

## 壁面せん断応力測定装置の試作と検討\*

森 谷 優\*\*

谷 口 清 一\*\*

坂 本 弘 志\*\*

(昭和52年4月14日受理)

### A Discussion on the Wall Shear Stress Measuring Instrument of Our Own Making

by Masaru MORIYA, Seiichi TANIGUCHI  
and Hiroshi SAKAMOTO

A floating-element skin friction meter was made by ourselves to measure the shear stress acting on the wall of a wind tunnel. The instrument consists of a small element, three leaf springs, a balance ring, three adjustment screws and a detecting probe. A piece of the small element cut off from the wall is carefully hung on the balance ring by leaf spring at the same level as the wall surface. The piece moves freely streamwise due to a frictional force of fluid and thus the shear stress is directly measured with a displacement gauge as an electrode gap of the probe. This instrument is set in the turbulent boundary layer within the wind tunnel to check its performance.

The results are compared with the values obtained by Preston tube and Clauser chart in a two dimensional turbulent boundary layer.

#### 1. 緒 論

物体表面に作用する摩擦力を正しく評価することは、流体工学において極めて重要な問題である。したがって、これまで数多くの理論および実験的研究が報告されている。壁面摩擦力は物体に作用する圧力と比較して非常に小さく、厳密な測定は非常に困難であるため種々の測定方法によって得られる結果は大きな相違を示している。物体表面に沿う流れが層流および乱流の場合にはその表面に作用する摩擦力をほぼ正しく評価できるようになってきた。しかし、物体表面における、例えば吹き出しおよび吸込みを伴う流れ、はく離を伴う流れ、再付着を伴う流れなどにおいては、その流れの構造が極めて複雑であるため理論的に摩擦力を求めることは困難であり、現在のところ実験的手法に依存せざるを得ない。先に述べたように壁面

\* 日本機械学会北海道支部第19回講演会('76-9-29, 札幌)で発表

\*\* 北見工業大学機械工学科

せん断応力の測定方法は種々あるが、本研究は測定する流れの場をより実際の状態に保持しかつ壁面摩擦力を直接測定する一方法について実験的研究を行なったものである。

まず、本実験で試作した壁面せん断応力測定装置の概略とその測定方法について述べ、さらに本測定装置を乱流境界層が存在する平面壁に設置し、本装置を用いることによって得られる壁面せん断応力と Preston tube, Clauser chart および Ludwig-Tillman<sup>1)</sup>の式によって算定される結果と比較し本装置の性能の検討を行なったものである。

## 2. 壁面せん断応力測定装置

### 3-1 測定装置の概略

本研究で行なった壁面せん断応力測定装置は物体表面の一部を切り取り、その面（以下、エレメントとよぶ）に働く摩擦力を直接測定するものである。その装置の詳細図を図1に示す。図に示すようにエレメントの直径は20 mmφであり、かつエレメントは全周にわたり0.035 mmの隙間をもって設定できるようになっている。この小さな間隔にエレメントを据え付けるための微調整用ビスが設けられている。また、エレメントの先端（円周部）を鋭く削り取り、先端の厚さは0.09 mmとしてある。エレメントはエレメント吊り下げ用円環から3本の板バネ（燐青銅板、厚さ0.1 mm）で吊ってある。3本の板バネで吊る場合エレメントの表面がまわりの壁面と一致するように、十分な注意を払って設定した。エレメント周辺の壁面には8個の

