

## 第5章 インデューサ付き遠心ファンの騒音特性

### 5.1 まえがき

遠心羽根車のブレード面での流動模様は、ブレード入口の剥離によりブレード面に沿わない流れとなっていると考えられる。インデューサ付き遠心ファンでは、このブレード入口の流れを改善する目的で、羽根車の入口部にインデューサを設置している。

この章では、まず本節で騒音特性に関与する諸因子について述べる。次に、2節で、騒音特性に及ぼすインデューサの有無の影響を実験的に明らかにするとともにこれらの特性と内部流動との関係について検討している。3節では、遠心ファンの出口角が騒音特性に及ぼす影響について数値計算結果を示し、実験結果について考察を加えている。4節では、前面シュラウドとベルマウスとの間で発生する漏れの影響が騒音に及ぼす影響について考察した。5節では、遠心ファンの騒音特性を、仮定したブレード後端の渦幅モデルより予測する方法について述べ、実測値と比較した結果を考察する。

まず、インデューサ付き遠心ファンの騒音特性を実験的にあきらかにするために、以下に示す因子に着目し実験を行なった。

- (a) インデューサの有無について
- (b) 羽根出口角度の影響
- (c) 前面シュラウドとベルマウスの形状

これらの諸因子に対して、羽根車直径 360mm、内径 210mm、翼枚数 11 枚、出口角度 39°、入口角度 29° を基準の羽根車とした。

### 5.2 インデューサの影響

#### (1) 騒音の流量特性

図 5-1 にスクロールケーシングに羽根車を組み込んだ場合の騒音レベルと比騒音レベルの流量特性を示す。騒音は A 特性であり、図中の白塗り記号は BWI2939 を示し、黒塗り記号は BW2939 を示す。また、○印と●印は騒音レベル (SPL)、△印と▲印は比騒音レベル ( $K_s$ ) である。音圧レベルは騒音計の A 特性 (聴感補正を施したレベル) を用いて示している。比騒音レベルは音圧レベルに流量と圧力を加味したもので送風機の良否を表し、この値が小さいほど良好な送風機とされている。比騒音レベルは次式で定義される。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10} (QP_s^2) + 2 \quad (5-1)$$

ここで、SPL は音圧レベル (dB)、 $Q$  は流量 ( $m^3/s$ )、 $P_s$  には静圧 (Pa) である。音圧レベルは流量係数が 0.15 付近までは BWI2939 が BW2939 よりも低い値をとっている。また 0.15 以上の流量係数においては逆転し BW2939 の方が騒音レベルが低くなる。BW2939 が流量係数が変化しても騒音レベルがほとんど変化しないのに対して BWI2939 は流量係数の変

化に伴って変化する。これらからインデューサを設けた場合流量の変化による音圧レベルの変化に注意すべきである。

また第4章2節で述べたとおりインデューサを設けることで圧力が上昇するため、比騒音レベルで BWI2939 と BW2939 を比較した場合は、ほぼ全域で BWI2939 が低くなり音圧レベルで比較した場合よりも両者の差は広がる傾向にある。

これらはクリーンモジュールユニット (CMU) に各羽根車を組み込んだ場合も同様の結果が得られる (図5-2 参照)。

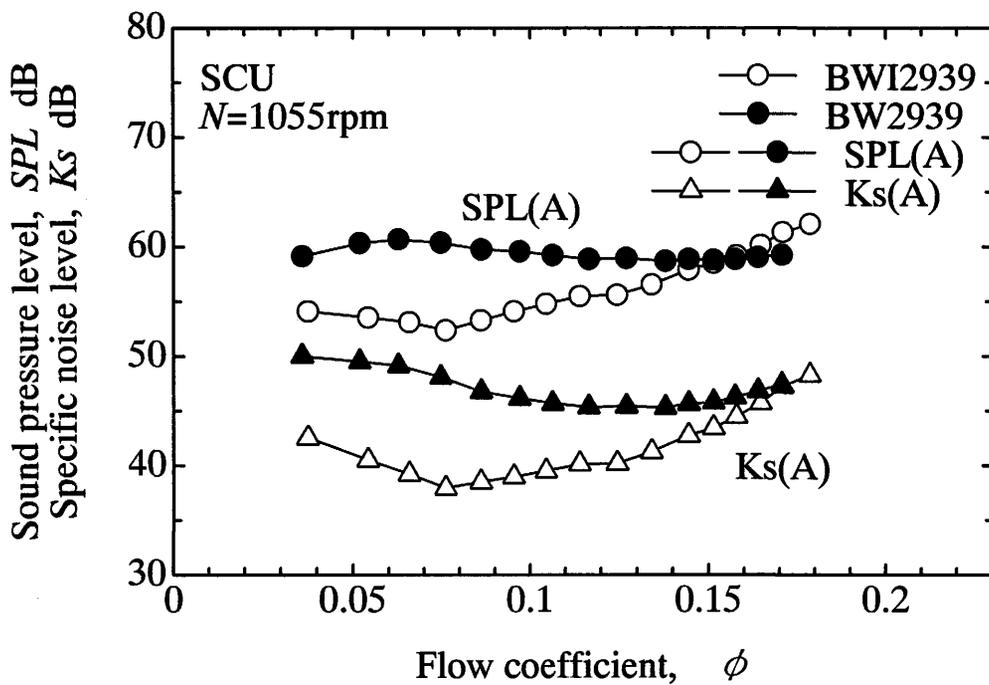


図5-1 音圧レベルと比騒音レベルの流量特性 (SCU)

