

計測計測自動制御学会東北支部 第 348 回研究集会 (2024.5.31)

資料番号 348-7

風洞装置を用いたスター型 2次元超音波風速計の校正

Calibration of Star-type Structured 2D Ultrasonic Anemometer Using Wind-tunnel

星野 翔*, 和田 琉誠**, 佐藤 淳***

Syou Hshino*, Ryusei wada**, Atsushi satoh***

*** 岩手大学大学院, ** 岩手大学

***Graduate School of Iwate University, **Iwate University

キーワード：風速計測 (wind velocity measurement), 超音波風速計 (ultrasonic anemometer), 位相差法 (phase shift method), スター型 (star shape), 校正 (calibration)

連絡先：〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 佐藤 淳
Tel.: 019-621-6404, Fax: 019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1 緒言

現在普及している超音波風速計のほとんどは伝播時間逆数差法（以下「逆数差法」と呼ぶ）と呼ばれる計測方法にもとづいている。逆数差法を用いてある方向の風速成分を計測するためには、その方向に沿って一組のトランスデューサを配置し、これらの間で双方向に音波を伝播させる必要がある。そのため 2次元風速を計測する際には 2組のトランスデューサを用いて 4方向音波伝播時間の情報が必要となる。

一方近年佐々木ら¹⁾²⁾は逆数差法を拡張した新しい計測方法を提案している。この手法を 2次元風速の計測に用いれば、3方向の音波伝播時間の情報で計測が可能となる。また、同一線上で音波を双方向に伝播させる必要がないため、伝播軸の配置を工夫すれば連続波を用いても混信することなく計測が可能となる。

そこで筆者らは上記の特徴を生かした 2次元風速の計測部として 3軸のスター型軸計測部の開発を行っている。スター型とは、円周上に並んだ受信器に向けて、円の中心に置かれた発信器から外側に超音波

を送出する構造のことを指し、今回は 3 個の受信器を備えるものを考える。送受信器は同一平面内に配置されており、この平面と平行な 2次元風速成分を計測する。

超音波風速計はトランスデューサやその支持構造が計測する流れに影響を与え、特に流れの方向が伝播軸と平行になるときに影響が大きいことが知られている³⁾。そのため、実用的な風速計では風向に対する計測風速の校正が必要となる。

本研究では風洞装置を用いて様々な方向の流れに対して、試作したスター型 2次元超音波風速計を用いた風速計測を行い、風速の校正を行った結果を報告する。

2 風速計測の原理

筆者らの研究¹⁾²⁾によると、以下のような原理で風向・風速を計測できる。

送信器から送信された信号は、音速 C に軸方向風速 V_a が加わった合成速度で軸間距離 L を伝播する。

そのため、受信器で受信する信号には、送信された信号に対し位相差 $\Delta\theta$ が生じる。この $\Delta\theta$ は次式で表すことができる。

$$\Delta\theta = \frac{\omega L}{C + V_a} \quad (1)$$

$$V_a = \frac{\omega L}{\Delta\theta} - C, \quad (\omega: \text{超音波周波数}) \quad (2)$$

ω , V , C は一定とすれば $\Delta\theta$ を計測することで軸方向風速 V_a が計測できる。

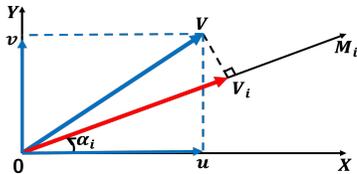


Figure 1: 座標系

2次元風速について考えるために、XY平面上の n 本の計測軸について考え、 i 番目の計測軸を M_i 、その単位ベクトルを e_i とおく。また、2次元風速ベクトル $V = [u \ v]^T$ の M_i 方向成分を V_i とすると

$$V_i = V \cdot e_i = u \cos \alpha_i + v \sin \alpha_i \quad (3)$$

となる。式(1),(3)より、 i 番目の計測軸における位相差を $\Delta\theta_i$ 、軸間距離を L_i とすると

$$C + u \cos \alpha_i + v \sin \alpha_i = \frac{\omega L_i}{\Delta\theta_i}, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

が成立するため次式を得る。

$$Ax = b \quad (5)$$

$$x := [C \ u \ v]^T \quad (6)$$

$$A := \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$b := \left[\frac{\omega L_1}{\Delta\theta_1} \ \dots \ \frac{\omega L_n}{\Delta\theta_n} \right] \quad (8)$$

