

# スクロールレス遠心ファンの空力特性と騒音に関する研究 (羽根車入口・出口角度の影響)

林 秀千人\*・児玉 好雄\*・荻野 和郎\*\*

## Characteristics of Aerodynamics and Noise for Centrifugal Fan without Scroll Casing (Effect of Inlet and Outlet angles)

by

Hidechito HAYASHI, Yoshio KODAMA, Kazuo OGINO

The influence of the inlet and outlet angles of the centrifugal fan without scroll casing were investigated in relating to the characteristics of aerodynamics and noise. The following results are obtained. The inlet angle of the impeller, which is estimated by the radial inflow condition, gives the extremely low angle for the inflow condition. The cause is that the leakage flow from the clearance between the front shroud and the bell mouth is very large and has the tangential component of velocity. And we proposed the new charts of the performance on the fan noise. They clearly indicate the effect of the inlet and outlet angles of the impeller to the performance of the fan noise. From the charts, the optimal design parameters and the sensitivity of them to the fan noise can be easily obtained.

### 1. 緒言

遠心送風機は比較的高い圧力が得られることから、生活の身近なところで数多く利用されている。最近では、高圧・大流量を必要とする場合にも利用され、空力性能のさらなる向上が望まれている。一方、オフィスや病院などの利用が増えるとともに、環境面から騒音の小さい静かな送風機が望まれている。遠心送風機に関する研究は、これまでに翼形状と騒音の関係を調べて騒音を低減化するもの<sup>(1),(2)</sup>や、多翼ファンの騒音発生機構に関する研究<sup>(3)</sup>、多翼ラジアルファンの乱流騒音に関する研究<sup>(4)</sup>などがある。

スクロールケーシングのないファンすなわちスクロールレス遠心ファンは、空調機器用として注目され用いられている。この場合、羽根車からの流れがそのまま周辺装置へ流れていくために、ファンの形状が周辺装置によって左右される。児玉らは、送風機の羽根車と周辺装置との関係について、騒音特性を明らかにして

いる<sup>(5)</sup>。さらに、精度の良い騒音の予測を行っている<sup>(6)</sup>。しかしながら、このような遠心ファンの羽根車は、流体力学的性能については設計時に比較的検討がなされるものの、騒音特性の面から低減化を計ることはまだ十分にはなされていないようである。本研究では流体力学的特性を加味した騒音レベルすなわち比騒音レベルに着目して、羽根車の入口および出口角度と騒音特性の関係から、低騒音の送風機設計の指針を与えるものである。

### 2. 主な使用記号

|       |                           |
|-------|---------------------------|
| $B$   | : 羽根枚数                    |
| $D$   | : 羽根車直径 m                 |
| $h$   | : スパン高さ m                 |
| $K_s$ | : 比騒音レベル dB               |
| $P_s$ | : 静圧 Pa                   |
| $Q$   | : 流量 $m^3/min$ 又は $m^3/s$ |

平成14年 4月12日受理

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

\*\*大学院博士後期課程 (Graduate School of Science and Technology)

- SPL : 騒音レベル dB
- $u_2$  : 羽根車外縁の周速度 m/s
- $V_u$  : 絶対速度の周方向成分 m/s
- $\gamma_1$  : 羽根入口角度 度
- $\gamma_2$  : 羽根出口角度 度
- $\rho$  : 空気の密度  $\text{kg/m}^3$
- $\Psi_s$  : 圧力係数
- $\phi$  : 流量係数
- $\delta_2$  : 出口偏差角 度
- $\Delta q$  : もれ流量  $\text{m}^3/\text{min}$
- $\Delta \Psi_i$  : 損失係数
- 添え字
- 1 : 羽根車入口
- 2 : 羽根車出口

3. 実験装置および方法

図1(a)は本研究で使用したスクロールレス遠心ファンの装置全体の概要図である。これはクリーンルームの空気清浄に用いられるもの(クリーンモジュールユニット)で、吸い込み口にはベルマウスが取り付けられ、通過した流れが羽根車に入る。羽根車で加圧、加速されたあと径向きに流出した流れは側壁で曲げられ下流側に設けられた除塵フィルタを通して機外へ流出する。詳細は文献(6)に示している。

図(b)は供試羽根車の1つの形状を示している。羽根車は外径が360mm、内径が265mmで、羽根は厚み2mmの円弧形状をした二次元羽根である。羽根枚数は11枚である。実験では、入口・出口角度が異なる3種類の羽根車を用いた。空力設計上は、入口角 $\gamma_1=20^\circ$ 、出口角 $\gamma_2=39^\circ$ が所定の流量、圧力を得るものである。本実験では、騒音に及ぼす入口・出口角度の影響を調べるために、入口角 $\gamma_1=20^\circ$ 、出口角 $\gamma_2=39^\circ$ の羽根車(以下BW2039と呼ぶ)の他に、入口角が $\gamma_1=$

