

多翼送風機の翼形状が送風性能と騒音に及ぼす影響*

川崎 真俊^{*1}, 北爪 三智男^{*2}, 平原 裕行^{*3}

Influence of Blade Shape on Flow Performance and Noise Generation of Multi-Blade Blower

Masatoshi KAWASAKI^{*1}, Michio KITAZUME and Hiroyuki HIRAHARA^{*1} Sanden Co., Ltd., 20 Kotobuki-cho, Isesaki-shi, Gunma, 372-8502 Japan

The influence of different parameters in the design of multi-blade fan, such as the ratio inner diameter of outer diameter, D_1/D_2 , number of blades, Z , inclination angle, α , outlet angle, β_{d2} , and inlet angle, β_{d1} , were examined in order to study relation between the flow pattern and noise level. In the present report, we investigated the fan performance and the noise characteristic experimentally and compared with simplified two-dimensional CFD analysis. The flow pattern passing the blades under the different geometrical conditions was examined and discussed in terms of fan performance and noise level. The results shows that high efficiency and low noise were attained in range of $D_1/D_2=0.8\sim0.84$, $Z=35\sim45$, $\alpha=30^\circ\sim40^\circ$, and $\beta_{d2}=155^\circ\sim165^\circ$. For these conditions, it was found that the pressure loss and noise generation in the flow between blades were attributed to the separation of the flow which was induced by the circulated vortex at the suction side, reattachment of the separated flow, and shear flow at the trailing edge. It was also confirmed that a large inner to outer diameter ratio gives a defected performance and big noise generation because of no reattachment of the separated flow. Also, the increasing of blade number resulted in the increasing of high frequency noise due to the vortices generation in shear layer in spite of rectification of passing flow.

Key Words : Turbomachinery, Multi-Blade Fan, Flow Performance, Efficiency, Noise, Separation, Computational Fluid Dynamics

1. 緒 言

多翼送風機は通気抵抗が高い系においても、比較的多くの流量を得ることができる特徴を有する。そのため、産業用、空調用、換気用等、さまざまな分野の製品に組み込まれて使用されている。そのような状況にあっても、製品の多様・複雑化、CO₂ 排出量低減、快適性向上等による近年の背景から、多翼送風機の更なる小型化、高性能化（高静圧・高効率・低騒音）に対し、解決すべき技術課題は多い。

多翼送風機の羽根車翼は、前縁から後縁にかけて回転方向へ傾斜している前向き羽根で、内外径比が大きく、羽根枚数が多いことが特徴で、その翼間の流れは複雑である。このような多翼送風機的设计は、一部の理論と蓄積された経験・データによってなされることが多い。多翼送風機に関するこれまでの研究としては、送風性能の最適化のための羽根形状を調査した研究⁽¹⁾、ケーシングの各種諸元が送風性能と騒音に及ぼす影響を調査した研究⁽²⁾⁽³⁾、送風機内部の流れ場及び圧力変動を実験的に解析し、騒音発生機構について検討した研究⁽⁴⁾、音響インテンシティを駆使して騒音源を探索した研究⁽⁵⁾、送風機内部の各種損失を 1 次元モデル化し、それを見積もることによって送風性能を予測した研究⁽⁶⁾などがある。このように従来の研究を鑑みても、羽根車内の流れの変動が騒音に及ぼす影響について検討した例はなく、特に、翼の各緒元が送風性能と騒音に及ぼす影響に対してそれを裏付ける翼間流れと関連付けて研究した例は見当たらない。

そこで本研究は、多翼送風機翼の基本緒元である内外径比、羽根枚数、傾斜角、翼出口角、翼入口角に着目し、

* 原稿受付 2010 年 9 月 1 日

^{*1} 正員, サンデン(株) (〒372-8502 群馬県伊勢崎市寿町 20 番地)^{*2} サンデン(株)^{*3} 正員, フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科

E-mail: kawasaki_masatoshi@sanden.co.jp



送風性能と騒音に対する適正化について検討すると同時に、これらの変化によって送風性能と騒音に及ぼす影響を、CFD 解析を用いて翼間流れと関連付けて調査した。

主 な 記 号

b	: 羽根高さ [mm]
c	: 絶対速度 [m/s]
D_1	: 羽根車内径 [mm]
D_2	: 羽根車外径 [mm]
D_1/D_2	: 内外径比
L_A	: 騒音レベル [dB(A)]
L_{SA}	: 比騒音 [dB(A)]
N	: 回転数 [1/s]
P	: ファン全圧 [Pa]
Q	: 流量 [m^3/s]
T	: トルク [Nm]
u	: 周速度 [m/s]
w	: 相対速度 [m/s]
Z	: 羽根枚数
α	: 傾斜角 [°]
β_d	: 設計翼角度 [°]
ϕ	: 流量係数
ϕ	: 圧力係数
η	: ファン効率
ρ	: 空気密度 [kg/m^3]
ω	: 角速度 [rad/s]
添え字	
1	: 内径側
2	: 外径側

2. 性能試験及び数値解析

2・1 性能試験

送風性能と騒音レベルの性能評価を行うため、無響室にて図 1 に示す JIS B8330, JIS B8346 に準拠した実験装置を用いた。ファン回転数は $3000\text{rpm} \pm 0.5\%$ とし、流量はオリフィス前後の差圧から、静圧は管壁面に取り付けられた静圧孔から計測され、装置下流にある絞りを調整して、流量、静圧、モータ電圧、モータ電流、騒音を測定した。なお、計測されたそれぞれの値の誤差は $\pm 3\%$ 以下であることを確認している。ファン効率算出のために必要なモータのトルクについては、予めモータ単体でトルク測定装置にて電流とトルクの関係性を測定しておき、電流測定値からトルクを算出した。騒音特性に関しては、ファン回転軸上吸込口上端から 1m の位置にプリアンプ内蔵 1/2inch コンデンサマイクロホンを設置して計測し、FFT アナライザにて周波数特性を分析している。

