

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	乱流境界層における壁面せん断応力直接測定とリブレットによる抵抗低減に関する実験的研究 (Experimental study on the direct measurement of wall shear stress and drag reduction over riblets in turbulent boundary layers)
氏 名 (Name)	野々宮 巧人

昨今, 世界中で環境問題対策としてCO₂排出量削減が求められており, 流体力学的なアプローチとしてリブレットによる壁面せん断応力低減が注目されている。また滑面乱流境界層においては壁面せん断応力と速度分布との間に壁法則の成立が知られており, 乱流境界層の理解や流れの予測, 制御, 抵抗法則の算出などに広く用いられている。壁面せん断応力は物理的に非常に小さい値になることが多く, 壁法則成立などを仮定する間接測定法を用いて計測されてきた。しかし, リブレット面上において壁法則の成立可否のコンセンサスは得られておらず, 間接測定法を用いることには疑問が残る。そのため, 壁面せん断応力を壁法則と関連付けず計測できるようになれば, リブレット面上の壁法則の成立の議論ができ, 速度分布から壁面せん断応力を推定できるようになり, シミュレーション技術の向上やメカニズムの更なる理解に繋がる。

本研究の目的は, 壁面せん断応力を流れ場の仮定なしに測定できる壁面せん断応力直接測定装置を開発し, その装置で計測した壁面せん断応力を用いて, 滑面乱流境界層を定義し, リブレット面の流れ場を適切な仮想原点を用いて評価することでリブレットの抵抗低減メカニズムについて, 壁法則と関連付けて解明することである。

第 1 章では従来の研究の概観を述べ, それらの課題について整理し, 本研究の目的について明確にした。

第 2 章ではリブレット面にも用いることができる壁面せん断応力直接測定装置を開発した。流れ場の相似性に依存せずにせん断応力を計測できる点で, 従来の手法に比べて大きな利点がある。その設計と機能についての知見を以下に述べる。

- (1) フォースセンサは弾性ヒンジ機構とて式拡大機構を採用したことにより, せん断応力による変位を $2.53 \mu\text{m/N}$ に抑えたため, ギャップ寸法 G を小さくすることができ, 減衰装置が不要となり, 不確かさの要因を低減することに成功した。
- (2) 測定面を正方形測定面としたことで, リブレットの効果を流れ方向に均一化して, 壁面せん断応力を計測することができる。
- (3) フォースセンサの材質にスーパーインバー材を用いることで, 従来のステンレス材に比べて温度変化の影響を 1/10 倍にした。これにより, 温度依存性の影響を排除し, 安定した計測性能を実現した。
- (4) ギャップ寸法が $G^+ < 6.3$, かつミスアライメント寸法が $h^+ = 0$ であれば, ギャップ寸法 G とミスアライメント寸法 h の影響を無視できることが確認された。一方, $h^+ > 0$ の場合, 壁面せん断応力計測値への影響は, $h^+ < 0$ に比べて約 3.7 倍大きいことが明らかとなった。
- (5) 本装置の相対標準不確かさは $u_R(F) = 0.65\%$ と見積もられた。

第 3 章では $1553 < Re_\theta < 6823$ における零圧力勾配下の滑面乱流境界層で壁面せん断応力を直接計測し, 平均速度分布や速度欠損則のパラメータについて調査を行い, 以下のような知見を得た。

- (1) 低レイノルズ数では, 慣性力に対する粘性力の支配が相対的に大きく, 外層にまで粘性応力の影響が及ぶことが確認された。これにより, 後流関数 $W(y/\delta)$ と対数法則部の接続が低下し, 粘性底層の厚みが増加している。これに伴い, 対数法則において Re_θ が小さくなると, カルマン定数 κ は増加し, 対数法則の切片 C_{log} も同様に増加する傾向にあった。
- (2) 対数法則及び速度欠損則の主要パラメータであるカルマン定数 κ , 対数法則の切片 C_{log} , 速度欠損則の切片 D_{defect} , および後流パラメータ Π は, 低レイノルズ数において粘性の影響を受けるが, これらのパラメータは相互に関連していることが確認された。

第 4 章では零圧力勾配下でのリブレットの効果を明らかにするため, 壁面せん断応力直接測定装置を用いて滑面とリブレット面上の壁面せん断応力を計測し, I 型熱線プローブ及び定温度型熱線流速計により速度分布と乱れ強さ分布を計測した。リブレット面上の仮想原点を定め, リブレットが壁法則に与える影響について調査した。その結果, 以下のような知見が得られた。

