

ジェットファンの離散周波数騒音の研究 (第1報：騒音に及ぼすハブコーンの影響)

児玉 好雄*・林 秀千人*・木下 朋行**
村山 将***・近藤 重樹***・山口 英告***

Study on Discrete Frequency Noise Generated by a Jet Fan (First report : Effect of Hub Cone)

by

Yoshio KODAMA*, Hidechito HAYASHI*, Tomoyuki KINOSHITA**
Masaru MURAYAMA***, Shigeki KONDOU***, Hidetsugu YAMAGUCHI***,

Noise generated by a fan consists of the discrete frequency noise (DFN) and the turbulent noise. When the jet fan operates near the design point, the former is dominantly. The DFN consists of the noise due to rotation of the steady pressure field on the impeller blades and the noise due to the interaction of the impeller blades and the stator (strut). The rate of decay of the rotating pressure field noise is predictable and in the most cases the quickly decreases in proportion the distance from the rotor. Therefore, DFN observed away from the jet fan is mostly interaction noise which due to interact rotor-strut and rotor-distorted flow incoming the rotor

1. はじめに

ジェットファンは本体内部に設置された電動機によって二個の羽根車が直接駆動される形態の横型双翼軸流送風機である。この送風機は、主としてトンネル内の排気ガス、煤煙、塵埃などの排出用ファンとして用いられている。通常はトンネル天井アーチ部に吊り下げられ、ファンの噴流による圧力上昇によりトンネル内を軸方向に換気するシステムを採っている。また、ファンの吐出し方向をトンネル内の風向きに応じて変えることが出来る。つまり、正逆運転が可能である点に特徴を有する。しかしながら騒音が高いことが難点である。

このファンはトンネル内の風向きに応じて自由に吐出し方向を変える必要があるため、ファン内部に設置した電動機1台で2個の動翼を回転させるような構造をとっている。また、ジェットファン内部には整流効果と剛性を高めるためハブコーン(以下ではこれをハブと呼ぶ)が取り付けられており、動翼同士、ハブ支持板と動翼との干渉が離散周波数騒音の増大を招き、騒音特性に大きな影響を与え、トンネル内において歩行者やドライバーに不快感を与えることが問題となっている。このような背景に立脚して本研究では、離散周波数騒

音の発生原因について、ハブの影響を調べることによって騒音低減を目的として実験的な検討を行った。

2. 主な記号

a_0	: 音速
B	: 動翼枚数
C	: 翼弦長 mm
ΔdB	: 音圧レベルの減衰量 dB
D_1	: ハブ外径または羽根車外径 mm
D_2	: 動翼外径 mm
f	: 周波数 Hz
g	: 重力加速度 m/s^2
k	: 任意の整数
m	: モード数
M_m	: 音圧モードの周方向先端マッハ数
M_m'	: 臨界先端マッハ数
n	: 高調波次数
N	: 動翼回転数 rps
N'	: モードの回転速度 rps
P_s	: 静圧 Pa
P_T	: 全圧 Pa
V	: 静翼枚数または空気の絶対速度 m/s
Δx	: 軸方向距離 m

平成12年10月27日受理

* 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

** 大学院修士課程機械システム工学専攻 (Graduate Student, Department of Mechanical Systems Engineering)

*** 松下精工 (株) (Matsushita Seikou Co.Ltd.)

- Y : スパン長さ mm
 ρ_a : 空気の密度 kg/m^3
 ρ_w : 水の密度 kg/m^3
 ξ : 翼取付角 $^\circ$
 Ω : 動翼角速度 rad/s

3. 実験装置及び方法

図1はジェットファンの実験装置の概略を示したものである。全長2250mm、内径は630mmの軸流送風機である。電動機1台、動翼2個、ベルマウスが出口と入口にそれぞれ1個ずつ設置された構造になっている。この図は一段目動翼前方及び、二段目動翼後方にハブを設けた状態を示したものである。図2にハブの概略図を示す。ハブは整流効果と剛性を高める目的で、4方向に8枚の支持板によって固定されており、空気流の剥離や渦流発生が少ない形状になっている。駆動電動機は三相交流誘導電動機であり、インバータによる電源周波数変換によって回転数を変えるようになっている。また、電動機は送風機内部に軸中心がダクトの軸中心に一致するように設置され、90° 間隔に4枚の支持板二段によってケーシングに固定されている。主軸は電動機と一体になっているため駆動力は電動機から直接動翼に伝達され、2個の動翼を同一方向に回転させている。空気は入口側ベルマウスより流入し、ハブ外壁と円管ダクト内壁の二重円筒状の環状流路流れ、一段目動翼を通過し旋回しながら二段目動翼を通過した後、管出口に向かって流出する。

