

特集

回転機に働く電磁力と振動, 騒音

堀 康郎

(岐阜大学)

高橋 身佳

(日立製作所)

1 はじめに

最近の回転機は小型, 軽量化に伴い, 構造全体の剛性が低下し, 振動, 騒音が発生しやすくなっている. また, インバータ運転では, 電源に高調波が含まれ, 回転数の変化範囲が広く, 加振力となる周波数成分が多く, かつそれらの周波数が変化することから, 構造系の固有振動数との共振の可能性が大きくなっている. 最近では, 電磁界解析技術, 振動解析技術, 音場解析技術が進歩し, CAE (Computer Aided Engineering) を用いて, 騒音発生源の電磁加振力から, 騒音の放射までを総合的に解析する技術が開発されてきている [1]. ここでは, 振動, 騒音発生源となる電磁力について最近のシミュレーション例を紹介しながら, 概説するとともに, 電磁力の低減方法についても述べる. また, 振動, 騒音については, 音の主の放射源となる固定子の固有振動数の計算法, 騒音の予測法を示すとともに, 振動, 騒音の低減法についても述べる.

2 回転機に働く電磁力

電磁気学的に物体に働く力は, 次式のように磁気的な力と電気的な力とで与えられる [2].

$$F = \int_v (f_m + f_e) dv \quad (1)$$

$$f_m = \nabla(M \cdot H) + I \times B \quad (2)$$

$$f_e = \rho E + (P \cdot \nabla)E \quad (3)$$

ここに, ρ : 電荷密度, E : 電界強度, I : 電流, H : 磁界強度, B : 磁束密度, M : 磁気ベクトル, P : 電気分極ベクトル

(2) 式の第 1 項は磁化と磁界の作用によって生ずる力で, 永久磁石モータ, スロット形直流機, かご形誘導電動機, 同期機, リラクタンスモータなどのトルクはこれを利用したもので最も応用の広い項で, いわゆる鉄心に働く力となる. また, 第 2 項の $I \times B$ は電流と磁界による作用で発生する力で, 空隙に配置さ

れる巻線端や渦電流モータなどの電流の流れる部分に直接作用する力となる. 一方, (3) 式は静電モータに利用され得るもので, 磁気的な力に比べると極めて小さい.

ここで, (2), (3) 式の各ベクトル量は回転機の構造, 磁気飽和及び電源の影響で時間的空間的な高調波を含んでいる場合がほとんどで, これら各高調波成分の相互作用で電磁力にも同様に時間と空間の高調波成分が発生する.

具体的な電磁力の解析方法には Maxwell の電磁界方程式を解析的に解く方法や, 磁気回路を仮定したパーミアンス法等もあるが, 1970 年代に有限要素法が回転機の電磁界解析の分野にも適用が始まり, 局所的構造の効果などが定量的に評価できるようになった. 更に, 1990 年代には回転機特有の回転子の回転を容易に扱える有限要素法の解析技術が開発され, 回路との連成による電源高調波も含めた電磁力の評価が可能になってきている. 最近では, 三次元解析も適用され始め, 複雑な端部構造の影響も評価出来るようになってきている.

以下, 代表機種に対する電磁力の解析例について紹介する.

2.1 三相誘導電動機 [3][10]

電磁騒音の代表的なものは誘導電動機である. 高調波による磁束の相互作用によって生じた電磁力は固定子や回転子に作用して, これらの構造物を振動させ騒音を発生させる. 電磁力で直接発生する騒音に関して大抵の場合, 固定子の半径方向振動が顕著な騒音源に成ることが多い. 一般に誘導機のギャップに n 次と m 次の高調波磁束が存在している場合, これら 2 個の高調波磁束による電磁力波は次のようになる.

$$f_r \propto B_n \cdot B_m \left\{ \cos(\omega_n - \omega_m)t - (n - m) \frac{2}{p} \cdot \frac{\pi}{\tau} x \right\} - \cos \left\{ (\omega_n + \omega_m)t - (n + m) \frac{2}{p} \cdot \frac{\pi}{\tau} x \right\} \quad (4)$$