送風機の送風特性及び騒音特性の評価に用いる流量係数 ϕ 、圧力係数 ϕ 、ファン効率 η 、比騒音 L_{SA} は (1) ～ (4) に示す式により算出した。

$$\phi = \frac{Q}{\pi D_2 b_2 u_2} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho u_2^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{PQ}{T\omega} \quad (3)$$

$$L_{SA} = L_A - 10 \log(60QP^2) + 20 \quad (4)$$

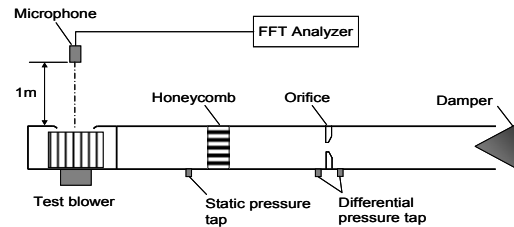


Fig. 1 Experimental apparatus for the measurements of fan characteristics

2・2 供試送風機

表 1 に本研究で検討した内外径比 D_1/D_2 、羽根枚数 Z 、傾斜角 α 、翼出口角 β_{d2} 、翼入口角 β_{d1} の緒元を示す。図 2 のようにそれぞれのパラメータを定義する。翼厚に関しては、最薄の後縁で 0.8mm である。スクロールケーシングの開き角は 5° を適用した。なお、本論文では、車両用空調装置 (HVAC) の運転において、特に冷房時における騒音及び効率が製品性能の良否を大きく左右するものであると言えるため、この動作点近傍に相当する $\phi = 0.22$ における翼間流れと送風機特性の関係を調査検討することとした。

Table 1 Specifications of the test fan in the experiments

Test parameter	D_1/D_2	Z	$\alpha [^\circ]$	$\beta_{d2} [^\circ]$	$\beta_{d1} [^\circ]$	No.
D_1/D_2	0.72	35	35	165	70	1
	0.8					2
	0.835					3
	0.89					4
Z	0.835	25	35	165	70	5
		35				6
		45				7
		60				8
α	0.835	45	10	165	70	9
			19			10
			35			11
			48			12
β_{d2}	0.835	45	35	145	70	13
				155		14
				165		15
				175		16
β_{d1}	0.835	35	35	165	50	17
					70	18
					90	19

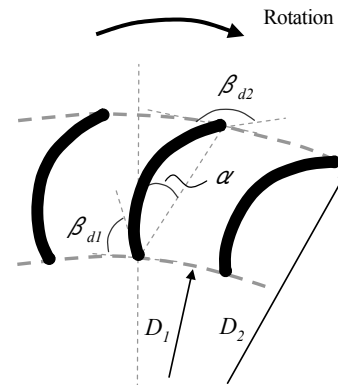


Fig. 2 Fundamental parameter of fan blades

2・3 2次元翼間CFD解析

翼間流れが送風機性能に及ぼす影響を調査するため、CFD解析を用いて検討する。CFD解析には汎用熱流体解析ソフトである(株)シーディーアダプコジャパンのSTAR CCM+を用いた。今回の解析では、時間平均的流れ場が送風性能及び騒音に与える影響を検討することが目的であるため、計算工数を大幅に抑えるために以下のような簡易な解析モデルを用いている。解析領域に関しては、図 3 に示すように翼 1 ピッチ間の 2 次元断面のみとし、翼入口側の境界は速度流入、出口側境界は大気圧一定、回転周方向の境界を周期境界条件、翼周囲の領域のみ回転座標系により定義した。メッシュ数は約 5000 である。計算に関しては、対流項には 2 次精度風上差分法、乱流モデルには Realizable k- ϵ を用い、2 次元定常計算を行う。

本解析モデルの妥当性を評価した結果を図4に示す。これは、内外径比を変化させたときの流量係数 $\phi=0.22$ における圧力係数とファン効率の実験結果(図1に示す試験装置で測定した結果)と2次元翼間CFD解析結果及び実験と同じ条件を模擬し、2次元翼間解析と同様の計算パラメータを適用した3次元CFD解析結果($D_1/D_2=0.835$ のみ)を比較したものである。2次元解析により得られた圧力係数は、翼間流れの入口と出口の圧力差を用い、ファン効率は翼にかかるトルクを用いて算出した。2次元解析結果は実験結果よりも圧力係数及びファン効率が若干高くなる。これは、2次元翼単体モデルであるため、スクロールケーシングに関わる損失が加味されないこと、翼間流れの流入及び流出部には外乱発生の影響がほとんど無いこと、かつ、3次元的な損失が加味されないためと考えられる。それぞれの状態が異なっているため、各係数の値そのものを直接比較することはできないが、傾向は定性的に良く一致している。一方、3次元解析結果($D_1/D_2=0.835$ のみ)は定量的に良く一致している。実際の送風機内流れは、子午面から見た場合の多翼送風機特有のシュラウド側に定在する渦流領域とハブ側の主流領域が存在する流れ、周方向で異なる速度分布の流れ、スクロール内2次流れ等の流動状態となっている。佐々木ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は、ファン全圧の上昇はハブ側の主流部が貢献することを示しており、翼後流に起因する広帯域騒音は $\theta=270^\circ$ 付近の主流領域が騒音レベルに大きな影響を及ぼすことを示している。そこで、2次元翼間解析結果から得た翼間相対速度ベクトルと3次元解析結果から $\theta=270^\circ$ 付近の主流領域断面($b_2/2$ における断面)における翼間相対速度ベクトルを比較した(図5)。なお、相対速度は周速度 u_2 で割った無次元量で示している。翼前縁剥離による剥離泡の大きさは若干異なるものの、翼間流れの傾向は概ね一致している。以上より、本2次元翼間CFD解析モデルを用いて、翼間流れと送風機特性との関係を定性的に関連付けて検討することは可能であると判断した。