Table 1 Main dimensions of Impellers

|                         | BW2039 | BW2939 | BW2090 |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| Inner diameter $D_i$    | 265mm  |        |        |
| Outer diameter $D_o$    | 360mm  |        |        |
| Number of blade $B$     | 11     |        |        |
| Inlet angle $\gamma_1$  | 20°    | 29°    | 20°    |
| Outlet angle $\gamma_2$ | 39°    | 39°    | 90°    |

$29^\circ$ で、出口角が $\gamma_2=39^\circ$ の羽根車(以下BW2939と呼ぶ)、また入口角が $\gamma_1=20^\circ$ で出口角が $\gamma_2=90^\circ$ の羽根車(以下BW2090と呼ぶ)について調べた(表1)。

流動様相の計測は、羽根車半径より10mm大きい位置で、周方向に4断面(図1(a)中のMP1~MP4)について行った。騒音の測定は、吸い込み口正面で回転軸上の1m上流の地点に精密騒音計を設置して無響室でおこなった。騒音計からの出力信号はFFTアナライザを用いて周波数解析を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 空力特性および騒音特性

図2は3種類の羽根車について、作動点近傍の圧力について特性曲線を示したものである。圧力係数、流量係数は式(1)で定義される。

$$\Psi_s = 2P_s / (\rho u_2^2), \phi = Q / (\pi D_2 h_2 u_2) \tag{1}$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $u_2$ は羽根車外縁の周速度、 $Q$ は流量、 $D_2$ は羽根車外径、 $h_2$ は羽根車出口における翼のスペン高さである。またスクロールレス遠心ファンの場合は、羽根車から出た流れが直接周辺装置に流れ込むために、流れの動圧はあまり利用されない。従って通常、性能の評価は静圧で行なわれ、式(1)の圧力にも静圧 $P_s$ を用いた。図より、BW2039(▲印)が圧力はもっとも低く、入口角が29度と設計より大きいBW2939羽根車がそれより高くなっている。さらに、出口角が90

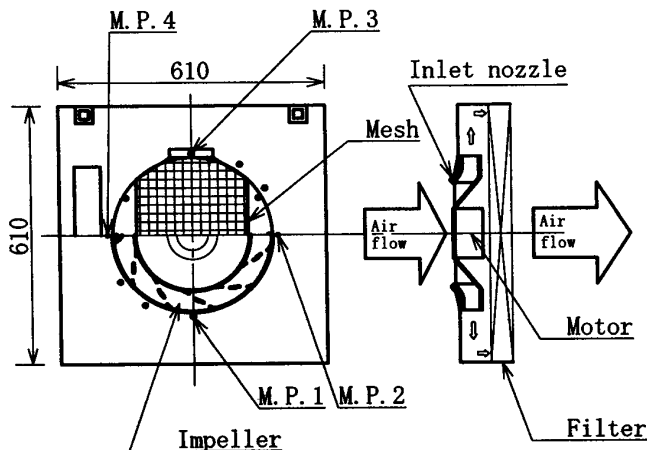


Fig. 1 Experimental Apparatus

度のBW2090羽根車は、もっとも静圧が高くなっている。BW2939は流量の増加による圧力の低下も他に比べると緩やかで、流量が大きいところでさらに有利であると考えられる。これは流量が多くなるにつれて、羽根入口角度が大きいBW2939羽根車の流入条件に近づくためである。また、除塵フィルタの所定の流量・圧力を得る条件を考えると、羽根車出口角度が90°の場合 (BW2090)がもっとも高い圧力を得ることができることから、BW2090羽根車は回転数をもっとも下げることができ有利と考えられる。

図3は騒音および比騒音特性をA特性について示したものである。騒音(SPL)特性は、いずれの羽根車でも流量による変化がほとんど見られない。出口角度が90°のBW2090は他の2つより2dBほど高くなっている。これは、後述のように流れが翼からはく離する割合が

