

[論文]

## 二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音特性に関する実験的研究 (露出度とスクロール吐出角の影響)

島山 真\*<sup>1</sup> 児玉好雄\*<sup>2</sup> 佐々木壮一\*<sup>2</sup> 林秀千人\*<sup>2</sup> 後藤健一\*<sup>3</sup>

### Characteristics of the Aerodynamics and the Noise of a Dual-cascade Centrifugal Fan (Effects of Bare Ratio and Outlet Angle of Scroll Casing)

Makoto HATAKEYAMA, Yoshio KODAMA, Souichi SASAKI, Hidechito HAYASHI and Kenichi GOTOH

Characteristics of the aerodynamics and the noise of dual-cascade centrifugal fan have been experimentally investigated with respect to the effects of the bare ratio and the outlet angle of scroll casing. It was shown that the performance of the fans became best when the bare ratio was around between 9% to 25%, then the characteristics of the dual-cascade centrifugal fan were superior to that of the single-cascade centrifugal fan. The former was little influenced by the different bare ratio and the fans were able to be widely designed in comparison with the latter, the both characteristics were improved when the outlet angle was 20 degrees.

**Keywords** : Dual-cascade Centrifugal Fan, Noise, Internal Flow, Specific Noise, Scroll Casing

#### 1. 序論

小型遠心ファンの使用用途は多岐にわたるが、近年、空調機器やOA機器の普及にともなうこの種のファンの使用が増加している。このようなファンの多機能化のためにサイズ上の制限を受けることも多く、羽根車の外径を大きくできないときは羽根車高さ、すなわち翼スパンを高くしなければならない場合が生じる。このように羽根車高さを高くした場合には、羽根車の前面シュラウド近傍ではく離や逆流が生じ、ファン性能の大幅な低下を招く<sup>(1)(2)</sup>。このような問題を解決するために、羽根にこう配をつけた羽根車や傾斜スクロールの検討がなされている<sup>(2)</sup>。また、衛生機器のように比較的広い出口面積を必要とするにもかかわらず機器そのものは小型化を要する機器においては、羽根車

外径は大きくできない。このような場合には露出長さを長くしてケーシング吐出幅を広げたり、ケーシングに吐出角をつける必要がある。森主は、多翼ファンの発生騒音が羽根車出口の流れやスクロールケーシング出口流れの影響を強く受けることを実験的に示している<sup>(3)</sup>。このようにケーシングの出口形状を変更すると、空力特性だけでなく騒音特性についても大きな性能の低下を招く恐れがあり、ファンを設計する際には十分な配慮が必要である。

筆者らは、上部翼列の内径が下部翼列のそれより小さい翼列を有する二重翼列遠心ファンを提案している<sup>(4)</sup>。このファンは、上部翼列の内径を大きくすることによって、前面シュラウド近傍で生じるはく離や逆流の改善を図り空力特性を向上させ、併せて騒音レベルの低減を図ることを目的として開発したものである。これまでの二重翼列遠心ファンの研究から、スクロールの広がり角の最適値は6°近傍にあり、隔壁の最適位置は上部翼列と下部翼列の入口/出口