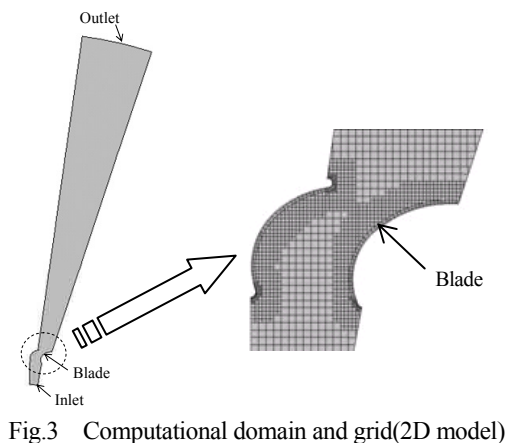


Fig.3 Computational domain and grid(2D model)

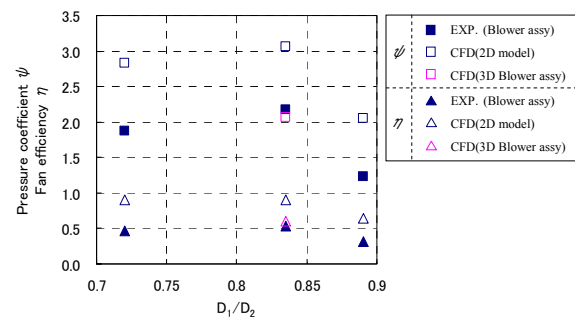
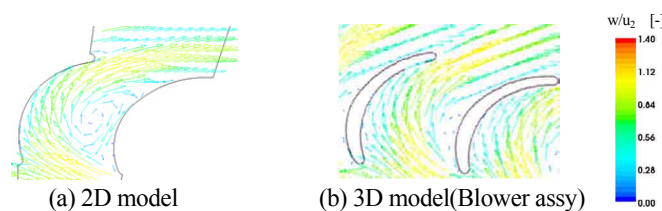


Fig.4 Comparison of fan characteristics between experiments and CFD results

Fig.5 Comparison of relative velocity vector between 2D and 3D CFD model($D_1/D_2=0.835$)

3. 検討結果及び考察

3・1 内外径比の影響

内外径比 $D_1/D_2=0.72, 0.8, 0.835, 0.89$ (表1のNo.1,2,3,4に対応)に対する ϕ - ϕ 特性、 η - ϕ 特性、 L_A - ϕ 特性、 L_{SA} - ϕ 特性の実験結果を図6に示す。このとき D_2 は一定である。 $D_1/D_2=0.8, 0.835$ では送風性能、ファン効率が高く比騒音は低い値を示している。 $D_1/D_2=0.89$ では送風性能、ファン効率は低く、騒音レベル、比騒音は高くなる。比騒音に関しては、送風性能が低く、騒音レベルが高くなっていることから他の仕様に比べ非常に高い特性を示している。

図7に $D_1/D_2=0.72, 0.835, 0.89$ の $\phi=0.22$ における騒音スペクトルの測定結果を示す。1750Hzにあるピークは回転数×羽根枚数で表されるNZ周波数である。 $D_1/D_2=0.89$ においては、図6の騒音レベルにおいても示されているように、その値は高くなるが、これは同様に図7においても他の条件に対して広帯域で騒音レベルが増大していることが示されている。中でも400~700Hzにおける増大が顕著である。

図8にCFD解析で得られた相対速度ベクトルと乱流エネルギーの計算結果を示す。相対速度は周速度 u_2 で割った無次元量で示している。 $D_1/D_2=0.72, 0.835$ の相対速度ベクトルは、翼の前縁で剥離した後、主流が後続翼の圧力面に沿って流れ、翼の回転方向へ曲げられて流出されている。前縁剥離によって生じた死水領域は、後縁からの流出主流によって前方翼の負圧面後縁の手前で再付着し、翼間で剥離泡が形成される。乱流エネルギーは、負圧面前縁から後縁にかけて剥離泡の周囲を取り巻いているせん断層部、再付着部、後縁下流直後における剥離にて生成された微小な死水領域と流出主流とのせん断領域部によって大きくなっている。これらのことから、翼間流れにおける損失及び騒音源は、これらの乱流エネルギーの大きい領域が影響していると考えられる。

$D_1/D_2=0.72$ においては、内外径比が小さいため、流入面積が小さいことによって、他の条件に比べて翼流入絶対速度が大きくなる。そのため、前縁剥離による動圧損失が大きくなることによって、 $D_1/D_2=0.835$ より送風性能が劣るものと考えられる。

