V形熱線による低流速の測定*
(第1報, 基本特性)

辻 俊博**, 長野靖尚**, 福岡弘嗣***

Turbulence Measurements at Low Velocities with Symmetrically
Bent V-Shaped Hot-Wires
(1st Report, Heat Transfer Characteristics)

Toshihiro TSUJI, Yasutaka NAGANO, and Hirotsugu FUKUOKA

The heat transfer characteristics of a V-shaped hot-wire, which was originally developed for reliable measurements of near-wall turbulence, are investigated for measurements of small gas velocities. The effective cooling velocity of a V-shaped hot-wire can be represented by the relation

$$U_e^2 = U_n^2 + k^2 U_{t1}^2 + h^2 U_{t2}^2$$

for the fluid velocity range 0.05 to 1.0m/s, where U_n , U_{t1} and U_{t2} are the orthogonal velocity components in the hot-wire oriented coordinate system. For a given type of wire, the sensitivity coefficients, k and h , are dependent primarily upon the fluid velocity and almost independent of the wire orientation. The effect of the wire configuration on heat transfer characteristics is shown and discussed.

Key Words: Flow Measurement, Hot Wire Anemometer, Low Velocity, Effective Cooling Velocity

1. 緒 言

細線をV形に折り曲げたV形熱線は、壁面近傍の乱流諸量を正しく測定するために考案されたもので、乱流研究で最も一般的な流速範囲においては、その熱および流体力学的特性は明らかにされている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしこのV形熱線を、自然対流境界層、熱ブレード、浮力噴流のような低流速における乱流計測に適用するには、低流速におけるV形熱線の伝熱特性に関する知見が必要となる。よく知られているように、低流速になると細線の伝熱特性は純強制対流熱伝達によるものと異なってくる⁽³⁾。高レイノルズ数流れの測定では、V形熱線は構造上支柱に対する配慮を全く必要としないが⁽¹⁾⁽²⁾、低流速においては熱線周りの温度境界層が厚くなるために、熱線の支柱をも含めたその形状と配置が問題となる。通常のI形熱線では、高レイノルズ数流れにおいても、支柱等の影響は避け得ず、これらの影響を考慮した熱線の伝熱特性に基づき乱流測定が行われている^{(4)~(9)}。

本研究は、低流速におけるV形熱線を速度ベクト

ルと熱線の相対的な配置も考慮して系統的に調べ、乱流測定の基礎式となる有効速度の表示式を求めたものである。

2. 記 号

$$H = 1 - k^2$$

h : 速度成分 U_{t2} に対する感度係数

h_c : 熱線の熱伝達率

$$K = 1 - k^2$$

k : 速度成分 U_{t1} に対する感度係数

l : V形熱線の一辺の長さ

U : 流体速度

U_e : 有効速度

U_n : V形熱線のV面に垂直方向の速度成分

U_{t1} : V形熱線のV面の中心線方向の速度成分

U_{t2} : V形熱線のV面上でV面の中心線に垂直な方向の速度成分

α : (V形熱線の頂角)/2

ϕ : V形熱線の迎え角

ψ : V形熱線の偏角

3. 実験装置および方法

V形熱線を図1のようにベルマウスを設けた直径

* 昭和61年11月3日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演，原稿受付 昭和61年4月30日。

** 正員，名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

*** 松下電器産業(株) (〒525 草津市野路町 2275-3)。

95.5 mm の鉛直円管入口近くの管中心部に置き、速度較正と流れに対する迎え角および偏角による熱線周りの熱伝達率の変化を求めた。低流速では流速そのものの測定が困難なため、従来熱線風速計の較正には種々の工夫がなされている^{(10)~(15)}。本研究では、測定部の下流に設けたオリフィスによる流量測定から求める管断面平均速度に補正を加えて熱線位置の流速を算出した。補正量は、その補正を加えて速度較正した熱線による管断面の速度分布の積分値とオリフィスによる流量とが任意の流速において常に一致するように前もって定められている。この方法で0.05~2 m/sの速度較正が可能であり、較正精度は自然対流層流境界層の理論値と測定値との比較⁽¹⁶⁾によると、誤差0.01 m/s以下となっている。

使用したV形熱線は直径3.1 μm のタングステン線を中央で折り曲げたもので、線長 $2l$ は1.5 mmおよび1.2 mmである。流れの抵抗により生じる熱線先端のたわみは、流れに直角に置かれた長さ l の一端支持の片持ばりとして計算すると、 $2l=1.5$ mmの場合、流速1 m/sで約 1.5×10^{-3} mmであり、読取顕微鏡による観察でも検知できない程度であった。熱線の両端は、直径30 μm 、長さ2 mmの銅メッキ部を介して支柱にハンダ付けされている。支柱は直径0.5 mmのピアノ線を加工したもので、ハンダ付けする先端の太さは約0.1 mmであり、V形熱線の特性に影響を与えないように熱線の下流に置かれている。

4. 有効速度

4.1 熱線の熱伝達率と有効速度 頂角 2α のV形熱線を図2のように速度 U の流れの中に置く。熱線のV面は xy 面と直交し、その中心線は xy 面内にあり、V面と x 軸のなす角を ϕ 、 xz 面内にある速度ベクトルが x 軸となす角を ψ とする。そして、V形熱線

