

熱膜流速計の検定結果について

齋藤 隆*・大成博文**・亀田芳満*

The Calibration Results of Hot-film Flow Meter

Takashi SAITOU, Hirofumi OHNARI
and Yoshimitsu KAMEDA

Abstract

A great number of measurement instrument of flow have been used in hydraulic engineering. For example, they are Total head tube, Rolling-propeller, Hot-wire, Hot-film, Electro-magnetic-Inductive Force, Super-sound wave, Laser flowmeter and so forth.

Hot-film flowmeter is the better instrument so far developed for analysis of space and time variables of the micro structures of the velocity of a streaming liquid. The reasons of the present superior of Hot-film flowmeter as a measuring instrument for studied of liquid flows is that the flow probe sensor is sensitive, responsive and can be manufactural in exceedingly small physical sizes. In contrast to that superior characteristics there is a few problem of measuring steadiness. One of a few problem is need of calibration of flow velocity from the existance of each differential characteristics of the technical method of the coating quarts on the pratinum plated sensor. Another problem is that the characteristics of probe sensor have an effect on the change of liquid temperature.

This paper aims at clarifying of the calibrating velocity characteristic of Hot-film probe sensor the type of V under the changing of liquid temperature.

1. 緒 言

現在、水理学において用いられている流速測定法としては、浮体追跡法、圧力法、プロペラ回転計法、熱膜流速計および超音波流速計があげられ、最近レーザー流速計が開発されている。

一般に、流速計測装置として要求される必要条件是、鋭敏性、追従性、安定性、耐水性および機械的強度に優れていて流れを乱さないことである¹⁾。しかしながら、これらの特性は相互に相反するもので、水流流速測定において全てを満足せしめることは非常な困難をとめない、測定目的に応じて測定法を選択しなければならぬ。

熱線流速計は空気流の乱流計測において、上記の必要条件をほぼ満足し、乱流理論の発展に大きな寄与をしている^{2),3)}。この実績に立脚し、水流用に開発されたのが熱膜流速計であって、鋭敏性および追従性に優

れていることより流れの細部構造を探る計測器としてきわめて有力なものである。しかしながら、その流速測定原理である熱膜からの放熱量の変化は水温の変化に対して鋭敏なることより、検定に困難を伴う欠点を持っている。

熱膜流速計の受感部は磁製棒に約1000Å厚に被覆された白金膜で、流体との絶縁および熱膜の汚染防止のために約 1.6×10^4 Å厚の石英膜で被覆されている。個々のプローブセンサーのこれら被覆の微妙なる相違が、個々の放熱特性を左右し、個々のセンサーに対して異なった検定結果を与える。

プローブセンサーの放熱特性を変える要因としては、センサーへの糸クズ等の汚濁物質および気泡等の付着と流体の温度変化が主なものである。前者は流体の清浄化と計測時の監視によって克服可能であるが、後者は温度補償を考慮した検定を必要とする。

水温変化に伴うセンサーの放熱特性の変化は、上述した白金および石英膜のコーティングの微妙な相違によって、個々のセンサーで異なり、水温変化に伴うセンサーの放熱特性の変化については充分明らかに

* 土木工学科

** 徳山工業高等専門学校土木建築工学教室

されていない。

本文は、小型の恒温水槽（幅 30cm×長さ 50cm×深さ 20cm）を用いて熱膜センサーの水温変化に伴う放熱特性を明らかにすることによって、水温変化に対応しうるセンサーの検定が可能なることと、熱膜センサーの望ましい使用条件を検定結果より明らかにしたものである。

2. 熱膜流速計の原理

熱膜流速計の原理は、電流により加熱された熱膜の流体中での放熱量が、熱膜近傍における流体流速によって異なり、放熱量に相当する電力変化を計測することである。センサーの検定法および検定結果の整理の都合上、熱膜流速計の原理をセンサーの放熱特性の面のみから説明する。