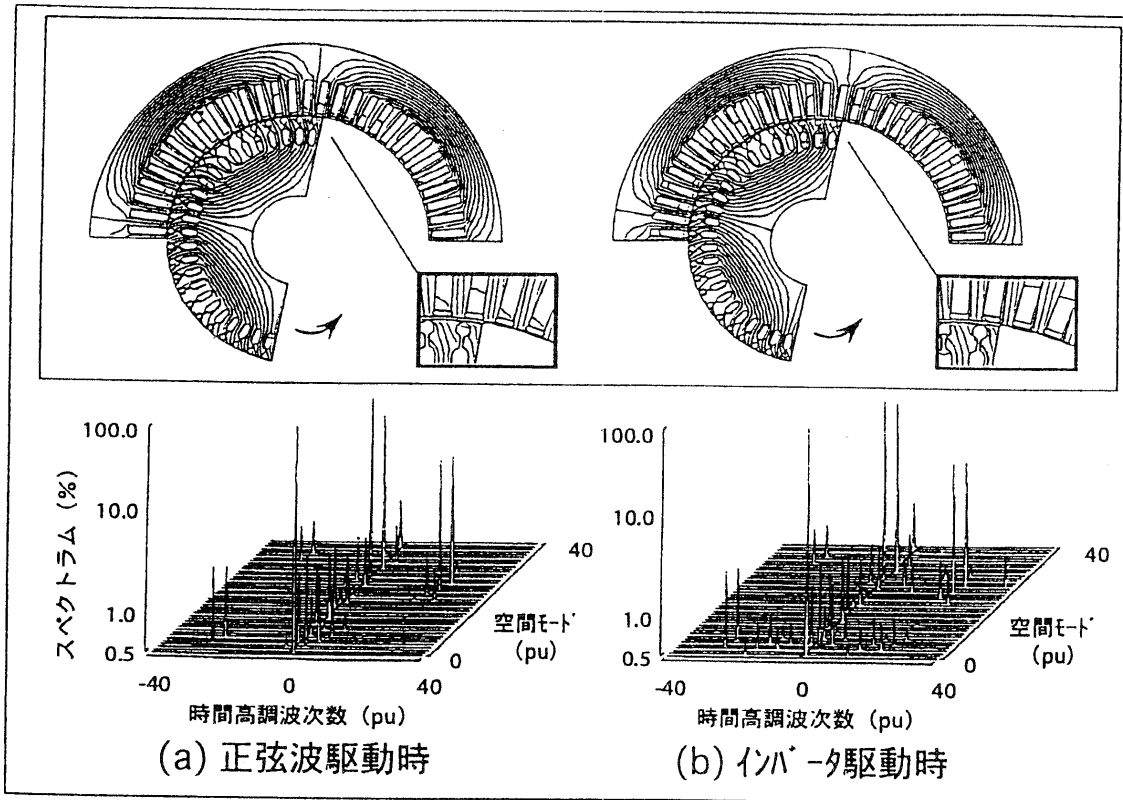


Fig. 1: インバータ駆動時の磁束流線と電磁力密度 [3]

Table 1: 電磁力波のモードと周波数 [10]

項目	高調波次数		モード (M)	周波数 $\times f$ (Hz)
	n	m		
固定子側のみ	固定子側		$n+m$ $r_1 z_1 + P$	2
	$n, m = (6k+1) \times \frac{P}{2}$	$n, m = r_1 z_1 + \frac{P}{2}$		
固定子側と回転子側	固定子側	回転子側	$n+m$ $r_1' z_1 + r_2' z_2 + P$	$2 + r_2' \frac{z_2}{f} (1-S)$
	$n = (6k+1) \frac{P}{2}$ $n = r_1 z_1 + \frac{P}{2}$	$m = n' + r_2 z_2$		
回転子側のみ	回転子側		$n+m$ $r_1' z_1 + r_2' z_2 + (6k+2) \frac{P}{2}$	$2 + r_2' \frac{z_2}{f} (1-S)$
	$n, m = r_2 z_2 + (6k+1) \frac{P}{2}$ $n, m = r_1 z_1 + r_2 z_2 + \frac{P}{2}$ $n, m = r_2 z_2 + \frac{P}{2}$	$n-m$ $r_1' z_1 + r_2' z_1 + 6k \frac{P}{2}$		

記号の説明

n, n', m : 高調波次数, z_1, z_2 : 固定子と回転子スロット数
 P : 極数, S : 滑り, $r_1, r_1', r_2, r_2', r_2'', k$: 0を含む整数

ここに, f_r : 電磁力波, B_n, B_m : n 次, m 次の高調波磁束密度の最大値, ω_n, ω_m : 角速度, P : 極数, τ : 極ピッチ, x : 固定子座標

誘導機では多数の高調波磁束が発生しており, その組み合わせは膨大になる. ここでは主磁束やスロット高調波磁束などの磁束密度が比較的大きな周波数の組み合わせについて検討すると次のようになる.

1. 固定子高調波磁束 (含む基本波磁束) どちらの組み合わせ
2. 固定子高調波磁束と回転子高調波磁束の組み合わせ
3. 回転子高調波磁束どちらの組み合わせ

これをモードと周波数に分類して示すと Table 1 のようになる [10].

具体例として Fig.1 にインバータ駆動 4 極誘導電動機の磁束流線と, 径方向電磁力を固定子座標系の高調波次数で示す. 同図で時間高調波次数は正值が正相分, 負値が逆相成分を示す. 同図 (a) は正弦波駆動時, (b) はインバータ駆動時の結果である. 図より, 磁束流線に両者の差はほとんど見られない. これは, 誘導機の二次導体が, インバータから流入する時間高調波

