周波数変調による横流ファンの低騒音設計*

林 卓 郎^{*1}, 小林 洋一郎^{*2}
永 守 朗^{*2}, 堀 野 博 文^{*2}

Low-Noise Design of Cross-Flow Fan Based on Frequency Modulation

Takuro HAYASHI, Youichiro KOBAYASHI,
Akira NAGAMORI and Hirofumi HORINO

The aerodynamic noise generated by the rotating blade row of an electric fan generally consists of a broad-band vortex noise and a narrow-band rotational noise. The rotational noise, called blade passing frequency (BPF) noise, is annoying and its suppression has been considered at the design stage of many types of fans. The authors propose new design methods to reduce BPF level based on sinusoidal frequency modulation and M-sequence frequency modulation. Comparison by means of numerical simulation revealed that M-sequence frequency modulation is superior to sinusoidal frequency modulation with respect to spectral dispersion. Furthermore, it was confirmed that M-sequence frequency modulation realizes successful reduction of the BPF level of the cross-flow fans used in air conditioners.

Key Words: Noise, Rotational Fan Noise, Cross-Flow Fan, Sinusoidal Frequency Modulation, M-Sequence Modulation

1. 緒 論

ファンやブローなどの送風機から発生する騒音は大別すると周期的成分をもつものと、非周期的なものに分けられる。非周期的なものは、羽根への気流の衝突、羽根後流ではなく離などの乱流作用で発生するので、周波数的にみると広い帯域に分布したスペクトルとなる。周期的な騒音の周波数スペクトルは、回転数と羽根数の積を基本周波数としたピークとして現れる。この基本周波数は翼通過周波数(BPF)と呼ばれ、多くの場合、そのいくつかの高次成分もピークとして現れる。このような音を総称して、羽根切り音または翼ピッチ音と言う。翼ピッチ音の発生理由は、羽根前後の空気の圧縮と膨張が羽根とともに回転し、固定点からみると周期的な圧力変動として観測されるからである。また、この翼ピッチ音は送風機に流入する流れが偏流の場合、流れに障害となる支柱等がある場合、整流のための案内羽根がある場合、流れを絞る舌部がある場合などに特に大きくなる傾向がある。これは回

転翼による周期的圧力変動が、周囲の形状によって決まる流れ場の圧力分布と干渉したり増幅されたりするからである。このような翼ピッチ音が際立って大きい場合は、聴感上耳障りに感じ、送風機の騒音評価の上で大きなマイナス要因となる。

翼ピッチ音の発生を別の側面からみれば、周期的な圧力変動が起こるのは通常の送風機の羽根が等ピッチに配列されているからであり、時間的に等しいインタバルで圧縮膨張の繰返しが起こるからである。したがって翼ピッチ音を低減するには、羽根を等ピッチではなく不等ピッチにして、圧力変動の周期性をなくすことが考えられる。この考え方は以前からあり⁽¹⁾⁽²⁾、文献等でも散見する。しかし、理論的に明確な設計方法が提示されているわけでもなく、また文献によっては等ピッチからのずれが大きくなりすぎているものもある。本報では、エアコン室内機横流ファンの翼ピッチ音を対象として、羽根を不等ピッチにすることを前提に、その設計方法を考察した。そして、新しい設計方法として、回転周期変調法と疑似ランダム系列変調法を用いた設計法を提案した。さらに、数値シミュレーションや実験で、翼ピッチ音のピークが効果的に低減できることを示した。