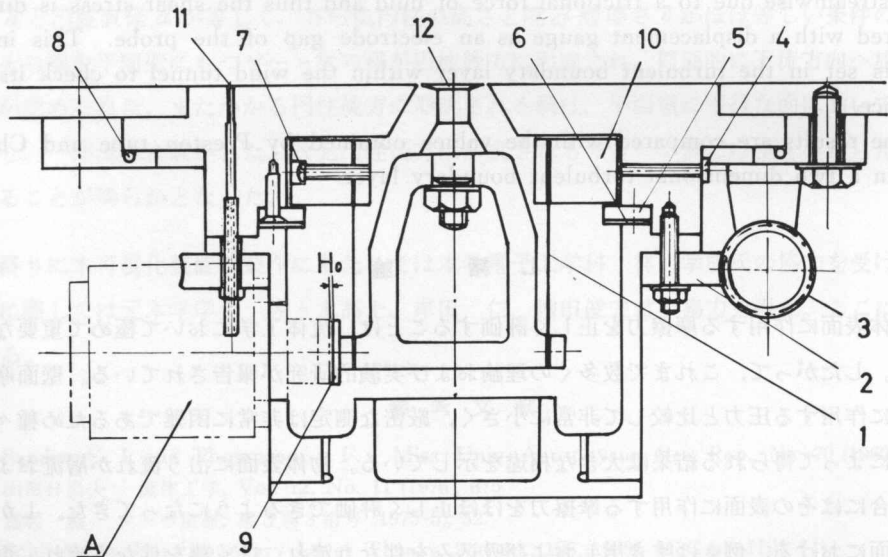


図1 せん断力測定装置の詳細図 1. エレメントつり下げ用板バネ; 2. 回転用ウォームホイール PCD 159; 3. 回転用ウォーム PCD 30; 4. エレメント位置調整用ネジ; 5. エレメント落下防止用座金; 6. 圧力漏れ防止用パッキン; 7. 板バネ支持用ネジ; 8. 回転用スラストベアリング; 9. プローブ（静電容量測定）; 10. エレメントつり下げ用円環; 11. 静圧孔（8個）; 12. エレメント（直径20 mmφ）

Fig. 1. Details of the floating-element skin friction meter.

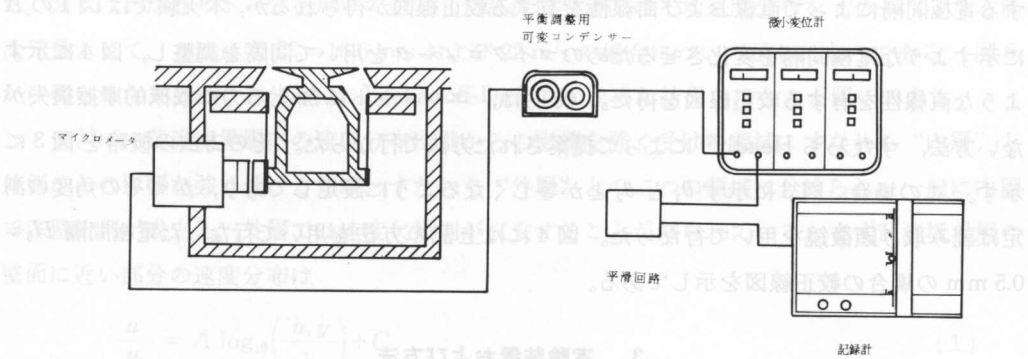


図2 測定概要

Fig. 2. Schematic diagram of the measurement.

静圧孔 (直径, 0.6 mm) を設け, エレメントが流れの方向と同一方向に作用するように装置全体を回転させることができる構造となっている。またエレメントの表面は, 粗さ要素の影響をなくするためまわりの壁面と同じく研削仕上げしてある。なお, 本装置は内部の圧力が風洞測定部内と等しくなるように密封されている。測定は図2に示すように, 平面壁上に設置したエレメントに働く摩擦力をバネを介して変位に変え, 微小変位計で変位量を測定し, 記録するものである。微小な変位を測定する計器には種々あるが, 本実験では非接触型静電容量変換方式の微小変位計 (岩崎通信機製, MD-31 型) を用いた。微小変位計からの出力は電気的平滑回路をへて記録計から読み取る。平滑回路は, チョークコイル (TPW-958 型) とコンデンサー (2 個, 470  $\mu$ F) との二つから構成されている。

2-2 較正線図

壁面せん断力測定装置によって摩擦力を測定する場合, あらかじめエレメントに加わる既知力と変位との較正線図を作成しなければならない。本装置に用いた微小変位計は最初に設定

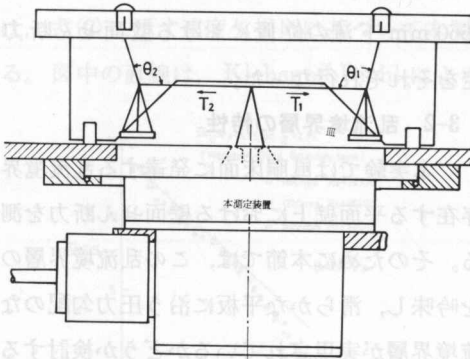


図3 本装置の較正方法

Fig. 3. Calibration method of the floating-element.