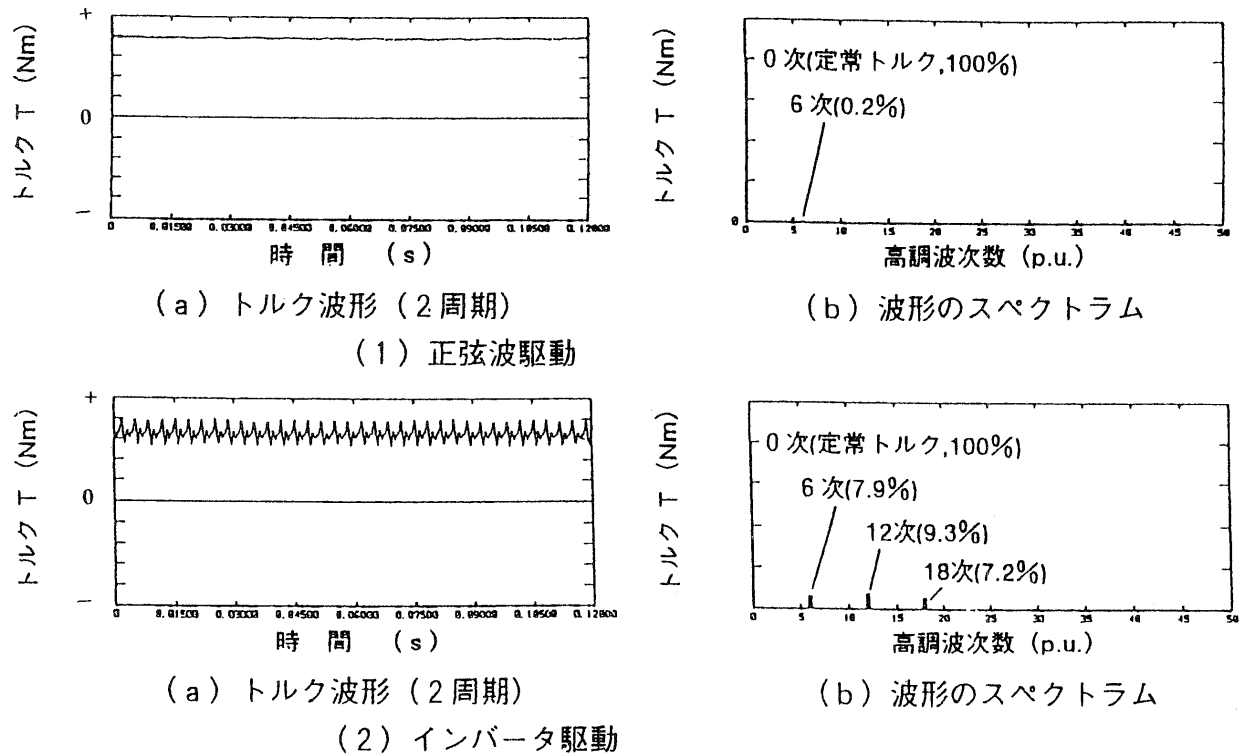


Fig. 2: トルク波形とスペクトラム [3]

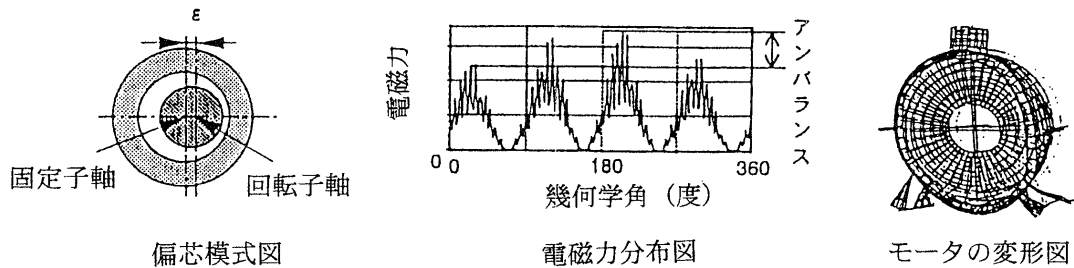


Fig. 3: 偏芯による変形 [4]

起磁力をほとんど打ち消す起磁力を生成するためである。正弦波及びインバータ運転時とも電磁力において時間高調波次数が ± 2 次近傍に分布するものが、基本波成分の自乗で生成される成分と固定子スロットに起因した高次空間モード成分である。また、時間・空間次数が同一の線上に分布するのが回転子電流に起因した成分である。さらに、逆相の比較的低次空間モードの固定子と回転子のスロットコンビネーションによる成分が生じている。固定子と回転子のスロット数の選定の仕方によっては、振動騒音が大きくなることもある。一方、インバータ駆動時には正弦波駆動時には見られない新たな高調波成分が複数生じていることが認められる。これらインバータ駆動時に新たに発生した電磁力成分は、一次電流の時間高調波成分に起因するもので、特に低次空間成分が顕著となっている。一

般に、この低次の空間モードとなる電磁力成分は構造系の固有振動数に一致すると、騒音特性に大きく影響を与える。次に、機内の周方向電磁力の評価としてトルク波形とそのスペクトラムの分析例を Fig.2 に示す。正弦波駆動時の発生トルクはほぼ定常トルクのみであるが、インバータ駆動時は基本波周波数の6の倍数の周波数で鋸歯状の脈動トルクを生じ、振動・騒音源となることがある。

また、誘導機はギャップが狭いため、偏芯があると電磁力に脈動を生じ騒音を生ずることがある。Fig.3は回転子の回転軸と固定子の中心軸に対して、平行にずれる静的偏芯に関する解析例である。偏芯模式図に示すように、正常時のギャップに対して10%偏芯した場合の固定子内径に作用する径方向電磁力の分布を示すが、電磁力にアンバランスが生じるのがわかる。

