

## 二重反転式軸流送風機の乱流騒音の予測\*

児玉好雄<sup>\*1</sup>, 林秀千人<sup>\*1</sup>  
三村雄次郎<sup>\*2</sup>, 深野徹<sup>\*3</sup>Prediction of Turbulent Noise Generated  
from Counter-Rotating Axial Flow FansYoshio KODAMA, Hidechito HAYASHI,  
Yujirou MIMURA and Tohru FUKANO

There are two mechanisms which give rise to turbulent noise radiated from a counter-rotating axial flow fan. One is the strong turbulence induced by the front rotor during the incoming main flow to the rear rotor, which, in turn, induces random force fluctuation on the rear rotor blade. The other is the shedding of vortices from the trailing edge of the both front and rear rotors. In this paper, we take these two mechanisms into consideration to theoretically estimate the turbulent noise level. The estimated values agree well with the measured levels of turbulent noise generated from the counter-rotating fans. It is theoretically clarified that the noise generated from the rear rotor is higher than that from the front rotor. The noise due to the turbulence during the incoming main flow is nearly equal to that due to the vortex shedding from the trailing edge of the rotor.

**Key Words:** Fluid Machine, Counter-Rotating Fan, Fan Noise, Turbulent Noise, Vortex Shedding Noise, Turbulent Flow, Wake Width

## 1. はじめに

二重反転式軸流機械は最近航空機や船舶などに用いられるようになってきている。この形式の送風機は通常の二段式軸流送風機に比較して圧力や効率が高いという長所があるが、騒音が高いという短所を有している。著者らは騒音が高い原因の一つに前段と後段の動翼間の干渉によって管軸方向に減衰しない離散周波数騒音が発生していることを突き止めた。これらの音は前段と後段の動翼枚数の組合せを適切にすることによって低減可能である<sup>(1)</sup>。したがって、この種の送風機で問題になるのは主として乱流騒音である。

二重反転式軸流送風機の乱流騒音は、主として前段および後段動翼の後縁から放出される渦ならびに前段動翼で発生した後段動翼に流入する主流の乱れに起因すると考えられる。翼後縁から放出される渦に基づく騒音については著者の一部が単段の軸流送風機を用いて実験と理論の両面から研究を行っており、その理論による音圧レベルの予測値は実験値と良好な一致を示

している<sup>(2)-(4)</sup>。

一方、翼に流入する乱れに起因する乱流騒音に関しては sharland が予測式を誘導している<sup>(5)</sup>。しかしながら、二重反転式軸流送風機の乱流騒音に関する理論的ならびに実験的研究はほとんどなく、発生騒音のレベルに対して前述した二つの音源がいかに関与しているのかまったくわからない。また、翼に流入する乱れの大きさも測定された例が少なく、乱れの大きさを計算で求めることができないので、乱れに基づく乱流騒音の予測が不可能である。

本研究ではこのような背景に立脚して、翼まわりの流動特性の計測を行い、乱れの大きさを予測する実験式の導入を試みるとともに、流動状態の計測結果に基づいて渦放出による騒音と流入する乱れによる騒音の音圧レベル予測を行った。そして、両者の騒音エネルギーの和を乱流騒音の予測値と定め、これと実験値を比較することによって予測式の妥当性の検討も行った。

## 2. おもな記号

$a_0$ : 音速 m/s

$B$ : 動翼枚数

$C$ : 翼弦長 m, mm

\* 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3月13日。

<sup>\*1</sup> 正員、長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14)。

<sup>\*2</sup> 松下精工(株) (〒486 春日井市鷹来町4017)。

<sup>\*3</sup> 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

- $D$ : 相対座標系における後流の幅 m, mm
- $D_R$ : 動翼直径 m, mm
- $D_f$ : 翼後縁の厚み m, mm
- $E$ : 音響出力
- $E_T$ : 乱れに起因する乱流騒音の音響出力 W
- $E_v$ : 渦放出に基づく乱流騒音の音響出力 W
- $f$ : 周波数 Hz, kHz
- $g$ : 重力の加速度  $m/s^2$
- $L$ : 軸動力 kW または乱れの大きさ m, mm
- $N$ : 回転数 rpm, rps
- $p_0$ : 最小可聴音圧 (=0.000 02 Pa)
- $p_T$ : ファン全圧 Pa
- $Q$ : 流量  $m^3/min, m^3/s$
- $R$ : 半径方向の距離 m, mm
- $R(Z)$ : 相関係数
- $R_0$ : 動翼半径
- $U_0$ : 動翼外縁の周速度  $m/s$
- $(\overline{w^2})^{1/2}$ : 速度変動成分の二乗平均値  $m/s$
- $Z$ : 流れ方向の距離 m, mm
- $z$ : 音源と観測点との距離 m
- $W$ : 相対速度  $m/s$
- $W_1$ : 入口相対速度  $m/s$
- $\beta_2$ : 相対流出角 °
- $\eta$ : 電動機と送風機の総合効率または無次元量  
=  $\pi C/L$
- $\lambda$ : 動力係数
- $\nu$ : ハブ比
- $\rho$ : 空気の密度  $kg/m^3$
- $\phi$ : 流量係数または揚力曲線のこう配
- $\psi$ : 圧力係数
- $\omega$ : 角周波数  $rad/s$

