U. D. C. 621.313.333.2.013.5 : 621.631 : 534.83

扇風機用モータの磁気音についての検討

Magnetic Noise of Fan Motor

田島邦雄* 高野久行* 根本和夫*
Kunio Tajima Hisayuki Kôya Kazuo Nemoto

要　　旨

扇風機の磁気音には，振動トルクを原因とする羽根からの磁気音と，分布力を原因とする本体からの磁気音の2種類がある。これらの磁気音とステータおよびロータスロット数の組合せの関係について理論的，実験的検討を行なった結果，スロット数選定上の考え方および磁気音に対する処理方法の一端を捕えることができた。

1. 緒　　言

かご形誘導電動機の特異な現象のうち扇風機の騒音で問題になるのは振動トルクおよび分布力で，前者はシャフトを介し，羽根より音を放射する原因となり，後者はステータコア，ハウジングを振動させ，扇風機各部に伝達し，騒音を発生する。

本報告では，単相誘導電動機（以下モータという）の磁気音について理論的，実験的検討を行なった結果について報告する。

2. モータ磁気音についての理論的考察

2.1 空げきにおける磁束

空げきのパーミアンスを一定と仮定すると，ステータ側の基本波に対するスロット高調波の次数は次のようになる。

$$\text{ステータ高調波の次数}=\frac{2K_1S_s}{P}\pm1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\text{ステータ高調波の振幅}=\frac{B_1}{\dfrac{2K_1S_s}{P}\pm1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

ここに，K_1：正の整数

S_s：ステータのスロット数

P：基本波の極数

B_1：基本波磁束密度の最大値　(Wb/m²)

また，ロータ側のスロット高調波の次数は次のようになる。

$$\text{ロータ高調波の次数}=\pm\frac{2K_2S_r}{P}+1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

$$\text{ロータ高調波の振幅}=\frac{B_2}{\pm\dfrac{2K_2S_r}{P}+1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

ここに，K_2：正の整数

S_r：ロータのスロット数

P：基本波の極数

B_2：ロータ基本波磁束密度の最大値　(Wb/m²)

（注）ロータ高調波次数のうち，正記号は基本波磁束と同方向へ回転し，負記号は反対方向に回転するものとする。

ステータ側電流により，発生する磁束密度は(1)式において

$$N=\frac{2K_1S_s}{P}-1,\qquad M=\frac{2K_1S_s}{P}+1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

とすると次のようになる。

$$\left.\begin{aligned}
B_{1f}&=B_{1fm}(=BI_{1f})\cos\left(x_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega t\right)\\
B_{1b}&=B_{1bm}(=BI_{1b})\cos\left(x_1\frac{\pi}{\lambda}+\omega t\right)\\
B_{1Nf}&=B_{1Nfm}\left(=BI_{1f}\cdot\frac{1}{N}\right)\cos\left(Nx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega t\right)\\
B_{1Nb}&=B_{1Nbm}\left(=BI_{1b}\cdot\frac{1}{N}\right)\cos\left(Nx_1\frac{\pi}{\lambda}+\omega t\right)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(6)$$

$$\left.\begin{aligned}
B_{1Mf}&=B_{1Mfm}\left(=BI_{1f}\cdot\frac{1}{M}\right)\cos\left(Nx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega t\right)\\
B_{1Mb}&=B_{1Mbm}\left(=BI_{1b}\cdot\frac{1}{M}\right)\cos\left(Mx_1\frac{\pi}{\lambda}+\omega t\right)
\end{aligned}\right\}$$

ここに，

$B_{1f}, B_{1fm}, B_{1Nf}, B_{1Nfm}, B_{1Mf}, B_{1Mfm}$：基本波，$N$および$M$次高調波の前進磁界成分の磁束密度の瞬時値および最大値　(Wb/m²)

$B_{1b}, B_{1bm}, B_{1Nb}, B_{1Nbm}, B_{1Mb}, B_{1Mbm}$：基本波，$N$および$M$次高調波の後進磁界成分の磁束密度の瞬時値および最大値　(Wb/m²)

I_{1f}, I_{1b}：ステータ側前進および後進磁界電流

λ：極ピッチ　(m)

x_1：ステータ上にとった座標　(m)

ロータ電流により，空げきに発生する磁束密度は(3)式において

$$R=\frac{2K_2S_r}{P}-1,\qquad T=\frac{2K_2S_r}{P}+1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

とおくと

$$\left.\begin{aligned}
B_{2f}&=B_{2fm}(=BI_{2f}\cdot\eta_P)\cos\left(x_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega t+\theta_f\right)\\
B_{2b}&=B_{2bm}\ (=BI_{2b}\cdot\eta_P)\cos\left(x_1\frac{\pi}{\lambda}+\omega t+\theta_b\right)\\
B_{2Rf}&=B_{2Rfm}\\
&\left(=BI_{2f}\cdot\frac{\eta_R}{R}\right)\cos\left(Rx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\left[R(1-s)-s\right]t+\theta_{Rf}\right)\\
B_{2Tf}&=B_{2Tfm}\\
&\left(=BI_{2f}\cdot\frac{\eta_R}{T}\right)\cos\left(Tx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\left[T(1-s)+s\right]t+\theta_{Tf}\right)\\
B_{2Rb}&=B_{2Rbm}\\
&\left(=BI_{2b}\cdot\frac{\eta_R}{R}\right)\cos\left(Rx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\left[R(1-s)+2-s\right]t+\theta_{Rb}\right)\\
B_{2Tb}&=B_{2Tbm}\\
&\left(=BI_{2b}\cdot\frac{\eta_T}{T}\right)\cos\left(Tx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\left[T(1-s)-2+s\right]t+\theta_{Tb}\right)
\end{aligned}\right\}\quad\cdots(8)$$

ここに，

$B_{2f}, B_{2fm}, B_{2Rf}, B_{2Rfm}, B_{2Tf}, B_{2Tfm}$：基本波，$R$および$T$次高調波の前進磁界成分の磁束密度の瞬時値および最大値　(Wb/m²)

$B_{2b}, B_{2bm}, B_{2Rb}, B_{2Rbm}, B_{2Tb}, B_{2Tbm}$：基本波，$R$および$T$次高調波の後進磁界成分の磁束密度の瞬時値および最大値　(Wb/m²)

I_{2f}, I_{2b}：ロータ側前進および後進磁界電流

η_P, η_R, η_T：基本波，RおよびT次高調波に対するスキュー係数

$\theta_f, \theta_b, \theta_{Rf}, \theta_{Rb}, \theta_{Tf}, \theta_{Tb}$：それぞれ基本波一次電流に対する位相差をあらわす。

