

熱線風速計の風向特性に対する補正法と2次元計測への応用

烏谷, 隆

九州大学応用力学研究所 : 助手

石井, 幸治

九州大学応用力学研究所 : 文部技官

天本, 肇

九州大学応用力学研究所 : 助手

辰野, 正和

九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4744033>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 82, pp.139-143, 1997-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



熱線風速計の風向特性に対する補正法と2次元計測への応用

鳥谷 隆* 石井 幸治†
天本 肇* 辰野 正和‡

概 要

低風速域での熱線風速計の風向特性について調べた。風向に対する補正の方法として風速の1次式の形式を提案する。1次式の各項の係数は風向に依存しておりその関数形は低次のスプライン関数を用いて精度よく近似できる。2次元計測に応用する方法について提案する。

Key words: Constant-temperature anemometer, Spline function, X-type probe

1. はじめに

「流体中に置かれた加熱された物体からの熱の流体中への輸送量は流体の速度に依存する」という原理に基づく熱線風速計は流体の運動を計測する手段として様々な領域で利用されている。よく知られているように、センサーとなる熱線の長さが有限であるため、風向に対する流速計からの出力変化は単純なコサイン型とはならない。これを補正する方法としては、一般に、 $(\cos^2 + \epsilon \sin^2)^{1/2}$ 型がよく利用されている¹⁾ここでは、低風速域(2-3 [m/s]以下)での熱線風速計の風向特性に対する別の補正法とそれに基づく二次元の流れの計測への応用について述べる。

2. 熱線風速計の風向特性

熱線風速計にはカノマックスの定温度型熱線流速計(MODEL 1011)を使用した。センサー部は直径5 [μm]長さ1 [mm]のタングステン線できている。加熱された熱線から持ち去られる熱量 q は、風速 U と風向と熱線との角度 ϕ (熱線に垂直な方向を0度とする)による。定温度型熱線風速計(熱線の抵抗を一定に保つようにフィードバックをかけ加熱電圧を調整している)では流体によって奪われる熱量は熱線風速計の出力(プローブの加熱電圧) E の2乗に比例する。即ち、

$$q \propto E^2 = F(U, \phi),$$

*九州大学助手, 応用力学研究所

†文部技官, 応用力学研究所

‡九州大学助教授, 応用力学研究所

と表せる。

ここで、関数 F について次の仮定をする。

$$F = A + BU_e^m(U, \phi),$$

$$U_e(U, 0) = U,$$

A, B, m は定数とする。この仮定は、風がプロープに垂直にあたっているときに良く成立する King の式の拡張になっている。

角度 ϕ と風速 U を適当に変えて測定した、 E, U, ϕ のデータを図1に示す。このデータより、有効風速 U_e の関数型を次のような手順で求めた。まず、 $\phi=0$ のデータより、非線型最小二乗法を使用して、定数 A, B, m を決める。この例では、 $A=3.98, B=1.86, m=0.494$ となった。次に、 U_e の関数型を推測するために、これらの定数と E^2 の値から、各 ϕ について U と U_e の関係をグラフにした。図2にグラフを示す。図2は、横軸が測定時の風速 U で縦軸は $\{(E^2 - A)/B\}^{1/m}$ の値である。このグラフから有効風速 U_e の関数型を次のように仮定することは自然なことである。

