

二重反転式軸流送風機の流体力学的特性と 騒音特性に関する研究

(電動機支持形態および動翼間の軸間距離の影響)

児玉好雄* ・ 林秀千人*
田中清裕* ・ 山口明広**

Characteristics of Fluid Dynamics and Noise in Counter-Rotating Fan

by

Yoshio KODAMA, Hidechito HAYASHI
Kiyohiro TANAKA and Akihiro YAMAGUTI

The effects of asymmetry of the electric motor support, the distance between two impellers on the fluid dynamic characteristics and the fan noise were investigated experimentally with a counter-rotating fan. Moreover, the comparison of the fan noise and the fluid dynamic characteristics between the counter-rotating fan and a two stage rotor fan was made. It is concluded from these experimental results that the fan noise generated from symmetric support fan is lower 3 to 6 dB than that of asymmetric support fan and the fluid dynamic characteristics of the former is superior to that of the latter. The distance between two impellers is larger, the fan efficiency and the fan noise become lower. The fluid dynamic characteristics of the counter-rotating fan with 9-blades is superior to that of the two stage rotor fan, but the noise generated from the former is higher than that of the latter.

1. まえがき

二重反転式軸流送風機は二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、静翼が不要となるためその分内部損失が低減でき、したがって送風機効率を向上させることができるのが特徴の一つである。このため、今日ではこの種の機械は航空機やヘリコプタ等のプロペラに 응용され、航空機の場合には通常のプロペラ機に比べて燃料が30%も節約できた例が報告されている⁽¹⁾。D.B. Hanson は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倍音など基本周波数の偶数倍にモード数が零となる干渉騒音が発生すると述

べている⁽¹⁾。このモードの音がダクト付き送風機で発生すれば、音は減衰せずにダクト内は伝ばし高いレベルを保ったまま大気中へ放射されることになる^{(2),(3)}。S. Fujii らは自由空間内に設置したダクト無し3枚羽根の二重反転式ファンを用いて二個の羽根車の回転数が等しい場合と不等の場合の発生騒音の実験を行なっている⁽⁴⁾。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。B.A. Janardan と P.R. Giebe 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⁽⁵⁾。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)前段動翼の翼端うずと後段動翼との干渉の3種類の干渉があり、第三番目の干渉が放射騒音に最も大きい

平成4年9月28日受理

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

**大学院機械工学専攻 (Graduate Student, Department of Mechanical Engineering)

影響を与えるとのべている。T.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なうとともに一段と二段の送風機の全騒音についても実験を行なっている⁶⁾。また、一段送風機に比較して二段送風機は約20dB程度音圧レベルが高くなることを示している。

しかしながら二重反転式軸流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を行った。

2. おもな記号

- B: 動翼枚数
- 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
- R: 半径方向の距離 m, mm
- R_0 : 動翼半径 m, mm
- U: 動翼外縁の周速度 m/s
- V: 絶対速度 m/s

- W: 相対速度 m/s
- Z: 軸方向距離 m, mm
- η : 電動機と送風機の総合効率
- λ : 動力係数
- ν : ハブ比
- ρ : 空気の密度 kg/m³
- ϕ : 流量係数
- ψ : 圧力係数

3. 実験装置および方法

図1は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を、吐き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、静圧孔が設置されており、この円管は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、任意に取り付け角を変えることが出来る。平均の翼先端すきまは約2.5mmである。翼間距離は長さ30mm, 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。なお、送風機は市販品である。電動機の支持形態は市販のものは図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。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。前者を対称支持(SSと略記)、後者を非対称支持(ASと呼ぶ。表1は前段動翼諸元を示したものである。なお、角度は軸方向から測定した値である。後段動翼は前段動翼とねじれが逆で、食い違い角を後者より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。