空げきにおける磁束密度B_gは(6)(8)式より

* 日立製作所多賀工場

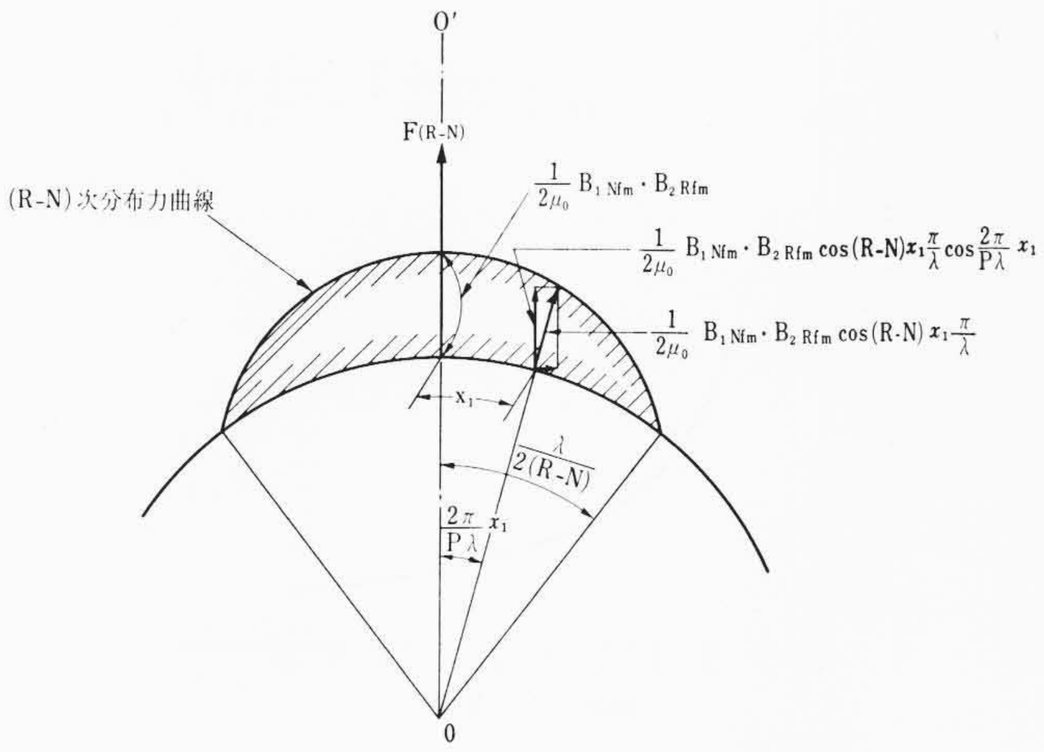


図1　分布力のベクトル和の求め方

表1　高調波による磁気音加振力

ステータ磁束	ロータ磁束	周波数 F_v (Hz)	分布力 振動モード次数 m	分布力 大きさ	振動トルク 発生条件	振動トルク 大きさ (N-m)
B_{1Nf}	B_{2Rf}	$\frac{K_2S_r}{60}X-2f$	$\frac{P}{2}(R-N)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2f}\frac{A_m\eta_R}{NR}$	$N=R$	$K_TB^2I_{1f}I_{2f}\frac{\eta_R}{N}$
B_{1Mf}	B_{2Rf}		$\frac{P}{2}(R-M)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2f}\frac{A_m\eta_R}{MR}$	$M=R$	$K_TB^2I_{1f}I_{2f}\frac{\eta_R}{M}$
B_{1Nf}	B_{2Tb}		$\frac{P}{2}(T-N)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2b}\frac{A_m\eta_T}{NT}$	$N=T$	$K_TB^2I_{1b}I_{2b}\frac{\eta_T}{N}$
B_{1Mf}	B_{2Tb}		$\frac{P}{2}(T-M)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2b}\frac{A_m\eta_T}{MT}$	$M=T$	$K_TB^2I_{1b}I_{2b}\frac{\eta_T}{M}$
B_{1Nf}	B_{2Rb}	$\frac{K_2S_r}{60}X$	$\frac{P}{2}(R-N)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2b}\frac{A_m\eta_R}{NR}$	$N=R$	$K_TB^2I_{1f}I_{2b}\frac{\eta_R}{N}$
B_{1Nb}	B_{2Rf}		$\frac{P}{2}(R-N)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2f}\frac{A_m\eta_R}{NR}$	$N=R$	$K_TB^2I_{1b}I_{2f}\frac{\eta_R}{N}$
B_{1Mf}	B_{2Rb}		$\frac{P}{2}(R-M)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2b}\frac{A_m\eta_R}{MR}$	$M=R$	$K_TB^2I_{1f}I_{2b}\frac{\eta_R}{M}$
B_{1Mb}	B_{2Rf}		$\frac{P}{2}(R-M)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2f}\frac{A_m\eta_R}{MR}$	$M=R$	$K_TB^2I_{1b}I_{2f}\frac{\eta_B}{M}$
B_{1Nf}	B_{2Tf}		$\frac{P}{2}(T-N)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2f}\frac{A_m\eta_T}{NT}$	$N=T$	$K_TB^2I_{1f}I_{2f}\frac{\eta_T}{N}$
B_{1Nb}	B_{2Tb}		$\frac{P}{2}(T-N)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2b}\frac{A_m\eta_T}{NT}$	$N=T$	$K_TB^2I_{1b}I_{2b}\frac{\eta_T}{N}$
B_{1Mf}	B_{2Tf}		$\frac{P}{2}(T-M)$	$K_0B^2I_{1f}I_{2f}\frac{A_m\eta_T}{MT}$	$M=T$	$K_TB^2I_{1f}I_{2f}\frac{\eta_T}{M}$
B_{1Mb}	B_{2Tb}		$\frac{P}{2}(T-M)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2f}\frac{A_m\eta_T}{MT}$	$M=T$	$K_TB^2I_{1b}I_{2f}\frac{\eta_T}{M}$
B_{1Nb}	B_{2Rb}	$\frac{K_2S_r}{60}X+2f$	$\frac{P}{2}(R-N)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2b}\frac{A_m\eta_T}{NR}$	$N=R$	$K_TB^2I_{1b}I_{2b}\frac{\eta_R}{N}$
B_{1Mb}	B_{2Rb}		$\frac{P}{2}(R-M)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2b}\frac{A_m\eta_T}{MR}$	$M=R$	$K_TB^2I_{1b}I_{2b}\frac{\eta_R}{M}$
B_{1Nb}	B_{2Tf}		$\frac{P}{2}(T-N)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2f}\frac{A_m\eta_T}{NT}$	$N=T$	$K_TB^2I_{1b}I_{2f}\frac{\eta_T}{N}$
B_{1Mb}	B_{2Tf}		$\frac{P}{2}(T-M)$	$K_0B^2I_{1b}I_{2f}\frac{A_m\eta_T}{MT}$	$M=T$	$K_TB^2I_{1b}I_{2f}\frac{\eta_T}{M}$

$$B_g=\sum_{\substack{K_1=1,2,3,\ldots\\K_2=1,2,3,\ldots}}\{(B_{1f}+B_{1b}+B_{1Nf}+B_{1Nb}+B_{1Mf}+B_{1Mb})-(B_{2f}+B_{2b}+B_{2Rf}+B_{2Tf}+B_{2Rb}+B_{2Tb})\} \quad \ldots\ldots(9)$$

2.2 分　布　力

空げきの磁束密度 B_g がわかったので分布力の密度は

$$F=\frac{B_g^2}{2\mu_0}=\frac{1}{2\mu_0}[\sum\{(B_{1f}+B_{1b}+B_{1Nf}+B_{1Nb}+B_{1Mf}+B_{1Mb})-(B_{2f}+B_{2b}+B_{2Rf}+B_{2Tf}+B_{2Rb}+B_{2Tb})\}]^2 \quad (\mathrm{N/m^2}) \quad \ldots\ldots(10)$$

にて求まる。(10)式のうちN次前進磁束とR次前進磁束との積の項を考えてみると

$$\Delta F_{NR}=\frac{1}{2\mu_0}B_{1Nfm}\cdot B_{2Rfm}\cdot\cos\left\{N_{x1}\frac{\pi}{\lambda}-\omega t\right\}\cos\left\{R_{x1}\frac{\pi}{\lambda}-\omega\{R(1-s)-s\}t+\theta_{Rf}\right\}$$

$$=\frac{1}{2\mu_0}\left\{B_{1Nfm}\cdot B_{2Rfm}\cdot\cos\left\{(R-N)x_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\{R(1-s)-1-s\}t+\theta_{Rf}\right\}+\cos\left\{(R+N)x_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\{R(1-s)+1-s\}t+\theta_{Rf}\right\}\right\} \quad (\mathrm{N/m^2}) \quad \ldots\ldots(11)$$

(11)式の第一項は，比較的低次の振動モードを作り，第二項は高次の振動モードを生ずる分布力である。一般に高次の振動モードについては振動インピーダンスが大きいため無視できる。分布力は空げき円周上に分布した半径方向の力の集合であるが，振動モードを解析するためには，半波長ごとに分布力のベクトル和をとって考えるのが便利である。そこで(11)式第一項について半波長間のベクトル和 $F_{(R-N)}$ を求めてみる。ある瞬時を考えるとその分布力は図1のようになっており

$$x_1=-\frac{\lambda}{2(R-N)}\text{から}\quad x_1=\frac{\lambda}{2(R-N)}$$

までの力の 0–0′ 方向成分を積分すれば求められる。すなわち

$$F_{(R-N)}=\frac{l}{2\mu_0}B_{1Nfm}\cdot B_{2Rfm}\cdot 2\int_0^{\lambda/2(R-N)}\cos(R-N)x_1\frac{\pi}{\lambda}\cdot\cos\frac{2\pi}{P\lambda}x_1\,dx_1$$

$$=K_0B_{1Nfm}\cdot B_{2Rfm}\cdot A_m=K_0B^2I_{1f}I_{2f}\frac{A_m\eta_R}{NR}\quad(\mathrm{N}) \quad \ldots\ldots(12)$$