3. 乱流騒音の理論

単段の軸流送風機で動翼上流に障害物がない場合には動翼に流入する乱れは比較的小さいので、乱流騒音の主たる発生源は翼後縁から放出される渦に基づいている<sup>(3)-(5)</sup>。一方、二重反転式軸流送風機の場合には前段動翼で発生した乱れが後段動翼に流入するため、この乱れに起因する騒音も考慮しなければならない。

3・1 翼後縁から放出される渦に因る乱流騒音

著者の一部は翼後縁から放出される渦によって発生する乱流騒音のモデル解析を行い、騒音の音響出力  $E_v$  の予測式として式(1)を提案している<sup>(3)</sup>、さらにこの式を種々の軸流送風機に適用した場合、実験値と予測値はかなりよい精度で一致することを示している<sup>(3)(4)(7)</sup>。

$$E_v = \pi B \rho \int_{span} DW^6 dR / 2400 a_0^6 \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $B$  は動翼枚数、 $\rho$  は空気の密度、 $D$  は後流の幅、 $R$  は半径方向の距離、 $a_0$  は音速である。

3・2 翼に流入する乱れに起因する乱流騒音

Sharland は翼に流入する乱れに起因する乱流騒音の音響出力  $E_T$  の予測式として式(2)を導いている<sup>(5)</sup>

$$E_T = B \rho \int_{span} \phi^2 C W^4 \overline{w^2} dR / 48 \pi a_0^6 \dots \dots \dots (2)$$

ここで  $\phi$  は揚力曲線のこう配、 $C$  は翼弦長、 $(\overline{w^2})^{1/2}$  は翼に流入する主流の速度変動成分の二乗平均値である。

3・3 揚力曲線のこう配 Liepmann は揚力曲線のこう配  $\phi$  を揚力変動の二乗平均値と乱れの強さおよび大きさに関連付けて議論し、式(3)を導いている<sup>(6)</sup>。

$$\phi^2 = 4\pi^2 [(4\eta - \pi) / \{2\pi(\eta^2 + 1)\} + (\eta^2 + 3)(\eta \log \eta^2 + \pi) / \{2\pi(\eta^2 + 1)^2\}] \dots (3)$$

$$\eta = \pi C / L \dots \dots \dots (4)$$

ここで  $L$  は乱れの大きさ、 $C$  は翼弦長である。したがって、乱れの大きさが計測できれば、式(3)と式(4)より  $\phi$  の予測値が定まり、これを式(2)に代入すれば、主流の乱れに起因する乱流騒音が算定できる。

3・4 二重反転式軸流送風機の乱流騒音

二重反転式軸流送風機においては、上述したように放出渦と主流の乱れはともに乱流騒音の音源となり得ると考えられる。また、これらは独立した音源であると仮定すれば、二重反転式軸流送風機の乱流騒音の音響出力  $E$  は両者の和として式(5)で表される。

$$E = E_v + E_T \dots \dots \dots (5)$$

一方、音響出力  $E$  と軸中心上のベルマウス端から  $z$  の距離にある測定点の音圧レベル SPL とは  $p_0$  を最小可聴音圧として、次式で関係付けられる<sup>(3)</sup>。

$$SPL = 10 \log_{10} (3\rho a_0 E / 8\pi z^2 p_0^2) \dots \dots \dots (6)$$

4. 実験装置および方法

図1は二重反転式軸流送風機(以下CRファンと呼ぶ)の実験装置の概要を示したものである。装置の全長

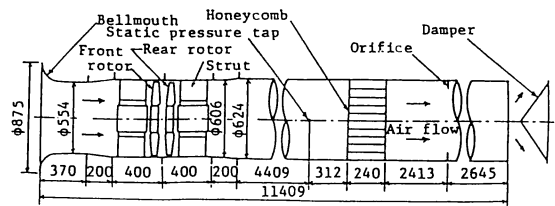


Fig. 1 Experimental apparatus

は約 11.4 m で、吸込口には軸方向長さ 0.37 m のベルマウスが取り付けられている。また、送風機の下流側の直径 0.624 m の吐出し管には JIS 規格に従って整流格子、静圧孔およびオリフィスが設置されている。流量の調整は円管末端に設置されているダンパで行った。この円管と送風機は広がり角 6° のテーパ管で連結されている。

