

MAR. 1977

RIIS-RR-25-4

UDC 628.854 : 53.082.3

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-25-4

熱線風速計による微風速度の測定における出力電
圧の温度補正の方法と気流方向の計算について

木 下 鈞 一

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

熱線風速計による微風速度の測定における 出力電圧の温度補正の方法と気流方向の計 算について

木下 鈞 一

On the method of temperature compensation to the
out put voltage of a hot wire anemometer and
the calculation method of the direction
of air stream in low velocity.

by Kinichi KINOSHITA

This paper deals with the method of compensating the out put voltage of a hot wire anemometer for fluctuating temperature, and the method of calculating the direction of air stream by using a digital computer.

Firstly, in measuring accurately low air velocity below 2m/sec, it is necessary to compensate the voltage of the anemometer. Therefore for this purpose, fluctuating air temperature must be measured accurately and continuously. The most simplest method to measure air temperature is to use the tungsten wire of about $5\mu\text{m}$ in diameter which is generally used in a hot wire anemometer, because this fine wire can be got easily and its temperature coefficient on electrical resistance is comparatively greater than other common metals. The prong of this sensor is made of manganine wire of $60\mu\text{m}$, and the step response to temperature of this sensor is estimated to be about 16Hz.

The compensations equations written in eq. (3, 20), (3, 23) are derived from the results that are obtained by solving eq. (3, 8) under the following conditions ; 1) Diameter of hot wire of tungsten is $5.25\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$, 2) Aspect ratio (L/d) of hot wire is in range of 190~570, 3) Fluctuating air temperature is in the range of normal temperature and 60°C , 4) The average heat temperature of hot wire is the cases of 170, 200 and 230°C . And also the same eq. (3, 24), (3, 25) as above equations were derived from many experimental data. Temperature compensation by the former equation gives good agreement with that by the latter equations. The error of temperature compensation by using eq. (3, 26) is estimated at $\pm 0.161\%$ to the out put voltage, and this accuracy is approximately sufficient in measuring low air velocity.

Secoundly, it is an interesting problem to calculate the direction of air stream. In this paper, the method of calculation of two dimensional direction was ascertained empirically by using a x-type probe, and the approximate equations to calculate the direction are obtained. But high accuracy in calculation can not expected with the reason which heat transfer from fine wire is inclined to be insensible to the direction of air stream in the very low air velocity.

1. はしがき

気流温度が変動している場で速度が 200cm/sec 以下の微風速度を測定することは容易ではない。その理由は、一般には、乱流速度の測定には熱線風速計が用いられるが、この風速計の出力電圧は無風時出力電圧 V_0 に、気流速度に対応する信号電圧が重畳して出力する機構となっていて、この信号電圧が V_0 に対して比較的小さいこと、また V_0 の温度に対する変化がきわめて大きいためである。このため測定精度を高めるには風速計の出力電圧に対し精度のよい温度補正を施す必要がある。

温度補正のための気流温度の測定には応答性、感度の高いセンサーを必要とするが、 $5\mu\text{m}\phi$ のタングステン線の電気抵抗の温度係数がかなり高いのでこの要求を満たすものと思われる。よって本報ではまず、この線を抵抗線式温度検出用センサーとし（以下冷線と呼ぶ）、この線を用いたときの応答性、感度について検討した。次に温度による空気の変粘性係数、熱伝導率、およびタングステン線の熱伝導率など物性値の変化も考慮し、半理論的に熱線風速計の出力の温度による影響について考察し、これより温度補正式を求めた。さらに実験によっても温度補正式を求め、物性値を考慮しない場合の温度補正式との比較検討を行なった。

さらに X 型プローブを用いて、2次元の場合について気流方向を計算する方法を実験的に調べたものである。

なお本報では、測定対象として気流速度 2m/sec 以下、気流温度が常温～60°C の範囲で、温度変動が比較的ゆるやかな乱流を考えている。また測定器の出力信号は全て電子計算機によって処理している。

記号

線径	d (cm)
線長	$2l$ または L (cm)
線の断面積	S (cm ²)
線の熱伝導率	λ (J/sec cm °C)
線の熱伝達率	h (J/sec cm ² °C)
線の比熱	c (J/g °C)
線の密度	ρ (g/cm ³)
線に流す電流	i (A)

線の電気抵抗	R (Ω)
温度 0°C のときの線の電気抵抗	R_0 (Ω)
線の抵抗温度係数	α (1/°C)
気流温度	t_a (°C), $t_a = t_{a0} + \bar{t}_a + t_a'$
気流温度(初期)	t_{a0} (°C)
変化した気流温度の平均値	\bar{t}_a (°C)
変化した気流温度変動分	t_a' (°C)
線の温度	t (°C)
線の最高温度	t_t (°C)
線の平均加熱温度	t_h (°C)
境界膜平均温度(自然対流時)	t_m (°C), (3.9)式
境界膜平均温度(強制対流時)	T_m' (°K), (2.12)式
絶対温度	T (°K)
輻射係数	σ (J/°K ⁴ sec cm ²)
無次元温度	θ , (2.5)式
線の長さ方向距離	x (cm)
線の無次元距離	η $\eta = x/L$
時間	τ (sec)
無次元時間	τ' (2.5)式
気流速度(線に対する流れの方向は任意)	U_a (cm/sec)
気流速度(流れの方向は線に直角)	U (cm/sec)
空気の変粘性係数	ν (cm ² /sec)
空気の熱伝導率	λ_a (J/sec cm °C)
線の熱伝達率	h (J/sec cm ² °C)
熱線風速計の出力電圧	V (Volt)
熱線風速計の無風時出力電圧	V_0 (Volt)
温度補正係数(無風時(自然対流時))	D_0
温度補正係数(有風時(強制対流時))	D_1
水平線と気流方向との角度	φ (rad)
レイノルズ数	$Re = Ud/\nu$
グラスホッフ数	$Gr = G\beta((t-t_a)d^3/\nu^2)$
ヌセルト数	$Nu = hd/\lambda_a$

添字 M はマンガン線に対してつけるものとする。とくにタングステンとマンガンとを区別する必要があるときにはタングステンには w を付す。

2. 温度検出用センサーの特性について

2.1 センサーの概要

熱線風速計に使用している公称 $5\mu\text{m}$ の径のタング

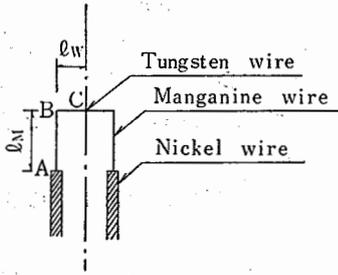


Fig. 1 Sensor for air temperature
気流温度検出用センサー

ステン線は電気抵抗値の温度係数が実測で約 0.0035 くらいである。これを利用すれば抵抗線式温度検出用センサーとして充分使用できる。以下その応答性能、感度などについて検討した。

このセンサーの使用目的は

- 1) 乱れた気流の温度の測定
- 2) 熱線風速計のセンサーの近傍で気流温度を検出し、熱線風速計の出力電圧の温度補正の計算の両用を考えている。

このセンサーの概要は Fig. 1 に示す。プローブは計算上 60, 80 μm の 2 種の径のマングニン線を考えた。マングニン線は温度変化に対する抵抗値の変化が他の金属に比し、きわめて少ない材料であるのでプローブに用いたものである。タングステン線とこのプローブとの接合はタングステン線の接合部分を銅メッキを施し、ハンダ付を行なった。タングステン線のメッキしない部分の長さは約 4mm とした。これをブリッジの一端に入れ、気流の温度の変化に対するブリッジの不平衡電圧を増幅し、温度を検出するものとする。

2.2.1 センサーの応答性について

はじめ気流温度 t_{a0} であったものが変化し t_a になるものとする。平均変化温度 \bar{t}_a 、変動分を t_a' とすれば t_a は

$$t_a = t_{a0} + \bar{t}_a + t_a'$$

で表わされる。

プローブの先端の温度はプローブの径が充分に小さいので、流れの中の同一点に数秒以上置けば温度は $t_{a0} + \bar{t}_a$ に達するものとみてよいためから応答性についての検討を要するのは t_a' に対するものである。

まずはじめに次のことを仮定する。

- 1) 線はきわめて細いので、半径方向の温度差は無視する。
- 2) マングニン線の温度による抵抗値および熱伝導

率の変化を無視するが、タングステン線の熱伝導率も測定範囲が狭いので温度の変化を無視し一定値とする。

3) 輻射による伝熱は対流によるそれと比較してきわめて小さいので、輻射による影響を無視するものとする。

気流温度が平均気流温度 ($=t_{a0} + \bar{t}_a$) から t_a' だけ変わったとすると、線の任意の微小部分の熱収支の関係を整理すれば、次のような式が得られる。ただし Fig. 1 の A 点をプローブの始点、B 点をタングステンとマングニン線の接合点、C 点は線の中点をそれぞれ表わし、かつ長さの原点を A 点とする。

マングニン線の部分、 $0 \leq x \leq l_M$ では、

$$\rho_M C_M \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_M \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{4h}{d_M} (t_{a0} + \bar{t}_a + t_a' - t) \quad (2.1)$$

また、タングステン線の部分、 $l_M \leq x \leq L_c$ (ただし $l_M + l_W = L_c$)

$$\rho_W C_W \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_W \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{4h}{d_W} (t_{a0} + \bar{t}_a + t_a' - t) \quad (2.2)$$

境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad x=0; \quad t &= t_{a0} + \bar{t}_a \\ 2) \quad x=l_M; \quad S_M \lambda_M \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{l_M-0} &= S_W \lambda_W \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{l_M+0} \\ & \quad (t)_{l_M-0} = (t)_{l_M+0} \\ 3) \quad x=L_c; \quad \frac{\partial t}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

初期条件は、

$$\tau=0; \quad t = t_{a0} + \bar{t}_a \quad (2.4)$$

である。

ここで、 t, τ, x をそれぞれ無次元変数 θ, τ', η を用いて次式のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= (t - t_{a0} - \bar{t}_a) / t_a' \\ \tau' &= \frac{\lambda_W}{\rho_W C_W L_c^2} \tau \\ \eta &= \frac{x}{L_c} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

いま、 $x=l_M$ のとき、 $\eta=\eta_1$ とし、(2.1)~(2.4) 式を無次元化する。

i) $0 \leq \eta \leq \eta_1$

$$P \frac{\partial \theta}{\partial \tau'} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + \frac{4L_c^2 h}{d_M \lambda_M} (1 - \theta) \quad (2.6)$$

ただし上式中の P は

$$P = \left(\frac{\rho C}{\lambda} \right)_M \cdot \left(\frac{\lambda}{\rho C} \right)_W \quad (2.7)$$

である。

ii) $\eta_1 \leq \eta \leq 1$ では、

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau'} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{4L_c^2 h}{d_W \lambda_W} (1 - \theta) \quad (2.8)$$

したがって境界条件, 初期条件も、

1) $\eta = 0 ; \theta = 0$

2) $\eta = \eta_1 ;$

$$S_M \lambda_M \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right)_{\eta = \eta_1 - 0} = S_W \lambda_W \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right)_{\eta = \eta_1 + 0}$$

および $\theta_{\eta = \eta_1 - 0} = \theta_{\eta = \eta_1 + 0}$

3) $\eta = 1 ; \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0$

4) $\tau' = 0 ; \theta = 0$

(2.9)

