

流体摩擦計測用熱線プローブの特性

石田正弘*・琴浦和樹**

Characteristics of Hot Wire Probe
for Wall Skin Friction Measurement

by

Masahiro ISHIDA

(Mechanical Engineering 2.)

Kazuki KOTOURA

(Mechanical Engineering)

For the purpose of measuring the instantaneous wall skin friction in the fluctuating internal flow, a new type hot wire probe is manufactured and its characteristics are examined experimentally using a special calibration apparatus. And it is compared with the hot film probe. The manufactured probe is consisted of 5μ dia. tungsten wire and its traversing gear, and the wire is located at 0.03 mm high from the wall for measuring wall friction. This probe has an almost same sensitivity as the flush mounting hot film probe, and there is little effect of the probe surrounding material on the sensitivity because of a little heat loss to the surroundings. If a hot wire is in contact with the wall, the probe sensitivity decreases and the heat loss increases in comparison with a detached hot wire.

1. 緒言

管内あるいはターボ機械内部の流れは、壁面に働く流体摩擦の影響を大きく受けており、この壁面摩擦が圧力損失の主たる原因になることが多い。したがって壁面摩擦を計測することは、ターボ機械における損失や流れの機構を知る上で重要である。

従来、定常な流れの壁面摩擦を計測する方法として、壁面に働く接線力を直接測定する直接法⁽¹⁾、壁面近くの流れ分布の相似則を基にしたスタントン管法⁽²⁾やプレストン管法⁽³⁾、および壁面摩擦と熱伝達の関係

を利用した熱フィルム法⁽⁴⁾などが用いられているが、ターボ機械内部流れのように圧力勾配が存在し、三次元的でしかも流れの方向および大きさが変動する流れの場の壁面摩擦を計測することはかなりの困難さを伴う。変動する流れの場の瞬時的な壁面摩擦を計測するためには先ず計測プローブの応答性が問題となるが、既に著者らは^(5,6)上記の方法の中から熱フィルム法を選びその応答性を理論的に調べ、壁面摩擦と熱伝達の位相遅れおよび変動振幅が両者が異なりかつ変動周波数とともに変化すること、また熱フィルムの伝熱面長

昭和54年4月26日受理

* 機械工学第2学科

** 機械工学科

さが短い程応答性が良くなることなどを示した。

本報告では上記の示唆に基づき、伝熱面長さが極めて短い直径 5μ のタングステン線を用いた壁面摩擦計測用熱線プローブを試作すると共にその特性を調べ、従来の熱フィルムプローブと特性の比較を行う。

2. 壁面摩擦計測用試作熱線プローブ

図1は試作した壁面摩擦計測用熱線プローブの形状を示す。図において①は直径0.5mmのピアノ線を2本用いた熱線サポートで、サポートの先端には直径 5μ 、有効長さ1mmのタングステン線②が張ってある。このサポートは直径5mmの絶縁材でできたサポートガイド③内をスライドできる。④は熱線トラバース装置の外筒で、⑤はスプリング、⑥はリード線端子、⑦はサポート支持部および⑧はトラバース用ネジである。

このプローブを用いれば壁面付近の流速測定もできるが、壁面摩擦を計測するためにはトラバース装置で熱線を壁面から約0.03mmの位置まで接近させ固定す

る。本研究に用いた熱線用素線の形状から、熱線の壁面からの最小高さは0.03mmに制限されている。熱線の設定高さおよび壁面に対する平行度は万能投影器を用いて $\pm 0.003\text{mm}$ の精度で確認している。

図2は比較のために用いたディサ社製フラッシュマウンティング熱フィルムプローブ55A90型の形状を示す。この熱フィルムプローブの伝熱面は長さ0.2mm、幅約1mmの白金膜で石英ガラスの基材に密着している。これらの計測プローブはいずれも定温度型熱線流速計で作動され、後述の検定装置を用いて壁面摩擦と発生ジュール熱の関係が求められる。