図 2 に前段動翼と後段動翼を示す。これらの動翼には翼枚数が 9 枚、7 枚および 5 枚があるが、これらは翼のピッチやソリディティを除いた動翼諸元はいずれも同じである。このほかに翼枚数が 9 枚の動翼とソリディティを同じにした翼弦長の長い 7 枚翼 [7(W)翼] がある。これらの羽根車の外径は 600 mm、ハブ比は 0.38 であり、アルミニウム合金で造られている。翼形はクラーク Y 形に近い形をしており、任意に取付角を変えることができる。

二重反転式軸流送風機の動翼の組合せとしては、前段枚数 9 枚、後段枚数 9 枚の市販品の CR 99 ファン、前段枚数はそのままにして後段枚数を 7 枚にした CR 97 ファン、逆に前段と後段枚数をそれぞれ 7 枚と 9 枚に配置した CR 79 ファン、前段と後段枚数を 9 枚と 5 枚および 5 枚と 9 枚にした CR 95 と CR 59 ファン、前段側に 9 枚翼、後段側に前段動翼と同じソリディティをもつ 7(W)翼を配置した CRW 97 ファンの 6 種類がある。前段動翼と後段動翼の軸間距離はいずれの場合も 83 mm で、平均の翼先端すきまは約 3 mm である。

Table 1 Dimensions of the blades (9 blade impeller)

	Tip	Mean	Hub
Radius mm	300	227	115
Stagger angle	60°	53°	42.5°
Blade inlet angle	67.5°	60.5°	50°
Blade outlet angle	56.5°	49.5°	39°
Chord length mm	86	96.5	76.3
Pitch mm	209.4	158.6	80.3
Solidity	0.41	0.61	0.95

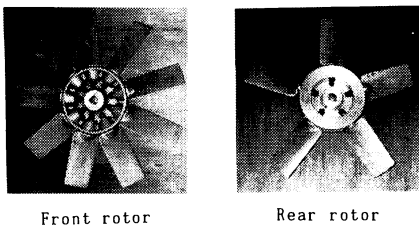


Fig. 2 Test rotors (CR95 fan)

表 1 に前段 9 枚動翼の主要諸元を示す。表 1 中の角度はいずれも軸方向から測定したものである。また、前段動翼と後段動翼とではねじれが逆のほか後段動翼の食違い角が 4° だけ大きい。7(W)翼は 9 枚翼よりも各スパン位置における弦長が 28.6% だけ長い。

動翼まわりの流れは五孔球形ピトー管と熱線流速計を用いて動翼前縁と後縁よりそれぞれ 10 mm だけ上流と下流の断面を 10 mm 間隔で測定した。乱れの大きさは前段動翼後縁と後段動翼前縁の軸間距離が 83 mm であることを考慮して、前段動翼を単独に設定して、その後縁下流 83 mm を基準にとって、2 本の熱線流速計の出力の相互相関係数を用いて測定した。騒音測定は送風機の軸中心上のベルマウス端から 1.5 m 上流に設置した 1/2 インチマイクロホン付き精密騒音計で行い、その出力信号を FFT アナライザで周波数分析した。

5. 実験結果および考察

5.1 ファンの空力特性 図 3 は二重反転式軸流送風機の特長曲線に与える動翼枚数と配置の影響を回転数  $N$  が 1500 rpm について示したものである。図 3 中の  $\psi$  は圧力係数、 $\phi$  は流量係数、 $\lambda$  は電動機の動力係数、 $\eta$  は電動機と送風機の総合効率で、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \psi &= 2p_T / (\rho U_0^2), \phi = 4Q / (\pi(1-\nu^2)D_k^2 U_0) \\ \lambda &= 8L / \{\rho\pi(1-\nu^2)D_k^2 U_0^3\}, \eta = \phi\psi/\lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

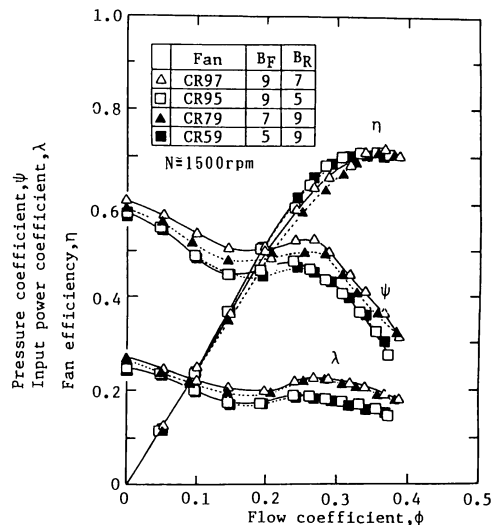


Fig. 3 Effects of arrangement of the rotor on the characteristic curves

ここで、 $p_t$  は全圧 (Pa)、 $\rho$  は空気の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $U_0$  は羽根車の先端周速度 (m/s)、 $Q$  は流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $\nu$  はハブ比、 $D_R$  は羽根車の直径 (m)、 $L$  は電動機入力 (W) であり、 $U_0$  の値は約 47.1 m/s である。