図1 実験装置

についてV面に垂直方向を ξ 、V面の中心線方向を η 、V面上でV面の中心線に垂直方向を ζ と座標をとる。

線長 $2l=1.5$ mm、頂角 $2\alpha=22.3^\circ$ のV形熱線について $\phi=0^\circ$ とし、種々の迎え角 ϕ に対する流速 U と熱伝達率 h_c の関係を求めて図3に表した。ここで $(h_c)_{U=0}$ は $\phi=90^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ 、 $U=0$ m/sにおける h_c の値である。 $U=0$ m/sで重力が $-\xi$ 方向に作用する場合と $-\eta$ 方向に作用する場合の熱伝達率の測定値の差異は約0.2%と小さく、重力の方向と熱線の姿勢について特に考慮する必要はない。熱線の大きさと形状が定まると、熱伝達率 h_c は流速 U および熱線と流れのなす角 ϕ によって定められる。すなわち

$$h_c = h_c(U, \phi, \psi) \quad \dots\dots\dots (1)$$

そして、任意の角 ϕ における熱伝達率が、 $\phi=90^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ （すなわちV面と速度ベクトルが垂直になるとき）の熱伝達率に等しい速度 U をもって有効速度 U_e が次のように定義される。

$$U_e = f[h_c(U, \phi, \psi)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

関数形 f は、流速 U と $\phi=90^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ における熱伝達率 h_c との関係より得られる。例えば、 $\phi=20^\circ$ における $U=1.0$ m/sに対する有効速度は図3より $U_e=0.58$ m/sとなる。

次に、式(2)で求まる有効速度 U_e を次式で表すこ

図2 座標および記号

図3 熱線の熱伝達率

とにする。

$$U_e^2 = U_n^2 + k^2 U_{i1}^2 + h^2 U_{i2}^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 U_n , U_{i1} , U_{i2} はそれぞれ図2に示すように η 方向、 η 方向の速度成分である。 k , h は速度成分 U_{i1} , U_{i2} の寄与の割合を表す係数であり、一般には線長、頂角、流速および熱線と流れのなす角に依存する。

式(3)右辺の3方向の速度成分を、流速 U および角 ϕ , ψ を用いて表すと、

$$\left. \begin{aligned} U_n &= U \sin \phi \cos \psi \\ U_{i1} &= U \cos \phi \cos \psi \\ U_{i2} &= U \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。したがって、式(3)は次式のように表される。

$$\begin{aligned} U_e^2 &= U^2(\sin^2 \phi \cos^2 \psi + k^2 \cos^2 \phi \cos^2 \psi + h^2 \sin^2 \phi) \\ &= U^2(1 - K \cos^2 \phi \cos^2 \psi - H \sin^2 \phi) \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 $K=1-k^2$, $H=1-h^2$ である。

以下に、係数 K , H の性質を調べ、低流速において有効速度式(5)が妥当であるか否かを検討する。

4.2 K および H の変化 式(5)で $\psi=0^\circ$ あるいは $\phi=90^\circ$ とすると次式が得られる。

$$K = [1 - (U_e/U)^2] / \cos^2 \phi \dots\dots\dots (6)$$

$$H = [1 - (U_e/U)^2] / \sin^2 \phi \dots\dots\dots (7)$$

$\psi=0^\circ$ として熱線を ϕ 方向に回転させ、式(2)を用

図4 K と流速の関係

図5 H と流速の関係

いて得られる有効速度 U_e を式(6)に代入して求めた K の値を図4に表した。図には種々の ϕ に対する測定値を示したが、いずれの場合も実線で表した $\phi=0^\circ$ の値とよく一致し、 ϕ に依らず流速のみによって変化することがわかる。

同様に $\phi=90^\circ$ として熱線を ψ 方向に回転させ、式(2), (7)より求めた H の値を図5に表した。この場合も異なる ψ について得られた結果は $\psi=90^\circ$ で求めた値と一致し、やはり流速のみにより変化する。

4.3 有効速度の変化 熱線を $\psi=0^\circ$ として ϕ 方向に回転した場合および $\phi=90^\circ$ として ψ 方向に回転した場合の有効速度の変化を、それぞれ図6および図7に表した。図中の曲線は、 K , H に図4, 5に実線で示した値を用い、式(5)より計算した U_e を表している。両図より、有効速度が式(5)でよく表されることが示されている。

式(5)の一般性を検証するために、任意の流速および任意の迎え角と偏角におけるV形熱線の有効速度の測定値と、式(5)による計算値を、次に比較する。図8は、 $U=0.695$ m/s で、 ϕ を $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ とし

図6 有効速度の迎え角による変化

図7 有効速度の偏角による変化

て熱線を ϕ 方向に回転したときの有効速度の変化である。図中の曲線は、 K, H にやはり図4, 5の実線の値を用いた式(5)の値である。式(5)が任意の角に対する有効速度の測定値をよく表していることがわかる。この流速における K の値は H の約2倍で、式(5)からもわかるように、有効速度の変化は ϕ が約