図3に動翼の詳細図を示す。本研究においては動翼間や、動翼とハブ支持板、モーター支持板との影響を明らかにするため、動翼二段と上流側動翼のみの単段で実験を試みた。表1は動翼の詳細を示す。本研究では $N=3000\text{rpm}$ と $N=1960\text{rpm}$ の異なる回転数で同流量を出すために、翼の取付角が二者間で異なるようにしている。動翼の断面は翼形翼であり、翼枚数は市販品では一段目、二段目共に6枚である。

騒音測定は送風機軸中心上のベルマウス端から上流1.5mの点(遠距離場)で行い、この出力信号をFFTアナライザで周波数分析することで騒音スペクトル分布を求めた。なお、音圧レベルは工学的意味を考慮して聴感補正を施していないL特性と聴感補正を施したA特性で計測した。

4. 実験結果及び考察

4.1 空力特性

図4は上流側と下流側の動翼枚数がともに6枚の二段

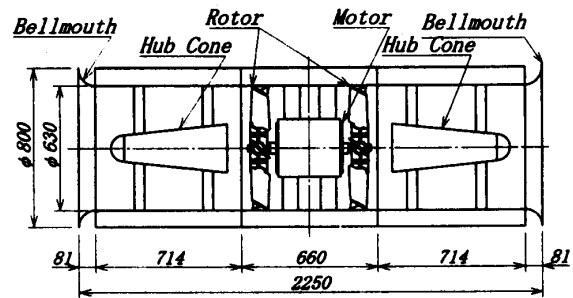


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

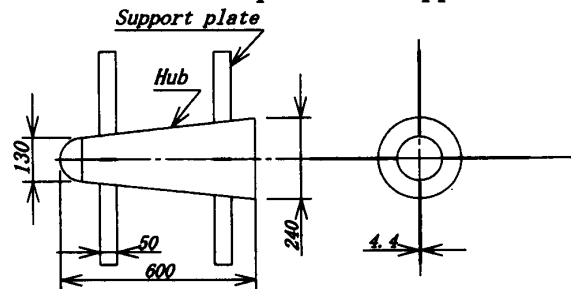


Fig.2 Schematic diagram of the hub cone

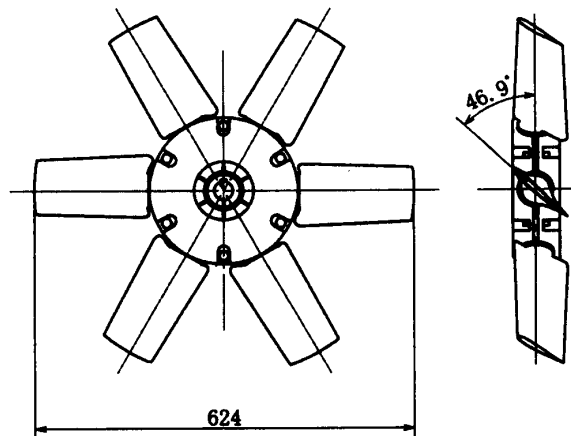


Fig.3 Test rotor in this experiment

Table1 Main dimensions of the rotor

N , [rpm]	3000	1960
B	6	6
D_1 [mm]	250	250
D_2 [mm]	626.8	626.8
Y [mm]	218.5	218.5
C [mm]	108.9	108.9
ξ [$^\circ$]	30	46.9

と、上流側のみの単段のジェットファンにおける特性曲線を示したものである。図中の ϕ は圧力係数、 ϕ は流量係数、 η は電動機と送風機の総合効率であり、式(1)で定義されている。

$$\begin{aligned}
 \phi &= 2P_T / \rho U_2^2, \quad \phi = 4Q / \pi (1 - \nu^2) D_2^2 U_2 \\
 \lambda &= 8L / \pi \rho (1 - \nu^2) D_2^2 U_2^3, \quad \eta = \phi \phi / \lambda
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここでは P_T 全圧(Pa)、 ρ は空気密度(kg/m³)、 U_j は羽根車外縁の周速度(m/s)、 Q は流量(m³/s)、 ν はハブ比、 D_j は動翼直径、 L は電動機の軸出力である。