図 3 中の白抜き記号は前段動翼枚数  $B_F$  を 9 枚と一定にして後段動翼枚数  $B_R$  を変えた場合の結果であり、黒塗りの記号は後段動翼枚数  $B_R$  を一定 (9 枚) にして、前段動翼枚数  $B_F$  を 7 枚と 5 枚に変えたときの結果である。図 3 から最高効率点近くでは全圧に関しては前段動翼枚数を多くしたほうが、わずかに圧力が高くなるが、効率に関してはほとんど両者の差異は見られない。また、前段と後段の動翼枚数の和が多いほうが各流量における圧力は高く、羽根車が仕事をしていることがわかる。翼枚数や羽根車の配置が効率に及ぼす影響はかなり小さいといえる。

**5・2 動翼まわりの流れ** 図 4 は動翼の 10 mm 下流で計測した CR 97 ファンの前段動翼と後段動翼の静止座標系における速度変動波形の一例を示したものである。前段動翼の場合、半径 190~250 mm 近傍の間が変動波形の振幅は小さく後流の幅も狭く、流れは比較的翼に沿って流れているといえる。一方、270 mm より半径の大きいところや 190 mm 以下の場所では振幅が大きく、後流の幅も広がっている。これに比べて、後段動翼では、翼先端の一部と半径 230 mm 以下で乱れが強くなり、後流の幅も広がっており、270

mm 近傍では流れは翼に沿って流れている。このように前段と後段では流動様相が多少異なっている。

相対座標系における後流の幅を求めるために、著者らは絶対座標系 (静止座標系) における速度変動波形から求めた後流の幅の実測値と速度三角形を用いて相対座標系における後流の幅を算出する方法<sup>(4)</sup>と図 5 に示すように流出角から後流の幅を予測する方法<sup>(7)</sup>を提案してきた。前者は後流の速度変動波形を実験的に得ること自体簡単でないから、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。このために、本研究では後者による方法で相対座標系における後流

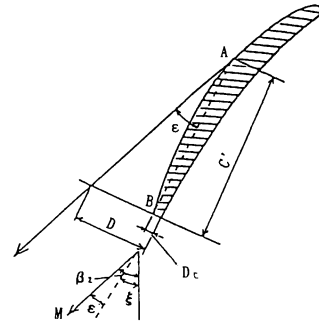


Fig. 5 Relation between the wake width and the relative flow angle

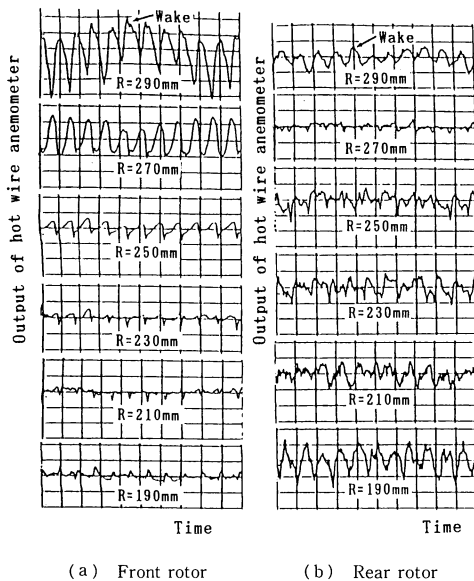


Fig. 4 Velocity fluctuations in the wake of CRW97 fan

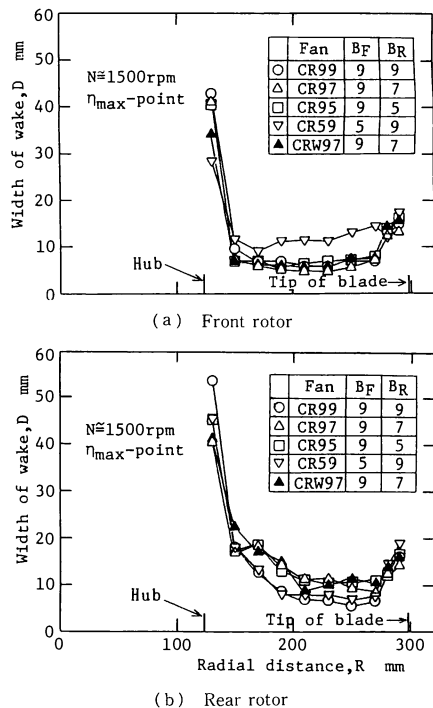


Fig. 6 Radial distributions of the wake width

の幅の予測を行った。図5に示す関係により、後流の幅  $D$  は近似的に次式で算出できる。

$$D = C' \tan \varepsilon + D_t \dots\dots\dots (8)$$

$$\varepsilon = \beta_2 - \xi \dots\dots\dots (9)$$

ここで  $C'$  は実測した  $W$  の方向を示す実線  $M$  に平行な線が翼の負圧面に接する点  $A$  から翼後縁  $B$  までの距離、 $D_t$  は翼後縁の厚さ、 $\beta_2$  は相対流出角である。