線形方程式である式(5)を解けば、 u , v が求まり、風速 V 、風向 ϕ は次式のように求めることができる。

$$|V| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (9)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{v}{u}, \quad (-\pi \leq \phi < \pi) \quad (10)$$

ただし、式(5)が唯一の解を持つには $n \geq 3$ でなくてはならないため、2次元風速を計測するには少なくとも3本の計測軸が必要となる。

3 風洞装置を用いた計測実験

3.1 計測部

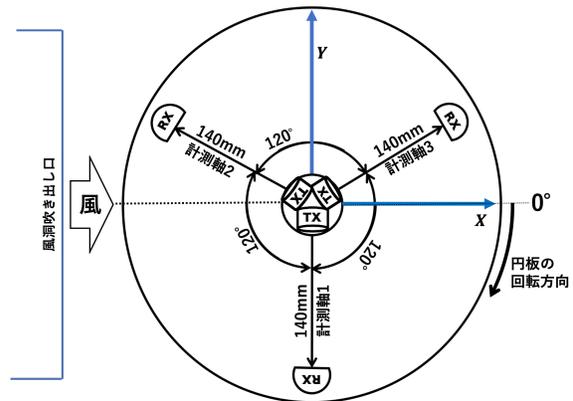


Figure 2: 計測部寸法



Figure 3: 受信器



Figure 4: 送信器

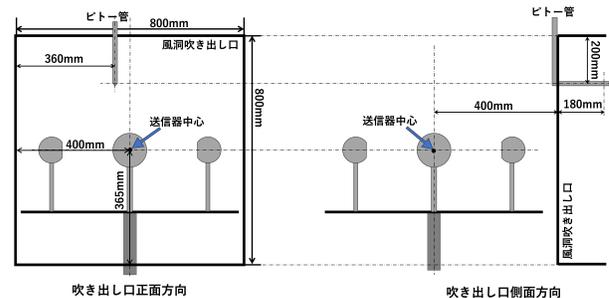


Figure 5: 計測部の設置位置

Fig.2のように送信器は円板上の中心に、受信器は送信器をかこむ円周上に設置した。各計測軸間は 120° とし、軸間距離は 140mm とした。送受信器には 25kHz の超音波トランスデューサ (Pro-wave Electronics 250ST/R160) を使用しており、Fig.3, 4のように球状のカバーで覆い金属の支柱で円板上に固定した。計測部の設置位置は風洞の吹き出し口に対し Fig.5 のような寸法で設置した。

送信器をファンクションジェネレータ (JDS6600) により 25kHz の正弦波で駆動し、受信器へ超音波を発信する。送信器の駆動信号と受信信号を AD コン

バータ (AIO-121601UE3-PE) で計測した。



Figure 6: 信号処理部

3.2 位相差の計算

実際に計測される位相差を $\Delta\zeta$ とすると位相を一定に決められる範囲は $-\pi \leq \Delta\zeta < \pi$ であるため、 $\Delta\theta$ は適当な波数 N を用いて次式のように表される。

$$\Delta\theta = \Delta\zeta + 2\pi N \quad (11)$$

この波数 N は、周波数 $f = 25\text{kHz}$ や軸間距離 $L = 140\text{mm}$ を用いて次式により計算される。

$$N = \left\lfloor \frac{Lf}{C_{th}} \right\rfloor \quad (12)$$

また、理想気体中の音速 C_{th} は実験時の気温 $t[^\circ\text{C}]$ を用いて次式により計算される。

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\kappa R(273.15 + t)}{M}} \quad (13)$$

比熱比: $\kappa = 1.413$, 気体定数: $R = 8.314462$,
分子量: $M = 28.996 \times 10^{-3}\text{kg/mol}$