となる。

(2.6), (2.8) 式の解は電子計算機により求めるのであるが、その差分式は Crank-Nikolson の方法^{*1)}に従うことにする。

ここで空気の熱伝導率 λ_a , 動粘性係数 ν も以下のように温度による変化を考え、次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_a &= 0.000241(1 + 0.00314t_a) \quad (\text{J/sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}) \\ \nu &= 0.136 + 0.001t_a \quad (\text{cm}^2/\text{sec}) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

また、熱伝達率については Collis の与えた式^{*2)}

$$Nu = \left(\frac{T_m'}{T_a} \right)^{0.17} \{ 0.24 + 0.56 Re^{0.45} \} \quad (2.11)$$

$$T_m' = (T + T_a)/2 \quad (2.12)$$

によるものとする。なお、定数値は

$$l_M = 0.6 \text{ cm} \quad l_W = 0.2 \text{ cm}$$

$$\rho_M = 8.5 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_W = 19.1 \text{ g/cm}^3$$

$$C_M = 0.40 \text{ J/g}^\circ\text{C} \quad C_W = 0.14 \text{ J/g}^\circ\text{C}$$

$$\lambda_M = 0.22 \text{ J/sec cm}^\circ\text{C} \quad \lambda_W = 1.59 \text{ J/sec cm}^\circ\text{C}$$

$d_W = 5.24 \times 10^{-4} \text{ cm}$, $d_M = 0.006 \text{ cm}$ および 0.008 cm の2通り

$U = 30, 60, 100, 150, 200 \text{ cm/sec}$ の5通り

とした。

上記の連立方程式を計算した結果、センサーの温度分布を Fig.2 に示す。また Fig.3 はタングステン線の平均上昇温度 $\bar{\theta}$ と τ' 時間の関係を示すものである。この図から $d_M = 0.006 \text{ cm}$ の場合 $\tau' < 1.0 \times 10^{-2}$ で立ちあがりは速いが、それ以後はブロンズの部分の熱容量が大きいいためその影響があらわれ、応答がおく

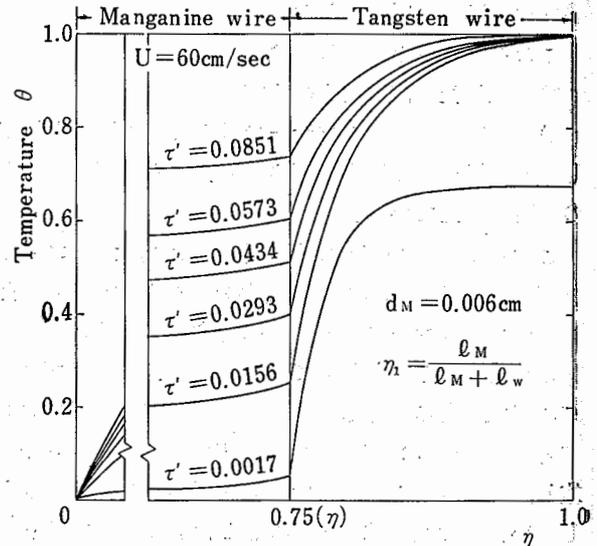


Fig.2 Temperature distribution of cold wire (in the case of $U = 60 \text{ cm/sec}$) 線の温度分布

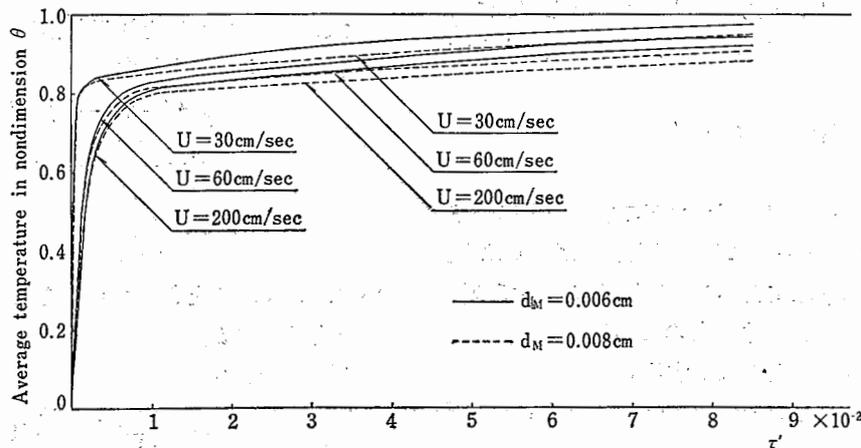


Fig.3 $\bar{\theta}$. vs. τ' $\bar{\theta}$ と τ' の関係

れる。 $\bar{\theta}$ が 0.90 に達するときの時間の逆数を応答周波数 f_r とすると、図より $U=60\text{cm/sec}$ のとき、 $\tau' = 5.74 \times 10^{-2}$ 。 τ は (2.5) 式より

$$\tau = 0.061(\text{sec}) \quad \therefore f_r = 16.3\text{Hz}$$

となる。また $d_M=0.008\text{cm}$ の場合には図より明らかのように線の熱容量の影響や大きく $d_M=0.006\text{cm}$ の場合よりいくぶん応答性がおちる。

本プローブの使用目的は室内環境温度、気流測定を考えているので、高い応答性は必要なく、上記の値程度で充分である。

2.2.2 感度について

Fig.18 に示すような温度検出用ブリッジ回路の場合の出力を計算してみると、タングステン線の温度係数を $0.0035/^\circ\text{C}$ としたとき、 $25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 程度となり、60db の前置増幅器で $25\text{mV}/^\circ\text{C}$ 程度の電圧を得ることができ、十分な出力電圧を得ることができる。

3. 熱線風速計の出力電圧と空気温度との関係について

3.1 タングステン線の熱関係の物性値について

容易に入手でき、温度係数が比較的大きく、線径がきわめて細い金属線として、白金線とタングステン線がある。タングステン線の場合、市販されている線は電灯用として生産されたもので、熱線風速計に使用しているものはさらに細く加工したものである。この線は

わずかではあるが、異種の金属が混入されているばかりでなく、不純物質も微量ではあるが混っている。このため純粋のタングステン線について得られた物性値とは異なると考えねばならない。とくにいま熱線の温度の計算で重要視しなければならない電気抵抗値の温度係数の値は不純物によって非常に影響をうける^{*)}。

純粋なタングステン線の物性値については C. J. Smithells^{*)} によってまとめられている。また比抵抗 ρ_R 、熱伝導率 λ については、P. O. Davis^{*)} は純粋のタングステンに対し、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \rho_R &= \{0.022(T-54) + 3.8 \times 10^{-6}(T-54)^2\} \times 10^{-6} \\ \lambda &= 2.92 \times 10^{-8} T / \rho_R \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

のように表わすことができている。

本研究に用いたタングステン線は僅少ではあるが、カリが混合されているので、実測の必要を認め、線と同成分とみられる線加工前の原料からテストピース(厚さ約 1.2mm, 径 10mm の円板)を切り出し、レーザー・フラッシュ法による熱伝導率計測装置(真空理工 KK 製, TC-1000 型)によって測定した。結果を Fig.4 に示す。またその実験式は次式となる。

$$\lambda = 1.70 - 0.0019t + 0.912 \times 10^{-5}t^2 \quad (3.2)$$

ただし $0^\circ\text{C} \leq t < 400^\circ\text{C}$

以後の熱線の温度計算においてはこの式を用いるものとする。

また、比重および、比熱については測定に使用したタングステン線の成分がほぼ純粋のタングステンに近

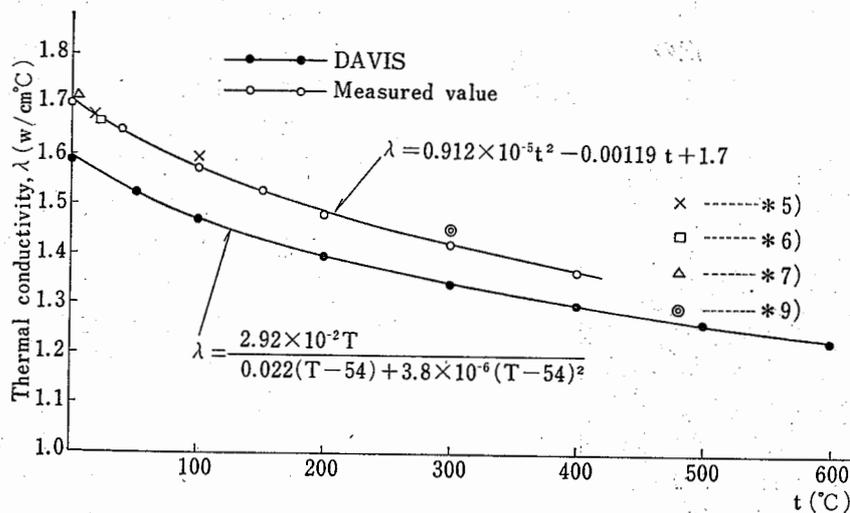


Fig.4 Thermal conductivity of tungsten
タングステンの熱伝導率

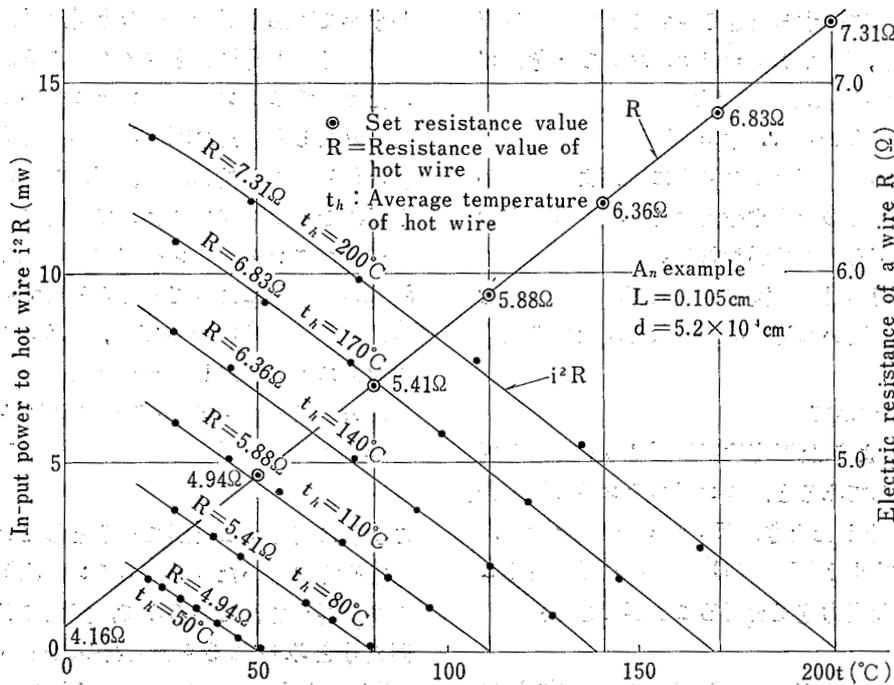


Fig.5 Characteristics of tungsten wire to temperature

- 1) Temperature. vs. electric resistance value
 - 2) Temperature. vs. in-put power to hot wire (in natural convection)
- 熱線の抵抗, 自然対流時における熱線への入力電力の温度に対する特性