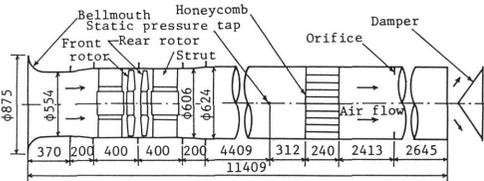


Fig. 1 Experimental Apparatus

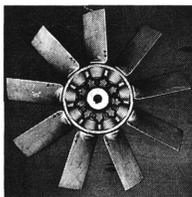


Fig. 2 Impeller

Table 1 Main Dimensions of the Impeller (Front Impeller)

| | Tip | Mean | Hub |
|--------------------|-------|-------|-------|
| Radius mm | 300 | 227 | 115 |
| Stagger angle | 62.0° | 57.0° | 41.0° |
| Blade inlet angle | 67.0° | 60.5° | 46.0° |
| Blade outlet angle | 59.5° | 54.0° | 38.5° |
| Chord length mm | 86 | 97 | 72 |
| Pitch mm | 209 | 158 | 80 |

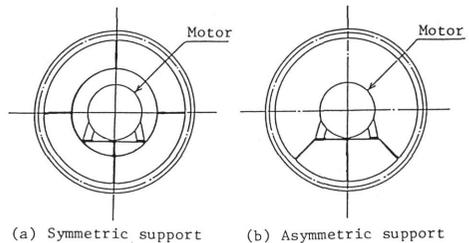


Fig. 3 Supporting Form of Motor

騒音測定は通常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ない、またその出力信号はFFTアナライザで周波数分析される。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り付け、これを管内に挿入して行った。

4. 実験結果および考察

4.1 電動機の支持形態が特性に及ぼす影響

4.1.1 空力特性 図4は支持形態が特性曲線におよぼす影響を回転数Nが1500rpmについて示したものである。前段動翼枚数(B_F)と後段動翼枚数(B_R)はともに9枚である。図中のφ_T, φ, λ, η_Tはそれぞれ圧力係

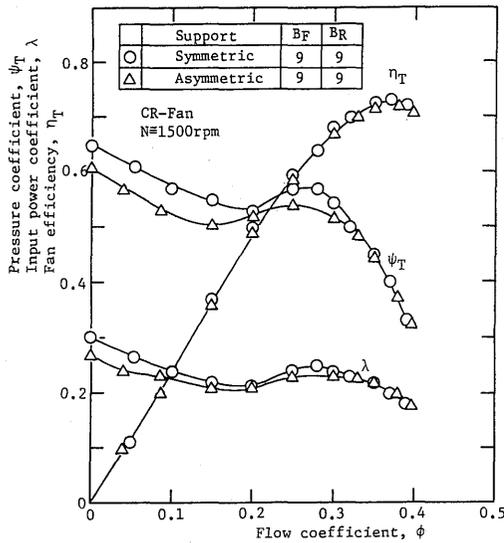


Fig. 4 Characteristic Curves

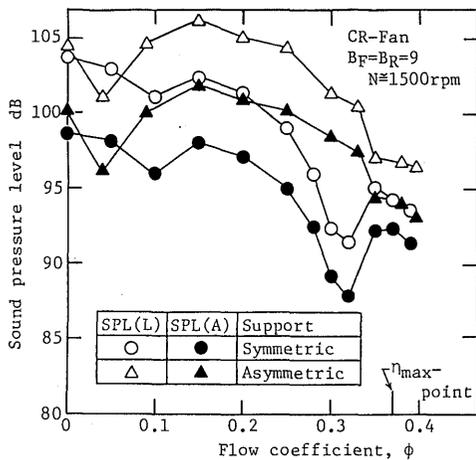


Fig. 5 Effects of Flow Coefficient on Sound Pressure level

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, 次式で示される。

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

また, ○印と△印はそれぞれ対称支持(SS)と非対称支持(AS)の結果を表わしている。この図から, 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, 圧力係数および動力係数はφが0.35近傍より小さな流量係数において後者が前者より低い。また, 圧力係数の極大点と極小点の間の領域で表わされるサージング領域は後者が広いことなどが分かる。

4.1.2 騒音特性 図5は羽根車回転軸中心上の, ベルマウス端から1.5m上流の点で計測された音圧レベルSPLの流量特性を対称支持と非対称支持について比較したものである。図中の白抜ききの記号は騒音計のL特性で, 黒塗りの記号はA特性で測定された結果である。SPL(L), SPL(A)ともにほぼ, 全流量域にわたって3~5dB対称支持が非対称支持よりも音圧レベルが低い。

図6は騒音のスペクトル密度分布におよ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6(a)は非対称支持の場合を, 図6(b)は対称支持の場合

