シロッコファンの羽根車に生じる不安定現象について*

戸塚 順一朗^{*1}, 佐藤 光太郎^{*2}
北川 晃 一^{*3}, 辻本 良信^{*2}

Flow Instabilities Observed in Scirocco Fan Impeller

Junichiro TOTSUKA, Kotaro SATO,
Koichi KITAGAWA and Yoshinobu TSUJIMOTO

An experimental study was made to clarify the fundamental flow characteristics of Scirocco fans. It was found that the impeller generally suffers from instabilities caused by the positive slope of the Euler head when it is used without a casing. This instability can be distinguished from that of impeller rotating stall. The instability can be suppressed by using a casing. Thus, another important role of a casing, other than pressure recovery, has been elucidated.

Key Words: Scirocco Fan, Flow Instability, Casing, Euler Head, Spectrum Analysis

1. 結 論

羽根幅の大きな前向き翼の羽根車を有するシロッコファンは比較的構造が簡単で、高い出口圧力を得られることから空調、産業、電子機器組込み用などさまざまな目的で広く利用されている。しかしながら、送風機内部の流れは極めて複雑であるので、今日でもその設計は経験則に頼るところが大きく、昨今のさらなる小形化・薄形化ならびに低騒音化の要求にこたえるには系統的な知見が必要である。

これまでのシロッコファンに関する研究は、送風機としての性能予測^{(1)~(3)}あるいは性能試験^{(4)~(7)}が主体であったが、最近では騒音発生メカニズムの解明に主眼をおいた非定常流れに関する研究がいくつかなされている⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

しかしながら、シロッコファンが有する前向き翼の羽根車の基本特性およびスクロールケーシングの果たす役割に着目した例はほとんどなく、したがって、羽根車とスクロールケーシングの関係についても不明な点

が多く残されている。

本研究ではシロッコファンの羽根車の基本特性を解明することを目的とし、羽根車単体およびケーシング付き羽根車で試験を行い比較・検討した。ただし、ここでは山崎ら⁽²⁾、Rajら⁽⁶⁾により指摘されている吸込口の渦領域の影響を軽減するためにもに羽根幅の短い羽根車を使用した。さらに旋回流中に静止翼列を配して、出口における圧力・変動速度を測定した。また、シロッコファンの羽根車に異なる大きさのケーシングを取付けることにより、スクロールケーシングの役割についても検討した。

2. 記 号

b : 羽根幅
 D_2 : 羽根車外径
 f : 周波数
 f_n : 羽根車回転周波数
 n : セル数
 L_g : 羽根車上で良好に流れる領域
 Q : 流量
 r : 半径
 r_c : ケーシング半径
 s : ケーシング舌部すきま

* 1994年11月4日 流体工学部門講演会において講演、原稿受付 1995年5月11日。

^{*1} 神戸製鋼所(☎651 神戸市中央区脇浜町1-3-18)。

^{*2} 正員、大阪大学基礎工学部(☎560 豊中市待兼山町1-3)。

^{*3} 正員、(株)東芝(☎235 横浜市磯子区新杉田町8)。

T :セルの周期

T_θ :流れが良好な時間

u :羽根車周速度

v :絶対流速

v' :変動流速の卓越周波数成分

$v_{r\text{gm}}$: L_θ 内での平均半径方向速度

α_c :ケーシングの拡大角

Φ :流量係数 $= v_{r2}/u_2 = (Q/\pi D_2 b)/u_2$

Ψ_t :全圧上昇係数

$= (\text{出口全圧} - \text{入口全圧}) / 0.5 \rho u^2$

Ψ_{st} :入口全圧出口静圧係数

$= (\text{出口静圧} - \text{入口全圧}) / 0.5 \rho u^2$

Ψ_s :圧力係数 $= (\text{静圧} - \text{大気圧}) / 0.5 \rho u^2$

Ω :羽根車の回転角速度

ω :変動流速の角振動数

添 字

1:羽根車入口

2:羽根車出口

θ :周方向成分

r :半径方向成分

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 ケーシングを用いる場合と羽根車単体との比較実験に使用した実験装置の概略図を図1に示す。作動流体は空気であり、流量調節用のブースタ、バルブを通してブレンナムに入り、流量測定用のノズル、 $\phi=85$ mmのパイプを通して羽根車に導かれた後、大気中に放出される。また、ケーシングは着脱可能であり、同条件でケーシングを用いる場合と用いない場合の比較実験を行うことができる。回転数はおもに1180 rpmとした。