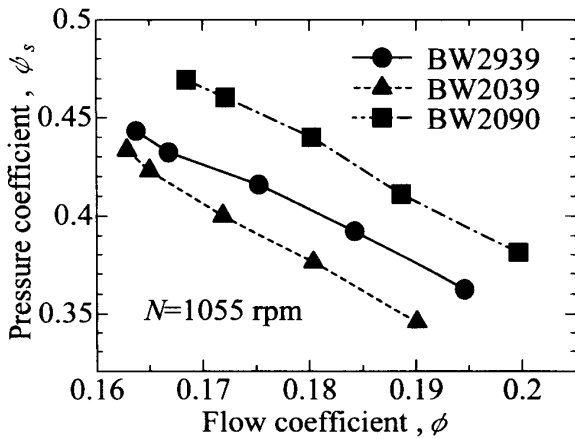


Fig. 2 Variation of the pressure coefficient with the flow coefficient

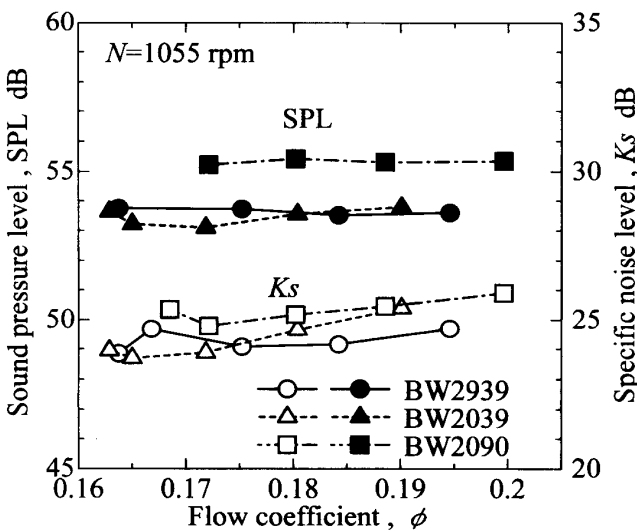


Fig. 3 Variation of the sound pressure level and specific noise level with the flow coefficient

他の2つのものより大きく、後流幅が増加するためである。一方、BW2039とBW2939羽根車はほとんど騒音レベルは変わらない。比騒音 $K_s$ は、騒音レベルに流量と圧力の影響を式(2)により考慮したものである。騒音レベルに流体力学的特性を加味して評価するもので、騒音性能の良否を判断できる。

$$K_s = SPL - 10 \log(QP_s^2) + 2 \quad (2)$$

ここで、 $K_s$ は比騒音レベル(dB)、 $SPL$ は音圧レベル(dB)、 $Q$ は流量( $m^3/s$ )、 $P_s$ は静圧(Pa)である。比騒音レベル $K_s$ は流量の増加とともにわずかに増加する傾向が見られる。これは、上述のように騒音レベルは流量で変化しないものの、図2に示したように静圧が流量の変化により大きく低下するためである。また、羽根車による相違を見ると、BW2090羽根車が流量によらずもっとも大きいレベルを示す。一方、BW2939羽根車は全体的に低いレベルに保たれている。BW2039羽根車は、流量が増加するにつれて、BW2090とほぼ同程度まで高くなっている。

以上のことより、空力性能の面では前述のように出口角が大きいBW2090羽根車のほうが良好であるが、騒音の面ではBW2090羽根車は最も悪く、BW2939羽根車がもっとも良好な羽根車となった。

#### 4. 2 羽根車の流動様相

図4は羽根車出口における絶対速度のスパン方向分布を示している。いずれの羽根車も前面シュラウドへ向けて大きくなる傾向が見られる。また、出口角度が90°のBW2090羽根車がスパン全体にわたって大きくなっている。出口角度が同じBW2039とBW2939羽根車はほとんど変わらない。

図5は絶対速度の周方向成分のスパン方向分布を示している。この図においても、いずれの羽根車も前面

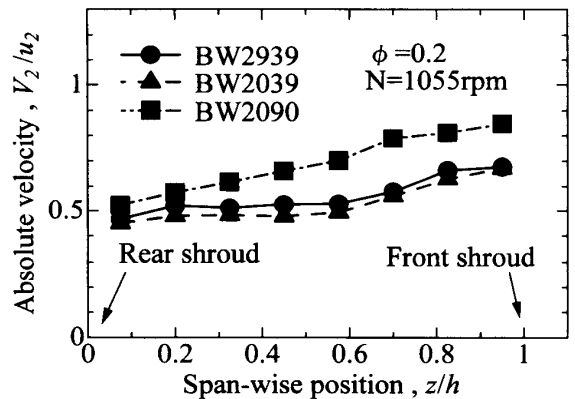


Fig. 4 Spanwise distribution of the absolute velocity

シュラウドへ向けて大きくなる傾向がある。また、羽根車出口角度が $90^\circ$ のBW2090羽根車は大きく、他の2つにはほとんど違いが見られない。このことから、羽根車出口角度が同じ場合には、すべりがほぼ等しく理論ヘッド（オイラーヘッド）はほとんど同じであると考えられる。しかしながら、実際の羽根車における圧力上昇量はBW2939羽根車がBW2039羽根車より大きくなっており（図2）、両者の損失に大きな違いがあることが予想される。

