小型多翼ファン流入流のステレオ PIV による解析*

Gyeong-Rae CHO¹, 川橋 正昭², 平原 裕行², 北爪 三智男³,
内田 正⁴

Experimental Analysis on Inflow of Multi-blade Fan by Means of Stereoscopic PIV

Gyeong-Rae CHO, Masaaki KAWAHASHI, Hiroyuki HIRAHARA, Michio KITATSUME
and Tadasi UCHIDA

ABSTRACT

Small scale multi-blade fan being used in automobile air conditioning system is one of the well-established fluid machinery, however further improvement of performance and noise reduction are required in the situation of total advancement of automobile engineering. In order to meet the requirement, experimental analysis of 3D flow in it is useful to understand physical phenomena generated in it and to improve the performances. Stereoscopic PIV (SPIV) is promising technique for this case, however there are some difficulties in practical measurements of the flow field in a multi-blade fan having complicated geometry. The feasibility and applicability of SPIV have been investigated by applying to measurements of the inflow structure of the multi-blade fan for two different types of impeller. The basic interests on the inflow are the flow through the inlet bell-mouth of the fan casing and the three-dimensional velocity field at the inlet part of the impeller. In the case of measurement of three-components of flow velocity at the section of the bell-mouth, the common optical arrangement of SPIV is applied, but in the latter case, a different type of camera arrangement must be applied. In the arrangement, two cameras are set at large stereoscopic viewing angle and with long focal length. In this case, a modified optical arrangement of SPIV and Schiempflug configuration of camera lens are adapted successfully. The results obtained give the three-dimensional features of inflow of the fan and the understanding of fan characteristics. From these results, the usefulness of SPIV for 3D flow analysis in a practical model of fluid machinery has been verified.

Keywords : Multi-blade fan, Stereoscopic PIV (SPIV), 3D flow analysis

1. はじめに

さまざまな分野で多用されている多翼ファンについては、その基本設計概念はすでに確立しているが、使用環境に応じて高機能化、省スペース化、低騒音化が求められており、新たな視点からの見直しが必要となっている。

なかでも車載用空調機の押し込みファンとして用いられる多翼ファンでは、車の高機能化に伴う省スペース化、快適性の要求に伴う空調機能の高度化、静粛性の要求に伴う低騒音化などが強く求められている。このような要求に対応するため、羽根車翼形状の改良、スクロールケーシングの形状変更などが試みられている。これらの試みがファン特性の改良や低騒音化などにどのように結びついているかを明らかにするためには、ファン内部流れの詳細な解析が必要である。

ファン内流れの実験的解析手法としては、熱線流速計や5孔ピトー管を用いた時系列点計測法が適用されてきたが、最近では PIV による2次元速度場計測法が用いら

* 原稿受付 2004 年 2 月 27 日

¹ 正会員 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

² 正会員 埼玉大学工学部 (E-mail: mkawa@mech.saitama-u.ac.jp)

³ 非会員 サンデン(株)エアコン事業部

⁴ 非会員 埼玉大学大学院理工学研究科

れるようになってきている^{1),2)}。これらの実験的解析結果から、羽根車流入・流出流、ケーシング内流れ、翼間流れなどが明らかにされ、シュラウド剥離の存在や、ケーシング内2次流れ、翼間流れにおける負圧面剥離などが明らかにされてきた。しかし、多翼ファン内流れは非定常性を有する3次元流れであり、ファン特性に結び付けて検討するための平均的3次元流れ場構造を明らかにすることは容易ではない。

3次元流速場の実験的解析法としては、3次元PTVやホログラフィックPIVなどがあるが、複雑な形状を有する流体機械内部3次元流れの速度場解析においては、観測面内の速度3成分が得られるステレオPIV (Stereoscopic PIV, SPIV) が現実的で有効な手法である。SPIVについての基本原理や、具体的計測手法については、すでに十分確立しており^{3),4)}、適用の具体例も多く示されている^{5),6)}。しかし、SPIVを複雑な形状や回転部を有する流体機械における流れ場解析に適用するには幾つかの困難さを伴うことから、実機モデルにおける流れ場のSPIV実験解析の有用性を十分確認する必要がある。