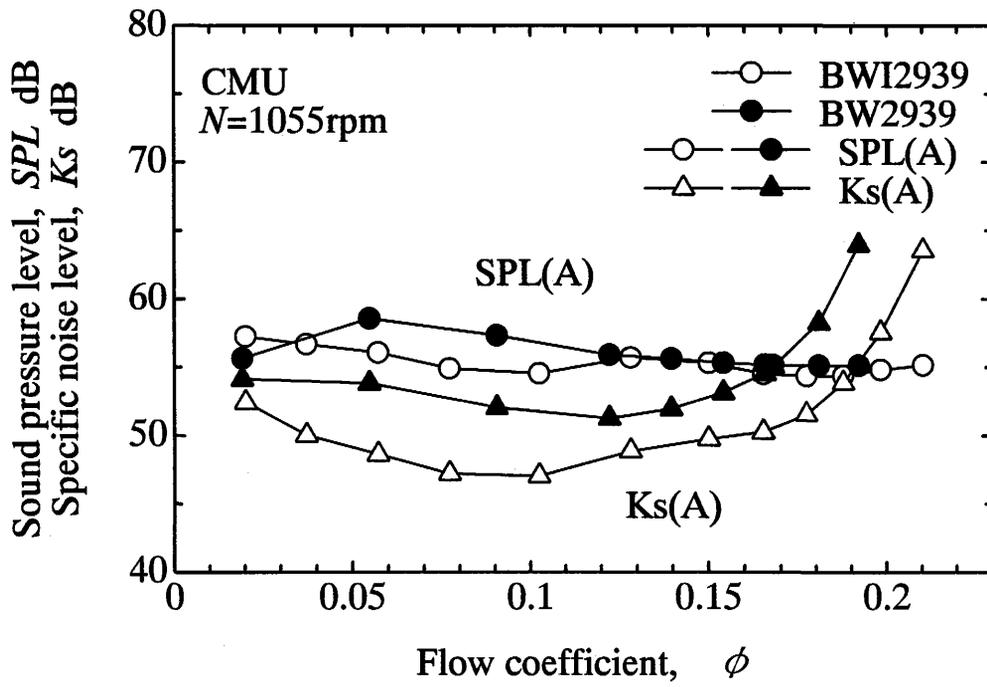


図 5-2 音圧レベルと比騒音レベルの流量特性 (CMU)

## (2) 羽根出口における流動様相 (実測値による解析)

図 5-3 に CMU における羽根車出口の相対速度のスパン方向分布を示す。図中の白塗り記号は BWI2939、黒塗り記号は BW2939 の結果である。インデューサを設けることによりスパン下部では相対速度は上昇し、スパン上部では低下している。平均的に見ると同程度であると思われる。また、この相対速度は音圧レベルに 6 乗で効いてくるが、インデューサによる相対速度の差異があまりないことから騒音に及ぼす影響は少ないと思われる。

図 5-4 に CMU における羽根車出口の速度変動波形の一例を示す。縦軸は電圧、横軸に時間をとっている。電圧は熱線流速計により測定した流速を示す。測定は絶対座標系で行ったため凸となった部分が後流を示し、図中に示す  $D_0$  が絶対座標系における後流の幅に対応する。これを相対座標系における後流の幅に直した場合<sup>(22)</sup> のスパン方向分布を図 5-5 に示す。縦軸は後流の幅、横軸はスパン方向距離をとり、図中の白塗り記号は BWI2939、黒塗り記号は BW2939 の結果を示す。これらの図からスパン上部の  $z/h_2$  が 0.8 以上では後流の幅はインデューサ付きが若干大きい、 $z/h_2$  が 0.8 以下ではインデューサ付きがインデューサ無しに比べてかなり狭くなっている。この後流の幅は騒音に影響を及ぼすことから、この値が大きいほど音圧レベルは高くなる。インデューサ付きは、 $z/h_2$  が 0.3~0.7 の領域で後流の幅がかなり狭くなったことにより騒音レベルが若干下がったものと考えられる。