図8 有効速度の任意の迎え角と偏角による変化

(a)

(b)

図9 有効速度の流速による変化

45°付近でその変化が最も小さくなる。一方、 $\phi=0^\circ$ および40°とし、種々の流速のもとで熱線を ϕ 方向に回転したときの有効速度の変化を図9(a), (b)に表した。それぞれの流速に対応する K, H の値を用いた式(5)の曲線は有効速度の測定値と非常によく一致している。

以上により、式(5)〔すなわち式(3)〕が低流速におけるV形熱線の有効速度を表す式として妥当なものであることが示された。

5. 熱線形状の影響

5.1 頂角の影響 前節までの結果はすべて $2l=1.5$ mm, $2\alpha=22.3^\circ$ の熱線についてのものである。V形の頂角を変化させると、熱線周りの速度場、温度場が変化し、 K, H の値も図4, 5に示した結果とは若干異なってくる。しかし、頂角が約60°までの種々の熱線についての実験では、 K, H の値はやはり流速 U のみの関数であって、 ϕ, ψ には依存しない結果であった。図10(a), (b)は、それぞれ頂角 $2\alpha=36.1^\circ$ および

(a)

(b)

図10 頂角の影響

60.9°の熱線を、約0.7 m/sの流速中で回転させたときの有効速度の変化を表したものである。いずれの有効速度の測定値は、流速のみに依存する K, H の値を用いた式(5)の曲線とよく一致している。

なお、熱線の頂角は約20°以上とするほうが製作も容易で、上記のように安定した特性でもって使用できる。この頂角を小さくすると、低流速で熱線の熱伝達率が小さいため、V形先端の温度が上昇して熱線の劣化が生じ、使用が困難になることがある。

5・2 線長の影響 線長 $2l=1.2$ mmのV形熱線についても同様な実験を行い、その特性を調べた。 K, H の値は同程度の頂角を持つ $2l=1.5$ mmの熱線の場合と比べて少し小さくなった。しかし、頂角が一定であれば、 K, H の値はやはり流速のみの関数で ϕ, ψ に依存せず、有効速度の変化も任意の流速、任意の迎え角、偏角に対して式(5)でよく表されることが確かめられた。線長を短くすると、熱線出力の変化が減少し、有効速度の変化も小さくなって、相対的に熱線両端のメッキ部や熱線の支柱による流れ場の変形の影響が大きくなる。また線長を長くすると、熱線の変形あるいは測定体積増大などの問題が生じてくる。これらを勘案すると、本研究で主に取り上げた $2l=1.5$ mm程度が低流速測定用のV形熱線として、最適寸法と考えられる。

6. 結 言

低流速の乱流諸量を測定する目的で、V形熱線の低流速における基本特性を調べた。得られた結果は次のように要約される。

(1) 低流速におけるV形熱線の有効速度は、V面に垂直な方向、V面の中心線方向およびV面上で

中心線と垂直な方向の三つの速度成分の寄与を考慮した式(3)〔あるいは式(5)〕でよく表される。

(2) 有効速度式の係数 k および h (あるいは K および H)は熱線の流れに対する角 ϕ および ψ に無関係で、流速 U のみに依存する。

(3) これらの特性は、定性的にはV形熱線の頂角、線長の影響をあまり受けない。したがって、熱線の寸法と形状が与えられると、本報で示した手法により、その有効速度式を精度よく求めることができる。

なお、速度成分 U_n, U_{t1}, U_{t2} と x, y, z 方向の速度成分 u, v, w との間には一定の関係があり、これらの速度成分(時間平均値および変動成分)の測定については次報で述べる。

文 献

- (1) 菱田・長野, 機論, 52-479, B (昭61), 2595.
- (2) 菱田・ほか2名, 機論, 52-479, B (昭61), 2601.
- (3) Hatton, A. P., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 42 (1970), 17.
- (4) Jørgensen, F. E., *DISA Information*, No. 11 (1971), 31.
- (5) Acrivellis, M., *J. Phys.*, E, 13 (1980), 986.
- (6) Huffman, G. D., 文献(5)の1177ページ.
- (7) Müller, U. R., *J. Fluid Mech.*, 119 (1982), 155.
- (8) Frota, M. N., *Ph. D. Thesis, Stanford Univ.*, (1982).
- (9) Andreopoulos, J., *Rev. Sci. Instrum.*, 54 (1983), 733.
- (10) Collis, D. C. and Williams, M. J., *J. Fluid Mech.*, 6 (1959), 357.
- (11) Andrews, G. E., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15 (1972), 1765.
- (12) Koppius, A. M. and Trines, G. R. M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19 (1976), 967.
- (13) Doan-Kim-Son, ほか2名, *J. Int. Chem. Eng.*, 17 (1977), 617.
- (14) Christman, P. J. and Podzimek, J., *J. Phys.*, E, 14 (1981), 46.
- (15) 高木, 日本流体力学会誌, 1 (1982), 382.
- (16) 菱田・辻, 機論, 47-424, B (昭56), 2314.