

翼付き多層円板ファンの流体力学的特性と騒音に関する実験的研究* (第1報, 翼の有無, 円板間隔, 翼取付位置の影響)

濱田 靖夫*¹, 児玉好雄*¹, 林 秀千人*¹
深野 徹*², 原賀久人*³, 赤松克志*³

Aerodynamic and Noise Characteristics of Bladed Multiple-Disk Fans (1st Report, Effects of the Existence of Blades, the Gap of Disks and the Location of Blades)

Yasuo HAMADA, Yoshio KODAMA, Hidechito HAYASHI,
Tohru FUKANO, Hisato HARAGA and Katushi AKAMATSU

An experimental study of both noise and aerodynamic characteristics of a multiple-disk fan was carried out with respect to the effects of three parameters: (1) the existence of blades, (2) the gap of disks, (3) the location of blades. It was shown that the bladed multiple-disk fan exhibited higher pressure head and the fan efficiency than the non-bladed multiple-disk fan, though the noise generated from the former was higher by 3 to 6 dB than that of the latter. The fan efficiency and noise increased proportional to the gap of disks, and it was experimentally shown that a 0.7 mm gap gave the lowest specific noise level among the impellers tested in this experiment. Concerning the location of blade, when the distance between the trailing edge of the blade and the cutoff was larger than 13 mm, the discrete frequency noise generated by the interference between the blade and the cutoff became lower than the level of turbulent noise. We also obtained the experimental result that the multiple-disk fan with a 13 mm distance between the blade and the cutoff had the lowest specific noise level.

Key Words: Fluid Machine, Aerodynamic Characteristics, Fan, Turbulent Noise, Interference Noise

1. 緒 言

円板ファンは薄いドーナツ状の円板を回転軸方向に狭い間隔をおいて多数重ね合わせたものを羽根車としたファンで, 回転円板のせん断力による回転運動とそれによって誘起される遠心力により流体に動力を伝えるものである。入口レイノルズ数が2000以下の場合には層流ファンとも呼ばれている。この種のファンは円板間隔が狭く, 円板間での境界層の発達を制約を受けることや離れが生じ難いため, 通常のファンに比べ騒音が低く, 低騒音の流量域も広いことが期待されている。原田らはAllenの騒音に関する経験式を用いて通常のファンと円板ファンとの比較を行い, 層流ファンのほうが騒音は低いことを示している⁽¹⁾。また, Merryらは圧力上昇, 回転数, 直径のほぼ等しい遠心ファンと層流ファンの騒音を比較した場合, 後者が前者より全周波数帯域にわたって騒音が低いことを報告している⁽²⁾⁽³⁾。児玉らは層流ファンの揚程に関する式を誘導し, この式を用いれば精度よく揚程が予測でき

ることを示した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また, 騒音に関して層流ファンは市販されている遠心ファンに比べ低騒音の流量域が広く, かつ比騒音レベルも低く, 良好な特性を有していることを明らかにしている⁽⁶⁾。

しかしながら, 空力特性の面では層流ファンは全圧効率が低く, また流量が少ないという欠点がある。このことが実用化に大きな障害となっているが, これまでこれらの問題を解決するための研究はほとんど行われていない。上述の理由に立脚して, 著者らは騒音レベルを上げることなく, 大幅な全圧効率の上昇および流量の増加を図るために, 円板ファンの円板と円板の間にスパンのきわめて短い翼を取付けたファンを検討した。このファンを翼付き多層円板ファンと名付ける。本報では翼の有無, 円板間隔および翼の取付位置が空力特性や発生騒音に及ぼす影響を羽根車まわりの流動様相と関連付けて議論する。

2. おもな記号

A : 無次元流量 $= q\delta_D/\nu R^2$
 BB : 2枚の円板間の翼枚数
 BD : 円板枚数
 D_i : 円板厚み mm
 f : 周波数 Hz

* 原稿受付 平成5年3月12日。

¹ 正員, 長崎大学工学部(〒852 長崎市文教町1-14)。

² 正員, 九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

³ 東陶機器商品研究所(〒253 茅ヶ崎市本村2-8-1)。

図2はスクロールケーシングを示したものである。広がり形状は対数らせ線、広がり角 θ_c は 3.6° とした。この角度は風量が多い領域でも性能低下が少ない角度として選定したものである⁽¹⁰⁾。図2中のM1~M4は羽根車出口の流動様相の測定場所である。この場所は羽根車半径より10 mm大きい半径上に位置している。なお、舌部と円板外縁との距離で定義される舌部すきまは5 mmである。