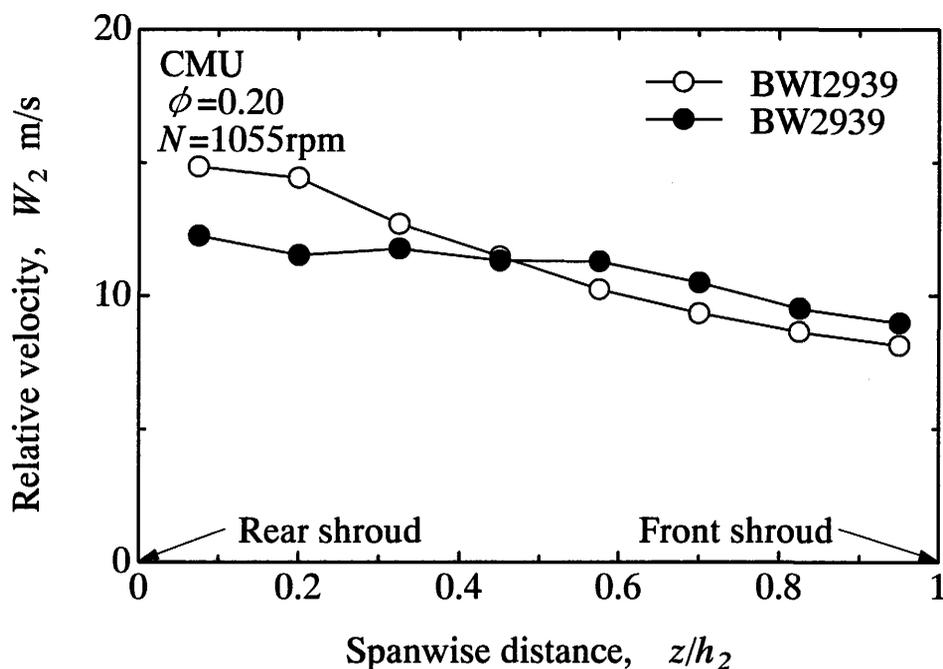


図 5-3 羽根車出口相対速度のスパン方向分布

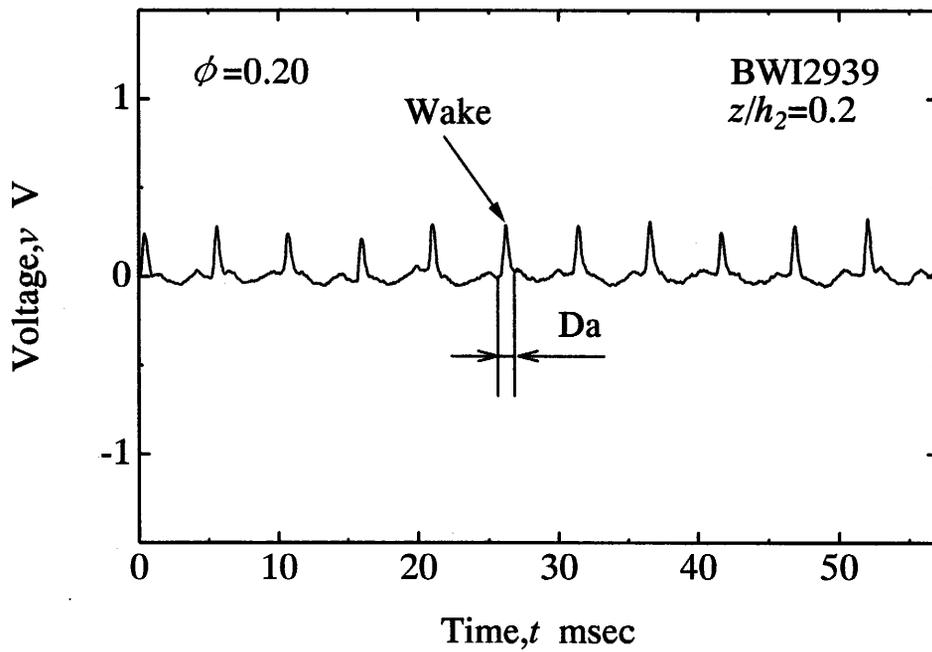


図 5-4 絶対座標系における速度変動波形

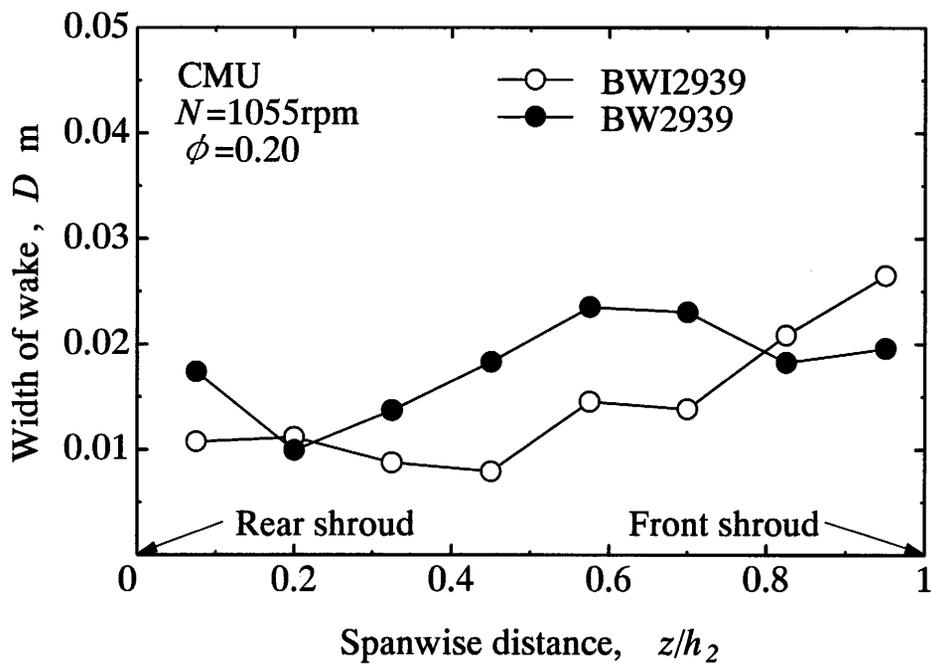


図 5-5 後流の幅のスパン方向分布

### (3) 騒音スペクトル分布

図 5-6 に CMU に BWI2939 と BW2939 の両羽根車を組み込んだ場合の騒音のスペクトル分布を示す。縦軸に音圧レベル、横軸に周波数をとっている。太線は BWI2939 を、細線は BW2939 を示し、凡例と共に L 特性と A 特性におけるオーバーオール値を示す。図中の 193Hz のピークは翼通過周波数であるため 1 次の高調波である。423Hz のピークはモータに起因する振動から引き起こされた騒音であると考えられる。また、1000~3000Hz のなだらかな騒音の山も、その周波数から全帯域騒音に与える影響が大きいと考えられる。

BWI2939 と BW2939 を比較するとオーバーオール値で BWI2939 の方が若干低い。これは基本周波数 ( $n=1$ ) のピークとその周辺のレベルが低下したことに起因していると考えられる。

