クロスフローファン内部流れの可視化と LDV 測定*

新井 隆 景^{*1}, 杉 山 弘^{*1}
SOEHARTO^{*2}, 小 林 洋 一 郎^{*3}Flow Visualization and LDV Investigations
of Flow Characteristics of Cross Flow FanTakakage ARAI, Hiromu SUGIYAMA,
SOEHARTO, Yoichiro KOBAYASHI

The flow characteristics of two models of cross flow fan were clarified by flow visualization and LDV investigations. The velocity vector maps, stream lines and vorticity distributions were obtained so that the position of the eccentric vortex in the rotor could be clarified. Furthermore, the aerodynamic characteristics of a blade and the power generated by a blade were clarified. The results showed that the blades of a rotor at $\theta=240^\circ$ to 270° (in discharge area) have good aerodynamic performance and have better work performance than those of the suction area. The effect of changing of casing shape and suction load in suction area on the flow pattern was also clarified.

Key Words: Turbomachinery, Cross Flow Fan, Internal Flow, LDV, Flow Visualization

1. 結 言

クロスフローファンは各種空調機器や電子機器冷却用ファンとして数多く使用されているが、クロスフロー内部の流れ場に及ぼす因子は羽根車の形状やケーシング形状など多く、その設計方法は確立されていると言えない。最近、クロスフローファンの最適設計を最終目的として、クロスフローファンの寸法効果⁽¹⁾⁽²⁾、LDVを用いた流れ場の平均特性⁽³⁾や騒音低減化⁽⁴⁾⁽⁵⁾、トレーサ法を用いたクロスフローファン内部流れの可視化による研究⁽⁶⁾などが行われてきている。その結果、横流ファンの性能は、ケーシングやノーズの形状ならびにそれらと羽根車との相対的な位置関係などにより影響を受けることが判明してきた。しかし、クロスフローファン内部の流れの定量的な把握は十分とはいえない。特に、翼に対する流れの流入流出角度や離などの翼の空気力学的特性、その翼の空気力学的特性と翼によってなされる仕事との関係などは明らかでない。

そこで、本研究では、流れの可視化とLDVによる流れ場の詳細な測定により、クロスフローファン内部の流れを定量的に明らかにし、翼の空気力学的特性を把握することを目的として実験的研究を行った。実験に用いた羽根車などは、光学的測定が可能のように新たに設計、製作した。作動流体としては、実際の使用形態を考慮して、空気を用いた。その結果、羽根車周上にほぼ中心を持つ偏心渦領域と、流体輸送を行う貫流域の存在を確認するとともに、羽根車内の流線、渦度や乱れ強さの空間分布、羽根車の各翼の空気力学的状態や仕事量が明らかとなった。

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置と測定装置の概略を示している。流れの可視化はドライアイスの白煙と4Wのアルゴンレーザー光を光源とするレーザーライトシートを用い、流速の測定には二次元LDV(TSI製)を用いた。LDVのトレーサには6 jet-atomizer(TSI製)によって作られた水微粒子(1~2 μm)を用いた。サンプリング数は一つの測定点につき400とした。図2は実験で使用したクロスフローファンの羽根車とケーシングの相対位置関係を示している。クロスフローファンはよく知られているように、羽根車、ケーシング、ノーズ、側板およ

* 原稿受付 平成6年5月16日。

^{*1} 正員、室蘭工業大学 (〒050 室蘭市水元町 27-1)。^{*2} 室蘭工業大学大学院。^{*3} (株)東芝富士工場 (〒416 富士市蓼原 336)。