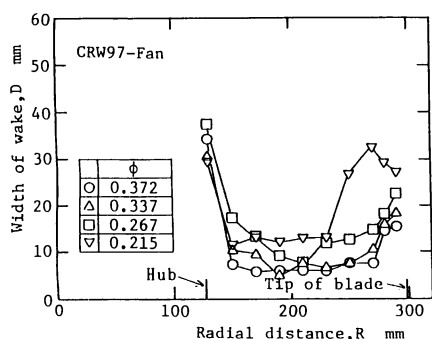
図6は以上のようにして求めた相対座標系における後流の幅の半径方向分布を示したもので、図6(a)は前段動翼、図6(b)は後段動翼の結果である。図6から、前段動翼枚数がいちばん少ないCR59ファンを除いて、前段動翼の後流の幅のほうが狭いことがわかる。また、前段動翼では管壁近傍とボス近傍で、後段動翼では管壁近傍と  $R=170$  mm 以下で後流の幅が広がっている。CR59ファンが前段動翼後流で後流の幅が広いのは次のように考えられる。翼枚数を少なくすれば、ソリディティが小さくなるために最適迎え角が小さくなる。したがって、翼を寝かせるべきであるが、本研究の場合は翼の取付角を一定にしているの

の負圧面側で逆圧力こう配が大きくなって境界層が発達する。その結果、負圧面側の境界層が厚くなり、後流幅が広がる。図6(b)の△印と▲印の比較から、翼弦長の長い7(W)ファンのほうが後流の幅は広い傾向にある。

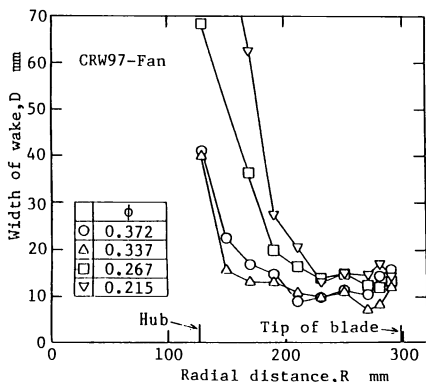
図7(a), (b)はそれぞれCRW97ファンの前段動翼と後段動翼における後流の幅の流量による変化を示したものである。流量が減少するに従いほぼ全半径位置で後流の幅は増加する。また、前段動翼では翼先端近傍とボス近傍で後流の幅が広いが、後段動翼ではボス近傍で広がっており、特に  $\phi=0.267$  以下で急激に増加している。これは後段動翼のボス近傍ではく離が生じ、流れが翼先端側に偏っていることを示している。

図8には後段動翼に流入する乱れの大きさを推定するために9枚翼の単段動翼を用いて、その下流92mmの断面を基準断面(管軸方向距離では83mm)として測定を行った相関関係を示している。本研究では流れ方向の乱れの大きさは流れ方向に  $Z$  だけ離れた2本の熱線流速計の出力信号の相関係数を二次曲線  $R(Z)$  で近似して定めた。すなわち、この曲線と横軸との交点を  $c$  とし、零から  $c$  まで積分した値を乱れの大きさ  $L$  と定義した<sup>(8)</sup>。なお、相関係数を求める際、フィルタをかけて動翼の回転による周期成分を除去するような処理を行っている。その方法は以下のとおりである。動翼回転に同期させて速度変動の時間的平均を行うことより、後流の周期成分のみを取り出す。この波形を毎時の速度変動波形から差引く。このような処理を行えば周期成分を取り除いた速度変動波形が得られる。