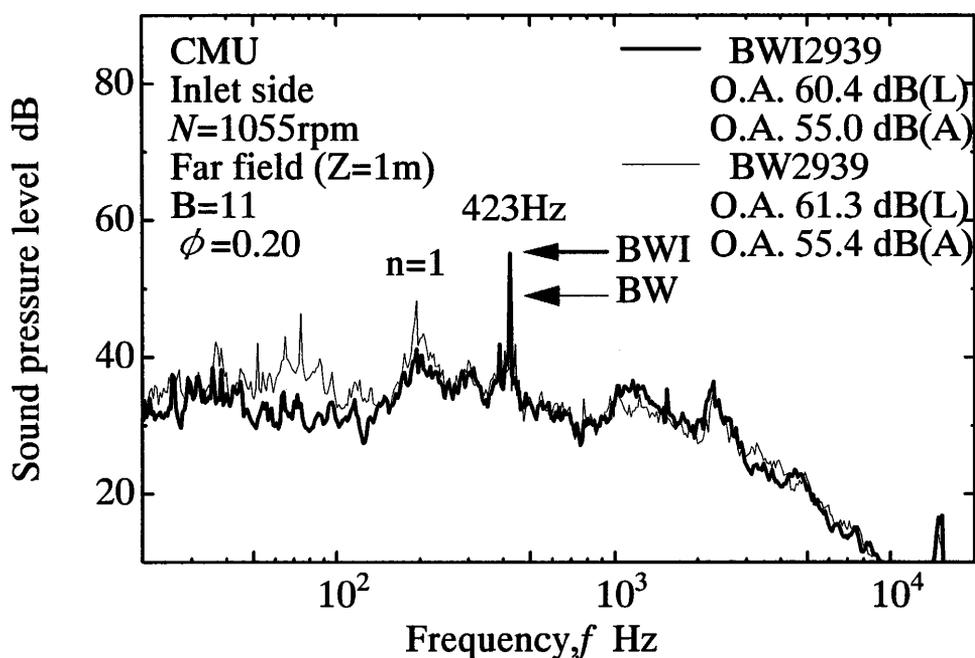


図 5-6 騒音のスペクトル分布

### 5. 3 羽根車出口角の影響

第4章2節の結果よりインデューサを付ける事により空力特性が改善されることが分かった。ここでは、インデューサ付き羽根車の出口角を変化させ、出口角が騒音に与える影響について考察する。実験で用いた羽根車は、BWI2923( $\gamma_2=23^\circ$ )、BWI2939( $\gamma_2=39^\circ$ )、BWI2965( $\gamma_2=65^\circ$ )、RWI2990( $\gamma_2=90^\circ$ )の四種類である

#### (1) 騒音特性

図5-7は $\phi=0.2$ のときの $\gamma_2=23^\circ$ (緑)、 $\gamma_2=39^\circ$ (黒)、 $\gamma_2=65^\circ$ (赤)、 $\gamma_2=90^\circ$ (青)の四種類の羽根車の騒音スペクトル分布を示したものである。横軸は周波数、縦軸は音圧レベルである。前述したように $n=1$ は翼通過周波数を、周波数 $f=423\text{Hz}$ はモーターの振動に起因する音である。図をみると、ほぼ全域で出口角の増加にともない、音圧レベルが上昇しているのが分かる。また $n=1$ の音圧レベルが出口角の増加にともない増加しているのは、羽根の翼負荷が大きくなるためだと考えられる。

四つの羽根車はそれぞれ流量が異なっているためそのまま音圧レベルの比較はできない、そのため音圧レベルに圧力と流量を加味した比騒音レベルで比較してみる。比騒音レベル $K_S$ は式(5-1)を用いて算出した。図5-8は出口角による音圧レベルと比騒音レベルの影響を示したものである。横軸に出口角、縦軸に音圧レベルと比騒音レベルをとって表している。比騒音レベルで比較すると、 $\gamma_2=23^\circ$ が一番高く、つづいて $\gamma_2=39^\circ$ 、 $\gamma_2=90^\circ$ 、 $\gamma_2=65^\circ$ の順に小さくなっている。 $\gamma_2=23^\circ$ が一番高くなったのは、流れは翼にそっているものの出口角が小さいためオイラーヘッドが小さいので仕事その他の羽根車より小さくなっているためである。一方で、 $\gamma_2=65^\circ$ が比騒音レベルが一番小さくなったことから騒音を加味したファンの特性からはこの出口角が一番良いといえる。