一般に、熱線（あるいは熱膜）の放熱は熱伝導、自由対流、強制対流および放射によって行なわれ、ヌーゼルト数によって規定される。ヌーゼルト数は開水路流れのような水流においては、レイノルズ数のみの関数によって表わされる⁴⁾。

円柱状の放熱体よりの放熱量について、King が次式を提案している。

$$Q = k_f \cdot l \{1 + \sqrt{(2\pi \cdot \rho \cdot C_p \cdot d \cdot u / k_f)}\} \cdot (T_p - T_w) \quad (1)$$

ここに、 Q ；放熱量、 k_f ；流体の熱伝導係数、 l ；熱線の長さ、 ρ ；流体の密度、 C_p ；流体の定圧比熱、 d ；熱線の径、 u ；流体流速、 T_p ；熱線温度、 T_w ；流体温度である。

上式を一般化して、熱膜形式の放熱体にも適用出来るように次式に書き換える。

$$Q_p = K_0 \cdot (1 + K_1 \cdot U^{1/n}) \cdot (T_p - T_w) \quad (2)$$

ここに、 Q_p ；プループ放熱量、 K_0 、 K_1 、 n ；検定結果より決められるプループ常数である。

一方、プループ発熱量 Q_E および熱膜の電気抵抗は通常の温度において、それぞれ次のように与えられる。

$$Q_E = R \cdot I^2 = V \cdot I = V^2 / R \quad (3)$$

$$R_p = R_0 (1 + \alpha T_p) \quad (4)$$

ここに、 R ；電気抵抗、 I ；電流、 V ；電圧、 R_0 、 R_p ；熱膜の温度がそれぞれ 0°C 、 $T_p^\circ\text{C}$ における熱膜の電気抵抗、 α ；温度係数である。

熱線流速計には定温度方式と定電圧方式とがあるが、我々が熱膜プループの検定に用いたのは前者の方式である。定温度方式によれば、熱膜の温度は流速に関係

なく設定抵抗値によって与えられ、測定中の熱膜の温度および電気抵抗は一定値に保たれる。

流体流速が零および U なるときのプループ電圧をそれぞれ V_0 、 V とすると、放熱量と発熱量とが平衡関係 ($Q_p = Q_E$) にあることより次の各式が求まる。

$$V_0^2 / R_p = K_0 (T_p - T_w) \quad (5)$$

$$V^2 / R_p = K_0 (1 + K_1 \cdot U^{1/n}) \cdot (T_p - T_w) \quad (6)$$

$$\therefore \frac{V^2 - V_0^2}{K_0 \cdot R_p (T_p - T_w)} = K_1 \cdot U^{1/n} \quad (7)$$

プループ温度が水温 (T_w) に等しいときのプループの電気抵抗を R_w とし、 R_w に対する R_p の値を設定抵抗比 $r (= R_p / R_w)$ と呼んでいる。

設定抵抗比 r は(4)式より

$$r = \frac{R_p}{R_w} = \frac{1 + \alpha T_p}{1 + \alpha T_w} \quad (8)$$

と表わされる。上式を書き換えると次式が得られる。

$$T_p = \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{R_p}{R_w} (1 + \alpha T_w) - 1 \right\} \quad (9)$$

(7)式に(9)式を代入し、(8)式でもって変形すると次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} (V^2 - V_0^2) / R_p &= \{K_1 (1 + \alpha T_w) (R_p / R_w - 1) \cdot U^{1/n}\} / \alpha \\ &= \{K_1 (1 + \alpha T_p) (R_p / R_w - 1) \cdot U^{1/n} \cdot R_w / R_p\} / \alpha \\ &= A (T_p \text{ or } T_w, R_p / R_w) U^{1/n} \end{aligned} \quad (10)$$