図3(a)は供試羽根車の概要を示したものである。羽根車は厚さ0.15 mm、外径200 mm、内径140 mmのドーナツ状のアルミニウム製の2枚の円板間にスパン長さ0.7~2.8 mm、最大厚み4.4 mm、翼弦長25 mmの翼形翼を同心円上に等ピッチに24枚そう入したものを多数重ね合わせたものから構成されている。翼はできるだけ広い迎え角の範囲で正常な作動できるように、失速特性のゆるやかなUSA 35 B翼形⁽⁷⁾を円形翼列に等角写像したものを採用した[図3(b)]。翼と円板の固定はスパン方向に貫通する2 mmの穴2個をもつ翼と、それに対応した位置に穴のあいた円板とを直径2 mmのボルト(本数=2枚の円板間の翼枚数の2倍)で厚さ2 mmの両面の基盤に挟み込むことによって行った。本研究で使用している羽根車はす

べて回転軸方向長さを40 mmとし、シュラウドすきまはファン効率が最大となるのを考慮して2 mmを選定した⁽⁴⁾。図3(c)は前縁距離 L_t と後縁距離 L_i および半径流羽根車の翼形状について示したものである。

翼のスパン長さの特性に与える影響を調べるためにBreiterらの文献(8)より求めた最適円板間隔0.7 mmを基に1.4 mmおよび2.8 mmの3種類を採用し、また、これらと同じ円板間隔を有する翼なしファンも製作し、翼の有無がファン特性に及ぼす影響について調査した。翼位置が空力特性と騒音に及ぼす影響を把握するために円板内縁と翼前縁との距離(前縁距離と呼ぶ) L_t を2.5, 5 mmおよび9 mmの3とおり変えて実験を行った。この場合翼弦長は一定(25 mm)としているから翼後縁と円板外縁との距離(後縁距離) L_i は10.5, 8 mmおよび4 mmとなる[図3(c)]。なお、円周方向からの角度で定義した取付角 ξ は $\delta_D=0.7$ mm, $N=2960$ rpm, 最高効率点のとき、流れが翼に対して迎え角 16° で流入するように(このとき揚力係数は1.6, 抗力係数は0.1) $\xi=35^\circ$ に設定した(この羽根車を標準翼羽根車と呼ぶ)。この際、翼に流入する流れの方向はHasingerら⁽⁹⁾が誘導した流体の理論周方向速度を表す式(1)に基づいて算出した。

$$\frac{V_u}{u} = 1 - \frac{A}{12\pi R_t^2} + \left(\frac{A}{12\pi} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_t} \right)^2 e^{12\pi(1-R_t^2)/A} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $R_t = R/R_i$ である。 A は無次元流量、 u は任意半径での円板の周速度、 R は任意半径、 R_i は羽根車入口半径である。ポテンシャル翼理論に基づけば、この条件下における設計時の全圧ヘッド H_T は約61 mmAqとなる。さらに羽根車による前縁距離と後縁距離が騒音と空力特性に及ぼす影響を詳細に究明するために $\xi=90^\circ$ とした半径流羽根車(弦長17 mm)についても前縁距離と後縁距離を($L_t=0$ mm, $L_i=13$ mm), (2, 11 mm)および(5, 8 mm)とした実験を行った。この羽根車に使用された翼は弦長17 mm, 最大厚み4.4 mmの対称翼である[図3(c)]。代表速度に入口半径方向速度、代表長さに円板間隔を用いて表される入口レイノルズ数は最大で約500である。

4. 実験結果および考察

4.1 性能曲線

4.1.1 翼の影響 図4(a)~(c)は翼の有無が性能曲線に及ぼす影響を示したもので、それぞれ円板間隔(翼付きの場合はスパン長さ) δ_D が0.7, 1.4 mmおよび2.8 mmの場合である。図4中の○印と△印は