実験により得られた信号モデルをフィッティングにより作成した。最小二乗法により、次式の値が最小となる係数 A , B , C を推定し、正弦波にフィッティングする。

$$\sum_{k=0}^{N-1} [y_k - \{A \sin(Bk + C)\}]^2 \quad (14)$$

信号モデルから受信信号、送信信号、およびそれに直交する信号のデータを計算し、式 (15)~(17) から $\Delta\zeta$ を求めることができる。

$$I = \int_{ts}^{tf} A \sin(\omega t - \Delta\theta) \sin(\omega t) dt \quad (15)$$

$$Q = \int_{ts}^{tf} A \sin(\omega t - \Delta\theta) \cos(\omega t) dt \quad (16)$$

$$\Delta\zeta = \tan^{-1} \frac{Q}{I} \quad (17)$$

ただし実際の計測には電気回路の動特性や軸間距離の誤差 ΔL などによる位相の変動が含まれるため、これらが無風時の位相計測値と気温から算出し除去する。

4 計測結果

風洞風速 $V=5, 10, 20[\text{m/s}]$ のとき、円板を 1° ずつ回転させることで相対的な風向 ϕ を変化させ、位相差 $\Delta\theta$ の計測を行った。それぞれ計測された位相差のグラフを Fig.7~9 に示す。風向変化に対して計測される位相差の理論値は、計測軸が風向と垂直になるときを中心に周期的に増減するため正弦曲線となる¹⁾。しかし、Fig.10 のように計測軸と風向が平行になる際、計測する流れに及ぼす構造物の影響が大きくなることで、計測される位相差と理論値との差が大きくなっている。