3.2 供試羽根車およびケーシング 表1に実験で使用した羽根車の諸元を示す。実験には羽根幅が55 mm($b/D_2=0.4$)と18 mm($b/D_2=0.13$)の2種類の羽根

車を用いたが、着目する現象が類似であったので特に断らない限りは流れがより二次元的であると考えられる18 mmの羽根車に対する結果を述べる。なお羽根車の前側シュラウド部分と前ケーシングのすきまは0.05 mm以下に抑えてある。

ケーシング形状と流速および圧力の測定位置の概略を図2に示す。ケーシング形状は、式(1)に示されるように角度と半径の関係で表される。

$$r_c = (r_2 + s) + \pi \times \tan \alpha_c \times \theta^\circ \times (r^2 + s) / 180 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでは、拡大角 $\alpha_c=5^\circ$ で舌部すきま $s=11$ mm($s/D_2=0.08$)のs11ケーシング、 $s=22$ mm($s/D_2=0.16$)のs22ケーシング、 $s=44$ mm($s/D_2=0.32$)のs44ケーシングの相似の3種類を用意した。ただし、舌部形状は3種類とも同形状とした。また、ケーシング側面の $r/r_2=1.12$ の位置に周方向に $\phi=1.5$ mmの静圧測定孔が 30° 間隔に12点(①~⑫)、熱線流速計挿入孔(①~⑥)は 60° 間隔で6点設けてある。

3.3 測定方法 羽根車出口での全圧測定、平均速度測定には、三孔ピトー管の代わりに単一孔ピトー管(管径1.2 mm, 孔径 $=0.2$ mm)を $\pm 30^\circ$ 回転させる方法を用いた。本実験での測定位置は $r/r_2=1.12$ とし、軸方向に5 mm間隔の4点で計測した。ただし、ケーシングを用いた場合は非軸対称となるので、図3に示

Table 1 Impeller specifications
($b/D_2=0.13$)

Inlet radius r_1 (mm)	59
Outlet radius r_2 (mm)	69
Impeller width b (mm)	18
Vane angle β ($^\circ$)	150
Number of vanes Z	43

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Scroll casing

されている周方向位置①～⑥の6点において、同様の計測を行った。融根車出口全圧上昇は、各点で得られた全圧上昇 Ψ^p を流量平均することにより、式(2)から求めた。

$$\Psi_t = \int \Psi^p dq / \int dq \dots\dots\dots (2)$$

ケーシングを用いた場合の羽根車出口静圧は、前述の静圧測定孔(図2)から得られた静圧を相加平均することにより求めた。羽根車単体の場合には流体は羽根車から直接大気へ開放されるので出口静圧は大気圧とした。

変動圧力および変動速度の測定には、それぞれ圧力変換器、熱線流速計を用いた。変動速度ベクトルの測定は、I形熱線プローブを同一測定位置において90°回転させて、直交する二つの熱線の出力から求めた。セル数は、周方向に離して設置した2本のI形熱線プローブの出力の位相差から決定した。

羽根車出口直径の流れは、I形熱線プローブを羽根車出口から約2mmの距離で、羽根車の中央に翼と平行に設置して測定した。ケーシングを用いる場合には、図2の⑥の測定孔の位置で測定した。

4. 結果および考察

4.1 ファン性能と不安定現象 ピトー管計測による性能曲線を図3に示す。羽根車として換気扇用のもの($b/D_2=0.40$)を流用しているが、この換気扇の運転範囲は $\phi=0.1$ から0.2となっている。 $s/D_2=0.08$ のs11ケーシングを用いた場合、用いない場合の全圧上昇係数 Ψ_t 、全圧静圧係数 Ψ_{st} (羽根車入口全圧、出口静圧)およびケーシングを用いた場合に対しては参考値としてケーシング出口での、 Ψ_t 、 Ψ_{st} を示した。図3から、ケーシングを用いると、 Ψ_t はケーシングを用いな