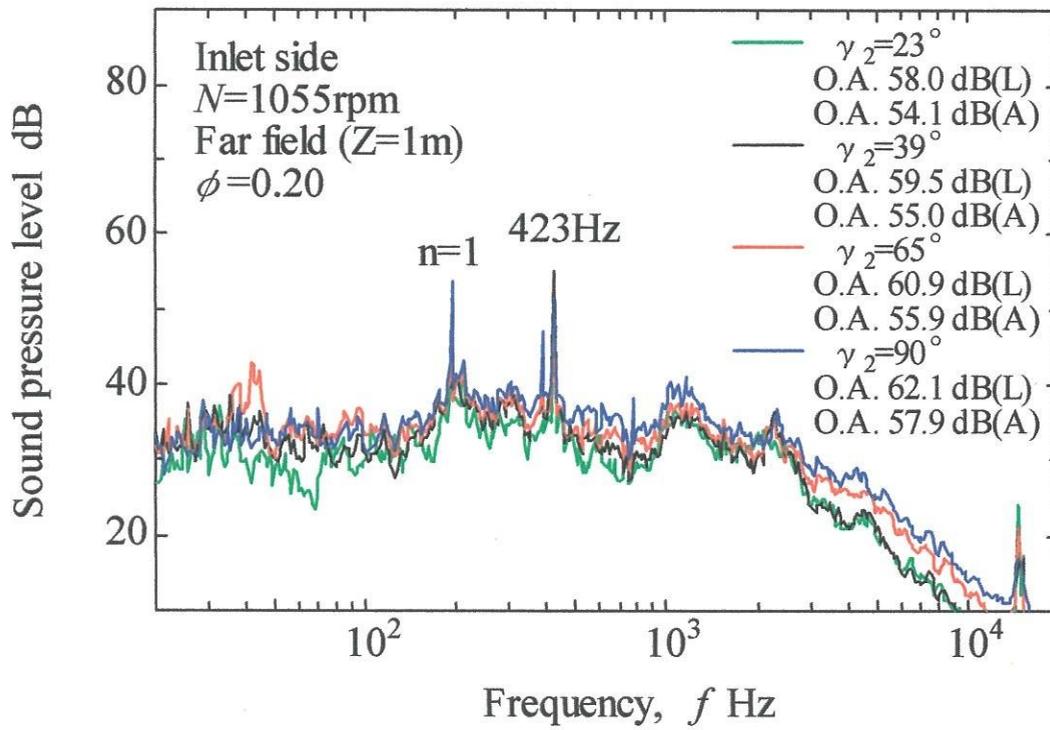


図 5-7 騒音のスペクトル分布

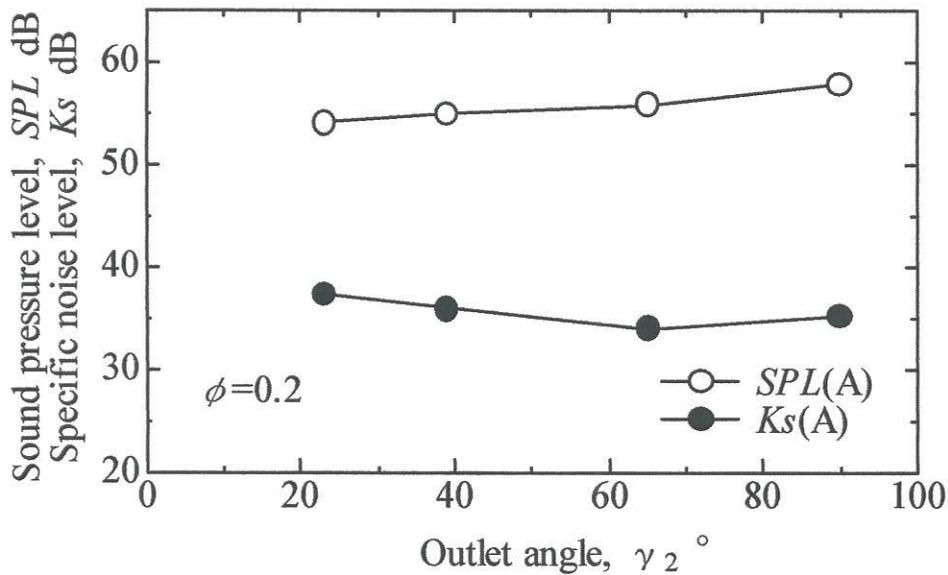


図 5-8 出口角が音圧レベルと比騒音レベルに及ぼす影響

## (2) 羽根車出口における流動様相 (実測値)

ここでは4つの羽根車の羽根車出口の流動様相について考察する。図中の $\Delta$ は $\gamma_2=23^\circ$ 、 $\circ$ は $\gamma_2=39^\circ$ 、 $\square$ は $\gamma_2=65^\circ$ 、 $\nabla$ は $\gamma_2=90^\circ$ を表している。

図5-9に相対速度のスパン方向分布を示す。横軸にスパン方向距離、縦軸に相対速度をとって表している。相対速度はすべての羽根車でスパン下部からスパン上部にわたって減少する傾向は一致している。 $\gamma_2=90^\circ$ のときが一番小さくなっているのは速度三角形より容易に予測できる。騒音は相対速度の6乗で効いてくることを考慮すれば出口角は大きいほうが騒音は低減されると考えられる。

図5-10は後流の幅のスパン方向分布を示したものである。横軸はスパン方向距離、縦軸は後流の幅である。すべての羽根車でスパン上部に行くにつれて後流の幅が増加している。また、 $\gamma_2=39^\circ$ までは比較的翼に沿って流れていると考えられ、 $\gamma_2=65^\circ$ 以上になるとほとんど翼に沿わなくなっていると考えられる。よって、後流の幅に起因する騒音は出口角を小さくしたほうが低減できる。

即ち、図5-9より、 $\gamma_2$ が大きくなるほうが騒音を低下させることができる。一方で、図5-10によると、 $\gamma_2$ が小さいほうが騒音を低下させることができる。実際には、相対速度と後流の幅の相互作用によって騒音は決まるので図5-8に示すように出口角の増加するにつれてわずかに騒音は増加する。