図 1 実験装置概略

図 2 供試モデル

び熱交換器より構成されている。羽根車、側板、ケーシングは透明アクリル製であり、光学的測定が可能である。実験では吸込側負荷の異なる二つのモデルを使用した。すなわち、図 2 (a) に示すモデル 1 は 2 枚の熱交換器が、図 2 (b) に示すモデル 2 は、モデル 1 と同じ 2 枚の熱交換器の他に第 3 の熱交換器が吸込側負荷として取り付けられている。図 3 は、この実験のために設計、制作した羽根車の詳細を示している。羽根車の外径と内径はそれぞれ 95 mm, 70 mm である。羽根は半径約 9.5 mm の円弧翼であり、回転方向に 26° 傾斜して等間隔に 35 枚配置されている。全長は 217 mm で、2 枚のドーナツ状の円板の仕切板で 3 分割されている。予備実験によって、流れの軸方向の一様性は側板と仕切板の極く近傍を除いて成り立つことが確認されているので、流れの可視化、流速の測定は側板と仕切板の中央の断面で行った。測定点の座標は図 4 に示すように、羽根車の中心を原点として、半径方向に r 、ノーズの上方の水平方向を 0° として、反時計回り方

図 3 供試羽根車詳細

図 4 座標系

図 5 流れの可視化

向に θ をとった。羽根車の回転方向は図 4 に示すとおり反時計回りである。図 2 において、ノーズから左上のケーシングまでの領域を吸込領域、ケーシングの左下からノーズまでの領域を吐出し領域と呼ぶことにする。クロスフローファンの運転条件は実際の使用を考え、吸込口、吐出し口とともに流量測定用のダクトは付けていない。したがって吸込口、吐出し口ともに大気解放の条件である。

3. 実験結果および考察

3・1 流れの可視化 図 5 (a), (b) はそれぞれモデル 1 とモデル 2 の流れ場をレーザライトシートによって可視化した一例である。この写真は家庭用ホームビデオ(シャッタースピード: 1000 分の一)で撮影されたものをビデオプリンタで出力したものである。羽

図 6 速度ベクトル線図

根車の回転数は 1 400 rpm である。羽根車の回転数が変化しても流れ場の様相はほとんど変化しなかったの
で、以後の実験では回転数 1 400 rpm 一定とした。ト
レーサの注入はクロスフローファンの吸込み領域全
域から行われた。図中の白い部分がトレーサを示し
ているので、この部分は貫流域に相当し、羽根車内
の右斜め下のトレーサがほとんど進入しない領域が
偏心渦に相当する。このように、流れの可視化から
、偏心渦領域と貫流域の存在とその領域の大きさ
がおおよそわかる。図 5 (a) のモデル 1 の場合、
ケーシング左上部付近にトレーサ粒子が淀んでいる
ように見受けられる。

3・2 速度分布 図 6 (a) , (b) はそれぞれモ
デル 1 とモデル 2 の流れ場を速度ベクトル線図で
示したものである。羽根車の回転数は 1 400 rpm
である。図 6 から、熱交換器背後の吸込領域で
は速度は比較的遅く、その流れは羽根車によって
加速され、羽根車内部に入り、その後吐出し側
の羽根車を通過することでさらに加速され、吐
き出されることがわかる。また、偏心渦の位置
は $\theta = 280^\circ \sim 290^\circ$ でほぼ羽根車の周上にあ
ることがわかる。また、図 6 (a) と図 6 (b) で
は偏心渦の位置はほとんど変化がないこともわ
かる。図 6 (a) では、ケーシング左上部付近の
速度ベクトルは羽根車の内部を向いておらず、
この領域から羽根車内部への流体の流入がない
ことを示している。一方、図 6 (b) のモデル 2
では、この部分からも流体の羽根車内部への流
入がある。これは、モデル 2 では、ケーシング上
部の第 3

図 7 流線

の熱交換器が存在することによる。前述したよ
うに、第 3 の熱交換器の存在は偏心渦の位置に
はほとんど影響を及ぼしていない。

3・3 流線と渦度分布 二次元極座標 (r, θ)
において、任意の点における流れ関数値 ψ は次
式で与えられるので、この式を離散化して、測
定値から計算した。ただし、原点の流れ関数の
値をゼロとした。

$$\psi - \psi_0 = \int (-v_\theta dr + v_r r d\theta) \dots \dots \dots (1)$$

ここで v_θ , v_r はそれぞれ周方向速度、半径
方向速度である。

また、渦度 ω は次式で定義されるので、流
れ関数と同様にこの式を離散化して測定値から
計算した。

$$\omega = \frac{\partial v_{\theta}}{r \partial r} - \frac{\partial v_r}{r \partial \theta} \dots \dots \dots (2)$$