$D_1/D_2=0.89$ においては、前縁剥離した後の流れは正圧面には沿わず、そのまま正圧面後縁に向かって流れが集中している。また、正圧面に沿った流れが十分形成されていないため回転方向への転向ができず、流出主流の流れ角度は小さい。これはすべりが大きいことを示唆しており、送風性能が低下する要因となる。さらに、負圧面へ再付着ができないことから剥離泡が形成されていないため、主流の周囲における死水領域は広がっている。このような領域では大小様々な渦が生成されると推察されることから、広帯域での騒音レベル増加につながっていると考えられる。

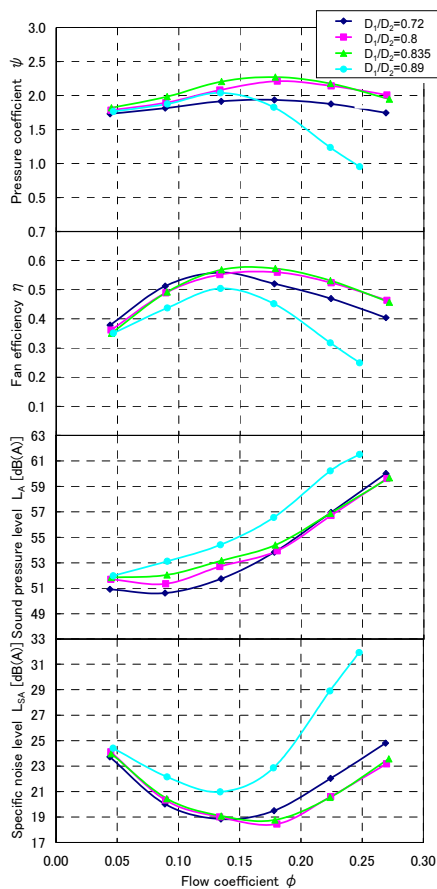


Fig.6 Influence of D_1/D_2 on fan characteristics

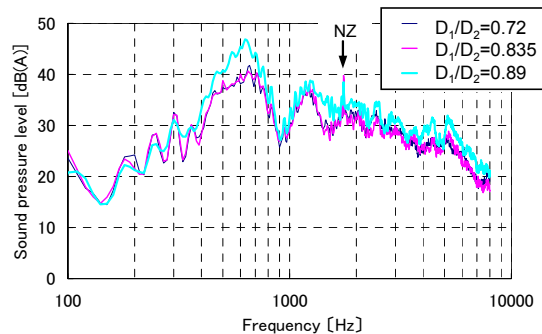


Fig.7 Influence of D_1/D_2 on noise spectra ($\phi=0.22$)

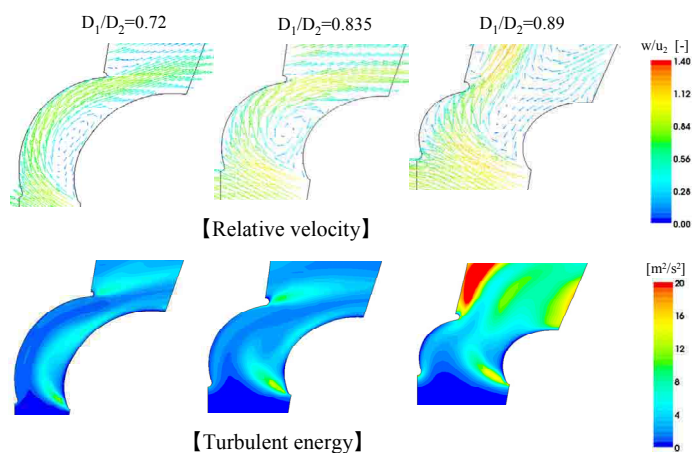


Fig.8 Influence of D_1/D_2 on relative velocity vector and turbulent energy distribution ($\phi=0.22$)

3・2 羽根枚数の影響

羽根枚数 $Z=25, 35, 45, 60$ (表 1 の No.5,3,6,7 に対応) に対する ϕ - ϕ , η - ϕ , L_A - ϕ , L_{SA} - ϕ の各特性の実験結果を図 9 に示す. 図から, ファン効率が低いのは $Z=35, 45$ で, 比騒音も低い値を示している. $Z=25$ は特に高流量係数領域で送風性能, ファン効率が低く, 騒音レベル, 比騒音は高い. 比騒音に関しては, 送風性能が低く, 騒音レベルが高くなっていることから他の条件に比べ非常に高い特性を示している.

図 10 に $Z=25, 35, 60$ の $\phi=0.22$ における騒音スペクトルの測定結果を示す. $Z=25$ は, 最も騒音の低い $Z=35$ と比較すると広帯域で騒音レベルが増大しており, 特に $400\sim 700\text{Hz}$ における増大が顕著である. これに対し, $Z=60$ では高周波数側の $2000\sim 5000\text{Hz}$ で高くなっている. これは, 翼間流れにおける変動は小さくなるものの, セン断層から発生する渦による騒音が増大するためと考えられる.

図 11 に CFD 解析で得られた相対速度ベクトルと乱流エネルギーの計算結果を示す. $Z=25$ は前述の No.4 ($D_1/D_2=0.89$, $Z=35$) に近い流動パターンであり, 前縁剥離した主流は正圧面に沿う流れが形成されず, かつ, 負圧面への再付着もできずに大きな死水領域が形成されている. また, 翼後縁からの流出流れ角度は小さい (すべりが大きい) ことがわかる. そのために $Z=35, 60$ よりも送風性能, ファン効率とも低下し, 騒音レベルは増大すると思われる. しかしながら, 送風特性とファン効率は No.4 ($D_1/D_2=0.89$, $Z=35$) よりも高い値を示している. これら両者の相対速度ベクトル図を比較すると興味深い結果が得られる. No.5 ($D_1/D_2=0.835$, $Z=25$) においては翼後縁からの流れ角度は No.4 よりも大きいことがわかる. これは, No.5 のほうが D_1/D_2 が小さい, すなわち翼長が長いいため, 正圧面に沿った主流が回転方向へ転向するための距離を稼ぐことができる. これによって, 周方向速度成分がより加わることで流出絶対速度が大きくなり, より送風性能が上昇すると思われる. このことから, D_1/D_2 が大きくなると, 羽根枚数を増やしても出口の速度すべりを小さくする効果はなくなると言える.