* 原稿受付 1996年2月20日。

^{*1} 正員、(株)東芝機械エネルギー研究所 (〒210 川崎市川崎区浮島町4-1)。^{*2} (株)東芝富士工場 (〒416 富士市夢原336)。

2. エアコンの室内機と横流ファン

図1にエアコン室内機の断面図を示す⁽³⁾。室内の空気はグリッドからフィルタを介して内部に流入し、熱交換器で熱交換された後、室内機下部の出口から外部へ吹き出される。このような空気の流れをつくるのが内部にある横流ファンである。出口近くのケースには、出口側の流れが入口側に逆流しないように舌部が設けられている。図1ではファンと舌部とのすきまを ϵ としてある。この ϵ は数mm程度であり、 ϵ が広いと送風性能が劣化するため、できるだけ狭めている。しかし、狭いほど翼ピッチ音も大きくなるので、両者の妥協ですきまが決められている。図2に横流ファンが等ピッチの場合の典型的な騒音の周波数特性を示す。翼ピッチ音は回転数(N) $\times$ 翼枚数(Z)の周波数に一次の成分が現れており、実際はこの倍音の二次成分ぐらいまでが問題となる。

3. 翼ピッチ音ピークの抑制

3.1 翼ピッチ音の発生メカニズム 翼ピッチ音の発生を単純化して考えると、舌部の前方では羽根が舌部に近づくにつれて空気が圧縮され、舌部の下に入り込むとそれが緩和される。そして、次の羽根が近づくるとまた圧縮が起こり、それが繰返される。一方、舌部の後方では羽根が舌部から離れるたびに空気の膨張が起こりそれが繰返される、と考えられる。なお、別の見方をすれば、羽根の前後の圧力差から渦が生じており、その渦が舌部を通るときに舌部とぶつかって圧力変動が生じるとも考えられる。これらの圧縮と膨張は舌部の幅だけ離れて、また羽根の通過する時間差だけタイミングがずれて起きるが、翼ピッチ音の発生メカニズムとしては片方だけ考えてもかまわない。そこで今、圧縮側だけを考えることにする。次に、翼ピッチを等ピッチからずらすことにする。ずらせ方の考え方とし

て、翼ピッチ音のような正弦波がある関数で変調されることによって、元のスペクトルが他のいろいろな周波数にも拡散され、ピークレベルが低減すると考える。周波数変調することは、音の大きさ自体が低減するわけではなく、ピークのレベルが他の周波数に拡散することにより減ずるものであるが、耳障りな音をなくする上では音質評価上欠かせないものとなる。ここで検討した設計法の内容は次の二つである。

(a) 翼ピッチ音に周期的な周波数変調(または位相変調)をかけ、もとの翼ピッチ音を低減する方法。

(b) 翼ピッチ音にできるだけランダムな周波数変調をかけ、もとの翼ピッチ音を低減する方法。

3.2 周期的周波数変調をかける方法 横流ファンの回転周波数を f_n 、翼ピッチ音の周波数を f_z とすると $f_z=f_n \times Z$ と表される。ここで、 Z は羽根の数である。角周波数は $\omega_n(=2\pi f_n)$ 、 $\omega_z(=2\pi f_z)$ となる。

はじめに、等ピッチでの圧力変動を考える。振幅は簡単のため1とし、翼ピッチ音の基本周波数成分だけを考えると、音圧 $p(t)$ は次のような正弦波で表される。

$$p(t)=\sin(\omega_z t) \cdots \cdots \cdots (1)$$

次に、羽根を不等ピッチにすることを考える。ここで、音圧 $p(t)$ を単純化して考え、羽根が舌部の先端に来たときに最大になるとすると、図3に示すように、等ピッチのときはそれが等しい時間間隔で起きるのに対し、不等ピッチのときは羽根の間隔に応じて $p(t)$ の最大値の位置が変化する。すなわち、音圧 $p(t)$ は羽根ピッチの変動により周波数変調を受けるとみなすことができる。そこで始めに、 $p(t)$ が正弦波で周波数変調されたときの性質について調べ、次に、 $p(t)$ が最大となる位置から羽根の取付角を決定することにする。ここで変調する角周波数を ω_m とする。ただし、羽根は1回転すると元の状態に戻るから、 ω_m も ω_n の整数倍の周波数である。すなわち $\omega_m=m\omega_n$ の関係がある。音