いこと, 比重, 比熱は微量のカリ含有により大きく値が変わることはないとなし, 次の純粹のタングステンの値をとることにした。

密度 $\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$

比熱 $c = 0.14 \text{ J/g}^\circ\text{C}$

また線の電気抵抗の温度係数は次のような実験によって求めた。

実験は熱線のプローブを恒温槽に入れ, タングステン線に自己加熱が無視できる程度の電流 (0.5 mA 以下) を流し, 恒温槽の温度を室温より 150°C 位まで上

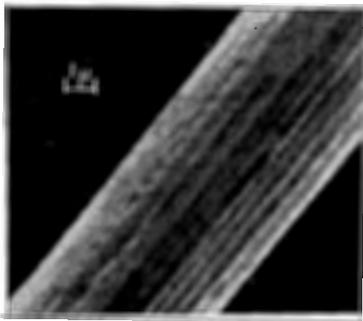


Fig.6 Measurement of the diameter of tungsten wire by electric microscope

電子顕微鏡によるタングステン線の径の測定 (約 10000 倍)

昇させ, 線の抵抗値を測定した。これより抵抗値と温度との関係は一例として Fig.5 に示すようにほぼ直線的な関係になり, これより抵抗の温度係数を求めることができる。しかし一般には異種類の金属を接合し電流を流すと Peliter 効果を生じ, この温度と抵抗値との関係には誤差を生ずるとされている*4)。この Peliter 効果による誤差の程度を確認するための実験を行なった。その方法は熱線をアルミ箔に包み, 恒温槽に入れて熱線風速計を設定抵抗を上記の方法で求めたある抵抗値に設定して熱線を抵抗値に対応する温度に加熱する。この状態のまま恒温槽の温度を設定温度近くまで上昇させる。そのとき熱線に供給された電力 i^2R と恒温槽の温度は Fig.5 のようになり, i^2R はほぼ温度上昇とともに熱線の設定温度に近づくことがわかる。これより Peliter 効果による影響は無視してもよい程度と考えられる。よって熱線の平均加熱温度はブリッジで正確に温度と抵抗値との関係を調べ, これより決定すればよい。

なお, 線の直径は走査型電子顕微鏡によって約 10000 倍に拡大し測定した結果は Fig.6 に示す。サンプルの試料では 5.15~5.30 μm であり, 平均で約 5.25 μm であった。また線の長さの測定は光学顕微鏡によって測った。

3.2 熱線の温度分布, プロングへの放熱量 および出力電圧の温度補正係数について

3.2.1 熱線の温度分布についての半理論式

熱線風速計は加熱細線の流体への放熱量より流体の速度を検出しようとするものである。よって、まず基本的に熱線の温度の分布状態について知る必要がある。

いま定温度型熱線風速計を用いる場合について考察することにする。

はじめに以下のように仮定をする。

1) 線の直径はきわめて微小であるので半径方向の温度差は無視する。

2) 定温度型熱線風速計は十分なフィードバック機構を有する装置であるため応答性能はきわめて高く、時間のおくれは無視するものとする。

また計算を行なうにあたり、熱線風速計の風速検出部のブリッジの辺の抵抗値を Fig.7 に示すようにし、辺の抵抗比を 1:100 とする。

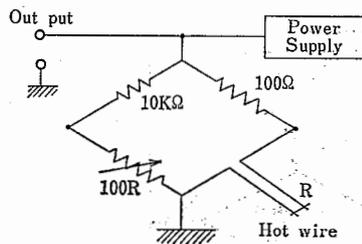


Fig.7 Resistance of the bridge of a hot wire anemometer
ブリッジの抵抗比

線の任意の点の微小の単位長さ当りの熱の収支に関して次のような微分方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dx} \left(\frac{dt}{dx} \right)^2 - \frac{4h}{d\lambda} (t - t_a) - \frac{4\sigma}{d\lambda} (T^4 - T_a^4) + \frac{i^2}{S\lambda} \frac{R_0(1+\alpha t)}{2l} = 0 \quad (3.3)$$

境界条件中は線の中央を原点とすれば

$$\left. \begin{aligned} 1) & x=0; \frac{dt}{dx}=0, t=t_t \\ 2) & x=l; t=t_a + \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

である。Δt は加熱により線の両端も空気温度より若干上昇することを見込んだものである。実験によれば Δt = 2~4°C 程度の上昇が認められたので、以後の計

算では $t_t - t_a$ の 2% にとるものとする。また、定温度型であるので、熱線の設定抵抗値を R とすると

$$R = \frac{2}{L} \int_0^L R_0 [1 + \alpha t(x)] dx \quad (3.5)$$

なる条件を満たす必要がある。

ここで (3.3), (3.4) 式を無次元化するために、次の変数変換を行う。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= (t - t_a) / t_a \quad 0 \leq \theta \leq 1 \\ \eta &= x/l \quad 0 \leq \eta \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ただし $t_a = t_t - t_a$ とおく。

(3.3) 式は

$$\frac{d^2 \theta}{d\eta^2} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{d\theta} \left(\frac{d\theta}{d\eta} \right)^2 - \frac{4l^2}{d} \frac{h}{\lambda} \theta - \frac{4l^2 \sigma T_a^4}{d\lambda t_a} \times \left\{ \left(\frac{T_a + t_a \theta}{T_a} \right)^4 - 1 \right\} + \frac{l_i^2 R_0}{2S\lambda t_a} \{1 + \alpha(t_a \theta + t_a)\} = 0 \quad (3.7)$$

境界条件は

$$\left. \begin{aligned} i) & \eta=0; \frac{d\theta}{d\eta}=0, \theta=1 \\ ii) & \eta=1; \theta=0.02 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

のように書き改められる。

次に (3.7) 式における熱伝達率 h については次のように自然対流時と強制対流時に分けて与えるものとする。

1) 自然対流時 (無風時) の場合

まず無風時 (自然対流時) の状態について解を求める理由は微風速領域の計測においては、熱線風速計の無風時の出力が風速に伴う出力に比しきわめて大であり、熱線の周囲の空気温度により大きな影響を受けるからである。

水平細線からの自然対流の無次元の熱伝達率についての実験式はこれまでいくつか提案されているが、坪内らの式*10)

$$Nu = 0.794 Gr^{1/15}$$

を用いるものとする。

ただし、空気の物性値は

$$t_m = (t - t_a) / \ln(t/t_a) \quad (3.9)$$

で計算される温度 t_m における値である。

2) 強制対流時の場合

強制対流時における加熱細線の熱伝達については、古くは King の式が著名であるが、ここでは Collis らの実験式を用いるものとする。

ただし、 Re 数の計算で流体の動粘性係数は流体の温度と細線の表面温度の平均値の温度のときの値をと

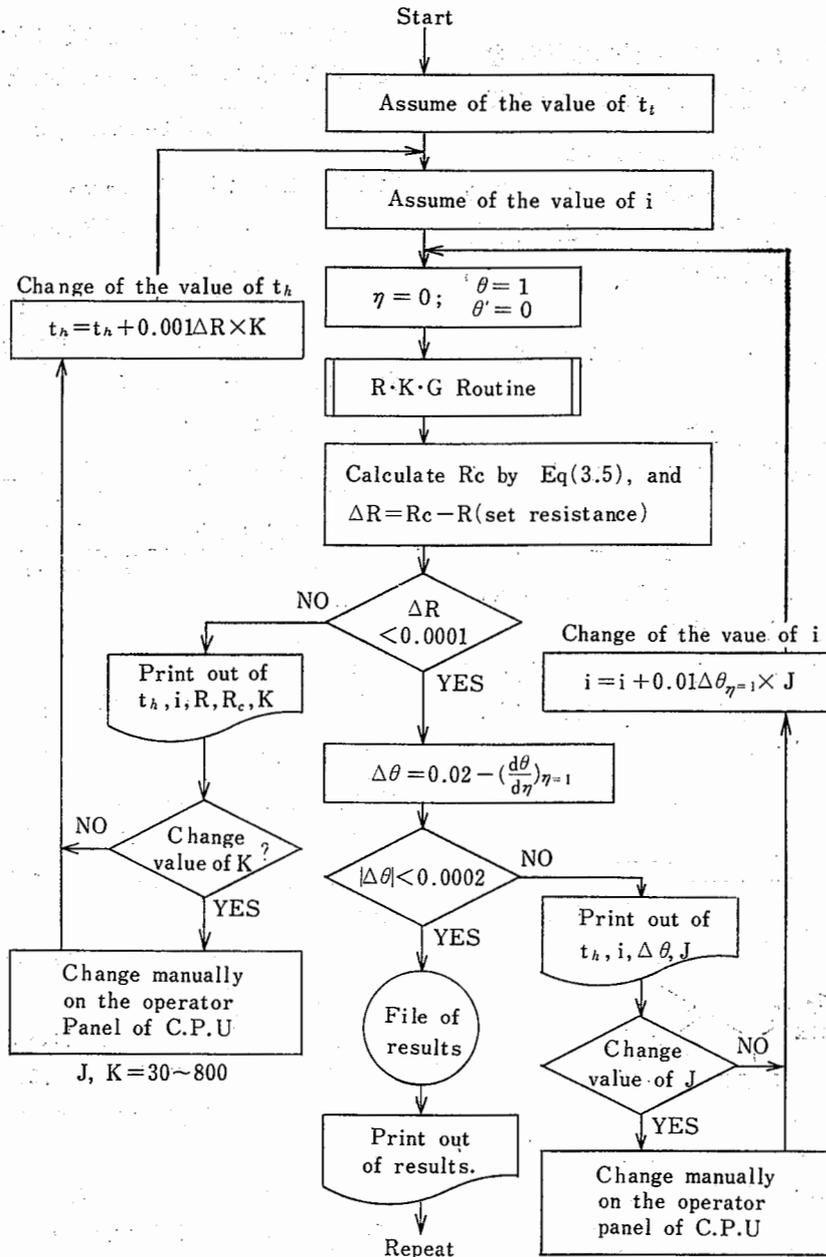


Fig.8 Flow chart of trial and error method in this calculation
本報で採用した試行錯誤のフローチャート

るものとする。

計算では次のような定数を全て組み合わせて行なった。

- i) 線長/線径 (L/d) ; 190.5, 380.9, 571.4 の 3 種
実用上から, d=5.25 μm, 10 μm の 2 種
- ii) 空気温度 t_a ; 20, 30, 40, 50, 60°C
- iii) 平均加熱温度 t_h ; 170, 200, 230°C
- iv) 流速 U ; 0, 10, 30, 60, 100, 150, 200, 250 cm/sec

ただし流速 U は線に直角に流れると考える値である。

以上のような定数値を与え (3.7) 式を Runge-Kutta-Gill 法によって解いた。

ただし、演算開始の時点で電流値 i および t_h は未定数であるので、はじめは任意の値を与え逐次、(3.5), (3.8) 式を満足させながら収斂させる方法によって i, t_h を決定し、解を求めた。