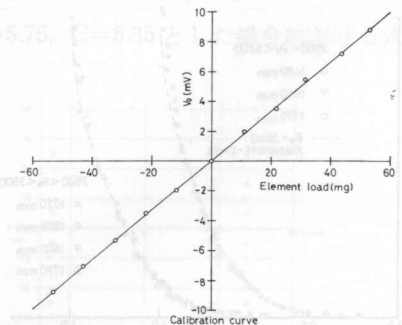


図4 較正線図

Fig. 4. curve of the floating-element Calibration.

する電極間隔によって直線および曲線性を有する校正線図が得られるが、本実験では図1のAに示すような電極間隔を変化させるためのマイクロメータを用いて間隔を調整し、図4に示すような直線性を有する校正線図を得た。校正は、エレメントに加える力に機械的摩擦損失がない方法、すなわち Headly<sup>2)</sup>によって提案された方法で行なった。その方法の概略を図3に示す。この場合、図3に示す  $\theta_1$  と  $\theta_2$  とが等しくなるように設定してあり、かつその角度の測定は読み取り顕微鏡を用いて行なった。図4には上記の方法を用いて行なった電極間隔  $H_0 = 0.5 \text{ mm}$  の場合の校正線図を示してある。

### 3. 実験装置および方法

#### 3-1 供試風洞

本実験で使用した風洞は、2.2 kW の遠心送風機をもつ、縮り比 25:1 なる吸込み型風洞であって、断面 200 mm × 200 mm、長さ 2000 mm の測定部を有する。測定部の天井壁は上下の移動が可能であり、天井壁を操作することにより、流れ方向に対して任意の圧力勾配を設定できるようにになっている。本実験では、壁面せん断力を圧力勾配のない乱流境界層の存在する平面壁上で測定することを目的として、厚さ 10 mm の滑らかなアクリル板で構成されている測定部床面に乱流境界層を生成させた。乱流境界層の生成に当っては測定部の長さを考慮して繁富<sup>3)</sup>らの報告に基づいて測定部入口の床面に直径 1.0 mm なるステンレス管を設置した。また壁面せん断力測定装置は測定部入口から 1660 mm 下流の位置に設定した。この測定部の概略は図5に示してある。なお実験は主流速度  $U_0$  を 16.6 m/s, 22 m/s および 25 m/s の三通り変化させ、測定部床面に発達する乱流境界層および測定部入口より

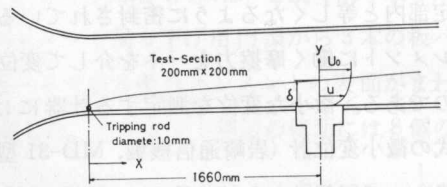


図5 測定部概略

Fig. 5. Sketch of the test section.

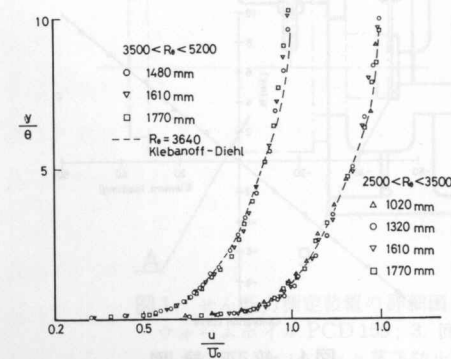


図6 無次元平均速度分布

Fig. 6. Nondimensional mean velocity distributions.

1660 mm 下流の位置における壁面せん断力の測定をそれぞれ行なった。

#### 3-2 乱流境界層の特性

本実験では風洞床面に発達する乱流境界層の存在する平面壁上における壁面せん断力を測定する。そのために本節では、この乱流境界層の特性を吟味し、滑らかな平板に沿う圧力勾配のない乱流境界層が実現されているかどうか検討する。

乱流境界層内の平均速度の測定には、1.3 mmφの注射針を扁平にした外径断面 0.32 mm × 1.8 mm の形状を有する境界層型ピトー管を用い

た。図6はかかるピトー管を用いて測定した乱流境界層内の平均速度分布を  $y/\theta \sim u/U_0$  なる無次元量として、主流速度  $U_0=16.6$  m/s および  $22$  m/s の場合について示したものである。図6から明らかのようにこの分布は、Klebanoff-Diehl<sup>4)</sup> の求めた結果とほとんど同一である。