Fig. 1 Indoor Air conditioner unit and cross-flow fan

Fig. 2 Noise spectrum of a cross-flow fan

圧 $p(t)$ は近似的に

$$p(t) = \sin(\omega_z t + \beta \sin \omega_m t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおくことができる。 β は変調の大きさを示す振幅である。ここで⁽⁴⁾

$$\cos(\beta \sin \omega_m t) = J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cos 2n\omega_m t, \quad \sin(\beta \sin \omega_m t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\beta) \sin (2n+1)\omega_m t$$

($J_0, J_1, \dots$ はベッセル関数) $\dots\dots\dots (3)$

式(3)より式(2)は

$$\begin{aligned} p(t) &= J_0(\beta) \sin \omega_z t + J_1(\beta) \{ \sin(\omega_z + \omega_m)t - \sin(\omega_z - \omega_m)t \} \\ &\quad + J_2(\beta) \{ \sin(\omega_z + 2\omega_m)t + \sin(\omega_z - 2\omega_m)t \} + J_3(\beta) \{ \sin(\omega_z + 3\omega_m)t - \sin(\omega_z - 3\omega_m)t \} + \dots \\ &= J_0(\beta) \sin \omega_z t + \sum_{i=1}^{\infty} J_i(\beta) \{ \sin(\omega_z + i\omega_m)t + (-1)^i \sin(\omega_z - i\omega_m)t \} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となるから、図4に示すように、もとの翼ピッチ音周波数の振幅は $J_0(\beta)$ 倍となり、その両側に ω_m ごとに振幅 $J_1(\beta), J_2(\beta), \dots$ のスペクトルが生ずることになる。式(4)から、両側に生ずるスペクトルの大きさは変調周波数 ω_m には依らないことがわかる。 ω_m が大きくなるとスペクトルが横に広がるだけである。スペクトルの大きさは β の値によって決まる。なお、 $p(t)$ を二つの周波数 ω_{m1}, ω_{m2} で変調したとして

$$p(t) = \sin(\omega_z t + \beta_1 \sin \omega_{m1} t + \beta_2 \sin \omega_{m2} t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

とすると

$$\begin{aligned} p(t) &= J_0(\beta_1) \sin(\omega_z t + \beta_2 \sin \omega_{m2} t) + \sum_{i=1}^{\infty} J_i(\beta_1) [\sin \{ (\omega_z + i\omega_{m1})t + \beta_2 \sin \omega_{m2} t \} \\ &\quad + (-1)^i \sin \{ (\omega_z - i\omega_{m1})t + \beta_2 \sin \omega_{m2} t \}] \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

となるから、 ω_{m1} で分散化されたそれぞれのスペクトルをさらに ω_{m2} で分散化することになる。変調する周波数が多数ある場合はこの繰返しとなる。

3・3 周期的な周波数変調における翼の取付角度

翼の取付角は式(2)の $p(t)$ が最大となる条件から求められるが、初期位相が異なるだけであるから、

$p(t)$ が最小となる点を取ってもよいし、零点が一つおきにとってもよい。簡単のため、 $\sin$ の中味が 2π の整数倍になる場合を考えると、

$$\omega_z t + \beta \sin \omega_m t = 2\pi k \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots (7)$$

となる。翼の回転角を θ とすると、 $\theta = \omega_m t$ であり、 $\omega_z = Z\omega_m$ であるから、式(7)は

$$Z\theta + \beta \sin(m\theta) = 2\pi k \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。式(8)の解を θ_k ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) と表すことにすると

$$Z\theta_k + \beta \sin(m\theta_k) = 2\pi k \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad \dots\dots\dots (9)$$