ここに，$m=\frac{P}{2}(R-N)$……振動モード次数

$$K_0=\frac{P\lambda l}{2\pi\mu_0}$$

$$A_m=\frac{1}{2}\left\{\frac{\sin\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{1}{m}\right)}{m-1}+\frac{\sin\frac{\pi}{2}\left(1+\frac{1}{m}\right)}{m+1}\right\}$$

……振動モード係数と称する。

l ＝積　厚

このmは，分布力の空間的な分布の次数を表わすもので振動モード次数と称することにする。$F_{(R-N)}$の時間的変化の周波数 $f_{V(R-N)}$ は(11)式から

$$f_{V(R-N)}=\{R(1-s)-1-s\}f=\frac{K_2S_r}{60}X-2f \quad \ldots\ldots(13)$$

ここに，　f：電源の周波数　(Hz)

X：ロータの回転数　(rpm)

(10)式のそのほかの項についても同様の計算を行ない比較的低次の振動モードをもつ分布力を整理すると表1のようになる。

2.3 分布力の種類

分布力の次数mの各値に対する振動モードを図2に示す。

(1)　$m=0$：円周一様に半径方向分布力を生ずる。

(2)　$m=1$：この場合には分布力は全円周を一波長として分布し，鉄心全体を一つの剛体としてある方向へ押そうとする働きをする。

(3)　$m\geqq 2$：この場合には分布力は空げき全周の $1/m$ を一波長として分布し鉄心に弯曲変形を生ずるように働く。

2.4 振動トルク

一般にトルクは磁界のエネルギーから計算することができる。すなわち鉄の透磁率を無限大とすると，空げきにたくわえられる磁界のエネルギーをWとし，回転子の角度を$\partial\Delta$だけ動かしたときのW

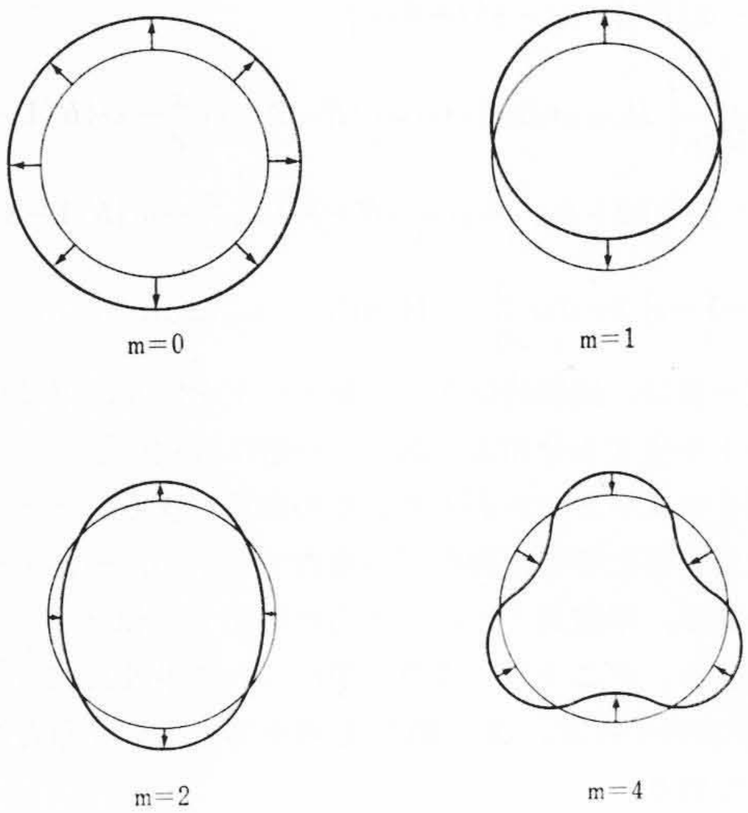


図2　分布力の種類

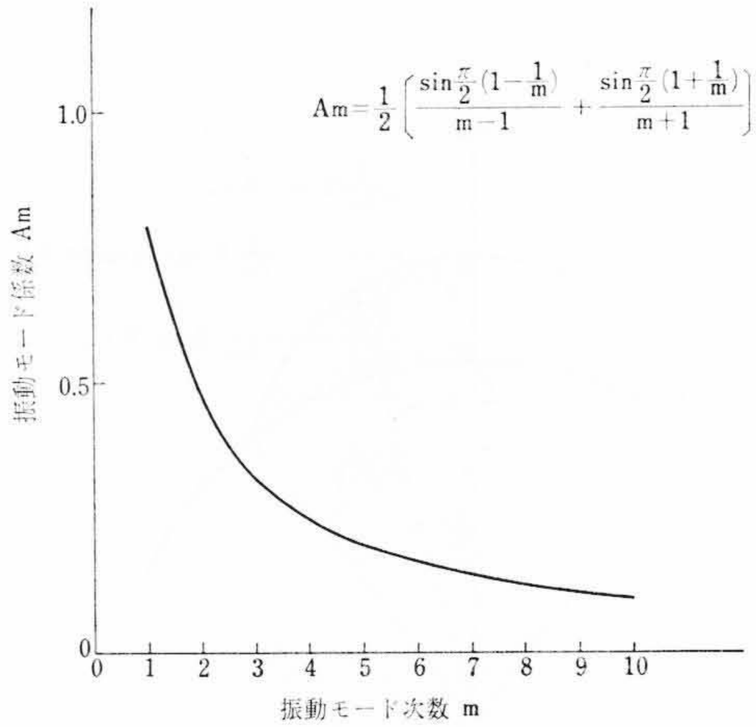


図3　分布力の振動モード係数

の変化を∂Wとすれば

$$T=-\frac{\partial W}{\partial \Delta} \quad (\text{N-m}) \quad \cdots\cdots(14)$$

である。

空げき内磁束密度は(9)式で与えられるので，トルクは次式になる。

$$T=\int_0^{P\lambda}-\frac{\partial}{\partial \Delta}\left\{\frac{B_g^2}{2\mu_0}\cdot l\cdot g_e\right\}dx_1 \quad (\text{N-m}) \quad \cdots\cdots(15)$$

ここに，

D_r：ロータ径（m）　B_g：空げき内磁束密度（Wb/m²）

l：有効鉄心長（m）　μ_0：空気の透磁率 $4\pi\times10^{-7}$

g_e：有効空げき長（m）　P：極数

λ：極ピッチ（m）

N次高調波とR次高調波について考えてみるとトルクは

$$\begin{aligned}T_{Nf.Rf}&=\int_0^{P\lambda}\frac{l\cdot g_e}{2\mu_0}\left\{2B_{1Nfm}\cos\left(Nx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega t\right)\cdot B_{2Rfm}\right.\\&\left.\cdot R\frac{P}{2}\sin\left(Rx_1\frac{\pi}{\lambda}-\omega\left\{R(1-s)-s\right\}t+\theta_{Rf}\right)\right\}dx_1\\&=K_T RB_{1Nfm}B_{2Rfm}\int_0^{P\lambda}\left\{\sin\left((N+R)x_1\frac{\pi}{\lambda}\{R(1\right.\right.\\&\quad -s)+1-s\}t+\theta_{Rf}\Big)+\sin\Big((R-N)x_1\frac{\pi}{\lambda}\\&\quad \left.\left.-\omega\{R(1-s)-1-s\}t+\theta_{Rf}\right)\right\}dx_1 \quad\cdots\cdots(16)\end{aligned}$$

(16)式でx_1の係数がゼロ以外の項まで積分すると0となるから残る項は$R=N$つまりステータ側次数とロータ測次数が等しい場合であり，これが高周波の振動トルクとなる。すなわち$R=N$のとき振動トルクは

$$\begin{aligned}T_{Nf.Rf}&=K_T\cdot R\cdot B_{1Nfm}\ B_{2Rfm}\sin\left[\theta_{Rf}-\omega\left[R(1-s)-1-s\right]t\right]\\&=K_T B^2 I_{1f}I_{2f}\frac{\eta_R}{N}\sin\left[\theta_{Rf}-\omega\left[R(1-s)-1-s\right]t\right]\\&\qquad (\text{N-m}) \quad\cdots\cdots(17)\end{aligned}$$