図6は、理論圧力係数から実際の圧力係数を差し引いた流動損失 $\Delta\phi$ のスパン方向分布を示している。いずれの羽根車も後面シュラウドから前面シュラウドへ向けて流動損失が増加する傾向が見られる。このことは、羽根車出口では上述のように前面シュラウド側へ流れが偏り、そこに低エネルギーの流体が集中していることを示すものである。また、BW2939羽根車はスパン全体にわたってもっとも流動損失が小さく、BW2039羽根車は後面シュラウドからスパン中央近くの領

域で流動損失が大きい。このことは、後述のように入口で衝突損失の大きい流体が羽根出口ではこの領域に流れてきていると考えることができる。また、BW2090羽根車は全スパンにわたって流動損失が大きくなっている。これらのことからBW2090羽根車は理論ヘッドは出口角度が大きいため、十分大きくなるものの損失もかなり大きくなっていること。一方、BW2039羽根車とBW2939羽根車は理論ヘッドがほとんど変わらないものの、損失が前者で大きいため実ヘッドに差が出ていることがわかる。

図7は出口偏差角のスパン方向分布を示している。いずれの羽根車も後面シュラウド側で大きく、前面シュラウドへ向かうにつれて次第に小さくなっていることがわかる。また、出口角度が $\gamma_2=39^\circ$ のBW2939羽根車とBW2039羽根車はともに、スパン高さの60%程度までは $\delta_2$ が $20^\circ$ 程度であり、前面シュラウドでは $5^\circ$ 以下とかなり翼に沿っている。一方、出口角度が $90^\circ$ のBW2090羽根車では後面シュラウド側で $\delta_2$ が $70^\circ$ 程度とかなり大きく、前面シュラウド近くでも $35^\circ$ 程度である。したがって、この羽根車の場合は、スパン全体にわたって流れは翼に沿っておらず、広い後流が形成されていると考えられる。すなわち、BW2939羽根車とBW2039羽根車はともに流れは翼に比較的沿っており、良好な状態となっている一方で、BW2090羽根車では流れは翼から大きく離れており、これが損失の著しい増加を招いている。

図8は、羽根入口角度による翼間流れへの影響をAEA社CFX-TASCflowで数値シミュレーションした結果である。図はスパン高さの75%の断面における相対速度の等高線である。図(a)はBW2939羽根車であるが、負圧面側の後縁近傍にはく離を示す低速領域が見られるが、それ以外は全体に良好な流れとなっている。一方、図(b)のBW2039羽根車では、負圧面側の前縁近傍