(a) Regular blade pitch

(b) Irregular blade pitch

Fig. 3 Relation between blade pitch and sound pressure wave

(a) Spectrum of original sinusoidal wave

(b) Modulated spectrum

Fig. 4 Spectral dispersion caused by sinusoidal frequency modulation

である。式(9)を解くことで羽根の取付角が求められるが、設計に便利となる近似式を導くことにする。まず、 $\theta_{k+1}-\theta_k$ に対して $\sin(m\theta_k)$ の変化がゆるやかであるとして、差分を微分で近似し、

$$\frac{\sin(m\theta_{k+1})-\sin(m\theta_k)}{\theta_{k+1}-\theta_k} \cong m \cos(m\theta_k) \quad \dots\dots\dots(10)$$

が成り立つものとする。と、 k 番めと $k+1$ 番めの羽根の間のピッチ角 θ_{pk} は

$$\theta_{pk} = \theta_{k+1} - \theta_k \cong \frac{2\pi}{Z + m\beta \cos m\theta_k} \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。文献(1)では、途中の導出過程は示さずに結果だけを示しているが、式(11)の分母の θ_k の近似に、等ピッチのときの羽根取付角として $2\pi k/Z + \pi/Z$ を用いた結果となっている。ただし、近似を用いている関係上、 θ_{pk} をすべて足し合わせても 2π にはならないから、 2π になるように後で修正している。なお、一つの周波数ではなく、 i 個の周波数で変調したときの近似式は

$$\theta_{pk} \cong \frac{2\pi}{Z + \sum_i m_i \beta_i \cos m_i \theta_k} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。

また、別の近似の方法を検討すると、等ピッチのときの k 番めの羽根の取付角を $k\theta_{pz}$ ($k=0, 1, \dots, N-1$; $\theta_{pz}=2\pi/Z$)、等ピッチからのズレを $\delta\theta_k$ とすると、 $m\delta\theta_k \ll 1$ の場合、式(9)より

$$\begin{aligned} \delta\theta_k &= \theta_k - k\theta_{pz} = -\frac{\beta}{Z} \sin(m\theta_k) \\ &= -\frac{\beta}{Z} \{\sin mk\theta_{pz} \cos m\delta\theta_k \\ &\quad + \cos mk\theta_{pz} \sin m\delta\theta_k\} \\ &\cong -\frac{\beta}{Z} \{\sin mk\theta_{pz} + m\delta\theta_k \cos mk\theta_{pz}\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(13)$$

である。これより

$$\delta\theta_k \cong \frac{-\beta \sin mk\theta_{pz}}{Z + m\beta \cos mk\theta_{pz}} = \frac{-\beta \sin\left(\frac{2\pi mk}{Z}\right)}{Z + m\beta \cos\left(\frac{2\pi mk}{Z}\right)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

となる。一つの周波数ではなく、 i 個の周波数で変調したときは

$$\delta\theta_k \cong \frac{-\sum_i \beta_i \sin\left(\frac{2\pi m_i k}{Z}\right)}{Z + \sum_i m_i \beta_i \cos\left(\frac{2\pi m_i k}{Z}\right)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

となる。

3・4 ランダムな周波数変調をかける方法 ランダムな周波数変調をかけるには、乱数を発生させ、そ

の値で等ピッチからのずれ量を設計する方法と、M 系列に代表される擬似ランダム系列を用いる方法が考えられる。このうち乱数を用いる方法は従来から行われているが、乱数なので発生させるごとに少しずつ変化し、どれが最適なパターンなのかを決定することが困難であった。また変調周波数のランダム性が悪い場合、翼ピッチ音のスペクトルが完全には分散せず、元のスペクトルの近くにかたまっている場合もあった。横流ファンでは一回転すると元の状態に戻るから、いずれにせよ変調周波数は回転周期と無関係ではないが、M 系列に代表される擬似ランダム系列を用いれば、ホワイトノイズの特性に近い変調をかけることができる。M 系列は一般には p^n-1 の周期を持つ系列で、 $p=2$ の場合がよく用いられる。横流ファンに適用することを考えると、現在の羽根数 35 に近いのは $2^5-1=31$ (枚)である。31 を周期とする M 系列の数値 x_i の場合、 $x_0, x_1, \dots, x_{30}$ が 0 または 1 の値をとり、 x_{31} は x_0 に戻る。これを繰返すような数列となる。M 系列を用いると羽根数がある程度限定されるが、これに一致しない羽根数の場合でも、全体として M 系列の特性に近くなるように設計すればよい。M 系列の場合、羽根の取付角は手計算で求めることが出来る。各羽根間の角度は 2 種類しかない。そこで、 x_i の値が零のときはピッチが狭く、1 のときは広いようにピッチを設計することを考える。広いほうの角度を θ_1 、狭いほうを θ_0 とし、