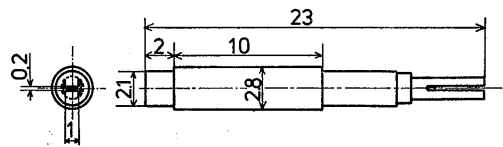


Fig. 2 Hot film probe for skin friction measurement

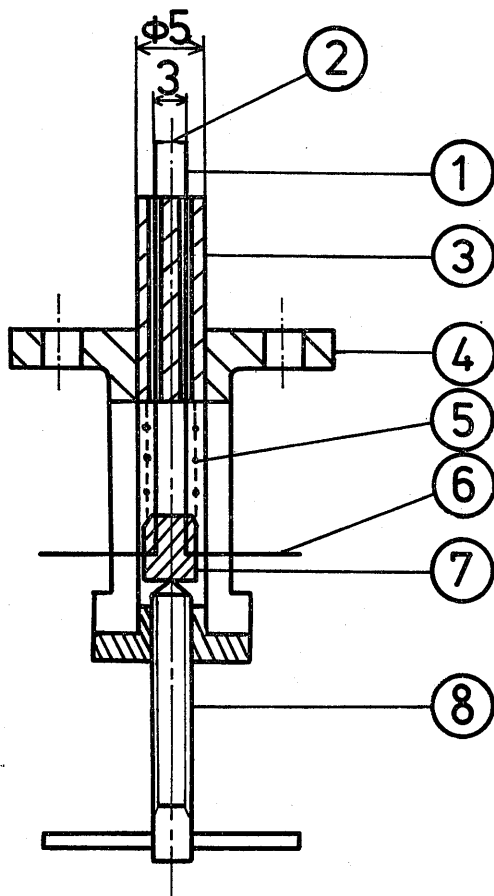


Fig. 1 Hot wire probe for skin friction measurement

3. 検定装置および検定方法

3.1 検定装置

図3は壁面摩擦計測プローブの検定装置の主要部分を示す。これは吸込式検定風洞で、通路は全長1,000mm、高さ $H=5\text{mm}$ 、幅 $B=150\text{mm}$ の長方形断面を持つ。通路高さの寸法精度は $5 \pm 0.03\text{mm}$ で、通路壁は透明の合成樹脂板を用いている。通路入口のノズル下流直後にトリップワイヤの働きをする0.3mmのピアノ線を上下壁面に貼付け、乱流への遷移を早めるとともに流れの二次元性を良くしている。通路入口の下流500mmの位置から100mm毎に合計5個(①~⑤)の静圧孔を下壁に設け、No. ①、③および⑤の上壁には直径5mmのプローブ挿入孔を設けている。壁面摩擦計測プローブはNo. ③に装着し、No. ①および⑤ではピトー管により動圧を計測する。

このような通路の測定部(長さ $L=400\text{mm}$)では高

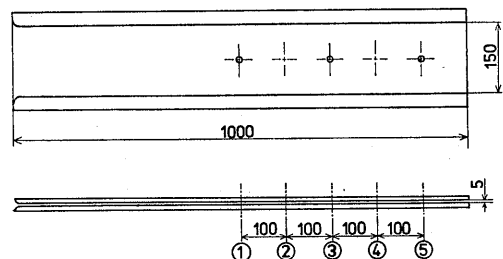


Fig. 3 An apparatus for calibration of skin friction probes

き方向は境界層で覆われているが幅方向には速度分布の一樣の部分が幅広く残っているので、文献(7)によれば測定部中央 No. ③における 壁面摩擦力 τ_w は次式により算定される。

$$\tau_w = \frac{H}{2L} \left\{ (p_1 - p_5) + \frac{n}{n+2} \left(\frac{\rho}{2} U_1^2 - \frac{\rho}{2} U_5^2 \right) \right\} \quad (1)$$