本研究では、流れ方向に乱れの大きさがどのように



(a) Front rotor



(b) Rear rotor

Fig. 7 Radial distributions of the wake width for each flow rate

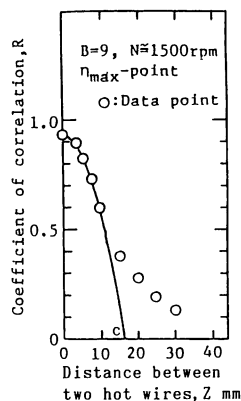


Fig. 8 Relation between a coefficient of correlation and the turbulent scale

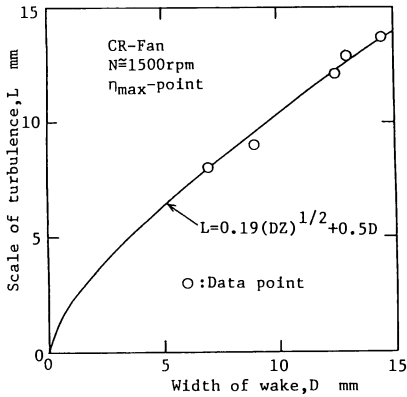


Fig. 9 Relation between the turbulent scale and the wake width

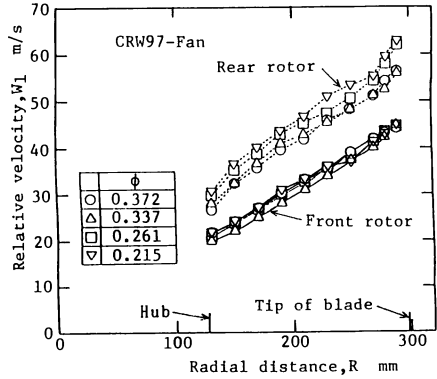


Fig. 11 Radial distributions of the relative velocity at the inlet of the rotor

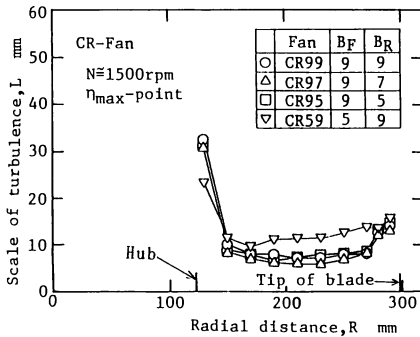


Fig. 10 Radial distributions of the turbulence scale

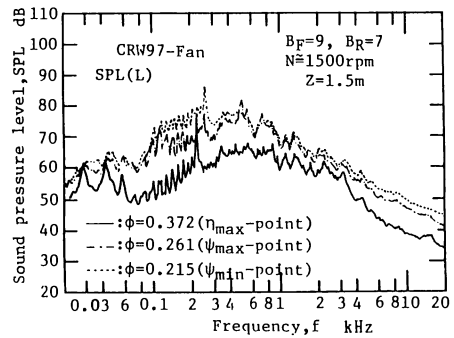


Fig. 12 Spectral density distributions of the fan noise for each flow rate

変化するかは計測していないが、Schlichting によれば距離の増加に伴って増大するようである<sup>(6)</sup>。図9は流れ方向の距離を一定 ( $Z=92\text{ mm}$ ) にして、翼弦長と流量を変えた場合の翼後縁下流  $10\text{ mm}$  ( $Z=0.01\text{ m}$ ) における後流の幅と乱れの大きさとの関連を調べた結果である。図9から、次の整理式を得た。

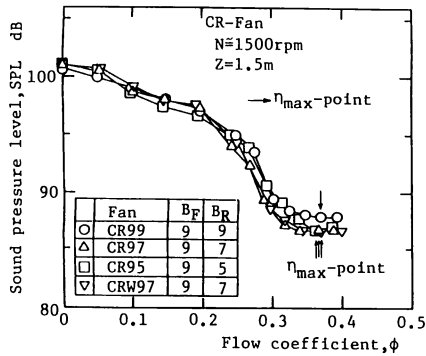
$$L = 0.19(DZ)^{1/2} + 0.5D \dots \dots \dots (10)$$

二重反転式軸流送風機で後段動翼に流入する乱れの大きさを測定することは前述したように実験装置や計測装置の制限上本実験の場合不可能である。したがって、ここでは式(10)を用いて乱れの大きさを算定した。図10はそのようにして定めた乱れの大きさの半径方向分布を示したものである。乱れの大きさはCR59ファンを除いてほぼ同じである。CR59ファンが他のものに比較して大きいのは、図6の説明で述べたように、翼枚数が少なくなれば負圧面側での境界層が厚くなるためであると推察される。また、ボスの極近傍で

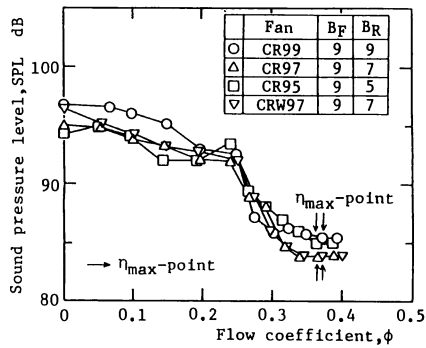
は前段動翼におけるボス近傍のはく離のため境界層が発達し、後流の幅が広がるため後段動翼に流入する乱れが大きくなっている。一方、翼先端近傍では圧力面から負圧面への漏れ流れのため、流れが若干翼に沿わなくなることが原因して、乱れが大きくなっている。

図11はCRW97ファンの前段動翼と後段動翼における入口相対速度  $W_1$  の流量による差異を示したものである。図11から、前段動翼では流量による差異はかなり小さいが、後段動翼では流量が減少するにつれてほぼ全半径位置で相対速度が増加することがわかる。騒音は相対速度の六乗と後流の幅とに比例することを考慮すれば、図11の結果は、流量が低減するにつれて騒音が増加することを示唆している。