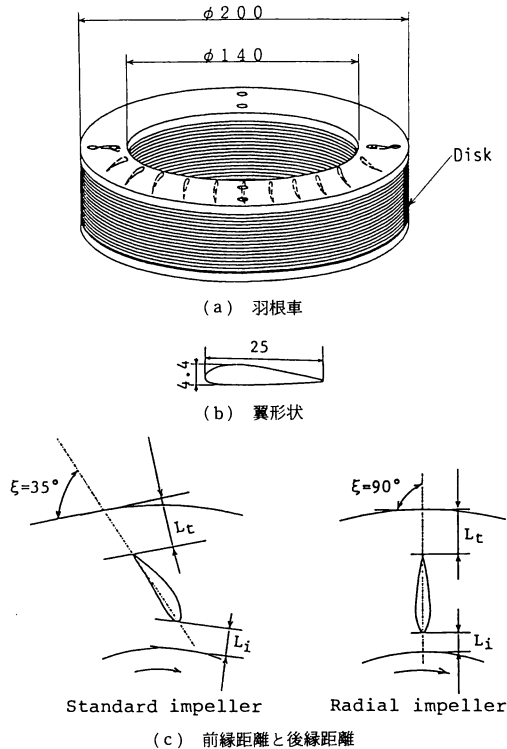


図3 供試羽根車の概要

それぞれ翼付きと翼なしの場合の結果である。翼なしファンについて見れば、 δ_D が大きくなるにつれて最大流量は減少し、圧力および効率も低くなっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。最大流量が減少するのは、本実験ではファンの軸方向長さを一定の40 mmにしているため δ_D が大きくなるにつれて円板枚数が減少するため、 H_T の値に示されるように、円板による仕事が減少することに起因している。また、圧力が低くなるのは同じ流量の場合、流体の平均周方向速度 V_u を表す式(1)の中の無次元流量 $A(=q\delta_D/\nu R_i^2)$ が δ_D の増加に従って大となり、 V_u が低下するためである。なお、 q, ν, R_i はそれぞれ2枚の円板間の流量、動粘性係数、羽根車入口半径である。また、効率が減少するのは円板間隔が増加するほど円板間の速度分布にひずみが生じ、流体の

混合損失が増加するためである。

一方、○印の翼付きの場合にはスパン長さ(δ_D に相当)が増加するほど圧力はあまり変わらないものの、効率は増加しており、翼が仕事をしていることがわかる。これはスパン長さが長いほど円板面上に発達する境界層の外側の比較的乱れの小さい部分が増え、翼による仕事が増加するためと考える。翼を付けることによって、15~30%の効率上昇、10~30 mmAqの全圧ヘッドの増加、0.5~1 m³/minの流量の増加が期待できる。以上のことから空力特性の面からは翼を付けたほうが特性は改善され、翼のスパンはできるだけ長いほうがよいことなどがわかる。

4.1.2 翼の位置の影響 図5は3種類の翼の取付位置に対する性能曲線の差異を示したものである。この場合、翼形状、翼弦長、取付角を一定にしているため、前縁距離、後縁距離はそれぞれ2.5, 5.0, 9.0 mmおよび10.5, 8, 4 mmとなる。翼はいずれの場合も2枚の円板間に等ピッチ間隔で24枚配置されている。図5から、三者間において圧力ヘッドおよびファン効率に差が見られないことから、翼の位置がファン性能に及ぼす影響はかなり小さいといえる。図6に示す半径流羽根車では $L_i=0$ mm (○印)と2 mm (△印)

