

[論文]

# チューブラー遠心送風機の空力特性と騒音特性の実験的研究

## (羽根車入口と出口の面積比の影響)

淵上真一郎\*<sup>1</sup> 児玉好雄\*<sup>2</sup> 林 秀千人\*<sup>2</sup>  
三村雄次郎\*<sup>3</sup> 脇山卓哉\*<sup>4</sup>

### 1. はじめに

渦巻形のケーシングの代わりに円筒形のケーシングに遠心羽根車を組み込んだ送風機が日本で最近市販されつつある。この送風機は、日本ではチューブラー遠心送風機または軸流遠心送風機、欧米ではStraight line flow fanと呼ばれている。この送風機が使用される動機としては比較的高い圧力と管路系が直線を必要とする場合である。このような場合、国内では斜流送風機を使用する例が多く見られるが、この送風機は高価であることや大型になることなどの難点がある。

チューブラー遠心送風機は極めて単純な構造であり、その上羽根車が遠心送風機と共有できるので製造コストが低くなること、直管の管路系に容易に組み込めること、遠心送風機や斜流送風機に比較して送風機を小型化できることなどの特徴がある。また舌部がないために遠心送風機のようなスクロール舌部と羽根車との干渉騒音が発生せず、騒音面で遠心送風機よりさらに有利なことが期待できる。

一方、チューブラー遠心送風機は上述のような特徴を有する送風機であるが、羽根車を出た

半径向きの流れがダクト壁面に衝突し、90°転向して下流側へ流出することになる。そのため衝突や曲がりによる圧力損失が生じ、他機種の送風機に比較して送風機効率が低くなるものと推測される。

著者らの一部はこれまでに軸流送風機<sup>(1)(2)</sup>、斜流送風機<sup>(3)(4)</sup>および遠心送風機<sup>(5)(6)</sup>の流体力学的特性と騒音特性について実験と理論の両面から検討を行い、送風機の特性改善策を議論してきた。一方チューブラー遠心送風機については、流体力学的特性ならびに騒音特性がほとんど分かっていないのが現状である。

このような背景に立脚して、本研究ではチューブラー遠心送風機の流体力学的特性ならびに騒音特性を、最高効率点の圧力と流量がほぼ同等の市販の遠心送風機及び斜流送風機との比較、検討を行った。さらに面積比（入口面積/出口面積）の異なる3種類の羽根車を用いてチューブラー遠心送風機の流動様相を調べ、流体力学的特性と騒音特性との関連性を考察し、その特徴を明らかにした。併せて、ケーシングの形状が送風機特性に及ぼす影響を調べた。

### 2. おもな記号

$A_r$  : 面積比 (羽根車入口面積/出口面積)  
 $B$  : 動翼枚数  
 $C$  : 翼弦長 [m, mm]

\* 1 長崎大学 大学院 海洋生産科学研究科  
\* 2 長崎大学 工学部  
\* 3 松下精工(株)  
\* 4 長崎大学 大学院 工学研究科  
原稿受付日 平成11年3月17日

- $D_0$  : 口金口径 [m, mm]
- $D_1$  : 羽根車内径 [m, mm]
- $D_2$  : 羽根車外径 [m, mm]
- $f$  : 周波数 [Hz]
- $g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]
- $K_s(A)$  : A特性における比騒音レベル [dB]
- $K_s(L)$  : L特性における比騒音レベル [dB]
- $L$  : 電動機入力 [W]
- $n$  : 高調波の次数
- $N$  : 回転数 [rpm, rps]
- $P_r$  : 全圧 [Pa]
- $Q$  : 流量 [m<sup>3</sup>/min, m<sup>3</sup>/s]
- $SPL(A)$  : 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]
- $U_T$  : 羽根車外縁の周速度 [m/s]
- $V_a$  : 羽根車出口の絶対速度の軸方向成分 [m/s]
- $V_r$  : 羽根車出口の絶対速度の半径方向成分 [m/s]
- $W$  : 羽根車出口の相対速度 [m/s]
- $X$  : スパン方向の距離 [mm]
- $Y_1$  : 動翼入口における翼のスパン長さ [mm]
- $Y_2$  : 動翼出口における翼のスパン長さ [mm]
- $\delta$  : 出口偏差角 [deg.]
- $\eta$  : 送風機と電動機の総合効率  
[ $\eta = \phi \psi / \lambda$ ]
- $\lambda$  : 動力係数 [ $\lambda = 8L / (\rho \pi D_2^2 U_T^3)$ ]
- $\nu$  : ハブ比
- $\xi$  : 翼取付角 [deg.]
- $\rho$  : 空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\phi$  : 流量係数 [ $\phi = 4Q / (\pi D_2^2 U_T)$ ]
- $\psi$  : 圧力係数 [ $\psi = 2P_r / (\rho U)^2$ ]
- $\omega$  : 角速度 [rad/s]