但し p = 静圧, U = 最大速度, ρ = 密度,
 $n = 2.667 (UH/2\nu)^{1/3}$

ここに用いた装置では、式(1)の右辺第2項が摩擦力 τ_w に占める割合は5%以下であり、動圧の測定誤差に基づく τ_w の誤差は小さい。

3.2 検定方法

熱フィルムプローブあるいは熱線プローブにより壁面摩擦力を計測するための基礎理論を簡単に述べる。強制対流層流熱伝達ではヌセルト数 N_u がレイノルズ数 Re の平方根に比例することは周知のことである。

$$N_u \propto \sqrt{Re} \quad (2)$$

したがって、温度一定のとき熱伝達係数 α は流速 U の平方根に比例する。すなわち； $\alpha \propto \sqrt{U}$
 一方、対流による熱伝達量 Q_c は； $Q_c = \alpha \cdot \Delta T \cdot A$ (ΔT = 温度差, A = 伝熱面積) であるから次の関係を得る。

$$Q_c / \Delta T \propto \sqrt{U} \quad (3)$$

また層流境界層の壁面摩擦力 τ_w は次式で与えられる。

$$\tau_w = 0.332 \rho U^2 / \sqrt{Re} \propto \sqrt{U^3} \quad (4)$$

式(3)と(4)から対流熱伝達量 Q_c と壁面摩擦力 τ_w について次の関係を得ることができる。

$$Q_c / \Delta T \propto \tau_w^{1/3} \quad (5)$$

ここで流体の密度 ρ が変化する場合も考慮すると、

$$Q_c / \Delta T \propto (\rho g \tau_w)^{1/3} \quad (6)$$

となる。すなわち熱フィルムあるいは熱線からの対流熱伝達量 Q_c は壁面摩擦力 τ_w の3乗根に比例することが分る。

実際の作動状態においては、熱フィルムプローブの場合伝熱面である白金膜が基材に密着しているため、対流による伝熱量の他に伝熱面から基材の方へ多量の熱が熱伝導により逃げるし、また熱線の場合はサポートへ熱が逃げる。このような対流による伝熱量 Q_c 以外の損失熱量を Q_l とすると、プローブが発生するジュール熱は次のようになる。

$$I^2 R_H = Q_c + Q_l$$

(I = 電流, R_H = プローブ作動抵抗)

式(6)を代入すると

$$I^2 R_H / \Delta T = C_1' (\rho g \tau_w)^{1/3} + C_2' \quad (7)$$

但し C_1' は比例定数, $C_2' = Q_l / \Delta T$ である。式(7)において C_1' , C_2' は壁面摩擦力 τ_w には無関係であるが、流体温度 T_a および熱フィルムあるいは熱線の設定温度 T_H によって変化する。したがって C_1' , C_2' が定数として取扱えるように T_a および T_H の基準温度 $T_{a.ref}$ および $T_{H.ref}$ をあらかじめ決めて、それらと異なる温度状態で得られたジュール熱 $I^2 R_H$ の値を次式を用いて基準温度状態に換算する。

$$(I^2 R_H)_{ref} = I^2 R_H \cdot (\Delta T_0 / \Delta T) \cdot (\Delta T_{ref} / \Delta T_0)^m \quad (8)$$

但し $\Delta T = T_H - T_a$, $\Delta T_0 = T_H - T_{a.ref}$, $\Delta T_{ref} = T_{H.ref} - T_{a.ref}$, 指数 m は実験的に定める定数で本実験の場合 $m = 0.88$ であった。このとき式(7)を次のようにおくと、

$$(I^2 R_H)_{ref} / \Delta T_{ref} = C_1 (\rho g \tau_w)^{1/3} + C_2 \quad (9)$$

C_1 および C_2 はある固定された $T_{a.ref}$ および $T_{H.ref}$ に対して定数として取扱える。

計測プローブを検定装置に装着し、流速を種々変化させて壁面摩擦力 τ_w を式(1)により、そのときの基準状態発生ジュール熱 $(I^2 R_H)_{ref}$ を式(8)により算定し、式(9)に従って定数 C_1 および C_2 を求め検定曲線を作る。なお熱フィルムあるいは熱線の設定温度は測定困難なため近似的に次式を用いて算定する。

$$T_H = \frac{1}{a} \left[\frac{R_H}{Re} (1 + a \cdot t_c) - 1 \right] \quad (10)$$