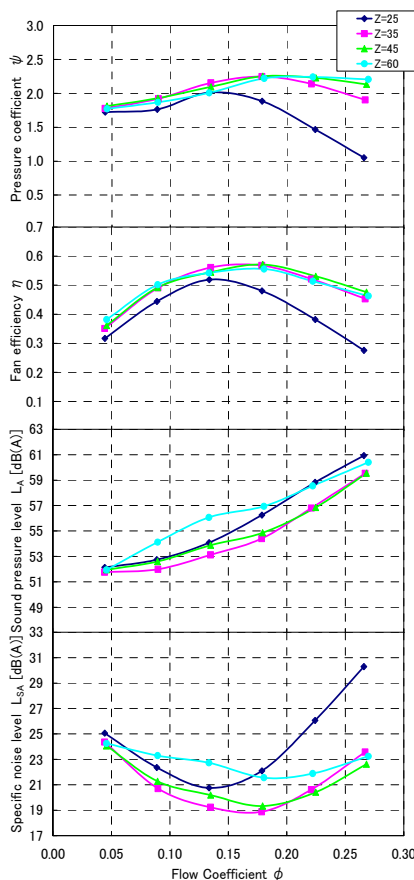


Fig.9 Influence of Z on fan characteristics

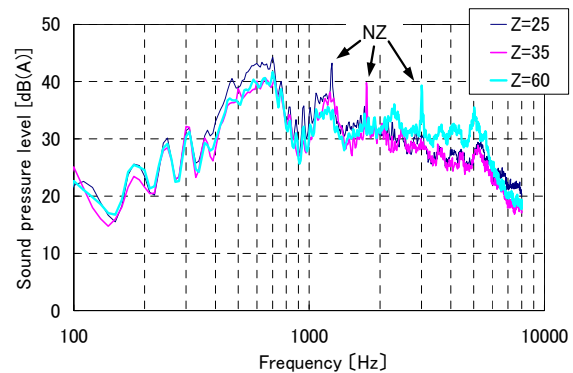


Fig.10 Influence of Z on noise spectra ($\phi=0.22$)

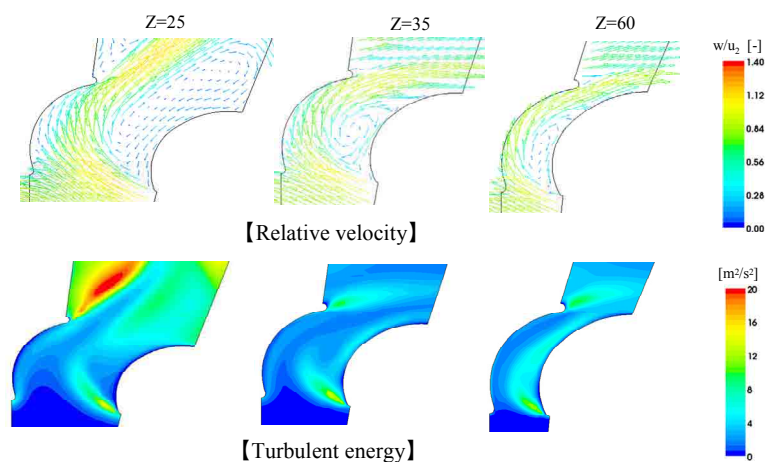


Fig.11 Influence of Z on relative velocity vector and turbulent energy distribution ($\phi=0.22$)

3・3 傾斜角の影響

傾斜角 $\alpha = 10^\circ, 19^\circ, 35^\circ, 48^\circ$ (表1のNo.8,9,6,10に対応)に対する ϕ - ϕ , η - ϕ , L_A - ϕ , L_{SA} - ϕ の各特性の実験結果を図12に示す. 図からわかるように, $\alpha = 35^\circ$ ではファン効率が高く, 比騒音は最も低い値を示している. $\alpha = 10^\circ$ は送風性能, ファン効率が低く, 騒音レベルも低いが, 比騒音に関しては高流量係数領域にて送風性能の著しい低下があるために, この範囲で増大している. $\alpha = 48^\circ$ は送風性能, ファン効率は高いが, 騒音レベル, 比騒音が全体的に高い特性を示している.

図13に $\alpha = 10^\circ, 35^\circ, 48^\circ$ の $\phi = 0.22$ における騒音スペクトルの測定結果を示す. 最も良い特性を示しているのは $\alpha = 35^\circ$ であり, $\alpha = 10^\circ$ は $\alpha = 35^\circ$ と比較すると $400 \sim 700\text{Hz}$ の範囲で高い値を示し, $\alpha = 48^\circ$ は広帯域で高い値を示している.