上式の A は熱膜温度あるいは水温 T_p 、 T_w と設定抵抗比 r によって規定されるが、後に検定結果の検討の際に述べる理由によって、熱膜流速計を使用する水温を $10 \sim 30^\circ\text{C}$ とすると、温度係数 α はほぼ 0.002 程度のものであることより、 $(1 + \alpha T_w)$ の変化による(10)式の左辺に与える影響は 4% 以下である。検定精度よりこの程度の誤差を容認すれば(10)式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} (V^2 - V_0^2) / R_p &= A (R_p / R_w) \cdot U^{1/n} \\ \{(V^2 - V_0^2) / R_p\}^n &= B (R_p / R_w) \cdot U \end{aligned} \quad (11)$$

$$B (R_p / R_w) = A (R_p / R_w)^n$$

3. 検定方法とその結果

検定を行なった熱膜センサーは、実験室内での開水路および管路の乱れ流速の測定によく用いられている形式である、TSI 製の V 字型 Model 1233W (No. 6237, No. 6238) の 2 個である。V 字型の特徴は、ノイズの

主因となる熱膜近傍での流れの剝離が起りにくく、また低流速において熱線式のように熱線下流面への渦の付着がみられず、かつ機械的強度が大きいことである。検定したV字型ブルーブの詳細図を参考のためFig. 1に示す。

熱膜流速計は熱膜センサーよりの放熱量の変化によって流速を求めるのであるから、検定中の水温変化は検定精度に直接影響してくる。そのため、検定は室温をほぼ一定に保つことが出来るコンクリート養生用の

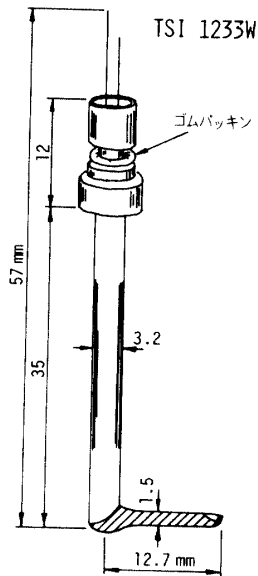


Fig. 1 Hotfilm-sensor

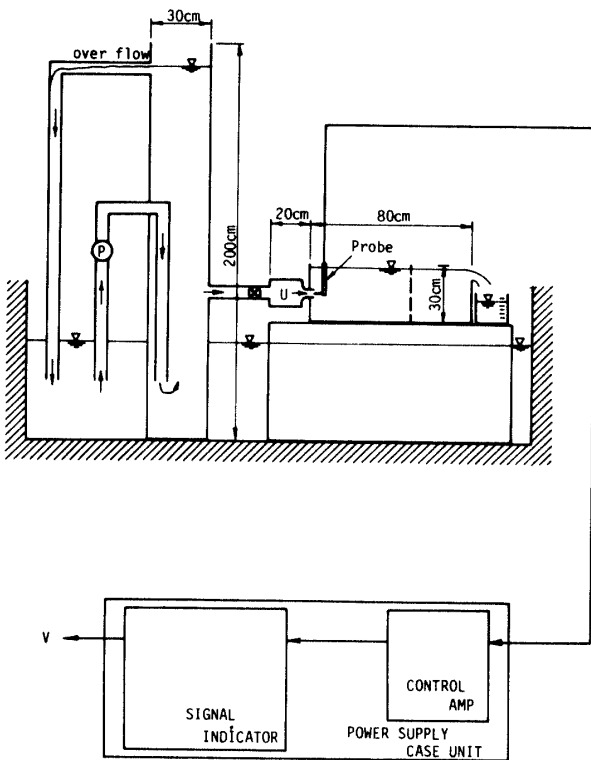


Fig. 2 Block diagram of measurement system

恒温恒湿室中で行なった。

平均流速の検定装置の概要をFig. 2に示す。貯水槽はコンクリート養生用水槽で、高架水槽は直径30cmの塩ビ管でもって作成されている。高架水槽より噴流発生装置間には流速調節用バルブが設けられている。噴流孔は噴出断面での流速が一様な分布になるように滑めらかに縮小されていて、噴出孔断面は直径12mmの円形断面である。噴出孔断面における流速は下流水槽の下流端に設けられているセキからの越流量より求めた。

