多熱線プローブの三次元有効設置角度の検定法に関する研究*

(第2報, 熱線の速度特性を含めた検定プロセス)

水野明哲^{*1}, 伊藤東吾^{*2}

A Hotwire Calibration Method of 3-Dimensional Apparent Setting Angles (2nd Report, Entire Calibration Procedure Including Velocity Characteristics)

Akisato MIZUNO and Togo ITO

In the first report the authors proposed the concept of apparent angles of a hot-wire through which incorrectness of the hotwire angles as well as bias error can be eliminated. The present report is a description of the whole calibration procedure of a hotwire probe including velocity characteristics and apparent angles. These include (1) setting of the calibration table, (2) calibration of velocity characteristics, (3) calibration of apparent angles and (4) confirmation of the results. The table setting can be performed by processing the information obtained by rotating the probe axis. Velocity characteristics are calibrated in terms of the least square concept in determining optimal coefficients in the approximation equation formulated from King's law. The whole procedure is conducted under guidance by a microcomputer, which enables accurate calibration of velocity and apparent angles for three hotwires within 20 minutes.

Key Words: Current Meter, Flow Measurement, Three-dimensional Flow, Turbulent Flow, Hotwire Anemometer, Microcomputer System, Velocity Vector, Calibration, Multiple Wired Probe, Error

1. 結 言

熱線による流れ場の測定に際して、熱線の設置角度の不正確さが出力に与える影響を一般的な角度に拡張して解析した例がみられる⁽¹⁾。しかし、設置角度そのものの一般的な検定方法について報告された例はみられない。

前報⁽²⁾において著者らは、有効設置角度の概念を紹介した。これは熱線の幾何学的な設置角度に補正を施した値に相当し、速度ベクトル算出段階で代入することにより熱線設置角度の不正確さを解決したうえで、多熱線プローブの測定範囲内で近似式のかたより誤差を最小にすることができるものである。

本報においては定温度形熱線流速計の使用を前提にして、検定手順の具体的な流れについて報告する。これは、検定テーブルの位置決め、各熱線の速度特性の検定、有効設置角度の検定、および検定結果の妥当性の確認よりなる一連の手順である。

以上の操作をマイクロコンピュータシステム、検定

テーブルおよび検定風洞を有機的に統合し、データの取込みおよびテーブルの駆動指令を高度に自動化した検定装置を用いることにより全工程を約20分間で終了することができる。また、検定に際してはプローブホルダにプローブを取付ける作業以外にはいっさいプローブに手を触れることがないので、その構造や熱線径の細さによる取扱いの難しさ、あるいは経時変化などの諸事情を考慮すればきわめて実用的であるといえる。

2. 有効設置角度の検定手順

2.1 有効設置角度検定の全プロセス プローブホルダの軸が検定風洞から送られる気流の方向に一致するように検定テーブルを正しく位置決めした後、熱線の速度特性を含めた有効設置角度の検定を次の手順により行う(図1参照)。なお、本報で用いる記号などの大部分は前報⁽²⁾の定義による。

① 目視、あるいは設計段階の値を用いて熱線の設置角度 α_n , β_n を仮定する。

② 検定テーブルの回転系を駆動して熱線を気流に直交する方向に調整する[最初は①により仮定した熱線設置角度を、二度目以降のループにおいては③で得られた結果を用いて熱線を気流に直交させる]。

* 平成元年11月7日 流体工学部門講演会において講演。原稿受付 平成元年4月19日。

*¹ 正員、工学院大学工学部(〒160 八王子市中野町2665-1)。

*² 学生員、工学院大学大学院。

気流の速度を適当な範囲に選び、すべての熱線に対して並行作業でおおのの流速に対応する出力電圧を計測する。ここで得られた流速と出力電圧との離散的な関係から式(1)の各未知係数を最小二乗法により算出し、流速計の出力電圧から直接速度を得る(2・2節参照)。

③ 検定テーブルの回転系をマイクロコンピュータで独立に制御し、プローブ軸に固定した座標系を回転することによりあらかじめプログラムしたさまざまな方向の気流を熱線プローブに当てる。このとき各熱線が計測した有効冷却速度と方向特性を近似した関係式との間に生じるかたより誤差を最小にする立場から熱線の有効設置角度を算出する(2・3節参照)。

④ 検定作業中に生じた種々の外乱要因を排除し、実際に流れ場を計測する際に生じる測定結果の不確かさの程度をあらかじめ認識するため、③において計測した有効冷却速度と近似式とをそれぞれ無次元化し、標準偏差(誤差の二乗平均の平方根) χ を求める(2・4節参照)。