周波数$f_{V(Rf.Nf)}$は

$$f_{V(Rf.Nf)}=\left[R(1-s)-1-s\right]f=\frac{K_2\cdot S_r\cdot X}{60}-2f \quad\cdots\cdots(18)$$

となりこれはB_{1Nfm}とB_{2Rfm}による分布力の周波数$f_{(R-N)}$(13)と同じになる。同様にほかのステータおよびロータ磁束間の振動トルクを計算し，すべてあげると表1の振動トルクとなる。

2.5　ステータとロータのスロット数の組合せの考察

2.5.1　分布力係数，振動トルク係数

表1からS_s，S_r，f，Xが与えられると次のことがわかる。

（1）　K_2の一つの値に対応してそれぞれ3種の周波数の分布力および振動トルクが発生する可能性がある。

（2）　振動トルクはステータ次数(NまたはM)とロータ次数（RまたはT）が等しい条件においてのみ発生する。

（3）　分布力の大きさはすべて

$$K_0B^2I_1\left(\frac{f}{b}\right)I_2\left(\frac{f}{b}\right)\frac{A_m\,\eta\binom{R}{T}}{\binom{N}{M}\binom{R}{T}}$$

の形で与えられているから（$\binom{f}{b}$はfまたはbの意，$\binom{R}{T}$，$\binom{N}{M}$も同様）次数N（またはM），R（またはT）が大きいほど小さくなる。またA_mは図4に示すように，振動モード次数mが大きいほど小さくなる。したがってK_2が大きくなると分布力の大きさは急激に小さくなる。

（4）　振動トルクの大きさも，

$$K_TB^2I_1\left(\frac{f}{b}\right)I_2\left(\frac{f}{b}\right)\frac{\eta\binom{R}{T}}{\binom{N}{M}}$$

の形で与えられるから同様に次数N（またはM）が大きいほど，したがってK_2が大きいほど小さくなる。

（5）　$\dfrac{A_m\,\eta\binom{R}{T}}{\binom{N}{M}\binom{R}{T}}$，$\dfrac{\eta\binom{R}{T}}{\binom{N}{M}}$

は高調波の次数，モードの次数，スキュー係数のみの関係で，分布力，振動トルクの大きさを代表すると考えられるので，それぞれ分布力係数，振動トルク係数と称することにする。

2.5.2　スロット数の組合せによる磁気力

表2は扇風機として使用例の多い，16スロットのステータと14～19スロットのロータとの組合せの一覧表である。ステータ高調波については$K_1=1\sim15$に対応するNおよびM，ロータ高調波については$K_2=1\sim6$に対応するRおよびTが計算されている。理論的には，これらのすべての$\binom{N}{M}$と$\binom{R}{T}$の組合せに対して磁気力が働くが，表3から明らかなように，分布力については$\left|\binom{R}{T}-\binom{N}{M}\right|$の大きいものはモード次数$m$が大きく，ほとんど実際の騒音に寄与しないことと振動トルクについては，$\binom{R}{T}=\binom{N}{M}$の条件を満たさないと発生しないことを考慮して，$R$（または$T$）の各値に対しもっとも分布力係数，振動トルク係数の大きくなる力だけを○，◇，□，で表示した。

（1）　16スロットステータと各種ロータとの組合せについての考察

表2より次のことがわかる。

表2　16スロットステータと各種ロータとの組合せ一覧表

ステータ溝高調波

ステタスロット数	溝高調波の計算式	$K_1=1$	$K_1=2$	$K_1=3$	$K_1=4$	$K_1=5$	$K_1=6$	$K_1=7$	$K_1=8$	$K_1=9$	$K_1=10$	$K_1=11$	$K_1=12$	$K_1=13$	$K_1=14$	$K_1=15$
16 スロット	$N=8\ K_1-1$	7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	87	95	103	111	119
	$M=8\ K_1+1$	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	121

ロータ溝高調波

ロータスロット数	溝高調波の計算式	$K_2=1$	$K_2=2$	$K_2=3$	$K_2=4$	$K_2=5$	$K_2=6$
14 スロット	$R=7\quad K_2-1$	□ 6	13	20	27	□ 34	○ 41
	$T=7\quad K_2+1$	□ 8	○ 15	□ 22	29	36	43
15 スロット	$R=7.5\ K_2-1$	◇ 6.5	□ 14	21.5	29	36.5	44
	$T=7.5\ K_2+1$	◇ 8.5	□ 16	◇ 23.5	○ 31	38.5	□ 46
16 スロット	$R=8\quad K_2-1$	○ 7	○ 15	○ 23	○ 31	○ 39	○ 47
	$T=8\quad K_2+1$	○ 9	○ 17	○ 25	○ 33	○ 41	○ 49
17 スロット	$R=8.5\ K_2-1$	◇ 7.5	□ 16	◇ 24.5	○ 33	◇ 41.5	□ 50
	$T=8.5\ K_2+1$	◇ 9.5	□ 18	26.5	35	43.5	52
18 スロット	$R=9\quad K_2-1$	□ 8	○ 17	□ 26	35	44	53
	$T=9\quad K_2+1$	□ 10	19	28	37	□ 46	○ 55
19 スロット	$R=9.5\ K_2-1$	◇ 8.5	□ 18	27.5	37	46.5	□ 56
	$T=9.5\ K_2+1$	10.5	20	29.5	○ 39	48.5	□ 58

注：○印は振動トルクを発生する高調波の基本波に対する次数
◇印は振動モード m=1 の分布力を発生する高調波の基本波に対する次数
□印は振動モード m=2 の分布力を発生する高調波の基本波に対する次数

表3　$S_s=16,\ S_r=17$ のモータの騒音スペクトル計算値

K_2	周波数 f_V(Hz) 50 Hz $X=$ 1,250 rpm	50 Hz $X=$ 1,000 rpm	50 Hz $X=$ 800 rpm	60 Hz $X=$ 1,350 rpm	60 Hz $X=$ 980 rpm	60 Hz $X=$ 760 rpm	$\binom{R}{T}$	$\binom{N}{M}$	分布力による振動モード次数 m	分布力係数 $\frac{A_m\ \eta\binom{R}{T}}{\binom{N}{M}\ \binom{R}{T}}$	振動力トルク係数 $\frac{\eta\binom{R}{T}}{\binom{N}{M}}$
1	255	185	127	264	158	95	$R=7.5$	$N=7$	1	18×10^{-4}	*
	355	285	227	384	278	215	$R=7.5$	$M=9$	3	5.8×10^{-4}	*
	455	385	327	504	398	335	$T=9.5$	$N=7$	5	6.4×10^{-4}	*
							$T=9.5$	$M=9$	1	19.7×10^{-4}	*
2	610	470	354	648	436	310	$R=16$	$N=15$	2	2.51×10^{-4}	*
	710	570	454	768	556	430	$R=16$	$M=17$	2	2.21×10^{-4}	*
	810	670	554	888	676	550	$T=18$	$N=15$	6	0.476×10^{-4}	*
							$T=18$	$M=17$	2	1.2×10^{-4}	*
3	955	755	581	1,032	714	525	$R=24.5$	$N=23$	3	0.21×10^{-4}	*
	1,055	855	681	1,152	834	645	$R=24.5$	$M=25$	1	0.76×10^{-4}	*
	1,155	955	781	1,272	954	765	$T=26.5$	$N=23$	7	0.0315×10^{-4}	*
							$T=26.5$	$M=25$	3	0.0668×10^{-4}	*
4	1,300	1,040	808	1.416	1,092	740	$R=33$	$N=31$	4	0.0262×10^{-4}	*
	1,400	1,140	908	1,536	1,112	860	$R=33$	$M=33$	**	**	3.3×10^{-4}
	1,500	1,240	1,008	1,656	1,232	980	$T=35$	$N=31$	8	0.062×10^{-4}	*
							$T=35$	$M=33$	4	0.116×10^{-4}	*

（注）1.　振動モード次数は $\left|\binom{N}{M}-\binom{R}{T}\right|$ の最も小さいもののみを計算した
2.　*印は計算上振動源が発生しないことを示す

（a）　15, 17, 19 の奇数スロットでは $K_2=1$ の次数の低いところで $m=1$ の分布力を発生するため，この組合せではかなり磁気音発生が予想される。しかし振動トルクは $K_2=4$ と比較的高いところで発生する。

