

プロペラファンの非一様な環状後流と離散周波数騒音

佐々木壮一*・福田雅治**・向井将伍**

Relation between Discrete Frequency Noise and Non-homogenous Circular Wake of a Propeller Fan

by

Soichi SASAKI*, Masaharu FUKUDA**, Shogo MUKAI**

In order to clarify relation between discrete frequency noise and non-homogenous circular wake of a propeller fan which is used in a rectangular casing, the characteristics of the propeller fans were analyzed by measurement of internal flow. The absolute velocity of main flow domain in the meridional plane of the propeller fan became 30 m/s while the velocity of the inclined plane in the case of 40 degree was decreased to 25 m/s. The velocity fluctuations on the vertical plane in the wake were weakened at the diagonal line of the duct by the velocity deformation formed to the circumferential direction around the impeller. Then the circular wake formed in the propeller fan was broken by the velocity deformation. It is considered that the discrete frequency noise of the propeller fan in the second harmonics became large because the fourteen dynamic rotors and the pseudo four stators made by the non-homogenous circular wake resonated.

Key words : Fan, Resonance, Aerodynamic Noise, Wake, Internal Flow

1. 緒言

電子機器の筐体、エンジンケーシング、空調機器の角ダクトなどで利用されるプロペラファンの後流は、円筒ダクトを基本形状とする軸流ファンのような軸対象の流れとは異なる様相になる。例えば、軸流ファンの場合、設計点近傍での羽根車後流の形状は環状になる。一方、矩形ダクトに取り付けられたプロペラファンの後流はダクト形状の影響を被る。このような回転軸に対して非対称性のある後流には、その形状に依存した固有の振動や騒音の発生が懸念される。リングファンは、このような矩形のケーシングを有すエンジン冷却用ファンとして開発されたものである⁽¹⁾。このファンの羽根車は、翼先端側にリング状のシュ

ラウドを有す特徴がある。Longhouse⁽²⁾は、翼弦長の 6.5%の翼先端隙間におけるリングファンの騒音レベルが一般のベルマウスによるプロペラファンよりも最大 12dB 低減されることを実験的に明らかにしている。高山ら⁽³⁾は、5 枚翼のプロペラファンの全周流れに対して、約 650 万要素を用いた LES 解析を実施している。同研究では、翼通過周波数成分の騒音を除けば、壁面近傍の格子解像度上げることによって広帯域騒音の特性をある程度捕らえることが可能であることが示されている。著者ら⁽⁴⁾は、矩形のケーシングで利用されるリングファンの性能に関する実験的な研究に取り組んできた。これまでの研究で、リングファンの効率は、従来のプロペラファンよりも

平成 22 年 12 月 16 日受理

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

** 生産科学研究科博士前期課程 (Graduate School Student, Graduate School of Science and Technology)

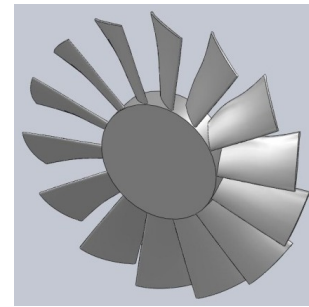
約 12% 向上すること, そのファン騒音は最高効率点近傍で約 3dB 低減されることなどを明らかにした. さらに, このファン騒音の特性には, 離散周波数騒音の影響が大きいことを指摘している. 本研究では, プロペラファンの離散周波数騒音とその後流に形成される環状の流れとの関係を明らかにすることを目的として, 二種類のプロペラファンの羽根車の後流と空力騒音の関係が解析されている. これらの解析に基づいて, 矩形ダクトで利用されるプロペラファンの環状後流の非一様性と離散周波数騒音の関係について議論する.