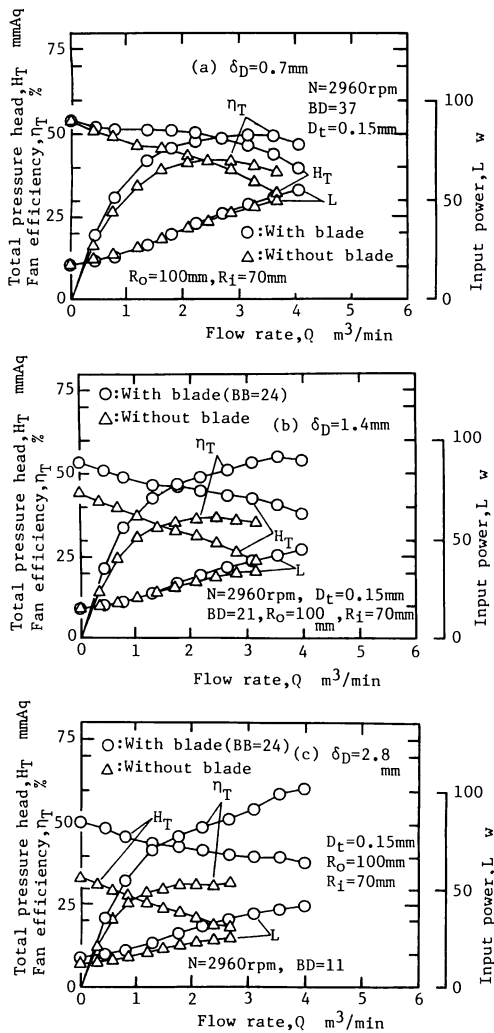


図4 性能曲線に及ぼす翼の有無の影響

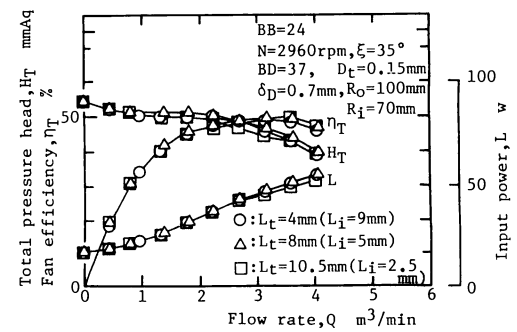


図5 性能曲線に及ぼす翼位置の影響(標準翼)

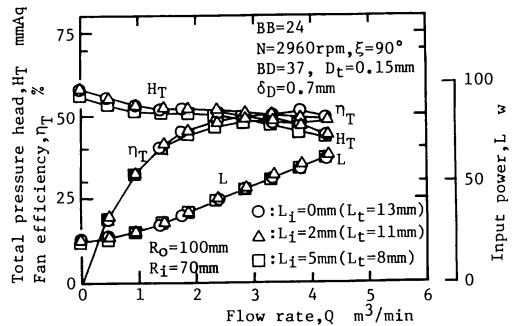


図6 翼位置の影響(半径流羽根車)

とでは空力特性には差は見られないが、 $L_i=5\text{ mm}$ (□印)の場合には若干性能が低下するようである。以上のことから翼の効率が最も低い $\delta_D=0.7\text{ mm}$ に限定すれば、前縁・後縁距離はファン性能にはほとんど影響を及ぼさないと考えてよい。

4.2 羽根車出口の速度分布 図7は羽根車出口の相対速度に与える円板間隔(翼スパン) δ_D の影響を最高効率点について示したものである。図7中の白抜き記号は翼付きの、黒塗りの記号は翼なしの場合である。また、○、●印は $\delta_D=0.7\text{ mm}$ 、△、▲印は $\delta_D=1.4\text{ mm}$ 、□、■印は $\delta_D=2.8\text{ mm}$ に対する結果である。相対速度は実測した絶対速度と流出角から出口速度三角形を用いて算出した。測定位置は図2に示したM1からM4の4断面であり、軸方向の各点の相対速度は周方向の4点の平均値として求めた平均絶対速度と流出角から算出している。図7から翼付きの場合(白抜き記号)も翼なしの場合(黒塗りの記号)も δ_D が小さくなるにつれて相対速度 W_2 は低下することがわかる。このことは式(1)から説明できる。本研究の場合、最高効率点流量は δ_D によってさほど変わらない。また、羽根車の軸方向長さを一定にしているから、 δ_D が小さくなるほど円板枚数が増加する。したがって2枚の円板間の流量 A が小さくなり、式(1)から明らかなように V_a が増加するため、任意半径の相対速度 W は小さくなる。翼付きの場合は、翼のスパンが短いため翼を付けたことによる全圧ヘッドの増加の割合は流量が $2.5\sim 3\text{ m}^3/\text{min}$ で、 $\delta_D=0.7, 1.6, 2.8\text{ mm}$ に対し、それぞれ約27, 72, 128%であり、 δ_D が小さいと円板が圧力上昇の主たる役割を演じているが、 δ_D が増加するに従って翼の役割が増大する。また、同じ δ_D の場合、翼付きと翼なしを比較すれば、多少翼付きのほうが出口相対速度は小さくなる。これは翼による循環によって円周方向分速度が増加されたためと思われる。