図7(a), (b)はそれぞれモデル1, モデル2の場合の流線を示している。図7(a)のモデル1の場合、偏心渦の中心は約290°の羽根車の内周付近にあり、その形はやや縦に長いことがわかる。また、吸込領域の左上の領域には閉じた流線が見られ、その領域からは流体の羽根車内への流入がないことがわかる。図7(b)のモデル2の場合、偏心渦の大きさはモデル1の場合よりもわずかに小さく、形状はより円に近いことがわかる。ただし、偏心渦の中心の位置はモデル1の場合とほとんど同じである。また、モデル2では第3の熱交換器があるために吸込領域の左上部の領域からも流体が羽根車内に流入していることがわかる。

図8(a), (b)はそれぞれモデル1とモデル2の渦度分布を示している。モデル1, モデル2のいずれの場合においても、偏心渦の中心付近において渦度は最も高くなる。また、その渦度の大きさはモデル2の方が大きいこともわかる。

3・4 乱れの大きさ 図9は各測定点の流速の測定値の標準偏差を示しており、表示には円を用いた。したがって、円が大きいほどその点の流速に対する変

動が大きいことを示している。図9(a)はモデル1, 図9(b)はモデル2の場合である。モデル1, モデル2のいずれの場合も、翼列を通過する直前の流速の標準偏差は小さいが、翼列を通過した直後のそれは大きいことがわかる。また、ノーズと羽根車の間の領域も流速の変動は大きい。さらに、モデル1の図9(a)の場合、吸込領域の左上部の領域も流速の変動は大きく、この領域からはスムーズに流体が羽根車内に流入していないことを示している。図10は流れの方向の測定値の標準偏差を示しており、その表示には扇形を用いた。扇形の半径はその点における平均流速を示し、扇形の角度が流れの方向の測定値の標準偏差を示している。したがって、扇形の角度が大きければ、流れの方向の変動が大きいことを示すことになる。モデル1 [図10(a)], モデル2 [図10(b)]のいずれの場合も、流速の変動が大きい領域は流れの方向の変動も大きいことがわかる。すなわち、翼列通過直後で流速の変動ならびに流れの方向の変動が大きいことから、円弧翼の背面で流れがはく離している可能性がある。

3・5 流れの翼に対する相対流入・流出角度 前述したように、乱れの発生の原因が流れの翼からののはく

図8 渦度分布

図10 流れの方向の測定値の標準偏差

図9 流れの測定値の標準偏差

図11 円弧翼と流れの関係

離にあるかどうか調べるために、流れの翼に対する流入流出角度を速度ベクトル線図から求めた。ここで、吸込領域においては、翼前縁における流れの方向は羽根車の外側の測定点のうち最も羽根車に近い点の流れの方向と同じとした。翼後端における流れの方向は羽根車内部の翼に対して最も近い測定点の流れの方向と同じとした。吐出し領域においても考え方は同じであるが、翼に対する流入領域は羽根車内部、流出領域は羽根車外部となる。図11は円弧翼と流れの関係を示している。図11(a)は速度三角形を示している。 u は翼前縁の周方向速度ベクトル、 v は流れの速度ベクトル、 w が翼に対する相対速度ベクトルである。 θ_r はベクトル u とベクトル v のなす角度であり、羽根車の外側の領域では、流れの速度ベクトルが羽根車の内側を向いている場合を負とし、羽根車の内側の領域では、それとは反対に、流れの速度ベクトルが羽根車の外側に向く場合を負とした。したがって、羽根車の外部および内部において、 θ_r が負の場合が翼に対して流れは流入、正の場合が流出となる。また、 $\theta_r=0^\circ$ の場合は流れの方向と翼の移動方向が同じである。図11(b)は翼に固定された座標系から見た流れと翼の関係を示しており、 α は翼に対する相対流入角度、 β が翼に対する