本報告では、車載用空調機に使用される小型多翼ファン流入流の3次元解析にSPIVを適用することを試みた。解析対象は、実際に用いられている形状の羽根車を有するファンの流入流と、モータ冷却効率向上のために一部形状変更をした羽根車を有するファンの流入流である。SPIVを適用して得られた結果は、各羽根車使用時のファン流入流の3次元構造を明らかにしており、流れ場の理解に有用な知見を与えている。

2. 実験装置および計測システム

本実験で対象とする車載空調機用多翼ファンの基本形状および寸法が、Fig. 1に示されている。羽根車ハブ面には、省スペース化のためのモータ格納部として釣鐘状のコーン部が形成されている。用いた羽根車の翼枚数は37である。このような形状の小型多翼ファンは、車載空調機用押し込みファンとして多用されているが、近年の空調機高機能化の要求によりファン駆動用モータの負荷が増加する傾向にあることから、その冷却法の改善が問題となっている。通常モータ冷却では、スクロールケーシングの圧力回復部から、流量比2%程度の冷却用

Fig. 1 Schematic view of test fan.

空気をモータ部に取り込み、羽根車ハブ下面とケーシング下面との隙間からケーシング内部に還流する方法が用いられている。これに対して、冷却効率を向上させることを目的として、羽根車コーン部に開口部を設け、モータ部に取り込んだ冷却空気を流入部側に還流する方法を用いることがある。このような方法によって、ファン特性に大きな影響を与えずに冷却効率が改善されることが明らかにされている。そこで本報告では、モータ冷却法の変更による羽根車コーン部の大幅な形状変化により、ファン流入流がどのような影響を受けるかについて、SPIVにより3次元的に調べた。

本実験で用いた2種類の羽根車 (タイプAおよびタイプB) がFig. 2に示されている。翼枚数、翼形状、翼幅などは全て同じである。タイプBの羽根車コーン部には、モータ格納部に対して台形状の開口部が7箇所設けられている。なお、開口比は約40%である。これら異なるタイプの羽根車を用いたときのファン特性がFig. 3に示されている。この図は、羽根車回転数を2,000 rpm一定としたときのJIS-B8330に基づき計測されたファン特性を示しており、縦軸および横軸は以下の式により定義される圧力係数および流量係数である。

$$\text{圧力係数: } \Psi = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho u_0^2}, \quad \text{流量係数: } \phi = \frac{Q}{\pi D_0 b_0 u_0}$$

ここで、 p は圧力、 Q は流量であり、 u_0 、 D_0 、 b_0 はそれぞれ、羽根車外周における周速度、外径、翼幅である。この図より、開口部を設けた羽根車を用いても、ファン特性に大きな差が生じないことが分かる。そこで、異な

(a) Impeller of type A

(b) Impeller of type B with opening

Fig. 2 Different types of impeller.

Fig. 3 Fan characteristics.