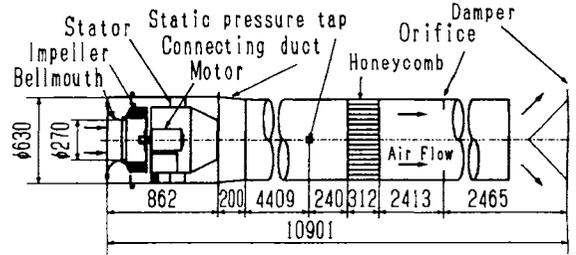


図1 実験装置の概要

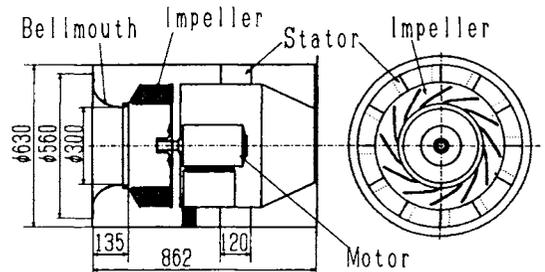
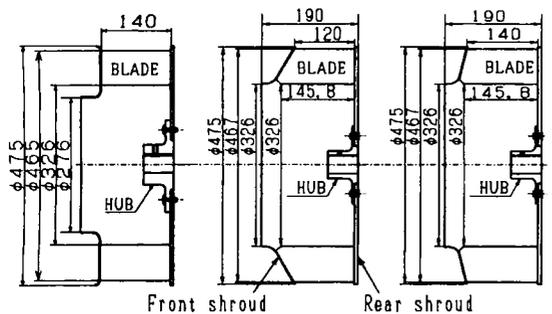


図2 チューブラー遠心送風機の概要

### 3. 実験装置および方法

図1はチューブラー遠心送風機の実験装置の概要を示したものである。実験装置の全長は約11mで、吸込口にはベルマウス、吐出管にはJIS規格に従って流量測定用オリフィス、静圧孔および整流格子が設置されている。流量の調整は管の出口に設けられているダンパを開閉することによって行った。なお、供試送風機と吐出管とは狭まり角6°の円管で連結されている。

図2において、送風機で空気はベルマウスより流入し、羽根車によって半径方向に加速されながら羽根車を出た後、ケーシングの壁面に衝突し、角度を90°転向して11枚の円弧形状をした静翼へ流入する。そこで旋回成分を減らされ静圧の回復後、管出口へと流出する。羽根車出口の流動様相は5孔球形ピトー管を用いて、羽根車外縁から10mm大きい半径の円筒面上を円周方向に90°間隔の4断面、スパン方向に約10mm間隔の14点で計測した。羽根車主板（後



(a) No.1羽根車 (b) No.2羽根車 (c) No.3羽根車

図3 供試羽根車

面シラウド) と静翼の距離は154mmである。

図3は供試羽根車の概要を示したものである。羽根車の外径はすべての羽根車でほぼ同じである。図(a)は羽根車の主板(後面シラウド)と側板(前面シラウド)がともに回転軸に直角に製作され、出口面積に対する入口面積の面積比 $A_r$ が0.29の、翼断面がクランクY型の翼形をした10枚羽根を有する羽根車である(以下ではNo.1羽根車と呼ぶ)。図(b)は主板が回転軸に垂直で、側板が回転軸と $62^\circ$ の傾斜角を持ち、羽根車の入口面積と出口面積の比 $A_r$ が0.47の平板の12枚の翼からなる羽根車(No.2羽根車)である。図(c)は12枚の平板製の翼からなる羽根車で主板が回転軸に垂直であり、側板が回転軸と $75^\circ$ の角度を有する羽根車(No.3羽根車)で、この羽根車の $A_r$ は0.41である。これらの羽根車は4極の誘導電動機によって約1800rpmで駆動される。羽根後縁における羽根車の周速度は約43.7m/sである。以下ではNo.1、No.2、No.3羽根車を有する送風機をそれぞれNo.1、No.2およびNo.3送風機と呼ぶことにする。