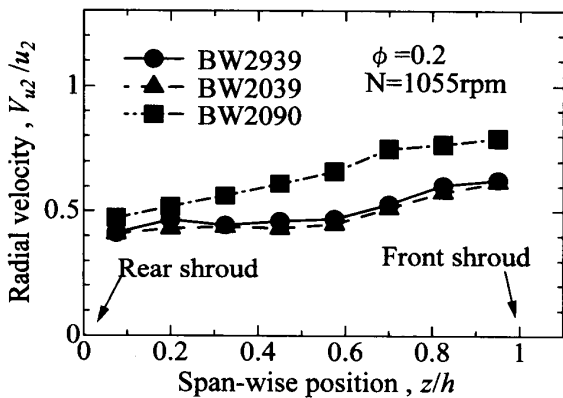


Fig. 5 Spanwise distribution of the tangential velocity component

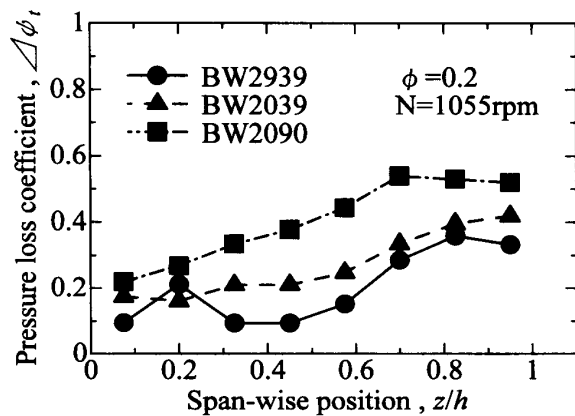


Fig. 6 Spanwise distribution of the pressure loss coefficient

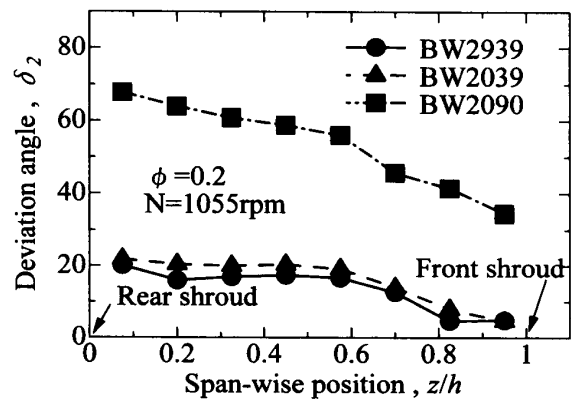


Fig. 7 Spanwise distribution of the deviation angle

に低速領域が現れており、負圧面側では流れが前縁からはく離していることがわかる。設計上はBW2039羽根車の羽根入口角が流入条件に合っているのであるが、実際には上述のように口金すきまからの流れによる影響がかなり大きいため、BW2039羽根車は入口部分で衝突損失が発生している。これが、後縁のところでは流路中央あたりへ続いているのである。

4.3 騒音の周波数特性

図9は騒音の周波数特性を示している。およそ430 Hzでいずれの羽根車もピークが見られるが、これはモータの振動による騒音であり、剛性を高めることで低下させることができる。周波数が200Hzから500Hz付近に騒音の中心があり、広い周波数領域にわたってなだらかに分布していることがわかる。これが乱流騒音である。

5. 乱流騒音の予測

送風機から発生する乱流騒音は、主流に乱れない場合は主として羽根後縁から放出される渦に起因する。この場合、音響出力は次式で与えられる。(5)~(8)