この試行錯誤による解を求める方法は Fig.8 のフローチャートに示す通りである。この図で、本計算では

Table 1 Examples of results of calculations
計算結果の一例

	t_a °C	U cm/s	V Volt	$i^2R(=Q)$ mW	$(\frac{\partial\theta}{\partial\eta})_{\eta=1}$	t_i °C	t_i/t_h	b	Q_h/Q	$(V/V)^2$	D	D_A	V_c Volt	V_A Volt
EX. 1	20	0	4.554	10.80	-1.934	242.8	1.42	-0.026	0.419	1.000	1.000	1.000	4.554	4.554
		30	4.953	12.78	-2.025	240.6	1.41	0.067	0.491				4.953	4.953
		60	5.150	13.81	-2.070	239.6	1.40	0.113	0.521				5.150	5.150
		100	5.334	14.82	-2.114	238.7	1.40	0.156	0.546				5.334	5.334
		200	5.644	16.59	-2.188	237.0	1.39	0.233	0.583				5.644	5.644
	40	0	4.269	9.49	-1.993	232.1	1.36	0.033	0.421	—	1.1357	1.1538	4.549	4.585
		30	4.624	11.14	-2.082	230.2	1.35	0.124	0.489	1.146			4.952	4.966
		60	4.807	12.03	-2.129	229.3	1.34	0.172	0.519	1.144			5.148	5.163
		100	4.977	12.90	-2.174	228.5	1.34	0.218	0.543	1.145			5.330	5.346
		200	5.265	14.43	-2.253	227.1	1.33	0.299	0.580	1.150			5.638	5.655
	50	0	4.112	8.81	-2.021	226.8	1.33	0.061	0.421	—	1.2241	1.2500	4.549	4.597
		30	4.450	10.31	-2.110	225.2	1.32	0.153	0.488	1.237			4.955	4.975
		60	4.625	11.14	-2.158	224.3	1.32	0.202	0.518	1.236			5.150	5.171
		100	4.787	11.94	-2.205	223.6	1.32	0.249	0.542	1.237			5.331	5.352
		200	5.064	13.35	-2.280	222.2	1.31	0.333	0.578	1.243			5.640	5.661
EX. 2	20	0	3.661	16.94	-3.571	214.7	1.26	1.644	0.796	1.000	1.000	1.000	3.661	3.661
		30	4.219	22.50	-4.123	208.6	1.23	2.207	0.828				4.219	4.219
		60	4.487	25.46	-4.386	206.4	1.21	2.476	0.840				4.487	4.487
		100	4.732	28.30	-4.619	204.7	1.20	2.713	0.850				4.732	4.732
		200	5.135	33.32	-5.024	201.7	1.18	3.126	0.863				5.135	5.135
	40	0	3.440	14.96	-3.752	207.0	1.22	1.828	0.794	—	1.1336	1.1538	3.662	3.695
		30	3.941	19.62	-4.281	202.6	1.19	2.368	0.826	1.144			4.221	4.233
		60	4.188	22.20	-4.551	200.7	1.18	2.644	0.838	1.142			4.486	4.498
		100	4.414	24.62	-4.801	199.1	1.17	2.899	0.847	1.143			4.728	4.741
		200	4.789	29.00	-5.222	196.8	1.16	3.328	0.861	1.151			5.130	5.144
	50	0	3.318	13.92	-3.829	203.8	1.20	1.907	0.794	—	1.2204	1.250	3.665	3.709
		30	3.792	18.17	-4.357	199.7	1.17	2.445	0.825	1.236			4.224	4.239
		60	4.029	20.52	-4.634	197.9	1.16	2.728	0.837	1.234			4.488	4.504
		100	4.245	22.78	-4.889	196.5	1.16	2.988	0.846	1.236			4.728	4.746
		200	4.603	26.78	-5.319	194.3	1.15	3.428	0.859	1.245			5.128	5.146

Ex. 1 : $L=0.1$ cm, $d=5.25$ μ m, $t_{a0}=20$ °C, $t_h=170$ °C, $R=6.005$ Ω

Ex. 2 : $L=0.3$ cm, $d=5.25$ μ m, $t_{a0}=20$ °C, $t_h=200$ °C, $R=19.20$ Ω

打ち切り誤差として設定抵抗値 R については, $\Delta R=0.0001$ Ω , 線端の温度 $\theta_{\eta=1}$ については, $\Delta\theta_{\eta=1}=0.0002$ とし, 計算結果がこれらの値以下になったとき打ち切った。また K と J の値が適当にえらばれたとき収斂所要時間は 20~60sec であった。

3.2.2 計算結果

1) 熱線の温度分布

線の寸法 L , 平均加熱温度 t_h , 空気温度 t_a , 熱伝導率および, 熱伝達率を与えて (3.7) 式の数値解を求めた結果, 解はほぼ 2 次関数に似た曲線となるが, L などの値により少しずつ曲線が変形するので次のような関数式で近似することを考えた。

$$\theta = 1 - 0.98\eta^2 e^{b(\eta-1)} \quad (3.10)$$

よって, プロングとの接合点の温度勾配は,

$$\left(\frac{d\theta}{d\eta}\right)_{\eta=1} = -0.98(2+b) \quad (3.11)$$

となる。左辺の値はすでに計算されているので、上式より b の値は得られる。いま b を、(3.7) 式を解くときに定数として与えたパラメータ、 t_a, t_h, L, d, U などの関数で表わすことを考え、最小 2 乗法により試行錯誤を行った結果、次のような式が得られた。

i) 自然対流時の場合

$$b = \left(0.0924 \frac{T_h}{T_{a0}} + 0.533 \times 10^{-3} L^{1.485} d^{-1.364} - 0.760 \times 10^{-3} \frac{T_h L}{T_{a0} d}\right) \frac{T_a}{T_{a0}} - 0.368 \frac{T_h}{T_{a0}} - 0.405 \times 10^{-4} \frac{T_h L}{T_{a0} d} - 0.309 \quad (3.12)$$

となった。

ii) 強制対流時

$$b = Re^{0.38} \left\{ \left(0.298 \times 10^{-6} \frac{L}{d} - 0.974 \times 10^{-3}\right) \frac{L}{d} \frac{T_h}{T_{a0}} + \left(0.299 \times 10^{-2} \frac{L}{d} + 0.207\right) \frac{T_a}{T_{a0}} + 0.337 \times 10^{-2} \frac{L}{d} - 0.726 \right\} + \left(0.390 \times 10^{-5} \frac{L}{d} + 0.754 \times 10^{-3}\right) \frac{L}{d} \frac{T_a}{T_{a0}} - 0.310 \frac{T_h}{T_{a0}} + 0.219 \frac{T_a}{T_{a0}} - 0.117 \quad (3.13)$$

となった。ただし動粘性係数 ν は温度 $(t_h + t_a)/2.0$ の

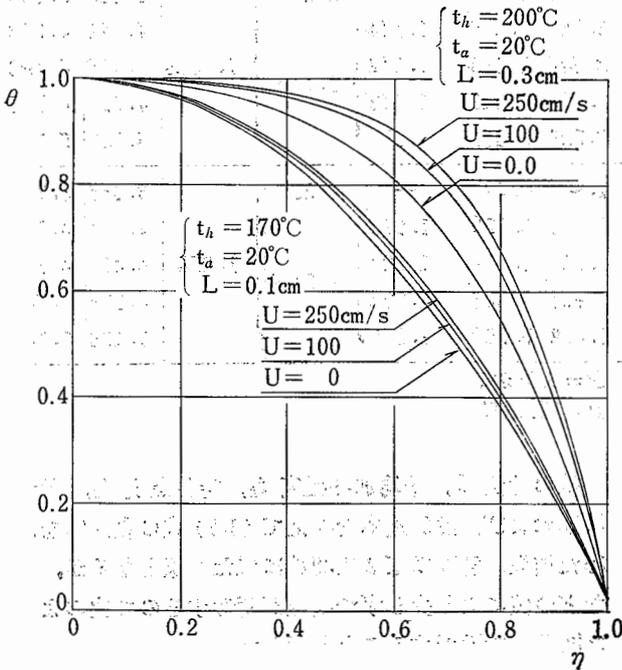


Fig.9 Temperature distribution of a hot wire
熱線の温度分布

ときの値をとるものとする。

この半理論的近似式に対する中央誤差を全データまとめて計算してみると 0.46°C となり、この近似式はほぼ満足できる精度をもっている。

その例として、 $d=0.000525\text{ cm}$, $2l=0.1\text{ cm}$, $0, 3\text{ cm}$, $t_h=170^\circ\text{C}$, 200°C , $t_a=20^\circ\text{C}$ のときの線の温度を Fig.9 に示す。また計算結果の一部を表にしたものが Table 1 である。

2) 熱線の最高温度について

熱線を過剰に加熱した場合、酸化が促進さ、熱線の損耗が著しい。このため加熱限度を知る上に、最高加熱温度を求める必要がある。これは (3.5), (3.6), (3.10) 式より

$$t_i = \frac{t_h - t_a}{1 - 0.98 \left(\frac{1}{b} - \frac{2}{b^2} + \frac{2}{b^3} - \frac{2}{b^3} e^{-b} \right)} + t_a \quad (3.14)$$

となる。

Table 1 には t_i および t_i/t_b を求めた結果の一部を掲げた。最高温度は概略、平均加熱温度が 170°C のときはその 1.31~1.42 倍、 200°C のときはその 1.15~1.27 倍程度になっている。

3) プロングへの伝熱量および対流放熱量について
2本のプロングへの伝熱量 Q_p は、(3.10) 式から

$$Q_p = 1.96(2+b) \frac{t_d}{l} \lambda S \quad (3.16)$$

となり、前項の b の値を用いれば伝熱量を計算することができる。

つぎに対流による放熱量 Q_h は

$$Q_h = 2 \int_0^1 t_a \theta h d\eta \quad (3.17)$$

で表わされ、温度分布が求められているので Q_h は求

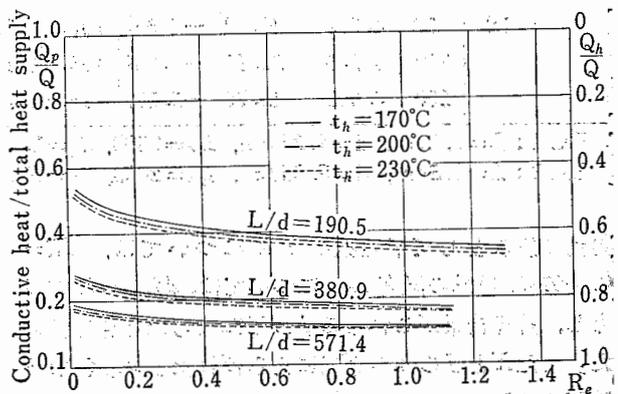


Fig.10 Ratio of convective heat, conductive heat at the prong to total heat supply
入力熱量に対する対流、伝熱放熱量比

められる。また輻射による放熱量は入力熱量の 0.2~0.3% であるのでこれを無視するものとして、入力熱量に対するプロングへの伝熱量、および空気への対流熱量の比を示したものが Fig. 10 である。また Table 1 の表中に他の計算結果と共に記した。

これらの結果を用いれば、熱線に流れる電流 i は

$$i^2 = \frac{1}{R} (Q_p + Q_h) \quad (3.18)$$

として求められる。計算ではブリッジの抵抗比は、1:100 としたが、これ以外の抵抗比のとき、あるいは辺の抵抗値を本計算に仮定した値と異るときも上式より出力電圧を求めることができる。