（b）　14, 18 の偶数スロットでは $m=1$ の分布力は存在せず $m=2$ の分布力が発生するため，磁気音の小さいことが考えられる。しかし振動トルクは $K_2=2$ と次数の低いところで発生するため，振動トルクが問題となる場合には注意を要する。

（c）　16 の偶数スロットでは，分布力は $m=4$ となるため非常に小さくなる。しかし，振動トルクは低い次数で発生し大きくなるため問題がある。

以上の結果をさらに使用上から考えてみると

（i）　16 スロットステータと 14～19 スロットの組合せでは，分布力振動トルクともなくなる組合せは存在しない。

（ii）　振動トルクを問題とせず分布力だけを小さくしたい場合には 14, 18 のいずれかを選定するのがよい。

（iii）　分布力を問題とせず振動トルクだけを小さくしたい場合には，15, 17, 19 のいずれかを選定するのがよい。

3.　実験結果とその検討

3.1　扇風機の磁気音とその発生状況

実際の扇風機の騒音のうち，分布力による磁気音がどんな様子で現われるのかを理解するため，扇風機の各速度調整ノッチごとに騒音を周波数分析した。図 4 はこの様子を示したものである。表 3 はこの供試モータの騒音スペクトルを表 1 から計算したものである。この表からわかるように，たとえば 50 Hz 3 ノッチ $X=1{,}250$ rpm のときは，255, 355, 455, 610, 710, 810, 955, 1,055, 1,155, 1,300, 1,400, 1,500, ...Hz の分布力が発生する。ただし K_2 の大きいものは分布力係数が小さくなり無視できることがわかる。この組合せでは，振動トルクは $K_2=4$ のときだけ発生し，たとえば $X=1{,}250$ に

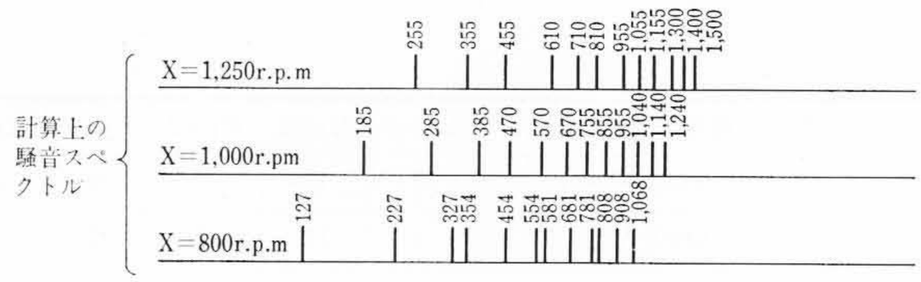
対しては1,300，1,400，1,500 Hzにのみ発生することがわかる。振動トルク係数は次数が大きい割合に小さくならず，$K_2=4$でも無視できない。**図4**中の騒音スペクトルは，**表3**の計算値を記入したもので，磁気音の大きいものだけが，実測側に対応していると考えられ，そのほかは扇風機固有の騒音レベルにマスクされて，現われていないと考えられる。したがって，特に大きなレベル騒音の発生だけを防げば，実用上支障ない低騒音が得られると考えてよい。

3.2 実験内容

いままで述べてきたスロット組合せについて，扇風機用モータを使用し，分布力および振動トルクによる磁気音を音圧として測定した。分布力による磁気音はモータ単体の側面から120 mmの位置で，振動トルクによる磁気音は羽根後端面から，300 mmの位置で測定された。

3.3 スロット数組合せと分布力および振動トルクによる磁気音との関係

図5は，ステータスロット数$S_s=16$，ロータスロット数$S_r=14$, 15, 16, 17, 18, 19の組合せに対し，スキュー量を1.0から，1.6スロットピッチごとに変えて50 Hz 1,250 rpm, 60 Hz 1,350 rpmについて，モータ単体の分布力による磁気音を測定したものである。**図6**は，**図5**と同一データをスキューをパラメータとしてスロット数に対する分布力の磁気音をかきかえたもので，スロット数に対する分布力の磁気音の変化がわかりやすい。**図7**は，1.0スキューロータに関し，スロット数に対する振動トルクの磁気音を$K_2=2$および$K_2=4$に関し求めたもので，それぞれK_2に相当する磁気音中最大値をプロットしてある。なお振動トルクによる磁気音は，共