⑤ 検定系を構成する各要素の特性からあらかじめ定めた標準偏差の許容値を χ_0 とし、 χ が χ_0 より小さいときを合格として検定を終了する。不合格のときは条件を満足するまで②から⑤の操作を繰返す(2・4節参照)。ただし、②の操作については気流方向の微小なずれが熱線の速度特性に及ぼす影響が小さく、省略することもできる。

2・2 熱線の速度特性の検定 本報においては、速度特性に関してもかたより誤差の影響を最小にするためにリニアライザを使用せず、次の方法を用いて直接的に速度を算出している。

熱線を気流の流れの方向に直交するように設置したとき、気流の速度 U に対する定温度形熱線流速計の

出力電圧 E の特性は、無風速時に自然対流熱伝達が生じなかったとき出力されるべき電圧 E_0 、熱線と被測定流体の物理的特性により定まる係数 σ および指数 n を用いてキングの式から導かれる

$$\left(\frac{E}{E_0}\right)^2 - 1 = \sigma U^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表すことができる⁽³⁾。

気流速度を N 個選びそれぞれに対応する出力電圧から速度と出力電圧との離散的な関係を、各係数 E_0 , σ , n が使用する速度の範囲内で一定であるという仮定のもとに次のように求める。

すべての気流速度のうち i 番めの試行において気流の乱れや微小な温度変化などの外乱要因、あるいは推定した関係式の矛盾などにより式(1)の関係が厳密に成り立たなかったときの残差 ε_i を、

$$\varepsilon_i = \left(\frac{E_i}{E_0}\right)^2 - 1 - \sigma U_i^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表す。そして ε_i の二乗和を

$$\tau = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で定義し、 τ が最小になるような E_0 , σ , n を求めるという問題に置き換える。 τ が最小になるための必要条件は、

$$\frac{\partial \tau}{\partial E_0} = 2 \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial E_0} = 0 \quad \dots\dots\dots (4\cdot a)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial n} = 2 \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots\dots (4\cdot b)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma} = 2 \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \sigma} = 0 \quad \dots\dots\dots (4\cdot c)$$

である。式(4)で与えられた三元連立方程式を E_0 , σ , n について解くことにより未知係数の値を得ることができる。ここでは、数値解法によることとして多元方程式に対するニュートン法を用いる。

以上の操作を経ることにより式(1)による近似のかたより誤差を最小にするかたちで流速計の出力電圧から直接的に気流速度を算出することができる。つまり、気流速度を使用する速度の範囲に限定して検定を行うことにより、使用条件下において最もかたより誤差の小さい速度特性を与える係数が得られる。図2に以上の手法により検定した計測値の一例を示す。

2・3 有効設置角度の検定 あらかじめわかっているさまざまな方向の速度ベクトルの気流を多熱線プローブに対して使用する角度の範囲に限定して当てる。このとき熱線が計測した有効冷却速度とそれを近似した関係式から熱線の設置角度を三次元的に検定する。

この手法により検定された値は幾何学的な設置角度に補正を施した値に相当し、速度ベクトルの計測の際

図1 検定手順のフローチャート

に用いることにより、熱線設置角度の不正確さを解決したうえで、速度ベクトル算出過程で用いる熱線の方角特性を近似した関係式と実測値のかたより誤差を最小にすることができ、計測値に含まれる誤差を全体として最小にできるものである(詳細は前報⁽²⁾)。

速度特性の検定におけるパラメータの決定と本節における有効設置角度の検定は、ともに誤差を最小にするという考え方に基づいたものである。

2.4 検定結果の妥当性の確認 この確認作業の目的は、予測不可能な外乱要因が検定結果に含まれた際にそれを排除することと、補正後の関係式の近似精度を含めた流速計の不確かさの程度を認識することにある。

(2) の操作で N 個の気流を熱線に当てることにより検定された有効設置角度 α_n, β_n と、気流の方角 α_{vi}, β_{vi} との関係からお互いがなす見掛けの角 $\bar{\phi}_{ei}$ が決定される。また $|\bar{V}_i|$ が既知であることから予測される有効冷却速度の計算値 $\bar{V}_{ei}$ と実測値 V_{ei} との残差 $\bar{f}_i$ が得られる。これは有効設置角度により補正した後の関係式のかたより誤差と考えることができ、全試行における $\bar{f}_i$ を気流速度の絶対値で割って無次元化した値、

$$\nu_i = \bar{f}_i / |\bar{V}| \quad \dots\dots\dots (5)$$

の標準偏差

$$\chi = \left(\sum_{i=1}^N \nu_i^2 / N \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を合格判定のパラメータに定め、検定系を構成する各要素の特性に応じた適当な値を許容値 χ_0 とする。そして χ が χ_0 よりも小さいときを合格とする。