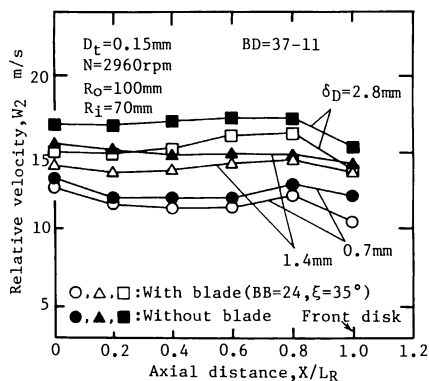


図7 相対速度に与える円板間隔の影響

これに比べて図8に示すように翼位置の影響は小さい。前縁距離を 2 mm 程度にとれば若干相対速度が減少する傾向が見られる。一方、前縁距離を設けると円板エッジや吸込管内で発生した乱れが整流されて翼に流入するが、前縁距離がないと円板エッジなどによる乱れた流れがただちに翼に流入するため、これに起因する乱流騒音の増加が考えられる。したがって、騒音低減からは前縁距離は 5 mm 程度とるのが望ましい。この長さは円板間隔の約6倍に当たる。

4.3 発生騒音

4.3.1 騒音のスペクトル分布 図9は翼なし円板ファンにおいて円板間隔 δ_D が騒音のスペクトル分布に及ぼす影響を最高効率点について示したものである。羽根車の回転数は約 3000 rpm である。図9からほぼ全周波数帯域において円板間隔 δ_D が大きくなるにつれて音圧レベルは増加していることがわかる。文献(6)によれば、ファン騒音のエネルギーは円板枚数 BD と幾何平均相対速度 \bar{W} の6乗、すなわち $BD \cdot \bar{W}^6$ に比例すると考えられるので、幾何平均相対速度は支配的パラメータの一つであるといえる。図7で示したように δ_D が増加するにつれて出口相対速度

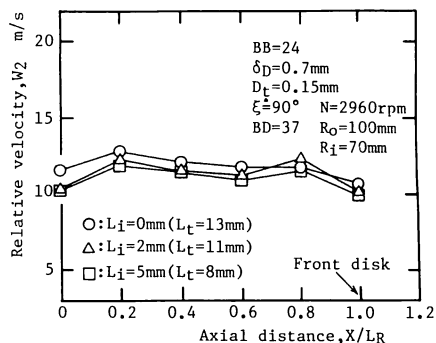


図8 相対速度に与える前縁距離の影響

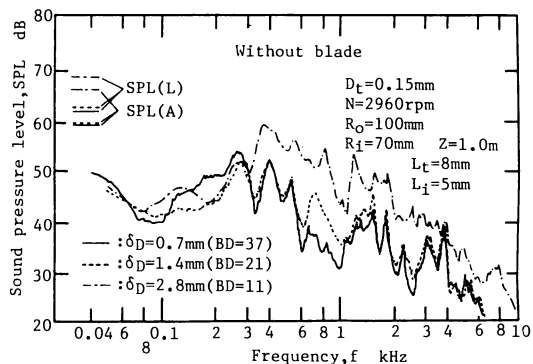


図9 騒音のスペクトル分布(翼なし羽根車)

が増加し、ひいては幾何平均相対速度の増加につながる。騒音は図に示されるような傾向となる。 $(BD \cdot \bar{W}^6)$ の総合効果は、1.4, 2.8 mmの場合、それぞれ $\delta_D=0.7$ mmの約1.4, 1.7倍となり、これを音響出力に換算すれば1.5, 2.3 dBだけ上昇することになるが、実際には1.5, 6 dB増加している。

図10は標準翼羽根車の最高効率点において、翼スパン(円板間隔) δ_D が騒音のスペクトル分布(L特性)に及ぼす影響を示したもので、前縁距離と後縁距離はそれぞれ5 mmと8 mmの場合である。図10において高いレベルの離散周波数騒音の発生は見られない。また、ほぼ全周波数帯域において円板間隔(スパン) δ_D が小さくなるにつれて音圧レベルが低くなる。これは図7に示したように δ_D が小なるにつれて出口相対速度が減少すること、および翼の放射面積が小さくなることによる。図9の翼なしファンと比較すれば、0.4~0.6 kHzの周波数帯域で翼付きファンの音圧レベルの増加が著しい。この増加は翼によるものとみなすことができる。ストローハル数を0.2、代表速度に幾何平均相対速度を、代表寸法に最大翼厚みを用いた場合の周波数は約500 Hzとなるので、この程度の規模の渦が翼出口端までに分裂拡散して、高周波数の