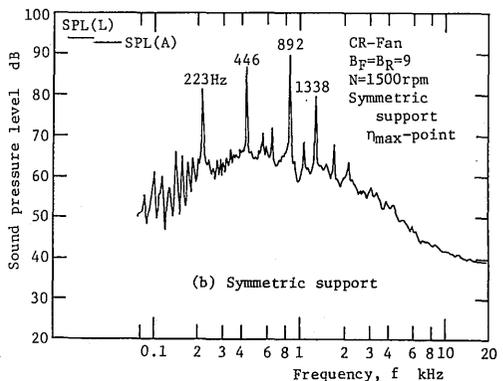
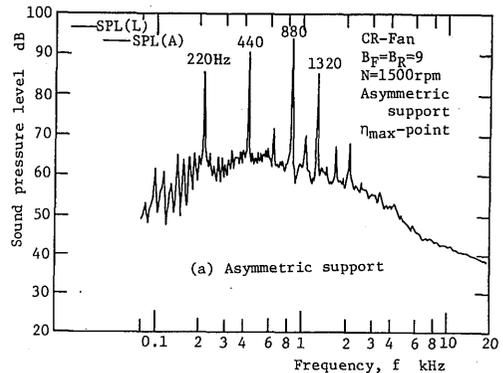


Fig. 6 Spectral Distribution of Fan Noise

である。前段、後段動翼の回転数は約1500rpmである。いずれの場合にも高い音圧レベルのピークを有する離散周波数騒音の発生がみられるが、これらの音は羽根枚数と回転数の積で示される羽根通過周波数とその高調波の騒音である。文献(1)によれば前段側と後段側の動翼の枚数と回転数が等しい場合には2次、4次、6次……において動翼間の干渉による干渉騒音のモードが零となる。このモードの音は平面波となり、Tylerらの理論⁽²⁾によれば管軸方向に減衰しない。対称支持にすることでこれらの音を約3 dB低下させられる他、基本周波数(223Hz)で5 dBの低減させることが出来たが、これは以下の理由による。非対称支持の場合には、動翼に流入する流れは周方向分布に不均一を生じ、結果として上流側に一個の障害物を置いた場合と等価であると考えられる。動翼と障害物との干渉の結果、生じる圧力モード(ロブ数)は式(3)で、軸方向の減衰量は式(2)で与えられる⁽²⁾。この場合偏流と動翼とが干渉するから式(3)において $V=1$ とおけば全ての nB に対して $m=0$ となり、式(2)から明かなようにこの音は管軸方向に減衰しない。このため高いレベルの離散周波数騒音が計測されることになる。

$$\Delta dB/\Delta x = 8.69m[(Mm^*)^2 - (M_m)^2]^{1/2}/R_o \quad (2)$$

$$m = nB + kV \quad (3)$$

ここで ΔdB は音圧レベルの減衰量、 Δx は軸方向の距離、 Mm^* は臨界先端マッハ数、 Mm は音圧モードのマッハ数、 R_o は動翼半径である。 n は高調波の次数($n=1, 2, 3, \dots$)、 B は動翼枚数、 K は整数($K=\dots-1, 0, 1, \dots$)、 V は障害物の数である。前述したように対称支持にすることによって干渉騒音のレベルを3~6 dB低下させることができるがまだ非常に高いレベルの騒音が存在している。これは動翼とダクトの歪との干渉によるものと思われる。これについては、次報で述べる

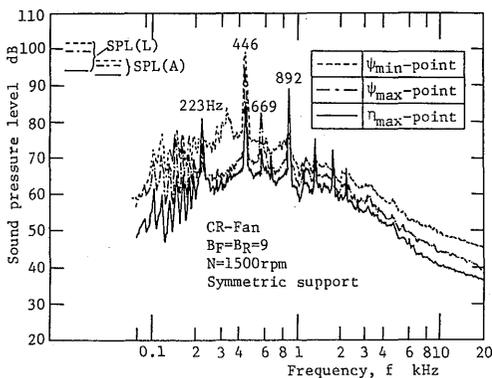


Fig. 7 Effects of Flow Rate on Spectral Distribution of Fan Noise

ことにする。

図7は騒音のスペクトル密度分布におよぼす流量の影響を示したもので、図中の実線、一点鎖線、破線はそれぞれ最高効率率点、圧力係数極大点、圧力係数極小点におけるものである。この図から、離散周波数騒音はいずれの場合も存在していること、流量が小なるにつれてほぼ全周波数帯域で音圧レベルが高くなることなどが判る。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ためと考える。