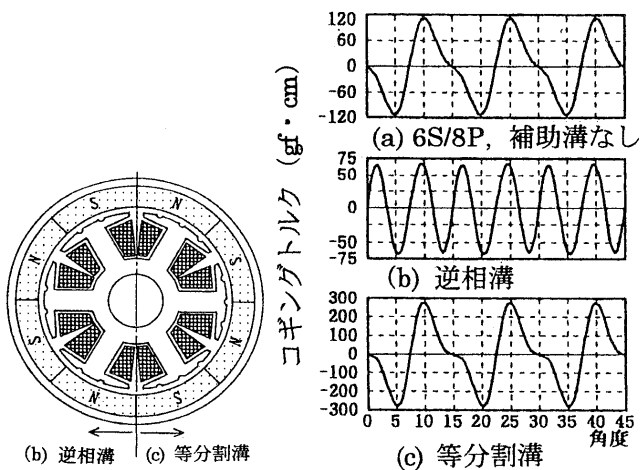


Fig. 4: 補助溝の効果 [5]

振動解析から得られた偏芯時のモータの変形図によると、電磁力の方向はギャップの偏芯量を拡大する方向に作用するのがわかる [4].

2.2 永久磁石モータ

OA や FA 等の分野で使用されているブラシレス DC モータは、励磁に永久磁石を使用しているため、電流によるトルク以前にまず永久磁石と磁気回路形状に基づいて発生するコギングトルクを極小化することが重要である。コギングトルクの周波数は磁極数と溝数の最小公倍数となることが知られており、Fig.4 に示すように補助溝の数と形状により高次側に周波数をシフトし低減する方法などが報告されている [5]。このほか、基本的にはモータに流す電流の通電相切り替えに伴ってトルク脈動が生ずる。これを低減することも、モータの電磁騒音低減に寄与する。このため、最適な転流タイミングによるドライブ制御等が検討されている。

2.3 スイッチトリラクタンスモータ (SRM)

SRM (Switched Reluctance Motor) は欧米で長期に渡って研究開発が行われてきたが、日本においてもここ数年大学・研究所で再度取り組みが行われている。このモータはステッピングモータのバリエブル・リラクタンス型と同じ構造を持ち、ブラシレス DC モータと同じくポジションセンサを付けて、制御回路を通して可変速駆動するモータである。回転子に巻線や磁石を持たないので特殊雰囲気中や高速運転用途のモータとして期待されている。このモータは磁気飽和領域

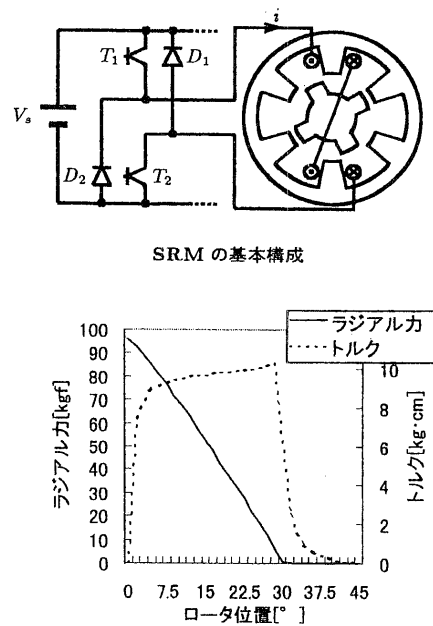


Fig. 5: SRM の基本構成と電磁力 [7]

を使用するため、一回転の間に何回も磁束レベルが変化するので、トルクとラジアル力の脈動があり、振動・騒音、鉄損が大きく、また設計の自由度が無いなどの欠点が指摘されている。このため、自在性のある制御システムや構造設計などの課題に向けた研究が進められている [6].

Fig.5 に固定子 6 極、回転子 4 極の 6-4 タイプの SRM の基本構成例と FEM 解析による全磁極分のラジアル力とトルクの解析例を示す。ロータ位置 0° は励磁されたステータ極とロータ極が完全に重なった状態を、ロータ位置 45° は外れた状態を示す [7].

2.4 タービン発電機 (同期機)

回転機のなかで、タービン発電機はもっとも出力密度の高い回転機であり電磁力も大きい。特に、高出力密度化に伴う電機子電流の増加は必然的に電機子巻線に働く電磁力を増加させる。巻線端部の電磁力評価は支持法の開発検討に重要である。Fig.6 に三相短絡時の 1 本のコイルについて径方向電磁力波形の代表例を示す。電磁力はコイル位置 A, B で大きく異なっており、電流周波数の 2 倍で振動することが示されている。これは (4) 式の $n=m=1$ が支配的なケースに相当している。また、巻線の端部の電磁力は Fig.7 に示すように三次元分布となり、運転状態で大きさと、方向が変化する [8].

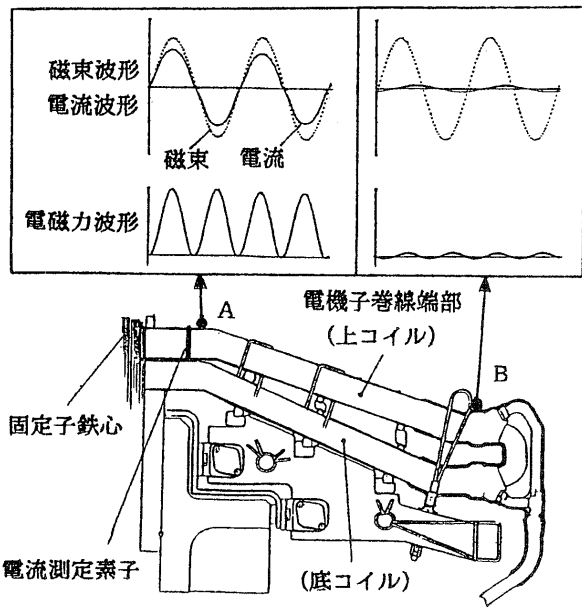


Fig. 6: 三相短絡時の電磁力波形の代表例 (径方向)[8]

