

二重翼列遠心ファンの空力特性と乱流騒音について

長崎大学

見玉 好雄・佐々木壮一

東陶機器(株)

畠山 真

〔論文〕

二重翼列遠心ファンの空力特性と乱流騒音について

児玉好雄*¹ 畠山 真*² 佐々木壮一*³

Aerodynamic Characteristics and Turbulent Noise in a Dual-Cascades Centrifugal Fan

Yoshio KODAMA, Makoto HATAKEYAMA and Souichi SASAKI

The effects of three parameters ; the location of the partition of impeller, the bare ratio and the outlet angle of scroll casing on the turbulent noise and aerodynamic characteristics, were experimentally investigated in the dual-cascades centrifugal fans. In this report, we proposed a new method to estimate the wake width which is an important parameter to calculate the turbulent noise. It was shown that the fan noise became lower when the bare ratio was from 9% to 25% and the outlet angle of scroll casing was about 20°. When the inlet/outlet area ratio of upper cascade was equal to that of the lower cascade and both of these are equal to about unity, the fan noise became lower. The predicted sound pressure level agrees well with the experimental values of the overall turbulent noise with L-weighting and A-weighting functions.

Keywords : Dual-Cascades Centrifugal Fan, Fan noise, Turbulent Noise, Aerodynamic Characteristics

1. 緒言

遠心ファンの空力特性と騒音は羽根車の入口面積と出口面積の比に大きく依存する。この面積比が小さくなるほど、前面シュラウド近傍におけるはく離や逆流が発生しやすく、そのスパン方向の領域も広がり、空力特性や騒音特性は悪化する。一方、面積比を大きくすれば、相対速度が大きくなり騒音の増加を招く。この結果、比騒音レベルも高くなる。

そこで遠心ファンの特性を改善するために著者らは羽根車の上部の内径を広げて、上部翼列と下部翼列の内径が異なる二重翼列遠心ファンを製作し、隔壁の位置とスクロール広がり角がファンの空力特性と騒音に及ぼす影響について研究を行った⁽¹⁾。この結果、通常が多翼遠心ファン（シロッコファン）に比べて騒音と空力特

性がかなり改善されることや遠距離場で問題になるのは乱流騒音であることを明らかにした。

著者らの一部は送風機の乱流騒音の理論解析を行い、音圧レベルが動翼によって作られる後流の幅と相対速度の6乗に比例するという予測式を提案した⁽²⁾。さらに、この式が種々のファンに適用できることを明らかにした^{(2)~(6)}。

二重翼列遠心ファンの騒音特性を改善するためには乱流騒音発生に関与する因子について詳細に調査し、検討することが肝要である。上述の乱流騒音の予測式を本研究に適用する場合、後流の幅および羽根に対する相対速度の予測が重要である。

上述の背景に立脚して本研究では、後流の幅の予測法の導入を試みるとともに、この予測法の妥当性を二重翼列遠心ファンと翼弦長の異なる二種類の単翼列遠心ファンを用いて騒音の予測値と実験値との比較で明らかにした。さらに露出度、スクロール吐出角などの因子が乱流騒音と空力特性に及ぼす影響についても検討した。

* 1 長崎大学 工学部
E-mail : ykodama@net.nagasaki-u.ac.jp
* 2 東陶機器(株)、長崎大学 大学院
* 3 長崎大学 工学部
原稿受付日 平成14年6月12日