$$E = \pi B \rho f D W^6 dz / (2400 a_0^3) \tag{3}$$

ここでBは動翼枚数、 $\rho$ は空気の密度、Dは後流の幅、Wは相対速度、zはスパン方向距離、 $a_0$ は音速である。

本研究のファンのように、吸込み口と吐出し口がかなり接近している場合は、音響出力Eと観測点の音圧 $\bar{p}$ とは次のように関連付けられる。

$$E = 4\pi r^2 \bar{p}^2 / (3\rho a_0 \cos^2\theta) \tag{4}$$

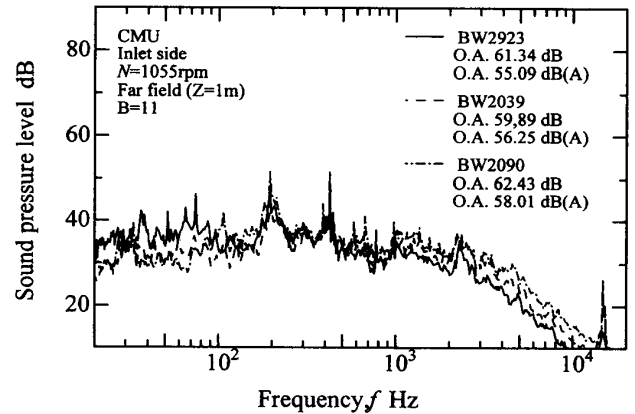


Fig. 9 Spectral distribution of the noise

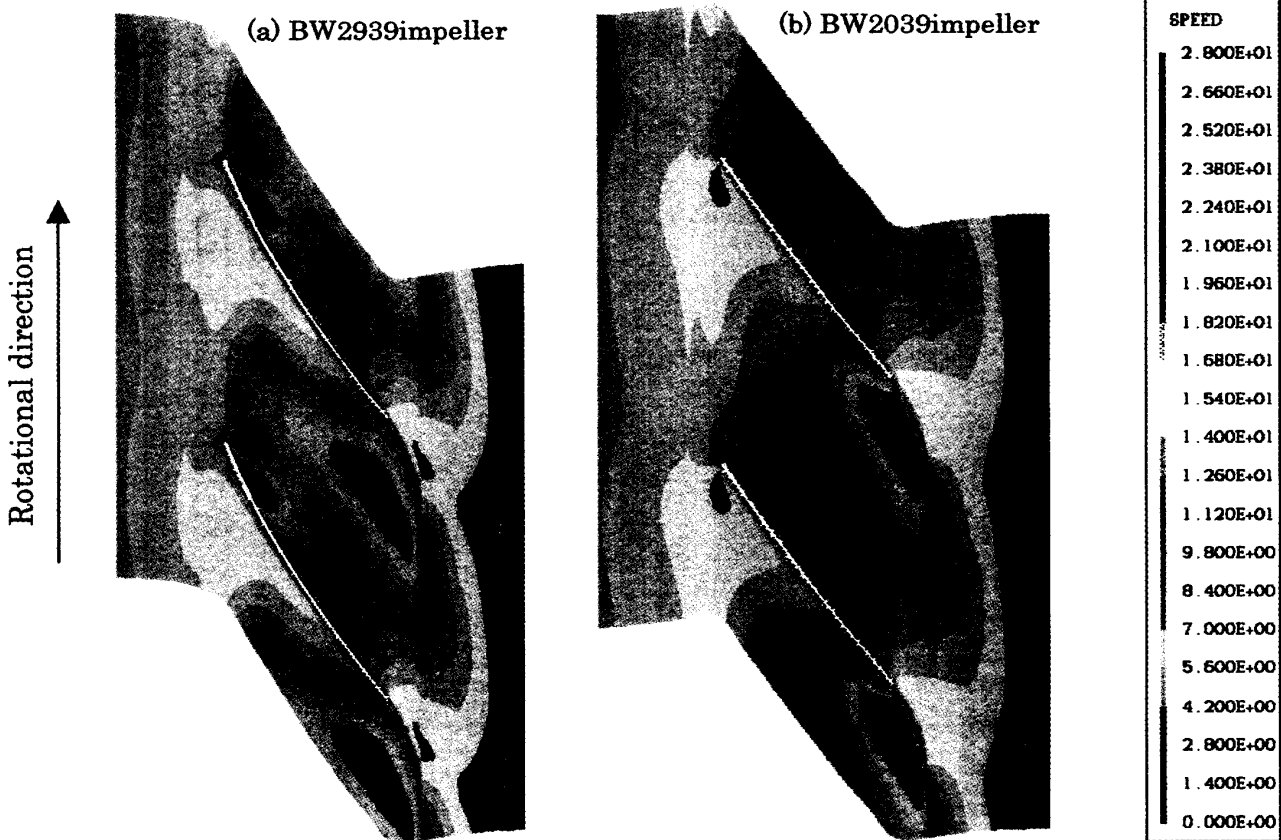


Fig. 8 Contour map of the relative velocity (75% span length)

ここで  $r$  は音源と観測点間の距離で、本研究の場合は入口ノズル及びフィルタとマイクロフォンとの距離を用いる。また  $\theta$  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あり、本研究の場合は  $0^\circ$  である。

観測点の音圧レベルと音響出力との間には次式が成り立つ。

$$SPL = 10 \log_{10} (\bar{p}^2 / p_0^2) \tag{5}$$

図10は流量係数  $\phi = 0.20$  における騒音の予測値と実験値の比較をしたものである。実験では、オーバーオールの騒音レベルから430Hzの離散周波数騒音を差し引いている。図よりいずれの羽根車においても、予測値は実験値と3 dB以内でよく合っていることがわかる。

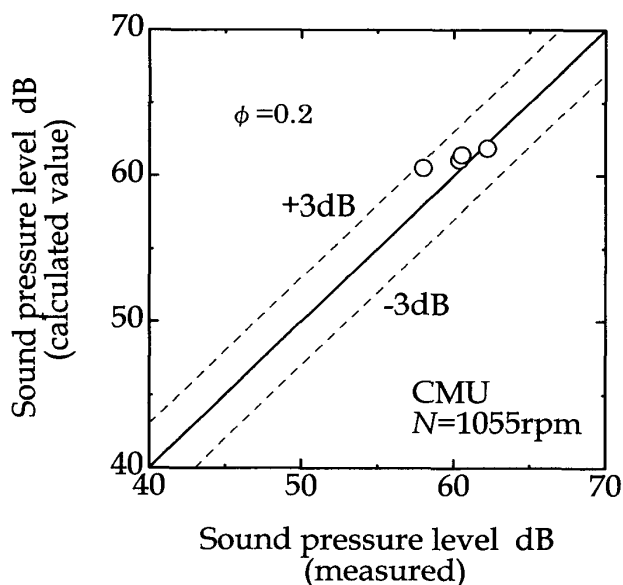


Fig. 10 Comparison of predicted and measured sound pressure level of turbulent noise

### 6. 比騒音の入口角と出口角による影響の評価

比騒音により羽根車の評価をする場合、相似則によると羽根車周速度の影響は、騒音レベルの式(3)から6乗に関係している。一方、比騒音レベルの中の流量と圧力の2乗の項は、式(1)からわかるように速度の5乗に関係している。したがって、羽根車が大型になるか回転数が高く周速度が増加すると比騒音レベルも増加して騒音面では不利である。一方で、同一の周速度となるように回転数と寸法を変化させた場合は、比騒音レベルの中の騒音は寸法に比例しており、流量と圧力の2乗の積の項は、寸法の2乗に比例している。したがって、同一の周速度すなわち同じ圧力を得る場合には、小型で高回転数のものより、大型で低回転数のものが、騒音面では有利であるといえる。