4) 出力電圧の温度補正式について

熱線風速計の出力電圧の温度補正については、附録のような方法によることができるとされている。しかし、附録の場合には温度による物性値の変化については考慮していないので、微風速の測定には誤差が生ずるので好ましくない。以下 (3.7) 式の数値解をもとに物性値の変化を考慮に入れた場合の温度補正式について検討を加えた。

温度補正式を求めるのに物性値の変化を考える場合には付録のように簡単ではない。本報では (3.7) 式を解くときに副次的に求めた V, t_h と、定数として与えた t_a, t_{a0}, L から実用性を考え、以下のように t_h, t_a, t_{a0}, L を変数とする関数式で表わすことにする。

$$\frac{V^2}{V_0^2} = D(t_h, t_a, t_{a0}, L) \quad (3.19)$$

V, V' はそれぞれ気流温度 t_{a0}, t_a のときの出力電圧を表わす。温度補正式の変数の組み合わせは温度分布の近似式を決定したときと同じように、最小二乗法を用いて試行錯誤を行った結果、次のような近似式が得られた。

1) 自然対流時

$$D_0 = \frac{t_h - t_{a0}}{t_h - t_a} \left\{ 1 - \frac{T_a - T_{a0}}{T_a} (0.1858 + 0.8040 \times 10^{-3} t_h + 0.6599 \times 10^{-6} t_a^2 - 0.2354 \times 10^{-2} t_a + 0.1604 L) \right\} \quad (3.20)$$

のように表わすことができる。

2) 強制対流時

熱線風速計の出力電圧 V と R_e の関係は N_w について (2.11) 式を採用した関係から King の式になる。すなわち $V^2 = V_0^2 + A \cdot R_e^{0.45}$ (3.21)

のように表わすのが望ましいが、出力電圧と R_e との関係は測定開始の時点で明らかにしておく必要がある。この場合 $R_e^{0.45}, A$ の計算など煩雑であるので、(3.21) 式を付録と同様な式

$$V^2 = V_0^2 + A\sqrt{U} \quad (3.22)$$

のように置いたとき、温度補正が、十分な精度で行なうことができるか否かを検討してみた。

まず、 $(V/V_0)^2$ が流速 U に対して独立であるかどうか確認するため計算した結果の一例を Table 1 の $(V/V_0)^2$ の欄に記した。この欄で、同一温度 (t_a) の欄の $(V/V_0)^2$ 値をみると微風速の場合には、流速の影響は認められるが、実用上流速の影響を無視するものとし、温度補正式を (3.19) 式のように置けるものとする。よって温度補正式 D_1 を求めると、

$$D_1 = \frac{t_h - t_{a0}}{t_h - t_a} \left\{ 1 - \frac{T_a - T_{a0}}{T_a} (0.2573 - 0.4134 \times 10^{-3} t_h + 0.3394 \times 10^{-4} t_a^2 - 0.3683 \times 10^{-2} t_a - 0.03375 L) \right\} \quad (3.23)$$

が得られた。

Table 1 の D の欄は、 $U=0.0$ cm/sec のときは (3.20) 式より D_0 の値を、強制対流時のときは (3.23) 式より D_1 の値をそれぞれ計算し、記入したものである。また D_A の欄は付録の方法 (物性値の温度による変化を考慮しない場合) によるときの温度補正值である。 V_0, V_A はそれぞれ、 D, D_A によって補正された出力電圧を示す。

これらの結果を比較してみると、Ex. 1 の場合まず $U=0$ のときにおいて D と D_A の両者を比較すると、かなりの差があり、 $t_a=50^\circ\text{C}$ に上昇したとき V_0, V_A を比較すると、それぞれ 4.549 (V), 4.597 (V) となり、 $t_a=t_{a0}$ のときの電圧は 4.554 (V) であるので、物性値の変化を考えないときの補正式によれば 43mV ほど過大となる。(3.20) 式の補正によるときは補正誤差は数 mV ほどで、ほど満足できる。

次に強制対流時の場合について同様な比較を行なってみる。気流温度が変化したときの同一速度の V_0, V_A をそれぞれ $t_a=t_{a0}$ におけるそれらと比較すると、計算上 V_0 の方はおよそ数 mVolt 以下の誤差で補正されるが、 V_A の方は約 20(mV) 程度の誤差が生ずる。よって (3.22) 式のような関係が存在するものとして (3.23) 式を計算上の温度補正式として充分であろう。しかしこの程度の誤差を問題としなければ、付録のような温度補正の方法が計算上簡単に都合よい。

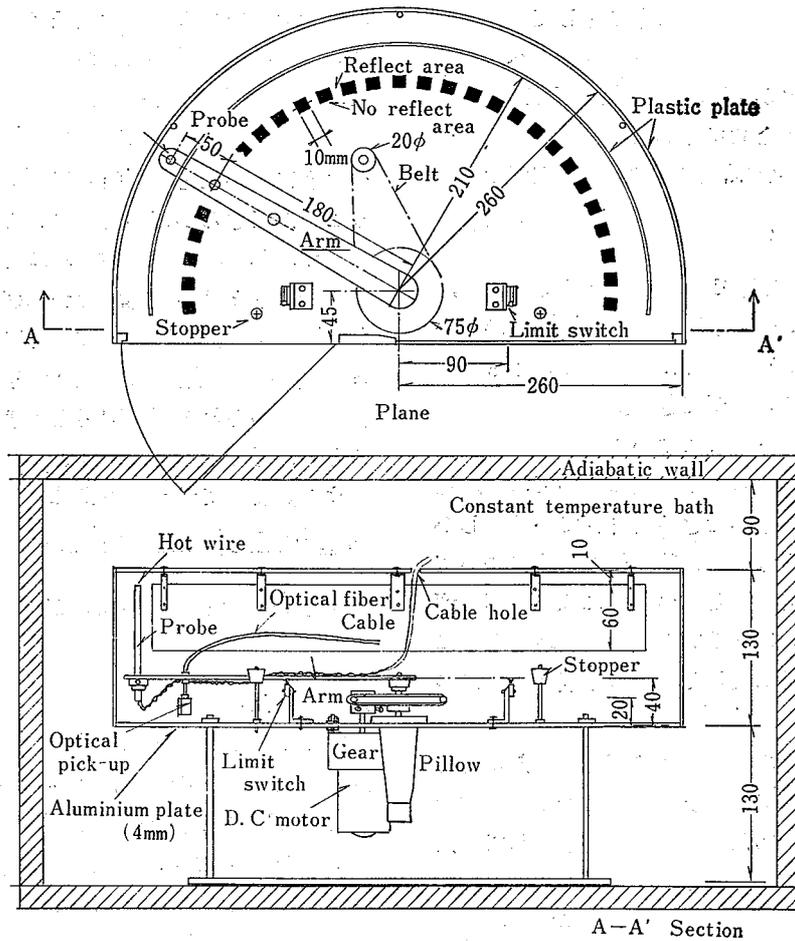


Fig.11 Apparatus of air velocity test
 気流速度実験装置

3.3.3 実験

1) 自然対流時

実験は 3.1 において (p.5) 記したような方法で出力電圧を測定した。プローブを水平に保ち、熱線の角度を水平面に対し 0~45° に変化させ出力電圧を測定したが 10mV 程度の差があることが認められたが無視しても大差はないであろう。

2) 強制対流の場合

実験装置の寸法等概略は Fig.11 に示す。この装置はアームの先端にプローブを取り付け、ケーブルの巻きつきのないようにアームを半回転させる方法をとった。回転速度は直流モーターを用い電圧制御による。速度の検出は、図のように平らな新しいアルミ板の表面に正確に幅 10mm (速度検出線上で) の黒色艶なし塗装を施す。アームの一点にオプティカル・ファイバ

ーで作られた反射光伝導線の先端を塗装面より 2~3 mm 離して固定する。この光伝導線他端には光電子を用いたアルミ板面反射光検出装置に接続されていて、アームを動かすと、この装置の出力端子からは黒色塗装部分、アルミニウム地の部分に応じてパルス信号が生じる。この信号をアナログ・デジタル変換を通して計算機に接続し、このパルス幅を正確に計測することによりプローブの速度を検出した。また、温度に対する出力電圧を調べる目的からこの装置全体を熱風式恒温槽に入れて使用する。70°C 位まで温度を上昇させて実験を行ったが支障なく使用できた。

この装置の速度検出範囲は 4.0~120cm/sec 程度に見込んで設計した。また寸法は上記のように恒温槽に入れる目的から、図のような大きさとしたものである。なお使用した熱線風速計は日本科学工業株式会社

Table 2 Examples of comparison in the compensated voltage by compensation equations derived from the results of experiments and calculations (\times -type probe) 実験および計算から得られた温度補正式によって補正された電圧の比較例(\times 型プローブを使用)

	t_a (°C)	U_a (cm/s)	U (cm/s)	V (Volt)	$D_{(CAL)}$	$D_{(EXP)}$	V_{c1} (Volt)	V_{c2} (Volt)
EX. 3	28.2	0.0	0.0	4.756	1.0000	1.0000	4.756	4.765
		20.2	15.2	4.848			4.848	
		58.1	43.6	5.027			5.027	
		96.9	72.7	5.179			5.179	
	36.6	0.0	0.0	4.656	1.0457	1.0466	4.761	4.763
		21.8	16.4	4.748	1.0515	1.0490	4.869	4.863
		59.2	44.4	4.915			5.039	5.035
		97.0	72.8	5.050			5.177	5.174
	43.7	0.0	0.0	4.561			1.0897	1.0903
		16.4	12.3	4.625	1.0992	1.0953	4.848	4.839
		51.6	38.7	4.780			5.012	5.003
		96.1	72.1	4.937			5.176	5.167
	50.8	0.0	0.0	4.463			1.1391	1.1383
		18.3	13.7	4.532	1.1524	1.1462	4.864	4.853
		58.5	43.9	4.697			5.043	5.032
		98.1	73.6	4.827			5.182	5.170
EX. 4	24.3	0.0	0.0	3.832			1.0000	1.0000
		14.8	11.1	3.966	3.966			
		55.2	41.4	4.312	4.312			
		107.4	80.6	4.565	4.565			
	33.5	0.0	0.0	3.726	1.0588	1.0589	3.833	3.834
		18.8	14.1	3.901	1.0643	1.0637	4.025	4.023
		51.3	38.5	4.157			4.285	4.287
		106.7	79.7	4.426			4.567	4.564
	42.3	0.0	0.0	3.620			1.1248	1.1240
		12.5	9.4	3.716	1.1353	1.1312	3.959	3.952
		54.1	40.6	4.042			4.307	4.299
		114.9	86.2	4.311			4.593	4.585
	52.9	0.0	0.0	3.468			1.2198	1.2148
		15.4	11.6	3.605	1.2353	1.2281	4.007	3.995
		58.5	43.9	3.904			4.339	4.326
		113.6	85.2	4.148			4.610	4.597

1. Values of the column of $D_{(CAL)}$ are obtained by eq(3.20) ($U=0$), or eq(3.23) ($U \neq 0$), and those of $D_{(EXP)}$ are obtained by eq(3.24) ($U=0$), or eq(3.25) ($U \neq 0$)
2. EX. 3 ; $t_h=193.4$, $L=0.10$ cm
3. EX. 4 ; $t_h=170.0$, $L=0.15$ cm