い場合に比べて2倍程度に増大し、 Ψ_{st} も飛躍的に増大していることがわかる。

図4に羽根車出口の速度変動スペクトルを示す。図4(a)は羽根車単体、図4(b)はケーシングを用いた場合である。速度変動の強さを表す変動振幅は周速で無次元化し、図4中に熱線プローブの位相差から求めたセル数 n および伝ば速度比 $\omega/n\Omega$ を最大のピーク値をもつスペクトル成分に対して示す。羽根車単体[図4(a)]では、広い流量範囲で巡回失速に類似した特定周波数の強い速度変動が見られるのに対し、ケーシングを用いた場合[図4(b)]には、速度変動振幅は羽根車単体の1/10以下に抑えられている。また、図4(a)では流量の増加に伴い、セル数が $n=3, 2, 1, 0$ と減少し、変動速度振幅の値も小さくなる。一方、伝ば速度比 $\omega/n\Omega$ は、およそ0.5～0.6範囲内で推移する。これらの結果から、ケーシング付加による羽根車性能の大幅な改善(図3)は、ケーシングにより羽根車に生じる不安定現象が抑制されたためであると考えられる。

図5は羽根車単体の場合における羽根車出口での速度変動のパターン($\phi=0.111$, セル数3, 伝ば速度比0.58)の一例である。ここでは変動速度のベクトルが、一定方向を向いているが、これについては4.4節で考

Fig. 3 Performance curves ($b/D_2=0.13$)

(a) without casing

(b) with casing

Fig. 4 Velocity fluctuation spectra at impeller outlet ($b/D_2=0.13$)

Fig. 5 Velocity fluctuation vectors ($b/D_2=0.13$, $\phi=0.111$, 3cells, $\omega/n\Omega=0.58$)

Fig. 6 Performance curve ($b/D_2=0.40$)

察する。

参考のため一般に広く用いられる羽根幅の大きい $b/D_2=0.40$ の羽根車の性能曲線を図 6 に示す。羽根幅の小さい図 3 の場合と比較して定性的な違いは認められず、図 3 同様、羽根車単体の性能はケーシングがある場合と比べて明らかに低下している。図 7 は羽根車単体の場合の羽根車出口における速度変動スペクトルである。セル数は異なるが図 4 (a) 同様、羽根車単体では強い速度変動が観察されるが、ケーシングを用いると速度変動の振幅は図 4 (b) 同様極めて小さくなる (図省略)。このように変動の発生と羽根車性能の関係は基本的に b/D_2 に依存しないので本研究では簡単のため流れがより二次元的となる $b/D_2=0.13$ の場合を中心に調べた。

以上のように羽根車単体では旋回失速と類似の現象が観察された。旋回失速は羽根車の一部で流量が低下 (増大) すれば迎え角が増加 (減少)、翼の失速に伴って全圧損失が増加 (減少)、羽根車の揚程が減少 (増加) し、その部分で流量がさらに低下 (増大) することによって

Fig. 7 Velocity fluctuation spectra at impeller outlet ($b/D_2=0.40$)

生じ、ある翼の失速に起因して隣接する翼に対する迎え角が一方で増大、他方で減少し失速セルが周方向に伝ばする不安定現象である。

シロッコファンを通過する流れは増速流であり、また羽根車入口での衝突角は通常極めて大きく前述のような迎え角増加に伴う翼の失速や全圧損失の増加が生じるとは考えにくい。もし旋回失速であれば羽根車を静止させ羽根車に等しい迎え角の旋回流を加えても旋回失速が生じるはずである (静止翼列では遠心力やコリオリの力が働かないが、内外径比が 1 に近く羽根車流路内で増速流になっているシロッコファンでは境界層の発達抑制され⁽⁹⁾、不安定現象へ及ぼすコリオリの力の効果は通常の羽根車に比べ小さいと考えられ、ここでは無視して考える)。4・2 節ではこのような実験を行った結果を述べる。

