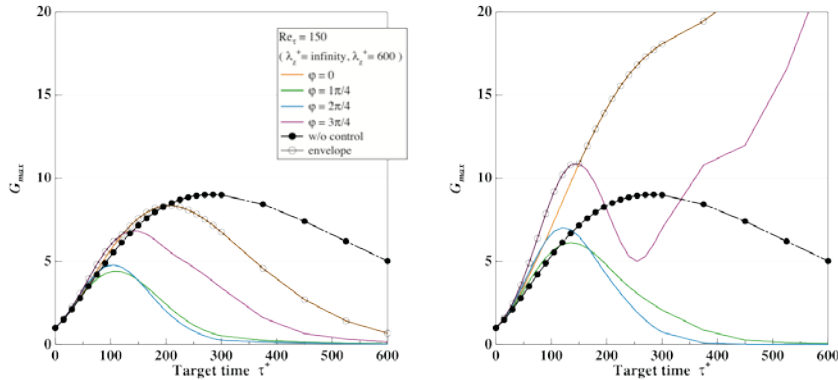


図3 ストリーク構造に相当する波長モードのストークス層重畳下の最高過渡成長率($\lambda_x^+ = \infty, \lambda_z^+ = 600$)

次に、直接数値シミュレーションを用いて、壁振動の有無による乱流統計量の位相変化を調べた. レイノルズ応力の四象限解析の結果、いずれの制御周期においても摩擦抵抗低減の主な原因はレイノルズ応力の Q2 イベントの低減であることが明らかとなった. 一方、長い制御周期で摩擦抵抗低減が抑制される主な原因は、レイノルズ応力の Q4 イベントの増加である. このとき、Q4 イベントだけでなく Q1 イベントと Q3 イベントの増加もみられるが、Q4 イベントの増加が卓越するため、結果的にレイノルズ応力が増加し、摩擦抵抗低減が抑制される. 比較的強い渦運動を保持する縦渦構造の条件付き抽出を行い、制御下の渦構造とその周りの乱流統計量の変化を観察した結果、Q2 イベントが顕著に弱まる位相、さらに Q4 イベントが顕著に強まる位相が見られ、四象限解析でのレイノルズ応力の Q2 イベントの低減と Q4 イベントの増加の原因と考えられる. 条件付き抽出された縦渦構造周りで、Q2 イベントが顕著に弱まる位相は、スパン方向制御速度が渦の回転方向と対向する位相と一致する. この時、縦渦構造周りの u'' の低速領域が弱まり、Q2 イベントが弱まると考えられる. 一方、抽出された縦渦構造周りで、Q4 イベントが顕著に強まる位相では、縦渦構造のスパン方向傾き角度も大きく、縦渦構造の生成維持に寄与する構造内部のエネルギー再分配の値も大きくなる. すなわち、これらの現象の間には力学的因果関係が存在すると考えられる.

以上、スパン方向壁振動制御下で、従来議論されて来たレイノルズ応力の低減を生み出す構造変化の詳細を、平行平板間乱流速度分布の過渡安定性解析、およびシミュレーションデータから条件付き抽出される縦渦構造の観察を通じて考察した. これらの結果は、一般に、壁乱流の自立維持機構を担うストリークの安定化、縦渦構造の発生の抑制が、顕著な摩擦抵抗低減を

可能とする有力な制御法と成り得ることを示唆している.

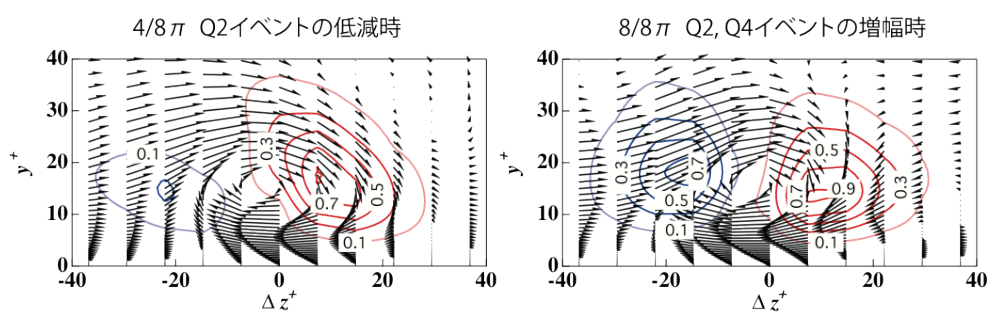


図 4 条件付き抽出した縦渦構造とその周りのレイノルズ応力 Q2 と Q4 イベントのコンター ($T^+ = 250$)