おもな記号

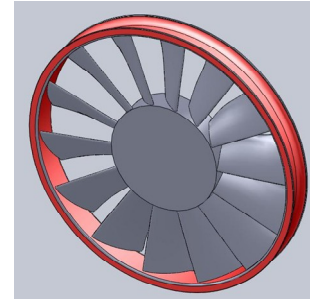
- f 周波数 (Hz)
- D 羽根車外径 (m)
- D_{hub} ハブ直径 (m)
- L 動力 (W)
- L_A 騒音レベル (dB)
- N 回転数 (rpm)
- P_s 静圧 (Pa)
- Q 流量 (m^3/min)
- U 周速度 (m/s)
- x 主流方向距離 (m)
- Z 羽根枚数
- ϕ 流量係数
- ϕ_s 静圧係数
- ϕ_t 全圧係数
- λ 動力係数
- η 効率
- ρ 密度 (kg/m^3)
- ν ハブ比

2. 実験装置および測定方法

図 1 は供試羽根車の形状を示したものである. 表 1 にその主要寸法が示されている. 図 1(a) がプロペラファンの羽根車であり, 図 1(b) がリングファンの羽根車である. 両者の羽根車はリングシュラウドの有無に相違があるだけで, その設計寸法は同じである. 羽根車の代表寸法には, プロペラファンの直径が採用されている. 図 2 はファン性能の試験装置の概略図を示したものである. 測定胴の断面は $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形であり, 装置の全長は約 4m である. ファンの空力特性の試験方法については既報⁽⁴⁾で詳述されているので, 本報では割愛されている. 送風機の静圧係数, 流量係数,



(a) Propeller fan



(b) Ring fan

Fig. 1 Test impeller

Table 1 Main dimensions of test impeller

	Propeller Fan	Ring Fan
D (m)	0.613	
D_{hub} (m)	0.260	
$\nu = D_{\text{hub}} / D$	0.424	
Shroud	without shroud	with shroud

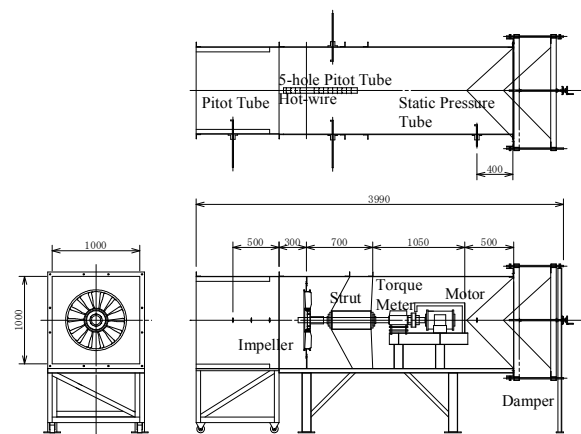


Fig. 2 Experimental apparatus

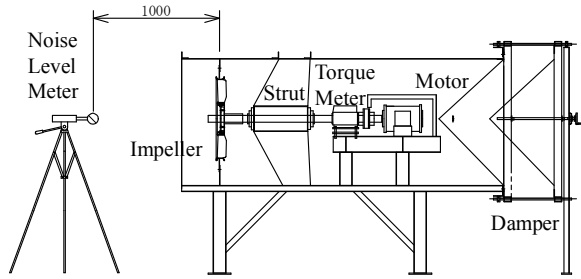


Fig. 3 Measurement method of fan noise



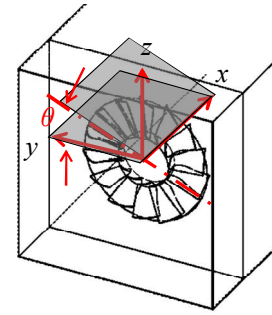
Fig. 4 Measurement method of internal flow in the inclined plane