\* 1 東陶機器(株) 商品研究所

\* 2 長崎大学 工学部

\* 3 長崎大学 大学院

原稿受付日 平成13年10月30日

面積比がほぼ等しく、かつ1に近いところがあれば、従来の多翼ファンに比べて高流量時の特性がかなり改善されることが明らかになった<sup>(4)</sup>。

本研究では、露出長さとスクロール吐出角が二重翼列遠心ファンの空力特性や騒音特性に及ぼす影響について実験的に究明した。

## 2. おもな記号

- $B$  : 翼枚数
- $C$  : 翼弦長 (mm)
- $D_i$  : 羽根車の内径 (mm)
- $D_o$  : 羽根車の外径 (mm)
- $d$  : 露出長さ (mm)
- $e$  : 露出度 [=100d/D<sub>o</sub>] (%)
- $f$  : 周波数 (Hz)
- $K_s(A)$  : A特性の比騒音レベルdB(A)
- $L$  : 軸動力
- $L_r$  : スパン長さ (mm)
- $L_{rU}$  : 上部翼列のスパン長さ (mm)
- $L_{rL}$  : 下部翼列のスパン長さ (mm)
- $N$  : 回転数 (rpm)
- $p_s$  : 静圧 (Pa)
- $P_t$  : 全圧 (Pa)
- $Q$  : 流量 (m<sup>3</sup>/min) または (m<sup>3</sup>/s)
- $SPL(A)$  : 音圧レベル (A特性) dB(A)
- $T$  : 吐出管の横断方向の長さ (mm)
- $U_o$  : 羽根車の外縁における周速度 (m/s)
- $W$  : 羽根車出口の相対速度 (m/s)
- $y$  : 吐出管の横断方向の距離 (mm)
- $z$  : スパン方向の距離 (mm)
- $\alpha$  : スクロール角 (deg.)
- $\beta$  : 羽根車出口の相対流出角 (deg.)
- $\eta$  : 送風機効率 [= $\phi \psi / \lambda$ ]
- $\theta$  : ケーシング吐出角 (deg.)
- $\lambda$  : 動力係数

$$\left[ = 2L / \left\{ \pi \rho D_o (L_{rU} + L_{rL}) U_o^3 \right\} \right]$$

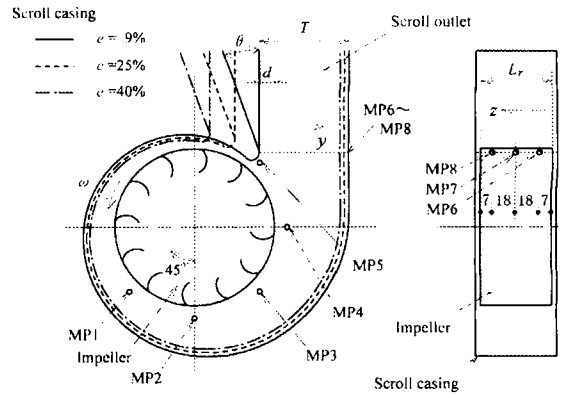


Fig. 1 Schematic diagram of scroll casing and measurement points

- $\rho$  : 空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\phi$  : 流量係数  
[= $Q / \{ \pi \rho D_o (L_{rU} + L_{rL}) U_o \}$ ]
- $\psi$  : 圧力係数 [= $2P_t / (\rho U_o^2)$ ]

## 3. 実験装置および方法

Fig. 1 は実験に用いられるスクロールケーシングの形状と内部流動の測定点を示したものである。スクロールの広がり形状は対数らせん形で、広がり角 $\alpha$ にはその最適条件である $6^\circ$ <sup>(4)</sup>が採用されている。スクロールケーシングの舌部と羽根車の外縁との距離で定義される舌部隙間は6mmに統一されている。露出度 $e$ は式(1)として定義した。

$$e = 100d / D_o \quad \dots(1)$$

ここで、 $d$ は露出長さで図中の $y$ 方向の羽根車の外縁と舌部の頂点とのなす長さで、 $D_o$ は羽根車の外径である。図中の $\theta$ で示されるケーシングの吐出角は、舌部頂点から吐出方向への広がり角である。本実験で調査した露出度 $e$ と吐出角 $\theta$ の設計条件はTable 1に示される通りである。全圧、静圧、速度、流出角などの流動様相の測定には5孔球ピトー管が用いられている。周方向の測定位置は羽根車の外縁より10mm外側でのMP1からMP5までの5点とし、

Table 1 Design parameters

Bare ratio, $e$ (Bare length, $d$ )	9%, 25%, 40% (11mm, 31mm, 50mm)
Outlet angle, $\theta$	0 deg., 20 deg.

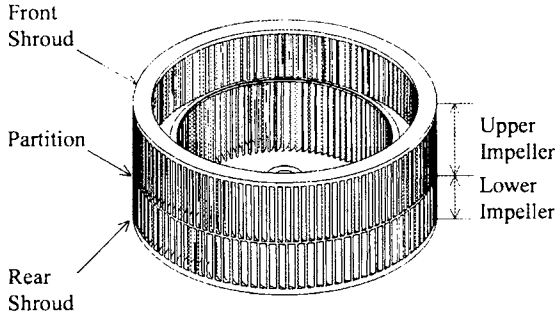


Fig. 2 Dual cascade centrifugal impeller (DC impeller)

そのスパン方向（図中の  $z$  方向）の分布には 5mm 間隔の 9 点が採用されている。ケーシングの吐出管の横断面の測定位置は MP6 から MP8 までの 3 点とし、図中の  $y$  方向の分布には 7mm 間隔の 10 点が採用されている。なお、内部流動と騒音の測定方法は既報と同様である（文献(4)を参照）。