図14にCFD解析で得られた相対速度ベクトルと乱流エネルギーの計算結果を示す. $\alpha = 10^\circ$ に関しては, No.4, No.5に近い流動パターンであり, 前縁剥離された主流は正圧面に沿って流れているものの, 負圧面へ再付着できずに大きな死水領域が広がっている. また, 翼間内で回転方向への転向が十分でないためすべりが大きくなることで流出流れ角度が小さいことからヘッドは低くなっている. このような流動パターンでは $400 \sim 700\text{Hz}$ で騒音が増加する傾向となると考えられる.

$\alpha = 35^\circ, 48^\circ$ は前縁剥離した主流が正圧面に沿って流れ, 後縁から流出した流れによって負圧面にて再付着している流動パターンを示している.

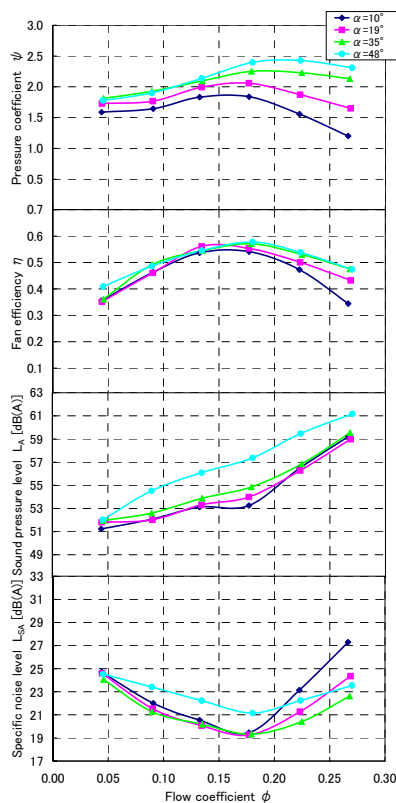


Fig.12 Influence of α on fan characteristics

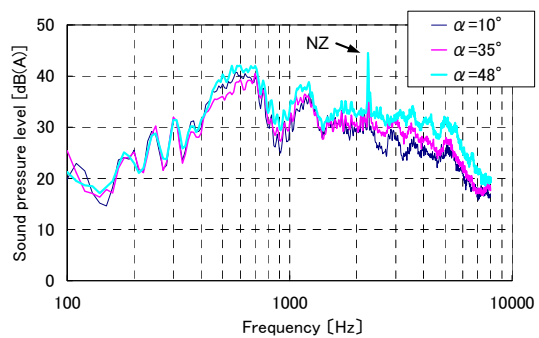


Fig.13 Influence of α on noise spectra ($\phi = 0.22$)

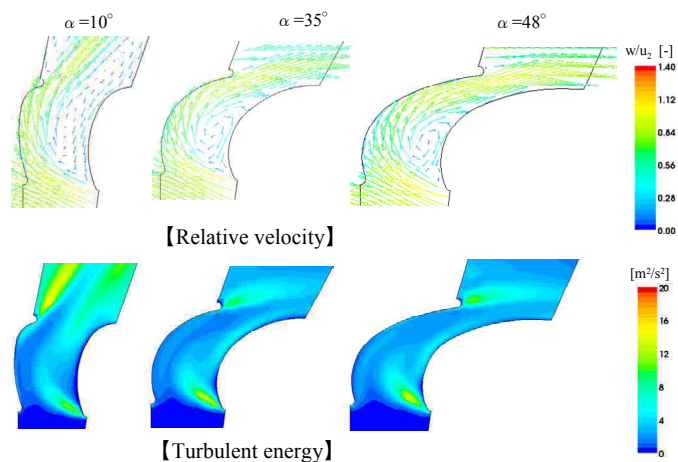


Fig.14 Influence of α on relative velocity vector and turbulent energy distribution ($\phi = 0.22$)

3・4 翼出口角の影響

翼出口角 $\beta_{d2}=145^\circ$, 155° , 165° , 175° (表1のNo.11,12,6,13に対応)に対する ϕ - ϕ , η - ϕ , L_A - ϕ , L_{SA} - ϕ の各特性の実験結果を図15に示す. $\beta_{d2}=155^\circ$, 165° はそれぞれ特性がほぼ同様で、ファン効率が高く、比騒音は低い. 一方、 $\beta_{d2}=145^\circ$ は他の仕様に比べ各特性が劣る傾向を示している.

図16に $\beta_{d2}=145^\circ$, 165° , 175° の $\phi=0.22$ における騒音スペクトルの測定結果を示す. $\beta_{d2}=165^\circ$ は他の条件より $400\sim 700\text{Hz}$ で若干低くなっている.

図17にCFD解析で得られた相対速度ベクトルと乱流エネルギーの計算結果を示す. $\beta_{d2}=165^\circ$, 175° の条件では、前縁剥離した主流が負圧面後縁手前で再付着し、 $\beta_{d2}=145^\circ$ においては前縁剥離した主流は正圧面に沿って流れ、再び負圧面の後縁直前で再付着されているものの、剥離泡は大きいため主流との間に大きなせん断流れ領域が形成されている. このため翼間内では乱れが大きくなり、他の仕様よりも騒音レベルは高くなると考えられる. また、回転方向の転向は小さくなるため周方向速度は小さくなり、送風性能は低くなる.