(1) 熱膜の温度係数 (R_p と T_p との関係)

熱膜センサーの温度係数の検定は小型恒温水槽を用いて行なった。センサー温度を直接測定することは困難であるため、センサー温度が水温に等しくなったと思われる時点で水温 T_p と熱膜センサーの抵抗 R_p を測定した。水温の測定には水銀温度計を用いたが、個々

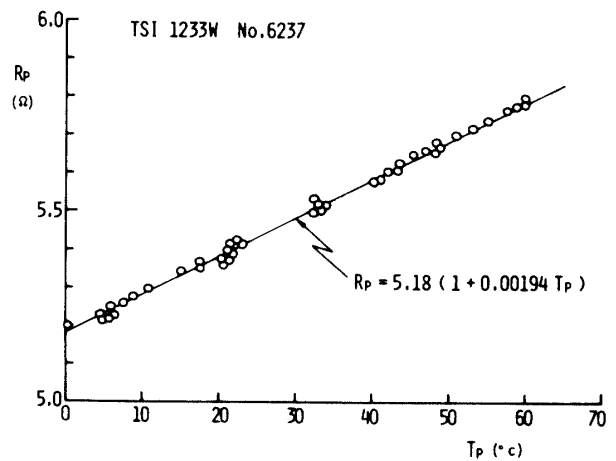


Fig. 3 (a) Relation between probe-temperature and probe-resistance

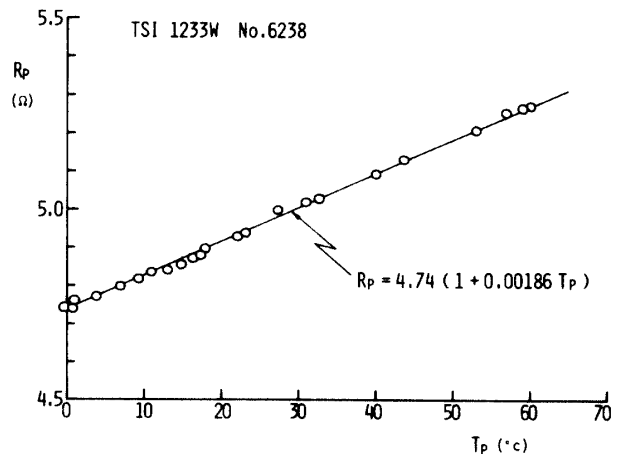


Fig. 3 (b) Relation between probe-temperature and probe-resistance

の温度計による差があるので、検定中は同じ温度計を用いている。

熱膜センサーの電気抵抗値の温度による変化を示したものがFig. 3である。測定結果より(4)式の温度係数 α および R_0 を求めると次のとおりである。

No. 6237 Fig. 3(a)
 $R_p = 5.18(1 + 0.00194 \cdot T_p)$ (12-1)
 $R_0 = 5.18, \alpha = 0.00194$

No. 6238 Fig. 3(b)
 $R_p = 4.74(1 + 0.00186 \cdot T_p)$ (12-2)
 $R_0 = 4.74, \alpha = 0.00186$

両者の温度係数はほぼ一致しているが、 R_0 に若干の相違がみられ、熱膜寸法のわずかな違いによるものであろう。

なお、測定範囲を $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ としたのは、熱膜温度を上げれば感度は良くなるが、 60°C 以上での使用は熱膜の老化が著しく、通常使用温度は 60°C 以下であることからである。

(2) 静止流体中における放熱特性 (V_o と $\Delta T = T_p - T_w$ との関係)

検定を行なった水温の範囲は、熱膜流速計を実際に用いる水温の範囲を含むように、 $0^\circ\text{C} \sim 34^\circ\text{C}$ とした。

検定は水温をほぼ一定に保ち、設定抵抗値 R_p を、Fig. 3の結果より水温に対する抵抗値 R_w と $T_p = 60^\circ\text{C}$ に対する抵抗値 $R_p(T_p = 60^\circ\text{C})$ の範囲内で、系統的に変化させていき出力電圧 V_o を測定することによって行なった。