Fig. 2 は二重翼列遠心羽根車の概観図を示したものである。二重翼列遠心羽根車は前面シュラウド側の上部翼列と後面シュラウド側の下部翼列とで構成される。二つの羽根車は隔壁によって仕切られ、これは前面シュラウド側で生じる逆流の領域を狭めることを意図して設計されている。以下、この二重翼列遠心羽根車を DC 羽根車と称し、この羽根車による送風機を DC ファンと呼ぶことにする。また、後述の単翼列の多翼羽根車を SC 羽根車と呼び、そのファンを SC ファンと呼ぶ。

Fig. 3 は本実験に用いられる三種類の供試羽根車の形状を示したものである。Table 2 にはこれらの主要諸元がまとめられている。羽根車の外径は全て 125mm である。DC 羽根車は SC 羽

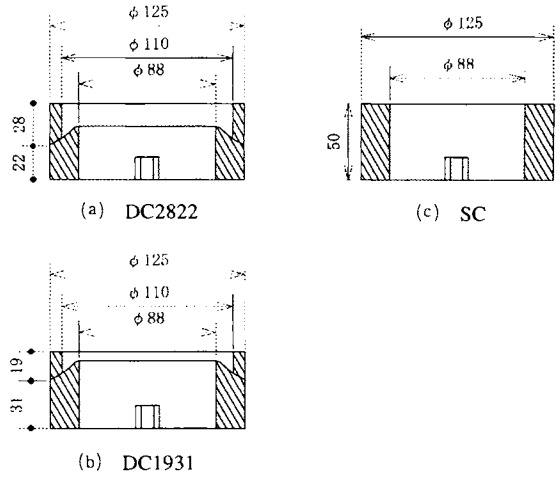


Fig. 3 Test impeller

Table 2 Main dimensions of the impeller

Impeller	DC2822		DC1931		SC
	UC	LC	UC	LC	
$D_o$ mm	125				
$D_i$ mm	110	88	110	88	88
$C$ mm	9	19	9	19	19
$L_r$ mm	28	22	19	31	50
$B$	120	100	120	100	100

根車の入口部の内径を拡大したもので、いずれも上部翼列の内径  $D_i$  が 110mm、下部翼列が 88mm である。二種類の DC 羽根車は、各々を区別するために上部翼列と下部翼列のスパン長さを基にして Fig. 3 (a) の羽根車を DC2822、また Fig. 3 (b) を DC1931 と略して記す。なお、上部翼列と下部翼列のソリディティを近づけるために、羽根枚数は前者が 120 枚、後者が 100 枚となっている。また翼の厚さは 1.6mm で、回転方向に対して前傾した円弧翼である。これらのファンの設定回転数は 2800rpm であり、このとき羽根車の外縁における周速度  $U_o$  は約 18.3m/s である。

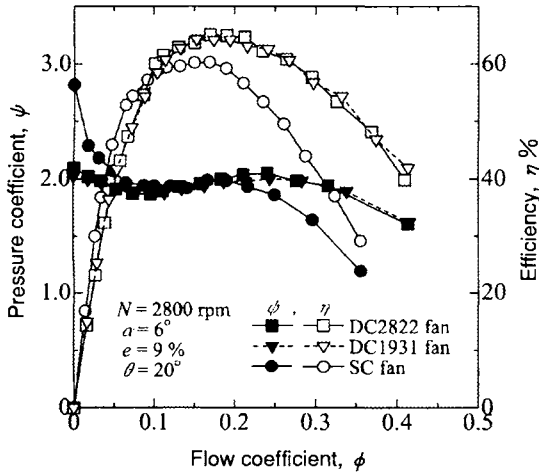


Fig. 4 Characteristic curves

## 4. 実験結果および考察

### 4-1 空力特性

Fig. 4はFig. 3に示す三種類のファンの空力特性曲線である。このとき、スクロールケーシングの露出度 $e$ は9%、吐出角 $\theta$ は $20^\circ$ である。図中の $\phi$ 、 $\psi$ 、 $\eta$ はそれぞれ流量係数、圧力係数および電動機と送風機の総合効率である<sup>(4)</sup>。ファンの設計点の流量係数は約0.23である。SCファンの圧力係数（●印）は流量係数が0.2を越える流量域で低下し、これと傾向を同じくしてその効率（○印）も低下する。また、SCファンの最大の流量係数はDCファンに比べ約20%低くなっており、DCファンがSCファンに比べて高流量に適していることがわかる。