また、乱流騒音の予測は聴感補正を施していないL特性と聴感補正を施したA特性の両特性で行った。

2. おもな記号

- A_r : 入口/出口面積比 [= $(\pi D_i^2 / 4) / (\pi D_o L_r)$]
 a_o : 音速 (m/s)
 B : 動翼枚数
 C : 翼弦長 (m) または (mm)
 D : 後流の幅 (m) または (mm)
 D_i : 羽根車内径 (m) または (mm)
 D_o : 羽根車外径 (m) または (mm)
 d : 羽根車頂点と舌部間の間隔 (mm)
 E : 音響出力 (W)
 e : 露出度 (%)
 f : 周波数 (Hz)
 $K_s(A)$: A特性の音圧レベルに基づく
比騒音レベル (dB)
 $K_s(L)$: L特性の音圧レベルに基づく
比騒音レベル (dB)
 L_r : 羽根出口のスパン長さ (mm)
 N : 回転数 (rpm)
 p : 音圧 (Pa)
 p_o : 最小可聴音圧 (Pa)
 P_T : 全圧 (Pa)
 Q : 流量 (m^3/s) または (m^3/min)
 $R(\theta_c)$: 角度 θ_c における
スクロールケーシングの半径 (m)
 r : 音源と観測点間の距離 (m)
 $SPL(A)$: A特性における音圧レベル (dB)
 $SPL(L)$: L特性における音圧レベル (dB)
 W : 代表相対速度 (m/s)
 W_m : 平均相対速度 (m/s)
 z : スパン方向の距離 (mm)
 z_p : 後面シュラウドと隔壁間の距離 (mm)
 α : スクロール角 (deg.)
 β_2 : 羽根出口における流出角 (deg.)

- γ_1 : 羽根入口角 (deg.)
 γ_2 : 羽根出口角 (deg.)
 θ : ファンの軸中心と観測点とのなす角
(deg.)
 θ_c : 対数らせ線の出発点からの角度 (deg.)
 θ_d : スクロール吐出角 (deg.)
 η : ファン効率
 ξ : 取り付け角 (deg.)
 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)
 ϕ : 流量係数
 ψ : 圧力係数

3. 乱流騒音の基礎式

羽根車の上流に障害物がなく、羽根車に流入する流れの乱れが小さい場合には、送風機から発生する騒音は主として翼後縁から放出される渦に起因する。この騒音の音響出力 E は式(1)で与えられる^{(2)~(4)}。

$$E = \pi B \rho [DW^6 dz / (2400 a_o^3)] \quad \dots(1)$$

ここで B は動翼枚数、 ρ は空気の密度、 D は後流の幅、 W は代表相対速度、 z はスパン方向の距離、 a_o は音速である。市販のソフト（タスクフロー）から求めた翼周りの数値シミュレーション結果（図省略）、翼弦長のほぼ中央ではく離することが分かったので、これを参考にして入口相対速度と出口相対速度の平均値すなわち平均相対速度を本研究では代表相対速度として用いた。

一方、送風機の乱流騒音の場合、音の放射特性は双極子形であるから、音響出力 E と観測点の音圧 p とは次のように関係付けられる^{(2)~(4)}。

$$E / 2 = 4 \pi r^2 p^2 / (3 \rho a_o \cos^2 \theta) \quad \dots(2)$$

ここで r は音源と観測点との距離で、実際は入口ノズル端からマイクロホンまでの距離である。

また、 θ は音源を中心としてファンの軸中心と観測点とのなす角で、本実験では 0° である。

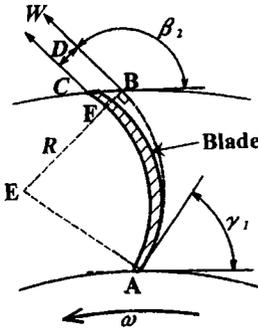


Fig. 1 Definition of the wake width

以上の関係を基に、次式より観測点の音圧レベル (SPL) が求まる^{(2)~(5)}。

$$SPL = 10 \log_{10}(\overline{p^2} / p_o^2) \quad \dots(3)$$

ここで p_o は最小可聴音圧で 0.00002Pa である。

なお、本研究では聴感補正を施したA特性における音圧レベルの予測も行った。この予測に関しては文献(7)に述べている予測法を用いた。

4. 後流の幅の予測法

式(1)に示すように、乱流騒音を予測するためには相対座標系における後流の幅 D の算定が必要である。後流の幅を得る方法として、後流の速度変動波形を用いる方法がある⁽⁴⁾⁽⁷⁾が、本研究で用いているような羽根枚数が非常に多いファンでは速度変動波形を精度良く得ること自体簡単ではない。また、このような方法で後流の幅を計算することは非常に煩雑である。これを簡単に決定できれば音圧レベルの予測にあたって好都合である。このことを考慮して、本研究では、Fig. 1 に示す関係により後流の幅 D を近似的に算定する方法を試みた。