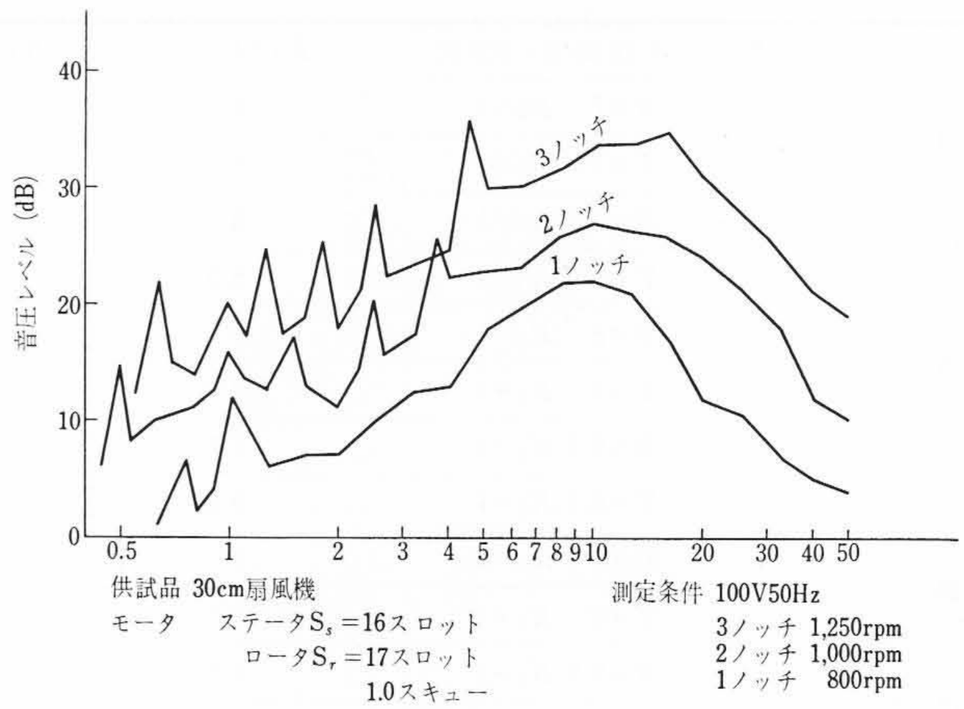


図4　騒音周波数特性　（分布力による本体の磁気音）

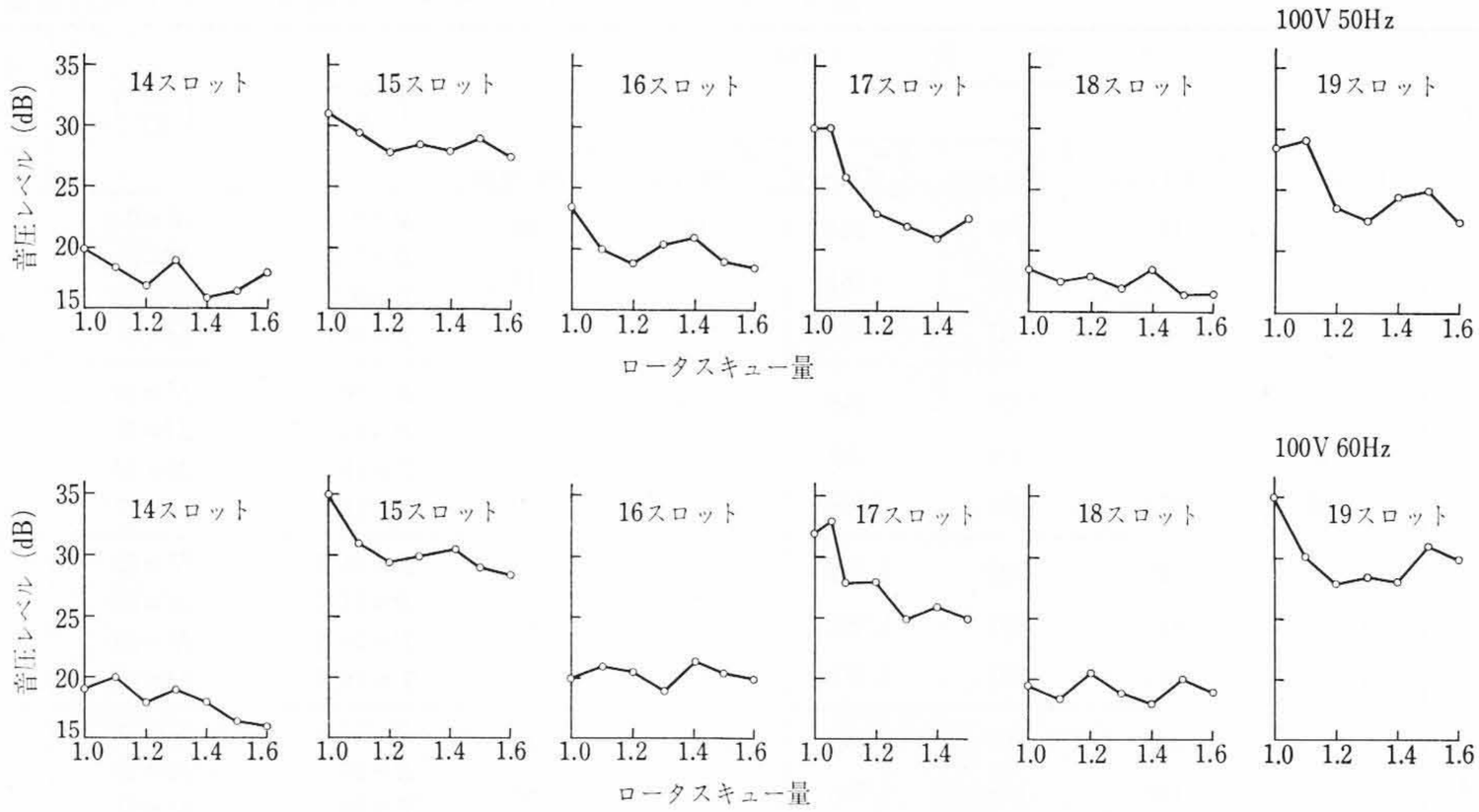


図5　ロータスロット数と分布力によるモータ単体磁気音の大きさの関係

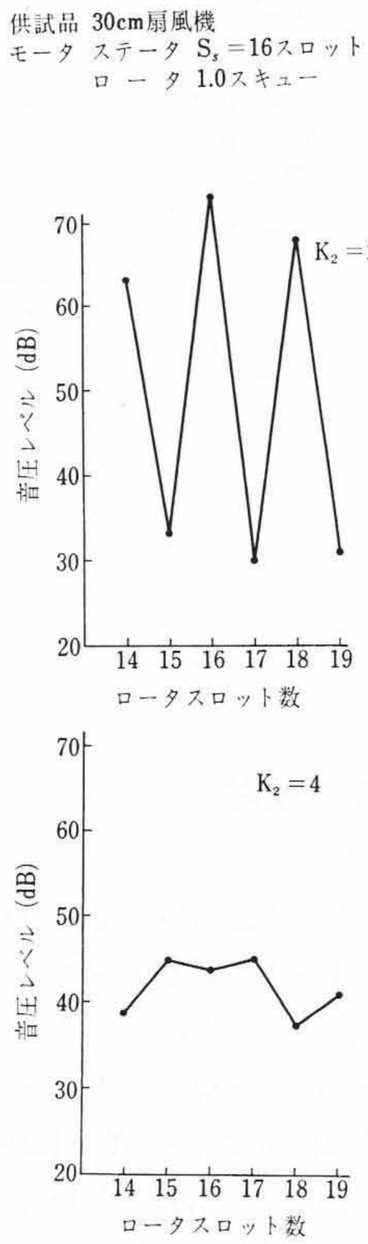


図7　ロータスロット数と振動トルクによる羽根磁気音の大きさの関係

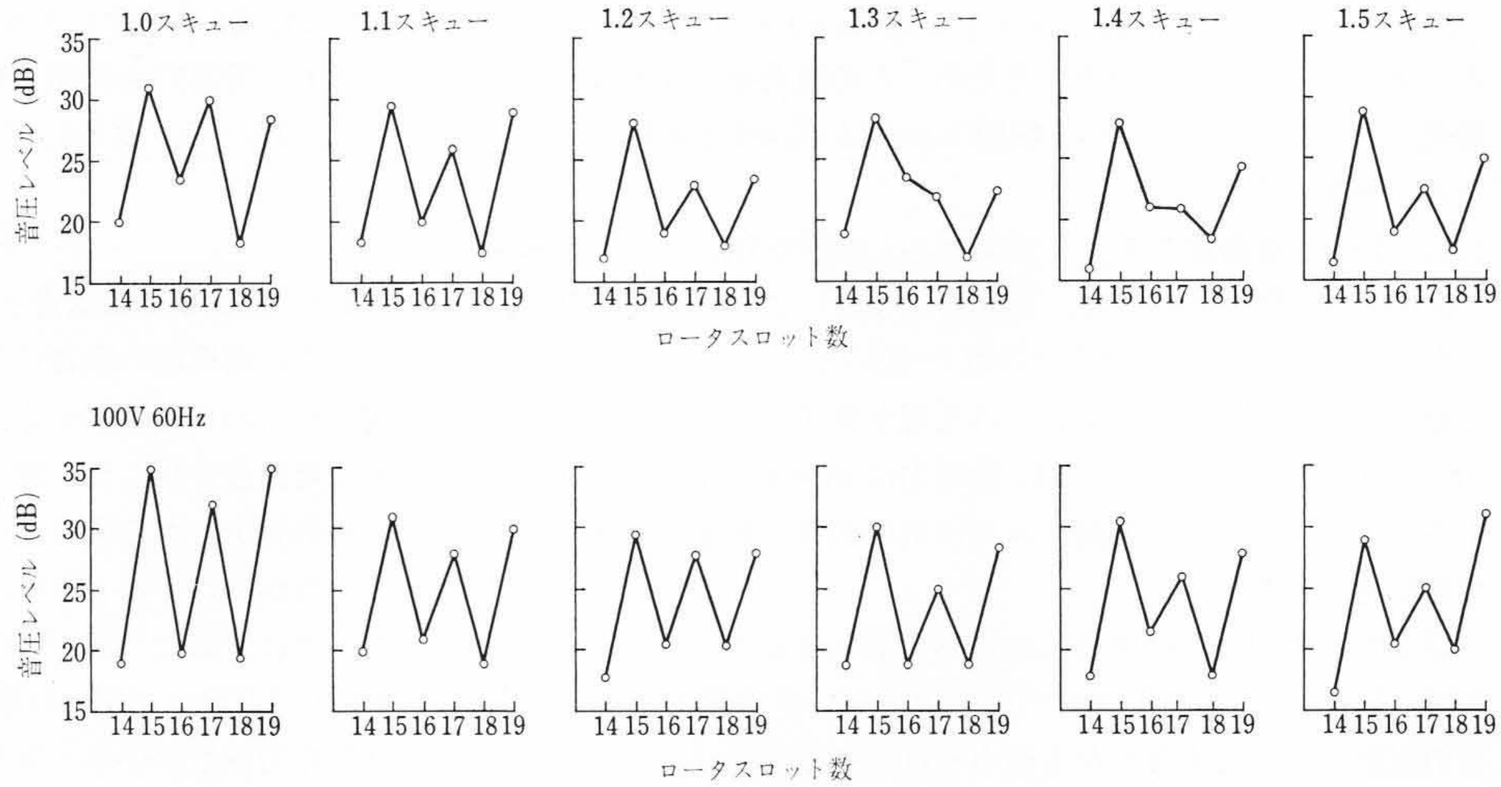


図6　ロータスロット数と分布力によるモータ単体磁気音の関係

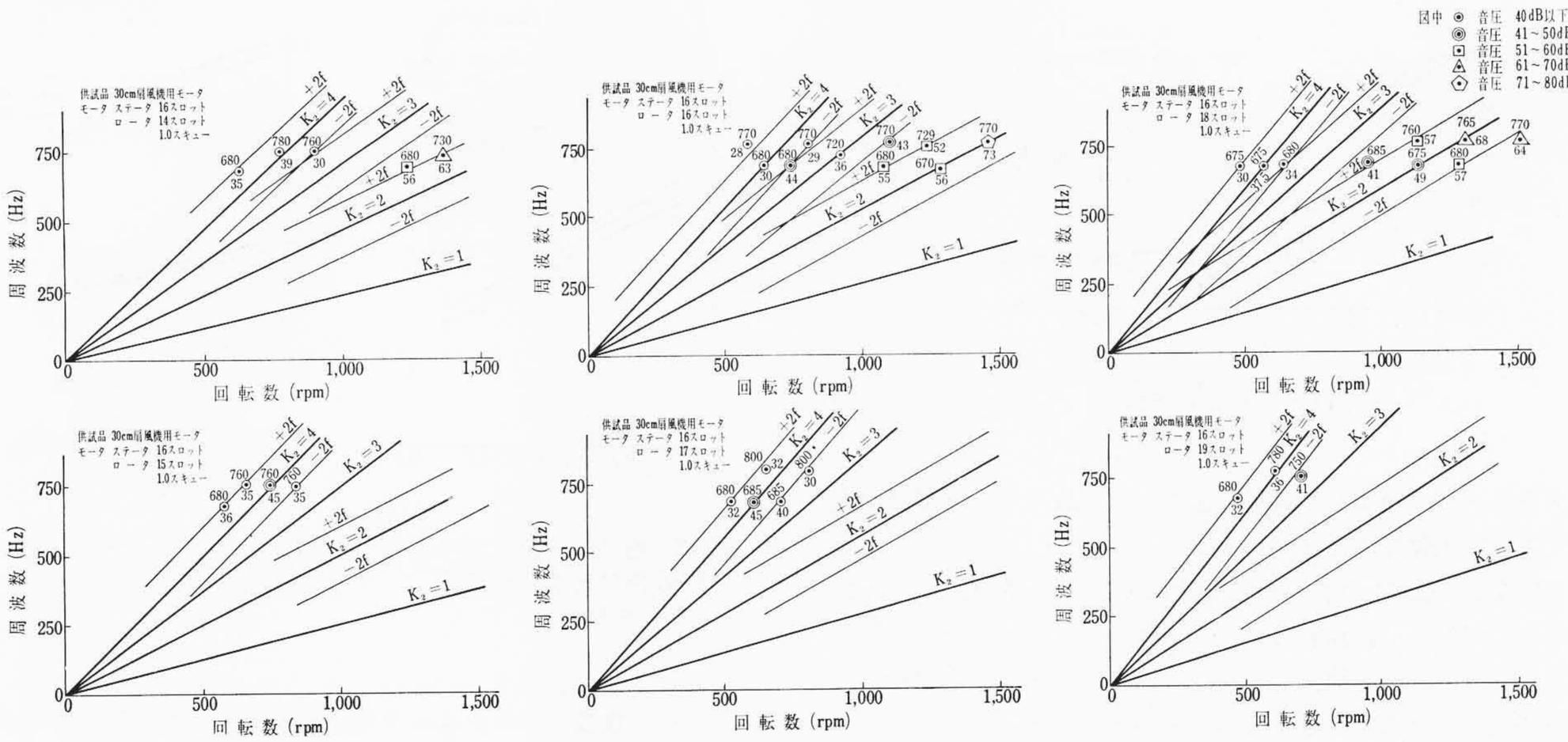


図 8　振動トルクによる羽根磁気音の発生回転数と周波数との関係

振点付近以外は大きくあらわれないため，測定にあたっては，電圧を調整して回転数を変え共振点を探して測定した。図 8 は $S_r=14$, 15, 16, 17, 19 に対し，それぞれ振動トルク発生回転数と周波数および大きさを図示してある。それぞれの記号は，図中にも記されているが◉が音圧 40 dB 以下，◎ が音圧 41～50 dB, □ が音圧 51～60 dB, △ が音圧 61～70 dB および ⬠ が 71～80 dB の範囲内にあることを示し，それぞれの記号の下側数字は音圧〔dB〕，上側数字は周波数〔Hz〕を表わしている。実測点以外では羽根の振動インピーダンスが大きく磁気音はない。

以上のことを頭において図 8 をみると $K_2=4$ の音はすべてのスロット数に対し，40 dB 前後〔◉および◎〕，また偶数スロット 14, 16, 18 では $K_2=2$ の音は 60 dB 前後の音を発生しているのがわかる。スロット数組合せに対する分布力および振動トルクによる磁気音を検討してみると

（1） 15, 17, 19 奇数スロットでは 20 dB 以上の分布力による磁気音を有するが，いずれもスキューを増すことにより減少する傾向を示している。振動トルクに起因する羽根磁気音は $K_2=4$ の音だけでないので偶数スロットに比較しかなり小さい。