表1はこれらの羽根車の主要諸元を示す。

表1 羽根車の主要諸元

Impeller	No.1	No.2	No.3
Blade section	Airfoil	Flat plate	Flat plate
B	10	12	12
$D_1$ mm	326	326	326
$D_2$ mm	465	467	467
$D_0$ mm	276	326	326
$Y_1$ mm	140	145.8	145.8
$Y_2$ mm	140	120	140
C mm	138	140.8	140.8
$\xi$ °	43	44.6	44.6
$A_r$	0.293	0.474	0.406

## 4. 実験結果および考察

### 4-1 空力特性

図4はチューブロー遠心送風機の実験結果を示したもので、図4(a)には羽根車による差異が示されている。図中の $\phi$ は圧力係数を、 $\phi$ は流量係数を、 $\lambda$ は動力係数を、 $\eta$ は送風機と電動機の総合効率を示している。図4中の破線はNo.1送風機、点線はNo.2送風機、実線はNo.3送風機の実験結果である。この図からNo.1送風機は他の2つの送風機と比較して最大流量がかなり少なく、最高効率も約10~20%ほど低いことが判る。これは面積比(羽根車入口面積/出口面積) $A_r$ に関して、No.1羽根車が0.293でNo.2羽根車の約半分であり、非常に小さいために羽根車入口の前面シラウド側で流れはく離し、逆流領域が最も広くなる<sup>(7)</sup>ことが主因と考えられる(図6参照)。このため、圧力係数も最も低くなっている。No.2送風機は前面シラウドが三つの中で最も傾斜し、面積比 $A_r$ も大きい。これに対応して最大流量が最も大きく、最高効率も70%と最も高い。No.3送風機は羽根車の入口面積をNo.2羽根車と同じにし、出口面積をNo.1羽根車と同じにしたものである。従って面積比がNo.2より15%ほど小さい。この場合、最大流量はNo.2送風機より約3%少なく、効率は約7%低下している。しかし、No.1

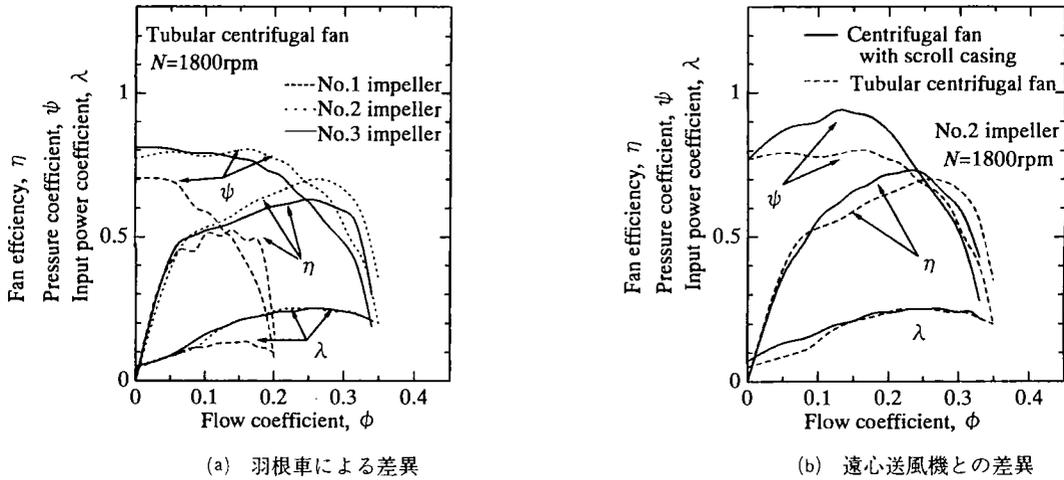


図4 チューブラー遠心送風機の特性曲線

送風機に比較すると最大流量は約70%、効率は約10%増加する。以上のことは、面積比 $A_r$ をできるだけ大きくし、1に近づけた方が特性改善の面からは良好であることを示している。

