

# ジェットファンの騒音低減化について

長崎大学

児玉 好雄・林 秀千人

松下エコシステムズ(株)

村山 将・近藤 重樹・山口 英告

[論文]

## ジェットファンの騒音低減化について

児玉好雄\*<sup>1</sup> 林秀千人\*<sup>2</sup> 村山 将\*<sup>3</sup> 近藤重樹\*<sup>3</sup> 山口英告\*<sup>3</sup>

### Reduction of Jet Fan Noise

Yoshio KODAMA, Hidechito HAYASHI, Masaru MURAYAMA  
Shigeki KONDOU and Hidenori YAMAGUCHI

A new type jet fan which has a single stage rotor was proposed. The geometry of the rotor blade is symmetry, that is, there is no camber and the position of maximum thickness is at middle of chord, because the characteristics of the jet fan have to become same in the case of positive and reverse rotations. It was clarified experimentally that the noise performance of the single stage jet fan was improved compared to that of the ordinary two stage jet fan and the aerodynamic characteristics were almost the same between the single stage and the two stage jet fan. It is theoretically clarified that the noise due to the inlet flow disturbances is higher than that due to the vortex shedding from the trailing edge of the rotor.

**Keywords** : Fan, Jet Fan, Noise, Turbulent Noise, Specific Noise Level

#### 1. はじめに

ジェットファンは正、逆回転どちらの場合にも送風機の特性が同じになることと、規定流量を確保することのために、通常は電動機の上流側と下流側にそれぞれ1個の動翼が取り付けられた二段方式が採用されている。

著者らはこのような二段方式ジェットファンに関して、ジェットファンの騒音は離散周波数騒音と乱流騒音から成っていることを明らかにした。このうち遠距離場で観測される離散周波数騒音は、動翼に流入する偏流と動翼、電源ケーブルと動翼との干渉によって発生したものであり、この騒音の周波数がダクトの気柱共鳴周波数に一致した場合には、離散周波数騒音の音圧レベルはさらに増幅されることを示した<sup>(1)</sup>。

一方、乱流騒音の支配的な因子は、翼に流入

する乱れと翼後縁から放出される渦であるといわれている<sup>(4)</sup>。二段方式ジェットファンの場合には、前段動翼で発生した主流の乱れた流れが後段動翼に流入するため、この乱れに起因する乱流騒音の大幅な増加が予想される。また、通常の二段方式ジェットファンの後段動翼は前段動翼を裏返しにした状態で取付けてある。このため翼に反りがあれば、後段動翼の翼面上の流れは前段動翼に比べて翼面に沿わなくなり、後段動翼は前段動翼より後流の幅が広がる。このことが通常の二段方式ジェットファンの乱流騒音が高くなる一因となっている。

正、逆回転どちらの場合にも送風機の特性が変わらないというジェットファンの特徴を有し、しかも後段動翼の反りに起因する乱流騒音を低減させる方策として翼の最大厚みが翼弦の中央に位置し、翼弦の中央を中心として左右が対称であり、また翼に反りがない対称翼を用いること、さらに、前段動翼の乱れに起因する乱流騒音の増加を回避するために、この対称翼を

\* 1 長崎大学 工学部  
E-mail : ykodama@net.nagasaki-u.ac.jp

\* 2 長崎大学 工学部

\* 3 松下エコシステムズ(株)

原稿受付日 平成16年1月7日

有する単段方式のジェットファンの採用が考えられる。したがって、単段方式ジェットファンで二段方式ジェットファンと同程度の空力特性が得られれば、騒音を含めたファン特性でかなりの改善が期待できる。

上述の背景に立脚して本研究では、この研究で提案した対称翼および翼形翼を有する二段方式ジェットファンと対称翼を有する単段方式ジェットファンに関して、実験を行い、騒音特性の優劣を比較検討した。併せて、翼後縁から放出される渦と翼に流入する乱れに起因する乱流騒音について理論的予測を行い、この予測式の妥当性を全帯域乱流騒音の予測値と実測値を比較することによって議論した。

## 2. 乱流騒音の基礎式

送風機から発生する乱流騒音は、主として羽根車上流の主流の乱れと翼後縁から放出される渦に起因する。それらの音響出力を以下に示す。

翼後縁から放出される渦に基づく乱流騒音の音響出力  $E_V$  の予測式<sup>(2)</sup>は式(1)で、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<sup>(4)</sup>は式(2)で与えられる。

$$E_V = \pi B \rho \int DW^6 dr / (2400 a_0^3) \quad \dots(1)$$

$$E_T = B \rho \int \phi^2 CW^4 \bar{w}^2 dr / (48 \pi a_0^3) \quad \dots(2)$$

ここで

$B$  : 動翼枚数

$\rho$  : 空気の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$D$  : 後流の幅 (m)