Fig. 5は、露出度 $e$ がファンの効率 $\eta$ へ及ぼす影響を示したものである。以下の特性は全て設計点の流量係数（ $\phi=0.23$ ）に統一し測定されている。Fig. 5では、DCファンの効率は露出度が9%から25%にかけては変化がほとんどない。一方、SCファンの効率は露出度が9%で最も高くなり、露出度を大きくするに従って徐々に低下する。このことは、DCファンの方がSCファンよりも露出度に対する設計の自由度が高

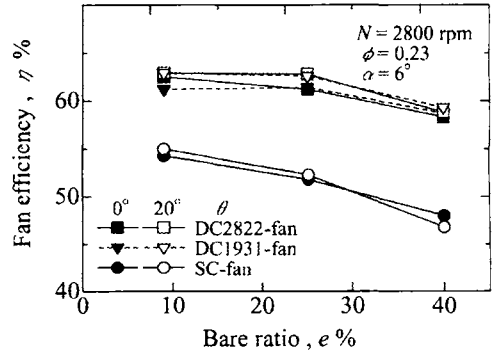


Fig. 5 Effect of bare ratio on the fan efficiency

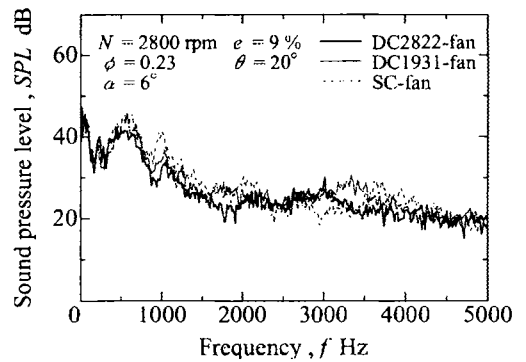


Fig. 6 Spectral distributions of fan noise

く、比較的大口径のダクトと接続された場合も効率の劣化が少ないことを示すものである。また、効率の著しい低下を招く露出度40%を除き吐出角が $20^\circ$ の場合（白抜記号）が、羽根車の形状によらずに効率が高くなっている。Fig. 5のこの傾向は、効率の代わりに圧力係数を用いて整理した場合も同様の変化を示す。

### 4-2 騒音特性

Fig. 6には三種類のファンの騒音のスペクトル分布が示されている。いずれのファンの場合も、羽根車から流出する流れが舌部と干渉して発生する離散的な干渉騒音のピーク（ $f=4667\text{Hz}$ ）は見られない。これは、翼の後流の渦放出流れが超多翼構造を採用することにより短距離で拡散され、干渉騒音が抑制されたことに

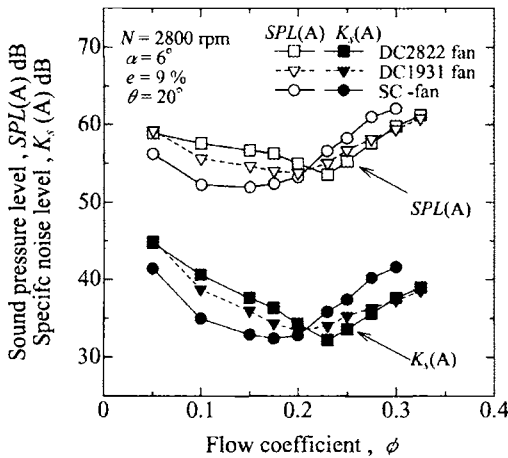


Fig. 7 Relationship between flow rate and the noise properties

よる<sup>(5)</sup>。この場合、ファンの騒音特性は広帯域の乱流騒音の影響が支配的になる。

Fig. 7 はファンの全帯域騒音の音圧レベル  $SPL(A)$  と比騒音レベル  $K_s(A)$  の流量特性を示したものである。比騒音はファンの良否を判断するパラメーターの一つで、式(2)として定義される。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10}(QP_1^2) \quad \dots(2)$$