- (1) $9.8 < s^+ < 15.6$ の台形溝リブレットの零圧力勾配下における壁面せん断応力低減率は, $\Delta\tau_w = -4.4 \sim -7.2\%$ であった。
- (2) リブレット面上の流れを滑面と比較するため, 平均速度分布から速度分布の仮想原点 h_{pi} , 乱れ強さ分布から横流れの仮想原点 h_{pc} を設定した。また, 壁面せん断応力が一様に作用するとみなせる仮想壁面までの深さ h_{prw} を新たに定義した。この結果, h_{pi} と h_{prw} は一致した。一方で, 横流れの仮想原点 h_{pc} は h_{pi} より壁遠方にあった。仮想原点で滑面と比較することで, リブレットの抵抗低減により, 対数法則のカルマン定数 κ は変化せず, 切片 C_{log} が増加することが分かった。
- (3) 乱れ強さ分布を滑面の摩擦速度 $u_{\tau, smooth}$ で無次元化すると, リブレット面において乱れ強さが低下していることが確認できた。それぞれの摩擦速度 u_{τ} で無次元化した際の壁近傍の乱れ強さの最大値はほぼ等しくなり, 乱れ強さの最大値は局所壁面せん断応力で整理できる。

第 5 章では, 航空機機体表面の境界層の約 50% を占める逆圧力勾配下におけるリブレットの抵抗低減効果を検証するため, 壁面せん断応力を壁面せん断応力直接測定装置で計測し, I 型熱線プローブと定温度型熱線流速計を用いて速度分布及び乱れ強さ分布を調査した。その結果, 以下の知見が得られた。

- (1) 逆圧力勾配下における壁面せん断応力は圧力勾配の影響で低下することが確認された。そこで, 壁面せん断応力直接測定装置に静圧孔を設置し, 浮動片要素のリップ部の圧力分布を推定して補正することに成功した。
- (2) $9.5 < s^+ < 11.6$ の範囲での台形溝リブレットについて, $\beta \approx 0.4$ の逆圧力勾配と零圧力勾配条件で抵抗低減率はほぼ同じであることが確認された。
- (3) リブレットの抵抗低減により, 逆圧力勾配下においても対数法則のカルマン定数 κ は変化せず, 切片 C_{log} が増加することが分かった。また, 流れ方向の乱れ強さ分布では, 滑面及びリブレット面の摩擦速度を基準にすると, 乱れ強さの最大値はほぼ等しかったが, 乱れ強さのピーク位置はリブレット上でわずかに壁遠方に移動した。

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)

(about 800 words)

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目

(Dissertation Title)

Experimental study on the direct measurement of wall shear stress and drag reduction over riblets in turbulent boundary layers

(乱流境界層における壁面せん断応力直接測定とリブレットによる抵抗低減に関する実験的研究)

氏 名 (Name)

NONOMIYA Takuto

In recent years, the reduction of CO₂ emissions have been required in the world as a point of view of environmental problems. In turbulent boundary layers over smooth surfaces, the existence of the wall law between wall shear stress and velocity distribution is well known and is widely used to understand turbulent boundary layers, to predict and control flows, and to provide empirical resistance laws. Wall shear stresses, often physically very small, are often measured using indirect methods that assume the universality of the wall law. However, no consensus has been obtained on whether the wall law is valid or not on riblets surfaces, and the use of indirect measurement methods is still open question. Therefore, if wall shear stresses can be measured independent of the wall law, the argument for the universality of a wall law on the riblets surfaces will be possible and the wall shear stress can be determined from the measured velocity profiles, leading to improved simulation techniques and a further understanding of the drag reduction mechanism.

The aim of this study is to develop a direct measurement device for wall shear stress independent of flow field assumptions. Using this device, wall shear stress is measured, and by comparing smooth and riblet surfaces at an appropriate virtual origin, the drag reduction mechanisms of riblets are evaluated in relation to the wall law.

Chapter 1:

Previous studies are reviewed, the associated issues are summarized, and the objectives of this study are addressed clearly.

Chapter 2:

The direct wall shear stress measurement device has been developed, which can measure the wall shear stress on the riblets surface. The ability to measure shear stress being independent of the flow field offers significant advantages over conventional methods. The key features are as below:

1. The force sensor adopts an elastic hinge mechanism and a lever-type magnifying mechanism, limiting displacement due to shear stress to $2.53 \mu\text{m/N}$. This allowed for a smaller gap size G , eliminating the need for a damping device and successfully reducing sources of uncertainty.
2. By using a square measurement surface, the effect of riblets is uniform in the flow direction, enabling accurate measurement of wall shear stress.
3. A Super Invar force sensor minimizes measurement errors due to temperature changes, reducing them to 1/10 of conventional sensors.
4. the gap size $G^+ < 6.3$ and the misalignment $h^+ = 0$ nullified their influence. The influence of $h^+ > 0$ is 3.7 times greater than that of $h^+ < 0$.
5. This direct measurement device achieves a relative standard uncertainty of $u_R(F) = 0.65\%$.