$E_V$  : 渦に基づく乱流騒音の音響出力 (W)

$E_T$  : 乱れに基づく乱流騒音の音響出力 (W)

$W$  : 翼に対する相対速度 (m/s)

$r$  : 半径方向の距離 (m)

$a_0$  : 音速 (m/s)

$\phi$  : 揚力曲線のこう配

$\bar{w}^2$  : 翼に流入する主流の速度変動成分の二乗平均値

$C$  : 翼弦長 (m)

式(1)の中に含まれる後流の幅は乱流騒音の重要なパラメータの一つである。この後流の幅については文献(3)と(6)に、また、式(2)中の  $\phi$  については文献(5)と(6)に予測法が詳述されている。

二段方式ジェットファンに関しては、動翼後縁から放出される渦と主流の乱れはともに乱流騒音の音源になり得る。乱れと渦放出に基づく音源は互いに独立した音源と仮定すれば、乱流騒音の全音響出力はこれら二つの音源から放射される音響出力の和として式(3)で、ファンの回転軸中心上で、ベルマウス端から  $z$  の距離 (m) にある測定点の音圧レベル  $SPL$  (dB) と音響出力  $E$  (W) の関係は式(4)で表される<sup>(2)(3)(6)</sup>。

$$E = E_V + E_T \quad \dots(3)$$

$$SPL = 10 \log_{10} \{3 \rho a_0 E / 8 \pi z^2 \rho_0^2\} \quad \dots(4)$$

ここで、

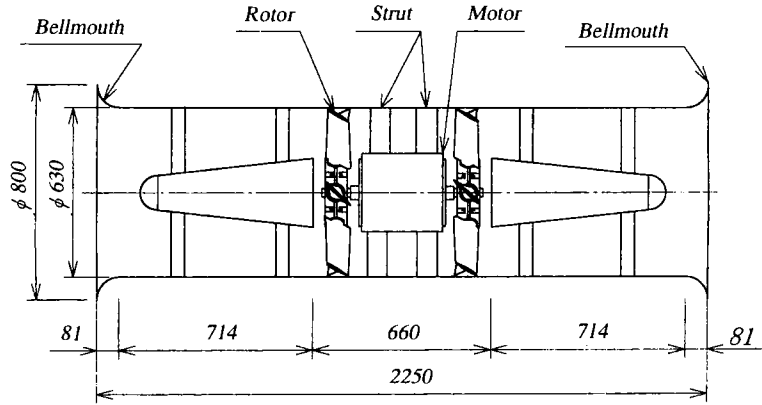
$\rho_0$  : 最小可聴音圧 (=0.00002Pa)

## 3. 実験装置及び方法

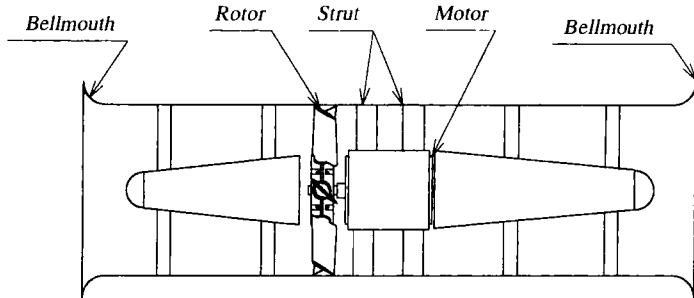
Fig. 1 はジェットファンの実験装置の概要を示したもので、Fig. 1 (a)は二段方式ジェットファンで、Fig. 1 (b)は単段方式ジェットファンである。Fig. 1 (b)において、空気が左から右へ流れる場合を後置支持板形式、右から左へ流れる場合を前置支持板形式と呼ぶ。装置の全長は2250mmで、ダクトの直径は630mmである。二段方式ジェットファンの場合、前段動翼後縁と後段動翼前縁の軸間距離は500mmである。実験装置の詳細な説明と騒音測定に関する事項は文献(1)に述べているので、ここでは割愛する。