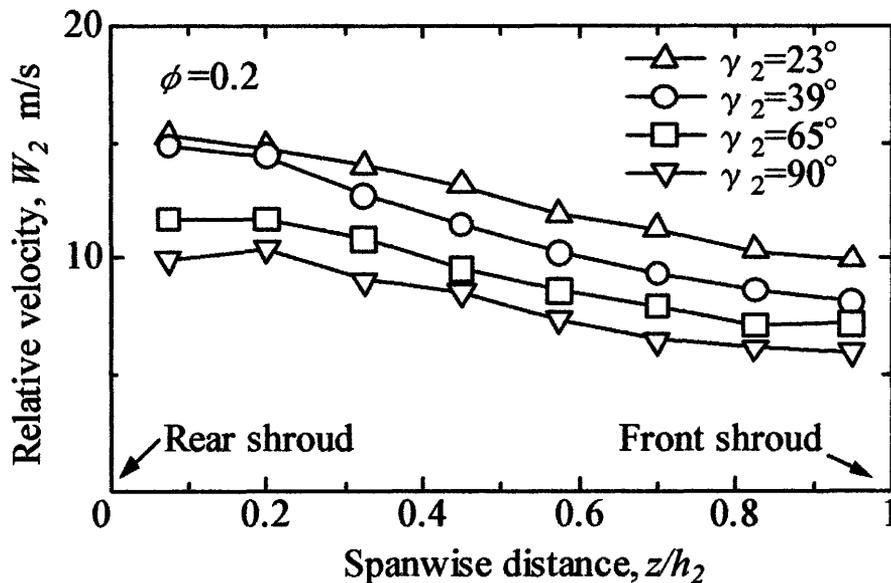


図5-9 相対速度のスパン方向分布

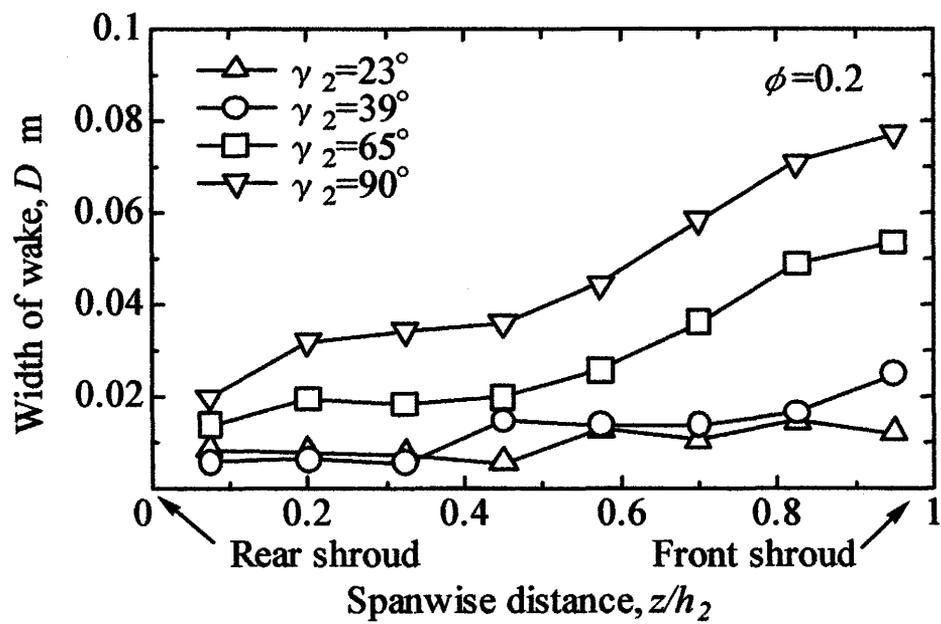


図 5-10 後流の幅のスパン方向分布

## 5. 4 シュラウド隙間の影響

遠心送風機においてはベルマウスと羽根車シュラウド間において羽根車出口から羽根車入口へ流れる漏れ流れが存在する。この漏れ流れを防止する方法として図 3-6 ような方法を取り、その場合の羽根車出口の流動様相と騒音レベルについて比較検討した。

### (1) 騒音特性

図 5-11 に CMU における騒音スペクトル分布を示す。縦軸は音圧レベル、横軸は周波数で、図中の細線は改良前、太線は改良後の結果である。オーバーオール値の L 特性はほとんど同じだが A 特性では 1dB ほど低下している。全体的に乱流騒音が増加しているように見えるが、これは、漏れ防止により羽根車を通る流れが減少し、相対流入角が減少し、結果として流入角が羽根の入口角からずれたため流れが翼面に沿わず後流の幅が増加し、乱流騒音の増加になったと考えられる。またスペクトル分布をみると 2000~3000Hz 付近にわたってのピークが減少していることがわかる。よってこの 2000~3000Hz 付近の騒音のピークは漏れ流れによって引き起こされていると考えられる。