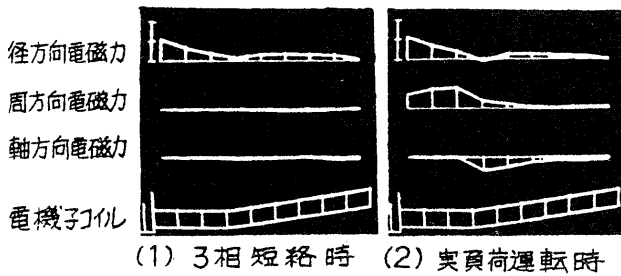


Fig. 7: 電機子コイル端部に沿った電磁力分布 ($I=1.0$ p.u.)[8]

2.5 スロットレス形回転機

コアレスモータや超電導発電機の電機子巻線など、いわゆるギャップに配置した巻線に作用する電磁力がこれに該当する。巻線が鉄心スロット内に配置される一般の回転機と異なり、主磁束が直接巻線を切るため巻線に直接トルクも含めた電磁力が作用し、運転状態で大きさ、方向が変化する。Fig.8 は巻線が軸方向に 180° スキューされた、ヘリカル電機子巻線が無負荷から三相突発短絡したときに作用する巻線電磁力の分布の解析例であり、軸方向中央部では径方向成分が、端部では軸方向成分が支配的な三次元的分布になることが示されている [9]。

2.6 直流機

サイリスタ整流装置または直流チョッパ装置により、直流電動機の電源電圧を変えて可変速運転を行う

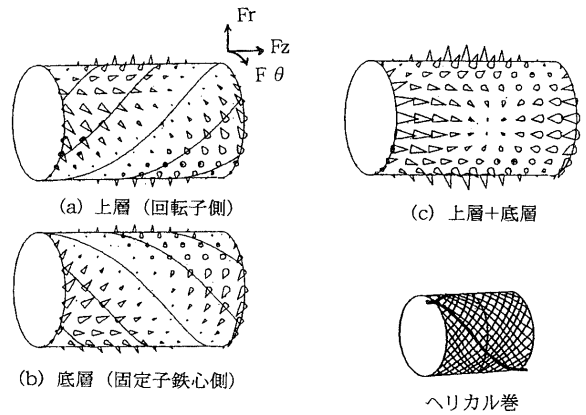


Fig. 8: ヘリカル巻線に作用する三相突発短絡時の電磁力 [9]

場合、脈動電流により電磁加振力が発生し構造系が振動することがある。また、大形の直流機や小型の交流整流子機においては、ブラシー整流子のすべり接触が騒音源になることがある。

3 電磁力低減法

代表的な電磁力の低減対策としては、以下のものが知られている。

1. 可能な限り磁束密度あるいは電流密度の低減
2. 時間高調波電流の抑制 (電源の高調波低減)
3. スキュー導体の採用
4. 磁性楔によるスロット高調波の減少
5. 加工・組み立て精度の向上 (ギャップアンバランスの減少, マグネットの着磁)

Fig.9 には磁性楔と非磁性楔によるギャップ中の磁束密度の空間高調波分布の例を示している [11]。磁性楔によりスロット開口部にも磁束が流れ磁束密度の粗密、すなわち空間高調波が低減し、これによる高調波電磁力も低減できる。

4 回転機の振動, 騒音

4.1 振動, 騒音の原因

回転機は前節で示した電磁力により、振動するが、同時に回転子の不釣り合い、軸受けなど機械的原因によっても振動する。さらに、冷却フィンによる風切り音などの流体騒音も発生する。Fig.10 にファンモータ

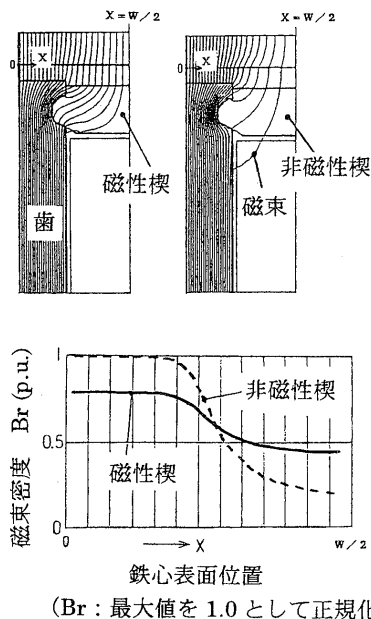


Fig. 9: 磁性楔による空間高調波の低減 [11]