（2） 14, 18 偶数スロットロータで分布力による磁気音は小さく（ほとんど 20 dB 以下）ロータスキュー量による変化も認められない。また本体に組込んだ場合も磁気音は感じられない。しかし振動トルクによる磁気音はかなり大きい。この磁気音は $K_2=2$ および $K_2=4$ で発生するため回転数をさけて使用することはむずかしい。したがってこの組合せを使用するためには，振動トルクによる磁気音そのものを減少させることが必要である。

（3） S_r/P=整数を満足する 16 スロットでは振動トルクによる磁気音は $K_2=2$, $K_2=3$, $K_2=4$ のすべてに生ずるためほかの偶数スロットより多くの回転数で発生する。さらにこの組合せでは，起動トルクの位置による変動も大きく問題がある。

3.4　スキュー量の変化と分布力振動トルクによる磁気音の関係

3.2 の検討結果のうち，スキュー量に関しさらにくわしく検討するため $S_s=16$ スロット，$S_r=17$ スロットのものにつき 0.4～2.18 まで変化させた場合のモータ単体の分布力による磁気音を測定した。図 9 はこれを示したものである。また，振動トルクによる磁気音に関し，スキュー量の効果をみるため振動トルクによる磁気音の比較的発生しやすい $S_s=16$ スロット，$S_r=18$ スロットに関し測定した。図 10 はこれを示したものである。まず分布力による磁気音はスロットの組合せから $K_2=1$, $R=7.5$, $T=9.5$ で発生しているので，これらに対するスキュー係数を計算してみると図 11 のようになる。15 次（$=P/2\cdot T$）のスロット高調波に対しては 1.13 スロットピッチ，19 次（$=P/2\cdot T$）のスロット高調波に対しては 0.9 スロットピッチのとき，それぞれ高調波の影響を除去することができる。しかしこれらスロット高調波は空げき中に同時に存在するにもかかわらず，