$$\theta_1 = (1+\gamma)\theta_0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

とする。数列全体の数を 2^n-1 とすると、M 系列では一般に 1 となる個数は 0 となる個数より一つ多く、1 の数は 2^{n-1} 、0 の数は $2^{n-1}-1$ である。ピッチ角をすべて合わせると 2π であるから

$$2^{n-1}\theta_1 + (2^{n-1}-1)\theta_0 = 2\pi \quad \dots\dots\dots(17)$$

式(16)と式(17)より

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{\{(2^n-1)+2^{n-1}\gamma\}} \quad \dots\dots\dots(18)$$

となって羽根の角度が簡単に求められる。例えば、 $n=5$ で羽根の枚数を 31 としたとき、 $\gamma=0.5$ として角度に換算すると $\theta_0=9.2$ (度)、 $\theta_1=13.9$ (度)のように求めることができる。

3・5 最大ずれ率 不等ピッチの場合、等ピッチからのずれが大きいほどスペクトルの分散効果が増すが、ずれが大きくなりすぎると送風性能が劣化する。そこでここでは一つの指標として最大ずれ率 α を次のように定義し、これを参照しながら効果を比較することにする。

$$\alpha = \frac{1}{2} \times \frac{\theta_{P \max} - \theta_{P \min}}{\theta_{PZ}} \dots\dots\dots (19)$$

ここで

$\theta_{P \max}$: 最大ピッチ角

$\theta_{P \min}$: 最小ピッチ角

θ_{PZ} : 等ピッチのときのピッチ角 $= 2\pi/Z$

である。正弦波による周期変調の場合、式(11)から

$$\theta_{k+1} - \theta_k \cong \frac{\theta_{PZ}}{1 + \frac{\beta m}{Z} \cos(m\theta_k)} \dots\dots\dots (20)$$

である。したがって、

$$\theta_{P \max} - \theta_{P \min} \cong \frac{\theta_{PZ}}{1 - \frac{\beta m}{Z}} - \frac{\theta_{PZ}}{1 + \frac{\beta m}{Z}} \dots\dots\dots (21)$$

これを式(20)に代入すると、

$$\alpha \cong \frac{\left(\frac{\beta m}{Z}\right)}{1 - \left(\frac{\beta m}{Z}\right)^2} \dots\dots\dots (22)$$

(a) Regular blade pitch

(b) Sinusoidal frequency modulation ($m=1$, $\beta=5$)

(c) Sinusoidal frequency modulation ($m=3$, $\beta=5$)

(d) M-sequence modulation ($\gamma=0.5$)

Fig. 5 Calculation result of the suppression effects of the blade passing tone

となる。 $\beta m \ll Z$ のときにはさらに簡単になって、

$$\alpha \cong \frac{\beta m}{Z} \dots\dots\dots (23)$$

となる。一方、M 系列変調の場合は式(16)、(18)、(19)から

$$\alpha = \frac{\gamma Z}{2\{(2^n - 1) + 2^{n-1}\gamma\}} \dots\dots\dots (24)$$