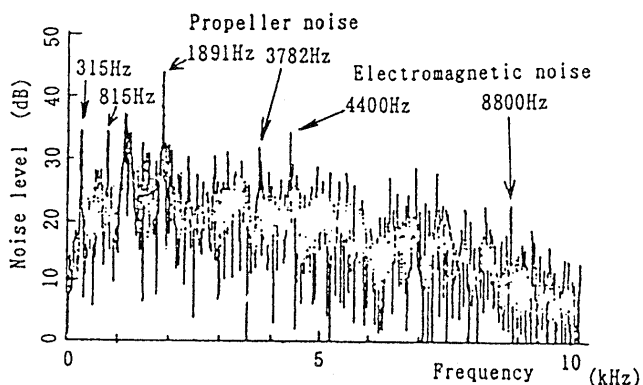


Fig. 10: ファンモータの騒音の周波数スペクトラム

の騒音の周波数分析結果の例を示す。多数の周波数成分が存在しており、主要なものは、回転振動数 315 Hz, ベアリングの振動 815 Hz, 羽根音 1891 Hz, 3782 Hz, スロット高調波による電磁振動 4400 Hz, 8800 Hz などである。Fig.11 に回転機の振動, 騒音の原因を電気的原因と機械的原因に分けて示す。回転機ではこのように、多数の加振源, ならびに周波数があるので、振動, 騒音の低減にあたっては、これらを分離して対策検討をする必要がある。

ここでは、特に電磁的原因による振動, 騒音に着目して説明する。

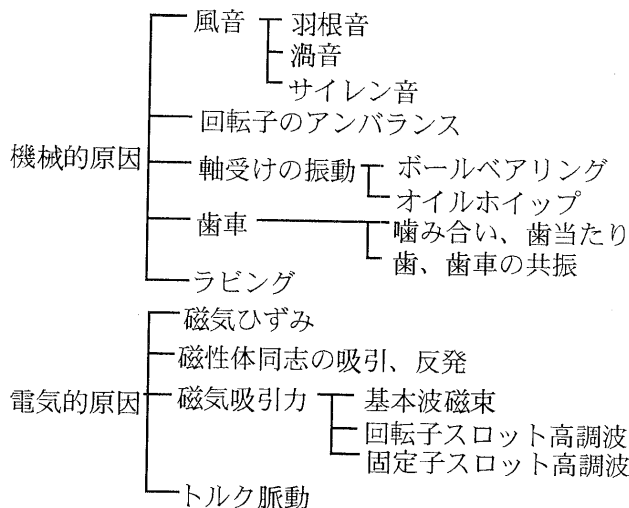


Fig. 11: 回転機の振動, 騒音の原因

4.2 振動, 騒音低減の考え方

構造物の振動振幅は固有振動数, 固有振動モードが与えられると、一般的に (5) 式のように示される。

$$\text{応答変位} \propto \sum K_i \times D_i \quad (5)$$

ここに、 K_i : i 次モードの関与率

D_i : i 次モードの動荷重率

$$K_i = \int \text{力の分布} \times i \text{ 次振動モード} \, dx \quad (6)$$

ここで、関与率は (6) 式に示すように固有振動モードと力の分布の積になっており、振動モードの形と力の形が似ているほど大きくなる。一方、動荷重率は共振特性を表わしており、固有振動数と力の周波数が近いほど大きくなる。すなわち、Fig.12 に示すように、力の周波数と固有振動数を出来るだけ離すとともに、力の分布も固有振動モードと異ならせることがよい。また、万が一、共振に近い状態の場合は、慣性力とばね力が打ち消し合い、減衰力が支配的になることから、減衰要素の付与が考えられる。一方、騒音の場合には、振動から音への変換効率である音響放射効率の低減, 吸音, 遮音などになる。回転機では加振力の周波数が多く、力の分布も複雑であり、固有振動数も多数存在するため、実際に起きている現象がどれに起因するかを把握することが重要である。数値シミュレーションはこれらを総合した結果として計算されるので、対策のためには、同時に内部で起きている現象を把握しておく必要がある。

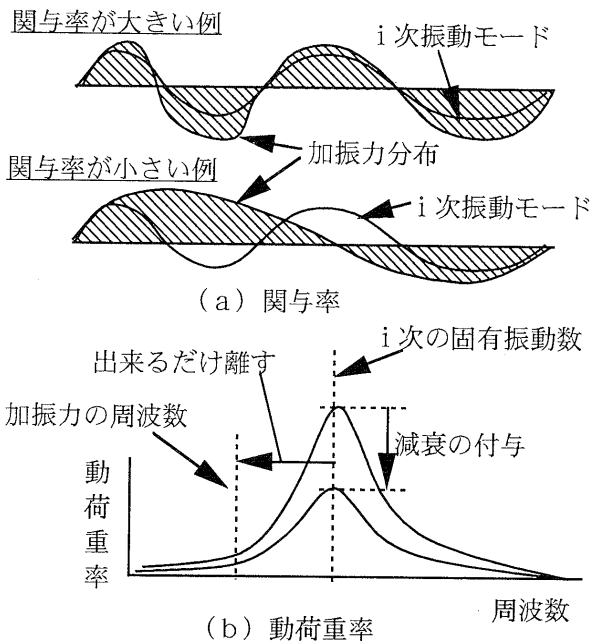


Fig. 12: 多自由度系の振動変位とその内訳

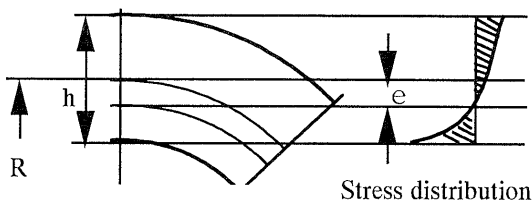


Fig. 13: 中立軸の移動

4.3 固定子の振動

固定子は近似的に円環の一種と考えられる。(7)式に円環の固有振動数を与える式を示す[12]. $n = 1$ は、剛体モードで基礎との固定方法によっては問題になるが、振動騒音に主として影響するのは $n = 2$ 以上のモードである。さて、(7)式は半径に比べて、半径方向の厚みが十分薄い場合であって、通常回転機では、誤差が大きくなる。