Re は t_c °C のときの冷抵抗 (Q), a は抵抗温度係数 (1/°C) である。

4. 結果および考察

4.1 壁面摩擦計測用熱線プローブの特性

図4, 5および6は熱線の壁面からの高さ h がそれぞれ0.028, 0.050および0.110mm のときの検定曲線で、縦軸は式(9)の左辺の値 $(I^2 R_H)_{ref} / \Delta T_{ref}$ (Watt/°C) であり、横軸は式(9)の右辺第一項の $(\gamma \tau_w)^{1/3}$ (kg^2/m^3)^{1/3} の値である。熱線の設定温度の影響を調べるため、設定抵抗値を5.0, 5.45, 5.95, 6.4および6.9Ω の5とおり変化させて検定しており、図中の●, ■, ▲, ○および□印がそれぞれに対応する。それらの基準設定温度は80, 100, 120, 140および160°C であり、流体の基準温度を $T_{a.ref} = 20$ °C としている。

図において縦軸切片の値 C_2 は損失熱量のパラメータ $(Q_l / \Delta T)_{ref}$ を表わし、直線の傾き C_1 は壁面摩擦力の変化に対する出力の変化すなわちプローブの静感度を表わす。図から分るように設定温度が低い程直線の傾きが大きくなり静感度は良くなるが、実験点のばらつき

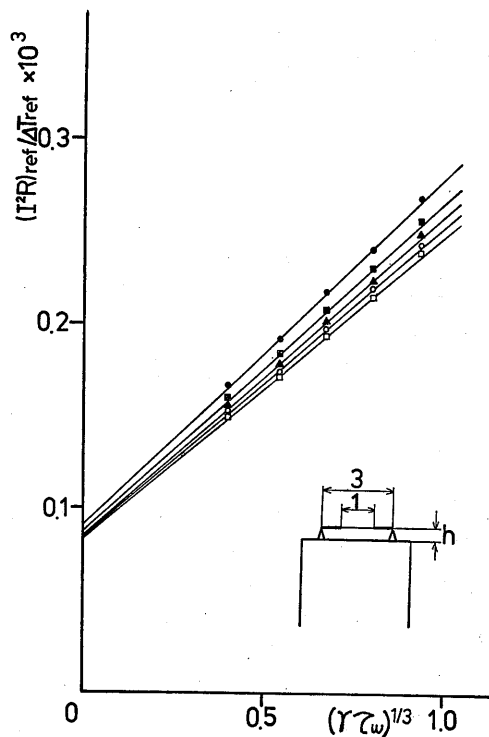


Fig. 4 Calibration curve
(Hot wire probe ; h=0.028mm)

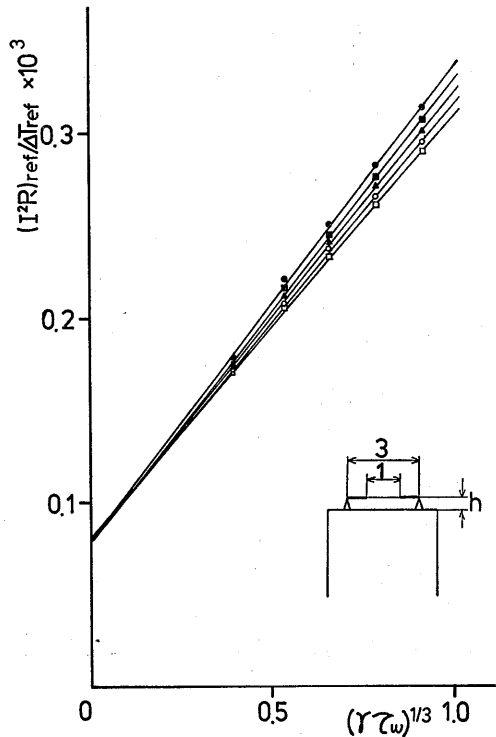


Fig. 6 Calibration curve
(Hot wire probe ; h=0.110mm)