つぎに、乱流境界層内の速度分布は壁からの影響を強く受ける領域、すなわち“内層”と外側からの影響を強く受ける領域、すなわち“外層”との二つの領域に分けられ、一般に内層では壁法則が成立し、外層では速度欠損則が成立することが知られている。まず乱流境界層の壁面に近い部分の速度分布は

$$\frac{u}{u_\tau} = A \log_{10} \left( \frac{u_\tau y}{\nu} \right) + C \tag{1}$$

の壁法則にしたがう。定数  $A, C$  についてはこれまで多くの数値が提案されているが、Clauser による  $A=5.62, C=4.9$  あるいは、Coles<sup>5)</sup> による  $A=5.75, C=5.1$  の値が広く採用されているようである。図7は、Coles による対数速度分布式と本測定値を比較して示したものである。両者はよい一致を示している。なお、式(1)に含まれるせん断速度  $u_\tau$  は、式(1)に示す Coles の対数速度分布式が

成立するものとして、実測した速度をプロットすることによって算定したものである。また、乱流境界層の外層では、一般につぎに示す速度欠損則が成立することが Kármán によって提案されている。

$$\frac{U_0 - u}{u_\tau} = -A \log_{10} \frac{y}{\delta} + C \tag{2}$$

図8は、式(2)に示す速度欠損則に基づいて本測定値の一例 ( $U_0=22$  m/s) をプロットしたものである。図中の直線は、Klebanoff-Diehl による  $A=5.75, C=5.35$  とした場合における式(2)

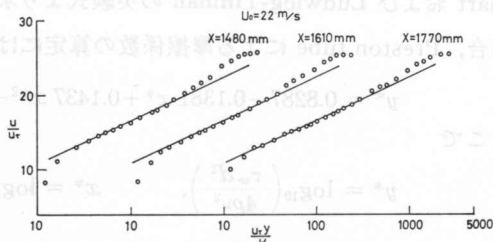


図7 対数速度分布と本測定値との比較

Fig. 7. Comparison of experimental results with the logarithmic law.

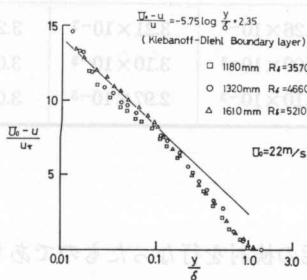


図8 速度欠損則と本測定値との比較

Fig. 8. Comparison of experimental results with the velocity-defect law.

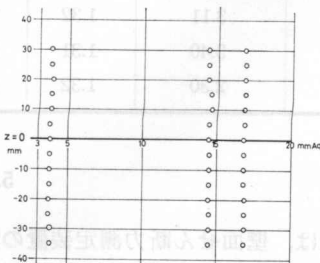


図9 流れの二次元性

Fig. 9. Two-dimensionality of flow.

を示すものである。壁面せん断力測定装置の設定した付近の速度分布は、Klebanoff-Diehlの求めたものとほぼ一致している。なお、図9には壁面せん断力測定装置の設置した位置における流れの二次元性を示したものであるが、中央断面を含む70 mmの範囲において良好な二次元性が存在する。以上の結果により、本風洞の測定部床面に存在する乱流境界層は、滑らかな平板に沿って発達する圧力勾配のない乱流境界層と同一の特性をもつものと判定される。

#### 4. 実験結果とその考察

表1には、風洞測定部入口より1660 mm下流の位置に設置した本測定装置を用いることによって得られた壁面摩擦係数 $C_f$ を示してある。また、表1にはPreston tube, Clauser chart および Ludwig-Tillmanの実験式より求めた摩擦係数 $C_f$ をそれぞれ示してある。この場合、Preston tubeによる摩擦係数の算定にはPatel<sup>6)</sup>による次式を用いた。

$$y^* = 0.8287 - 0.1381 x^* + 0.1437 x^{*2} - 0.006 x^{*3} \quad (3)$$

ここで

$$y^* = \log_{10} \left( \frac{\tau_w d^2}{4\rho\nu^2} \right), \quad x^* = \log_{10} \left( \frac{A_p d^2}{4\rho\nu^2} \right)$$