ここで円環の厚さと半径の比を(8)式のように α とおく。各種の電動機、発電機について筆者の知る範囲で α の値を調べると α は $0.2 \sim 0.6$ となっていた。そこで、このような厚肉の円環に対する固有振動数の推定法を以下に示す。

$$f_0 = \frac{n(n^2 - 1)}{2\pi\sqrt{n^2 + 1}R^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (7)$$

ここに、 R : 半径, I : 断面2次モーメント, E : ヤング率, ρ : 密度, S : 断面積

$$\alpha = \frac{h}{R} \quad (8)$$

ここに、 h : 半径方向の厚さ

円環は一種の曲がり梁と考えられ、厚肉の場合には中立軸の移動が起きる。Fig.13に中立軸の移動を示す。内径側のほうが半径が小さくなる分だけ、ひずみが大きくなるため、ひずみ分布は2次曲線になる。このときの移動量 e は(9)式により求められ、等価半径も少し小さくなる。一方、断面2次モーメントに相当する量も(10)式になる[13]。さらに、厚肉の場合には半径方向、円周方向の運動だけでなく、断面が回転することによる回転慣性、剪断力による半径方向の剪断変形を考慮する必要がある。ここでは、単純支持はりの回転慣性と剪断変形の影響を考慮した計算を利用する。

$$e = \frac{R\beta}{1 + \beta} \quad (9)$$

$$\text{ここに、} \beta = \frac{1}{3} \left(\frac{h}{2R}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{h}{2R}\right)^4 + \frac{1}{7} \left(\frac{h}{2R}\right)^6 + \dots$$

$$I' = eRS \quad (10)$$

Timoschenko は回転慣性と剪断変形を考慮したはりの運動方程式から、単純支持の場合の振動数方程式を示している[14]。これを解くと、固有振動数は回転慣性と剪断を考慮しない場合の固有振動数と回転慣性と剪断による補正項の積で与えられる。そこで、これを円環の固有振動数の補正に利用する。支持はりの長さを円環の節点間の円弧の長さに置き換える。その結果、厚肉円環の固有振動数の近似式は(11)式となる。

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 + (1 + A)x - \sqrt{\{1 + (1 + A)x\}^2 - 4Ax^2}}{2Ax^2}} \quad (11)$$

$$\text{ここに、} A = \frac{E}{k'G} \quad x = \frac{n^2\alpha^2}{12}$$

G : 剛性率, k' : 断面により決まる定数

α を変えた各種の円環について、有限要素法による詳細な計算を行い、(7)式、(11)式を比較した。Fig.14に有限要素法による計算結果に対する差を、 α を変化させて示す。有限要素法では、1, 2, 3 次の固有振動数を求めるため、1/2 円環を周方向に最大 180 分割、径方向に最大 40 分割したもので、細分化により、ほぼ一定になった状態の値を使用している。計算に用いたのは2次元の4辺形要素で、軸方向には十分薄い

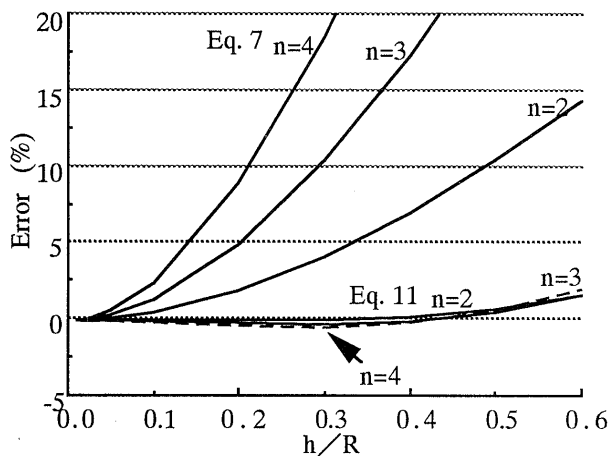


Fig. 14: 厚肉円環の固有振動数の計算精度

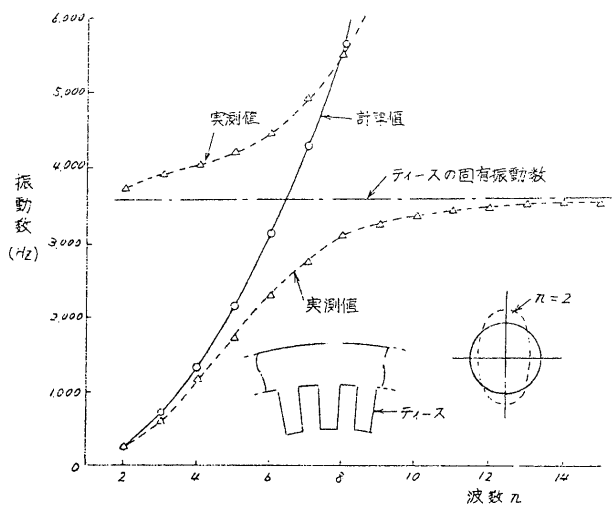


Fig. 15: 固定子鉄心の固有振動数 (ティースの影響)[15]