設定抵抗値 R_p より Fig. 3の関係で T_p を求め、水温をパラメータとして図示したのが Fig 4である。

センサーと水温との温度差 ($T_p - T_w$) が 10°C 以下の部分を除くと、各測定点はほぼ原点を通る直線上にあり(5)式の関係が成立している。しかし、水温が 12°C 以上での測定点は一直線で表わせるが、水温が 10°C 以下になると直線の勾配は水温が低くなるほど小さくなり、静止流体中での熱膜の放熱特性は水温が 10°C 以下になると水温そのものの影響を受けている。換言すれば、(5)式中の係数 K_o は水温が 10°C 以下においては水温 T_w の関数であり、温度差 ($T_p - T_w$) が 10°C 以下においては温度差 ($T_p - T_w$) の関数となる。 K_o が常数となるには水温が 10°C 以上であり、かつ温度差が 10°C 以上であることが必要である。温度差が 10°C 以下の条件は出力電圧自体が小さく、相対的に測定精度が低下するためであるとも考えられる。

Fig. 4 の関係より実際に熱膜センサーを用いるに、

水温および温度差を 10°C 以上で用いれば、これらによる補正を考慮する必要はない。この場合における(5)式中の K_o を測定結果より求めると次のとおりである。

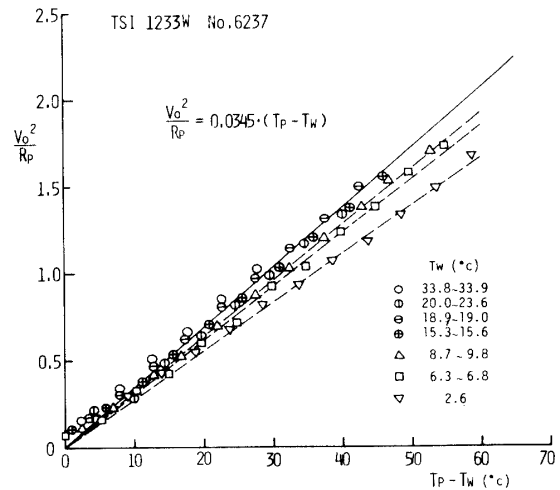


Fig. 4 (a) Relation between V_o^2/R_p and $T_p - T_w$

$V_o^2/R_p = 0.0345(T_p - T_w) \quad K_o = 0.0345$ (13-1)

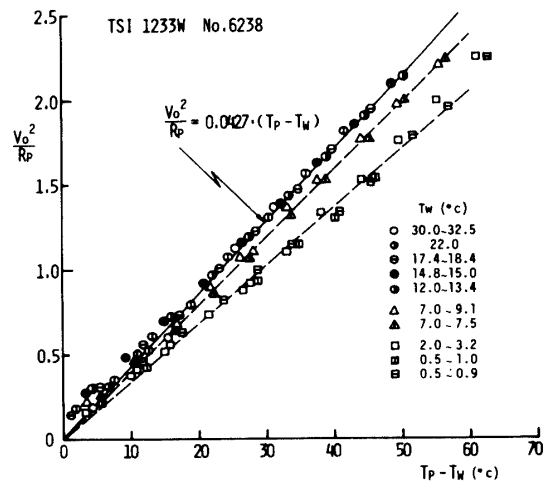


Fig. 4 (b) Relation between V_o^2/R_p and $T_p - T_w$

$V_o^2/R_p = 0.0427(T_p - T_w) \quad K_o = 0.0427$ (13-2)

(3) 平均流速と出力電圧との関係

流体温度を一定に保ち、噴出流速を系統的に変化させて測定した出力電圧を(1)式の形でもって図示した代表例が Fig. 5である。測定点は水温および設定抵抗値をパラメーターとして表示してあるが、設定抵抗比すなわら熱膜と水温との温度差が異なると測定点はほぼ平行に移動しているが、設定抵抗比が等しい場合には水温が 15°C から 25°C の範囲で変化しても、水温の差による変化は検定精度の範囲内で量的評価は困難である。したがって、検定結果の評価は、水温が $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ の範囲であれば、(10)式を簡略化した(11)式によ