4・2 静止翼列による実験 実験には $b/D_2=0.13$ の羽根車を用い、直径 114 mm の吸込管から旋回流を流した。入口流れ角や全圧は羽根車入口半径 $r_1=59$ mm に対し半径 57 mm を計測位置として、周方向には翼間に法線方向速度および全圧に分布が見られなかったことから翼と翼の中間でスパン方向に 4 点測定することにより求めた。計測には単一孔ピトー管を用いた。出口全圧は羽根車出口半径 69 mm に対し半径 72 mm の位置でスパン方向、周方向にそれぞれ羽根幅を 4 分割、翼間を 5 分割して測定を行った。

図 8 は周方向に翼と翼との中間で、スパン方向にも羽根幅の中央点での羽根車出口における速度変動のスペクトルである。羽根に対する流入角を周方向から計った流れ角 α で表し、予旋回のない回転羽根車でこのような相対流れ角が実現される流量係数を ϕ で表している。速度変動は全流量範囲で図 4 (a) に比べて約 1/30 と極めて小さく、また、特定の周波数の変動も見られない。

Fig. 8 Velocity fluctuation spectra at impeller outlet (Stationary impeller)

Fig. 10 Pressure fluctuation spectra around impeller outlet ($\Phi = 0.10$)

Fig. 9 Pressure loss characteristics of impeller

Fig. 11 Static pressure rise around impeller outlet

図9に羽根車の全圧損失係数 Ψ_t 、入口全圧-出口静圧損失係数 Ψ_{st} を示す。これらの係数は図9中に示すように圧力差を羽根入口周方向速度 $v_{\theta 1}$ の動圧で無次元化したものである。全範囲で Ψ_t はほぼ一定、 Ψ_{st} は右上がりこう配をもつ。線形解析によると旋回失速の発生条件は

$$\partial W_{st} / \partial \Phi < 0 \quad (3)$$

すなわち“周速を一定に保ったまま流量を増加(迎え角を減少)させた場合に入口全圧と出口静圧の差が減少すること”となるが、図9の特性はこの条件を満足していない。

以上より、増速流となるシロッコファン羽根車には“旋回失速”は発生しないことがわかる。

4.3 前向き羽根に生じる不安定現象 羽根車出口で圧力変動が零と仮定した線形理論によると不安定の発生条件は

$$\partial \Psi_{st} / \partial \Phi > 0 \quad (4)$$

となる⁽⁸⁾。前向き羽根をもつシロッコファン羽根車では図3や図6に示すように不安定の発生域でケーシングを用いてその発生を防止した場合、 Ψ_t は正のこう配をもつが、 Ψ_{st} は至るところ右下がりこう配をもち上記線形理論の発生条件を満足していない。本節では

Fig. 12 Estimated performance curves

これについて考察する。

図10に羽根車出口の片側に側板を設け他方を大気に開放した場合の側板上の圧力変動を、図11に側板上の平均圧力を示す。側板を設けた影響は当然含まれるが、羽根車下流のかなりの距離まで圧力変動が見られること、羽根車出口から20 mm程度の間に大きな圧力回復があることがわかる。図12に、羽根車のオイラヘッドから図9の全圧損失を差し引いて求めた Ψ_t 、 Ψ_{st} (損失に及ぼすコリオリの力の効果は無視している)と、種々の半径 r まで二次元的に圧力回復させた場合の Ψ_{st} を示す。図13にこの Ψ_t と、ケーシングを設けた場合の圧力タップの位置 ($r/r_2 = 1.12$, $r = 77.5$

mm)での ψ_{st} を実験値と比較した。ほぼ妥当な結果となっている。

さて図12によると羽根車出口からわずかの距離で大きな圧力回復があり、図11で圧力回復が最大となる位置($r=90$ mm)では ψ_{st} は右上がりこう配を有し不安定の発生条件を満足する。なお20 mmは用いた羽根車の羽根幅とほぼ一致する。