Fig. 2 は羽根の断面形状を示したものである。Fig. 2 (a)は翼断面が翼形をした翼で、Fig. 2 (b)は翼の上下面と左右が対称な翼である。前者を翼形翼、後者を対称翼と名付ける。

図中の  $X_f$  は前縁から最大厚み  $t_{max}$  までの長さを表す。

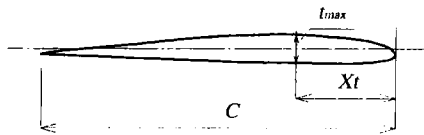


(a) Two stage jet fan

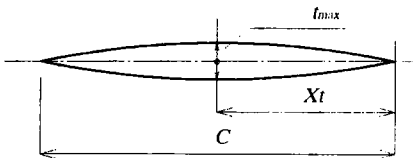


(b) Single stage jet fan

Fig. 1 Experimental apparatus



(a) Airfoil blade



(b) Symmetrical blade

Fig. 2 Blade section profile

翼形翼では  $X_t/C=0.3$  に最大厚みがある。羽根車には羽根枚数  $B$  が 3、5、6 枚の三種類がある。

前段と後段の羽根車の翼枚数がそれぞれ 6 枚のファンで、翼形翼を有するファンをTA66ファン、対称翼を有するファンをTS66ファン、5枚と3枚の組合せのファンをそれぞれTA53、TS53ファン、また、単段で6枚の対称翼ファンをSS6ファンと呼ぶ。単段方式ジェットファンに関して、前置支持板形式と後置支持板形式では後述するように電源ケーブルと動翼との干渉によって若干音圧レベルが異なる。したがって単段方式ジェットファンの騒音を議論する場合には、前者をSS6-F、後者をSS6-Rとして表示することにする。

動翼の直径  $D_0$  はいずれも624mmであり、平均翼先端すきまは約4mmである。各送風機の回転数は約1,960rpm、設計点風量における平均軸

Table 1 Main dimensions of the blades

Blade profile	Airfoil type	Symmetric type
$B$	3~6	3~6
$D_i$ (mm)	250	250
$\xi$ (deg.)	46.9	47.5
$\gamma_1$ (deg.)	41.2	47.5
$\gamma_2$ (deg.)	50.6	47.5

Table 2 Characteristics of the jet fan

Fan	TA66	TA53	TS66	TS53	TS6
$\psi$	0.216	0.221	0.220	0.236	0.210
$\phi$	0.475	0.484	0.486	0.501	0.470

流速度は約30m/sである。

Table 1 は動翼の主要諸元を示したものである。表中の  $D_i$ 、 $\xi$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  はそれぞれハブ直径、取り付け角、設計入口角、設計出口角である。なお、本実験ではソリディティは一定(0.67)としている。基準の6枚羽根羽根車における翼弦長は翼先端で218mmである。

また、本研究では単段方式ジェットファンの風量が二段方式ジェットファンの風量とほぼ同様になるように、前者の翼の取り付け角 $\xi$ は二段方式ジェットファンの場合より $2^\circ$ 大きくして、 $49.5^\circ$ に設定した。

## 4. 実験結果及び考察

### 4-1 ファンの空力特性

Table 2 に最高効率点における各ファンの圧力係数 $\psi$ と流量係数 $\phi$ を示す<sup>(1)</sup>。この表より、二段方式ジェットファンで動翼枚数の総和が同じ場合には、対称翼ジェットファンが翼形翼ジェットファンより圧力係数、流量係数ともに高く、対称翼を用いる方がジェットファンとして望ましい。

また、TA53ファンはTA66ファンより、TS53ファンはTS66ファンよりも圧力係数、流量係数ともに高く、翼の総枚数の少ない方が空力特性に関しては良好である。単段方式のSS6ファン

は3章で示したようにTA66と同風量となるように取り付け角をわずかに大きくしている。この場合、TA66ファンやTS66ファンよりも空力特性がわずかに低下する。

しかし、後述するように単段方式ジェットファンでは騒音のかなりの低減が期待できるので、騒音に圧力と流量を加味した比騒音レベルで評価すれば、単段方式ジェットファンが二段方式ジェットファンより騒音特性が良好となる可能性がある。

