

## 二重反転式軸流送風機の流体力学的特性と 騒音特性に関する実験的研究\*

(第1報, 軸間距離, 電動機の支持形態の影響)

児玉好雄<sup>\*1</sup>, 林秀千人<sup>\*1</sup>

深野徹<sup>\*2</sup>, 田中清裕<sup>\*1</sup>

### Experimental Study on the Characteristics of Fluid Dynamics and Noise of a Counter-Rotating Fan

(1st Report, Effects of the Supporter Shape of the Electric Motor and the Distance  
between Two Rotors on the Characteristics)

Yoshio KODAMA, Hidechito HAYASHI,  
Tohru FUKANO and Kiyohiro TANAKA

An experimental investigation of a counter-rotating fan was conducted with special attention to the effects of the supporter shape of the electric motor and the distance between two rotors on the fluid dynamic and fan noise characteristics. A comparison of the fan noise and the fluid dynamic characteristics between the counter-rotating fan and a two-stage rotor fan was also made. As a result it was concluded that the noise generated from a symmetrically supported fan was lower by 3 to 6 dB than that from an asymmetrically supported fan, and the fluid dynamic characteristics of the former were superior to those of the latter. The larger the distance between two rotors is, the lower the fan efficiency and the fan noise are. Although the fluid dynamic characteristics of the counter-rotating fan are superior to those of the two-stage rotor fan, the counter-rotating fan can't be recommended yet because it generates from much more noise than the latter.

**Key Words:** Fluid Dynamic Characteristics, Counter-Rotating Fan, Two-Stage Rotor Fan, Fan Noise, Discrete Frequency Noise

#### 1. ま え が き

二重反転式軸流送風機は2個の動翼を互いに反対方向に回転させる方式の送風機であり、静翼の代わりに後段動翼を設置したものである。この動翼は速度の旋回成分のエネルギーを回収すると同時に、流体に圧力を加える働きをする。このため、通常の二段式送風機よりも高効率で高圧力が得られるが、騒音が非常に高いといわれている。この種の機械は航空機やヘリコプタなどのプロペラに応用され、航空機の場合には通常のプロペラ機に比べ燃料が30%も節約できた例が報告されている<sup>(1)</sup>。Hanson<sup>(1)</sup>は自由空間内の二重反転式プロペラの干渉騒音についての理論式を提示し、両羽根車の干渉によって種々の周波数の干渉騒音が発生することを示している。また、両羽根車の羽根枚数と回転数が同一の場合には2倍音、4倍音、6倍音など翼通過周波数の偶数倍に音圧レベルの高い干渉騒音が発生すると述べている。

Fujiiらは自由空間内に設置したダクトなし3枚羽根の二重反転式ファンを用いて2個の動翼の回転数が

等しい場合と等しくないの発生騒音に関する実験を行っている<sup>(2)</sup>。前者では、羽根通過周波数とその高調波で干渉騒音が、後者では種々の周波数の干渉騒音が発生することを示している。Janardan-Gliebeはダクトなし二重反転式ファンから放射される干渉騒音について議論している<sup>(3)</sup>。この論文によれば、(1)前段動翼の後流と後段動翼との干渉、(2)ポテンシャル干渉、(3)前段動翼の翼端渦と後段動翼との干渉の3種類の干渉があり、第3番めの干渉が放射騒音に最も大きい影響を与えると述べている。Ikuiは二重反転式軸流送風機の揚程と効率について理論と実験の両面から研究を行うとともに単段と二段の送風機的全騒音レベルも管内の数点で測定している<sup>(4)</sup>。

しかしながらダクト付き二重反転式送風機の騒音に関する研究はかなり少なく、まだ不明な部分が多い。このような背景に立脚して、本研究では電動機の支持形態、動翼間の軸間距離が騒音および流体力学的特性に及ぼす影響について実験的に研究するとともに通常の二段式送風機との特性の良否についても議論する。

#### 2. おもな記号

$a_0$ : 音速 m/s

$B_F$ : 前段動翼枚数

\* 原稿受付 平成5年12月24日。

<sup>\*1</sup> 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14)。

<sup>\*2</sup> 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

- $B_R$  : 後段動翼枚数
- $C$  : 翼弦長 mm, mm
- $D_R$  : 動翼直径 m, mm
- $f$  : 周波数 kHz, Hz
- $H$  : 圧力ヘッド mmAq
- $k$  : 整数
- $K_S$  : 比騒音レベル dB
- $L$  : 軸動力 kW または動翼間の距離 m, mm
- $m$  : ロブ数
- $M_m$  : ロブ数  $m$  の先端マッハ数
- $M_m^*$  : 臨界先端マッハ数
- $n$  : 高調波の次数
- $N$  : 回転数 rpm, rps
- $P_T$  : 送風機全圧 Pa
- $Q$  : 送風機流量  $m^3/s$ ,  $m^3/min$
- $R$  : 半径方向の距離 m, mm
- $R_0$  : 動翼半径 m, mm
- $U$  : 翼先端の周速度 m/s
- $V_x$  : 絶対速度の軸方向成分 m/s
- $V_r$  : 絶対速度の半径方向成分 m/s
- $V_\theta$  : 絶対速度の円周方向成分 m/s
- $W_1$  : 入口相対速度 m/s
- $Z$  : 軸方向距離, 音源と観測点との軸間距離 m, mm
- $\eta_T$  : 電動機と送風機の総合効率
- $\lambda$  : 動力係数
- $\nu$  : ハブ比
- $\rho$  : 空気の密度  $kg/m^3$
- $\phi$  : 流量係数
- $\psi$  : 圧力係数