以上の結果より、線形解析との不一致について次のように考えている。前向き羽根をもつシロッコファンでは羽根車出口からわずかの距離で大きな圧力回復があり、 ψ_{st} のこう配は正となる。一方、有限な羽根幅をもつ現実の羽根車では羽根車出口を大気へ開放しても大気の巻込みによりそこでの静圧は一定とはならない。そこで、二次元線形解析で圧力が一定となる仮想的な“出口”は羽根車出口より一定距離だけ下流にとらねばならず、その位置では前記圧力回復により ψ_{st} は正のこう配をもち不安定が発生する。

以上の考察および静止翼列による実験より、シロッコファンに見られる不安定現象は羽根車自体のもつオイラヘッドの右上がり特性により運転流量範囲全域を

含む流量範囲で生じるものであり、部分流量域で見られる翼の失速や逆流に起因した通常の“旋回失速”とは異なるものと考えられる。

4・4 ケーシング形状と不安定の関係 4・1節では、ケーシングにシロッコファンの羽根車に生じる不安定を抑える働きがあることを示したが、この節では、おもにケーシングの大きさと不安定の関係、舌部すきまの広さと不安定の関係に着目する。図14に⑥の測定孔で測定した羽根車出口での速度変動のスペクトルを示す。本図から明らかなように、図14(a)s11ケーシングでは不安定は発生しないが、図14(b)s22ケーシング、図14(c)s44ケーシングとケーシングが大きくなると、低流量域に羽根車単体で発生した伝ば速度比約0.5の速度変動のスペクトルが現れ、速度変動の強さも順に大きくなる。

次に舌部すきまの大きさの影響をより詳細に調べるためにs44ケーシング舌部から平板を半径方向に挿入し[図15(b)]、ケーシング①～⑥各部の速度変動スペクトルを調べた。舌部すきまを減少させると速度変動の大きさはすきまの減少に対し連続的に減少し、すきま22 mmではほぼ完全に非同期離散周波数成分は消滅した。舌部に近い①での速度変動は小さいが、②～⑥の位置のスペクトルに有意差はなかった。

以上のようにケーシングによる不安定防止効果に対しては舌部すきまが大きな役割を果たしている。

4・5 羽根車出口流れ 図15に不安定現象発生下での出口変動速度ベクトルを示す。図15(a)は図14(c)で用いたものと同じケーシングの場合、図15(b)は舌部から平板を挿入し、舌部間隔を30 mmにした場合である。図15(b)の速度変動は図15(a)のそれに比べ明らかに小さくなっていることがわかる。また、 $\phi=0.054$ の低流量で大きな衝突角をもったにもかかわらず、変動速度ベクトルの向きは図16の速

Fig. 13 Performance curves ($b/D_2=0.13$)

(a) s11 casing

(b) s22 casing

(c) s44 casing

Fig. 14 Velocity fluctuation spectra at impeller outlet with casing

度三角形に示されるようにほぼ羽根出口角の方向に一致している。これはシロッコファン羽根車では増速流となるため、羽根車入口で大きな衝突角に伴ってはく離が生じて羽根車出口では流れはほぼ羽根車に沿うためであると考えられる。

図17に羽根車単体の場合、図18にs44ケーシングを用いた場合の、それぞれ羽根車一回転分(0.08 s)の絶対速度の時間波形と速度変動のスペクトルを示す。スペクトルの卓越周波数成分のうち、12.50 Hzは羽根車の回転数成分でありセルパターンに起因する変動成分ではない。羽根車単体(図17)では不安定が生じており、流れが停滞している部分と、細かい波形の部分とに大別される。一方、ケーシング(s44)を用いる場合(図18)では、連続した細かい波形が鮮明であり、この

波数を数えると43であり羽根数と一致することから、この波形は翼1枚1枚の通過の様子を表していることがわかる。また、図17においても良好に流れる領域における絶対速度の時間波形は、安定状態(図18)とほぼ一致している。