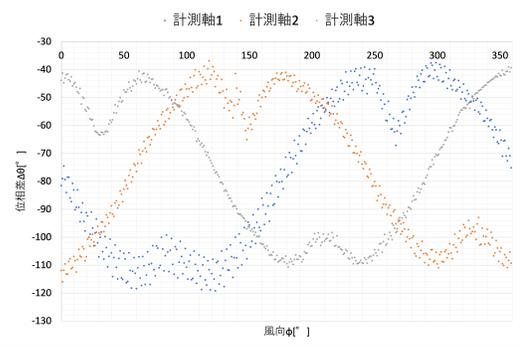


Figure 7: $V=5\text{m/s}$ における位相差

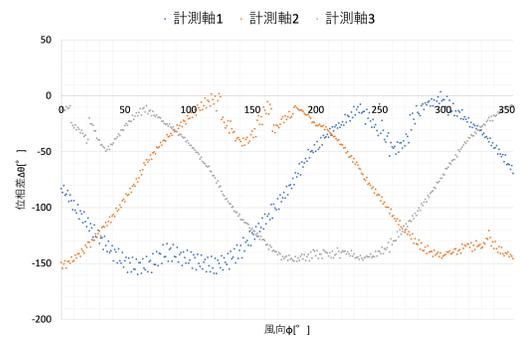


Figure 8: $V=10\text{m/s}$ における位相差

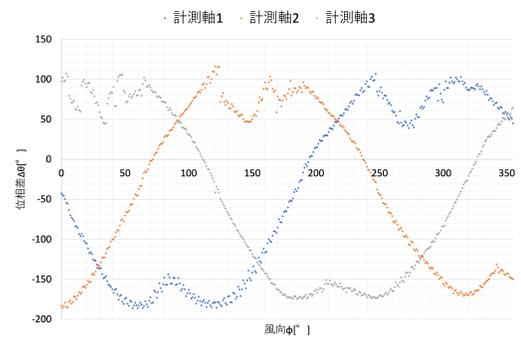


Figure 9: $V=20\text{m/s}$ における位相差

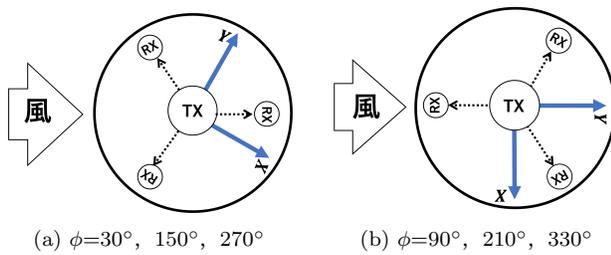
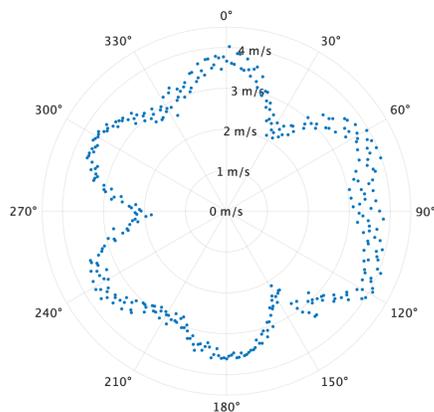
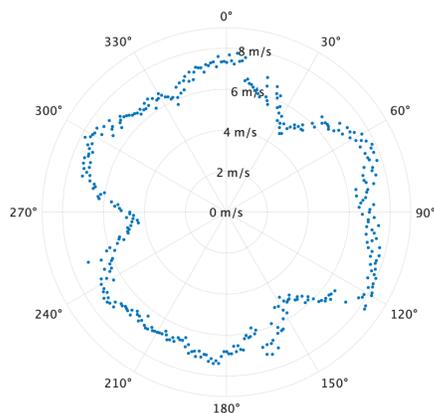
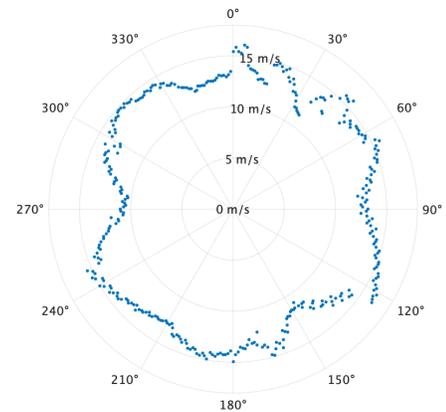
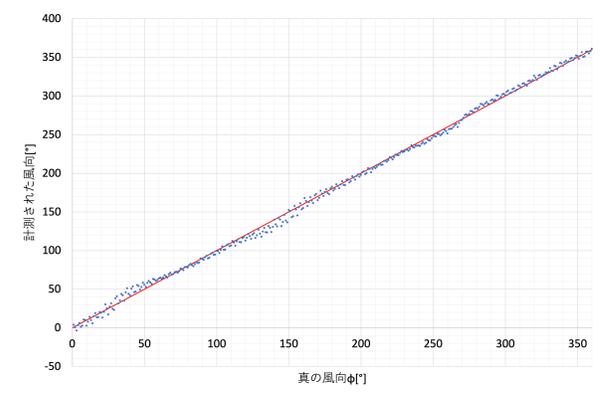
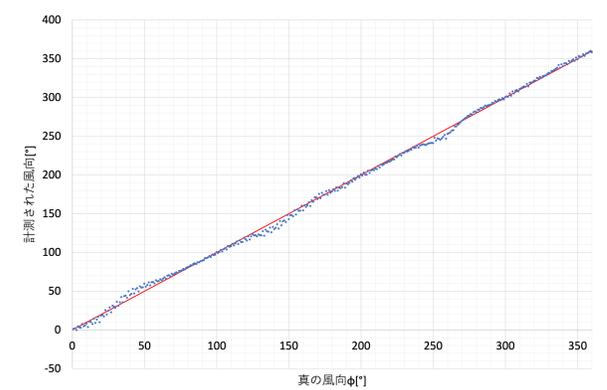
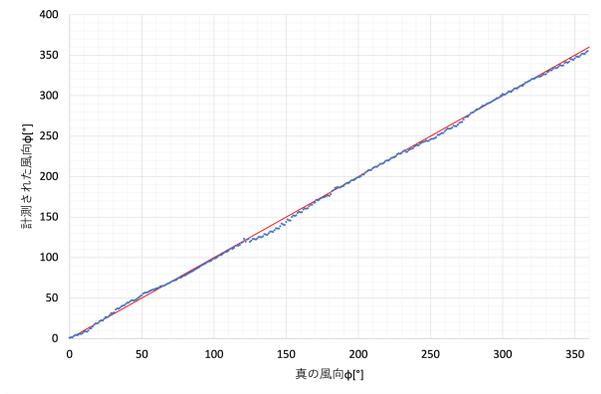


Figure 10: 構造物の影響が顕著となる風向の例

これらの位相差の計測結果から計算された指示風速を Fig.11 ~ 13 に示す. いずれの風速における結果でも, 構造物の影響が顕著となる風向で風速の減少が大きくなっており, 似たような風速特性が見られた. また, 真の風向 ϕ に対する計測された風向を Fig.14 ~ 16 に示す. 全ての計測においての風向の測定誤差は平均 2.9° であり, 計測された風向は誤差の小さな結果となった.

