

Numerical Analysis of Drag Reduction  
in Channel Flow by Traveling Wave-Like  
Blowing and Suction

March 2012

Hiroya MAMORI

# 主 論 文 要 旨

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	守 裕 也
主 論 文 題 目 :				
Numerical Analysis of Drag Reduction in Channel Flow by Traveling Wave-Like Blowing and Suction (平行平板間流れにおける進行波状吹出し・吸込みによる抵抗低減の数値解析)				
(内容の要旨)				
<p>三次元的な渦運動により、壁面摩擦抵抗が層流に比べ著しく増加する乱流に対する制御は、科学および工学的な観点から重要な課題である。本論文では典型的な流れ場の一つである平行平板間乱流における壁面摩擦抵抗低減の制御効果の調査を行った。この流れ場での摩擦抵抗の乱流寄与分は、レイノルズせん断応力の重み付き積分で表されるため、壁面からの制御により壁面近傍のレイノルズせん断応力を低減できれば、摩擦抵抗低減が達成されることが知られている。この知見を踏まえ壁面進行波状吹出し・吸込み制御が提案された。この制御は、センサを用いずにフィードバック制御と同程度の摩擦抵抗低減を得ることができる。現実には吹出し・吸込みを進行波状に実現する制御デバイスは機構が複雑になるため難しいが、この低減メカニズムを応用した制御戦略による制御デバイス実現の可能性は高い。そこで本論文では、この進行波状吹出し・吸込み制御によるより詳細な摩擦抵抗低減メカニズムの解明と高レイノルズ数における制御効果の調査を目的とした数値解析を行った。</p> <p>まず、層流下の摩擦抵抗低減効果について、線形解析を用いた調査によって、その低減メカニズムを位相関係の観点から明らかにした。壁面近傍の領域では、流体の粘性と進行波状制御により主流方向速度攪乱と壁垂直方向攪乱の間で非直交性が生じることでレイノルズせん断応力が誘起され、結果的に摩擦抵抗の増減に寄与していることが分かった。また壁面進行波の位相速度、波長、動粘性係数により、制御が影響を及ぼす厚さはスケーリングされ、これは静止流体中の壁面振動問題であるストークス問題との相似性を持つことも明らかにした。</p> <p>次に、低いレイノルズ数の乱流における制御効果およびその摩擦抵抗低減メカニズムについて直接数値シミュレーションを用いて調査した。上流方向進行波で摩擦抵抗低減が得られ、一方、下流方向進行波では摩擦抵抗が増加した。摩擦抵抗の乱流寄与分の原因であるレイノルズせん断応力に対し三成分分解を施した結果、周期成分による摩擦抵抗への寄与は線形解析で得られたメカニズムを用いて説明できることが分かった。吹出し・吸込み制御との比較の為に、壁面垂直方向外力を用いた進行波による制御効果についても調査を行い、この制御では位相速度がゼロの場合に最大の摩擦抵抗低減が得られることが分かった。また、乱流エネルギー輸送を考察する際に必要な、レイノルズ応力輸送方程式についてのエネルギー保存型有限差分法と整合した離散化方法についても示した。</p> <p>最後に、より高いレイノルズ数の乱流下での制御効果を調査するために、コヒーレント構造モデルを適用したラージ・エディ・シミュレーションを実施した。このモデルにより得られた結果は、低レイノルズ数乱流では直接数値シミュレーションで得られた摩擦抵抗値や統計量と、制御流、非制御流ともに比較的良好に一致した。そして、進行波状吹出し・吸込みによる制御効果のレイノルズ数依存性は比較的弱いことが分かった。</p>				

## SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Science for open and environmental systems	Student Identification Number  80946749	SURNAME, First name  MAMORI, Hiroya
<p>Title</p> <p>Numerical Analysis of Drag Reduction in Channel Flow by Traveling Wave-Like Blowing and Suction</p>		
<p>Abstract</p> <p>Flow control to reduce skin-friction drag of wall-turbulence is worth studying not only from the scientific point of view, but also the industrial one. The objective of this thesis is to clarify the skin-friction drag reduction mechanism of a traveling wave-like blowing/suction control in a fully developed laminar and turbulent channel flows by means of numerical analysis. This control is very simple, while it induces a large amount of drag reduction without using any sensors.</p> <p>For the laminar flow, an employed linear analysis reveals that the skin-friction drag decreases and increases when the wave travels to upstream and downstream directions, respectively. A detailed phase analysis reveals the drag reduction mechanism. An analogy between the present control and Stokes' second problem is also found. The mechanism and analogy are confirmed for wider range of parameters.</p> <p>Direct numerical simulation is performed to investigate the effect of traveling wave in a low Reynolds number turbulent flow. When an upstream traveling wave decreases the skin-friction drag, a negative Reynolds shear stress appears in the region near the wall. The generation mechanism of this negative Reynolds shear stress is revealed by a three component decomposition and a phase analysis: the similar explanation to the laminar flow control applies also for the turbulent flow. The control effect is compared with an opposition control, a suboptimal control and a traveling wave-like wall-normal forcing. Additionally, a numerical scheme for computation of Reynolds stress budget which is consistent with a second order energy conservative finite difference method is also proposed.</p> <p>The control effect is also investigated in relatively high Reynolds number turbulent flows by means of large eddy simulation with the coherent structure model. The effectiveness of skin-drag reduction of the control is found to decrease as increasing the Reynolds number.</p>		