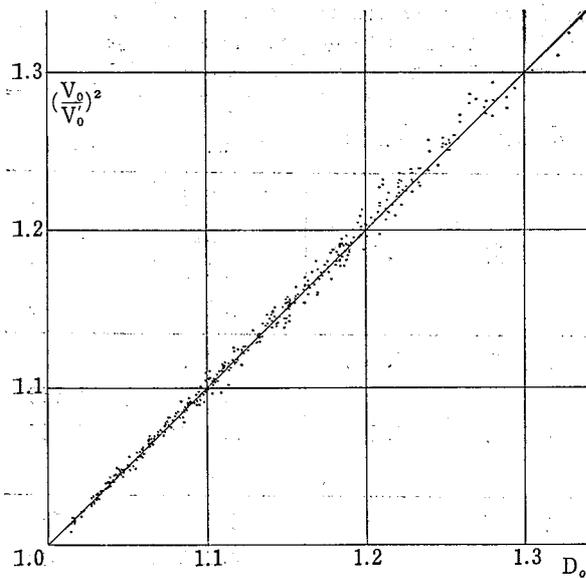


Fig. 12 $(V_0/V_0')^2$. vs. D_0
自然対流時の出力と温度補正係数 D_0

製 Model IAM-60-28/1111 である。

3.3.4 実験の結果

1) 自然対流時の出力電圧および温度補正式

空気温度と出力電圧についての実験結果の一例を Table 2 の $U=0.0$ の欄に示す。

この結果を用い、半理論計算値の場合と同様な方法で D_0 の近似式を求めてみると、

$$D_0 = \frac{t_h - t_{a0}}{t_h - t_a} \left\{ 1 - \frac{T_a - T_{a0}}{T_a} (0.3838 - 0.3785 \times 10^{-3} t_h + 0.5264 \times 10^{-4} t_a^2 - 0.4187 \times 10^{-2} t_a + 0.1604 L) \right\} \quad (3.24)$$

となる。また、実験結果をまとめて、 $(V_0/V_0')^2$ と、 D_0 の関係を図に示したものが Fig. 12 である。(3.20) 式の D_0 と比較してみると、係数に違いがあるが、Table 2 の $U=0.0$ の場合に $D_{(CAL)}$ と $D_{(EXP)}$ を比較してみれば、両者の差はきわめて小さい。全体の平均値で、前者は後者に対して 0.17% 程度大きい値となる。これを出力電圧に換算してみると数 mV 程度の誤差で実用上両者ほぼ一致した結果となる。また物性値を考慮しない補正式 $(t_h - t_{a0}) / (t_h - t_a)$ は、 $D_{(EXP)}$ に対し 1.21% 大となり、過大に補正することになる。誤差電圧は V_0, V_A の比較のところで述べた数値よりさらに大きくなる傾向にある。 $D_{(EXP)}$ の補正精度は電圧に換算して約 10mV 以下となり、充分な精度を有する。

2) 強制対流時

実験を行なった結果の一部を自然対流時の場合の結果と併せて示すと、Table 2 のようになった。同表には流速 U に対する出力電圧 V を記した。なお実験では X 型プローブを用いて行ったので、後の 4.2.1 で触れるが、 45° に横切る気流（プローブに平行）の速度 U_a が熱線に対して直角に流れるものとした等価的な気流速度（実験的には (4.7) 式によるものとして計算）を U として同表に併記したものである。

実験の場合でも (3.23) 式と同じ形の補正式を考え、実験データを同様な処理を施すと、次のような補正式が得られた。

$$D_1 = \frac{t_h - t_{a0}}{t_h - t_a} \left\{ 1 - \frac{T_a - T_{a0}}{T_a} (0.4459 - 0.6617 \times 10^{-3} t_h + 0.2712 \times 10^{-4} t_a^2 - 0.4853 \times 10^{-2} t_a - 0.03375 L) \right\} \quad (3.25)$$

また Fig. 13 は実験データを処理し D_1 と $(V/V')^2$ の関係をプロットしたものである。この図でややばらつきが見られるが、その主な原因は出力電圧の測定および平均加熱温度の推定が不正確であったためであり、またそのほか補正式にわずかではあるが流速の影響が入っているためであろうと思われる。

Table 2 には (3.23) 式の温度補正式、 $D_{(CAL)}$ と (3.25) 式の補正式 $D_{(EXP)}$ 、これらの補正式によって

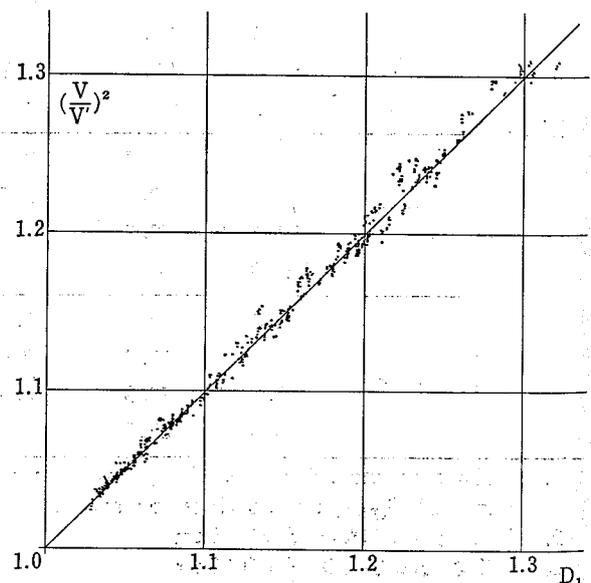


Fig. 13 $(V/V')^2$. vs. D_1
強制対流時の出力と温度補正係数 D_1 の関係

補正されたそれぞれの電圧 V_{c1} , V_{c2} を記した。これより $D_{(EXP)}$ に対する $D_{(CAL)}$ の値は実験データ全体の平均で約 0.48% ほど大となっている。これを電圧に換算すると平均で約 10mV 程度の差が生ずる。また物性値を考慮しない場合の補正式では $D_{(EXP)}$ に対して、約 1.18% ほど大となる。よって精度よく測定する必要のあるときには温度による物性値の変化も考慮しなければならない。

4. 微風速気流の方向の計算について

4.1 速度測定範囲の分割

気流の速度を測定する場合、その方向を併せて検出する必要がある場合が多い。熱線風速計の場合、細い円柱の軸に対し、ある角度で気流が円柱を横切って流れるときの対流による放熱量から方向を検出しようとするものであるが注), とくに気流速度がきわめて小さいとき(例えば速度が 15cm/s 以下のときには角度による放熱差はきわめて少く、気流方向の検出は不可能に近い。気流速度がやや大きくなると角度による放熱差が生ずるので、電子計算機の利用によって細かい計算を行えば、方向の検出は可能となるが、それでも十分な精度で検出することは困難である。その原因は上に述べたことその他、熱線風速計の出力電圧が不安定であること、例えば、塵の付着、長時間測定していると熱線が伸びて彎曲する、熱線の物性値が変化するなどである。本報ではこのような問題点があることを熟知し、多少の誤差を許容するとして、以下のような方法で演算処理し、気流方向を検出しようとするものである。ただし、ここでは主流方向とそれに直角な一方向を含む 2次元面に限定するものとし、3次元の方向検出は熱線の機構上から困難であるので、3次元方向については考慮しないものとする。

熱線風速計の出力電圧と気流速度との関係は熱伝達率に対する考え方から (3.21) 式を用いるべきであるが、計算をできるだけ簡便にすること、予め速度と出力電圧との較正を行なうので、3.2.2 の温度補正の項でも検討したように、気流速度が約 23cm/s 以上の場合において出力電圧と気流速度の関係は概略

$$V^2 = V_{01}^2 + A\sqrt{U} \quad (4.1)$$

注. 一般には流速が大きいき、X型プローブの2チャンネルの信号の和と差から直角方向の流速を求める方法が行なわれている。

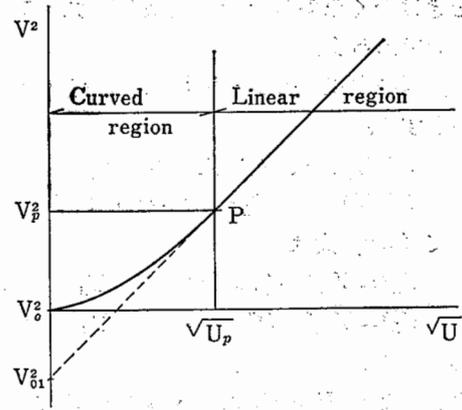


Fig.14 Division of measurement range
測定範囲の分割

のような関係にあるとみなす。A は定数、 V_{01} は対流が起らないと仮定したときの無風時出力電圧である。

また 23cm/sec 以下の速度のときには自然対流の影響により Fig.14 のように曲線となるので

$$V^2 = V_0^2 + A_0U \quad (4.2)$$

で近似するものとする。 A_0 は定数、 V_0 は無風時出力電圧(自然対流時)である。

よって Fig.14 のように流速によって V^2 と \sqrt{U} の関係を 2 領域に分割して考え、測定するものとする。また上記 2 式が交差する境界線上の点 P における流速を U_p 、出力電圧を V_p とすれば、これらは実験から既知であるとする。

4.2 曲線領域における気流方向の検出

熱線の水平線となす角度を $\pi/4$ 、方向未知の気流 U_a の水平線となす角度を φ とし、Fig.15 のように角度 φ をとるものとする。以下変数の添字の R と L は X 型プローブの背面から上流方向に向かってそれぞれ右側、左側の熱線を表示するものとする。

φ の範囲は熱線のプローブの構造上の制約から、 $-\pi/4$ から $\pi/4$ であり、この範囲外の方向気流に触

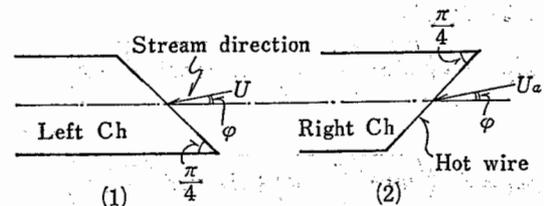


Fig.15 Angle between hot wire and stream direction in a X type probe
X型プローブの熱線と流れの方向との角度について

れたときは全く無意味な計算結果を示すがこれは止むを得ないであろう。

(4.2) 式の右辺の第2項を次のような近似式で表わすものとする。

$$\left. \begin{aligned} (A_0 U)_R &= U_a (C_R \sin \varphi + D_R) \\ (A_0 U)_L &= U_a C_L \sin \varphi + D_L \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

よって (4.2) 式は

$$V_R^2 = V_{0R}^2 + (C_R \sin \varphi + D_R) U_a \quad (4.4a)$$

$$V_L^2 = V_{0L}^2 + (C_L \sin \varphi + D_L) U_a \quad (4.4b)$$

で表わされる。

境界条件より $U_a = U_p$ のとき $V^2 = V_p^2$ であるので

$$\left. \begin{aligned} V_{PR}^2 &= V_{0R}^2 + (C_R \sin \varphi + D_R) U_p \\ V_{PL}^2 &= V_{0L}^2 + (C_L \sin \varphi + D_L) U_p \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

なる関係がある。(4.4a), (4.4b) 式より U_a を消去すると気流方向は

$$\sin \varphi = \frac{-(V_R^2 - V_{0R}^2) D_L + (V_L^2 - V_{0L}^2) D_R}{(V_R^2 - V_{0R}^2) C_L - (V_L^2 - V_{0L}^2) C_R} \quad (4.6)$$