図4中の実線は動翼二段を、点線は動翼単段の結果を示したものである。この図から、二段の場合(実線)は流量係数が0.46のとき最高効率を取り、その値は59.7%である。実際のジェットファンはほぼこの流量点近傍で運転されている。点線で示される単段の場合は、二段とはほぼ同等の最高効率を有しているが、単段の場合は極大値ではないのでここが最高効率であるとは言い難い。この二段のジェットファンは正逆向きの羽根車が設置されている構造上の問題から、下流側の羽根車では翼面から流れが剥がれて流れるため、境界層が発達する。このため、送風機の圧力は低下し、流量は減少する。このことが、ジェットファンが二重反転式軸流送風機や通常の二段方式軸流送風機と比べて送風機効率が低い原因と考えられる。

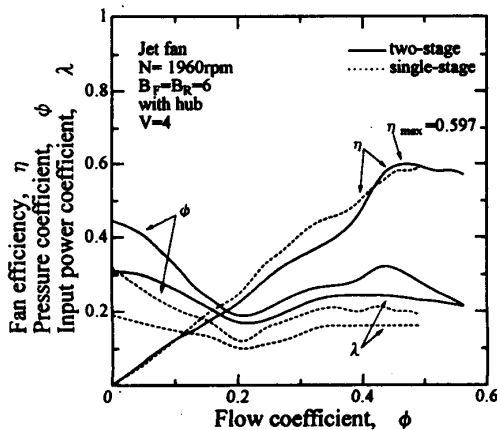


Fig.4 Characteristic curves

4.2 離散周波数騒音の軸方向減衰特性

本研究で着目している離散周波数騒音は回転騒音であるために、発生原因は動翼による何らかの干渉であると考えられる。その干渉騒音の発生原因としては、上流側にある動翼の後流を下流側の動翼が切断することによるものと、上流の動翼の後流が下流の支持板や静翼に衝突するものがある。このような後流干渉では動翼同士、動翼と支持板の枚数の組み合わせが重要となる。

図5は動翼同士、動翼と支持板の枚数の組み合わせによる干渉騒音の基本周波数騒音と倍音の管軸方向における減衰特性の差異を示したものである。管内の軸方向減衰特性は、TylerとSofrin⁽²⁾によって、次式(2)で表されている。

$$\frac{\Delta dB}{\Delta x} = 8.69 \frac{|m|}{R_0} \sqrt{M_m^{*2} - M_m^2} \quad (2)$$

ここで、 R_0 は動翼の外半径、 M_m^* は臨界先端マッハ数、 M_m は動翼の外周速度のマッハ数である。また m は干渉騒音の周方向の圧力モードを示すもので、干渉騒音のモード数と呼ばれ動翼枚数 B と静翼枚数 V によって次式で表される^{[1]~[4]}。

$$m = nB + kV \quad (3)$$

ここで、 n は高調波の次数、 k は任意の整数である。モード数が絶対値で最小となる値の時は、式(1)より音の減衰が最も小さくなる。

これらの式はモード数の値により、式(2)の

減衰量である $\frac{\Delta dB}{\Delta x}$ が決まる。式(3)のモード数が

$m=0$ の場合は平面波となり、この音は管内では減衰しないで伝播する^[4]。一方、 $m \neq 0$ の場合には、式(2)より干渉騒音の音圧レベルは m に比例して減衰する。したがって $m=0$ とならないような、また m の値が出来るだけ大きくなるように動翼間、または動翼と支持板の枚数の組み合わせに注意しなければならない。