3. 実験装置および方法

図1は二重反転式軸流送風機(以下CRファンと呼ぶ)の実験装置の概要を示したものである。装置の全長は約11mで吸込口にはベルマウスが、吐出し口には流量調整用のダンパが設置されている。送風機下流側にある内径624mmの円管にはJIS規格に従った整流格子と流量測定用のオリフィス、静圧孔が設置され

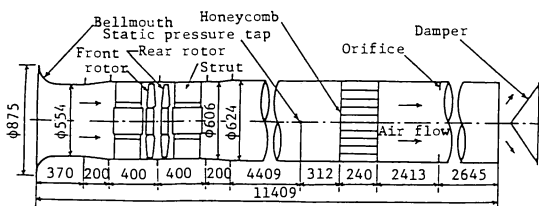
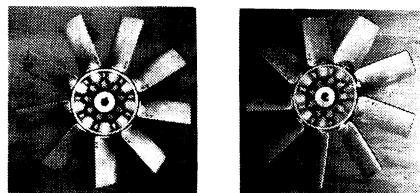


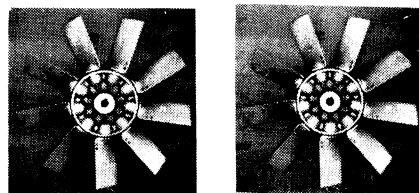
図1 実験装置の概要

ており、この円管は広がり角6°のテーパ管で送風機と連結されている。図2は供試羽根車を示したもので、市販品である。この羽根車の外径は600mm、ハブ比は0.38であり、アルミニウム合金で造られている。翼形はクラークY形に近い形をしており、任意に取付角を変えることができる。平均の翼先端すきまは約2.5mmである。二重反転式のファン[図2(a)]は前段動翼枚数 $B_F$ と後段動翼枚数 $B_R$ がともに9枚で、動翼先端間距離は80mmである。これをCR99ファンと名付ける。動翼間の軸方向距離は、60mmのスペーサおよび230mmのダクトを2個の動翼の間に挿入して変えた。二段方式ファン[図2(b)]はCR99ファンの前段動翼とまったく同じ羽根車を11枚の円弧静翼の上流側と下流側に配置したもの(TS99ファンと呼ぶ)である。これらの動翼は同方向に同じ周速度で回転する。翼先端における前段動翼後縁と静翼前縁、静翼後縁と後段動翼前縁の先端軸間距離はいずれも約83mmである。

図3は電動機の支持形態を示したものである。市販のものは図3(b)であるが、この場合支持部が非対称なため羽根車に流入する流れが非対称となり、これと羽根車とが干渉して軸方向に減衰しない干渉騒音を発生させる恐れがある<sup>(9)</sup>。これを防止するために図3(a)に示す対称な支持形態のものを製作した。この装置では、電動機は4枚の支持板で対称に支持された厚さ5mmの円筒の中に固定されている。図3(a)の形態を対称支持(SSと略記)、図3(b)を非対称支持(AS)と呼ぶ。表1は9枚動翼の主要諸元を示したもの



(a-1) 前段動翼 (a-2) 後段動翼  
(a) 二重反転式軸流送風機(CR99ファン)

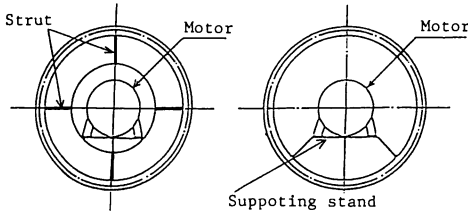


(b-1) 前段動翼 (b-2) 後段動翼  
(b) 二段方式軸流送風機(TS99ファン)

図2 供試羽根車

表1 動翼諸元(9枚羽根)

	Tip	Mean	Hub
Radius mm	300	227	115
Stagger angle	60°	53°	42.5°
Blade inlet angle	67.5°	60.5°	50°
Blade outlet angle	56.5°	49.5°	39°
Chord length mm	86	96.5	76.3
Pitch mm	209.4	158.6	80.3
Solidity	0.41	0.61	0.95



(a) 対称支持(SS) (b) 非対称支持(AS)

図3 電動機支持形態

である。なお、角度は軸方向から測定した値である。後段9枚動翼は前段動翼とねじれが逆のほか、食違い角 $\xi$ が後者より4°大きくしているため、入口角、出口角が4°大きくなる以外は前段動翼と同じである。