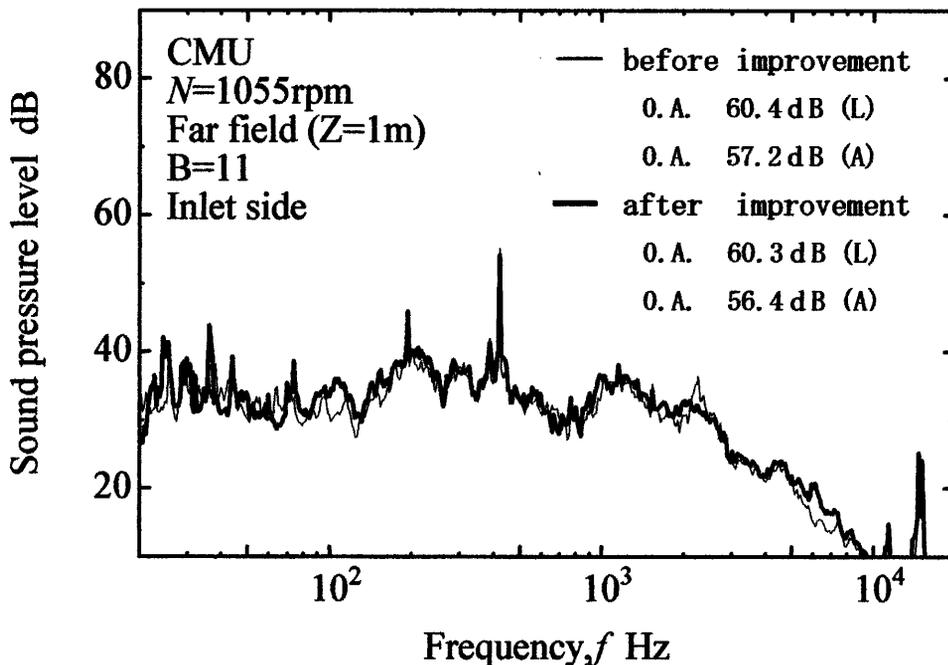


図 5-11 騒音のスペクトル分布

## 5. 5 全帯域音圧レベルの予測

### 5.5.1 まえがき

遠心羽根車の入口部にインデューサを設置することで羽根入口の流れを改善させて空力特性改善する試みがなされている。

この章では、遠心ファンの騒音特性をブレード後端の渦幅モデルより予測する方法について述べ、実測値と比較した結果を考察する。

遠心羽根車の入口にインデューサを設置したインデューサ付き遠心ファンは、インデューサ無しの従来の遠心ファンに比較して音圧レベルはほぼ同等であるが、高い静圧が得られる。このためインデューサ付き遠心ファンはインデューサ無し遠心ファンに比べて約7%のファン効率の上昇と、約7 dBの比騒音レベルの低下を可能にした。ここでは、遠心送風機から発生する騒音は主として乱流騒音である。

本節では、後退翼を有するインデューサ付き遠心ファンの乱流騒音に關与するパラメータの一つである後流の幅の予測方法を提案し、これを用いて全帯域乱流騒音のL特性とA特性の予測を行なった。

### 5.5.2 後流の幅の予測

式(1-16)に示すように乱流騒音を予測するためには相対座標系における後流の幅 $D$ の算定が必要である。後流の幅を得る方法として、図5-4に示すような後流の速度変動波形から求めること自体簡単ではない。またこの方法で後流の幅を計算することは非常に煩雑である。これを簡単に決定できれば、音圧レベルの予測にあたっては好都合である。そこで後流の幅 $D$ を次のように近似的に算出する方法を試みた。

図5-13は遠心ファン内の流動状態の概要を示したものである。流れは負圧面側では設計入口角 $\gamma_1$ で流入し、翼前縁の点Aから通路を通過して円弧状に流れ、翼後縁を通る円との交点Bを通過して後縁より流出角 $\beta_2$ で流出する。一方、圧力面側では、流れは翼面にそって流入し、点Cから圧力面に沿った角度で羽根車の外側に流出すると仮定する。 $\gamma_1$ と $\beta_2$ を与えれば、それを満足する円弧はただ一つ定まり、半径 $r$ と点Eが決定される。点Cにおいて接線を引き、これに垂線を立てる。この垂線と圧力面側の流れと交わる点をFとすれば、線分CFが求める後流の幅 $D$ であると定義した。

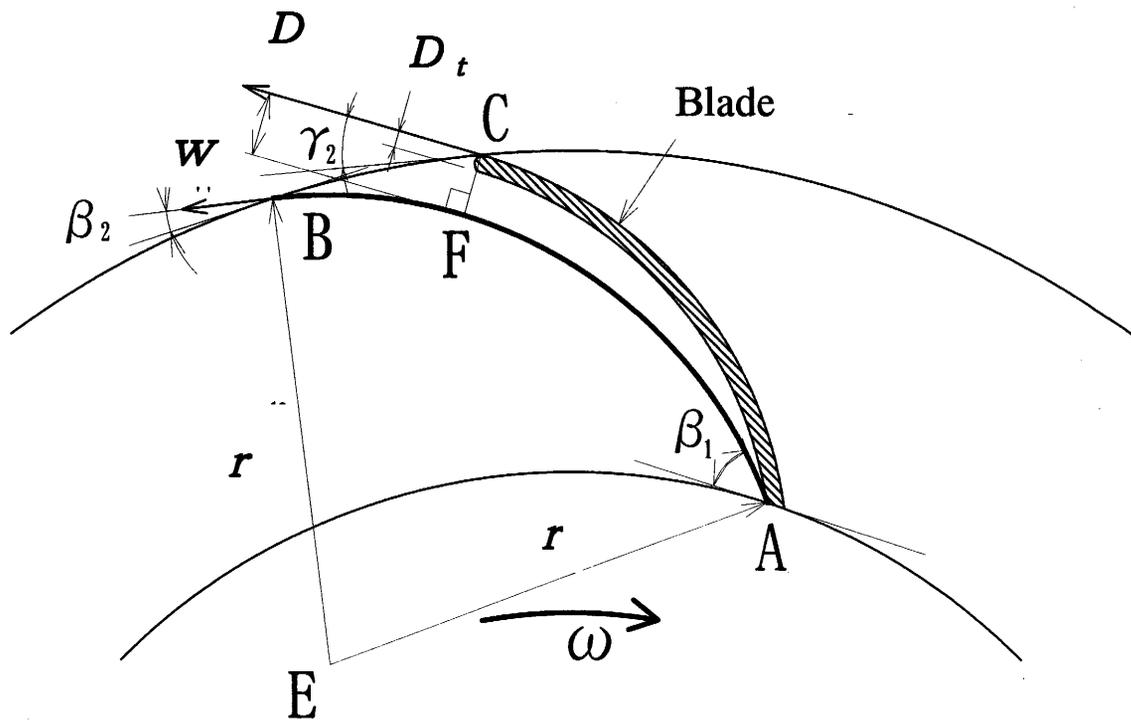


図 5-13 後流幅の定義

### 5.5.3 乱流騒音の予測

図 5-14 は、ブレードの入口角が  $29^\circ$  一定で、出口角を  $23^\circ$ 、 $39^\circ$ 、 $65^\circ$ 、 $90^\circ$  と変化させた場合の、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なったものである。45° の太い実線は実測値と予測値とが一致した点を結んだ線である。