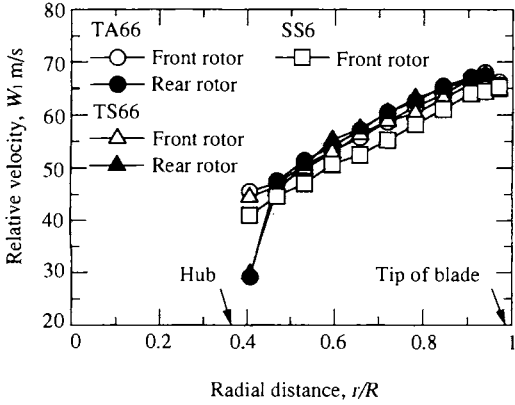
### 4-2 動翼まわりの流れ

Sharlandおよび深野らは軸流送風機の乱流騒音の予測に際して、代表相対速度 $w$ は入口相対速度 $w_1$ とほぼ同じであると仮定して乱流騒音予測を行い、よい結果を得ている<sup>(2)~(4)</sup>。したがって、本研究でも代表相対速度として入口相対速度を採用することにする。

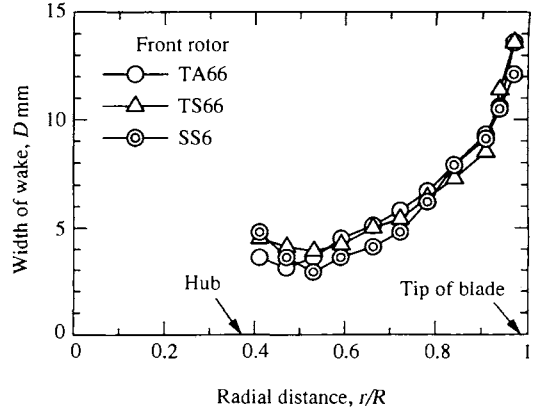
Fig. 3 はジェットファンの入口相対速度 $w_1$ の半径方向分布を示したものである。Fig. 3(a)にはTA66ファンの前段(○)と後段(●印)、TS66ファン(△印、▲印)、単段のSS6ファン(□印)の結果が記載されている。この図から入口相対速度は前段動翼が後段動翼よりも若干低いことが分かる。これは前段動翼部のハブコーンの直径が後段動翼のハブ径より若干小さいために、軸流速度は前者が低くなることに主因がある。また単段方式ジェットファンは二段方式ジェットファンに比較して若干入口相対速度が低下するが、これも前者が後者よりも軸流速度が多少低下するためである。

Fig. 3(b)のTA53とTS53に関してもFig. 3(a)と同様に後段動翼が前段動翼より入口相対速度は若干高い。また、翼形翼ジェットファンと対称翼ジェットファンの間には差異はみられない。

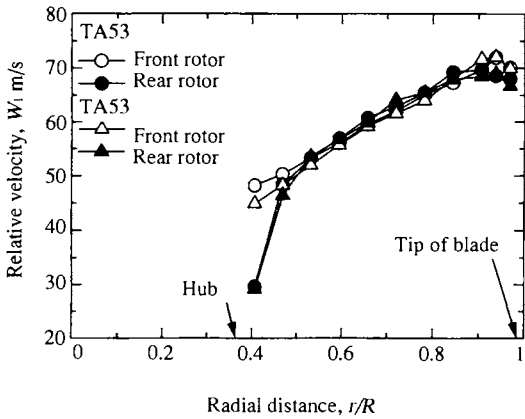
Fig. 4 は文献(3)と(6)に示された方法で求めた後流の幅の半径方向分布を前段動翼(Fig. 4(a))と後段動翼(Fig. 4(b))について示したものであ