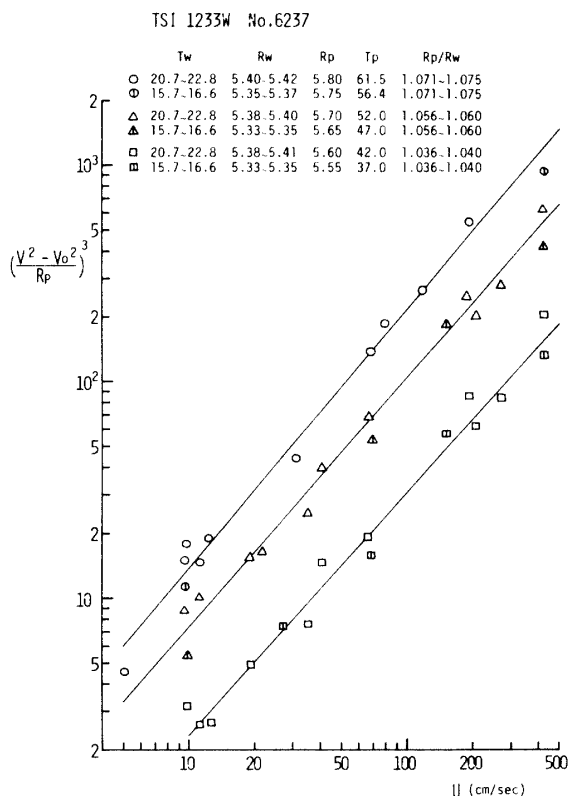


Fig. 5 (a) Relation between Voltage and Average Velocity

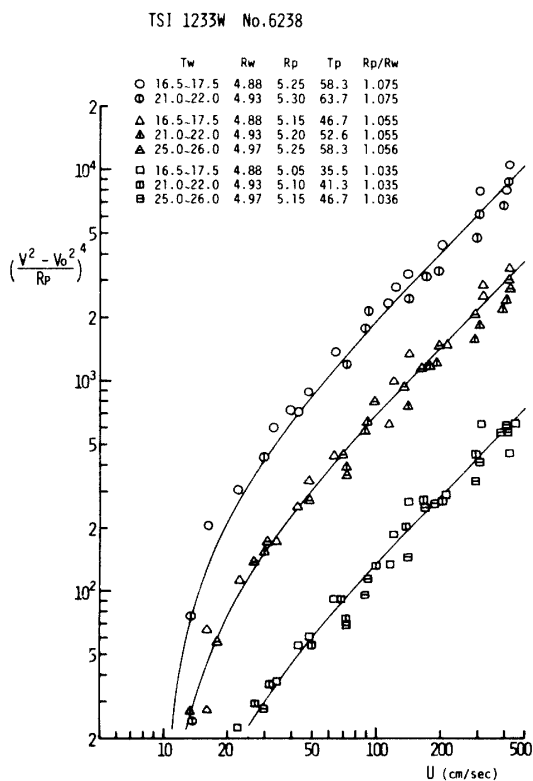


Fig. 5 (b) Relation between Voltage and Average velocity

って充分である。

Fig. 5 (a), (b)の両図を比較すると、同規格のセンサーであるが Kingの式を一般化した(2)式中の指数 n の値が異なっており、No. 6238 のセンサーは流速が 20 cm/sec 以下になると感度が急激に低下している。これは熱膜および石英のコーティングの微妙なる差によるものではないかと考えられる。