相対流出角度である。図12はモデル1の場合について、速度ベクトル図から θ_r, α, β を求めた結果を示している。図12(a)から、 $300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 110^\circ$ の領域では、羽根車の外側で $\theta_r < 0$ 、羽根車の内側で $\theta_r > 0$ であるので、流れは羽根車の外側から翼に流入し、羽根車の内側へ流出する。一方、 $120^\circ \leq \theta \leq 280^\circ$ では、羽根車の内側で $\theta_r < 0$ 、羽根車の外側で $\theta_r > 0$ であるので、流れは羽根車の内側から翼に流入し、羽根車の外側へ流出していることになる。このことは図5(a)の可視化結果とも一致する。図12(b)は翼に対する流入角度 α の周方向位置 θ に対する変化を示している。図中の破線は 50.8° の値を示している。この値は、図11(b)に示したように、円弧翼の翼前縁の接線方向と翼弦とのなす角度であり、 $\alpha=50.8^\circ$ の場合、流れは翼前縁から滑らかに流入していることになる。円弧翼の揚力係数は、翼弦長を l 、それを f とすると

$$C_L = 2\pi \sin\left(\frac{\pi}{180}\alpha + 2\frac{f}{l}\right) \dots \dots \dots (3)$$

となる⁽⁷⁾。図3に示す本研究で用いた円弧翼の場合、 $2f/l \approx 0.47$ であり、 $\alpha \approx 63^\circ$ で揚力係数 C_L は最大となる。図中の実線はこの値を示している。 $40^\circ \leq \theta \leq 110^\circ$ の範囲の吸込領域では、 $\alpha \approx 45^\circ \sim 60^\circ$ であるので、流れはほぼ翼に沿って流入していることがわかる。吐出し領域では、周方向の位置 θ が増加するにつれて α は増加し、 $\theta=260^\circ$ で $\alpha=63^\circ$ となる。すなわち、揚力係数が大きい状態に翼が置かれている位置は $\theta \approx 240^\circ \sim 270^\circ$ であることがわかる。図12(c)は翼に対する流出角度 β の周方向位置 θ に対する変化を示している。図中の破線は 50.8° の値を示しており、この角度は円弧翼の翼後端の接線方向と翼の弦とのなす角度である。したがって、 $\beta=50.8^\circ$ の場合、流れは翼後端から滑らかに流出していることになる。図12(c)より、 $\theta \approx 100^\circ \sim 110^\circ$ および $\theta \approx 240^\circ \sim 250^\circ$ の範囲を除いて、流れの方向は翼後端の接線方向と大きくずれ、 β は 50.8° より小さい。このことは、流れが翼背面で離れていることを意味している。したがって、3・4節に述べた翼列通過直後で流速の変動ならびに流れの方向の変動が大きいことの原因の一つには、流れの翼背面でのはく離であると考えることができる。図13はモデル2について、 θ_r, α, β の θ に対する変化を示したものである。モデル1の場合と同傾向は同じであるが、モデル2の場合、吸込領域が $300^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ であり、モデル1に比べてやや広がっていることがわかる。

3・6 翼によって成された仕事 図14は翼によって成された仕事を速度ベクトル図から計算したもので

図12 翼の空気力学的特性(モデル1)

(a) 羽根車の周方向と流れの方向のなす角度

(b) 翼に対する相対流入角度

(c) 翼に対する相対流出角度

図 13 翼の空気力学的特性(モデル2)

ある。ここで、仕事 dP は一つの翼の周りを検査面に取り、その検査面を通過する流体に対して角運動量の法則を適用して、以下の式で求めた。

$$dP = \rho dQ(u_{out}v_{out,\theta} - u_{in}v_{in,\theta}) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 dQ は検査面を通過する流量で、

$$dQ = v_{in,r} r_{in} d\theta \dots \dots \dots (5)$$

で与えた。ただし、添字 in は流入部、out は流出部を、 θ は周方向速度、 r は半径方向速度を表す。例えば、吸込領域では、 u_{out} は羽根車の内側の周方向速度、 $v_{out,\theta}$ は翼から流出する流れの速度の周方向成分、 u_{in} は羽根車の外側の周方向速度、 $v_{in,\theta}$ は翼に流入する流れの速度の周方向成分である。図 14(a) はモデル 1 の場合の結果を示している。図より、吸込領域における仕事はほぼ一定で、吐出し領域における仕事に比べて少ないことがわかる。仕事が最大値となる位置は $\theta = 270^\circ$ であり、翼が効率的に仕事をする位置は $250^\circ \leq \theta \leq 280^\circ$ であると言える。この位置は、図 13 に示したとおり、翼の空気力学的状態が良好な位置に相当する。また、 $\theta \approx 110^\circ \sim 120^\circ$ および $\theta \approx 290^\circ \sim 340^\circ$ の位置では仕事が負になることから、この位置では翼はポンプ作用をしているのではなく、タービンの働きをしてい