スクロール付き遠心送風機（遠心羽根車）との差異を図(b)に示す。どちらも同じNo.2羽根車を用いたものである。遠心送風機はチューブラー遠心送風機に比べて最高効率が3%高い、また流量係数が0.26より低い流量域で圧力係数がかなり高い。つまり、効率は大差ないが最大流量の65%以下の流量において前者が後者より圧力が優るといえる。チューブラー遠心送風機は下流に静翼があるために設計点から流量が大きくなると、そこで損失が増大するためである。

#### 4-2 流動様相

図5は羽根車出口から10mm大きい半径における圧力係数の平均値（周方向に90°間隔の4点）の羽根車による差異を最高効率点について示したものである。図中のFront shroudは前面シュラウドを、Rear shroudは後面シュラウドを表している。全スパンにわたっての平均値はNo.1羽根車（●印）が低い。これは羽根車の入

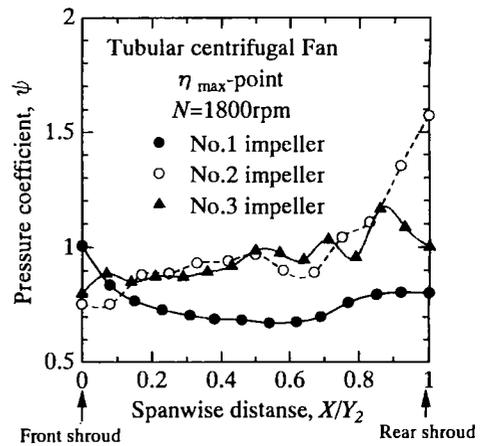


図5 圧力係数のスパン方向分布

口面積が小さいために、後述のように側板（前面シュラウド）近傍の流れのはく離や逆流（図6参照）が生じているのが主因である。さらに、最高効率の流量点はかなり小さく静翼での損失が大きいことも原因と思われる。またNo.3羽根車はNo.2羽根車と差異はほとんどなく、No.1羽根車よりほぼ全スパンで全圧が高い。

チューブラー遠心送風機の羽根車出口における半径方向速度成分のスパン方向分布を図6に示す。No.1羽根車はスパン方向距離 $X/Y$ が0.1

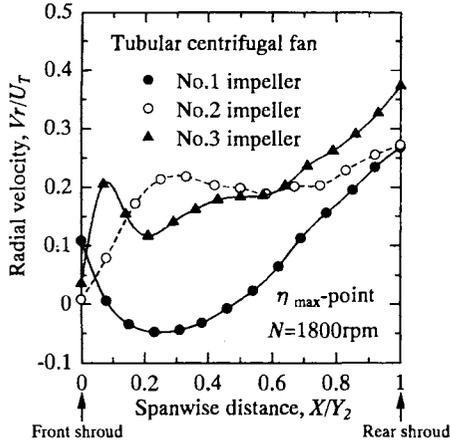


図6 半径方向速度のスパン方向分布

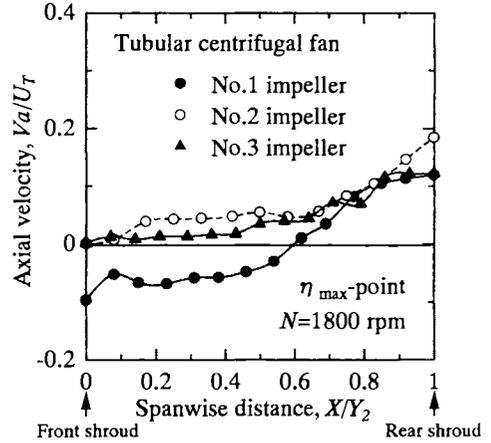


図7 軸方向速度のスパン方向分布

～0.5の領域で内向き流れ（負）、0.5以上の領域では外向き流れ（正）になっている。この内向き流れの部分は羽根車出口からの逆流を表し、有効な仕事は全くなされていらない。一方、羽根車の面積比 $A_r$ （入口面積/出口面積）が比較的大きいNo.2、No.3羽根車には内向き流れは現れていない。面積比 $A_r$ は羽根車内の流れに大きな影響を与え、 $A_r$ は大きい方がよいことが分かる。