となる。

4. 計算例

計算は周期変調の場合は実機を模擬して回転周波数 $f_n = 20$ Hz, $Z = 35$ 枚, $f_z = 700$ Hz, M 系列の場合は $Z = 31$ 枚で行った。そして、周期変調の場合は式(2)から音圧 $p(t)$ を求め、M 系列の場合は羽根の間隔ごとにその間隔を一周期とする $\cos$ 波を接続していくことで $p(t)$ を近似した。

図5は計算結果で、(a)は等ピッチの場合、(b)は周期変調の場合で $\beta=5$, $m=1$, (c)も周期変調で $\beta=5$, $m=5$ である。また、(d)はM 系列変調の場合で $\gamma=0.5$ である。

最大ずれ率 α は式(9)から取付角を計算して求めた結果では図5(b)で0.15、図5(c)で0.5であるが、近似式(23)からはそれぞれ0.16、0.48となり、ほぼ一致している。また、図5(d)では式(25)から0.2となっている。

図5を見ると、図5(a)は700 Hzにピークが一つだけ現れているが、図5(b)～(d)ではスペクトルが分散し、ピークスペクトルの抑制効果としては8 dB程度の効果を得ていることがわかる。しかし、図5(b)では元の翼ピッチ音の周波数の近傍にスペクトルがまだ集中しており、聴感上特定の帯域が強調される可能性がある。図5(c)はかなり分散してはいるが、線スペクトルとして広がっており、また等配からのずれが大きい。図5(d)のM 系列は広い範囲に分散しており、抑制効果が期待できることがわかる。以上の結果から、翼ピッチ音の抑制効果と等ピッチからのずれを考慮するとM 系列変調のほうが有利なことがわかる。ただし、羽根枚数がM 系列の周期と大幅に異なる場合には、M 系列変調で設計することが困難となるので、周期変調での設計が有効と考えられる。

5. M 系列翼の試験結果

翼ピッチ音の抑制の効果の確認のため、翼枚数31枚で等ピッチ翼のものとM 系列($\gamma=0.5$)のものを試作して騒音評価を行った。図6～9に両者の比較の例を示す。等ピッチ翼では翼ピッチ音の二次までが卓越し

Fig. 6 Noise spectrum of the regular blade pitch fan (1200 rpm)

Fig. 8 Noise spectrum of the regular blade pitch fan (900 rpm)

Fig. 7 Noise spectrum of the M-sequence modulated fan (1200 rpm)

Fig. 9 Noise spectrum of the M-sequence modulated fan (900 rpm)

ているが、M 系列翼ではピークが抑制され、スペクトルの分散効果が良好なことがわかる。この M 系列翼では、聴感上も良好との評価も得た。

6. 結 論

エアコン横流ファンなどで問題となる翼ピッチ音のピークレベルの抑制について検討した。そして、周期変調と M 系列変調による翼の設計法を検討し、それぞれについて取付角の算出式を示すとともに、等配ピッチからのずれの指標となる最大ずれ率も提示した。また計算と実験により、特に M 系列翼で良好なスペクトル分散効果が得られることを示した。この M 系列翼は、羽根枚数が M 系列の周期に近い場合に有効な設計方法であるが、羽根枚数が M 系列の周期と大幅

に異なる場合には周期変調による設計法が有効と考えられる。なお、今回試作した M 系列翼では、不等ピッチにしたことによる送風性能の劣化は起きていないが、送風性能と最大ずれ率の関係も今後の検討課題としたい。

文 献

- (1) Mellin, R. C. and Sovran, G., *J. Basic Eng.*, (1970), 143, ASME.
- (2) 得居卓司・稲塚徹・菊池芳正, 第 29 回空調和・冷凍連合講演会講演論文集, (1995-4), 117-120.
- (3) 小林洋一郎・永守朗・杉山弘・新井隆景・金野悟, 第 27 回空調和・冷凍連合講演会講演論文集, (1993-4), 69-72
- (4) 野呂雄吉, 応用数学, (1971), 218, 内田老鶴園新社.