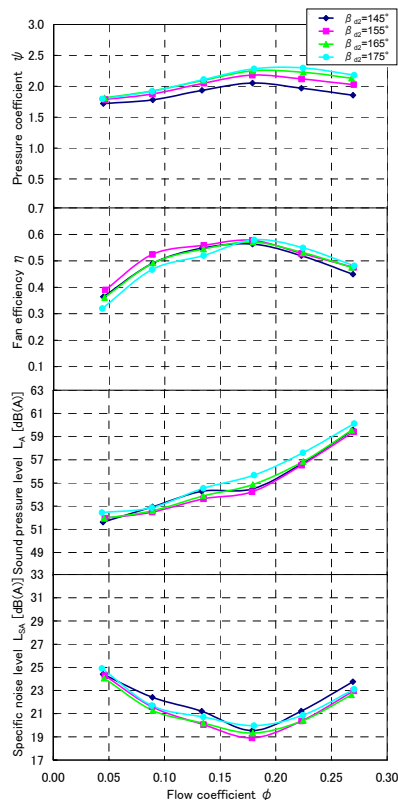


Fig.15 Influence of β_{d2} on fan characteristics

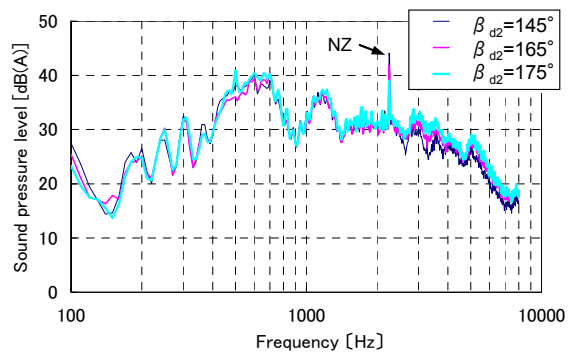


Fig.16 Influence of β_{d2} on noise spectra ($\phi=0.22$)

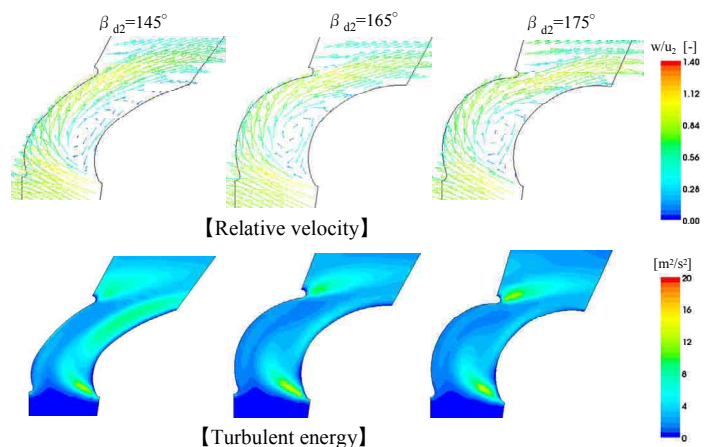
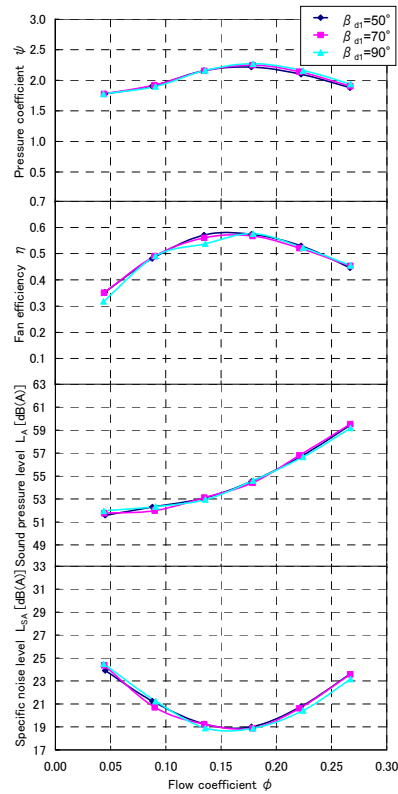


Fig.17 Influence of β_{d2} on relative velocity vector and turbulent energy distribution($\phi=0.22$)