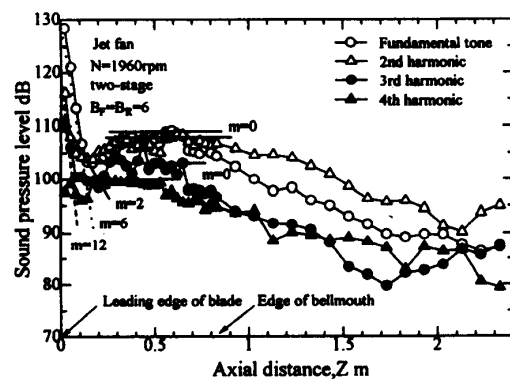


Fig.5 Decay of the rotating noise along duct axis

4.3 動翼後流の拡散状況

ジェットファンでは、ダクト内に整流効果と剛性を高めるためにハブと呼ばれる装置が取り付けられている。このハブは4方向に8枚に支持板によってダクト内に固定されておりこの支持板が騒音に大きく影響を与えているものと考えられる。そこで動翼とハブ支持板間で生じる干渉騒音の裏付けを行うために熱線流速計を用いて一段目動翼から発生される後流の存在を調べた。干渉騒音は、後流を動翼が切断したり、後流がハブ支持板と衝突するときに生じるため、もし一段目動翼で発生した後流がハブ支持板の直前まで存在していれば、動翼と支持板間に干渉騒音が発生していることの裏付けとなる。図7の(a)~(d)は図6の半径305mmにお

けるC断面以降の各断面の速度変動波形を示している。縦軸は電圧V、横軸は時間msecとなっている。回転数は1960rpmであるため、動翼が1回転するのに要する時間は約31msecであり、図をみるとその時間中に動翼枚数と同じ6回の周期を確認することができる。ここで、二段目動翼後方のハブ支持板直前のF断面における変動波形に着目すると後流が存在していることが分かる。このことより動翼とハブ支持板間の干渉騒音が影響を与えていると考えられる。

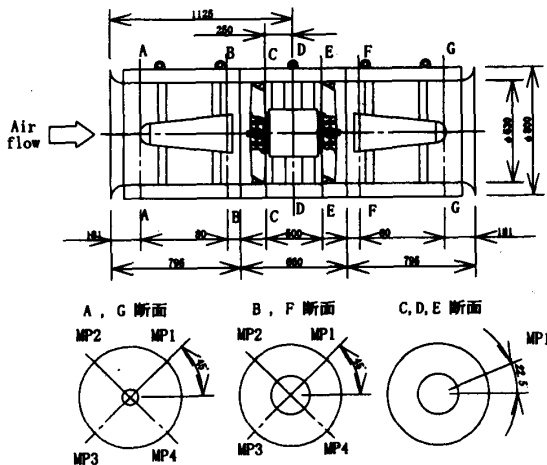
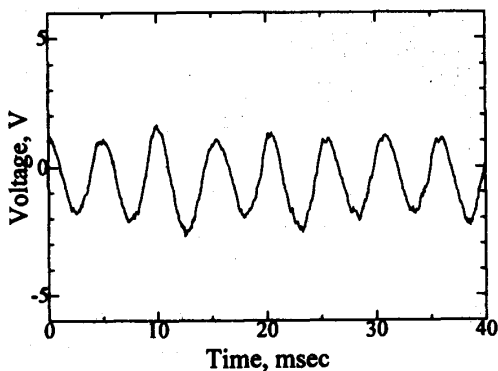
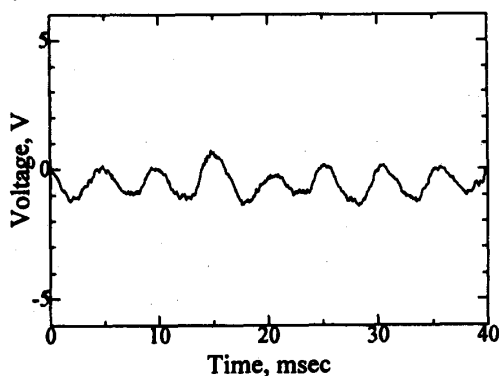