Fig. 1 は遠心ファン内の流れの概要を示したものである。流れは、負圧面側では設計流入角 γ_1 で流入し、円弧状に流れて流出角 β_2 で流出する。また、圧力面側では、翼面に沿って流れ、流出角 β_2 で後縁から流出するものと仮定する。後縁において流れ方向に垂直な線を立て

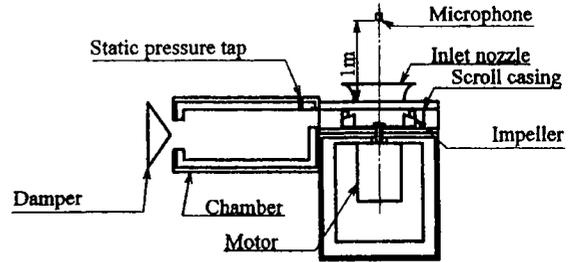


Fig. 2 Experimental apparatus for noise measurement

て正負両面間の幅を D とすれば、 D が求める後流の幅である。

5. 実験装置及び方法

Fig. 2 は騒音測定用の装置の概要を示したものである。吸込口には入口ノズルが取り付けられており、吐出口には長さ 1100mm 、幅 500mm 、高さ 500mm の無響箱が設けられている。流量調整は無響箱出口のダンパで行った。また電動機からの騒音を遮断するために、電動機はフェルト製吸音材が内張してあるアルミニウム製の箱に収められており、さらに箱全体をゴム製遮音材で覆っている。騒音測定は無響室で行った。

騒音測定位置は送風機の回転軸中心上の入口ノズル端から 1m 上流の点である。騒音計からの出力信号はFFTアナライザを用いて周波数分析した。騒音は聴感補正を施していないL特性と聴感補正を施したA特性で行った。また、空力特性の測定は文献(1)に示した実験装置を用いて行った。

二重翼列遠心羽根車 (以後DC羽根車と呼ぶ) をFig. 3 に、供試羽根車の概要をFig. 4 に示す。二重翼列遠心羽根車の上部翼列と下部翼列は隔壁で仕切られている (Fig. 4(a)参照)。これには隔壁の位置が異なるDC2822、DC1931、DC1139の三種類の羽根車がある。それらの羽根車のスパン長さと入口/出口面積比 A_r をTable 1 に示す。これらの羽根車を内蔵したファンを

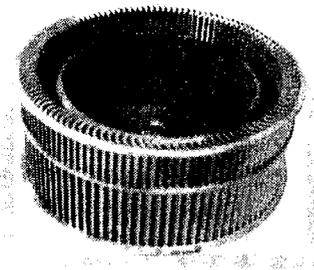
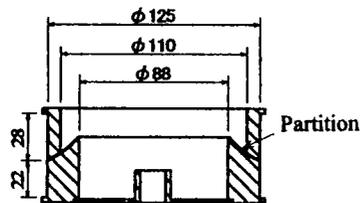


Fig. 3 Dual-cascade impeller

Table 1 Dimensions of the DC-impeller

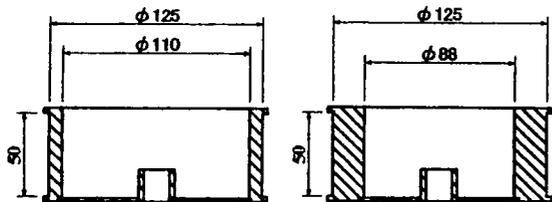
Impeller		L_r mm	A_r
DC2822	U.C.	28	0.86
	L.C.	22	0.70
DC1931	U.C.	19	1.27
	L.C.	31	0.50
DC1139	U.C.	11	2.20
	L.C.	39	0.40



(a) DC2822 impeller

Table 2 Main dimensions of the impeller

Impeller	DC2822		SC9	SC9
	U.C.	L.C.		
B	120	100	100	100
D_o mm	125			
D_i mm	110	88	88	110
C mm	9	19	19	9
L_r mm	28	22	50	50
γ_1 deg.	64.7	57.9	57.9	64.7
γ_2 deg.	27.4	35.5	35.5	27.4
ξ deg.	102	97	97	102
A_r	0.86	0.70	0.31	0.48