騒音測定は、通常は送風機の軸中心上のベルマウス端から1.5m上流の点に設置した1/2マイクロホン付き精密騒音計で行い、その出力信号はFFTアナライザで周波数分析した。一方、音の軸方向減衰特性の測定は延長コードの先端にノーズコーン付きマイクロホンを取付け、これを管内に挿入して行った。動翼まわりの流動様相は五孔球形ピトー管を用いて、動翼前・後縁の10mm上・下流の断面を半径方向に10mm間隔に計測した。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 空力特性

4.1.1 二重反転式軸送風機の空力特性 図4は電動機の支持形態が特性曲線に及ぼす影響を回転数 $N$ が約1500rpmについて示したものである。図4中の $\psi$ ,  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $\eta_T$ はそれぞれ圧力係数、流量係数、電動機の動力係数、電動機と送風機の総合効率であり、次式で定義されている。

$$\left. \begin{aligned} \psi &= 2P_T/\rho U^2, \quad \phi = 4Q/\pi(1-\nu^2)D_h^2 U \\ \lambda &= 8L/\rho\pi(1-\nu^2)D_h^2 U^3, \quad \eta_T = \phi\psi/\lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

図4中の○印と△印はそれぞれ対称支持(SS)と非対称支持(AS)の結果を表している。図4から、効率は全流量範囲にわたって両者ほとんど同じであるが、圧力

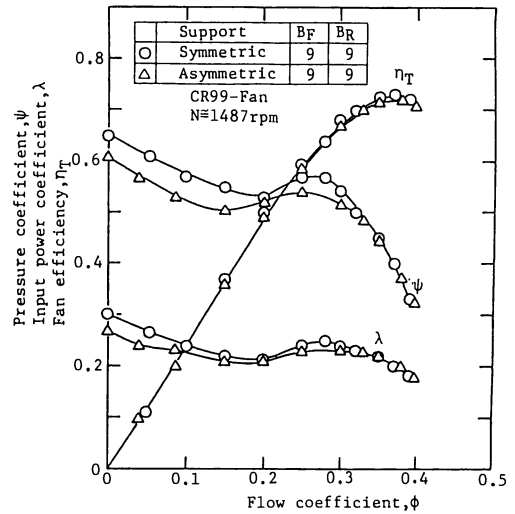


図4 特性曲線に及ぼす電動機支持形態の影響

係数および動力係数は $\phi$ が約0.35より小なる流量係数において後者が前者より低いこと、圧力係数の極大点と極小点の間の領域で表されるサージング領域は前者が後者より狭いこと、などがわかる。すなわち、対称支持にすることにより多少ファンの特性が改善されることがわかる。

4.1.2 動翼下流の流動様相 図5(a), (b)はCR99ファンの動翼下流の流動様相を最高効率点について示したもので、図5中の○印、△印、□印はそれぞれ絶対速度の軸方向、半径方向および円周方向成分である。なお、周方向速度 $V_\theta$ の向きは前段動翼の回転方向を正に取って表している。図5(a)および図5(b)はそれぞれ前段動翼、後段動翼の翼後縁から10mm下流の測定結果である。前段動翼の下流の流れは後段動翼の入口流れとなることを注意しておく。これらの図5から、半径方向成分はいずれの場合もかなり小さい。円周方向成分は前段動翼が後段動翼よりも平均的に大きく、後段動翼後方ではスパン中央部近傍で円周方向成分は小さく流れはほぼ管軸に沿って流れるが、翼先端側とハブ側では大きくなる。特にハブ近傍では出口偏差角が20°以上になっており、ハブ近傍で流れがはく離していることが予想される。一方、軸方向成分はいずれの動翼とも半径距離 $R/R_0$ が0.8近傍に最大値をもち、翼先端側とハブへ向かうにつれて低下する。その低下の割合は後段動翼のほうが大きい。また、CR99ファンの前・後段動翼について入射角と出口偏差角を調べた結果、いずれもハブ近傍を除けば $\pm 3^\circ$ であり、流れは比較的翼に沿って流れている。

4.1.3 動翼間の距離が流体力学的特性に及ぼす影

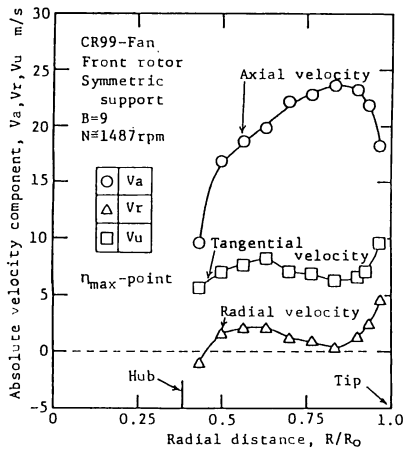
響 4・1・4 項で述べるように CR 99 ファンは回転騒音が非常に高い。このような干渉騒音を低減させるために動翼間の軸間距離を広げる方法がある。軸間距離  $L$  と動翼直径  $D_R$  の比が 0.3 になれば最高効率点の圧力係数は約 0.01, 最高効率率は約 3%, その比が 0.58 になれば, それらはそれぞれ 0.02, 約 6% 低下する(図省略)。これは  $L$  が増加するに従い, 後流が拡散し, また軸方向速度が半径方向に次第に均一化され, 絶対流れの方向が周方向に向けられることにより後段翼に対する入射角が大きくなり, その翼面上の境界層が発達し, 圧力損失が増加するためである。