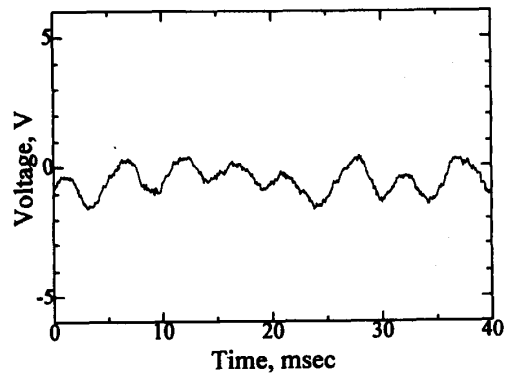
Fig.6 Measuring section



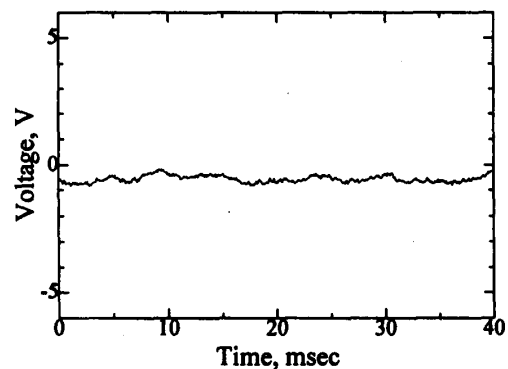
(a) X=250mm(cross section (D))



(b) X=500mm(cross section (E))



(c) X=660mm(cross section (F))



(d) X=1194mm(cross section (G))

Fig.7 Velocity fluctuation in the wake of a rotor

4.4 回転数がDFNに与える影響

図8はジェットファンにおける騒音スペクトル分布を示したものである。測定条件はハブ付きの動翼二段の送風機で、最大流量点で行った。図中の実線は回転数3000rpm、点線は回転数1960rpmである。図を見ると全帯域騒音において点線が実線よりL特性で約3dB程度低い。これは回転数が低下したことにより、乱流騒音、及び回転騒音が低減されたためによるものと考えられる。しかし、 $n=1, 2, 3 \dots$ の離散周波数騒音(回転騒音)を見ると、さほど差が見られない。よってジェットファンにおける騒音は離散周波数騒音が支配的であると考

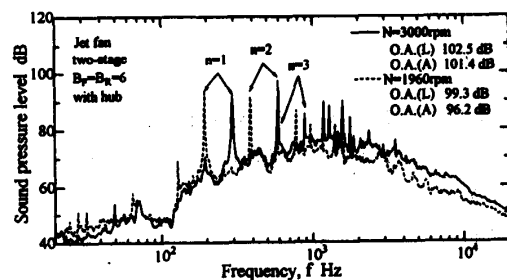


Fig.8 Spectrum distribution of the two-stage fan noise

えられる。

4.5 動翼間干渉

通常状態(市販品)ではジェットファンは一段目、二段目動翼枚数は共に6枚である。この場合、前述の理論より動翼間の干渉モードは $m=0$ となり管内では減衰しない騒音が発生する。

図9に動翼単段、二段の最大流量点における騒音スペクトル分布の比較を示している。図中の実線は動翼二段の場合を、点線は動翼単段の場合を示している。また図10は図9の騒音スペクトル分布における各高調波次数での音圧レベルを示している。図中の右側の棒グラフは動翼二段を、左側は動翼単段を表している。二段の場合に比べ、単段では離散周波数騒音が1次の高調波において約14dB、2次の高調波において約5dB低下しているため、結果として全帯域騒音はL特性で約6dB低下している。このことは、一段目動翼から発生した後流を二段目動翼が切断することによって干渉が生じたものと考えられる。そのため、ジェットファンにおいて動翼間の干渉は騒音に大きく影響を与えていると考えられ、モード数が0とならないような動翼の組み合わせにしなければならないといえる。しかし、単段においても離散周波数騒音は顕著に表れている。このことから動翼間の干渉によるもの以外にハブ支持板の影響が考えられる。