図7は軸方向（スパン方向）速度分布の羽根車による差異を最高効率点の流量において示したものである。この図から入口面積の小さいNo.1羽根車（●印）は全スパンの約6割で管軸入口方向への逆流が見られる。図6と、この図からNo.1羽根車では、前面シュラウドからスパンの6割ほどまでの広い領域で循環流れが生じて下流へ流体が流れず、有効な仕事がなされていないと思われる。また、入口面積を増加させ、出口面積を減少させたNo.2とNo.3羽根車では、全スパンに渡って $V_a > 0$ であり、逆流は発生していないことが分かる。特に、後面シュラウド近くで大きくなっていることから、羽根車から出る時すでに流れが下流側へ傾斜していることが分かる。No.3羽根車はNo.2羽根車とほ

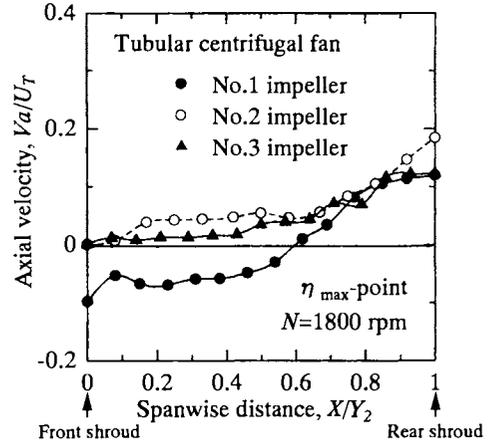


図8 相対速度のスパン方向分布

ぼ同じ傾向にあるが、No.2羽根車の方が多少大きくなっている。

図8は相対速度 $W$ のスパン方向の分布の羽根車による差異を示したものである。送風機から発生する騒音が相対速度の6乗に比例することを考えれば相対速度は騒音にとって非常に重要な因子の一つであると言える。スパン方向距離が約0.3以上では相対速度はNo.1（●印）がもっとも大きく、No.2（○印）、No.3（▲印）の順に小さくなっている。また、ハブ近傍では逆にNo.1送風機が最も小さい。

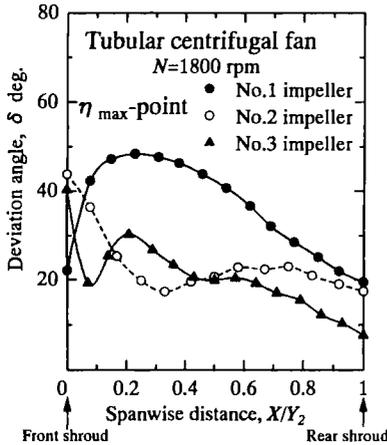


図9 出口偏差角のスパン方向分布

図9は流れの良否を示す材料の一つとして用いられている出口偏差角 $\delta$ の羽根車による差異を示したものである。 $\delta$ が小さいほど流れは翼に沿って流出しているといえる。この図から、No.1羽根車はほぼ全域で $\delta$ が大きく、流れが翼に沿っていないことがわかる。前面シュラウド近傍での逆流と、これが効率を大幅に低減させている。No.2とNo.3羽根車ではスパンにわたって小さくまた平坦である。このことからNo.2羽根車は、他の羽根よりも流れは翼に沿っているものと考えられる。

#### 4-3 騒音特性

図10は送風機騒音のスペクトル分布を羽根車について比較したものである。図中の破線はNo.1羽根車、点線はNo.2羽根車、実線はNo.3羽根車である。No.2羽根車(点線)とNo.3羽根車(実線)の場合には360Hz( $n=1$ )と720Hz( $n=2$ )に離散周波数騒音の発生が見られる。これらの周波数は羽根枚数と羽根車回転数の積で表される周波数とその倍の周波数であることから回転騒音と考えられる。回転騒音は動翼面上の圧力分布の回転に基づく動翼回転騒音と動翼と静翼との干渉に基づく干渉騒音とに分けられる<sup>(8)</sup>。動翼回転騒音は本研究で取り扱って