4・1・4 二重反転式と二段方式との空力特性の差異

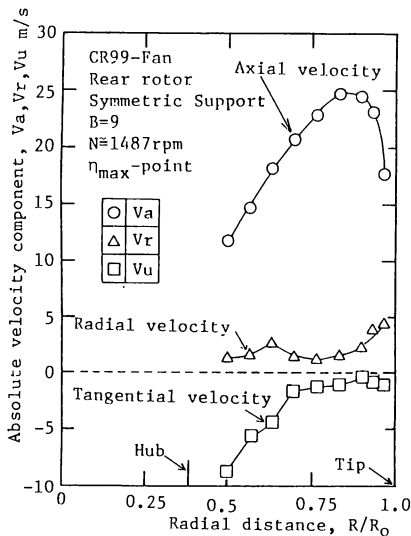
図 6 は 2 種類の送風機の空力特性を比較したものである。最高効率点流量はわずかに CR 99 が TS 99 よ

り高くなり, 圧力係数と効率もかなり高くなること注目される。この主因として, CR 99 は静翼がないため, これに基づく摩擦損失等の圧力損失がないことおよび TS 99 は直列二段式であり, このファンの全圧は抵抗曲線との兼ね合いで決まり, 単純に 1 台のファンの全圧の 2 倍とならないことなどが考えられる。また, サージングの開始点が前者が低流量側にあり, サージング領域も前者が後者に比べて狭い。図 6 中には  $\Delta$  印で前段動翼単段(SS 9)における特性も併記している。単段の最高効率は TS 99 よりも 3% 程度高いが, これは TS 99 の場合, 静翼翼面上の境界層の影響により後段動翼翼面の境界層が厚くなり動翼の摩擦損失が増加したためや衝突損失などのためと考えられる。一方, CR 99 と比較すれば約 7% 効率は低い。これは後段の翼で前段翼の後流の旋回成分をうまく回収したためと考えられる。また, TS 99 の  $\psi$  曲線は SS 9 2 台の直列運転の場合の  $\psi$  より若干低い(図省略)。これは TS 99 の二段の動翼間での損失が大きいことを示している。食違い角が  $26^\circ$  の後段動翼の効率は食違い角  $30^\circ$  の前段動翼よりも最高効率が 5% ほど低い(図省略)。

図 7 は CR 99 ファンと TS 99 ファンの前段および後段動翼の入口相対速度を比較したものである。白抜き記号は CR 99 ファン, 黒塗りの記号は TS 99 ファンの結果である。TS 99 ファンでは前・後段の相対速度はほとんど変わらないが, CR 99 ファンでは全領域にわたって相対速度は後段動翼が前段動翼よりも大きいことがわかる。また, 前・後段動翼ともに相対速度は CR ファンが TS ファンより大きい。騒音が入口相対速度の六乗に比例する<sup>(6)</sup> ことを考慮すれば二重反転



(a) 前段動翼下流側



(b) 後段動翼下流側

図 5 動翼周りの流動様相(CR 99 ファン)

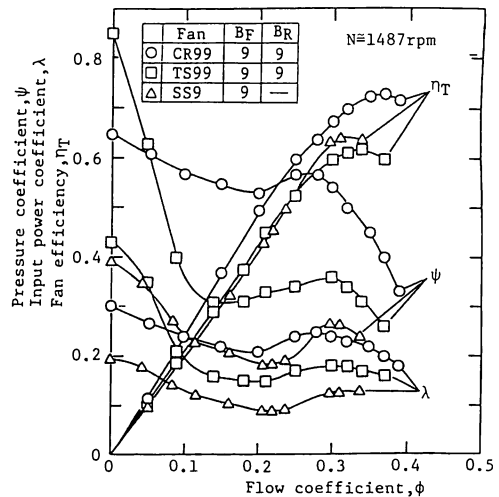


図 6 二重反転式と二段方式の特性曲線の差異

式軸流送風機の騒音は後段動翼に支配されており、CR 99 ファンは TS 99 ファンより騒音が高いことが推測される。

4・2 騒音特性

4・2・1 電動機の支持形態が騒音に及ぼす影響

図 8 は発生騒音の音圧レベル SPL の流量特性を CR 99 ファンの対称支持と非対称支持について比較したものである。図 8 中の白抜きの記号は騒音計の L 特性で、黒塗の記号は A 特性で測定された結果である。SPL(L), SPL(A) とともに、ほぼ全流量域にわたって 3~5 dB 対称支持が非対称支持よりも音圧レベルが低い。対称支持において流量係数  $\phi$  が 0.3 近傍で音圧レベルが低下するのは以下の理由によると思われる。図 6 の単段のファンの最高効率点は 0.3 近傍にあり、流れが翼に沿って流れるが、これより流量が増えても減っても境界層が厚くなるため、翼後流の幅が広くなり、騒音のレベルが上がる。CR 99 ファンで 0.3 より流量が多くても少なくとも後流の幅が広がるので、後段動翼との干渉騒音のレベルは上がり<sup>(8)</sup>、0.3 近傍に音圧レベルの極小点が生じたものと思われる。一方、