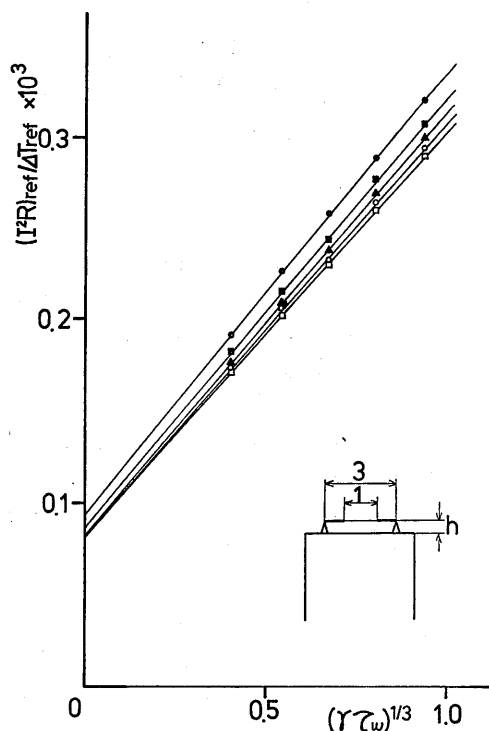


Fig. 5 Calibration curve
(Hot wire probe ; h=0.050mm)

が増す傾向にあり測定精度は悪くなる。

次に熱線の壁面からの設定高さの影響を見るために、それぞれの図の検定曲線の傾き C_1 と損失熱量パラメータ C_2 の値を表1に示す。損失熱量はいずれの場合でも約 0.08×10^{-3} (Watt/°C)で熱線の設定高さおよび設定温度の影響は殆んどない。すなわち損失熱量の殆んどが熱線サポートへ逃げているものと考えられ、その値も小さい。しかし表1から分るように、設定高さの増加とともに C_1 の値が増加しており、熱線の設定高さは静感度に著しい影響を与える。検定時と測定時とで境界層厚さが等しい場合は熱線の設定高さが大きい方が静感度が良く測定精度が良くなるが、一般の場合両者で境界層厚さは異なることが多いから出来る限り壁面近くに熱線を設定すべきである。すなわち、

h (mm)	C_1	C_2
0.028	$0.166 \sim 0.190 \times 10^{-3}$	0.08×10^{-3}
0.050	0.186 ~ 0.212	0.08
0.110	$0.226 \sim 0.254$	0.08

Table. 1 Values of sensitivity C_1 and heat loss parameter C_2

層流境界層の壁面近傍および乱流境界層の層流底層内では速度勾配が一定であり、剪断力 $\tau = \mu (du/dy)$ が壁面摩擦力 τ_w とほぼ等しいと見做せるから、熱線の設定高さはその範囲内にすべきと考える。本検定装置では境界層厚さは $\delta = H/2 = 2.5\text{mm}$ であり、 $h = 0.028\text{mm}$ のとき $h/\delta = 0.01$ となりこの条件をほぼ満たしている。

図7は熱線が湾曲して一部が壁面に接触している場合の検定曲線である。図中の記号は前図と同様である。この場合の傾き C_1 は $(0.08 \sim 0.10) \times 10^{-3}$ であり、図4に示した場合に比べ静感度は半減している。また縦軸切片 C_2 は 0.13×10^{-3} で図4の場合の約1.5倍の損失熱量を示している。これは熱線が壁面に接触しているため、発生熱量のかなりの部分が熱伝導により壁面へ伝えられるためと考えられる。これらのことから判断すると、壁面摩擦計測用熱線プローブとしては熱線を壁面に密着させるよりむしろ壁面から離して損失熱量を少なくした方が測定精度が良くなる。