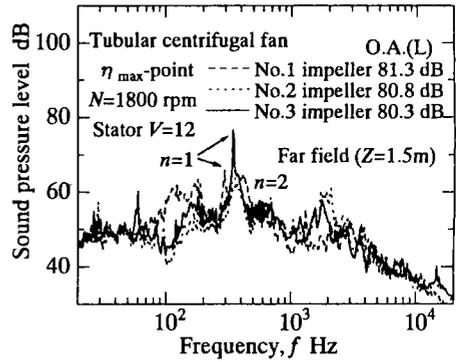


図10 騒音スペクトル分布の羽根車による比較

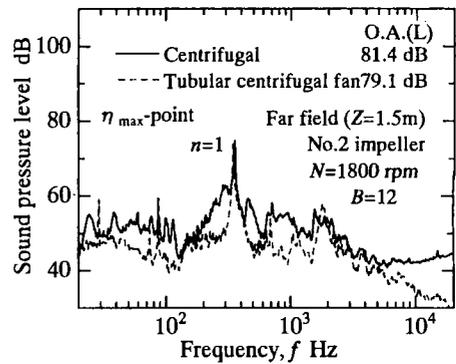


図11 騒音スペクトル分布の遠心送風機との比較

る低圧の送風機の場合には動翼の極近傍で乱流騒音とほぼ同程度のレベルまで減衰するので、ほとんど問題にならない<sup>(8)</sup>。したがって、これらの周波数における離散周波数騒音は羽根車と静翼(障害物)との干渉騒音であろう。一方、No.1羽根車ではこれらの離散周波数騒音は見られない。これは、前述のように流れが非常に乱れているために規則的な負荷変動の影響が表れにくいと思われる。しかし、その分乱流騒音が大きく、結果として全帯域騒音レベル(O.A.)は大きくなっている。

図11にNo.2羽根車における遠心送風機とチューブラー遠心送風機の騒音のスペクトル分布の比較を示す。この場合いずれの場合にも $f=360\text{Hz}$ に $n=1$ の干渉騒音の発生が見られる。ま

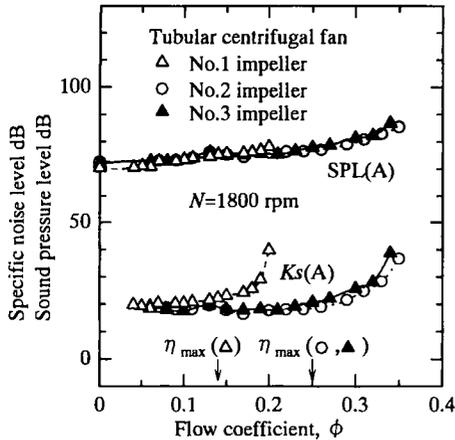


図12 全帯域騒音と比騒音レベルの流量特性の羽根車による差異

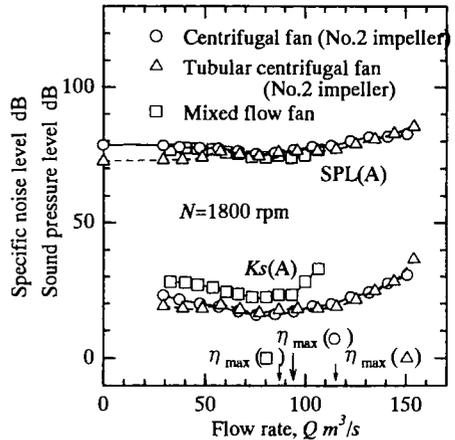


図13 全帯域騒音と比騒音レベルの流量特性の送風機による差異

た、遠心送風機がチューブラー遠心送風機に比較して乱流騒音のレベルが若干大きくなっている。遠心送風機の場合には静翼は設けられていないが舌部がある。したがって、舌部と動翼との干渉によって、管内で減衰せずに大気中へ放出される干渉騒音が発生している。一方、チューブラー遠心送風機の場合は静翼との干渉や流入する偏流との干渉が離散周波数騒音の発生原因として考えられる。

図12は騒音計のA特性を用いて計測した全帯域騒音  $SPL(A)$  と比騒音レベル  $Ks(A)$  の流量による変化を各羽根車について示したものである。比騒音レベルは式(4)に示すように音圧レベルに流量と圧力を加味した量として表され、このレベルが低いほど良好な送風機とされている。

$$Ks = SPL - 10 \log_{10} (QP^2) + 20 \quad \dots(4)$$

ここで

$SPL$  は音圧レベル (dB)、

$Q$  は流量 ( $m^3/min$ )、

$P_T$  は全圧 (Pa)

