

**Direct Numerical Simulation of Friction Drag Reduction in
Spatially Developing Turbulent Boundary Layers**

March 2013

Yukinori Kametani

School of Science for Open and Environmental Systems

Graduate School of Science and Technology

Keio University

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	亀谷 幸憲
主 論 文 題 目： Direct Numerical Simulation of Friction Drag Reduction in Spatially Developing Turbulent Boundary Layers (空間発達乱流境界層における摩擦抵抗低減の直接数値シミュレーション)				
(内容の要旨) 環境負荷軽減が地球規模で議論される現代社会において、我々の生活と密接に関わる輸送機関のエネルギー消費の抑制は課題の一つとなっており、流体の粘性に起因する摩擦抵抗の低減に注目が集まっている。航空機や鉄道車輛の表面の流れは乱流条件下にあり、摩擦抵抗は層流に比べて著しく増加している。コンピュータが著しく発達した1980年代から、壁乱流の数値シミュレーションの研究が進められ、摩擦抵抗低減制御に関する数値シミュレーションが数多く行われて来た。しかし、乱流構造の制御に必要なデバイスのスケールやメンテナンスの困難さから実用化には至っていない。これまで、主に管内流や平行平板間流等の内部流で摩擦抵抗の低減制御手法が検証されてきた。しかし空間発達性を有し、航空機や鉄道車輛の周囲に生じる空間発達境界層における検証はまだ乏しいと言える。Fukagata et al. (2002) が摩擦抵抗を異なる力学的成分に分解する恒等式を導いたことにより、内部流では壁面付近のレイノルズ剪断応力の減少が摩擦抵抗低減につながる事が数学的に証明された。しかし、空間的な発達を伴う流れでは分解がより複雑になり、これまで検証されてきた摩擦抵抗低減制御の効果に関しては未知な部分が多い。 本論文では航空機や鉄道車輛の周囲壁面での摩擦抵抗低減を想定し、空間発達平板乱流境界層での摩擦抵抗低減に関する調査を行った。センサを必要としないプレデターミンド制御として、壁面からの一様吹出し／吸込みおよび一様加熱／冷却による摩擦抵抗低減制御効果を検証した。 はじめに、壁面からの一様吹出しおよび吸込みを用いた摩擦抵抗低減の直接数値シミュレーション(DNS)を行い、吹出しによる摩擦抵抗低減および吸込みによる摩擦抵抗増加のメカニズムを摩擦の成分分解を行うことで定量的に明らかにした。摩擦抵抗を減らす大きな要因となるのは壁面垂直方向の平均移流であり、非制御の空間発達境界層においても、摩擦を抑える働きをしている。壁面からの吹出しにより、その働きが強くなり、運動量投入によって壁面から離れた位置での乱れが強くなるものの、壁面近傍から渦を引き離すことで摩擦抵抗低減を達成していることが分かった。一方で、一様吸込みの場合では平均移流が摩擦増加に働くことがわかった。 一様吹出し制御にて摩擦抵抗低減の可能性が示されたが、現実に一様な吹出しを実現するのは非常に困難である。そこで次に、壁面の加熱及び冷却による浮力を利用した摩擦抵抗低減のDNSを行った。結果、冷却の場合には境界層内に安定成層が形成され、レイノルズ剪断応力が減少し、摩擦抵抗低減が達成された。反対に、加熱の場合には不安定成層が形成され、レイノルズ剪断応力が増加し、摩擦抵抗が増加することがわかった。 一様吹出しの場合では壁面からの流束、一様冷却の場合では壁面付近の乱れの抑制という異なるメカニズムで摩擦抵抗低減が達成された。従来の内部流の場合では、主に乱れを抑制し、レイノルズ剪断応力を減らすことで摩擦抵抗低減を狙うことが主流であった。しかし本研究の結果から、外部流での摩擦抵抗低減に対しては、平均移流の増加と壁面近傍の乱れの抑制の2つの可能性が示された。制御の利得および正味エネルギー削減率を考慮した制御効率について検討を行った結果、一様冷却の場合ではエネルギー削減は得られなかったが、一様吹出しの場合では、従来内部流で検証された制御(進行波状吹出し・吸込み)と比較して、利得、エネルギー削減率ともに高い効率が得られた。				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Science for Open and Environmental Systems	Student Identification Number 81046673	SURNAME, First name KAMETANI, Yukinori
Title Direct Numerical Simulation of Friction Drag Reduction in Spatially Developing Turbulent Boundary Layers		
Abstract For mitigating environmental burden, reduction of skin friction drag caused by viscosity generated on a surface of transports systems are one of hot issues. Skin friction drag on the surface of the transports such as aircrafts, trains, ships or cars are enhanced by the turbulent transition. Due to the development of the computers since 1980's, scientists have been eager to analyze the skin friction drag reduction in wall-bounded turbulent flows by using numerical simulations of fully developed internal flows such as channel flows or pipe flows. However, the analysis of the skin friction drag in external flows on transports is still under investigation. Fukagata et al. (2002) introduced the FIK identity that decomposes skin friction drag into different physical contributions. FIK identity shows the Reynolds shear stress near walls has the dominant contributions to the skin friction drag in wall-bounded flows. Skin friction drag reduction by reducing Reynolds shear stress in fully developed channel or pipe flows was confirmed by analysis with FIK identity. However, the physical contributions in controlled spatially developing turbulent boundary layers are still unknown. In this thesis, skin friction drag reduction in spatially developing turbulent boundary layer was investigated. The direct numerical simulation with a predetermined control: uniform blowing/suction and heating/cooling, was performed. The uniform blowing reduced skin friction drag, while uniform suction increased it. FIK identity showed that mean flux through the wall surface worked as a reduction factor on skin friction drag, i.e. eddies near the wall were blown away from the wall, while opposite trend appeared in case of uniform suction. On the other hand, uniform cooling achieved skin friction drag reduction by suppressing turbulence near the wall, i.e. the stable stratification was formed in the boundary layer, while heating had the opposite trend. The analysis by FIK identity indicates that there are two ways to reduce the skin friction drag in spatially developing turbulent boundary layer: blowing away the turbulence near the wall and suppressing the turbulence near the wall. The control efficiency, which is defined by powers to drive mainstream and control input, was discussed. It was found that net-energy saving was achieved by uniform blowing, while not achieved by cooling.		