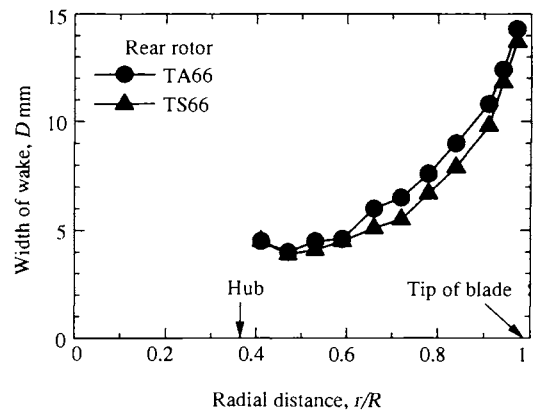
(a) TA66 and TS66 fan



(a) Front rotor



(b) TA53 and TS53 fan



(b) Rear rotor

Fig. 3 Radial distributions of the inlet relative velocity of the rotor

Fig. 4 Radial distributions of the wake width

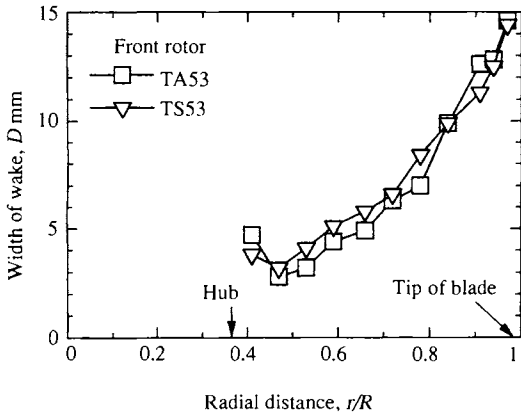
る。前段動翼に関しては  $r/R$  が 0.6 以上で対称翼ジェットファンが翼形翼ジェットファンよりも後流の幅が狭い。また、後流の幅の分布はハブから翼先端に向かうにつれて後流の幅が広がる傾向が見られる。これは翼先端において圧力面から負圧面への流れによる翼端渦の発生に一因があると考えられる。

一方、後段動翼に関しては後流の幅は対称翼ジェットファンより翼形翼ジェットファンの方が広い。これは、翼形翼ジェットファンの場合は前段動翼と後段動翼の反りが逆になっている

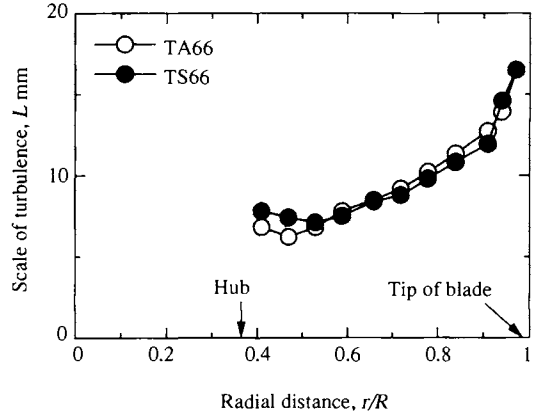
ためであると考えられる。

Fig. 5(a)、(b)にTA53ファンとTS53ファンの前段動翼と後段動翼の後流の幅の半径方向分布を示す。この場合もFig. 4と同様に後段動翼に関して後流の幅は翼形翼ジェットファン(■印)が対称翼ジェットファン(▼印)より広い。

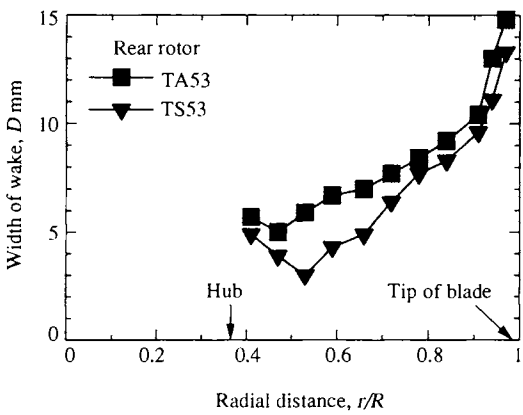
Fig. 6(a)、(b)は前段動翼後縁の下流500mmの断面(後段動翼前縁位置)を基準断面として測定した相関関数<sup>(6)</sup>から求めた流れ方向の乱れの大きさの半径方向分布を66ファンと53ファンについて示したものである。乱れの大きさはハブ近傍から半径が増加するにつれて減少し、 $r/R$



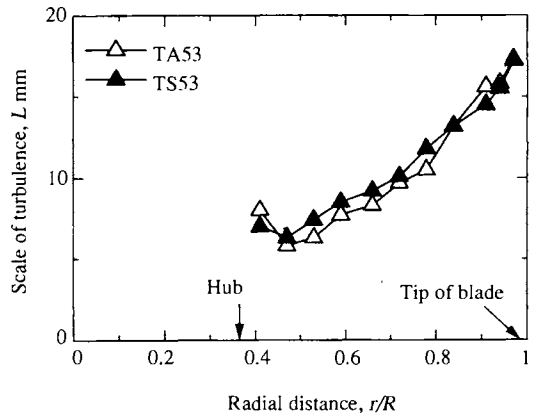
(a) Front rotor



(a) TA66 and TS66 fan



(b) Rear rotor



(b) TA53 and TS53 fan

Fig. 5 Radial distributions of the wake width

Fig. 6 Radial distributions of the turbulent scale

=0.5近傍で極小値を取り、翼先端に向かうにつれて再び増加する傾向を示す。また、乱れの大きさは本研究範囲では翼断面形状や動翼枚数にはあまり影響を受けないことが分かる。