$$U_e = a(\phi) + b(\phi)U.$$

角度に依存する係数 $a(\phi), b(\phi)$ の値はそれぞれの角度について最小二乗法によって求めた。

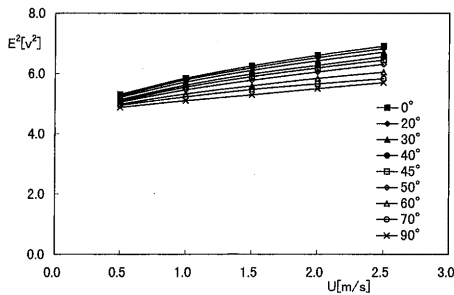


図1 熱線風速計の出力と風向、風速の関係。

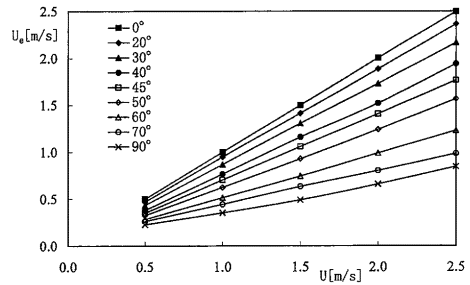


図2 風向に対する有効風速と風速の関係

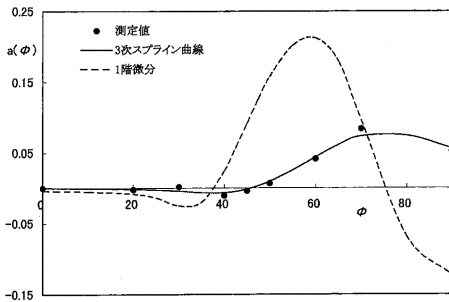


図3 係数 $a(\phi)$ の値と3次スプライン関数による平滑化曲線

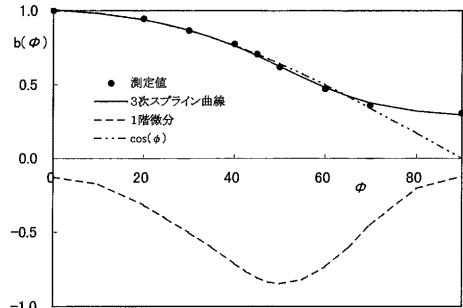


図4 係数 $b(\phi)$ の値と3次スプライン関数による平滑化曲線および曲線 $\cos(\phi)$

3. スプライン関数による近似

おのおのの角度について求めた係数 $a(\phi)$, $b(\phi)$ の値をそれぞれ図3, 4に示す。図中の測定値として示している黒丸がこのようにして決めた値である。風速の計測に利用するためには各測定値間の値を推測しなければならない。各測定値には、人為的なもの、電気的ノイズ、風の乱れなどを原因とする誤差が含まれているため、その値は絶対的に正確なものであるとはいえない。また、熱線のレイノルズ数は2以下なので、特定の角度のときに流れに特異な現象が生じるとは思われない。そのため、各係数は ϕ の変化に対して滑らかに変化していると予想される。こういう理由で、自然スプライン関数を利用して各係数を近似する。また、スプライン関数は微分値が容易に計算できるため、後で述べる2次元計測に応用する時にも好都合である。

スプライン関数は、与えられた各データ点で滑らかに接続された区分的多項式である。自然スプライン関数は各データ点を必ずしも通るものではなく、データ点列の適当な平滑化曲線 $f(x)$ を与える区分的多項式である。平滑化曲線が与えられたデータ点列 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ に対してどれくらい忠実であるか、あるいは滑らかであるかを評価する尺度 σ として次のような量が考えられている。²⁾

$$\sigma = \sum_{i=1}^n w_i \{f(x_i) - y_i\}^2 + g \int \{f^{(m)}(x)\}^2 dx.$$

第一項は忠実度を図る尺度であり、小さいほど $f(x)$ はデータ点列に忠実であることになる。重み w_i ($0 < w_i < 1$) は各データ点の重要度を指定する係数である。第2項は滑らかさを示す尺度である。指数 m は m 階微分を表し積分値が小さいほど振動の少ない滑らかな曲線となる。滑らかさをどのくらい重要視するかを指定する係数が g (≥ 0) であり、平滑化パラメータと呼ばれている。

尺度 σ が最小となる曲線 $f(x)$ は、データ点列に適度に忠実でもっとも滑らかな曲線となり、 $(2m-1)$ 次の自然スプライン関数となることが知られている。このスプライン関数は $m-1$ 次の多項式 P_{m-1} と $2m-1$ 次の切断べき関数 $(x-x_i)_{+}^{2m-1}$ の線形結合で表すことができる。²⁾

$$f(x) = P_{m-1} + \sum_{i=1}^n C_i (x-x_i)_{+}^{2m-1}.$$

自然スプライン関数 $f(x)$ は平滑化パラメータ g が零のときには、 σ の最小値は零であるので、各データ点を通ることになる。

図3, 4の実線は、すべての測定点で重み w_i を1とし平滑化パラメータ g を0.002にとったときの3次の自然スプライン関数を示している。両方の係数とも滑らかにうまく近似できていることが分かる。また、点線はその1階微分である。この1階微分も滑らかに変化しているのが分かる。図4には二点鎖線で $\cos(\phi)$ の値も書いている。およそ65度より大きな角度で係数 $b(\phi)$ はコサイン型から外れてくることが分かる。