乱れ成分に変わっていくこと、および前述したように δ_D が大なるほど翼の存在が重要となることを考えれば、スペクトルの差異が説明できよう。

図11は後縁距離 L_t が騒音のスペクトル分布に及ぼす影響を標準翼羽根車において最高効率点について示したもので、図11中の破線、一点鎖線および実線はそれぞれ L_t が4, 8 mmおよび10.5 mmの結果である。なお、実験時の回転数は2960 rpmである。図11中の1.2 kHz近傍に見られる音圧レベルのピークは翼の後流と舌部との干渉騒音⁽¹¹⁾である。これは以下の理由による。第1には本実験の場合、翼通過周波数は $[(2960/60) \times 24] = 1184$ Hzで発生音の周波数と一致すること、第2には舌部との距離を増加させると音圧レベルが減少して干渉の度合いが低減していることである。図11において L_t が増加するに従い音圧レベルが減少する理由は L_t が大なるほど後流の拡散が促進され、円板周方向の速度分布が一様化するからである。 δ_D が0.7 mmの場合に限定すれば、 L_t を8 mm(翼後縁と舌部間の距離 L_{TB} に換算すれば13 mm)以上にとれば、干渉騒音が乱流騒音とほぼ同じレベルまで低下することがわかる。 $L_{TB} = 13$ mmは翼の最大厚み(4.4 mm)の約3倍と相対的に短い距離であり、円板によって翼後流が短距離で拡散することがわかる。乱流騒音に関しては前・後縁距離による大きな差異は

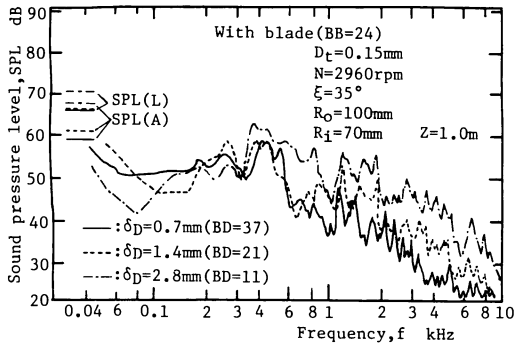


図10 騒音のスペクトル分布(翼付き羽根車)

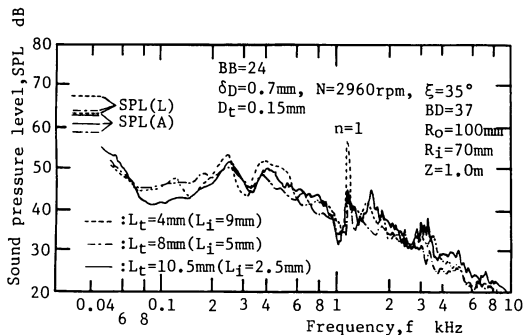


図11 騒音のスペクトル分布に与える後縁距離の影響

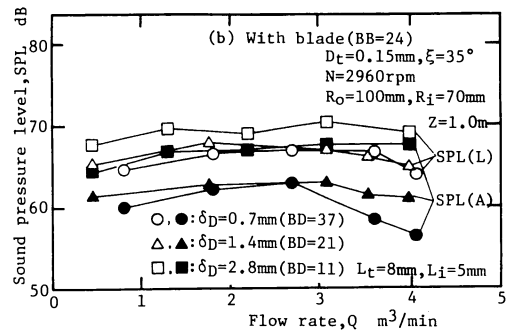
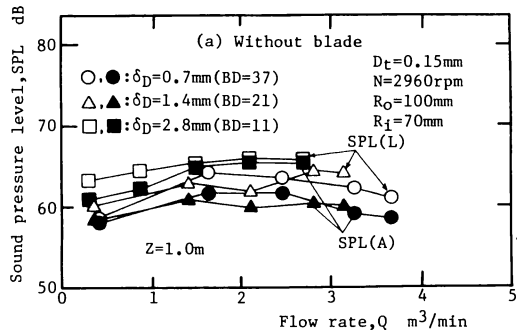


図12 全帯域騒音に及ぼす円板間隔の影響

見られない。

4・3・2 全帯域騒音の流量変化 図12はスパン長さ(円板間隔) δ_D が全帯域騒音に及ぼす影響を示したもので、図12中の白抜きと黒塗りの記号はそれぞれ SPL(L) と SPL(A) の場合である。図12から δ_D が小さくなるほどほぼ全流量域で音圧レベル SPL(L) および SPL(A) は低下する傾向が見られるが、翼付き羽根車の SPL(A) に関しては δ_D が 0.7 mm と 1.4 mm とでは差はない。また、 δ_D が小さくなるにつれて音圧レベルが低下する理由として幾何平均相対速度の低下が考えられる⁽⁶⁾。一方、翼を付けたと翼後縁から放出される渦に基づく音が発生するため、翼なしに比べ騒音は増加する。流量によるレベルの変化は翼なしの場合と同様に最大流量から締切点までほぼ一定値をとる。これはスパン長さが非常に短いため、翼周りの流れのはく離やサージングなどの現象が起りにくいからと思われる。