全帯域音圧レベルの実験値と予測値とは L 特性 (○印)、A 特性 (●印) とともにほぼ  $\pm 3$  dB 程度の精度で一致することがわかる。

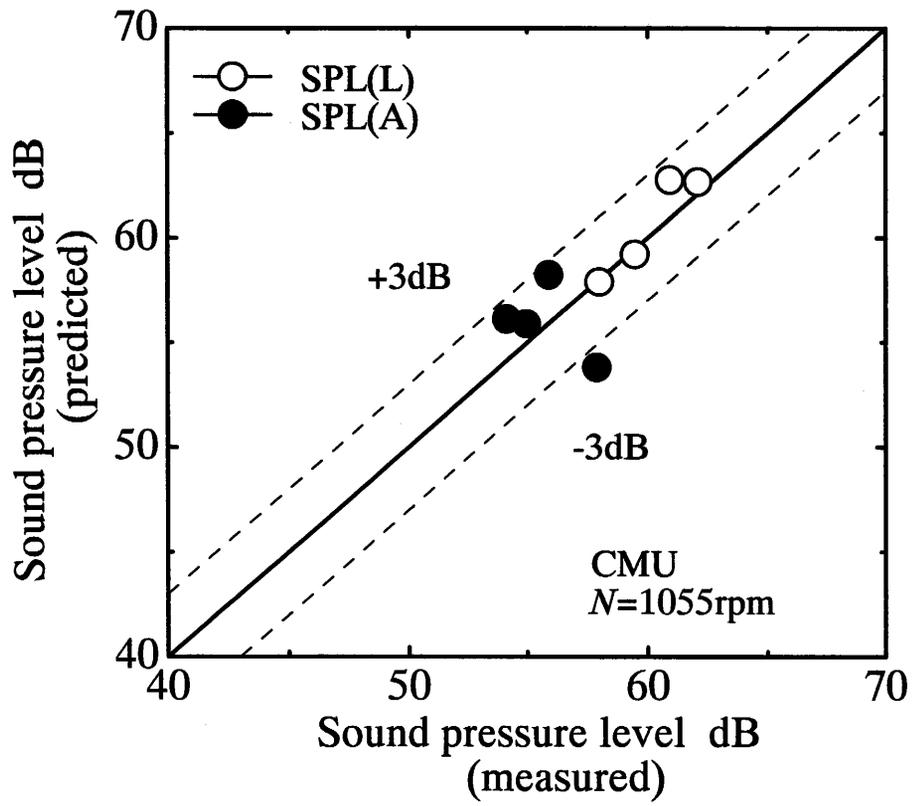


図 5-14 実測値と予測値の比較

## 5. 6 第5章のまとめ

- (1) 遠心ファンにインデューサをつけると音圧レベルは流量係数が 0.15 付近までは BWI2939 が BW2939 よりも低い値をとっている。また 0.15 以上の流量係数においては逆転し BW2939 の方が騒音レベルが低くなる。BW2939 が流量係数が変化しても騒音レベルがほとんど変化しないのに対して BWI2939 は流量係数の変化に伴って変化する。これらからインデューサを設けた場合流量の変化による音圧レベルの変化に注意すべきである。
- (2) またインデューサを設けることで圧力が上昇するため、比騒音レベルで BWI2939 と BW2939 を比較した場合は、ほぼ全域で BWI2939 が低くなり音圧レベルで比較した場合よりも両者の差は広がる傾向にある。このことから、インデューサをつけることは有効である。
- (3) 相対速度のスパン方向分布は、すべての羽根車でスパン下部からスパン上部にわたって減少するという傾向は一致している。 $r_2=90^\circ$  のときが一番相対速度が小さくなっているのは速度三角形より容易に予測できる。騒音は相対速度の 6 乗で効いてくることを考慮すれば出口角は大きいほうが相対速度に起因する騒音は低減されると考えられる。一方、後流の幅のスパン方向分布は、すべての羽根車でスパン上部にいくにつれて後流の幅が増加している。また、出口角  $39^\circ$  までは比較的翼に沿って流れていると考えられ、 $r_2=65^\circ$  以上になるとほとんど翼に沿わなくなっていると考えられる。よって、後流の幅に起因する騒音は出口角を小さくした方が低減できる。

実際には、相対速度と後流の幅の相互作用によって騒音は決まるが実験結果からは、出口角の増加するにつれてわずかに騒音は増加している。したがって、騒音からみた出口角の最適値は、 $39^\circ$  から  $65^\circ$  の範囲にある。
- (4) ベルマウスのすきまからの漏れは、2000Hz から 3000Hz の高周波の騒音を大きくさせる。漏れを防止すると、この乱流騒音を低減することができる。
- (5) 後退翼を有するインデューサ付き遠心ファンの乱流騒音に関与するパラメータの一つである後流の幅を、設計入口角と相対流出角から近似的に算出する方法で、全帯域乱流騒音の L 特性と A 特性の予測を行なうと、実験値と予測値とは、L 特性、A 特性ともにほぼ  $\pm 3$  dB 程度の精度で一致することがわかった。