Fig. 7に乱れの大きさと同じ位置において計測したファンの乱れの強さ  $T$  の半径方向分布を示す。計測は任意の半径位置において周方向に  $20^\circ$  間隔に18点で行い、18個の平均値を図に掲載している。乱れの強さはハブ近傍が最も高く、流れが乱れている。

4-3 ファンの騒音

Fig. 8~10に騒音計のL特性を用いて計測し

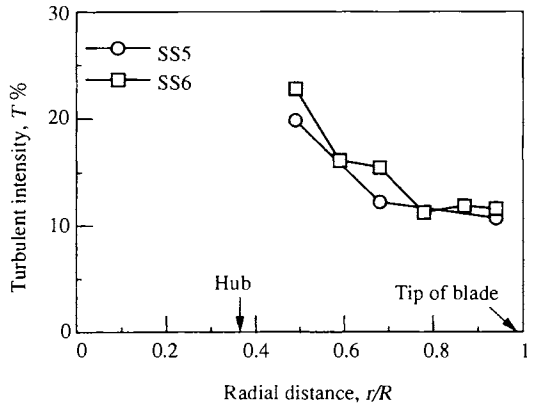


Fig. 7 Radial distributions of the turbulent intensity

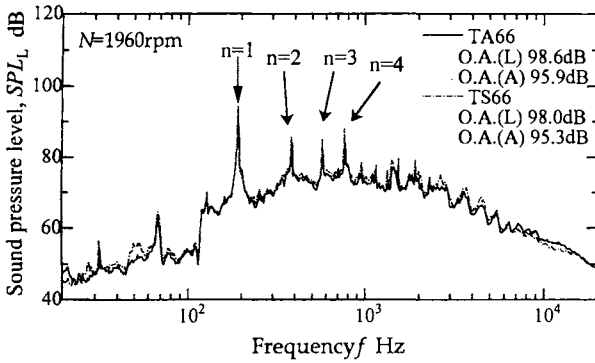


Fig. 8 Spectral distributions of the fan noise (TA66 and TS66 fan)

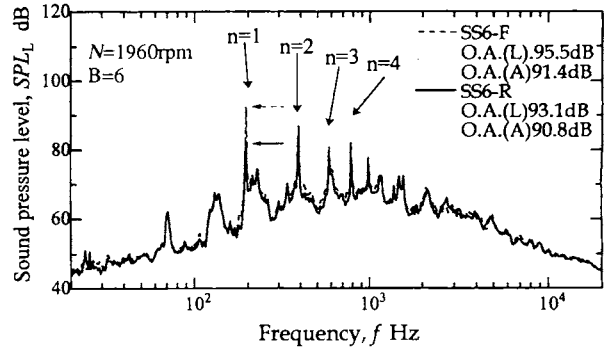


Fig.10 Spectral distributions of the fan noise (SS6 fan)

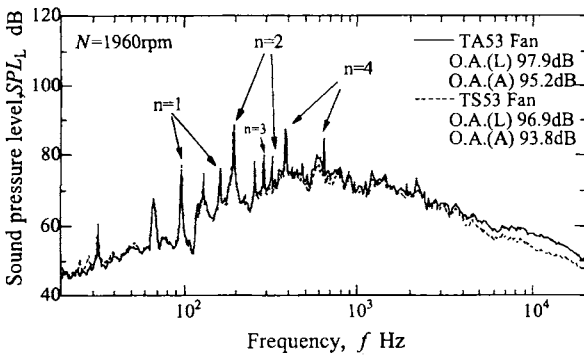


Fig. 9 Spectral distributions of the fan noise (TA53 and TS53 fan)

たファン騒音のスペクトル分布を示す。Fig. 8 に関して、TA66ファン(実線)とTS66ファン(破線)のいずれにも離散周波数騒音( $n=1, 2, \dots$ )の発生が見られる。これは翼に流入する流れの偏流と動翼あるいは電源ケーブルと動翼との干渉によって発生した干渉騒音である<sup>(1)</sup>。これらの騒音は対称翼ジェットファンが翼形翼ジェットファンより若干高いようである。