である。

いずれの羽根車も流量が減少するにつれて騒音レベルが低下している。また、No.1羽根車で

は前述のように乱流騒音が大きいために多少騒音レベルが大きい。比騒音レベルでは、No.1羽根車で著しく騒音レベルが大きい。No.2羽根車はNo.3羽根車に比べてわずかだが比騒音レベルが低く、わずかに良好な結果が得られている。

図13は遠心、チューブラー、斜流の3種類の送風機騒音及び比騒音を比較したものである。図中の○印、△印、□印はそれぞれ遠心、チューブラー、斜流送風機の結果を示している。流量  $Q$  が  $100 \sim 130 (m^3/min)$  および  $50 (m^3/min)$  以下の流量域においてはチューブラー遠心送風機が遠心送風機よりも音圧レベルは  $2 \sim 5dB$  低いこと、また、チューブラー遠心送風機と斜流送風機と比較した場合  $50 (m^3/min)$  以上の流量域では両者の音圧レベルはほとんど変わらないが、 $50 (m^3/min)$  以下の流量域では前者の方が後者より低い。以上の結果より、チューブラー遠心送風機は騒音に関して優れているといえる。

また、比騒音レベルでは全流量域で斜流送風機は他の送風機より  $8dB$  程度高いこと、チューブラー遠心送風機は流量  $Q$  が約  $50 \sim 100 (m^3/min)$  を除いた流量域では遠心送風機より低いことが

わかる。以上から判断すれば、チューブロー遠心送風機は通常の遠心送風機と比較して特性に関しては遜色がないこと、斜流送風機よりも特性が良好なことが分かる。

## 5. 結 論

本研究ではチューブロー遠心送風機を同等の圧力、流量を持つ遠心送風機及び斜流送風機と比較し、さらに3種類の羽根車について、羽根車入口と出口の面積比が送風機の流体力学的特性と騒音特性に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、以下の結論を得た。

- ① 面積比がNo.1羽根車のように小さいと羽根車の前面シュラウド近傍におけるはく離と逆流によって圧力損失は増加する。そのため送風機の全圧と効率は低くなり、さらに最大流量も小さくなる。
- ② チューブロー遠心送風機の場合でも、離散周波数騒音の発生が見られる。この発生原因としては、動翼と静翼の干渉や羽根車に流入する主流の偏流が考えられる。
- ③ 本実験範囲では、面積比が大きく1に近いチューブロー遠心送風機では最高効率点の流量がほぼ同程度の斜流送風機や遠心送風機と比較して、全流量域では多少音圧レベルが低い。比騒音レベルに関しては斜流

送風機より全流量域で12dB以上低く、スクロールケーシングを有する遠心送風機より2~3dB低く、比較的良好な送風機といえる。

## 6. おわりに

本実験に協力された当時長崎大学学生の永松秀規、股張淳および実験装置製作に協力された松下精工(株)の近藤重樹、鈴木保彦の諸氏に謝意を表す。

### <参考文献>

- (1) 深野・児玉・高松, 低圧軸流送風機の騒音に与える翼先端すきまの影響, 機論 (B), 51-463 (1985), 820.
- (2) 児玉・深野, 低圧軸流送風機の共鳴騒音に関する研究 (丸棒の位置, 回転数および翼先端形状の影響), 機論 (B), 52-477 (1986), 2131.
- (3) 深野・児玉, 低圧の軸流および斜流送風機騒音の音圧レベル予測, 機論 (B), 51-466 (1985), 1825.
- (4) 児玉・深野, 低圧斜流送風機の乱流騒音の流量特性とその予測, 機論 (B), 54-500 (1988), 883.
- (5) 児玉・他3名, 層流ファンの流体力学的特性と騒音に関する実験的研究, 機論 (B), 58-549 (1992), 1611.
- (6) 児玉好雄・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.
- (7) R. J. Kindand M. G. Tobin, "Flow in a Centrifugal Fan of the Squirrel-Cage Type", Trans. of the ASME., Vol. 112 (1990), 84-90.
- (8) 妹尾・児玉, 低圧軸流送風機の騒音に関する研究, 機論, 39-320 (1973), 1246.