このような大まかな定性的評価は従来から可能で羽根車の設計で指針となっていたのであるが、個々の設計パラメータによる騒音への影響はよくわかっていない。そこで、流体力学的性能の評価を1次元流動解析により行ない、上述の騒音予測の関係を元に、比騒音レベルの算出をした。なお、口金すきまからの流れの影響については、その予旋回成分も考慮し、その結果を羽根車の入口角度と出口角度による性能への影響を評価した。以下では流量係数は  $\phi = 0.2$  の設計流量について示した。

図11は羽根入口角  $\gamma_1$  と回転数による比騒音レベル及び静圧への影響を示している。縦軸は回転数、横軸は羽根入口角、グラデーションは静圧ヘッド(mmAq)を示し、等高線は比騒音レベルである。なお、羽根出口角は  $39^\circ$  とした。比騒音の曲線が折れ曲がっているのは流れの前縁はく離が正圧面で起こる場合と負圧面側で起こる場合の違いによるものである。図より、静圧

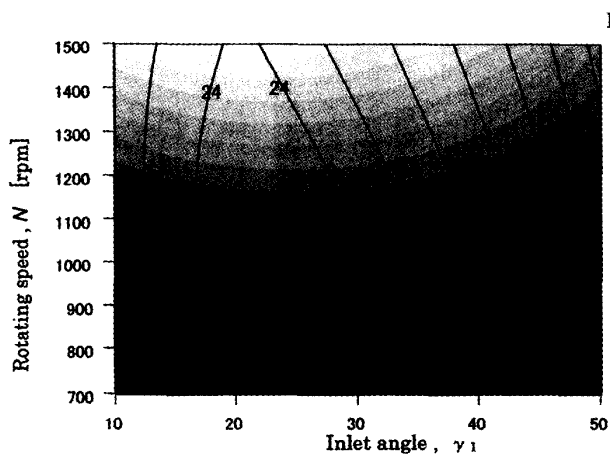


Fig. 11 Contour map of the specific noise level and static pressure with inlet angle and rotating speed

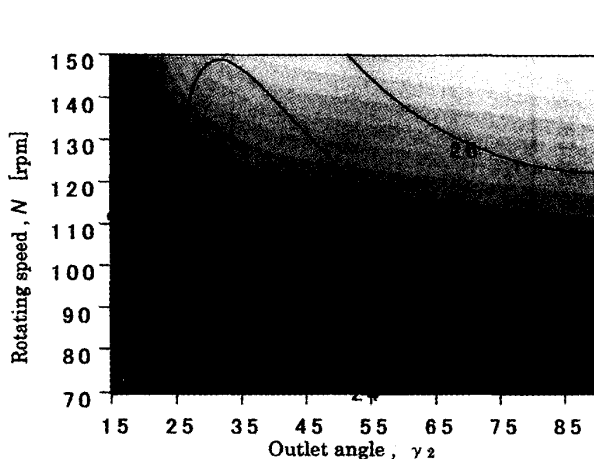


Fig. 12 Contour map of specific noise level and pressure with outlet angle and rotation speed

上昇量は同一回転数では羽根入口角度が小さいほうが大きくなることわかる。また、比騒音は回転数が小さいときには入口角が大きく、回転数の増加とともにわずかではあるが、小さい角度に低いレベルが続いているように見える。この図より、この羽根車の騒音面での最適な条件は、入口角が $26^\circ$ で、 $1000\text{rpm}$ にある。この場合の静圧はおよそ $8\text{mmAq}$ であり、羽根車の設計条件 $13\text{mmAq}$ よりだいぶ低くなっている。ただ、この図によると比騒音の変化の傾向は、回転数依存性が少なく、 $1100\text{rpm}$ 程度まで上げた場合に静圧の条件は満足し、比騒音のレベルもあまり変化しないことがわかる。

図12に羽根出口角 $\gamma_2$ の変化による比騒音レベル及び静圧の計算結果を示す。縦軸は回転数、横軸は羽根出口角、グラデーションは静圧を示し、等高線は比騒音レベルである。静圧上昇量は、羽根出口角が小さい場合は回転数の変化に鈍感であるが、大きくなると回転数に対して敏感になる傾向が見られる。また、出口角の影響は、回転数とは逆に出口角が小さい場合に敏感で、大きくなると鈍感になる傾向がある。一方比騒音では、もっとも低い領域が出口角 $35^\circ$ から $40^\circ$ にあり、回転数が $850\text{rpm}$ となっている。この場合静圧ヘッドは $6\text{mmAq}$ とだいぶ低く、設計条件とは異なっている。また、出口角度が $25^\circ$ 以上の領域では、入口角度と比べると比騒音の回転数、角度による影響が小さくなっている。