非対称支持の場合には偏流との干渉による騒音の発生が支配的となり、 $\phi=0.3$  近傍のこの低減効果が生じず、音圧レベルに極小点が生じなかったものと考えられる。

図 9 は騒音のスペクトル密度分布に及ぼす支持形態の影響を最高効率点流量について示したもので、図 9 (a) は非対称支持の場合を、図 9 (b) は対称支持の場合である。前段、後段動翼の回転数は 1490 rpm 前後であるので、羽根通過周波数(BPF)は 220~223 Hz となる。いずれの場合にも BPF とその高調波で高い音圧レベルのピークが形成されている。ほとんどのピークにおいて対称支持が非対称支持よりも 3~5 dB レベルが低い。Tyler らによれば、動翼と静翼(障害物)との干渉によって生じる干渉騒音のモード  $m$  と管軸方向の減衰の割合は式(2)と式(3)で与えられる<sup>(9)</sup>。

$$m = nB + kV \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta \text{dB} / \Delta X = 8.68 |m| [(M_m^*)^2 - (M_m)^2]^{1/2} / R_0 \dots \dots (3)$$

ここで  $n$  は高調波の次数、 $B$  は動翼枚数、 $k$  は任意の整数、 $V$  は静翼枚数、 $\Delta \text{dB}$  は音圧レベルの減衰量、 $\Delta X$  は軸方向の距離、 $M_m^*$  は臨界先端マッハ数、 $M_m$  は音圧モードのマッハ数、 $R_0$  は動翼の外半径である。本研究における非対称支持の場合、流速の周方向分布にひずみが生じ、結果として障害物を 1 個置いたのと

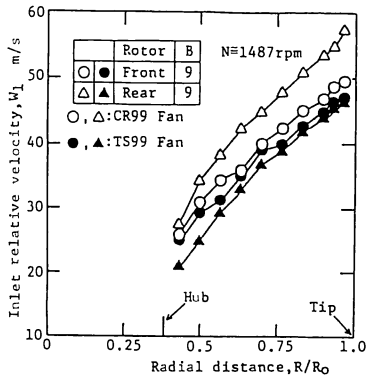


図 7 入口相対速度の送風機による差異

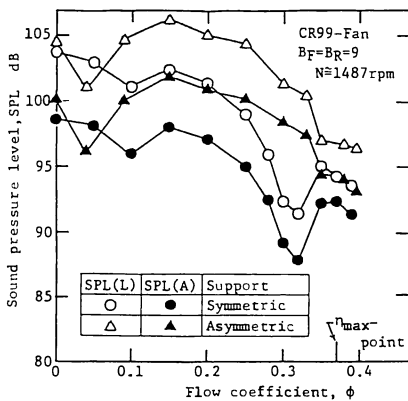


図 8 支持形態が騒音の流量特性に及ぼす影響

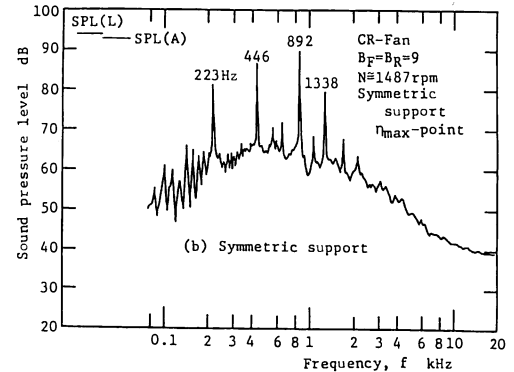
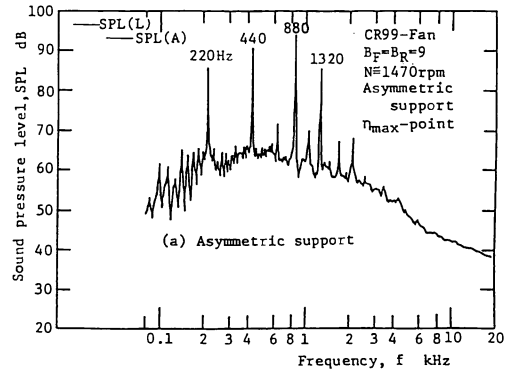


図 9 騒音のスペクトル分布の支持形態による差異

等価となり、 $V=1$ とみなすことができる。したがって、式(2)より  $n=1, k=-9$  において  $m=0$  となり、管軸方向に減衰しないモードの音が発生することになる。非対称支持が対称支持よりも羽根通過周波数(BPF)とその高調波において音圧レベルが高いのはこのためである。