5・3 ファンの騒音 図12はCRW97ファンにおける騒音のスペクトル分布の流量による変化を示したものである。流量が減少するに伴い、ほぼ全周波数帯域で音圧レベルが増加している。これは流量の低下



(a) SPL(L)



(b) SPL(A)

Fig. 13 Dependence of noise characteristics on flow rate

に伴う相対速度と後流の幅  $D$  の増加ならびに  $D$  の増加に伴う揚力曲線のこう配の増加のためである。225 Hz や 450 Hz 帯域に若干の音圧レベルのピークが見られるが、これはダクトが卵形に変形しているために生じた動翼とダクトとの干渉による騒音である<sup>(4)</sup>。なお、本研究においては全帯域騒音レベルからこの種の騒音をエネルギー的に差引いたものを乱流騒音レベルとしている。

図 13 は後段動翼の翼枚数および翼弦長が乱流騒音に及ぼす影響を示したもので、(a) と (b) はそれぞれ騒音計の L 特性と A 特性で計測した結果である。翼弦長の影響については CR 97 ファン (△印) と CRW 97 ファン (▽印) との比較で示されるように L 特性、A 特性において両者にほとんど差が見られない。また、後段動翼枚数が 9 枚と 5 枚とでは A 特性に関して流量係数が 0.25 以上で両者はほぼ一致している。流量係数が 0.2 以下で A 特性のレベルが L 特性に比べて減少しているのは低流量域で低周波数成分のレベルが高いためである。

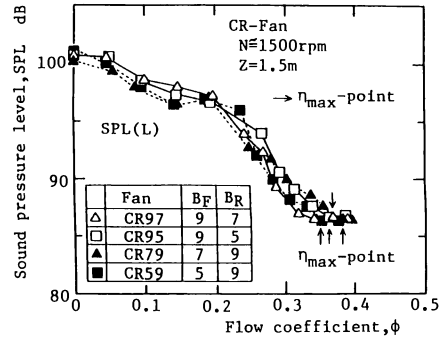


Fig. 14 Effects of arrangement of the rotor on overall sound pressure level

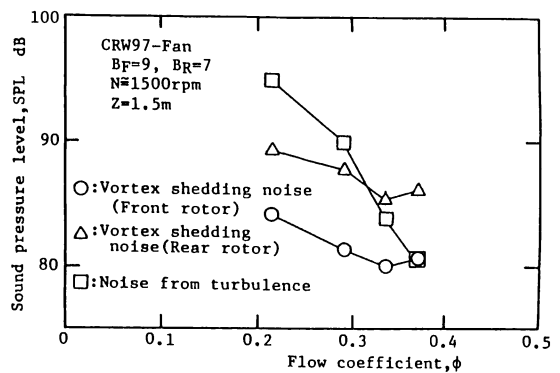


Fig. 15 Comparison of the two different sources

二重反転式軸流送風機の場合、前段動翼の枚数を多くしたほうがよいのか、逆に後段動翼枚数を多くしたほうがよいのかは興味あるところである。図 14 はこのことを検討したものである。図 14 に示されるように翼枚数が 9 枚と 7 枚の場合には前段側を多くしたほうが多少音圧レベルは低いようである。一方、翼枚数が 9 枚と 5 枚の場合にはわずかであるが後段側を多くしたほうが低い結果が得られている。後に図 15 に詳述するように後段動翼 (△印と□印) が支配的音源ではあるが、以上の結果から、騒音は流動状態と密接に関係するために、前段と後段のいずれの翼枚数を少なくしたほうが有利かは本実験範囲では一概にはいえない。

5.4 乱流騒音の予測値と実験値との比較 図 15 は式 (1) と式 (6) から算出される翼後縁から放出される渦に基づく騒音 (○印, △印) と式 (2) と式 (6) から算出される翼に流入する乱れに基づく騒音 (□印) との予測値を比較したものである。式 (1) および式 (2) を用いて乱流騒音を予測する際の代表速度  $W$  として、本研究では Sharland や深野らが用いたと同様に入口

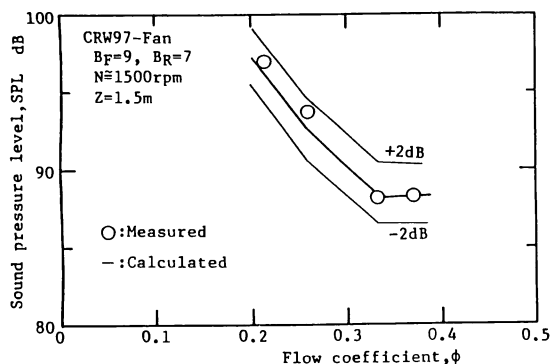


Fig. 16 Effects of flow rate on overall sound pressure level

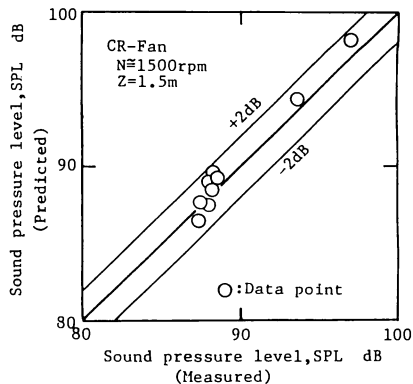


Fig. 17 Comparison of predicted value of sound pressure level with measured value