るタイプの羽根車を用いたときのファン流入流について SPIV を用いた 3 次元速度場実験解析を行うことにより、ファン特性に大きな影響を与えない理由を調べる。

計測対象は、ケーシング流入部のベルマウス断面通過流と、羽根車翼間流入流である。前者では面外速度成分が主成分となる流れ場であり、後者においては凹部流れ場であることに特徴がある。これらの異なる流れ場の特徴に応じて、SPIV 計測における光学系の組み方、キャリブレーションの方法が異なる。Fig. 4 にそれぞれの場合の光学系が示されている。使用した光源は、ダブルパルス Nd-YAG レーザであり、出力は 50 mJ/pulse である。カメラは素子数 1024×1018 ピクセルの高解像度 CCD カメラであり、シャインフラグ条件を満たすレンズ系が適用されて画像が取得される。なお、使用したキャリブレーションプレートは、レーザマーキング法により作成された格子パターンであり、格子間隔 3 mm、線幅 200 μm である。Fig. 4(a) に示されているベルマウス通過流計測に適用される光学系は典型的な SPIV の光学系であり、2 台の CCD カメラの光軸間角度が約 45 度で、両光軸がなす面はレーザシート光面に垂直である。キャリブレーションプレートは計測面（レーザシート光面）に平行に設置し、面に対して垂直方向に移動する。一方、凹部計測では同様の光学系が組めないことから、Fig. 4(b) に示すように各カメラはレーザシート光面を挟んでその両側に設置され、さらに 2 台のカメラの光軸間角度が約 55 度で、両光軸がなす面は羽根車回転軸に対して約 50 度傾いている。このとき、キャリブレーションプレートは、シート光に垂直に配置され、シート光に平行に移動される。凹部を伴う複雑形状をした流体機械などの流れ場解析に SPIV を適用する場合には、このような変則的光学系が適用される。

2 台のカメラによって得られた画像から、速度ベクトル 3 成分の回復アルゴリズムは幾つか提案されているが、本報告では Doh らによって提案された方法⁷⁾を用いている。

(a) Optical arrangement of SPIV for Bell mouth inlet flow measurements

(b) Optical arrangement of SPIV for impeller inlet flow measurements

Fig. 4 Different arrangement of SPIV measurement.

3. 計測結果および考察

3.1 ベルマウス通過流

はじめに、ファンケーシング流入部のベルマウス通過流について、SPIV により速度分布を求める。このとき、ケーシングからの光散乱がノイズとなることを避けるため、ケーシング上面から高さ 4 mm の面を厚さ約 1 mm のパルスレーザシート光で照明する。使用したトレーサはドライアイス温水に浸して発生するミストである。実験条件は、羽根車回転数 2,000 rpm、流量係数 0.19 とした。

ベルマウス入り口流れの速度 3 成分分布が、Fig. 5 に示されている。図には面内速度成分からとまるベクトルと、カラー等高線による面外速度成分が重ねて示されている。なお、計測では観測面を 4 分割して、それぞれの領域について 600 データのアンサンブル平均をとっており、得られた結果を結合して計測面内の速度分布として示している。図の(a)と(b)との比較より、タイプ B の羽根車による流入流は、タイプ A の結果に比べて流入流中心が幾何学的中心にほぼ一致していることと、周方向

Fig. 5 Distribution of three-components of velocity at bell-mouth.

Fig. 6 Distribution of mean axial velocity at section of bell-mouth in circumferential direction.

の分布がほぼ一様になっていることがわかる。この結果を用いて、中心角 10 度で半径がベルマウス開口半径に等しい扇状部分の面外速度平均値を求め、その周方向分布が Fig. 6 に示されている。この図は、タイプ B の羽根車

を使用した場合に、タイプ A と比較して回転軸に沿った軸対称の流入流傾向が強まることを示している。なお、これらの結果は同一流量におけるものであることから、タイプ A では開口半径より外側の領域で、レーザシート面とケーシング上面との隙間を通過する半径方向流入が存在するため、図の領域の面外速度平均値が小さくなっているものと考えられる。

3.2 羽根車流入流

前節で示した羽根車によるベルマウス流入流の変化が、ファン特性に影響する羽根車流入流にどのような変化をもたらすかを明らかにするため、以下のような計測を行った。羽根車流入流の計測では、計測対象部分が凹部形状をしていることから SPIV を適用するには Fig. 4(b) に示したような光学系を用いる。計測面は、舌部位置から周方向に 45 度おきに 8 断面とした。実験条件は前節と同一である。羽根車タイプ A および B について得られた周方向 90 度おきの断面についての結果が Fig. 7 に示されている。これらの結果は、600 データのアンサンブル平

(1) 3D velocity diagram of impeller inlet flow at $\theta = 0^\circ$

Fig. 7 Three-dimensional velocity diagrams in inlet part of impeller.