図13は、羽根車入口角度と出口角度に対する比騒音レベルおよび静圧の計算結果を示している。縦軸は入口角、横軸は出口角である。等高線は比騒音レベルをグラデーションは静圧の分布である。なお静圧の分布は図11および図12の参考と同じく、濃度が薄くなるほ

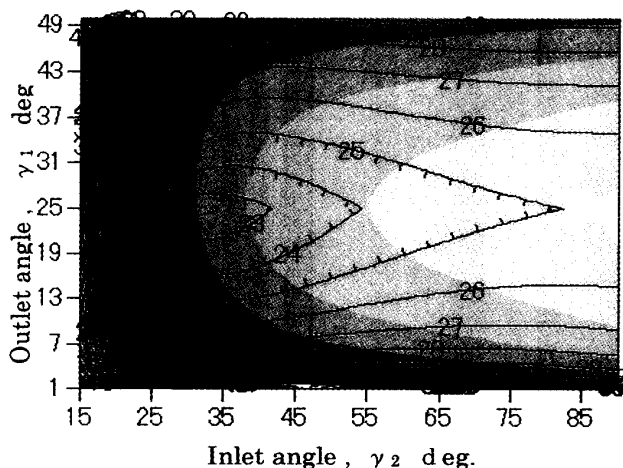


Fig. 13 Contour map of specific noise level and pressure with outlet angle and inlet angle

ど高い圧力になっている。図より、出口角が大きくなるにつれて静圧は大きくなる傾向にある。一方、入口角度は設計角度 $25^\circ$ 付近がもっとも良好であるが、それから大きくなっても小さくなくてもある程度はなれると急激に静圧が低下する。比騒音レベルは入口角度と出口角度について最適などところが見られる。また、静圧とは同様に出口角度による変化は小さいが入口角度の変化による影響は大きく出ている。ただ、出口角度が $30^\circ$ 程度以下になると比騒音レベルは著しく増加している。

以上のように、騒音の予測式を元に準1次元流体力学性能評価を用いることで、羽根車の騒音面での性能評価が可能であり、設計する上で非常に有益である。

## 6. 結論

スクロールレス遠心送風機の流体力学的特性と騒音の特性へ及ぼす羽根の入口角度と出口角度による影響を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 羽根車の流入条件に及ぼす口金隙間からの漏れ流れの影響は大きく、最適な流入条件はもれ流れの予旋回を考慮して、従来より大きくする必要がある。
- (2) 流体力学的特性の面では、羽根入口角度は小さいほうが良好であり、羽根車出口角の影響は、角度が大きいくほど良好であるが、本研究の範囲では出口角が $35^\circ$ を過ぎるとかなり小さい。
- (3) 騒音面で良好な羽根入口角度は、本研究の範囲では $20^\circ \sim 30^\circ$ にあり、回転数の増加とともに角度が小さくなる傾向にある。また、出口角度も最適値は $30^\circ \sim 40^\circ$ にあり、回転数の増加とともに角度がわずかに小さくなる傾向にある。
- (4) 騒音面で見たとときの入口角度と出口角度の相互の影響は入口角度の方が大きい。
- (5) 提案したチャートを評価することにより、最適の設計条件が求まるばかりでなく、各パラメータによる影響の程度も明確となり、騒音設計の有効な手段となり得ることがわかった。

## 文献

- (1) F.S. Howes and R.R. Real, Noise Origin, Power and Spectra of Ducted Centrifugal Fans, J. ASA., 30,714-720 (1958)
- (2) T.F.W. Embleton, Experimental Study of Noise Reduction in Centrifugal Blowers, J. ASA., 35,700-705 (1963)
- (3) 森主憲, 多翼ファンの騒音発生源, 機論, 57-543B, 3837-3844 (1991)

- (4) 児玉好雄ほか2名, 多翼ラジアルファンの乱流騒音の流量特性とその音圧レベル予測, ターボ機械, 25-2, 65-72 (1997)
- (5) 児玉好雄ほか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, 53-492B, 2514-2520 (1987).
- (6) 児玉好雄ほか3名, インデューサ付き遠心ファンの空力特性と騒音に関する研究, 長崎大学工学部研究報告, 32-58,47-56 (2002)
- (7) 生井, 井上, ターボ送風機と圧縮機, コロナ社, p193-222 (1988).