(b) SC9 impeller

(c) SC19 impeller

Fig. 4 Test impeller

DC2822、DC1931、DC1139ファンと呼ぶことにする。

また、翼弦長が乱流騒音に及ぼす影響を調べるために、弦長が9mmと19mmの単翼列の羽根車も用いて実験を行った。前者をSC9羽根車、後者をSC19羽根車⁽¹⁾と呼ぶ。Table 2にこれらの羽根車の主要諸元を示す。これらのファンの設定回転数は2800rpmであり、羽根車外縁における周速度 U_o は約18.5m/sである。

Fig. 5はスクロールケーシングを示したものである。ケーシングは平行壁を有するスパイラルケーシングであり、スクロールの広がり形状は対数らせん形状である。また、スクロールケー

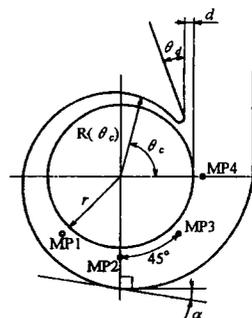


Fig. 5 Schematic of the scroll casing

シングの広がり角 α は6°⁽¹⁾である。スクロール吐出角 θ_d と露出長さ d はFig. 5のように定め、 d を羽根車外径 D_o で除して100倍したものを露出度 e と定義し、百分率で表した。図中のMP1~MP4は流動様相の計測断面である。

計測は5孔球形ピトー管を用いてスパン方向には5mm間隔の9点で行った。なお、舌部と羽根車外径の間のすきまで定義される舌部すきま

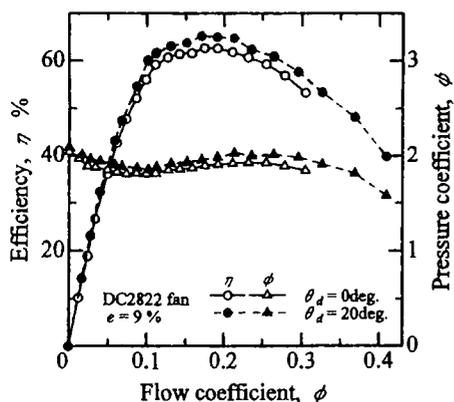


Fig. 6 Effects of the outlet angle at scroll casing on characteristic curves

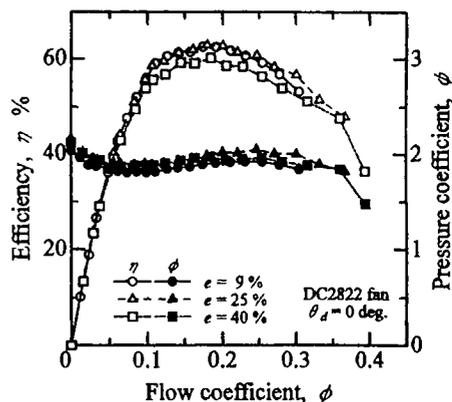


Fig. 7 Effects of the bare ratio on characteristic curves

はいずれのファンとも6mmである。

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、ケーシング吐出角 θ_d をつけたり、露出度 e を大きくする必要がある。

本研究ではスクロールケーシングの吐出角 θ_d として、 0° 、 20° の2種類を、露出度 e として9%、25%、40%の3種類を採用した。

6. 実験結果および考察

6-1 空力特性

Fig. 6は特性曲線に及ぼすスクロール吐出角 θ_d の影響を示したものである。図中の ψ 、 ϕ および η はそれぞれ圧力係数、流量係数、電動機とファンの総合効率である⁽¹⁾。また、白抜き記号は θ_d が 0° の場合を、黒塗り記号は 20° の場合を示している。 θ_d を増加させれば、効率と圧力係数がほぼ全流量域において上昇することが分かる。

なお、スクロール吐出角 θ_d を 30° にすればケーシング出口の舌部下流ではく離や逆流が生じて、圧力やファン効率がかなり低下するという結果⁽⁸⁾から判断して今回は吐出角が 30° の実験は