結果が不合格であった場合は(2)から操作をやり直し、再び(5)の確認までを行う。なお、二度め以降のループにおいては熱線を気流に直交させるパラメータとして検定した有効設置角度を用いることにより目視によるよりも信頼度を上げることができる。

図2 熱線の速度特性

結果が合格であった際に得られた χ は実際に流れ場を計測する際に計測値に含まれる誤差の平均値に相当する。したがって、本手順を行うことにより計測結果の不確かさの程度を認識できることにもなり、そのうえで計測を行うことが可能となる。

3. 検定テーブルの位置決め

3.1 位置決めの全プロセス 固定した検定風洞に対して検定テーブルの各モータを駆動し、プローブ軸に固定した座標系を回転させて所定の風向を得るという性質上、検定テーブルと検定風洞相互の位置関係をあらかじめ明らかにしておく必要がある。

ここでは初期位置、すなわち両モータの回転角がともに零のときの、検定テーブルに取付けたプローブの軸と風洞からの気流のずれを算出し、お互いが一致するように調整する。

検定テーブルの位置決め作業はあらかじめ目視による調整を行った後、次のような手順を繰返すことにより行う(図3)。

① 目視、あるいは設計段階の値を用いて熱線の設置角度 α_n, β_n を仮定する。

② 検定テーブルの回転系を駆動して、熱線を気流に直交する方向に調整し、速度特性の検定を行う。

③ β_m を $-\pi$ から π まで変化させ、出力される有効冷却速度 V_e を β_m の関数として求める。($\alpha_m=0$)

④ ③で得られた有効冷却速度の最大値と最小値の差があらかじめ定めた許容値 ε 以下のときを合格とし作業を終了する。不合格のときは⑤～⑦を経て、再び③から操作を繰返す。

⑤ β_m の関数として得られた出力の特性から検定テーブルのずれ角 ξ, γ を算出する[最初は①により仮定した熱線設置角度を用い、二度め以降のループにおいては⑦で得られた有効設置角度を用いる]。

⑥ ずれ角 ξ, γ が修正される方向に検定テーブルを調整する。

⑦ ⑤の試行に必要な α_n, β_n を求めるため、有効設置角度の検定を行う(2.3節ないし、前報⁽²⁾参照)。

3.2 検定テーブルの構造および角度の定義 初期位置($\alpha_m=0, \beta_m=0$)の検定テーブルにプローブを取付けたとき、プローブ軸に固定した x 軸と流れの方向とにずれが生じ、その角度が図4(a)に示した α_{v0}, β_{v0} であれば、これを図4(b)の座標系を用いて ξ, γ で表すことにより調整が容易になる。

検定テーブルの本体には図5に示すように角度調節つまみが取付けられており、これを回転させることにより γ に相当する角度を調整することができる。また

ξ 方向の調整は直接本体を回転するかわりに回転テーブルで代用することができる。

3・3 位置決めアルゴリズム 位置決め際には目視により検定テーブルを調整し、 α_{v0} を小さな値にした後、 α_h が 45° から 60° 程度の単一傾斜熱線プローブを使用して次のようにずれ角 ξ , γ を検出する。

なお、熱線の設置角度 α_h , β_h は、3・1 節に示した繰返し手法を導入することにより(最初は目視による仮の値が用いられ、順次近似精度が高まる)。近似的に既知量として扱えるものとする。

風洞の吹出し風速を一定に保ち、 $-\pi \leq \beta_m \leq \pi$ の範囲でプローブ軸を回転させて β_m に対応する有効冷却速度を計測する。いま、気流とプローブ軸とに α_{v0} のずれが生じていて、回転角が $\beta_m = \beta_{\min}$ のとき有効冷却速度の最小値を計測したとすれば図 6 (a) より互いかなす角 $\phi_{\min}$ は最小であり、さらに $\pm\pi$ だけ回転すればなす角 $\phi_{\max}$ は最大となる。このとき $\phi_{\min}$ および $\phi_{\max}$ と α_h , α_{v0} の間には

$$\phi_{\min} = \alpha_h - \alpha_{v0} \quad \cdots \cdots (7 \cdot a)$$

$$\phi_{\max} = \alpha_h + \alpha_{v0} \quad \cdots \cdots (7 \cdot b)$$

の関係が成り立ち、図 6 (b) より

$$\beta_h = \beta_{v0} - \beta_{\min} \text{ のとき } \phi = \phi_{\min} \quad \cdots \cdots (8 \cdot a)$$

$$\beta_h = \beta_{v0} - \beta_{\min} \pm \pi \text{ のとき } \phi = \phi_{\max} \quad \cdots \cdots (8 \cdot b)$$