図8は対称支持の場合の回転騒音(干渉騒音)の軸方向減衰特性を示したものである。図中の破線は式(2)および式(3)から得られる $m=9$ (223Hz)の騒音の理論減衰勾配である。動翼前縁から50mm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20~40mm、管外では500mm間隔で計測している。基本周波数(223 Hz)は基準断面から40mm上流の断面まではほぼ理論

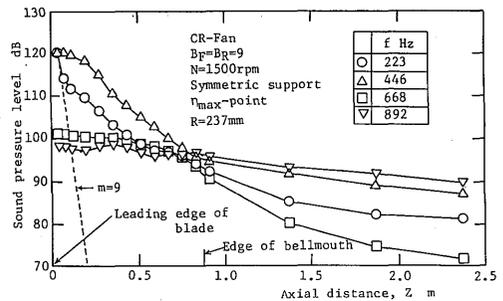


Fig. 8 Decay of the Rotating Noise

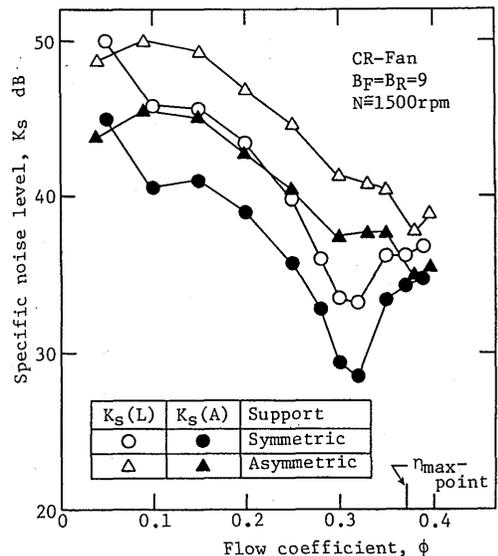


Fig. 9 Comparison of Specific Noise on Symmetric Support with Asymmetric Support of Motor

線に乗って減衰するが、この位置より上流へ行くにしたがって減衰率が低下する。2倍音(446Hz)は基本周波数より減衰が悪い。4倍音(892Hz)は基準面では基本周波数や2倍音に比べて約20dB音圧レベルが低い、管軸方向にほとんど減衰しないためベルマウス端近傍で逆転し高いレベルのまま管外へ放射される。

図9は騒音に流体力学的特性を加味した次式で示される比騒音レベル K_s で送風機の良否を比較したものである。このレベルが低いほど良好な送風機とされている。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10} Q P_r^2 \quad (4)$$

ここで Q (m^3/min) は流量を、 P_r (kg/m^2) は送風機全圧である。対称支持は非対称支持に比べて $K_s(L)$ では、全流量域にわたって3~6 dB、 $K_s(A)$ では、最大流量点近傍では両者はほとんど差がないが、これを除くほとんどの領域で3~6 dBレベルが低いことなどが判る。これは非対称支持が対称支持よりも音圧レベルが高いことと全圧が低いことに起因している。

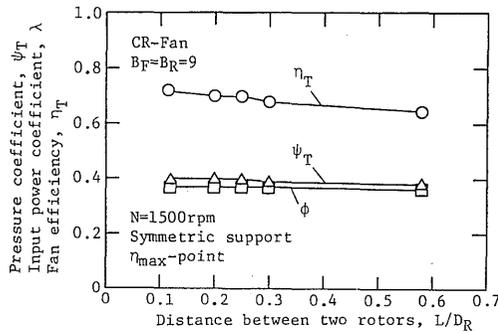


Fig. 10 Effects of the Characteristics on the Axial Distance between Two Impellers