省略した。以上の結果を考慮すれば、吐出角の最適値は 20° 近傍に存在すると考えられる。

Fig. 7は露出度 e が二重翼列遠心ファンの空力特性に及ぼす影響を示したものである。この図より、最大流量は露出度が大きくなるにつれて増加すること、最高効率も露出度が9%と25%ではほとんど同じであるが40%では若干低下すること、圧力係数に関しては、ほぼ全流量域で露出度が25%のファン(▲印)が、他のファンより若干高いこと、また露出度40%のファンは、どの露出度のファンよりも、ほぼ全流量域で効率が低下すること、などが分かる。

Fig. 8は設計流量点 $\phi = 0.23$ におけるファン効率のファンによる差異を示したものである。いずれのファンも、露出度 e が大きくなるにつれて効率は低下する。これは前述したように露出度が大きくなるにつれてスクロール出口におけるスクロールケーシングを通過しない流れが増加し、静圧の変換が効率よく得られないことのためである。一方、DC2822ファン(○印)とSC9ファン(□印)とはほとんど効率に差はないが、SC19ファンは前二者に比べて、効率が8~10%低下している。

これはSC19羽根車は羽根車入口/出口の面積比が後者が前二者より小さいために前面シュ

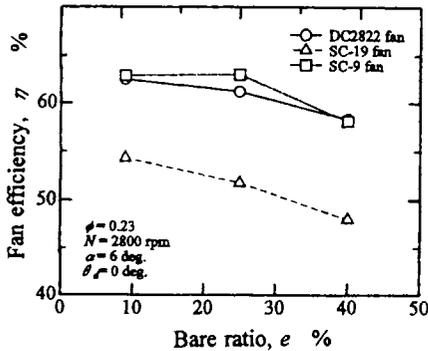


Fig. 8 Effects of the bare ratio on the fan efficiency

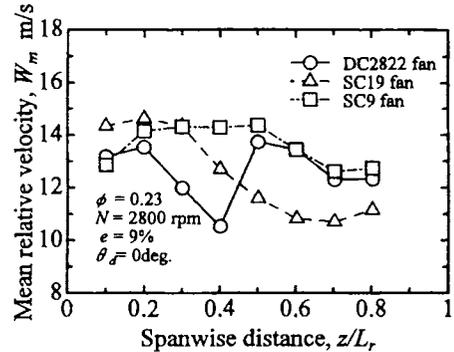


Fig. 10 Spanwise distribution of the mean relative velocity

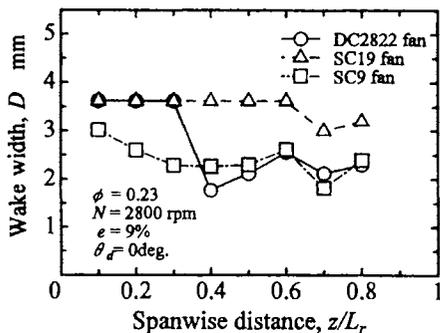


Fig. 9 Spanwise distribution of the wake width

ラウド近傍ではく離や逆流が生じる領域が広がることや、翼弦長が長いために境界層が発達しやすく、後流の幅が広くなり (Fig. 9 参照)、圧力損失が増加することに基づいている。

6-2 流動様相

Fig. 9 は後流の幅の-spanwise 方向分布を三種類のファンについて示したものである。なお-spanwise 方向の各点の値は計測断面MP1~MP4の4断面 (Fig. 5 参照) の平均値である。DC2822ファン (○印) は、-spanwise 方向距離 z/L_r が0.3近傍まではSC19ファン (△印) と後流の幅はほとんど同じであるが、0.4以上ではSC9 (□印) とほぼ同じ値になる。またDC2822ファンにおいて z/L_r が0.3近傍で後流の幅が低下するのはここに隔壁があるためであり、この近傍で流れが上部翼列と下部翼列の翼面により沿うようになる。