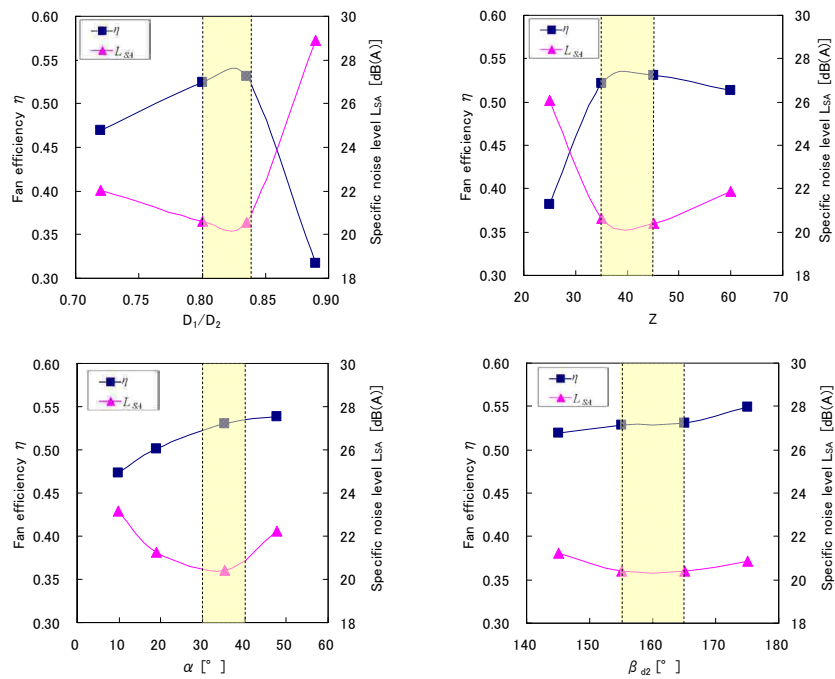
3・5 翼入口角の影響

翼入口角 $\beta_{d1}=50^\circ$, 70° , 90° (表1のNo.14,3,15に対応)と変化させたときの ϕ - ϕ , η - ϕ , L_A - ϕ , L_{SA} - ϕ の各特性の実験結果を図18に示す. この結果から、翼入口角を変化させても送風性能、ファン効率、騒音への影響は少ないことがわかる. 周波数特性、翼間流れもほとんど変化は見られなかったため、これらの図については省略する. 多翼送風機では一般的に、翼における半径方向速度成分に対して周方向速度のほうが大きいため、翼入口における相対流入角度は 30° 程度となる. 一般的に用いられる翼入口角 $\beta_{d1}=50^\circ \sim 90^\circ$ の条件においては、ほぼすべての場合に前縁剥離を生じるために翼入口角の影響は結果には現れないと考えられる.

Fig.18 Influence of β_{d1} on fan characteristics

3・6 各パラメータに対する性能特性

以上の検討から $\phi=0.22$ において各パラメータに対するファン効率, 比騒音の特性を図 19 に示す. 各パラメータに対してファン効率と比騒音が良好になる範囲としては, $D_1/D_2=0.8\sim0.84$, $Z=35\sim45$, $\alpha=30^\circ\sim40^\circ$, $\beta_{d2}=155^\circ\sim165^\circ$ であることが分かる. なお, β_{d1} については性能変化がほとんど見られなかったため図示しない.

Fig.19 Characteristic of η and L_{SA} for each parameter

4. 結 言

内外径比 D_1/D_2 、羽根枚数 Z 、傾斜角 α 、翼出口角 β_{d2} 、翼入口角 β_{d1} の各条件が送風性能と騒音に及ぼす影響について、系統的な実験的検討を行い、合わせて、2次元単独翼のCFD解析を用いて翼間流れと関連付けて調査した結果、以下の結論を得た。

- (1) 内外径比 $D_1/D_2=0.8\sim0.84$ 、羽根枚数 $Z=35\sim45$ 、傾斜角 $\alpha=30^\circ\sim40^\circ$ 、翼出口角 $\beta_{d2}=155^\circ\sim165^\circ$ を同時に満たすとき、ファン効率は高くなり、比騒音は低くなる。一方、翼入口角 β_{d1} の違いに対しては、送風性能、ファン効率、騒音への影響は少ない。この条件においては、前縁剥離した流れは、後続翼の正圧面に沿って流れ、その後、前方翼の負圧面に再付着して速度すべりの少ない状態で流出されることが明らかになった。
- (2) 翼間における主な損失及び騒音発生源は、負圧面前縁から後縁にかけて剥離泡の周囲を取り巻いているせん断層部、再付着部、後縁下流直後における剥離によって生成される微小な死水領域と流出主流とのせん断領域部にあると考えられる。
- (3) 内外径比が大きく、傾斜角が小さい場合は、出口速度のすべりが大きくなることによって、送風性能低下及びファン効率低下が著しくなると言える。この条件では、騒音レベルは広帯域で増大し、特に 400～700Hz の増大が顕著となる。これは、前縁剥離が再付着しないことが主な要因であり、この場合の羽根枚数の増加の効果はほとんどない。
- (4) $Z=60$ のように羽根枚数が多い場合は、翼間隔が小さくなることで流出速度が高くなり、さらに間隔が狭くなったことで翼出口付近にて翼間の流れは変動が小さくなるものの、せん断層から発生する渦によると考えられる高周波数側騒音レベルが増大する傾向になると言える。

本研究の一部はNPO 法人北関東産官学研究会からの補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 安達勤, 杉田尚弘, 山田洋介, “シロッコファンの性能に関する研究 (羽根形状の最適条件について)”, ターボ機械, Vol29-2 (2001), pp. 78-86.
- (2) 伊藤孝宏, 御法川学, 長松昭男, 鈴木昭次, “小型多翼送風機の性能と騒音に関する実験的研究 (スクロールケーシング緒元の影響)”, 日本機械学会論文集 B 編, 72 巻, 720 号 (2006), pp. 1867-1874.
- (3) 児玉好雄, 林秀千人, 荻野和郎, 野津仁志, “多翼遠心ファンの空力特性と騒音に関する研究”, 日本機械学会論文集 B 編, 72 巻, 721 号 (2006), pp. 2178-2185
- (4) 川口清司, 門田茂, 鈴木昌彦, 松井数馬, 菊山功嗣, “多翼ファン低騒音化の研究 (第 2 報, ファン翼間流れと圧力変動)”, 日本機械学会論文集 B 編, 60 巻, 570 号 (1994), pp. 458-463
- (5) 森主憲, “多翼ファンの騒音発生源”, 日本機械学会論文集 B 編, 57 巻, 543 号 (1991), pp. 3837-3844
- (6) 山崎進, 佐藤良次, 大熊洋一郎, “多翼送風機の空力性能に関する研究”, 日本機械学会論文集 B 編, 53 巻, 490 号 (1987), pp. 1730-1735
- (7) 佐々木壮一, 児玉好雄, 畠山真, “多翼シロッコファンの空力特性に及ぼす混合損失の影響”, 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻, 701 号 (2005), pp. 72-79
- (8) 佐々木壮一, 児玉好雄, 畠山真, “多翼ファンから発生する広帯域騒音に及ぼすカルマン渦列の影響”, 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻, 711 号 (2005), pp. 2686-2693