の関係が成り立つ。

熱線方向特性を表す近似式はテーブルの位置決め作業においてのみ

$$V_e = |\vec{V}| \sin \phi \quad \cdots \cdots (9)$$

を用いる。これはアルゴリズムを簡略化するためと、上述したような適当なプローブを用いれば、 α_{v0} が小

きな値であることから、ヨ一係数を考慮する必要がないためである。

式(9)に式(7)を代入することにより、計測する有効冷却速度の最小値 $V_{\min}$ および最大値 $V_{\max}$ は

$$V_{\min} = |\vec{V}| \sin(\alpha_h - \alpha_{v0}) \quad \cdots \cdots (10 \cdot a)$$

$$V_{\max} = |\vec{V}| \sin(\alpha_h + \alpha_{v0}) \quad \cdots \cdots (10 \cdot b)$$

となる。また、 α_{v0} が小さいことから V_e の変化は β_m の正弦関数となり、1 回転を N 個に等分割して計測した有効冷却速度 V_{ei} の平均値 V_{mean} は、

$$\sum_{i=1}^N V_{ei} / N \equiv V_{\text{mean}} \approx |\vec{V}| \sin \alpha_h \quad \cdots \cdots (11)$$

により近似的に表すことができる。したがって、

$$\begin{aligned} \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{mean}}} &= \frac{\sin(\alpha_h + \alpha_{v0}) - \sin(\alpha_h - \alpha_{v0})}{\sin \alpha_h} \\ &= 2 \sin \alpha_{v0} \cot \alpha_h \quad \cdots \cdots (12) \end{aligned}$$

が得られる。また $\alpha_{v0} \ll 1$ の条件と式(12)から

$$\alpha_{v0} \approx \sin \alpha_{v0} = \frac{1}{2} \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{mean}}} \tan \alpha_h \quad \cdots \cdots (13)$$

が得られ、式(8・a)より

$$\beta_{v0} = \beta_h + \beta_{\min} \quad \cdots \cdots (8)'$$

(a) α_{v0} , β_{v0} 系

(b) ξ , γ 系

図 3 テーブル位置決めフローチャート

図 4 気流の方向の定義

図5 検定テーブルの設定

以上のように、検定テーブルのずれにより生じた気流の角度が得られた。

α_{v0} , β_{v0} と ξ , γ の関係は $\gamma \ll 1$ であり、

$$\gamma \approx \sin \gamma = \sin \alpha_{v0} \sin \beta_{v0} \quad (14)$$

$$\xi = \tan^{-1}(\tan \alpha_{v0} \cos \beta_{v0}) \quad (15)$$

で対応付けることができるので、その分だけ検定テーブルを修正すればよい。以上の操作により初期位置におけるプローブ軸と検定風洞からの気流の軸とを一致させることができる。

3.4 位置検出精度の確認 検定テーブルのプローブ軸と気流の軸が一致した状態では $\alpha_{v0}=0$ である。このときプローブを1回転して計測した有効冷却速度の最大値と最小値の差は式(10)の関係から理論的には零になるはずである。

しかし、実際には検定風洞の気流の微小な乱れや、本来一致するように設計されているプローブ、プローブホルダ、モータ2の三者の軸の狂いなどの影響により完全に零にすることは不可能である。著者らは、検定風洞の吹出し風速を 20 m/s に定めたときその乱れが約 0.08 m/s であることから $\varepsilon=0.10$ m/s 以下の振れを許容値に定めた。このときプローブ軸と気流とのずれを 0.203° 以下に設定できる ($\alpha_h=45^\circ$ のプローブを用いた場合)。この場合通常3回以内のループで収束値に達する。

4. 結 論

マイクロコンピュータにより検定系を制御すること

(a) 角度の定義

(b) y-z 面への斜影

図6 位置決め時の速度ベクトルと熱線の関係

により、速度特性を含めた知能的な有効設置角度の検定法を紹介した。本手法は多熱線プローブによる速度ベクトルの計測で使用する方向特性を近似した関係式のかたより誤差と熱線設置角度の不正確さにより生じる矛盾を同時に改善でき、その計測値は全体として誤差が最小になるものである。そのため、乱流現象における高次のモーメントなどを統計的に取扱う場合に本手法の重要性が特に顕著である。

また、使用条件を限定したときに最適な速度特性の検定を実現でき、さらに流れ場を計測する際に各熱線の測定精度をあらかじめ認識して使用できる点も本手法の特長といえる。

文 献

- (1) 吉野・ほか2名, 機論, 52-482, B(1986), 3498.
- (2) 本論文集 1965 ページ.
- (3) 日本機械学会編, 技術資料流体計測法, (1980), 115, 日本機械学会.