図4の中にセル数と旋回速度比を示したが、ここではセル数の変化に伴う羽根車出口流れの変化に着目する。図19に、羽根車単体の場合の羽根車入口全圧 出口静圧 Ψ_{st} と伝ば速度比を重ねて示す。流量が増加すると $\Phi=0.1$ 付近でセル数が3から2に、 $\Phi=0.2$ 付近ではセル数が2から1へ変化し、それに伴って Ψ_{st} 、伝ば速度比ともに急激に上昇する。また、セル数が変化することにより旋回速度比は0.5~0.6の範囲に保たれる。図20は羽根車出口における半径方向速度の時間変化の一例である。ここで $\Phi=0.288$ 、セル数 $n=1$ であり、セルの周期 T が記録されている。すなわち、本図では約0.1 sでセルが一周する。セルの周期 T において良好に流れる時間を T_g とすると、 T_g 以外では半径方向速度がほとんどないことがわかる。また、羽根車出口で良好に流れている領域の割合を L_g =

Fig. 15 Velocity fluctuation vectors at impeller outlet with s44 casing ($\Phi=0.054$)

Fig. 16 Outlet velocity diagram

(a) Velocity fluctuation spectrum

(b) Impeller outlet flow velocity

Fig. 17 Impeller outlet flow velocity and fluctuation spectrum (without casing, $\Phi=0.196$)

(a) Velocity fluctuation spectrum

(b) Impeller outlet flow velocity

Fig. 18 Impeller outlet flow velocity and fluctuation spectrum (with s44 casing, $\Phi=0.196$)

Fig. 19 Propagation velocity ratio and performance curve

T_g/T で表す。図 21 に流量に対する L_g の変化と L_g 内での平均半径方向速度 V_{rgm} を示す。 L_g はセル数の変化により不連続的に変化するが、同一セル数内ではあまり変化していない。一方、 L_g 内の平均半径方向速度は同一セル内で流量の増加とともに増加する。しかし、セル数が変化すると不連続的に変化する事がわかる。したがって、セル数が変化することにより、平均半径方向速度 V_{rgm} 、巡回速度比ともに一定の範囲に保たれる結果になる。

5. 結 論

前向き羽根を有するシロッコファンの基本特性を知るために羽根車単体およびケーシング付き羽根車で実験を行い比較・検討した。以下におもな結論を示す。

(1) 前向き羽根をもつシロッコファンの羽根車を単体で運転するとセル数 1 から 3、伝ば速度比 0.5 から 0.6 の巡回失速に類似の不安定現象が通常の運転流量全域にわたる広い流量範囲で発生する。

(2) (1)の不安定現象は羽根車自体のもつオイルヘッドの右上がり特性による不安定であり、部分流量域で見られる翼の失速や逆流に起因した通常の“巡回失速”とは異なることを明らかにした。

(3) 前向き羽根に生じる不安定現象はケーシングを用いることで抑えられ羽根車の全圧上昇は飛躍的に増大する。さらに、ケーシング、舌部すきまは羽根車の不安定防止効果と深い関連があることを示した。

(4) セルによる流れの停滞領域の大きさと流量、セル数・伝ば速度比と圧力係数の間に関連があること

Fig. 20 Radial velocity change with time

Fig. 21 ϕ L_g and ϕ V_{rgm} curves

を示唆した。

ケーシングは従来、主としてディフューザ効果に着目されていたが、シロッコファンの羽根車に特有の不安定を防止する効果も重要であることを明らかにした。しかし、ケーシングの不安定抑止機構の詳細については今後の研究が必要である。

文 献

- (1) 山崎進・佐藤良次, 機論, **52** 484, B(1986), 3987-3991.
- (2) 山崎進・佐藤良次, 機論, **53** 485, B(1987), 108-113.
- (3) 山崎進・佐藤良次・大熊洋一郎, 機論, **53** 490, B(1987), 1730-1735.
- (4) 門田茂・川口清司・鈴木昌彦・松井数馬・菊山功嗣, 機論, **60** 570, B(1994), 452-457.
- (5) 川口清司・門田茂・鈴木昌彦・松井数馬・菊山功嗣, 機論, **60** 570, B(1994), 458-463.
- (6) Raj, D. and Swim, W. B., *Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power*, **103** (1981), 393-399.
- (7) 森主憲, 機論, **50** 459, B(1984), 2583-2591.
- (8) Stenning, A. H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **102** (1980), 14-20.
- (9) 菊山功嗣・村上光清・大城昌之・安達充兼・原悟・李奎漢, 機論, **51** 472, B(1985), 4162-4169.