Fig. 9 に関して、対称翼を有するTS53ファン(破線)は翼形翼のTA53ファン(実線)よりも3kHz以上の周波数で乱流騒音が低い。このため全帯域騒音のL特性で1dB、A特性で1.4dBの低減が見られる。これは後段動翼に関して、後流の幅は前者が後者より狭いことが主因と考えられる。また、図中の $n=1, 2, \dots$ のピークは回

転騒音(干渉騒音)である。

Fig.10は単段方式ジェットファン騒音のスペクトル分布を示したもので、図中の破線は前置支持板形式(SS6-F)、実線は後置支持板形式(SS6-R)の結果である。この図に見られるように前置支持板形式の場合には $n=1, 2, \dots$ に高いレベルを持つ離散周波数騒音の発生が見られる。これは動翼と上流側の電源ケーブルとの干渉および動翼上流の偏流と動翼との干渉によって生じたものである。特に電源ケーブルの影響が大きい。これらの離散周波数騒音のため前置支持板形式の全帯域騒音は後置支持板形式のそれと比べてL特性(O.A(L))で約2.4dB、A特性(O.A(A))で0.6dB高い。Fig. 8の基準の二段方式ジェットファン(TA66)の音圧レベルと比較すれば、全周波数にわたって単段方式ジェットファンが二段方式ジェットファンより音圧レベルは低いことが分かる。これは単段方式ジェットファンの場合は動翼が1個であり、動翼の上流が二段方式ジェットファンほど乱れていないためである。

前述したように単段方式ジェットファン(SS6)に関して、前置支持板形式(SS6-F)と後置支持板形式(SS6-R)は流れの方向が逆になるだけで、騒音が多少異なるもののファンとしては同じものである。したがって、1台のファン



Table 3 Sound pressure level

Fan	TA66	TA53	TS66	TS53	SS6
$SPL_L$ dB	98.6	97.9	98.0	96.9	94.3
$SPL_A$ dB	95.9	95.2	95.3	93.8	91.0

の騒音を評価する場合には両形式の全帯域騒音の算術平均値を用いるのが最もよいと思われる。以下に示す単段方式ジェットファン(SS6)の全帯域音圧レベルは両形式の算術平均値を用いたものである。

以上の結果より、単段化することで、基準の二段方式ジェットファン(TA66)に比べて全帯域音圧レベルがL特性で約4.3dB、A特性で4.9dB低減させることができる。

Table 3 に各ファンの全帯域音圧レベルを示す。二段方式ジェットファンでは、前段と後段の動翼枚数の総和が多い方が、翼形翼ジェットファン、対称翼ジェットファンを問わず音圧レベルは高い。ソリディティを一定にした場合、翼枚数が多くなるほど翼弦長は短くなる。乱流騒音に関しては、音響出力は翼枚数の1乗に、翼弦長の0.8乗に比例することが、翼枚数が多いファンが、騒音が高くなる理由である<sup>(2)</sup>。

一方、対称翼ジェットファンは翼形翼ジェットファンよりも音圧レベルが低い。これは前者が後者よりも後段動翼に関して後流の幅が狭いためである。

4-4 騒音特性

ファンの良否を表すのに式(5)で与えられる比騒音レベル $K_s$ が用いられている。このレベルが低いほど良好なファンとされている。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10}(QP^2) + 2 \quad \dots(5)$$

ここで

$SPL$  : 全帯域音圧レベル (dB)

$Q$  : 流量 (m<sup>3</sup>/s)

$P$  : 全圧 (Pa)

Table 4 には本実験に用いたファンの比騒音レベルを示している。添え字LとAは騒音計のL

Table 4 Specific noise level

Fan	TA66	TA53	TS66	TS53	SS6
$K_{sL}$ dB	35.2	34.5	34.6	33.4	28.8
$K_{sA}$ dB	32.5	31.9	31.9	29.0	28.3

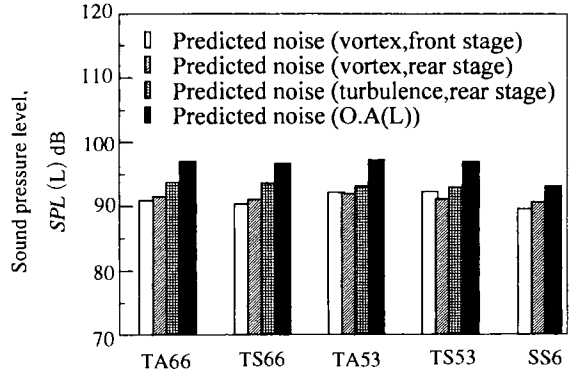


Fig.11 Comparison of the two different sources

特性とA特性の計測値を用いたことを意味している。この表より、二段方式ジェットファンに関しては、総翼枚数の少ないファンが多いファンより比騒音レベルは低い。また、翼形翼ジェットファンより対称翼ジェットファンの方が比騒音レベルは低い。二段方式ジェットファンではTS53ファンが最も低い。