図13に見られるように前縁距離が音圧レベルに及ぼす影響はスパン長さに比較すれば小さいが、前縁距離をあまり小さくとると図8に示したように相対速度が増加すること、翼に流入する乱れの増加のため音圧レベルも増加する⁽¹²⁾。このことは $L_i=5$ mm 程度の

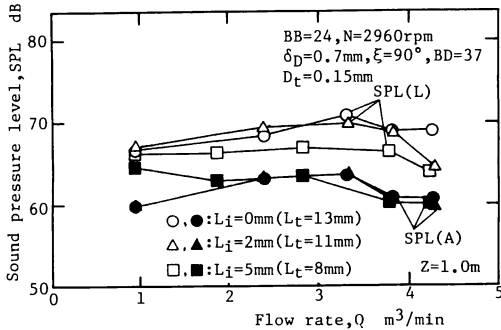


図13 全帯域騒音に及ぼす前縁距離の影響

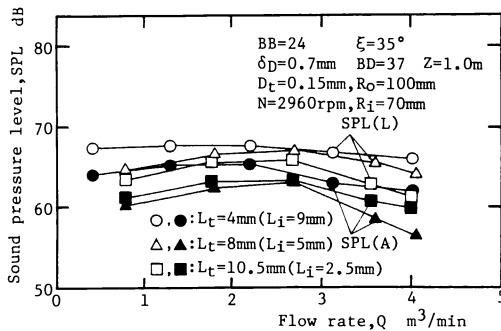


図14 全帯域騒音に及ぼす後縁距離の影響

前縁距離を設けることによって音圧レベルを低下させることができることを示している。また、図14からわかるように後縁距離が4 mm の場合には、干渉騒音が発生し、このため全帯域騒音が増加するので、注意を要する。

4・4 比騒音レベル 4・3節までに述べたように翼を付けることにより空力特性は飛躍的に改善されるが、一方では騒音が増加する。騒音を考慮に入れて送風機の良否を判定するための一つのパラメータとして音圧レベルに流量 Q [m³/min] と圧力 P_T [Pa] を加味した式(2)で示される比騒音レベル K_s がある。この値が低いほど良好な羽根車とされている。

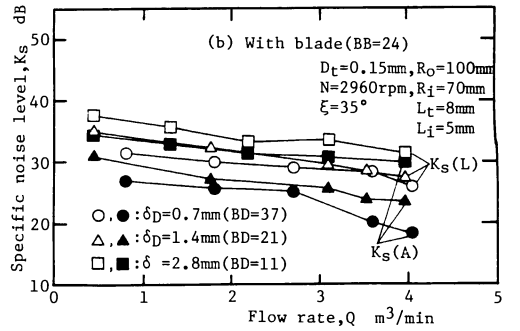
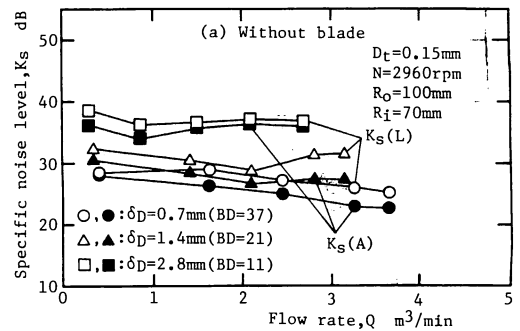