(a) モデル 1

(b) モデル 2

図 14 翼によって成される仕事

ると考えることができる。この位置は、ケーシングあるいはノーズと羽根車の間が狭い位置に相当する。図 14(b) はモデル 2 について、翼によって成された仕事を示している。翼のなす仕事の周方向分布の傾向はほぼモデル 1 と同様であり、仕事が最大値となる位置は $\theta = 270^\circ$ である。モデル 1 で見られた $\theta \approx 110^\circ \sim 120^\circ$ 付近の仕事が負となる領域は、モデル 2 では、 $\theta \approx 140^\circ \sim 170^\circ$ に見られる。これは、モデル 2 の第 3 の熱交換器によって吸い込み領域がモデル 1 に比べて拡大したことによると考えられる。

以上の結果より、わずかではあるが、モデル 2 の方がモデル 1 に比べて性能がよいと考えることができる。実際、出口断面における流速を積分して算出した流量は、1400 rpm の場合、モデル 2 の方がモデル 1 に比べて約 13% 大きかった。また、このことは 3・3 節で述べた偏心渦の中心付近の渦度の大きさがモデル 2 の方が大きいことと関係があると考えられる。

4. 結 論

クロスフローファンの内部の流れを、流れの可視化と二次元 LDV による流速測定により、詳細に明らかにした。本研究で得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 流れの可視化結果、速度ベクトル図、流線の図より、偏心渦の位置や貫流域が詳細に捉えられ、クロスフローファン内部の流れの定性的な把握ができた。

(2) 偏心渦の中心付近で渦度が大きいことを確認した。

(3) 流れが翼列を通過する直前では、流速の変動ならびに流れの方向の変動は小さいが、翼列を通過した直後では、それらは大きいことを確認した。

(4) 翼の空気力学的状態は、吐出し領域のほぼ $\theta \approx 240^\circ \sim 270^\circ$ の範囲でのみ良好であり、この範囲における翼のなす仕事は大きい。

(5) 流れは、周方向のほとんどの位置において、円弧翼の背面ではなく離れていると考えられる。

モデル1とモデル2の場合の結果の比較から、本実験の範囲内では、

(6) 吸込み領域におけるケーシングの形状や熱交換器の位置は、偏心渦の位置やその周囲の流れに大きな影響を及ぼさなかった。

(7) しかし、翼の空力力学的状態や翼のなす仕事など、詳細に観察すると、モデル1とモデル2の間の相異が判明した。

文 献

- (1) 田中・村田, 横流送風機の寸法効果に関する研究(第1報, 特性曲線に及ぼす羽根車寸法の影響), 機論, 58-550, B (1992), 1788-1795.
- (2) 田中・村田, 横流送風機の寸法効果に関する研究(第2報, 内部流動に及ぼす羽根車寸法の影響および特性表示法の検討), 機論, 59-560, B (1993), 1153-1160.
- (3) 杉山・ほか4名, 横流ファン流れに関する研究, 機講論, No. 930-49 (1993-8), 101-102.
- (4) 深野・ほか4名, 横流ファンの騒音低減化に関する研究(第1報, 舌部及び動翼の幾何形状の影響), ターボ機械, 20-8 (1992), 464-470.
- (5) 深野・ほか3名, 横流ファンの騒音低減化に関する研究(第2報, 舌部隙間の大きさの影響), ターボ機械, 21-6 (1993), 350-357.
- (6) 霧崎・ほか3名, 可視化によるクロスフローファン内部流れの研究(第1報, 粒子追跡法による計測結果の検討), 機論, 59-568, B (1993), 3743-3748.
- (7) 島・小林, 水力学, (1984), 144, 丸善.