図10は騒音のスペクトル密度分布に及ぼす流量の影響を示したもので、図10中の実線、一点鎖線および破線はそれぞれ最高効率点、圧力係数極大点および圧力係数極小点におけるものである。図10から、離散周波数騒音はいずれの場合も存在していること、流量係数が小なるにつれてほぼ全周波数域で音圧レベルが高くなること、などがわかる。これは流量が減少するにつれて流れが翼面に沿わなくなり、翼面上の境界層が厚くなることと翼に対する相対速度が増加するためであると考えられる。一方、二次と四次の高調波が高いのは前段と後段の羽根車の動翼枚数が同じであることによると推測される。文献(1)によれば、このような場合に動翼間の干渉によって生じる干渉騒音のモード  $m$  は式(4)で表される。

$$m = (n - 2k)B \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $n$  は自然数、 $k$  は整数 ( $\cdot -2, -1, 0, 1, 2 \cdot \cdot$ ) である。モード  $m$  が上述の式となるのは、前段動翼の後流を後段動翼が静翼の場合に比較して1回転当たり2倍切るからとされている。このことは式(2)の  $V$  を  $2V$  と置き換えられることを意味している。これに加えて2個の動翼の回転方向が逆であることを考慮すれば式(4)が得られる。式(4)において  $n=2, 4 \cdot \cdot$  の偶数においてのみ  $m=0$  となることがわかる。この場合、式(3)から明らかのようにこれらの音は管軸方向に減衰しない。このことは前・後段の動翼枚数が等しい二重反転式軸流送風機の特徴といえる。

図11は対称支持におけるCR99ファンとTS99フ

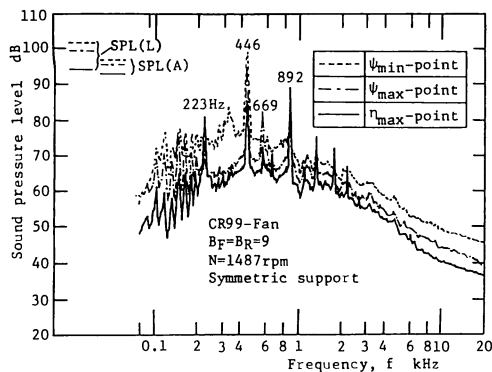


図10 騒音のスペクトル密度分布の流量による差異

ァンのBPFとその二、四次の高調波の管軸方向の減衰特性を示したものである。CR99ファンは白抜きの記号で、TS99ファンは黒塗りの記号で表している。図11中の破線は  $m=9$  (223 Hz) の騒音の理論減衰こう配である。騒音測定は動翼前縁から50 mm上流の断面を基準面として、二乗平均半径位置を管内では20~40 mm、管外では500 mm 間隔で行っている。CR99ファンの場合、基本周波数(○印)は基準断面から40 mm上流の断面までは  $m=9$  の理論線に乗って減衰し、この断面から上流ではほぼ  $m=1$  の減衰こう配で減衰した後、大気中に放射される。これはダクトが卵形にひずんでいるため翼先端とダクトとの干渉<sup>6)</sup>によって  $m=1$  のモードが発生したものと考える。すなわち、このような場合  $V=2$  とみなせるから式(2)に  $n=1, B=9, k=-2, V=2$  を代入すれば管内減衰が最も悪い場合を示す  $|m|$  の最小値は1となる。2倍音(△印)は  $m=0$  となるため減衰しないはずであるが、 $Z=0.25$  mより上流へ向かうにつれて  $m=1$  の減衰こう配よりゆるやかなこう配で減衰している。これは測定の結果管内に223 Hzの定在波が存在している[文献(7)の図9参照] ことと、ベルマウス入口部の広がりのためと思われる。4倍音(□印)は  $m=0$  となるためほとんど減衰しないでベルマウス端から自由空間へ放射される。

TS99ファンの場合には、基本周波数音(●印)はCR99ファンとほぼ同様の減衰特性を示す。2倍音(▲印)は基準面(4 cm)から10 cmまでほとんど減衰していない。これは式(2)に  $n=2, B=9, k=-9, V=2$  を代入すれば明らかのようにダクトと動翼との干渉によって  $m=0$  モードの干渉騒音が発生したためと考えられる。基準面では音圧レベルは105 dBであり、CR99ファンよりも約15 dB低い。4倍音(■印)においてもCR99ファンには  $m=0$  の干渉騒音の発生が

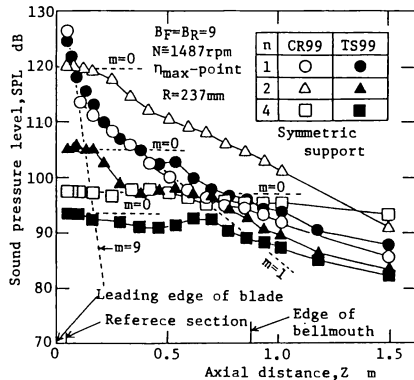


図11 離散周波数騒音の軸方向減衰特性

見られる。以上のことから二重反転式軸送風機に関しては動翼間の干渉騒音のモードが零にならないように十分注意する必要がある。このことについては統報にて議論する。

動翼回転数が全帯域騒音に及ぼす影響をCR 99ファンの最高効率点について調べた。この結果、騒音の増加のこう配はSPL(L)およびSPL(A)ともに $60 \log_{10} N$ に近く、音響出力が回転数の六乗に比例し、音源としては双極子形であることがわかった(図省略)。