Fig. 5 の縦軸に用いた、(1)式左辺の指数 n の値が異なっているのは、自然対流等の影響が無視出来るよう

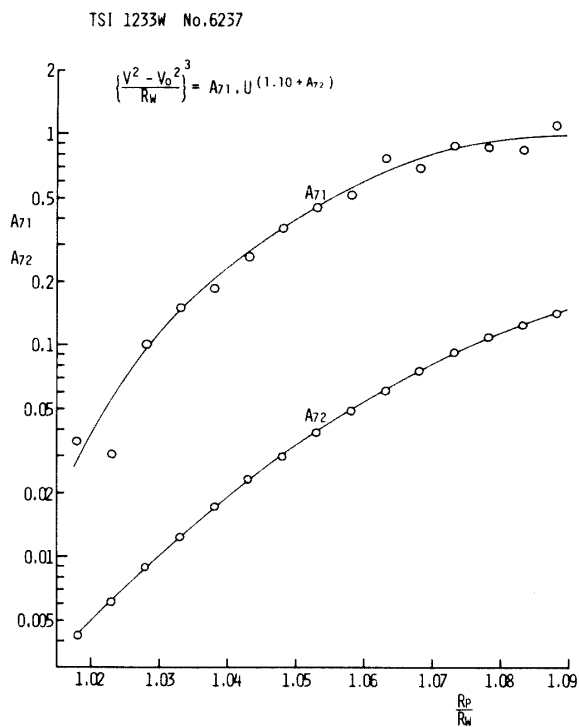


Fig. 6 (a) Constant value of probe

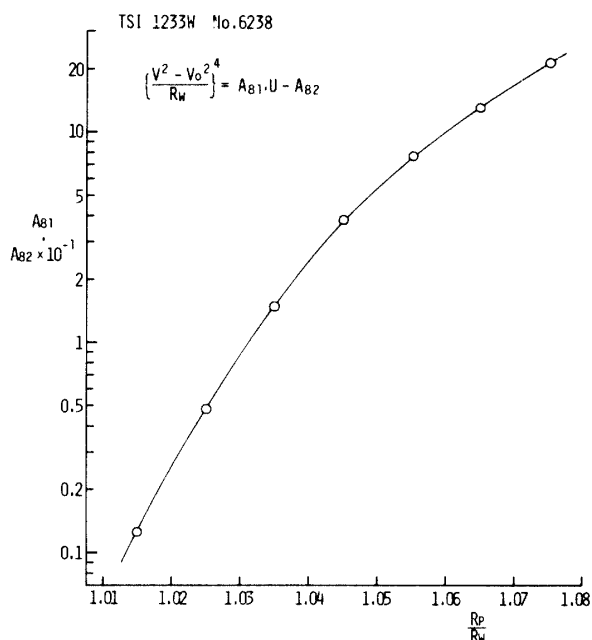


Fig. 6 (b) Constnt value of probe

な流速の大きいところで測定点が 1/1 勾配の直線に最も近くなるように試算によって求めたためである。

同規格のセンサーであるにもかかわらず、流速変化に伴う各センサーの放熱特性が異なり、とくに低流速における特性が大きく違っている。

Fig. 5 中に示してある検定点の平均線を、(10)式を若干修正して次式で表わす。

$$\{(V^2 - V_o^2)/R_p\}^3 = A_{71} \cdot U^{(1.10 + A_{72})} \quad (14-1)$$

$$\{(V^2 - V_o^2)/R_p\}^4 = A_{81} \cdot U - A_{82} \quad (14-2)$$

(14)式中の A_{71} , A_{72} および A_{81} , A_{82} は(11)式より設定抵抗比の関数である。これらと設定抵抗比 ($r = R_p/R_w$) との関係を図示したものが Fig. 6 である。

同規格のセンサーであるが、No.6238 のセンサーでは、感度係数、 A_{81} , A_{82} を設定抵抗比の関数として与えられれば、リニア・ライザーによって出力電圧と流

速を直線関係で与えることが可能であるが、No. 6237 のセンサーでは設定抵抗比によってリニア・ライザーの係数を変えなければ出力電圧と流速とを線型化することが出来ない。