相対速度  $W_1$  を採用した<sup>(3)(5)</sup>、二重反転式軸流送風機の場合は上流側に障害物のない送風機の場合と対照的に、後段動翼に流入する乱れの強さや大きさが大きいので、乱れに基づく乱流騒音(□印)は図15に示すように最高効率点近傍では後段動翼の渦放出による騒音(△印)より低いが、低流量域ではそれ以上になる。また、前段動翼と後段動翼の渦放出に起因する騒音を比較した場合、後者が相対速度が大きくかつ後流の幅が広いため騒音は高くなる場合が多い。渦放出による騒音の二つの動翼からの和と乱れによる騒音とを比較すれば流量係数がほぼ0.3以上では前者が後者より高いが、0.3以下ではほぼ同等か、後者が支配的となる。

図16は乱流騒音の予測値と実験値との比較をCRW97ファンについて行ったものである。図16中の太い実線は予測値を連ねたもので、細い実線はこれより±2dB平行移動したものである。また○印は実験値を示している。実験値と予測値は±2dBの精度で一致している。流量が0.26以下で騒音が高くなるが、これは相対速度が大きくなること、後流の幅が広がること、後段動翼に流入する乱れの強さや大きさが増加すること、などのためである。

図17は本研究で用いたすべてのファンについて乱流騒音の実験値と予測値とを比較したものである。45°の太い実線は実験値と予測値とが一致することを、細い実線はこれを±2dB平行移動したものである。実験値と予測値とは最高効率点ばかりでなく、低流量域の流量係数φが約0.25(93dB)と0.21(98dB)の場合も±2dB以内の精度でよく一致している。

以上の結果から、式(1)、(2)の音響出力の和を用いれば±2dB以内の精度で二重反転式軸流送風機の乱流騒音を予測することができるといえる。

## 6. 結 論

本研究では、二重反転式軸流送風機から発生する乱流騒音を、翼後縁から放出される渦によるものと後段動翼に流入する乱れに起因するものの二つの音源について議論し、それぞれについて予測値を求め、両者の音圧レベルの比較を行うとともに翼枚数や翼弦長の異なる6種類の送風機を用いて予測式の妥当性の検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 翼後縁から放出される渦に基づく騒音と翼に流入する乱れに起因する騒音とを比較すれば、最高効率点近傍では、前者が後者より高いが、低流量領域では逆に後者が支配的になる。
- (2) 相対速度、後流の幅、乱れの大きさは後段動翼が前段動翼よりも大きい。したがって二重反転式軸流送風機騒音に関しては後段動翼が支配的である。
- (3) 式(3)と式(6)を用いれば、本実験範囲内では乱流騒音を±2dB以内の精度で予測することができる。
- (4) 低流量域で騒音が増大するのは、相対速度、後流の幅、乱れの大きさの増加が主因である。
- (5) 後段動翼に流入する乱れの大きさが翼後縁からの距離と境界層厚さに関連することを明らかにするとともにその実験式を提示した。

本研究費の一部は原田記念財団の研究助成金(平成7年度)によったことを記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) 児玉好雄・ほか3名、二重反転式軸流送風機の流体力学的特性と騒音特性に関する実験的研究(第1報、軸間距離、電動機支持形態の影響)、機論、60-576、B(1994)、2764-2771。



- (2) 児玉好雄・ほか3名, 二重反転式軸流送風機の流体力学的特性と騒音特性に関する実験的研究(第2報, 動翼枚数の組合せ, ソリディティおよび翼先端すまの影響), 機論, 60-576, B (1994), 2772-2779.
- (3) 深野徹・ほか2名, 低圧軸流送風機の乱流騒音について, 機論, 41-345 (1975), 1479-1488.
- (4) 児玉好雄・深野徹, 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, 53-492, B (1987), 2514-2520.
- (5) Sharland, I. J., Sources of Noise in Axial Flow Fans, *J. Sound Vib.*, 1-3 (1964), 302-322.
- (6) Liepmann, H. W. J., On the Application of Statistical Concepts to the Buffeting Problem, *Aeronaut. Sci.*, 1-19 (1952), 793-800.
- (7) 児玉好雄・深野徹, 低圧斜流送風機の乱流騒音の流量特性とその予測(翼先端すまによる差異), 機論, 54-500, B (1988), 883-889.
- (8) Schlichting, H., *Boundary-layer Theory*, (1968), 535-536, 693, McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
-