図15 比騒音レベルに及ぼす円板間隔の影響

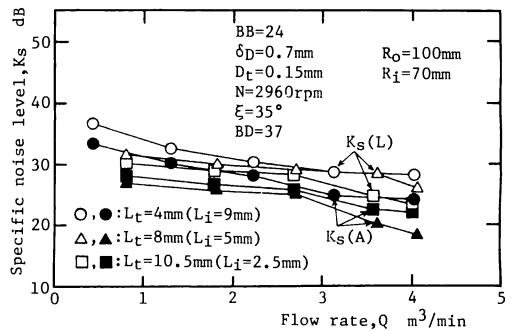


図16 比騒音レベルに及ぼす後縁距離の影響

$$K_s = \text{SPL} - 10 \log_{10}(QP^2) + 20 \dots\dots\dots (2)$$

ここで SPL は音圧レベル, P_T は全圧上昇である。

図 15 は翼スパン(円板間隔) δ_D が比騒音レベルに及ぼす影響を 3 種類の δ_D について調べたものである。 $K_s(L)$ は白抜きの記号で, $K_s(A)$ は黒塗りの記号で示している。 図 15(a) は翼なし, 図 15(b) は翼付きの場合である。 翼の有無にかかわらず δ_D が小さいほど全流量域で K_s は低くなることから, 本研究の場合 δ_D が 0.7 mm の羽根車がいちばん良好といえる。 翼付きと翼なしを比較した場合, 翼付きのほうが全圧上昇が効いて, ほぼ全流量域で低い。 このことより, 翼を付けることによって比騒音レベルの改善ができることがわかる。

図 16 は後縁距離が比騒音レベルに及ぼす影響を 3 種類の距離について示したものである。 なお, δ_D は 0.7 mm である。 距離 L_t が小さくなれば翼と舌部との干渉が激しくなって干渉騒音のレベルが増加し, 比騒音レベルも高くなる。 δ_D が 0.7 mm の場合に限定すれば, 後縁距離は 8 mm となるとその干渉騒音はほとんど見られなくなる。 この距離は円板間隔の約 12 倍で, 最大翼厚みの約 1.8 倍である。 円板外縁と舌部とのすきまは 5 mm であるので, 翼後縁と舌部との距離に換算すれば 13 mm となり, この距離は円板間隔の約 19 倍, 翼厚みの約 3 倍に相当する。

5. 結 論

本報では多層円板ファンにスパン(翼高さ)のきわめて短い翼を取付けた翼付き多層円板ファンに関して, 翼の有無, スパン長さおよび翼取付位置がファンの空力特性および騒音に与える影響を翼弦長を一定とした条件下で実験的に究明した。 その結果以下の結論を得た。

(1) 翼付き多層円板ファンは翼のない多層円板ファンに比較して全流量域で, 全圧および全圧効率が大幅に上昇する。

(2) 翼を装着すると音圧レベルは多少高くなるが, 圧力上昇が飛躍的に増大し, 最高効率点流量も増加するので比騒音レベルは低くなる。 したがって, 翼を付けることによって比騒音特性の改善ができる。

(3) スパン長さが短いほど全圧上昇は大きく, 比騒音レベルは低い。 最高効率はスパン長さが長いほうが高いが, 比騒音レベルの面からはスパン長さが 0.7 mm の羽根車が最も良好である。 また, 同じ円板間隔の場合ほぼ全流量域で翼付きファンが翼なしファンより比騒音レベルが低い。

(4) 翼の取付位置がファンの全圧上昇量や全圧効率に及ぼす影響は小さいが, 騒音に及ぼす影響は大きい。 前縁距離を 5 mm 程度に保つことによって乱流騒音を約 2 dB 低減できる。 また, 後縁距離を 8 mm (円板間隔の約 12 倍) 以上に保つことによって翼後流と舌部との干渉による干渉騒音が本実験の場合約 12 dB 低減した。

終わりに本実験に協力された長崎大学大学院生の筒井丈雄, 当時長崎大学学生の永山史教の諸氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 原田・菊島, 機講論, No. 740-13 (1974-11), 207.
- (2) Merry, S. L., ほか 2 名, *Inter-Noise*, 83 (1983), 21.
- (3) Merry, S. L. and Glegg, S. A. L., *Inter-Noise*, 84 (1984), 53.
- (4) 児玉・ほか 3 名, 機論, 55-518, B (1989), 3096.
- (5) 児玉・ほか 3 名, 機論, 56-524, B (1990), 952.
- (6) 児玉・ほか 3 名, 機論, 55-549, B (1992), 1161.
- (7) Jacob, E. N. and Abbott, I., *NACA Rep.*, 669 (1939), 14.
- (8) Breiter, C. L. and Pohlhausen, K. R. L., *ARL Rep.*, No. ARL 62-318 (1962).
- (9) Hasinger, S. and Kehrt, L., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, 85 (1963), 201.
- (10) 福富・ほか 2 名, 機論, 58-549, B (1992), 1473.
- (11) Tyler, J. M. and Sofrin, T. G., *SAE Trans.*, 70 (1962), 309.
- (12) Sharland, I. J. *J. Sound Vib.*, 1-3 (1964), 302.