均により求められたものであり、流速ベクトルは面内成分を示し、面外成分の大きさはカラー等高線により示されている。図に示されている結果より、以下の点が明らかにされた。前節で示された羽根車によるベルマウス通過流の変化にもかかわらず、平均流入流の基本的構造は使用した羽根車によって大きな差が生じていない。また、タイプ B ではコーン部に開口部を有することから、瞬間的にはモータ格納部に進入する流れも存在するが、平均流構造はタイプ A の場合とほぼ同じになる。予想されたとおり全体として、羽根車流入流は予旋回成分を有していないが、90 度前後の領域で、両者ともハブ面側でわずかに予旋回成分が生じている。

これらのアンサンブル平均された流れ場の観測結果より、コーン部に開口部を設けることにより、流入流にわずかな変化が生じているが、羽根車流入流構造の基本的変化が生じていないことが示され、回転数および流量係数一定の作動条件の下では、圧力係数に大きな差が生じないことが明らかにされた。

本実験では、比較的面外速度成分が小さい羽根車流入流についての SPIV による結果から、コーン部開口の影響について検討したが、今後、翼通過流および羽根車流出流についての速度 3 成分計測を行うことによって、本実験で得られた特性について、さらに検証していく。

4. おわりに

車載空調機用押し込みファンとして多用されている小型多翼ファンのモータ冷却効率改善のために、羽根車ハブ面に開口部を設ける試みを行ったとき、ファン流入流にどのような変化を与えるかについて、SPIV 法を適用して実験的流れ場解析を行った。

得られた結果は、ハブ面の形状変更は流入流の平均流れ場構造を大きく変えないことを示しており、ファン特性にも大きな差が生じていないことが明らかにされた。したがって、モータ冷却効率改善の方法として、ハブ面に開口部を設けることが有効であることが示された。さらに、複雑形状を有する流体機械実機モデルの流れ場解析に、SPIV 法が有用であることを示すことができた。

参考文献

- 1) 山本勝一, 川橋正昭, 関本修, 利波之広, 藤田泰範: 遠心送風機羽根車内流れの可視化解析, 可視化情報, Vol. 16, No. 60 (1996) pp. 27-33.
- 2) Kawahashi, M., Isohata, M., Yamamoto, K., Teruya, H. and Fujita, Y.: Experimental Analysis of Flow in a Multiblade Fan by Using PIV Technique, Proc. 5th Asian Int. Conf. Fluid Machinery (1997) pp. 787-793.
- 3) Prasad A.K. and Adrian R.J.: Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, Exp in Fluids, Vol. 15 (1993) pp. 49-60.
- 4) Hill D.F., Sharp K.V. and Adrian R.J.: Stereoscopic particle image velocimetry measurements of the flow around a Rush-ton turbine, Exp. in Fluids, Vol. 29 (2000) pp. 478-485.
- 5) Hu H., Saga T., Kobayashi T., Taniguchi N. and Yasuki M.: Dual-plane stereoscopic particle image velocimetry: system set-up and its application on a lobed jet mixing flow, Exp. in Fluids, Vol. 31 (2001) pp. 277-293.
- 6) Yoon J.H. and Lee S.J.: Direct comparison of 3D PIV and stereoscopic PIV measurements, Meas. Sci. Technol. Vol. 13 (2002) pp. 1631-1642.
- 7) Doh D.H., Kim K.Y., Cho G.R., Cho Y.B., Lee W.J., Saga T. and Kobayashi T.: Development of genetic algorithm based 3 D-PTV technique. Journal of Visualization, Vol. 5, No. 3 (2002) pp. 243-254.