であり $d$ はPreston tubeの外径(0.8 mm $\phi$ )、 $A_p$ はPreston tubeによって得られる圧力である。 $\tau_w$ は壁面せん断応力である。また、Ludwig-Tillmanの実験式は

$$C_f = 0.246 \left( \frac{U_0 \theta}{\nu} \right)^{-0.269} \times 10^{-0.678H} \quad (4)$$

によって与えられるものである。ここで $\theta$ ,  $H$ はそれぞれ運動量厚さ、形状係数である。表1から明らかなように本装置による測定結果とPreston tubeによる測定値とは良好な一致を示しており、さらにClauser chartによる結果とは最大3%程度の誤差でよい一致を示している。

表1 本測定値と他の測定値の比較

Table 1. Comparison of the present results with the other measured values

主流速度 $U_0$ [m/s]	運動量厚さ $\theta$ [mm]	形状係数 ( $H$ )	壁面摩擦係数 ( $C_f$ )			本測定値
			Ludwig-Tillman	Clauser chart	Preston tube	
16.6	3.11	1.32	$3.55 \times 10^{-3}$	$3.26 \times 10^{-3}$	$3.21 \times 10^{-3}$	$3.22 \times 10^{-3}$
22.0	3.40	1.31	$3.20 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$	$3.10 \times 10^{-3}$	$3.07 \times 10^{-3}$
25.0	2.30	1.32	$3.41 \times 10^{-3}$	$3.10 \times 10^{-3}$	$2.97 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$

#### 5. 結 論

本研究は、壁面せん断力測定装置の試作とその性能の検討を行なったものであり、本測定装置を乱流境界層の存在する平面壁上に設置して、壁面せん断力を測定した結果、壁面せん断力測定装置として十分に有用であることが判明した。

## 直接噴射ディーゼルエンジンにおける

- 1) Ludwig, H. and Tillmann, W.: NACA TM, 1285 (1949).
- 2) Headly, J. W.: AIAA., 4 (1960), 1862.
- 3) 繁富, ほか2名: 機論, 42巻, 362号 (昭和51-10), 3213.
- 4) Klebanoff, P. S. and Diehl, Z. W.: NACA TN 2475.
- 5) Coles, D.: J. Fluid Mech., 1, 191 (1956).
- 6) Patel, V. C.: J. Fluid Mech., 23, 1 (1965).

石谷博美  
(昭和52年4月25日受理)

### A Study of the Cold Smoke on a Direct Injection Diesel Engine

—The Relation between Combustion in the Cylinder and Cold Smoke—

by Hideyuki TSUNEMOTO and Hiromi ISHITANI

In the cold smoke was usually detected by visual sensitivity of man, in this study it was measured by a light transmission type smoke meter and evaluated numerically.

Using this smoke meter, the relation between combustion in the cylinder and cold smoke was clarified.

#### 1. ま え が き

ディーゼルエンジンを架橋として自動車用エンジンをガソリンからディーゼルエンジンに変換しようとする動きがある。このディーゼルエンジンのうち特に直接噴射式ディーゼルエンジンは燃費が低く、目的にかなっているが、騒音とか冷間時に問題があり予燃焼室式ディーゼルエンジンより劣悪となっている。

この直接噴射式ディーゼルエンジン冷間時の問題は、白煙、青煙と言われる炭煙、ディーゼル臭、のどを刺激する有害ガス<sup>1)</sup>であり、トンネル内とか寒冷地で特に問題となる。冷間時の燃焼時の不完全燃焼による燃料の微粒子または燃焼中間生成物の排気によるものと言われている<sup>2)</sup>。一般的に圧縮比を高める事や、噴射系の改造、暖気ヒーター等によって発生時間を短縮させている。ここで、低煙スモーク発生時のシリンダー内燃焼を解析する事により、燃焼の解析方法を目的として研究を始めているが、今回は黒煙測定器に使われている光透過式スモークメーターを利用し、従来人間の視感度にかまっていた炭煙スモークを数値化する事と

\* 日本機械学会第24回学術発表会で発表 (52年4月於東京)

†† 北見工業大学機械工学科