動力係数および効率 は式(1)のように定義されている。

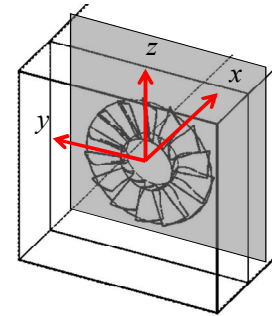
$$\begin{aligned}\phi &= 4Q / \pi (1 - v^2) D^2 U \\ \phi_s &= 2P_s / \rho U^2 \\ \lambda &= 8L / \rho \pi (1 - v^2) D^2 U^3 \\ \eta &= \phi \phi_t / \lambda\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 ϕ は流量係数、 ϕ_s は静圧係数、 λ は動力係数、 η は効率である。主軸の回転数は 1200rpm となるようにインバータで制御されている。このとき、翼通過周波数は 280Hz になる。図 3 はファン騒音の測定方法を示したものである。騒音は羽根車の回転軸上 1.0m 上流側の点で、精密騒音計に取り付けられた 1/2 インチマイクロホンによって測定されている。精密騒音計からの出力信号は FFT アナライザ(小野測器; CF5210)へ入力され、周波数分析された騒音スペクトルが得られる。

図 4 には、内部流動の測定方法が示されている。羽根車の後流は熱線流速計によって測定されて



(a) Meridional plane, Inclined plane



(b) Vertical plane

Fig. 5 Measurement plane of the fan

いる。傾斜断面にはプローブが専用のアダプタを介して取り付けられている。その測定断面は主軸に対して水平な子午面、子午面に対して 20° と 40° 傾いた傾斜断面(図 5(a)参照)、および主流に対して垂直な断面(図 5(b)参照)である。垂直断面での後流の計測では旋回流の影響が生じる。このため、この断面における速度分布には、水平方向と垂直方向に張られた I 型熱線で計測された流れの平均値が採用されている。この傾斜断面における主軸に対して垂直方向のスペン長さは、傾斜角 20° のとき約 532mm となり、 40° のとき約 653mm になる。主軸方向の測定点の間隔は 50mm であり、主軸と垂直方向には 20mm の間隔が設定されている。

3. 実験結果および考察

図 6 はファンの空力特性を示したものである。○がプロペラファンの特性であり、●がリングファンである。リングファンの静圧係数は、広い流れ領域に渡ってプロペラファンよりも高くなった。これに応じて、実測値の最高効率点近傍($\phi =$