**4・2・2 軸間距離の影響** 図12は2個の動翼間の軸間距離 $L$ が全帯域騒音に及ぼす影響を最高効率点について示したものである。音圧レベルは $L/D_R$ が0.12から0.58まで遠くなれば、 $L$ 特性で約2.5dB、 $A$ 特性で3dB音圧レベルは低下する。これは距離が広がるにつれて翼後流が拡散されて後流干渉が弱められるためである。

**4・2・3 二重反転式と二段方式の騒音の差異** 図13は二段方式(TS 99)送風機の最高効率点近傍流量時における騒音のスペクトル密度分布を示したものである。CR 99ファン[図9(b)]に比較してTS 99ファンでは、離散周波数騒音の音圧レベルは基本周波数

(223 Hz)を除けば低い。したがって、TS 99ファンの全帯域騒音SPL(L), SPL(A)はいずれもCR 99ファンより5~6dB低くなる。

図14は全帯域騒音レベルの流量特性を2種類の送風機について比較したもので、ほぼ全流量域でTS 99ファンがCR 99ファンより低い。これは4・1節で述べたように後段側の入口相対速度が低いこと、二次の高調波以上の高調波において干渉騒音のレベルが低いことにその原因がある。したがって、騒音の面からは前段と後段の動翼枚数が等しい場合に限定すれば、二重反転式が二段方式に比べて不利であるといえる。

**4・3 比騒音レベル** 空力特性と騒音特性を加味して送風機の良否を判断する目安の一つに比騒音レベル $K_s$ がある。 $K_s$ は騒音レベルSPLに流量 $Q$  [ $m^3/min$ ]と全圧 $P_r$  [Pa]を加味したもので次式で表される。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10}(QP^2) + 20 \dots\dots\dots (5)$$

右辺第3項の数値は圧力を工学単位からSI単位に変換したために生じたものである。図15はCR 99ファンについて電動機の対称支持と非対称支持の比騒音レベルの差異を示したものである。図15中の $K_s(L)$ と $K_s(A)$ は音圧レベルの $L$ 特性と $A$ 特性に基づく比騒音レベルを意味している。対称支持は非対称支持に比べてほぼ全流量域にわたって $K_s(L)$ ,  $K_s(A)$ ともに3~6dBレベルが低くなっており、対称支持にすることによって送風機の特性がかなり改善されることがわかる。これは主として対称支持の場合音圧レベルそのものが低いことに加えて全圧が高いことによる。

図16は対称支持にした場合のCR 99ファンとTS 99ファンの比騒音レベルの流量による変化を示したもので、図16中の白抜きと黒塗りの記号はそれぞれ $L$ 特性と $A$ 特性の音圧レベルに基づいた比騒音レベ