4.2 熱線プローブと熱フィルムプローブの比較

図8は熱フィルムプローブの検定曲線で、図中の●, ■, ▲, ○および□印は基準設定温度 $T_{h.ref}$ が

それぞれ120, 140, 160, 180および200°C の場合である。なお基準流体温度 $T_{a.ref}$ は20°Cとした。図からわかるように縦軸切片の値 C_2 は約 0.8×10^{-3} (Watt/°C) で、熱線プローブの場合の値 0.08×10^{-3} のほぼ10倍になっており、損失熱量が著るしく大きく、しかも C_2 の値は設定温度によって変化する。前述のように熱フィルムプローブの基材は比較的断熱性の良好な石英ガラス製ではあるが、白金膜が基材に密着しており、発生ジュール熱の大部分が基材へ熱伝導により逃げるため損失熱量が著るしく大きくなっている。プローブの静感度を表わす直線の傾き C_1 は 0.26×10^{-3} であり、熱フィルムの伝熱面積が熱線プローブのそれよりはるかに大きいにもかかわらず表1に示した熱線プローブの場合とほぼ同程度しかない。したがって熱フィルムプローブによる壁面摩擦力の測定精度は損失熱量すなわち C_2 の値の検定精度に依存し、プローブ周囲の影響を著るしく受けることが考えられる。

図9は図8と同様熱フィルムプローブの検定曲線である。前述の図8は図3に示した検定装置のプローブ装着位置③の周囲材質が断熱性の良いアクリル樹脂であったが、図9は熱フィルムプローブを比較的熱伝導

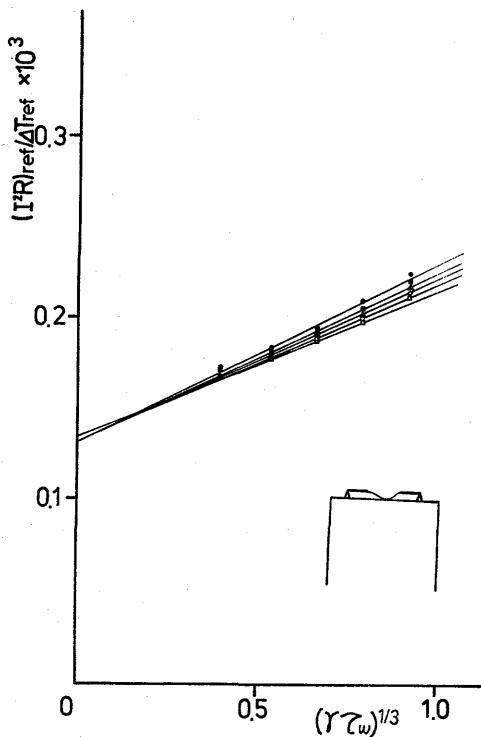


Fig. 7 Calibration curve (Hot wire probe; A part of wire is in contact with the wall)

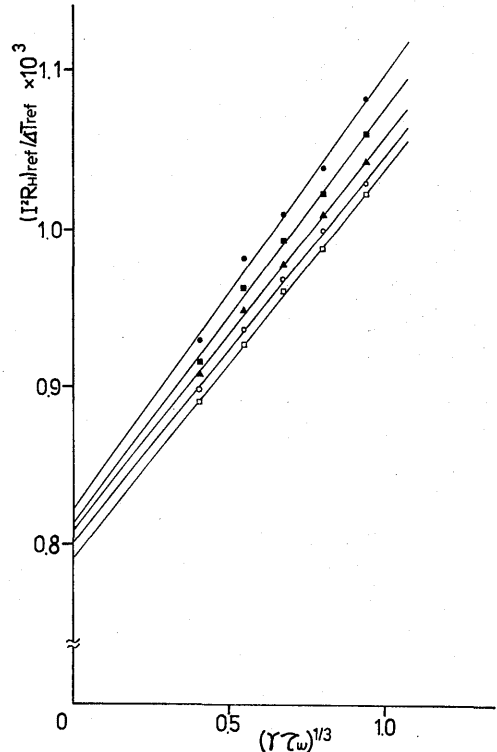


Fig. 8 Hot film calibration curve (Probe surrounding material is an adiabatic one)