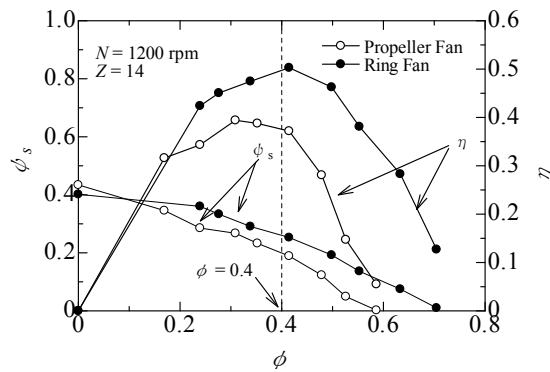


Fig. 6 Aerodynamic characteristics of the propeller fans

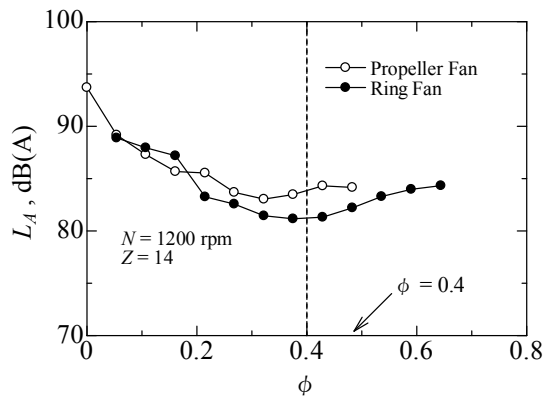


Fig. 7 Noise characteristics of the propeller fans

0.4)でのリングファンの効率は、プロペラファンよりも約12%高くなった。

図7には、ファンの騒音特性が示されている。リングファンのファン騒音は最高効率点近傍で、プロペラファンよりも約3dB低減された。図8は最高効率点近傍におけるファン騒音のスペクトル分布を示したものである。細い実線がプロペラファンの騒音スペクトルであり、太い実線がリングファンのスペクトルである。100Hzから200Hz近傍に分布するリングファンの広帯域騒音は、プロペラファンの騒音よりも大きい。一方、いずれのファン騒音も離散周波数騒音が大きく、翼通過周波数におけるリングファンの騒音はプロペラファンよりも小さくなった。図7のファン騒音の特性を勘案すれば、離散周波数騒音がファン騒音の支配的因子になることがわかる。図9には、各高調波次数における両者のファン騒音の差が整理されている。プロペラファンの第二高調波での離散周波数騒音レベルはリングファンより

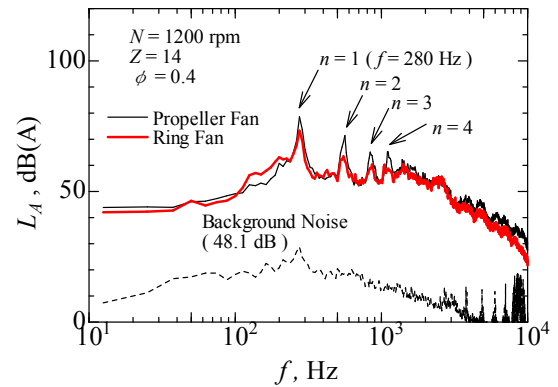


Fig. 8 Noise spectra of the propeller fans

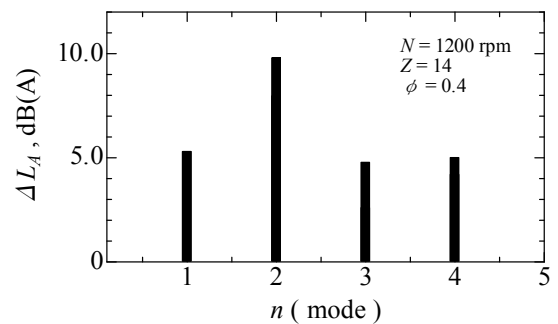


Fig. 9 Difference of the discrete frequency noise

も9.8dB高くなった。以下の内部流動の解析では、このように特定の高調波次数でプロペラファンの離散周波数騒音が大きくなる現象について議論する。

図10は子午面と傾斜断面における後流の速度分布を示したものである。図10(a)がプロペラファンの速度分布であり、図10(b)がリングファンである。流量は最高効率点($\phi = 0.4$)に設定されている。これら二つの内部流動に関する基本的な性質については既報に詳述されているので、文献(4)などを参考にされたい。この断面における速い速度の領域を主流部と呼ぶことにする。プロペラファンの傾斜断面における主流部の速度は、その傾斜角が大きくなるに従って減速される。これは傾斜角のついた二次元の流路が拡大されるために、局所的な流速が減速されるためであると考えられる。一方、リングファンの後流の流路はシュラウドによって一定に保たれるため、その主流部には傾斜角によらずほぼ様な速度分布が形成