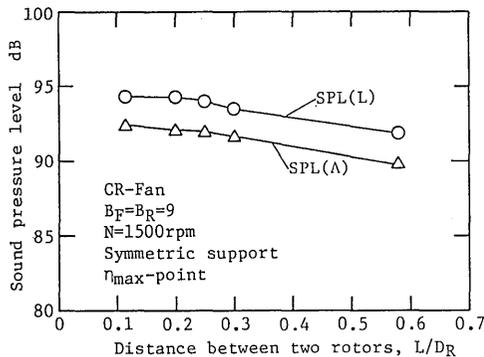


Fig. 11 Effects of the Overall Noise on the Axial Distance between Two Impellers

4.2 動翼間の軸間距離の影響

4.2.1 空力特性 干渉騒音の低減の一方法として動翼と静翼間の軸間距離を広げる方法がある。本研究では2個の動翼間の距離を増加させて騒音と流体力学の両面から実験的に調べた。図10は軸間距離が流量係数 ϕ 、圧力係数 ψ_T 、送風機効率 η_T におよぼす影響を最高効率点について示したものである。横軸には距離 L を羽根車直径 D_R で無次元化した量を用いている。 ϕ や ψ_T の距離による影響はわずかであるが、 η_T は L/D_R が0.3で約3%、0.58で6%低下する。

4.2.2 騒音特性 図11は騒音の軸間距離による変化を示したもので、図中の○印、△印はそれぞれ騒音計のL特性とA特性での測定結果である。市販の状態 ($L/D_R=0.13$) のものを約4.5倍に距離を広げることによりL特性で約2.5dB、A特性で3 dBの減衰が得られた。これは2個の動翼の距離を広げることにより羽根後流が拡散されて後流干渉が弱まったためと思われる。

4.3 二重反転式と二段方式との特性の差異

4.3.1 空力特性 本研究では二段方式(TS)として二重反転式(CR)の前段で用いたものと同じ羽根車を前・後段に取り付けられてそれらの羽根車の間に円弧静翼を設置した送風機を用いている。前段動翼後縁と静翼前縁および静翼後縁と後段動翼前縁の距離は翼先端でいずれも100mmである。また、二重反転式の場合、前段動翼後縁と後段動翼前縁のそれは83mmである。図12は二種類の送風機の空力特性を比較したものである。

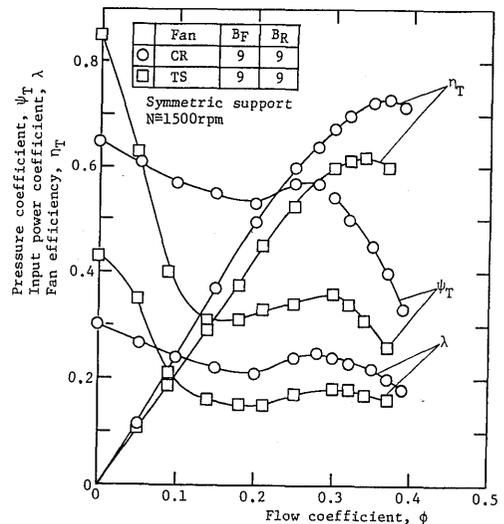


Fig. 12 Comparison of Characteristic Curves of CR-Fan with TS-Fan

最大流量や圧力係数はCRがTSより大きい。特に圧力係数と送風機効率がほぼ全流量域でCRがTSより高いことが注目される。また、サージングの開始点(圧力係数の極大点)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。

4.3.2 騒音特性 図13は二段方式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 [図6(b)参照]に比較してTSの場合、離散周波数騒音の音圧レベルは基本周波数を除けば低い。したがって、全帯域騒音 $SPL(L)$, $SPL(A)$ いずれも5~6 dBほどTSがCRより低くなる。

図14は騒音の流量特性を二種類の送風機について比較したものである。全帯域騒音はほぼ全流量域でTSがCRより低いことが判る。図15は二種類の送風機を比騒音レベル K_s で比較したものである。流量係数 ϕ が0.28~0.33の領域ではCRがTSよりも低いが、この領域以外では逆にTSがCRよりも低くなる。