-spanwise 平均値では後流の幅はSC19ファンがほぼ3.5mm、DC2822ファンが2.7mm、SC9ファンが2.4mmである。

Fig. 10に平均相対速度 W_m の-spanwise 方向分布を示す。 W_m を求めるに当たっては、入口流れは羽根に沿って流れると仮定して入口相対速度は計算で求め、出口相対速度は実験値を用いて算出した。DC2822ファンの相対速度は-spanwise 方向距離 z/L_r が0.5以上でSC9ファンとほぼ同じになる。これは上部翼列の内径がSC9ファンと等しいためである。また、 z/L_r が0.4以下では内径の小さいSC19よりも相対速度は低い。全-spanwise で平均すれば、DC2822とDC19ファンでは差はほとんどないが、SC9ファンでは高くなる。このことは、入口内径を大きくすれば、入口相対速度が増加し、ひいては平均相対速度の増加につながる。このため、騒音が高くなることが予測される。しかしながら二重翼列遠心ファンにすることによって、平均相対速度の-spanwise 平均値を下げるができる。このことは騒音の低減化につながるものと考えられる。

6-3 騒音特性

Fig. 11はスクロール吐出角が二重翼列遠心ファン騒音のスペクトル分布に及ぼす影響を示したものである。いずれの吐出角においても回転騒音 [基本周波数 (4967Hz) およびその高調波]

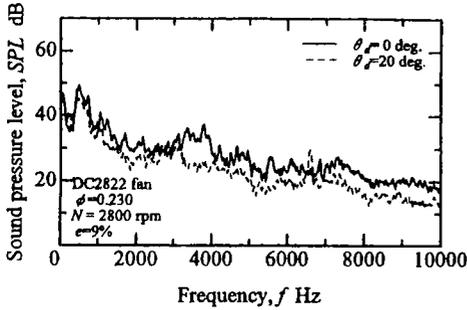


Fig.11 Spectral distribution of the fan noise

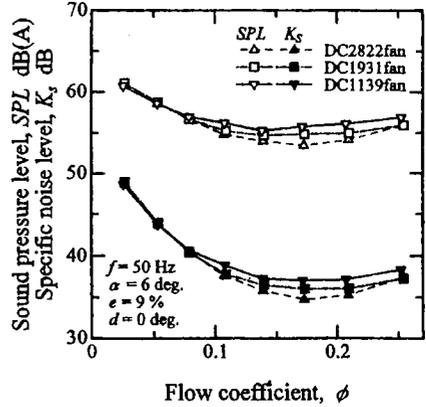


Fig.12 Change in SPL and K_s with flow rate

は現れていない。これは舌部すきまが6mmと比較的広いこと、動翼枚数が100~120枚と多いため、翼間で後流の干渉が生じ、後流が比較的近距离で一様化されるためと考える。このことは、二重翼列遠心ファンで問題になる騒音は乱流騒音であることを示すものがある。スクロール吐出角が騒音のスペクトル分布に及ぼす影響は小さいが、吐出角 θ_d が 0° のファンは 20° のファンに比べて全周波数域で音圧レベルが若干高い。

送風機騒音の評価の一つに音圧レベルに流量と圧力を加味した式(4)で表される比騒音レベル K_s がある。この値が低いほど良好な送風機あるいは静音の送風機と呼ばれている。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10}(Q P^2) + 2 \quad \dots(4)$$

ここでSPLは音圧レベル(dB)、 Q は流量(m^3/s)、 P は全圧(Pa)である。Fig.12は二重翼列遠心ファンの隔壁の位置が全帯域騒音と比騒音レベルに及ぼす影響を示したものである。図中の白抜き記号は音圧レベルを、黒塗り記号は比騒音レベルを表している。図中のDC2822は隔壁が前面シュラウドから下方28mmの位置、後面シュラウドから上方22mmの位置($z_p = 22mm$)にあることを示している。音圧レベル、比騒音レベルはともに隔壁の位置が前面シュラウドに近づくにつれて、すなわち $z_p = 22mm$ 、31mm、39mmの順に、ほぼ全流量域で高くなる傾向が見られる。これはDC2822の場合は上部翼列と