から求められる。なお上式中の V_{0R}, V_{0L} は実験的に前もって求めておく。

4.3 直線領域における気流方向の検出

任意の φ の気流速度 U_a に対し熱線が感知する気流速度 U は

$$\left. \begin{aligned} R_{ch} \text{ では} \\ U_R &= U_a \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) + B_R^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right)} \\ L_{ch} \text{ では} \\ U_L &= U_a \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \varphi \right) + B_L^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \varphi \right)} \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

とおけるものとする。 B_R, B_L は実験的に定められる値である*14)。いまこれを (4.1) 式の U に代入すると

$$V_R^2 = V_{01R}^2 + m_R \sqrt{U_a} \quad (4.8a)$$

$$V_L^2 = V_{01L}^2 + m_L \sqrt{U_a} \quad (4.8b)$$

となる。ただし

$$m_R = A_R \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) + B_R^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right)} \quad (4.9a)$$

$$m_L = A_L \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \varphi \right) + B_L^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \varphi \right)} \quad (4.9b)$$

とおく。

(4.8a), (4.8b) 式より $\sqrt{U_a}$ を消去すれば

$$\frac{V_R^2 - V_{01R}^2}{V_L^2 - V_{01L}^2} - \frac{m_R}{m_L} = 0 \quad (4.10)$$

なる関係が得られ、この式を満足するように φ をえらべば気流方向が求められる。ただし、 V_{01R}^2, V_{01L}^2 は実験を行なって調べてみると、一定値とはならず φ とある関係にある。よってこれらを φ の関数で表わしておく必要がある。いま直線領域と曲線領域の境界線上 $U_a = U_p$ では、(4.8a), (4.8b) 式より

$$V_{PR}^2 = V_{01R}^2 + m_R \sqrt{U_p}$$

$$V_{PL}^2 = V_{01L}^2 + m_L \sqrt{U_p}$$

なる関係がある。また (4.5) 式を用いて V_{PR}^2, V_{PL}^2 を消去すると、 V_{01R}^2, V_{01L}^2 は

$$V_{01R}^2 = V_{0R}^2 + (C_R \sin \varphi + D_R) U_p - m_R \sqrt{U_p} \quad (4.11a)$$

$$V_{01L}^2 = V_{0L}^2 + (C_L \sin \varphi + D_L) U_p - m_L \sqrt{U_p} \quad (4.11b)$$

で表わせる。これを (4.10) に代入し、その三角方程式の解を求め、気流方向を決定し、その結果から (4.9a), (4.8a) より気流速度 U_a を決定する。ただし、(4.10) 式の解は数値解に依らざるを得ないが、電子計算機の利用によって容易に求められる。

4.4 定数の決定

定数は実験によって決定されねばならない。微気流速度と出力電圧の較正の方法の一つとして、プローブを固定し空気を流動させる方式があるが微風速度では較正用気流が乱れ、よい結果を得ることはむづかしいので、本報ではプローブ自身を定速度で動かす方法によった。

本装置は長さ 4m, 高さ 40cm, 幅 60cm の密閉空間を作り、内部にはプローブをとりつけた移動台車をレール上円滑に動かす。この台車の駆動は電動方式で細い綱糸を定速度で引っ張る方法によった。この較正装置の測定範囲は、4~65 cm/sec である。プローブの取り付けは水平線とのなす角度が $-\pi/4 \sim \pi/4$ の範囲で任意にかえられるような構造になっている。

この装置を用い $\varphi = \pm\pi/4, \pm\pi/6, \pm\pi/12, 0$ の7段階にプローブを傾け、熱線を横切って流れる気流の方向を変え、速度較正を行なった。測定結果の一例を示すと Table 3 のような結果が得られた。同表には $U_a = U_1 (60.5 \text{ cm/s})$ と $U_a = U_p (23.8 \text{ cm/sec})$ のときの上記の角度における出力電圧 V_L, V_P を記した。

1) A_R, A_L, B_R, B_L の決定

Table 3 Examples of the calculated results of constants A, B, C, D
定数 A, B, C, D の計算例

	Angle φ	R channel				L channel			
		V_1 Volt	V_P Volt	V_1'	V_P'	V_1 Volt	V_P Volt	V_1'	V_P'
EX. 5	$-\pi/4$	4.575	4.320	4.984	4.322	4.942	4.815	4.911	4.808
	$-\pi/6$	4.565	4.310	4.564	4.305	4.956	4.820	4.960	4.819
	$-\pi/12$	4.550	4.295	4.533	4.286	4.996	4.825	5.016	4.831
	0	4.485	4.255	4.491	4.265	5.036	4.830	5.061	4.845
	$\pi/12$	4.425	4.235	4.437	4.244	5.096	4.855	5.095	4.858
	$\pi/6$	4.365	4.225	4.373	4.224	5.136	4.875	5.119	4.871
	$\pi/4$	4.325	4.215	4.315	4.208	5.146	4.885	5.134	4.881
			$A_R=0.813$ $C_R=-0.029$				$A_L=0.881$ $C_L=0.021$		
		$B_R=0.153$ $D_R=0.059$				$B_L=0.157$ $D_L=0.058$			
EX. 6	$-\pi/4$	5.005	4.760	5.004	4.769	4.975	4.867	4.960	4.861
	$-\pi/6$	5.000	4.755	4.985	4.753	4.980	4.872	5.005	4.870
	$-\pi/12$	4.975	4.745	4.955	4.737	5.032	4.877	5.056	4.880
	0	4.910	4.705	4.916	4.714	5.067	4.882	5.096	4.891
	$\pi/12$	4.812	4.687	4.867	4.694	5.132	4.897	5.127	4.900
	$\pi/6$	4.805	4.675	4.808	4.676	5.172	4.917	5.148	4.910
	$\pi/4$	4.767	4.660	4.757	4.659	5.177	4.922	5.160	4.920
			$A_R=0.798$ $C_R=-0.031$				$A_L=0.842$ $C_L=0.017$		
		$B_R=0.159$ $D_R=0.057$				$B_L=0.157$ $D_L=0.058$			

(4.8a), (4.8b) はそれぞれ V_R^2 と $\sqrt{U_a}$, V_L^2 と $\sqrt{U_a}$ の一次関係の勾配を表わしている。速度校正の実験では、 φ を 7 段階に変化させて速度と出力電圧との関係を求めているので (4.8), (4.9) 式を用い最小 2 乗法によって決定した。その結果は Table 3 に他の定数と共に記した。およその値は

A_R, A_L ; 0.70~0.90

B_R, B_L ; 0.14~0.25

位の値となる。これらの定数はプローブごとに少しずつ異なるので個々のプローブについて実験的に確かめておく必要がある。

2) C_R, C_L, D_R, D_L の決定

上記の実験結果と (4.3) 式の近似関数式から最小 2 乗法により決定できるが、簡単には次式の関係からも求められる。また略算法として、(4.5) 式において $\varphi=0$ とおけばそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} D_R &= (V_{PR}^2 - V_{0R}^2)_{\varphi=0} / U_P \\ D_L &= (V_{PL}^2 - V_{0L}^2)_{\varphi=0} / U_P \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

で求められる。 C_R, C_L は (4.5) 式で $\varphi = -\pi/4, \varphi =$

$\pi/4$ として得られた 2 つの式より D_R および D_L を消去すれば、

$$\left. \begin{aligned} C_R &= \frac{1}{\sqrt{2} U_P} (V_{PR(\varphi=\pi/4)}^2 - V_{PR(\varphi=-\pi/4)}^2) \\ C_L &= \frac{1}{\sqrt{2} U_P} (V_{PL(\varphi=\pi/4)}^2 - V_{PL(\varphi=-\pi/4)}^2) \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

によって決定するものとする。

最小 2 乗法によって得た結果の一例を Table 3 に示す。

熱線の長さが 1.0~3.0mm の場合にはそれぞれ

C_R ; -0.035~-0.015

C_L ; 0.015~0.035

D_R, D_L ; 0.050~0.080

の範囲の値となる。

なお Table 3 で V_1' の欄は実験から得た値を、また V_P' の欄は実験値をもとに最大 2 乗法によって 4 つの数を決定したあと、(4.5), (4.8), (4.9) 式を用いて計算したものである。両者それぞれ比較してみると良い精度で一致しているとは言い難いが、これ以上の精度は無理であろう。

5. 試作した複合プローブの使用方法について

5.1 試作したプローブの構造

2において温度検出用センサーの感度・応答性について調べた。また3においては熱線風速計の出力電圧と気流温度の関係について調べ、温度補正を行うための基礎的な事柄について把握した。以下でこれらの結果を利用し、温度検出用センサーと気流速度検出用センサーを組み合わせて用いるときの、ある気流の速度、温度の測定の方法について記すことにする。

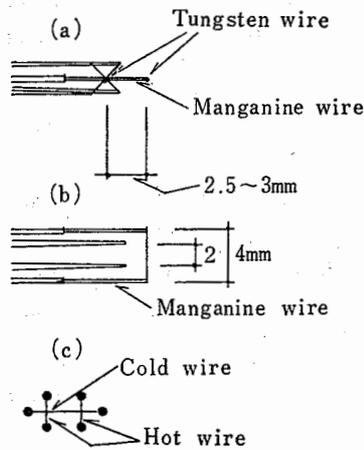


Fig. 16 Sensor manufactured for study
試作センサー
(a) Side view
(b) View from above
(c) Rear view

試作したセンサーは Fig. 16 のような構造である。熱線風速計用センサーのプローブの部分はニッケルであり、タングステン線の両端に銅メッキを施した線をこれにハンダづけをする。また温度検出用センサーのプローブの部分は径 0.006cm のマンガン線を用いた。プローブの部分の熱容量を小さくするためには線径を小さくすることが望ましく、上記線径が適当であろう。

また、図に示すように両センサーの距離は熱線からの輻射熱の影響をさけるため中心線上で約 2.5~3.0 mm 程度離れた。

5.2 熱線の温度に対する電気抵抗値および冷線を抵抗線温度計としたときの出力

製作された複合センサーは、3.1の方法で温度と抵

抗値の関係を求める。また冷線を Fig. 18 に示すようなブリッジの一边に挿入し、不平衡電圧を 60db 増幅し、温度に対する出力を確認しておく。

5.3 加熱温度の確認

上記のように熱線の温度に対する抵抗値を調べたあと、その結果を利用して熱線を所期の平均加熱温度 t_h に加熱する。恒温槽の温度は 20°C 程度のピッチで、100°C 以上にあげ各段階で、風速計の出力電圧 V_0 を測定する。3.1 に記したようにグラフ上で加熱温度を推定し、平均加熱温度の確認をする必要がある。この加熱温度の推定の誤差が大きいとき補正の精度は落ちるのでできるだけ精度よく求めておくことが必要である。

またセンサーは数時間程度エージングした後、抵抗値の測定に入った方がよい結果が得られるようである。

5.4 熱線と冷線の位置のずれによる気流の温度、速度測定時のタイムラグについて

プローブを Fig. 16 のような構造にし、熱線からの輻射の影響を少なくするため、5.1 で記したように冷線を熱線からある距離離すので、必然的に気流の速度と温度の測定の間タイムラグが生ずる。