この比騒音レベルの値が低いほど、総合的に静音性に優れたファンであるとされている。設計点 ( $\phi = 0.23$ ) の近傍では、DC2822ファンの全帯域騒音の音圧レベル (□印) が最も低い。しかし、流量係数がこれよりも低い場合は、SCファン (○印) の騒音がDC2822ファンよりも低くなる。一方、比騒音レベルではSCファンとDC2822ファンの最低値がほぼ同じである。またその流量点はDC2822ファンがSCファンよりも大きい。これは、例えファンを駆動する条件が同じでも、高流量時はDCファンの全圧がSCファンよりも高くなることによるものである。すなわち、DC2822ファンは、騒音特性に空力特性を加味して総合的に評価をした場合、三者の中で最も高流量に適した送風機であると

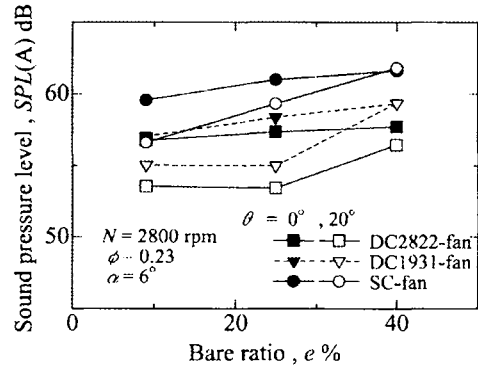


Fig. 8 Effect of bare ratio on the sound pressure level

言える。

Fig. 8 は、露出度  $e$  が全帯域騒音の音圧レベル  $SPL(A)$  へ及ぼす影響を示したものである。吐出角が  $0^\circ$  では、三種類のファンとも音圧レベルは露出度の増加とともに徐々に増加するが、露出度が9%から25%にかけての音圧レベルの増加量はDC2822ファン (■印)、DC1931ファン (▼印)、SCファン (●印) の順に大きくなる。一方、吐出角が  $20^\circ$  では、DC2822ファン (□印) とDC1931ファン (▽印) は、露出度が9%から25%にかけて、音圧レベルの変化がほとんど無いが、SCファン (○印) の音圧レベルは露出度の増加とともに増加する。これらの傾向はFig. 5 の効率の変化とほぼ逆の傾向にある。また、吐出角による変化を見ると、露出度が9%から25%までは、DCファン、SCファンともに吐出角  $\theta$  が  $0^\circ$  (黒塗記号) より  $20^\circ$  (白抜記号) の方がレベルが低く、吐出角を広げることによって、音圧レベルが低下していることがわかる。

### 4-3 内部流動と騒音の関係

#### 4-3-1 露出度の影響

Fig. 9 は露出度  $e$  の違いが静圧  $p_s$  の分布に及ぼす影響を示したものである。静圧は、吐出管に近いMP4の位置で測定された分布が代表して示されている。SCファンの静圧の分布は露出

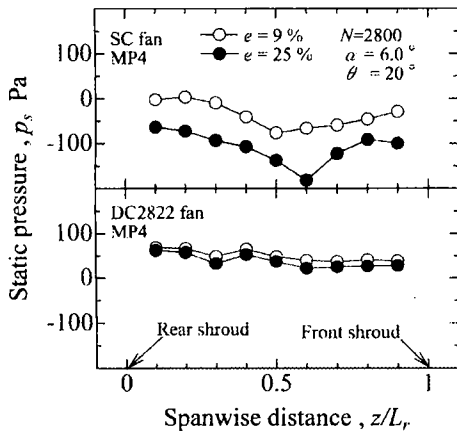


Fig. 9 Distribution of the static of the different bare ratio

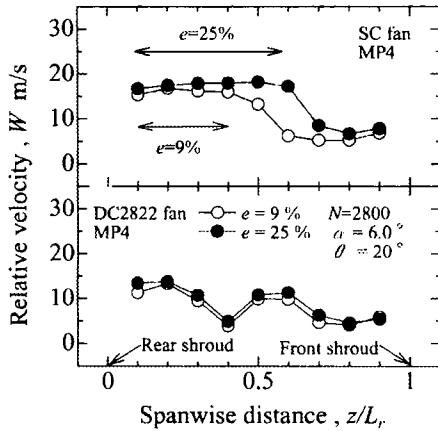


Fig.10 Deistribution of the relative of the different bare ratio

度が増加すると全体的に低下する。一方、DC2822ファンの分布は露出度が9%と25%とでは大きな差が生じない。これらの分布は周方向の測定点の平均値を用いて整理した場合でも同じ傾向を示す。また、この静圧の変化はFig. 5のファン効率の特性と同様であり、ファン性能の変化が静圧の変化によって起きていることがわかる。

