

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Development of Wall Shear Stress Measurement Technique with a Thin Plate Submerged in the Sublayer (サブレイヤー内に置かれた薄いプレートによる壁面せん断応力の計測手法の開発)
氏 名	華 丹
<p>A local wall shear stress measurement technique involving a sublayer plate was proposed in order to determine the local wall shear stress using an easily fabricated device, and experiments were conducted in order to investigate the accuracy and angular resolution in a canonical wall turbulent flow, namely, a fully developed two-dimensional turbulent channel flow.</p> <p>The calibration curve generated by the two dimensionless parameters is independent of the specifications of the sublayer plate and is not affected by the finite length of the plate, the streamwise length, or the spanwise width. The sensitivity of the sublayer plate is as high as that of the sublayer fence. If the plate is enveloped by the linear sublayer, the sublayer plate can produce a pressure difference sufficient for accurate measurement of the local wall shear stress. The angular resolution of the sublayer plate is represented in the same manner as that of the sublayer fence. It is expected that the sublayer plate can be used to detect the direction of the wall shear stress. Based on the comparison of plates of various sizes, the plate width should be greater than respectively 50 times the thickness of the sublayer plate. Note that, unlike the sublayer fence, the sublayer plate is easily fabricated. A unique calibration curve must be obtained in a canonical flow field for each individual sublayer fence. In contrast, sublayer plates can be used for wall shear stress measurement using a universal calibration curve, as with the Preston tube method.</p> <p>The calibration curve generated by the two dimensionless parameters depends weakly on the specifications of the circular plate in the linear sublayer. The sensitivity of the circular plate is reduced slightly in comparison with the rectangular plate. If a circular sublayer plate of sufficiently large diameter is submerged in the linear sublayer, the sensitivity remains approximately the same as that for a rectangular sublayer plate. A cubic semi-empirical function fits the experimental data extremely well for a wide range of wall shear stress angles of <math>\alpha = 0</math> to <math>90^\circ</math>. A circular sublayer plate with eight pressure taps was designed and tested in order to detect the wall shear stress vector in a situation in which the flow direction is initially unknown. The ratio of the pressure differences at two taps neighboring the tap with the maximum stagnation pressure provides higher angular resolution in comparison with the surface block gage and can detect the wall shear stress vector over <math>360^\circ</math>. The circular sublayer plate with 8 pressure taps can measure wall shear stress vector in complicate wall turbulence subjected to pressure gradient or cross stream current such as flow on the aircraft wings.</p>	



# 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

## (博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 736 号	氏名	華 丹
最終試験担当者		主 査 望 月 信 介 審 査 委 員 朝 位 孝 二 審 査 委 員 小 河 原 加 久 治 審 査 委 員 佐 伯 隆 審 査 委 員 三 上 真 人 審 査 委 員 鈴 木 博 貴	
<b>【論文題目】</b> Development of Wall Shear Stress Measurement Technique with a Thin Plate Submerged in the Sublayer (サブレイヤー内に置かれた薄いプレートによる壁面せん断応力の計測手法の開発)			
<b>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</b> 航空機などの流体中を移動する物体表面に生じる摩擦抵抗は、流体抵抗の源となり、さらにその働きにより生成される速度せん断層が逆圧力勾配によるはく離を導く。摩擦抵抗の正確な定量的評価はその生成原因を明らかにし、抵抗低減などの制御に関する重要な知見を与える。 一方、壁面に沿った流れにおいては、壁法則の成立が確認され、乱流のモデリングには不可欠な要素の一つとなっている。この壁法則の様々な条件下への拡張は、より複雑で実用的な流れ場の解明と制御に寄与することが期待され、多くの実験的試みがなされている。例えば翼面上の流れ場において、圧力勾配と三次元流れの壁法則への影響は極めて重要視されている。実験的解明の試みにおいて、結論を左右する最も重要な計測量は壁面せん断応力である。従来、プレストン管やクラウザーチャートといった簡便な手法が用いられているが、これらは壁法則の成立を前提としたものであり、研究成果の妥当性を決定づけることはできない。これに対して、壁法則には独立となる直接測定やサブレイヤーフェンスといった手法が提案され、試行されている。しかしながら、直接測定は構造的理由により圧力勾配下における使用には大きな制限が加わり、サブレイヤーフェンスは製作上の特性により普遍的な校正曲線を得ることが不可能という重大な問題がある。したがって、壁法則の成立に独立で普遍的な校正曲線に基づく高精度でかつ簡便な壁面せん断応力測定技術が望まれている。 この状況に対して、本研究はサブレイヤープレートと呼ばれる手法を提案し、その有用性を実験的に検証した。サブレイヤープレートは金属製の薄板でできており、これを壁面に設けた静圧孔に対して適切な位置に配置したものである。プレート上流側と下流側には流れの衝突とはく離により圧力差が発生し、それをマンメータなどで読み取るものである。プレートはレーザー加工機により切断され、先端の加工精度は極めて高く、均質な形状と寸法を維持することが容易である。プレートの上流側と下流側とに生じる圧力差は壁法則に基づき壁面のせん断応力に結びつけることが可能である。また、板の厚さを粘性底層以内とすることで乱流構造の影響を受けにくく、境界層、管内流、チャネル流といった流れ場の特性が作用せず、校正曲線は普遍となることが期待できる。 発達した二次元チャネル流を用いてサブレイヤープレートの校正曲線の取得とその拡張性を検証した。用いた二次元チャネル乱流は速度分布が標準的対数法則に従うこと、乱れ強さ分布が従来の壁法則に従う結果に良好に一致することより、検証実験に相応しい流れ場であった。十分に発達したチャネル乱流が得られる位置にサブレイヤープレートを設置し、検証した。			