熱膜センサーによる水流速の測定を行なうに水温変化にともなう温度補償はあまり明確にはされていなかったが、水温変化を設定抵抗比の変化に変換すれば(14)式によって今までよりも比較的容易に補償することが可能である。すなわち、適当なる設定抵抗値を設定し、出力電圧と同時に水温を測定すれば Fig. 7 に示す手順によって測定中の温度変化に対応して流速を求めることが可能である。また、センサーの老化に対しても、水温と出力電圧を同時測定すれば直ちに検定曲線との比較をすることによって、判定することが出来る。

同規格のセンサーを 2 本用いて検定した結果、センサー個々の相違をまとめてみたものが Table. 1 である。

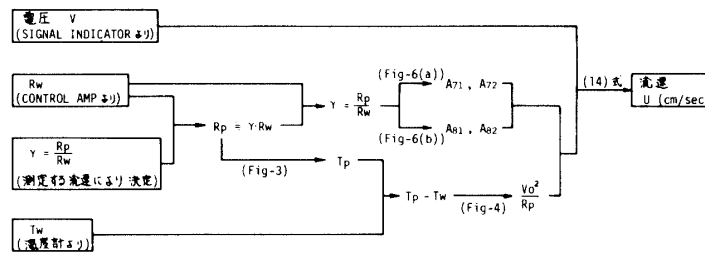


Fig. 7 The flow chart for use of the probe

Table 1 The specialty of probe

Probeの種類 注意事項項目	TSI 1233W No. 9237	TSI 1233W No. 6238
最大設定抵抗値	5.80	5.25
流体(水)温度の範囲	9°C 以上	10°C 以上
適当と思われる 設定抵抗比	1.03~1.06 (特に1.05)	1.02~1.07
流速測定可能範囲	10cm/sec 以上が望ましい (10cm/sec 以下は不安定)	20cm/sec 以上が望ましい (10cm/sec 以下は測定不可能)
電圧 V (V) と 流速 U (cm/sec) の関係	$\{(V^2 - V_o^2)/R_p\}^3 = A_{71} \cdot U^{(1.10 + A_{72})}$ <Fig.6(a)>	$\{(V^2 - V_o^2)/R_p\}^4 = A_{81} \cdot U - A_{82}$ <Fig.6(b)>

4. まとめ

実験室内水路の水温変化はかなりあり、とくに野外

の高架水槽を用いる順環式水路の水温変化は大きく 5°C 以上にもなり、熱膜センサーによる流速測定を行なうには、水温変化の補償を明らかにしておく必要がある。

この観点より、水理実験においてよく使用されるであろうところのV字型熱膜センサー2本を検定してみた結果、Table. 1にまとめたごとく同規格のセンサーであっても、その放熱特性はかなり異なっている。

本検定の目的である水温変化の補償は、熱膜の温度係数および静止流体中の熱膜の放熱特性(4), (5)式の検定)を行なっておれば、測定中の水温に対して設定抵抗を適当に選定し(感度および熱膜の最高温度を考慮して)、出力電圧の測定と同時に水温の測定を行なうことによって、水温変化を設定抵抗比の変化に変換しFig. 7の手順によって行なうことが出来た。また、熱膜センサーの老化に対しても、任意の水温で設定抵抗値を2, 3変化させて検定することによって判定が可能である。

以上、熱膜センサーの大きな弱点であった水温変化

に対する補償の一方法を報告したものであるが、同規格のセンサーであってもその特性がかなり異なることに注意しなければならない。

参 考 文 献

- 1) J. O. Hinze; An Introduction to Its Mechanism and Theory, McGraw-hill New York 1959.
- 2) Ippen and F. Raichlen; Turbulence in civil engineering, Measurement in Free surface stream, J.H.D, ASCE. 33 HY5, 1 (1957)
- 3) 今本博健: 開水路流れに於ける乱れの基本的時性について. 土木学会論文報告集 No.197, 1972-1.
- 4) DISA; DISA Elektronik A/S. DK-2730 Herlev Denmark. 9, 1971.

(昭和51年8月23日受理)