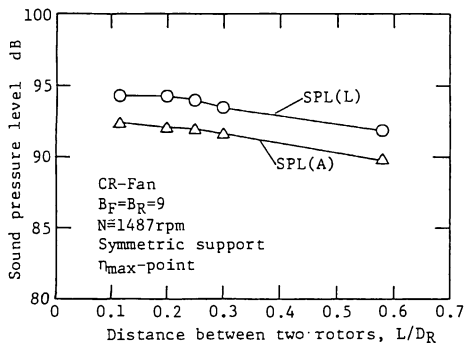


図12 軸間距離が全帯域騒音に及ぼす影響

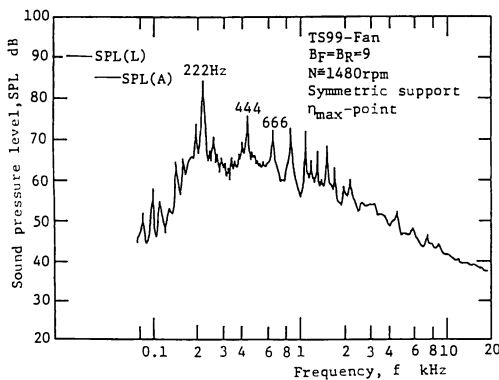


図13 TS 99ファンのスペクトル密度分布

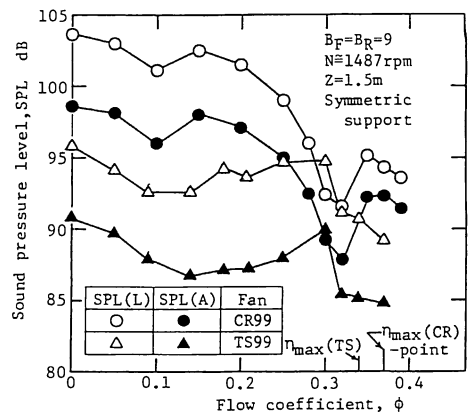


図14 全帯域騒音の送風機による差異

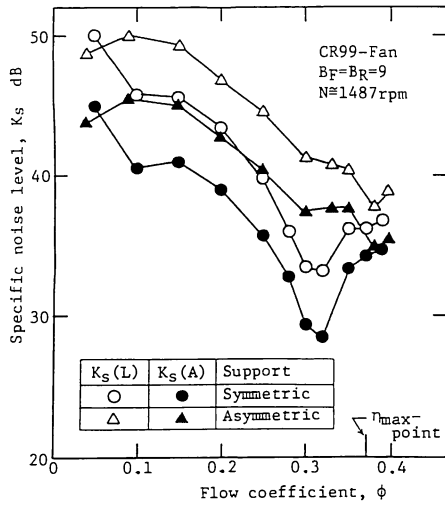


図 15 比騒音レベルに与える電動機支持形態の影響

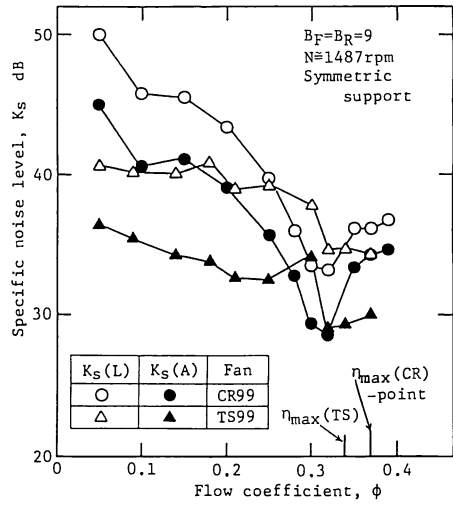


図 16 比騒音レベルの送風機による差異

ルである。また、○印、●印はCR 99 ファンの結果を、△印、▲印はTS 99 ファンの結果を示す。流量係数が0.28~0.33の流量域ではCR 99 ファンがTS 99 ファンよりも低い、この領域以外では逆になっている。ファン全圧は全流領域において前者が後者より高いことを勘案すれば、この原因は動翼間の干渉騒音によっていることは明らかである。したがって、 $m=0$  モードの干渉騒音が発生しないような前・後段動翼の枚数の組合せを設計段階で選定すべきである。

5. 結 論

本研究では二重反転軸送風機の電動機支持形態、動翼間の軸間距離が流体力学的特性と騒音特性に及ぼす影響を実験的に調査するとともに通常の二段方式送風機との特性の比較検討を行った。その結果以下の結論を得た。

(1) 電動機の支持形態に関して、非対称支持は対称支持に比べて、圧力係数は0.01~0.03低い。また、非対称支持では流れが円周方向に非一様となるので、偏流と動翼とが干渉して管軸方向に減衰しないモード( $m=0$ )の騒音が発生する。本実験では、支持形態を対称支持にすることによって全帯域音圧レベルで3~5 dB、比騒音レベルで3~6 dBの低下が得られた。

(2) 2個の動翼の軸間距離が広がるにつれて送風機の総効率と音圧レベルはともに低下する。本実験では、間隔を動翼直径の約0.6倍広げると、効率は約6%、音圧レベルは約2.5 dB低下する。これに伴い圧力係数は約0.02低下するので、騒音を加味した送風

機の良否の面からは軸間距離を広げることは特性改善にはならない。

(3) 通常の二段方式送風機(TS 99)は二重反転式送風機(CR 99)に比較して、圧力係数が0.1~0.4、送風機の最高効率が約12%低い。したがって、流体力学的特性の面からは後者が有利といえる。一方、全帯域騒音はほぼ全流量域で後者のほうが高い。これは後段動翼に流入する相対速度が高いことや動翼間の干渉によって $m=0$ の軸方向に減衰しない干渉騒音が発生するためである。また、比騒音レベルは大部分の流量域で前者のほうが低い。したがって、前・後段の動翼枚数が同じ二重反転式送風機のほうが良好な送風機といえる。二重反転式送風機の特性を改善するためには前・後段の動翼枚数の組合せを改善する必要がある。

おわりに本研究に協力していただいた当時長崎大学院生の立山省吾、学部学生の大津信弘、峰哲一、山口明広、装置製作に協力していただいた松下精工(株)の三村雄次郎の諸氏に謝意を表す。

文 献

- (1) Hanson, D. B., *J. Aircraft*, 22(1985), 609.
- (2) Fujii, S., ほか2名, *J. Aircraft*, 23(1986), 719.
- (3) Janardan, B. A. and Glibe, P. R., *J. Aircraft*, 27(1990), 268.
- (4) Ikui, T. *Mem.Facul. Eng. Kyushu Univ.*, 17(1958), 105.
- (5) Tyler, J. M. and Sofrin, T. G., *SAE. Trans.*, 70(1962), 309.
- (6) 深野・ほか2名, 機論, 51-463, B(1985), 820.
- (7) 深野・ほか3名, 機論, 43-370(1977), 2199.
- (8) 妹尾・児玉, 機論, 39-320(1973), 1246.
- (9) 深野・ほか5名, ターボ機械, 9-10(1981), 22.