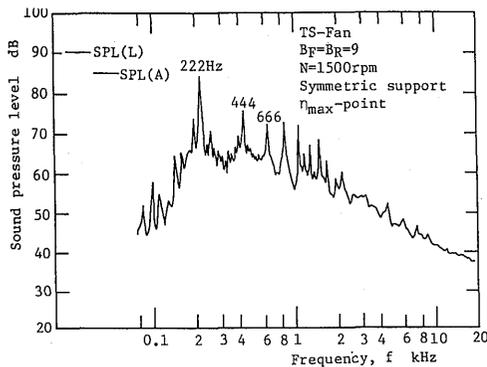


Fig. 13 Spectral distribution of Generated Noise by TS-Fan

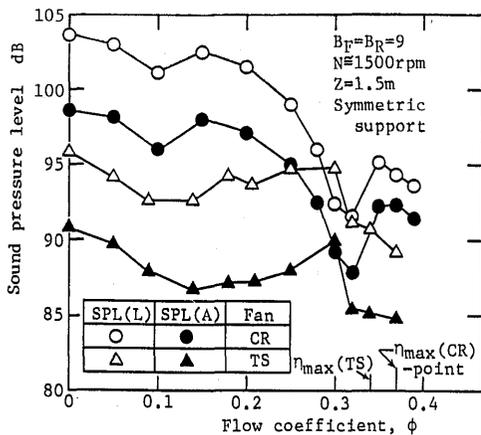


Fig. 14 Comparison of Overall Noise generated from CR-Fan with TS-Fan

5. 結論

本研究では二重反転式軸流送風機の電動機支持形態および動翼間の軸間距離が流体力学的特性と騒音特性におよ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なった。その結果以下の結論を得た。

(1) 電動機の支持形態が非対称支持であれば、圧力係数に多少の低下が見られる。また、この形態のときは流れが偏流するためこれと動翼とが干渉して管軸方向に減衰しないモードの騒音が発生する。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レベルの低下が得られた。

(2) 2個の動翼の間隔を広げると送風機効率, 音圧レベルともに低下する。圧力係数も多少減少するので比騒音レベルで比較した場合軸間距離を広げることは得策ではない。

(3) 通常の二段方式送風機は二重反転式軸流送風機に比較して圧力, 送風機効率ともに低い。しかしながら、動翼同志の干渉騒音が前者は後者より低いので全帯域騒音はほぼ全流量域で二段方式の方が低い。比騒音レベルで比較すれば、流量係数が0.3近傍では、二重反転式がその他の領域では二段方式がレベルは低くなる。二重反転式の送風機の騒音特性を改善するには前・後段の動翼枚数の組合せを考えると、ダクトの歪を小さくすることなどが考えられる。

おわりに本研究に協力していただいた当時長崎大学

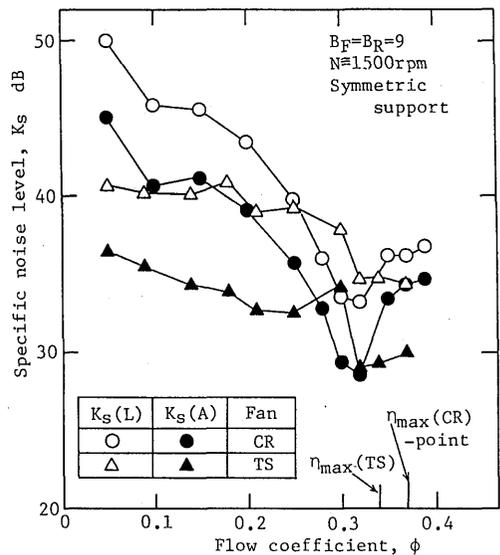


Fig. 15 Comparison of Specific Noise of CR-Fan with TS-Fan

院生の立山省吾，学部学生の井手誠也，徳永政広，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わす。

文 献

- (1) Hanson, D.B., J. Aircraft, 22 (1985), 609.
- (2) Tyler, J.M. and Sofrin, T.G., SAE Trans, 70 (1962), 309.
- (3) 妹尾・児玉, 機論, 39-320 (1973), 1246.
- (4) Fujii, s. et al., J. Aircraft, 23 (1986), 719.
- (5) Janardan, B.A. and Gliebe, P.R., J. Aircraft, 27 (1990), 268.
- (6) Ikui, T., Mem. Facul. Eng. Kyushu Univ., 17 (1958), 105.