3種類の異なる厚さのサブレイヤープレートを用いて較正曲線を求め、プレート厚さが粘性底層以内にある場合には較正曲線が厚さに独立になることが示された。また、同様にして実施された円管乱流における実験において較正曲線を求め、チャンネル流のものと一致することが確認された。プレート厚さが粘性底層内にある場合、チャンネル流や管内流という流れ場が異なる場合に同一の普遍的な較正曲線が得られることを確認した。プレートの寸法については、流れ方向に板厚の10倍程度、スパン方向幅は流れ方向寸法の50倍程度必要であることを示した。圧力差のせん断応力に対する比である計測感度はサブレイヤーフェンスと同程度の高さを持つことを明らかにした。

せん断応力の方向に対してサブレイヤーフェンスと同様の分解能があることが証明された。これに対して、せん断応力の方向と大きさの両方を検出するための形状と構造が検討された。サブレイヤーフェンスと矩形形状のサブレイヤープレートの角度特性は0度近傍の分解能が極めて低いという問題がある。そこで、円形のサブレイヤープレートに45度毎に静圧孔を設け、それらの相対関係を用いて角度分解能を向上させる試みがなされた。その際に、円形プレートが直線の先端を持つプレートに比べて感度の低下が懸念され、実験的に検証された。円形の寸法が小さい場合、円形のプレートの上流と下流との圧力差は矩形のプレートに比べて若干低下した。円形プレートの直径が十分に大きい場合、その感度低下を許容範囲内に抑制できることを示した。45度毎に設けた圧力孔において計測された圧力の差と比率を定義し、その定義量が角度変化に対して極めて高い分解能を持つことを実証した。

本研究で提案したサブレイヤープレートはサブレイヤーフェンスと同程度の高い精度で壁面せん断応力の計測を実現できることを示した。また、フェンスには不可能な円形形状のプレートを用い壁面せん断応力の方向検出に関する高い分解能を実現できる。サブレイヤープレートは加工が容易で、同一寸法で同一形状のものの製作が可能である。このことはプレストン管と同様に使用者が同一のセンサを使用できること、標準的な流れ場で設定された較正曲線が普遍的に採用できることを意味している。

本審査においては、比較しうる他手法の詳細とそれらに対する優位性、必要とされる寸法などの仕様とそのメカニズムに基づく説明、設定された条件以外で使用した場合への対応などが質問された。

公聴会においては、流れ場の基本的特性に関する確認、センサの時間分解能、関連する最新の研究状況、将来の応用などが質問された。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

(a) 査読のある雑誌等

(1) 著者氏名 : Dan Hua, Hiroki Suzuki, Shinsuke Mochizuki

論文題目 : Local wall shear stress measurements with a thin plate submerged in the sublayer in wall turbulent flows

学術雑誌名 : Experiments in Fluids (Springer nature)

巻、号、頁 : Vol.58, No.124, DOI 10.1007/s00348-017-2406-y

発行年月 : 平成29年8月発行

(b) 査読のある国際会議の会議録等

(1) 著者氏名 : Dan Hua, Hiroki Suzuki, Shinsuke Mochizuki

論文題目 : Local Wall Shear Stress Measurement with a Rectangular Plate Submerged in the Sublayer

学術雑誌名 : Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Eng. Conf., October 27-30, 2017. (Okinawa, Japan)

巻、号、頁 : TFEC9, Paper No.1021

発行年月 : 平成29年10月発行