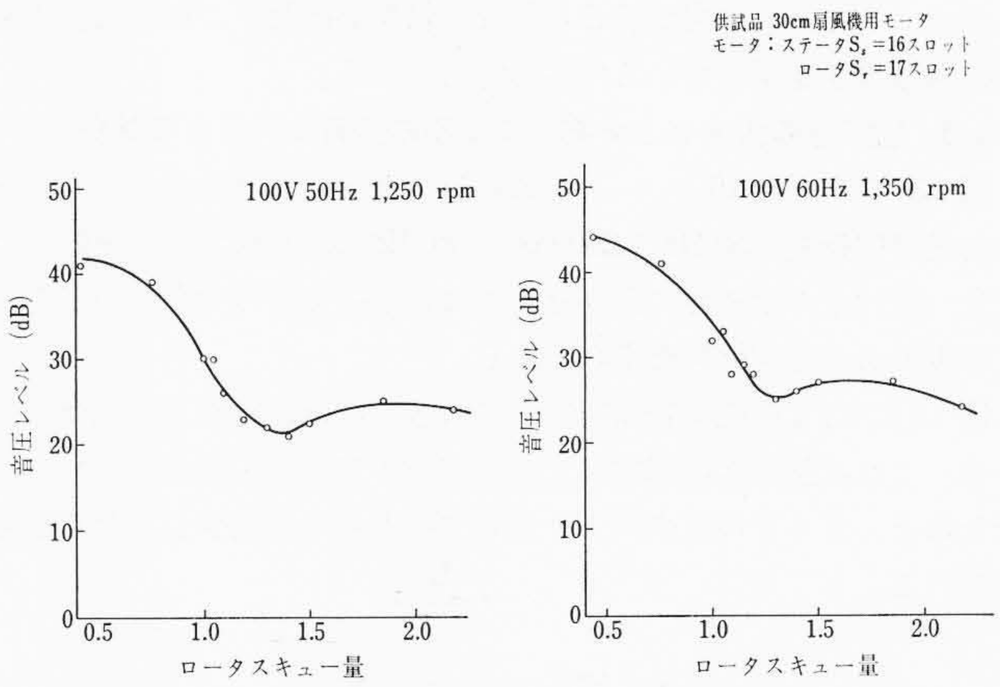


図 9　ロータスキュー量と分布力による磁気音の大きさの関係（モータ単体）

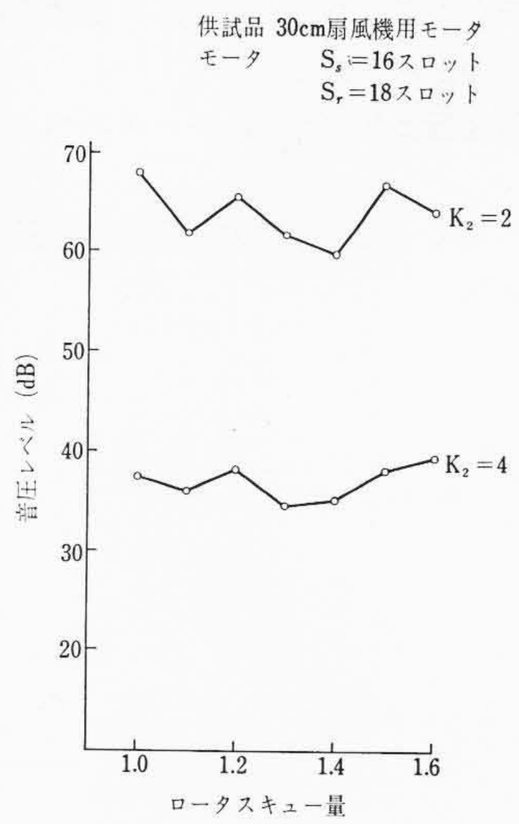


図 10　ロータスキュー量と振動トルクによる羽根磁気音の大きさの関係

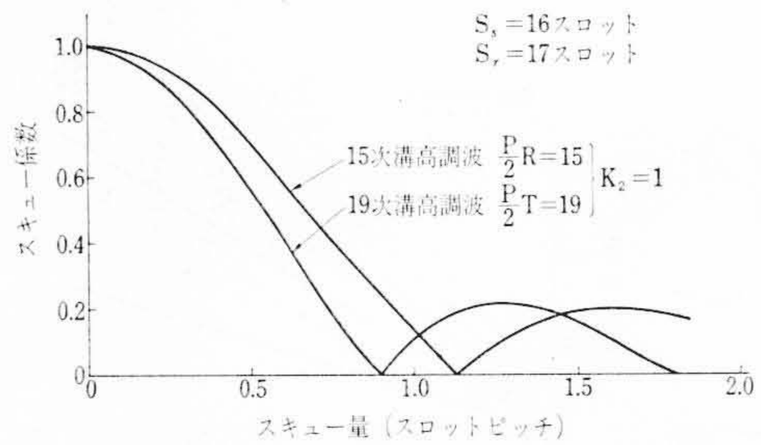


図11　スキュー係数

ロータスキューは1種類しか選択できないため，スキュー量だけ完全に除くことは困難であるのがわかる。

図9の実測値と図11の計算値とを比較すると，実測値では1.3付近に谷を生じており，計算値と合っていない。これはスキュー量だけではスロット高調波を除去できないことと，スキュー効果そのものも完全でないことにより起こるものと考えられる。

次に振動トルクによる磁気音に対するスキュー効果を図10の実測値について調べてみると，特にどこが小さいという傾向を示すことなく，スキュー効果が感じられない結果が出た。これは羽根磁気音が共振現象を呈しているためと考えられる。

3.5　空げきの大きさと分布力による磁気音の大きさの関係

図12, 13はS_s=16スロット，S_r=17スロット1.0スキューのモータを定格回転数（50 Hz 1,250 rpm，60 Hz 1,350 rpm）で運転したとき，空げきの大きさにより分布力による磁気音の大きさがどのように変わるかを実験したものである。

図12より，この磁気音は空げきの大きさにほぼ比例し，減少している。これは空げきの増加とともにパーミアンスの変化がやわらいだためと，トルクの減少により分布力そのものが減少したためと考えられる。

4.　結　　言

（1）　扇風機の磁気音には振動トルクを原因として羽根より発生する磁気音と，分布力を原因とした本体の一部である基台支柱などにより発生する磁気音の二つがあり，ともに空げきに存在するスロット高調波がその発生源である。

（2）　上記2種類の磁気音とステータ，ロータスロット組合せとの関係

（a）　奇数ロータスロットでは分布力が大きく振動トルクが小さくなる。

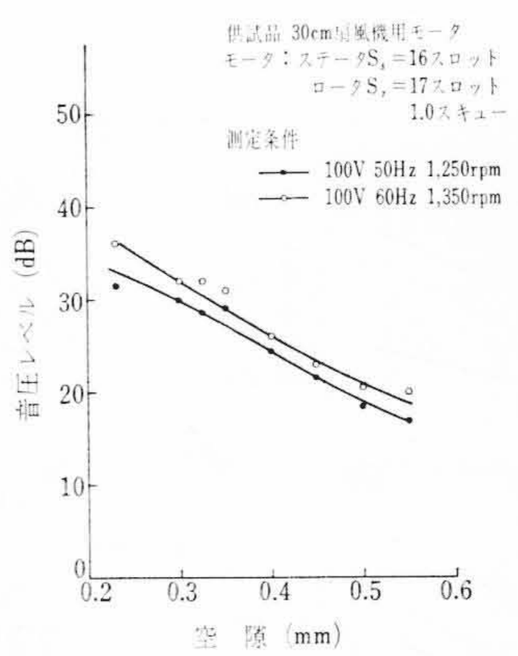


図12　空げきと分布力による磁気音の大きさの関係（モータ単体）

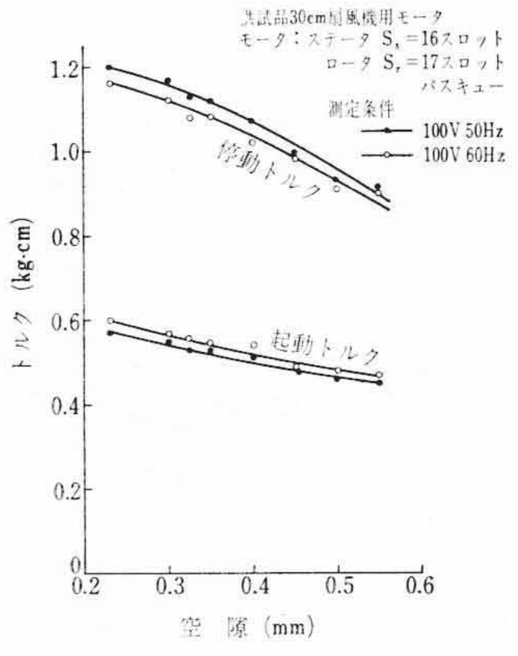


図13　空げきとモータトルクの大きさの関係

（b）　偶数ロータスロットでは分布力が小さく振動トルクが大きくなる。

（c）　偶数ロータスロットの中でもS_r/P=整数を満足するロータスロットでは分布力は小さいが振動トルクがほかの組合せより大きいため，羽根からの磁気音が大きくなり，この組合せは避けるのがよい。

（3）　2種類の磁気音を同時に小さくする組合せは存在しないため，用途に応じて重要視するほうを基準にスロット数の選定を行なう必要がある。また他方の磁気音を小さくするためには適切なスキュー量の選定，空げきの増加，閉スロットロータの採用などにより検討する必要がある。

（4）　スキュー効果は分布力による磁気音に関してはみとめられたが，振動トルクによる磁気音に関してはみとめられなかった。しかし両方とも完全とはいえい。これは一つにはすべての高調波に対してスキュー効果を完全にできないことと，磁気音の発生が共振現象を呈しているためと考えられる。したがってある程度実験的検討により最もよいスキュー量を決定するのがよい。

（5）　空げきの増加は分布力の磁気音に効果があるが，あまり顕著ではない。さらにトルク特性の低下を生ずるため特性とのかねあいで決める必要がある。

参　考　文　献

（1）　J. Morill, W. J.: Harmonic Theory of Noise in Induction Motors, Trans. AIEE. (1940)

（2）　尾本，石崎：　電工論 **4**，127（昭27）