Chapter 3:

The wall shear stress was directly measured over smooth surfaces in turbulent boundary layer under zero pressure gradients at $1553 < Re_\theta < 6823$. And then, parameters of mean velocity profiles and the velocity defect law were investigated. The key features are as below:

1. At low Reynolds numbers, viscous effects are not negligible for turbulent motion and momentum transport. These effects weaken the connection between the wake function $W(y/\delta)$ and the log-law, while thickening the viscous sublayer.
2. Key parameters such as the Kármán constant κ , the log-law additive constant C_{log} , the velocity defect law additive constant D_{defect} , and wake parameter Π are viscosity-dependent at low Reynolds numbers but remain interaction each other.

Chapter 4:

To clarify the effect of the riblets under zero pressure gradients, local wall shear stresses on smooth surfaces and riblets surfaces were measured directly. Mean velocity and turbulence intensity profiles were also measured using a single hot-wire probe and a constant-temperature anemometer.

1. Trapezoidal groove riblets ($8.7 < s^+ < 19.4$) reduce the local wall shear stress by 4.4%–7.2%.
2. The downward shift from the riblet top to the virtual origin of the wall shear stress h_{prw} matches the shift to the virtual origin of the longitudinal mean velocity h_{pt} for similarity argument. The estimated distance from riblet top to the virtual origin of cross flow h_{pc} is slightly further away from the wall than h_{pt} . By comparing the smooth and riblets surfaces at the appropriate virtual origin, it was found that the Kármán constant κ remains unchanged, while the additive constant C_{log} increases due to the reduction of the wall shear stress over the riblets surfaces.
3. The maximum value of the turbulence intensity nondimensionalized by the friction velocity of the smooth surface is certainly decreased over riblets, but the maximum value nondimensionalized by each friction velocity almost agrees over smooth and riblets surfaces.

Chapter 5:

To verify the effectiveness of the riblets in reducing drag under adverse pressure gradients, which account for approximately 50% of the boundary layer of the aircraft surface, local wall shear stresses were measured with the direct measuring device, while the mean velocity and turbulence intensity profiles were measured with a single hot-wire probe and a constant-temperature anemometer. The key features are as below:

1. Errors in wall shear stress measurements caused by pressure gradients are successfully eliminated by analyzing the pressure distribution on the lip of the floating element.
2. Under adverse pressure gradients of the order of $\beta \cong 0.4$, the wall shear stress reduction rate of the trapezoidal grooves riblets with dimensions $9.5 < s^+ < 11.6$ agrees with the reduction rate under zero pressure gradients.
3. The logarithmic mean velocity profile can be recognized over riblets and Kármán constant κ keeps almost the same value for smooth and riblets surface. However, the additive constant C_{log} is increased by the wall shear stress reduction over riblets. When normalized by friction velocity, streamwise turbulence intensity profiles show similar maximum values for both smooth and riblets surfaces, though the maximum position y^+ shifts slightly away from the wall for riblets.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	野々宮 巧人
審 査 委 員	主 査： 望月 信介
	副 査： 小河原 加久治
	副 査： 三上 真人
	副 査： 田之上 健一郎
	副 査： 蔣 飛
論 文 題 目	乱流境界層における壁面せん断応力直接測定とリブレットによる抵抗低減に関する実験的研究 Experimental study on the direct measurement of wall shear stress and drag reduction over riblets in turbulent boundary layers
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 本論文の目的は、壁面せん断応力を流れ場の仮定なしに測定できる壁面せん断応力直接測定装置を開発し、その装置を用いて計測した壁面せん断応力に基づいて滑面乱流境界層を精査し、航空機において重要視される逆圧力勾配下のリブレットによる摩擦抵抗低減率を定量的に明らかにすることである。開発する直接測定装置は圧力勾配の相似性への影響を無視するという仮定を必要としないものである。さらに、平均速度および乱れ強さ分布に関する実験データを取得し、リブレットによる摩擦抵抗低減メカニズムを明らかにする。研究成果は航空機においてリブレットによる摩擦抵抗低減技術構築とその改善に貢献し、炭酸ガス排出量削減を通じて環境悪化抑制に寄与するものである。 第 1 章では従来の研究の概観を述べ、それらの課題について整理し、本研究の目的を明確にした。第 2 章ではリブレット面にも適用でき、高精度の壁面せん断応力直接測定装置を開発した。相似性成立の前提条件を必要とせず壁面せん断応力を計測できるため、非滑面であるリブレットに応用できるという大きな利点を有する。その設計と機能について以下の知見が得られた。 (1) フォースセンサに弾性ヒンジ機構を採用し、変位を $2.53 \mu\text{m}/\text{N}$ に抑え、ギャップ寸法 G を微小とし、減衰機構を不要とすることで不確かさの要因の削減に成功した。 (2) 本装置の相対標準不確かさは 0.65% と見積もられ、摩擦抵抗低減率確認に十分である。 第 3 章では $1553 < R_\theta < 6823$ における零圧力勾配下の滑面乱流境界層で壁面せん断応力を直接計測し、平均速度分布や速度欠損則のパラメータについて調査を行い、以下の知見を得た。 (1) 低レイノルズ数では、後流関数 $W(y/\delta)$ と対数法則部の接続が低下し、粘性底層の厚みが増加している。これに伴い、R_θ の減少により対数法則のカルマン定数 κ は増加し、切片 C_{log} も同様に増加する傾向にあった。 (2) 対数法則及び速度欠損則の主要パラメータである対数法則のカルマン定数 κ と切片 C_{log}、速度	