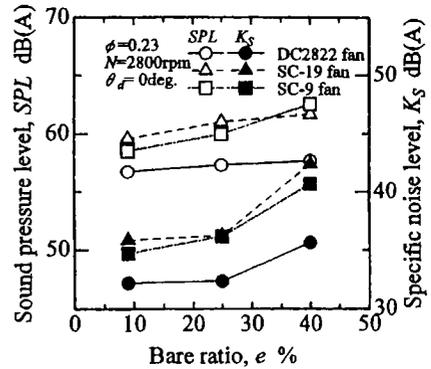


Fig.13 Effects of the bare ratio on the SPL and K_s

下部翼列の羽根入口/出口面積比がともに1近くであるが、隔壁位置が前面シュラウドに近づくに従い、下部翼列の面積比が1より低下して行き、下部翼列において隔壁の下面近傍の流れが悪くなり、逆流や渦などが発生して翼面上の境界層が発達し、結果として後流の幅が厚くなったためと考えられる。

Fig.13は三種類の羽根車の騒音特性に及ぼす露出度の影響を設計流量 ϕ が0.23について表したものである。図中の白抜き記号は音圧レベルを、黒塗り記号は比騒音レベルを示している。Fig.13に示す音圧レベルは露出度が増加するにつれて増加するが、増加率はDC2822ファン(○印)が最も低く、SC9ファン(□印)が最

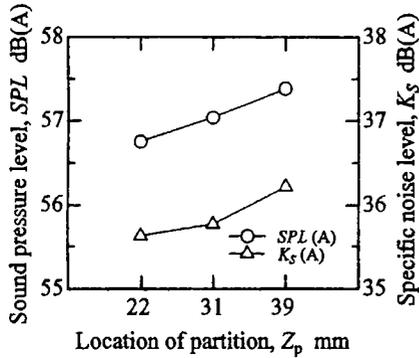


Fig.14 Effects of the location of partition on the SPL and K_s .

も急激に増加する。また、いずれの露出度に関してもDC2822ファンが音圧レベルが最も低い。

黒塗り記号で示した比騒音レベルも音圧レベルの場合と同様なことがいえる。DC2822ファン（●印）の場合は露出度が25%までほとんど変化が無く最もレベルが低い。したがって、騒音特性の面からはDC2822ファンが最も静音性に優れたファンといえる。またFig. 8のファン効率も勘案すればDC2822ファンが最も良好なファンといえる。以上の結果から、羽根車の入口直径を大きくして二重翼列遠心ファンにすれば、空力特性及び騒音特性の両特性ともに良好になることが期待される。また、DC2822ファンを用いれば、両特性をほとんど損なうことなくスクロール出口面積を広げることが可能である。

Fig.14は隔壁の位置がファンの騒音特性に及ぼす影響を示したものである。後面シュラウドから隔壁の位置までの距離 z_p が広がるにしたがって音圧レベル（○印）は徐々に増加する。

これは隔壁が前面シュラウドに近づくにつれて下部翼列において隔壁下面のはく離や逆流領域が広がり（図省略）、これに起因する騒音が増加するためと考える。一方、比騒音レベル（△印）も音圧レベルと同様の傾向が見られる。これも下部翼列の面積比が1より小さくなり

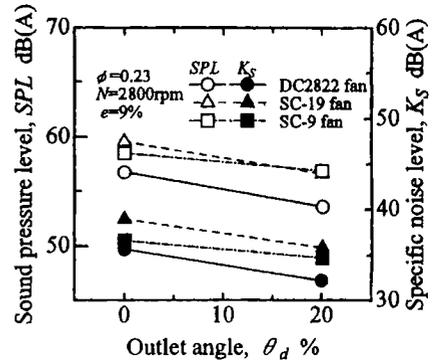
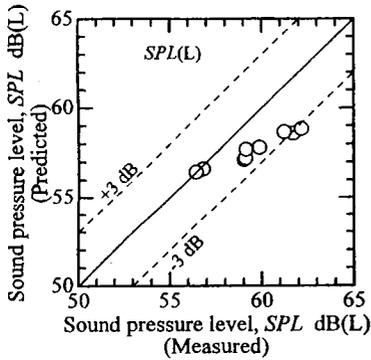


Fig.15 Effects of the outlet angle at scroll casing on the SPL and K_s .