以下相関法により実験的にこのタイムラグの程度を調べた。その方法は熱線を加熱せず温度検出用センサーとして利用し、実際に測定しようとする流れの場に置き、両センサーの出力電圧の相互相関をとった。その結果の一例として Fig. 17 のような結果を得た。タイムラグは約 5~6m/sec と考えてよいであろう。こ

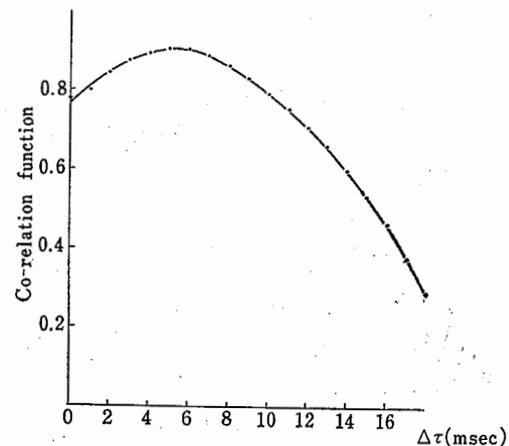


Fig. 17 Co-relation function
相互相関関数

のタイムラグのおよその時間がわかれば、AD 変換器を通してデータを収録するときサンプリングの周期をタイムラグと同程度にし、演算処理の段階で一周期ずれたデータを組み合わせて演算すればよい。このような方法によってある程度の時間差による誤差を少なくすることができる。この方法の場合サンプリング周期は測定対象によって変えてる必要がある。

5.5 熱線による温度検出用センサーの加熱について

両センサーの距離はできるかぎり接近していることが望ましいが、熱線は3で述べたような温度分布で加熱されている。よって近接すぎると輻射熱による加熱が無視できなくなるので、冷線を熱線より水平に2.5~3.0mm 程度離れたときその上昇温度を実験的に調べてみると、静止空気中で約1.5~2.0°C の上昇が認められるが、6cm/sec以上の気流のある場では熱輻射の影響はなくなることを確認した。

5.6 計測のシステム

測定装置のブロックダイアグラムはFig.18に示す。温度検出ブリッジの出力を直流増幅器で増幅しているが、この増幅器はドリフトの少ないものを使用する必

要がある。また一般には熱線風速計の次段にはリニアライザーを接続し、速度と風速計の出力電圧との関係を直線化して出力を取り出すのが普通である。しかし、取り扱う信号が小さいとき、中間にアナログ機器を設けた場合、精度が損なわれること、また、後述のように気流が20cm/sec程度以下になると自然対流の影響があらわれはじめるため、全測定範囲にわたって直線化はできないなどの理由で、リニアライザーを省略し、直接風速計の出力をAD変換器に接続する方法をとった。

AD変換されたあと記憶装置に収録されたデータは3において記した温度補正式で処理され、4において述べたような方法によって速度および気流方向の測定ができる。

6. 結 語

以上の結果を要約すると次のようになる。

- 1) 長さ4mm程度のタングステン線を抵抗線式温度計として使用するとき、90%応答で応答周波数は約16Hzくらいであり、気流速度が小さく温度変動がゆるやかな場合での測定には十分であろう。
- 2) 熱線タングステンを用いたときの温度分布は、

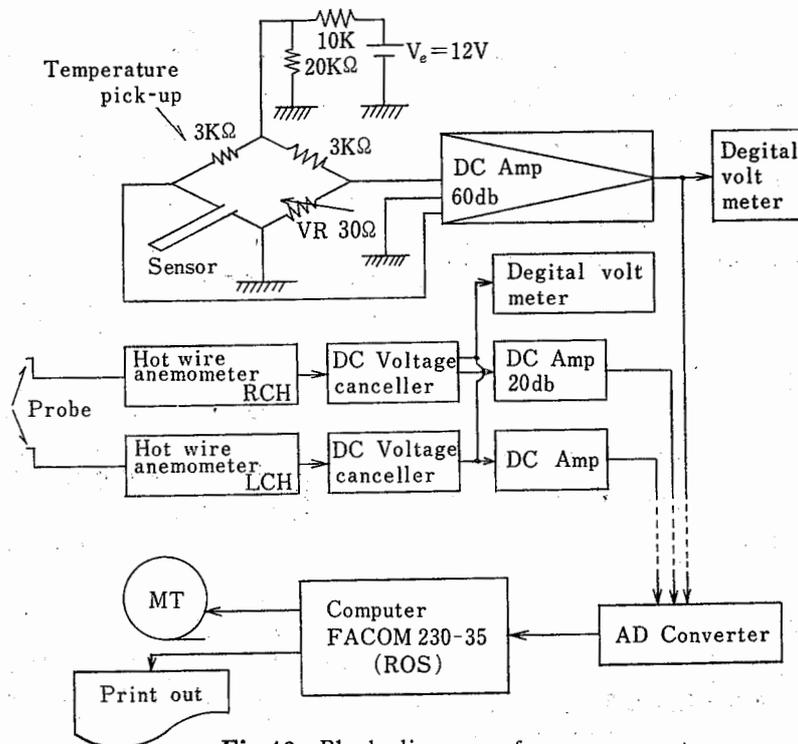


Fig.18 Block diagram of measurement
測定のブロックダイアグラム

(3.10)～(3.14)式で十分な精度で表わすことができる。また熱線の最高温度も(3.16)式によって求められる。

3) 2)の結果からプロングへの放熱量、対流による放熱量も計算できる。

4) 熱線風速計の自然対流時の出力電圧の温度に対する補正式は、実験および計算で得られた結果はほぼ一致し、(3.20)式を用いれば充分であろう。

5) また強制対流時の場合は、(3.24)式で補正できる。

6) これらの補正式について、空気の動粘係数、熱伝導率などの物性値の温度による変化を考慮しない場合の補正式と比較してみると、気流速度が大である場合には差は少ないが、微風速度の場合には物性値の変化を考慮しない補正式は誤差がやや大きくなる。

7) 試作した熱線と冷線を組み合わせた複合センサーによる出力は位置のずれによる時間差が生ずるが、オン・ラインによる電算機処理においてAD変換する際、サンプリング周期を調整することにより、ある程度カバーできる。

8) 微風速度のとき気流方向は、十分な精度とは云えないかもしれないが、(4.6)、(4.10)式で求められる。ただし20cm/s程度以下では弁別はきわめて困難であろう。

9) 熱線風速計を用い、気流温度の変化する場合の速度の測定を中心にさまざまな問題について検討してきたが、熱線、冷線とも極細の金属線であるため、その物理的特性が狂いやすく、動作状態が微妙で、風速に対する信号電圧も小さい。熱線風速計による気線速度の測定には精度上限界があることを認識すべきである。

7. 附 記

本研究において実験データの処理および数値解析には労働省産業安全研究所電子計算機システム、FACOM 230-35を用いて行なった。

8. 謝 辞

本研究を行なうに多くの方の協力を得たがとくに、タングステン線の熱拡散率の測定には金属材料技術研究所、岡田雅年氏に、風速計の温度補正の実験装置に

ついては大阪府立大学、星野毅史氏に有用な意見をいただいた。また電子顕微鏡によるタングステン線の線径の測定には当所機械研究部田中正清氏の手を煩わした。ここに深謝する次第です。

(昭和51年11月4日受理)

9. 附 録^{*16)}

出力電圧と風速との関係は King の式より

$$V^2 - V_0^2 = CR(T_h - T_a)\sqrt{U} \quad (A-1)$$

で表わさる。Cは流体の熱的諸性質や熱線の形状、寸法によって決まる定数で、温度には無関係であるとする。

いま気流温度 T_a が T_a' に変化した場合、出力電圧を V' 、 V_0' とすると、前式と同様に

$$V'^2 - V_0'^2 = CR(T_h - T_a')\sqrt{U'} \quad (A-2)$$

で表わされる。

次に無風時の出力電圧はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} V_0^2 &= C_0 R(T_h - T_a) \\ V_0'^2 &= C_0 R(T_h - T_a') \end{aligned} \right\} \quad (A-3)$$

ただし、 C_0 は C と同様な定数であるとする。この式より、温度補正係数 D は

$$D = \left(\frac{V_0}{V_0'} \right)^2 = \frac{T_h - T_a}{T_h - T_a'} \quad (A-4)$$

となる。一方、風速成分の信号については、(A-1)、(A-2)式より、 $U = U_1$ とおけば

$$\frac{V^2 - V_0^2}{V'^2 - V_0'^2} = \frac{T_h - T_a}{T_h - T_a'} = D \quad (A-5)$$

となり、(A-4)式を用いれば

$$V^2 = DV'^2$$

となる。気流温度がわかれば、(A-5)式から D を計算し、 V'^2 に乗ずることにより補正される。

10. 参考文献

- 1) 磯田和男, 大野豊監修, FORTRAN による数値計算ハンドブック, オーム社, 1967
- 2) D. C. Collis and M. J. Williams, Two dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers, J of Fluid Mech 6 (1959), 357
- 3) C. J. Smithells, Tungsten, a treatise on its metallurgy properties and applications, CHAPMAN AND HALL LTD, London, 1952
- 4) P. O. A. L. Davis and M. J. Fisher Proc, Roy Soc, A 280(7), 486, 1964

- 5) 日本金属学会, 金属データブック, 丸善, 1974
- 6) 機械設計便覧編集委員会編, 機械設計便覧, 丸善, 1973
- 7) 飯田修一他, 物理定数表, 朝倉書店, 1969
- 8) 中央管理協議会, 熱管理便覧, 丸善, 1972
- 9) 理科年表, 丸善, 1975
- 10) 坪内為雄他, 極細線および微粒子の自然対流による熱伝達, 機械学会論文集, 25(156), 798, 1957
- 11) 星野勲史他, 急変するガス温度と流速の測定法の研究, 機械学会論文集, 38(305), 139, 1972
- 12) H. L. Beckers, Heat transfer at very low Grashof and Reynolds numbers, Appl, Sci, Res Section A, 6, 82
- 13) S. Corrsin, Extended applications of the hot-wire anemometer, N, A, C, A, TN, 1964, 1949
- 14) 原莊太郎, 佐世保工業高等学研究報告第8号, 昭46
- 15) 日本科学工業株式会社, 熱線風速計による乱流測定について (測定法解説書)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-25-4

昭和52年3月1日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒108 東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453-8441 番(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 628.854 : 53.082.3

微風速気流速度の測定の際の温度補正の方法および気流方向の計算の方法について

木下 鈞 一

労働省産業安全研究所研究報告

RIIS-RR-25-4 (1976)

微風速度を熱線風速計を用いて測定する際、気流温度の変化に対して出力電圧に精度のよい温度補正をする必要があり、その方法について研究した。また気流方向を計算する方法についても実験的に調べ、その方法を示した。

(表 3, 図 17, 参 15)



UDC 628.854 : 53.082.3

On the method of temperature compensation to the out put voltage of a hot wire anemometer and calculation method of the direction of air stream in low velocity.

by K. KINOSHITA

Research Report of the Reseach Institute of Industrial Safety RIIS-R-R-25-4 (1977)

This paper deals with the method of compensating the out put voltage of a hot wire anemometer for fluctuating temperature and the method of calculating the direction of air sream, by using digital computer. From the results of experimental data and theoretical calculation, an equation of temperature compensation has been derived. And equations to be used in the calculation of the direction of air stream have been obtained empirically.

(3 Table, 18 Illus, 15 Refs)