単段方式ジェットファン(SS6)は基準の二段方式ジェットファン(TA66)より $K_{sL}$ で6.5dB、 $K_{sA}$ で4dB低い。このことはジェットファンとして単段方式を採用することによってファンの騒音特性が大幅に改善されることを示唆するものである。

Fig.11は式(1)から算出される翼後縁から放出される渦に基づく乱流騒音と式(2)から算出される翼に流入する乱れに基づく乱流騒音の予測値を比較したものである。この図から、二段方式ジェットファンの場合は主流の乱れに起因する乱流騒音が翼後縁から放出される渦に基づく乱流騒音より高いことが分かる。

Fig.12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。なお乱

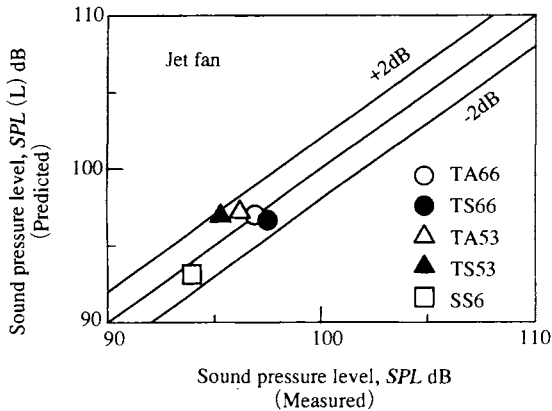


Fig.12 Comparison of predicted and measured sound pressure level of the turbulent noise

流騒音の実験値としては全帯域音響出力から全離散周波数騒音の音響出力を差し引いたものを用いた<sup>(7)</sup>。図中の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 $\pm 2$ dBの誤差を示す線である。全帯域音圧レベルの実験値と予測値とはよい精度で一致することが分かる。

## 5. 結言

本研究では、ジェットファンの騒音と空力特性に及ぼす動翼枚数の組合せ、段数の影響を実験的に調べた。併せて乱流騒音に及ぼす翼後縁からの放出渦と翼に流入する乱れについて議論した。その結果、以下の結論が得られた。

- ① 二段方式ジェットファンに関しては、翼形翼ジェットファンよりも対称翼ジェットファンの方が音圧レベル、比騒音レベルと

もに低く、ファンの騒音特性としては後者が優れている。また、前段と後段の動翼枚数の合計が少ないほど音圧レベル、比騒音レベルが低く、静音のファンといえる。

- ② 二段方式ジェットファンの場合、主たる音源は後段動翼である。
- ③ 単段方式ジェットファンは二段方式ジェットファンに比べて空力特性はわずかに劣るが音圧レベルが低いため比騒音レベルが低くなる。このことより単段方式ジェットファンの方が二段方式ジェットファンより騒音特性が優れているといえる。
- ④ 本研究範囲では、乱流騒音に寄与する因子の内、最も影響の大きい因子は翼に流入する乱れである。これが二段方式ジェットファンの乱流騒音が高い要因となっている。

### <参考文献>

- (1) 児玉・他4名, ジェットファンの離散周波数騒音に関する研究, ターボ機械, 29-10 (2001), 611-618.
- (2) 深野・児玉・高松, 低圧軸流送風機の乱流騒音について, 機論, 41-345 (1975), 1479-1487.
- (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) Sharland, I.J., Sources of Noise in Axial Flow Fans, J. Sound and Vibration, 1-3 (1964), 302-322.
- (5) Liepmann, H.W.J., On the Application of Statistical Concept to the Buffeting Problem, Aeronaut. Sci., 1-19 (1952), 793-800.
- (6) 児玉・他3名, 二重反転式軸流送風機の乱流騒音の予測, 機論(B), 62-595 (1996), 1068-1076.
- (7) 児玉・深野, 低圧軸流送風機の流量特性とその音圧レベル予測, 機論(B), 53-492 (1987), 2514-2521.