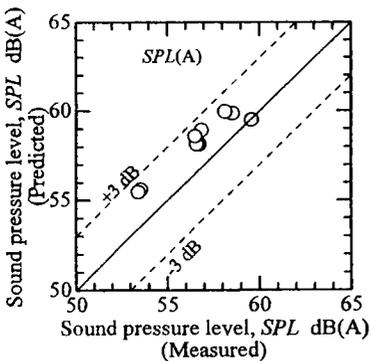
く離域や逆流域が増加し、音圧レベルが増加することに主因がある。以上の結果より、本研究範囲では二重翼列ファンとして上部翼列と下部翼列の入口／出口面積比がともに1に近いDC2822ファンが最も良好なファンであるといえる。

Fig.15はスクロール吐出角 θ_d が音圧レベルに及ぼす影響を示したものである。白塗り記号の音圧レベル、黒塗り記号の比騒音レベルともに、三種類のファンいずれも吐出角が0°の場合より20°の場合が低下している。吐出角を30°にすれば、第6章の1節で述べたように圧力が低下するので、たとえ音圧レベルが20°の場合と同じであったとしても、比騒音レベルが20°の場合より高くなるのは避けられないであろう。したがって騒音特性の面からも、吐出角の最適値は20°近傍であろう。

Fig.16(a)、(b)は乱流騒音の全帯域音圧レベルの実験値と予測値の比較を行ったものである。45°の太い実線は実験値と予測値とが一致した点を結んだ線である。細い実線は±3dBの誤差を示す線である。Fig.16(a)はL特性の結果である。一方Fig16(b)は文献(7)に述べた方法を用いて算出したA特性の結果である。全帯域音圧レベルの実験値と予測値とはL特性、A特性のいずれもほぼ±3dB以内の精度で一致することが



(a) With L-weighting function



(b) With A-weighting function

Fig. 16 Comparison of measured sound pressure level and predicted values

分かる。これらのことより、本研究で用いた後流の幅の予測法はほぼ妥当であると考ええる。

7. 結言

本研究では、二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音特性に及ぼす隔壁の位置、スクロール吐出角および露出度の影響について実験的に究明した。併せて乱流騒音に及ぼす因子の一つである後流の幅の予測法について議論した。得られた結論は以下の通りである。

- ① 隔壁の位置が前面シュラウドに近づくほど下部翼列の流動状態が悪化するため、隔壁近傍の後流の幅が増加し、音圧レベルと比騒音レベルは高くなる。

- ② 設計点においては、スクロール吐出角を 0° から 20° に広げることで音圧レベルと比騒音レベルの値は若干低下する。このことは騒音面と広い出口面積を使用できるという面から有用である。実験結果から判断すれば、吐出角の最適値は 20° 近傍に存在する。
- ③ 露出度を増加させれば、SCファンでは効率は低下し、音圧レベルと比騒音レベルは高くなる。しかしながらDC2822ファンでは露出度を9%から25%まで増加させても上述のファン特性はほとんど変わらない。したがって、二重翼列ファンではファンの特性を損なわずにファンの出口面積を広げることが可能である。
- ④ 本研究で提案した後流の幅の予測法を用いれば、ほぼ $\pm 3\text{dB}$ 以内の精度で二重翼列ファンと単翼列ファンの乱流騒音のA特性とL特性の値を予測することが可能である。

<参考文献>

- (1) 児玉・他3名, 二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音に関する研究 (スクロール角及び隔壁の影響), ターボ機械, 29-8(2001), 456-463.
- (2) 深野・他2名, 低圧軸流送風機の乱流騒音について, 機論, 41-345 (1975), 1479-1486.
- (3) 深野・児玉, 低圧の軸流および斜流送風機の音圧レベル予測, 機論 (B), 51-466 (1985), 1825-1832.
- (4) 児玉・深野, 低圧軸流送風機の乱流騒音の流量特性とその音圧レベル予測, 機論 (B), 53-492(1987), 2514-2521.
- (5) 児玉・他3名, 翼付き多層円板ファンの乱流騒音について, 機論 (B), 62-596 (1996), 1420-1427.
- (6) 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), 477-484.
- (7) 児玉・他3名, スクロールレス遠心送風機の乱流騒音について, 機論 (B), 66-650 (2000), 2577-2584.
- (8) 児玉・他4名, 多翼ラジアルファンの流体力学的特性に関する研究 (ケーシング出口角および露出長さの影響), 長崎大学工学部研究報告, 28-50 (1998), 21-28.