これまで述べてきた手順と方法により、熱線風速計からの出力 E と風速 U 角度 ϕ の間の関数 $F(U, \phi)$ を決めることができた。

4. 2次元計測への応用

2次元計測では、流速の主流方向の成分とそれに垂直な方向の成分を求める。このためには、二本の

熱線を互いに垂直に配置したX型プローブを使用する。X型プローブを用いて $(\cos^2 + \varepsilon \sin^2)^{1/2}$ 型補正を利用する時の問題点は、交差角を正確に 90 度にするのが困難であること。また、プローブの中心軸(対称軸)をきめ、中心軸と主流方向を一致させることが難しいことである。中心軸とそれぞれの熱線とのなす角度はおよそ 45 度になる。この角度は係数 $b(\phi)$ の変化がもっとも激しい付近であるので主流に垂直な方向の小さな成分を精度よく測定することができる。逆にいえば、プローブの中心軸を主流の方向に正確にあわせなければ大きな誤差を生じることになる。また、垂直方向の成分が大きい場合には、風は中心軸に対し大きな角度をなして入ってくるためどちらか一方の熱線と風とのなす角度は大きくなる。このため、コサイン型から外れる領域を精度よく補正することが重要である。

ここで指摘した問題点は前章までに述べた方法で解決できる。まず、熱線に垂直に風を当て、それぞれの熱線について定数 A, B, m を求める。この時、熱線と風の向きとの垂直性については、 $\phi=0$ の付近では $b(\phi)$ の変化は小さいため、あまり注意を払う必要はない。次に、プローブの中心軸を適当に決めて、その中心軸をかぜの方向にあわせる。中心軸と風とのなす角度を適当に変化させて係数 $a(\phi), b(\phi)$ を求めるための校正データを取り、適度に平滑化した自然スプライン関数を用いて、これらの係数を近似する曲線を決めればよい。

図5はこのようにして求めたX型プローブの風向特性の例である。角度 θ は適当に定めたプローブの中心軸と風とのなす角度である。図中の実線および点線は3次の自然スプライン関数を示している。それぞれ充分うまく近似できていることが分かる。

次に、このようにして求めた風向特性からそれぞれの風速成分を求める方法について説明する。風速成分を求めるためには風速の強さ U と中心軸と風向とのなす角度 θ をもとめればよい。まず、それぞれの熱線からの出力 $E_{1,2}$ と定数 $A_{1,2}, B_{1,2}, m_{1,2}$ から有効風速 $U_{e1,2}$ を計算する。そうすると、 U, θ を求める問題は次のマトリックス f の零点を求める問題に帰着する。

$$f = \begin{bmatrix} a_1(\theta) + b_1(\theta)U - U_{e1} \\ a_2(\theta) + b_2(\theta)U - U_{e2} \end{bmatrix}$$

マトリックス f の零点は Jacobi の反復法によって求めることができる。Jacobi 法では k 番目の値をそれぞれ U_k, θ_k とすると、 $k+1$ 番目の値は

$$\begin{bmatrix} U_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_k \\ \theta_k \end{bmatrix} - J_k^{-1} \cdot f_k,$$

$$J_k = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial U_k & \partial f_1 / \partial \theta_k \\ \partial f_2 / \partial U_k & \partial f_2 / \partial \theta_k \end{bmatrix}$$

で計算できる。係数 $a_{1,2}(\theta), b_{1,2}(\theta)$ は滑らかなスプライン関数で与えられておりその1階微分も容易に計算することができる。適当な収束条件のもとで U, θ を決めれば風速成分を求めることができる。

この方法の問題点としては、係数 $a(\theta)$ が速

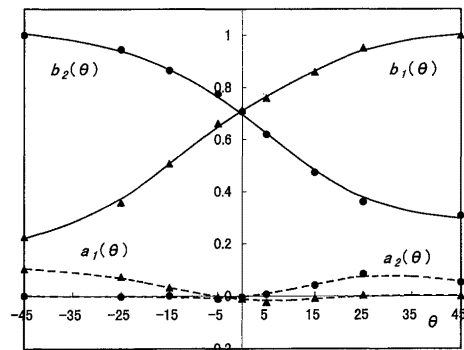


図5 X型プローブの風向特性の例

度の次元を持っておりその値は最大およそ0.1 [m/s] の大きさになる。しかも、係数 $b(\theta)$ が小さくなっていく領域で $a(\theta)$ は大きくなるため、 $b(\theta)U$ がおよそ0.1[m/s]以下になると $\{a(\theta)+b(\theta)U\}^{-1}$ は2価関数となる可能性があり、その時にはこの方法では風速を求めることはできない。

5. ま と め

熱線風速計の風向特性について調べた。風向に対する補正の方法として風速の1次式の形式を提案した。この1次式の各項の係数は風向に依存しておりその関数形は低次のスプライン関数を用いて精度よく近似できる。また、風向特性を利用して2次元計測に応用する方法について説明した。

参 考 文 献

- 1) 機会学会編：技術資料 流体計測法（丸善，東京，1986）第3章
- 2) 桜井 明監修 吉村和美，高山文雄著：パソコンによるスプライン関数（東京電気大学出版局，東京，1989）

（平成9年6月30日 受理）