欠損則の切片 D_{defect} , および後流パラメータ Π は, 低レイノルズ数の影響を受ける.

第 4 章では零圧力勾配下におけるリブレットの効果を明らかにするため, 壁面せん断応力直接測定装置を用いて滑面とリブレット面上の壁面せん断応力を計測し, 熱線流速計により速度分布と乱れ強さ分布を計測した. リブレット面上の仮想原点を定め, リブレットが壁法則に与える影響について調査した. その結果, 以下の知見が得られた.

- (1) $9.8 < s^+ < 15.6$ の台形溝リブレットの零圧力勾配下における壁面せん断応力低減率は, $\Delta\tau_w = -4.4 \sim -7.2\%$ であることを明らかにした.
- (2) 滑面と比較するため, 平均速度分布から速度分布の仮想原点 h_{pl} , 乱れ強さ分布から横流れの仮想原点 h_{pc} を設定した. また, 壁面せん断応力が一様に作用するとみなせる仮想壁面までの深さ $h_{p\tau_w}$ を新たに定義した. この結果, h_{pl} と $h_{p\tau_w}$ は一致した. 一方で, 横流れの仮想原点 h_{pc} は h_{pl} より壁遠方に位置する. 仮想原点に基づき議論することで, リブレット導入により対数法則のカルマン定数 κ は不変, 切片 C_{log} は増加することが明らかとなった.

第 5 章では, 実用化において重要な条件となる逆圧力勾配下におけるリブレットの抵抗低減効果を検証し, 以下の知見を得た.

- (1) 壁面せん断応力直接測定装置に静圧孔を設置し, 浮動片要素のリップ部の圧力分布を推定して計測における圧力勾配による誤差要因の削除に成功した.
- (2) $9.5 < s^+ < 11.6$ の範囲での台形溝リブレットについて, $\beta \cong 0.4$ の逆圧力勾配と零圧力勾配条件で抵抗低減率はほぼ同じであることが確認された.
- (3) リブレットの抵抗低減により, 逆圧力勾配下においても対数法則のカルマン定数 κ は変化せず, 切片 C_{log} が増加することが明らかとなった.

本論文により, 逆圧力勾配下におけるリブレットを用いた抵抗低減がゼロ圧力勾配とほぼ一致することが定量的に明らかとなり, 航空機への適用における見通しが得られた. 平均速度分布における仮想原点の定義に基づく低減メカニズムの議論により, 壁面乱流における摩擦抵抗発生機構が明らかとなり, 新型リブレット開発に対する重要な知見が得られた.

本審査会においては, 壁面せん断応力の低減が平均速度勾配により説明に対して乱流運動による影響の可能性, 実験条件に設定した逆圧力勾配の大きさの正当性などが質問された. また, 壁面摩擦抵抗係数を予測する抵抗法則のバラツキの意味と表示方法に対する改善案, 本研究の今後の展望などの質問がなされた. いずれの質問に対しても, 適切な回答がなされた.

以上より本研究は独創性, 信頼性, 有効性, 実用性ともに優れ, 博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した.

論文内容及び審査会, 公聴会での質問に対する応答などから, 最終試験は合格とした.

なお, 主要な関連論文の発表状況は以下の通りである (関連論文 計 2 編, 参考論文 計 1 編)

(a) 査読のある雑誌等

- 1) Nonomiya, T., Mochizuki, S. and Sasamori, M., Development of a direct measurement device for the local wall shear stress in boundary layer flows, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.19, No.3, DOI:10.1299/jfst.2024jfst0027, 2024 年 4 月
- 2) 野々宮巧人, 笹森萌奈美, 望月信介, 乱流境界層中のリブレット上における仮想原点の決定に基づく壁法則の検討, 日本機械学会論文集, DOI: 10.1299/transjsme.24-00142, 2024 年 11 月