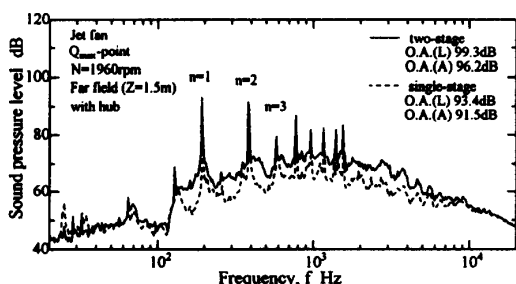


Fig.9 Spectrum distribution of the fan noise

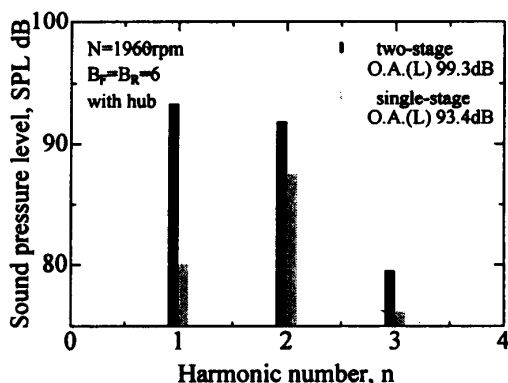


Fig.10 Sound pressure level in each harmonic

4.6 動翼とハブ支持板間の干渉

図11は動翼単段における騒音スペクトル分布の比較を示したものである。実線は単段ハブ付きを、点線は単段ハブ無しを示している。この図を見ると、ハブが無い状態のものは、ハブ付きのものに比べて全帯域騒音で約4dB低下している。図12に図11で示した騒音スペクトル分布での各高調波次数における音圧レベルが比較を示してある。この図を見ると、特に高調波次数 $n=2$ 、 $n=4$ において大きな低減がみられる。単段ハブ付きでは動翼枚数が6枚、支持板枚数が4枚であるため干渉騒音のモード数が2次と4次の高調波で $m=0$ となる。しかし、ハブを取り除いたことにより、動翼と支持板間の干渉が無くなったため大きく低減したものと考えられる。その結果として、全帯域騒音での大きな低減が得られた。よって離散周波数騒音の発生には、動翼とハブ支持板の干渉が大きく関与しており、干渉騒音をおさえるために動翼枚数とハブ支持板の枚数を調整するか、または半円筒状のスピナーを動翼に直接取り付けなければならない。

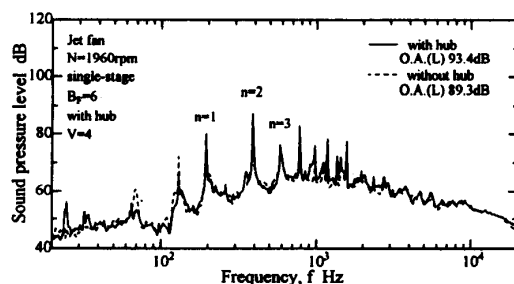


Fig.11 Spectrum distribution of the single-stage fan noise

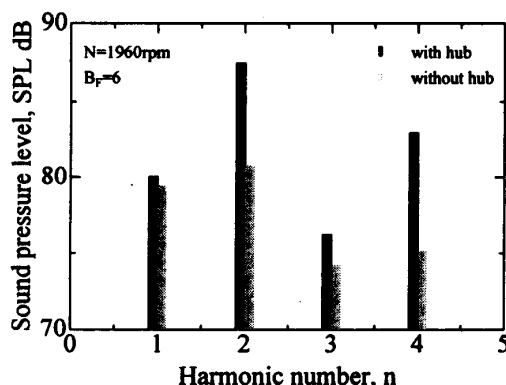


Fig.12 Sound pressure level in each harmonic

5. 結論

- 一段目と二段目の動翼の翼枚数を同数にすると動翼間の干渉による管軸方向に減衰しない $m=0$ のモードの干渉騒音が発生する。したがって一段目と

二段目の動翼枚数は等しいかあるいは倍数になってはならない。また、両者の枚数の差を大きく採る必要がある。

2. 動翼とハブ支持板枚数の組み合わせにより、偶数次の高調波において $m=0$ のモードが発生する。そのため動翼と支持板の枚数を考慮して $m=0$ のモードが発生しないように、また m ができるだけ大きくなるように配慮する必要がある。

参考文献

- [1] 村山将、他4名、ジェットファンの騒音に関する研究, 機講論, No99-7(1999), 67-70
- [2] Tyler, J.M. and Soflin, T.G.: Axial Flow Compressor Noise Studies SAE Trans, vol70(1962), 309-332
- [3] 妹尾泰利、児玉好雄、低圧軸流送風機の騒音に関する研究機論, 39-320(1973), 1246-1254
- [4] 児玉好雄、他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(第一報: 軸間距離、電動機の支持板の影響), 機論, 60-576, B(1994)2764