Fig.10は露出度  $e$  の違いによる相対速度  $W$  のスパン方向の分布を比較したものである。SCファンの場合、相対速度は露出度が9%では

$z/L_r$  が0.4から0.6で低下するが、25%では0.6から0.8で低下し、その速度こう配の位置が前面シュラウド側へ移動する。Fig.13で示されるように、前面シュラウド近傍では相対流出角がほぼ0であるため、相対速度ベクトルはほぼ接線方向となり、半径方向速度は0に近い。このことはこの領域では流れがはく離していることを示している。したがって、この露出度の違いによる分布の変化は、SCファンの場合、露出度の増加とともに前面シュラウド側で生じる流れのはく離領域が狭められることを示すものである。一方、DC2822ファンの相対速度の分布には大きな変化がない。周方向の平均値についても、SCファンはDC2822ファンに比べ相対速度  $W$  の上昇が大きい。

筆者らは、小型多翼ファンの内部流動と乱流騒音の関係を式(3)の予測式で整理した<sup>(6)</sup>。

$$E = \pi B \rho \int_{SPAN} DW^6 dz / (2400 a_0^3) \quad \dots(3)$$

ここで、 $E$  は音響エネルギー、 $B$  は羽枚数、 $D$  は後流の幅、 $W$  ははく離点での相対速度、 $a_0$  は音速である。この予測式は小型多翼ファンの乱流騒音だけでなく、多翼ラジアルファン<sup>(7)(8)</sup>の乱流騒音も  $\pm 2.0\text{dB}$  以内の精度で予測できるものである。ここでは、この予測式を基にSCファンとDC2822ファンの内部流動と乱流騒音の関係について考察する。式(3)で示される相対速度  $W$  の6乗が音響エネルギーの変化と関係することを考えれば、Fig. 8における音圧レベルの傾向は主として、スパン方向の相対速度の変化として理解することができる。すなわち、SCファンは露出度を増加させることで前面シュラウド側のはく離した領域は狭められるが、騒音レベルは相対速度  $W$  の6乗に比例するため、スパン方向の音源面となる (Fig.10中の矢印) 領域は広がることを意味する。また、相対速度の大きさもSCファンの方がDC2822ファンより大きく、騒音レベルを大きくする傾向にあることが

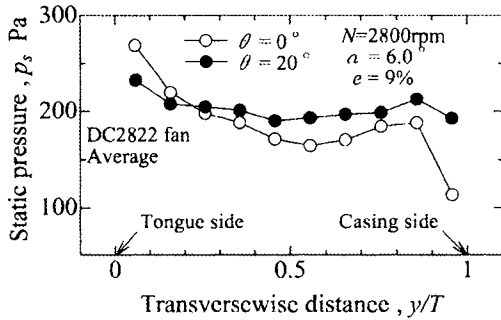


Fig.11 Distribution of the static pressure at nozzle outlet

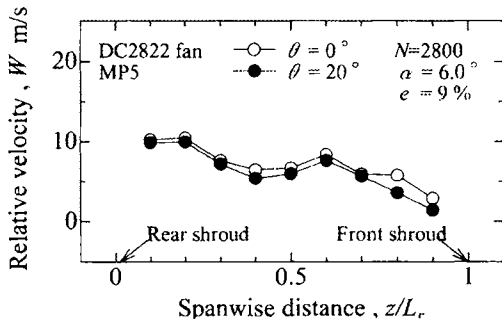


Fig.12 Distribution of the relative velocity of the different outlet angle

わかる。

#### 4-3-2 吐出角の影響

Fig.11は吐出角 $\theta$ の違いによるケーシング吐出管の横断方向（ $y$ 方向）の静圧 $p_s$ の分布を、DC2822ファンについて比較したものである。吐出管の横断方向の静圧には、MP6からMP8までの平均値が用いられている。吐出角が $0^\circ$ から $20^\circ$ にすると吐出管の断面積が広がるために、吐出管内の流速は相対的に低下し静圧が上昇する。しかし、舌部近傍の静圧は吐出角が $20^\circ$ の方が低い。これは、吐出角を広げることにより吐出管内の舌部近傍の流れが吐出管の側壁に沿って流れるため局所的に動圧が上昇し、それに応じて舌部近傍の静圧が減少したものと考えられる。また、そのことによって吐出管横断面の静圧分布が均一化されたと考えられる。このことは、SCファンに関しても同様である（図省