プロペラファンの非一様な環状後流と離散周波数騒音

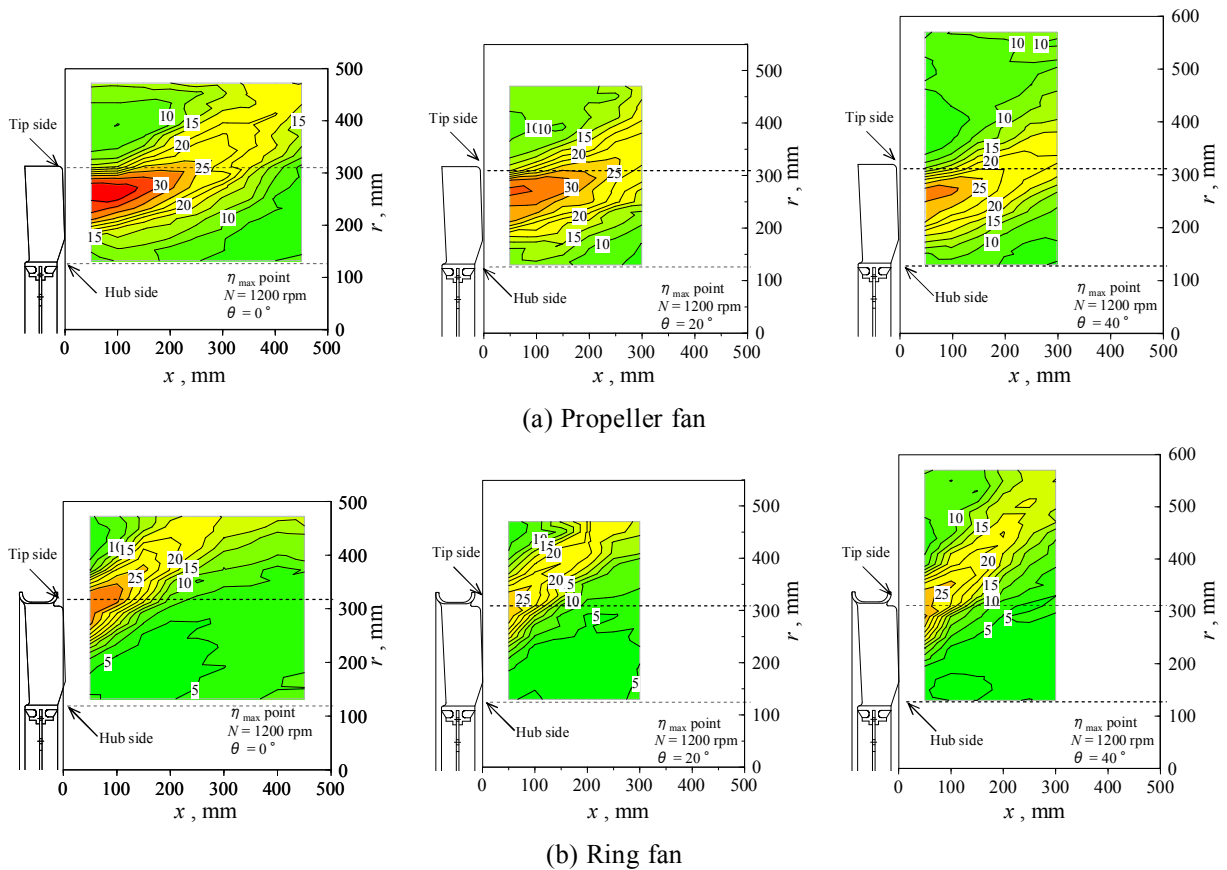


Fig. 10 Distribution of the velocity in meridional plane and inclined plane

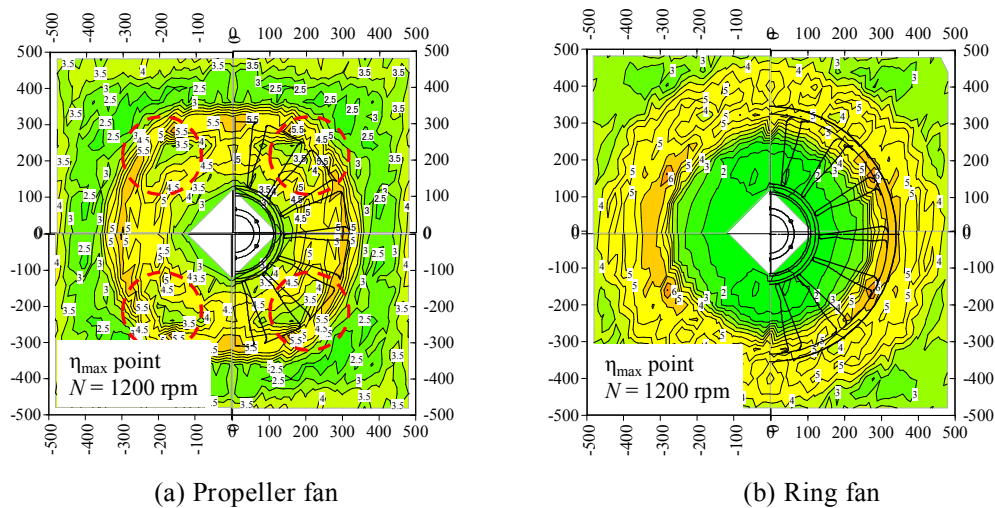


Fig. 11 Distribution of the velocity fluctuation in vertical plane

される。

図 11 は垂直断面の速度変動の分布が示されている。測定位置は羽根車の後縁から 200mm 後方の位置である。プロペラファンの速度変動の分布では、ダクトの対角線上の速度変動が小さくなっており、環状の後流には四箇所の破れが形成され

ている。一方、リングファンの後流の速度変動は、プロペラファンよりも半径方向外側へ広がった分布となり、環状に形成される後流の速度変動は一様に分布している。図 10 の速度分布によれば、プロペラファンのダクト対角線上の速度は、その流路が拡大されるために減速した。従って、プロ

ペラファンの垂直断面におけるダクト対角線上の速度変動の分布には, この周方向の速度ひずみによって破れが形成される. 一方, リングファンの場合, 羽根車の後流はそのシュラウドによって矩形ダクトに流路の影響を受けにくくなる. これに応じて, リングファンの後流には一様な環状後流が形成される. 非一様な環状後流がプロペラファンに形成されるため, 矩形ダクトの内部には擬似的に 4 枚の静翼が形成される. この 4 枚の静翼と 14 枚の動翼が干渉すると, 1200rpm で回転する羽根車には 560Hz で共振現象が生じる. プロペラファンの第二高調波 ($f=560\text{Hz}$) の離散周波数騒音が増幅されることは, この擬似的な 4 枚の静翼との共振現象によるものであることを示した.

4. 結言