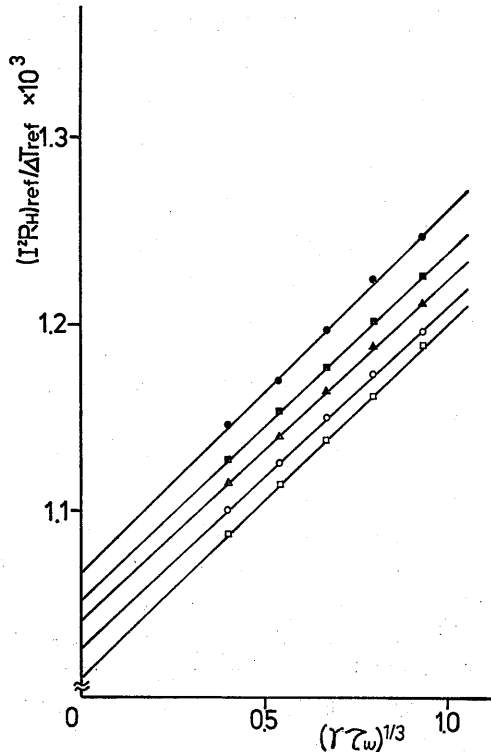


Fig. 9 Hot film calibration curve
(Probe surrounding material is a metal)

性の良い直径20mmの黄銅製器具に装着して検定を行った場合の特性である。図から分るように縦軸切片の値 C_2 は $(1.01 \sim 1.07) \times 10^{-3}$ で図8の値より20~30%大きく、また直線の傾きも減少している。すなわち熱フィルムプローブの場合、損失熱量がプローブの周囲材質によっても影響を受け、壁面摩擦力の変化による出力変化よりむしろ周囲条件の変化に基づく出力変化が著るしいから、検定装置と実際に測定したい実験装置の測定孔近傍の材質は一致させる必要がある。これに対し本研究で試作した熱線プローブの場合、前述のように熱線を壁面から僅か離すことによって損失熱量を小さくし、プローブの周囲材質の影響を避けることができるるとともに伝熱面積が小さいにもかかわらず熱フィルムの場合と同程度の静感度を維持できる。更には熱線の熱容量が十分小さいため動的な測定にも適用

できるものと考えられる。

この他熱線プローブについて検定曲線の再現性を調べ、短期間の実験前後では十分な再現性があることが分った。しかし熱線の素材がタングステン線であったため長期間使用すると酸化あるいはごみの付着により特性が若干変化した。一方熱フィルムは白金膜であるため数年に亘る長期使用に対しても再現性が認められた。

5. 結言

壁面摩擦の動的測定を目的として壁面摩擦計測用熱線プローブを試作し、その第一段階としてプローブの静特性を調べるとともに、熱フィルムプローブとの特性比較を行い次のことが明らかになった。

- (1) 壁面摩擦を計測するために熱フィルムプローブと同様に熱線を壁面に密着させると、損失熱量が大きいかつ静感度が悪くなる。
- (2) 熱線を壁面から僅か0.03mmの位置に設定することによって、伝熱面積がはるかに大きい熱フィルムプローブと同程度の静感度特性を得ることができる。
- (3) 同時に損失熱量を1桁小さくできるため、プローブの周囲材質の影響を受けにくく測定精度が向上する。

終りに本研究の熱線プローブの試作および検定実験に際し、本学卒業生の久保田真文君ならびに祐野博君の多大な協力があつたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Brown, K. C., Joubert, P. N., J. Fluid Mech., Vol. 35 (1969)
- 2) Gadd, G. E., ARC R&M, No.3147, (1960)
- 3) Preston, J. H., J. Royal Aero. Soci., Vol. 58 (1954-2)
- 4) Bellhouse, B. J., Schultz, D. L., ARC R&M, No.3445 (1964)
- 5) 石田, 山田, 機講論, No.760-15, (1976-10), 107
- 6) 石田, 琴浦, 機講論, No.780-16, (1978-10), 154
- 7) 妹尾, 他2名, 九大生研所報 第50号(1970), 7