Figure 11: $V=5\text{m/s}$ における指示風速Figure 12: $V=10\text{m/s}$ における指示風速Figure 13: $V=20\text{m/s}$ における指示風速Figure 14: $V=5\text{m/s}$ における計測された風向Figure 15: $V=10\text{m/s}$ における計測された風向

Figure 16: $V=20\text{m/s}$ における計測された風向

これらの結果から、風速計で計測される指示風速を真の風速へ補正するための係数(校正係数)を求めた。Fig.18より校正係数は風速に依存しないことがわかるため、風洞風速5, 10, 20[m/s]それぞれでの計測から各風向ごとに係数を求め平均した値をFig.17に示す。

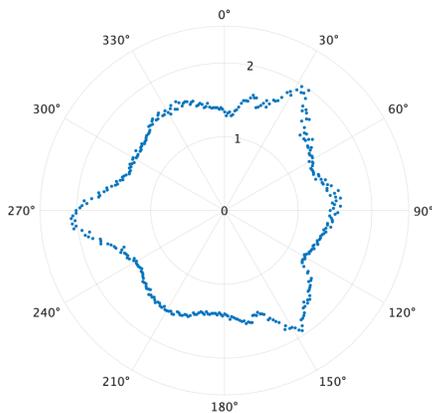


Figure 17: 風速補正係数

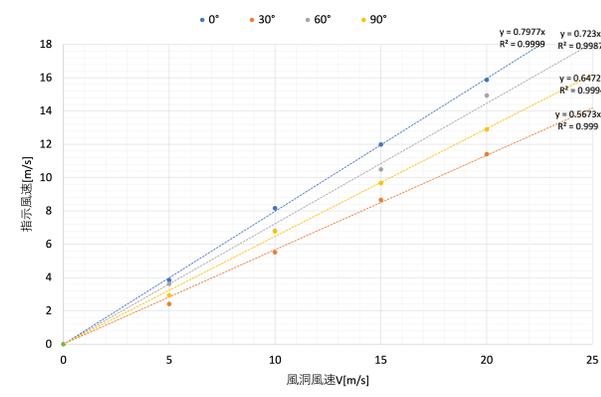
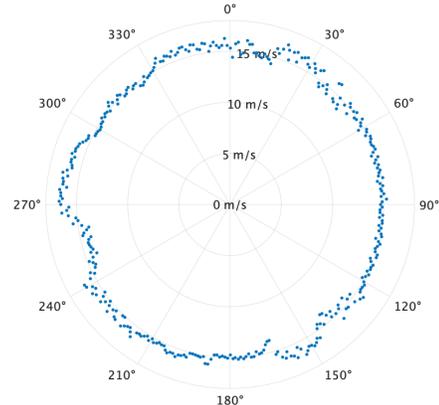


Figure 18: 風洞風速と指示風速の線形性

求められた補正係数を利用し、風洞風速が15m/sのときの指示風速から求めた補正ずみの風速をFig.19

に示す。各風向での相対誤差は平均3.3%であり、最大11.5%であった。

Figure 19: 校正後の風速 ($V=15\text{m/s}$)

5 結言

本研究では2次元風速計測用に作成したスター型計測部による風速計測の校正結果を報告した。校正用のデータを取得するために風洞装置を用いて設定風速5, 10, 20[m/s]の場合について0~360[°]の風向について計測実験を行った。

計測結果より風洞風速と指示風速との比は風洞風速によらず一定であることが確認されたため、両者の比である校正係数は風向だけに依存すると考えた。各風速における計測データから校正係数の平均値を求め、風洞風速15[m/s]の場合の計測結果に適用した結果、風洞風速との相対誤差が±11.5%以内になるよう補正することができた。

風洞風速と指示風速の差の主な要因としてはトランスデューサ部分を回り込む逆流域の存在がある。また乱れた流れにより生じる不規則な流速の変動も校正係数の決定に影響を与えられられる。今後はトランスデューサ部分の小型化や計測軸長の拡大、さらなる計測データの取得などによる計測精度の向上を検討する。

参考文献

- 1) 佐々木 健人・高田 知英・佐藤 淳：複数の超音波伝播軸からの位相情報にもとづく風速ベクトルのワンステップ計算, 337-7, 計測自動制御学会東北支部第337回研究集会(2022)
- 2) 佐々木 健人・佐藤 淳：超音波の位相情報にもとづく2次元風速計測部の開発, 342-2, 計測自動制御学会東北支部第342回研究集会(2023)
- 3) 林 隆・須賀 新一・角田 道正：超音波風速計の風向風速特性試験, 日本原子力研究所(1973)