矩形ダクトで利用されるプロペラファンの非一様な環状後流と離散周波数騒音の関係について解析した結果, 以下の結論が得られた.

- (1) 本研究の実験条件では, プロペラファンの第二高調波における離散周波数騒音レベルはリングファンよりも 9.8dB 高くなった.
- (2) プロペラファンの傾斜断面における主流部の速度は, その傾斜角が大きくなるに従って減速される. これは傾斜角のついた二次元の流路が拡大されるために, 局所的な流速が減速されるためである.
- (3) プロペラファンの速度変動の分布は, 矩形ダクトの対角線上で小さくなっており, 環状の後流には四箇所の破れが形成された. プロペラファンの垂直断面における非一様な環状後流の分布は, 周方向の速度ひずみによって形成される.
- (4) 擬似的に形成される 4 枚の静翼が 14 枚の動翼と干渉すると, 1200rpm で回転する羽根車には 560Hz で共振現象が生じる. プロペラファンの第二高調波の離散周波数騒音は, この擬似的な 4 枚の静翼との共振現象によって増幅されることを示した.

参考文献

- (1) 坪田晴弘, リングファンの研究・開発, *KOMATSU Technical Report*, 53 - 1 (2007), pp. 2 - 9.
- (2) R.E. Longhouse, Control of tip-vortex noise of axial flow fans by rotating shrouds, *Journal of Sound and Vibration*, 58 - 2 (1978), pp 201 - 214.
- (3) 高山糧, 加藤千幸, 山出吉伸, プロペラファンから発生する空力騒音の数値予測, 生産研究, 59 - 1 (2007), pp.63 - 66.
- (4) 佐々木, 福田, 林, リングファンの空力特性に及ぼす内部流動の影響, ターボ機械, 38 - 12 (2010), pp. 729 - 736.