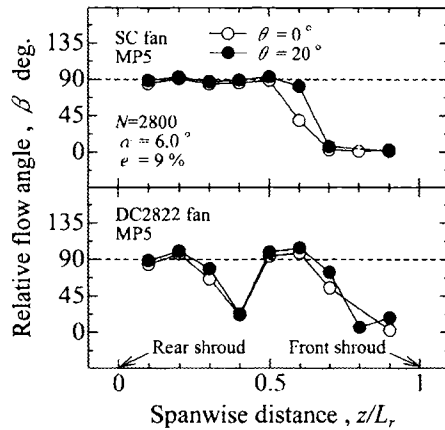


Fig.13 Distribution of the relative flow angle of the different outlet angle

略)。

Fig.12は吐出角 $\theta$ が相対速度 $W$ の分布へ及ぼす影響を、DC2822ファンについて示したものである。相対速度は舌部に近いMP5での分布が示されている。相対速度の分布は吐出角が増加するとわずかに低下している。この相対速度の変化量のみが式(3)の予測式によって音圧レベルの変化量へ換算されると、音圧レベルが約3dB減少することになる。この変化はFig. 8に示される実験の傾向と一致する。

Fig.13は吐出角 $\theta$ の違いによる相対流出角 $\beta$ の分布を比較したものである。相対流出角のスパン平均としては $90^\circ$ よりも小さい。また、どちらのファンも吐出角が $0^\circ$ より $20^\circ$ の方が相対流出角が増加している。したがってMP5での相対速度 $W$ は、相対流出角 $\beta$ の増加に伴って減少することになる。また、翼の出口角が $90^\circ$ 以上の前傾翼であることから、相対流出角の増加は、後流の幅の減少を意味している。これらのことから、Fig.13は、相対速度及び後流の幅の変化があいまって、前節の露出度の場合とは逆に、吐出角が増加するとファン騒音が減少することを示すものである。

## 5. 結論

本研究では、露出度とスクロールの吐出角が二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音特性に及ぼす影響を実験的に調査した。その結果、以下の結論を得た。

- ① DCファンの露出度の最適値は空力特性と騒音特性の両者を加味すると、露出度が9%から25%に存在する。
- ② 設計点の近傍で露出度が増加した場合、SCファンのファン効率と全帯域騒音の音圧レベルは劣化するが、DCファンは両特性とも大きな変化が生じない。
- ③ DCファンは露出度を25%まで増加させても前面シュラウド側での流れのはく離領域の流動状態が変化しない。
- ④ 本研究の範囲では、DCファンとSCファンの両者とも吐出角を $20^{\circ}$ にすることで、効率が向上し、全帯域騒音の音圧レベルが低減する。

## 〈参考文献〉

- (1) King, R.J・Tobin, M.G., Flowin a Centrifugal Fan of the Squirrel-Cage Type, Trans.ASME, 112 (1990), 84.
- (2) 山崎・他2名, 多翼送風機の羽根車およびスクロール形状の軸方向変化が性能と騒音に及ぼす影響, 機論(B) 63-614 (1997), 3325.
- (3) 森主, 多翼ファンの騒音発生源, 機論(B) 57-543 (1991), 3837.
- (4) 児玉・他3名, 二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音特性に関する研究(スクロール角及び隔壁の影響), ターボ機械, 29-8 (2001), 456.
- (5) 新原・他3名, 多翼ラジアルファンの流体力学的特性と騒音特性に関する実験的研究(流体力学的特性および騒音特性に及ぼす羽根車内径, 羽根枚数の影響), 機論(B) 62-602 (1996), 3642
- (6) 畠山・他4名, 小型シロッコファンの乱流騒音について, 長崎大学工学部研究報告, 31-57 (2001), 15.
- (7) 児玉・他2名, 多翼ラジアルファンの乱流騒音の予測, ターボ機械, 24-8 (1996), 477.
- (8) 児玉・他2名, 多翼ラジアルファンの乱流騒音の流量特性とその音圧レベル予測, ターボ機械, 25-2 (1997), 65.