として、平面応力場として計算した。図からわかるように、(7)式では α が0.2以上で誤差10%となっており、誤差が大きくなっているが、(11)式では α が0.6の場合でも誤差が2%以下となっている。すなわち、(11)式により、十分な精度で厚肉円環の固有振動数を予測できることがわかる。なお、固定子鉄心のように薄い珪素鋼板を軸方向に積層したものでは、軸方向には僅かな隙間があったり、層間の絶縁材料の影響で軸方向の厚み方向に変形できると考えられ、いわゆる平面応力場となり、前述の式が使用できると考えられる。しかし、軸方向に厚い円環、あるいは短い円筒では、軸方向の変形が拘束されるため、固有振動数が高くなる。これに対しては平面ひずみ場で計算すればよく、固有振動数が4%から5%程度増加する。固定子の内径側にはコイルを入れるティース、歯があり、

コイルとともに固有振動数に影響する。Fig.15に固定子の振動に対する歯の振動の影響を調べた結果を示す[15]。野田らは、固定子鉄心とハウジングの詰めあいの程度と固有振動数との関係を検討しており、ハウジングと鉄心が円周方向にすべる場合の固有振動数を導いている[16]。固定子のハウジングについては有限要素法により、詳細にモデル化して計算することが行われている。しかし、固定子ハウジングの固有振動数の解析式を示すことは、設計時の固有振動数の見積のために意味のあることであると考えられる。ハウジングは一種の両端に円盤がついた円筒に近似される。円筒の固有振動数については、昔から Warburton 他論文があり、両端支持と両端固定の薄肉円筒の計算結果が示されている[17]。また、高橋等が両端に円板がついた場合の固有振動数の計算を示している[18]。面白いのは円筒になると、固有振動数と振動モードの関係が円環と異なり、 $n=2$ がかならずしも低くならないことである。

4.4 回転子の振動

回転子は変断面のはりと考えられ、有限要素法により、計算されるが、珪素鋼板を積層しているため、鉄心の曲げ剛性と、支持の軸受け剛性の評価が固有振動数の見積りに影響を与える。これについては、岩田、松原等が積層鉄心の等価剛性と軸受けの剛性を評価している[19][20]。鉄心の等価剛性から求めた等価ヤング率の値は鉄心鋼板材料の3~4%と微小な値になること、実験的に軸受けの並進と回転の剛性を同定し、固有振動数の計算と実験がほぼ一致することを示している。モータの両側にファンを備えたものでは、回転子とファンとの間でねじり振動が発生することがある。ねじり振動の固有振動数がトルク脈動の周波数に一致すると、騒音が大きくなる。この場合には羽根車、軸長さなどを左右対称にすることにより、非対称の振動モードが誘起しないようにすることができる。[21]

4.5 騒音の予測

回転機の振動による騒音の予測では、ハウジングの表面の振動がわかると、音場の計算ができる。表面の振動から、音場を求めるには、球上の点音源の指向性を利用する方法[22]、境界要素法による方法[1]などがある。Yangは円筒の振動による音場の解を用いて、放射される音響エネルギーを見積っている[23]。

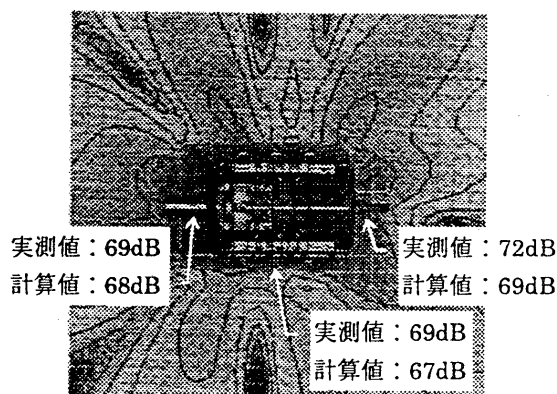


Fig. 16: 騒音分布計算結果 (1100 Hz)[1]

電磁力と振動を有限要素法で求め、音場を境界要素法を用いて計算した例を Fig.16 に示す [1]. 実験値と 3 dB 程度で一致した結果が得られている. 今後はこのように、電磁力から音場までを一貫して求めることが行われるようになり、計算の精度も向上するものと期待される.

5 振動と騒音の低減法

振動, 騒音の低減法を以下に示す.

1. 共振回避

固定子, ハウジング, 回転子などの固有振動数と電磁力の周波数との共振を避ける

2. 加振力の分布に対して振動モードの形を出来るだけ異ならせる (関与率の低減).

3. 振動の減衰を増加させる

制振鋼板の採用 ファンガイド, ハウジング, エンドブラケットなど

4. ハウジング, エンドブラケットの剛性増加

5. 空気の入出口にサイレンサを設ける

6. 音響放射効率の低減

固定子の周方向の力波を高次にする

半径を大きく, 軸方向の長さを小さくする.

7. 回転子の不釣合量の低減

6 おわりに

各種の回転機の電磁力の解析技術について, 最近のシミュレーション例を用いて概説するとともに, 振動の原因となる電磁力の低減法を示した. また, 騒音の主な放射源となる固定子の固有振動数の計算方法を示すとともに, 騒音の計算法, シミュレーション例, 振動, 騒音の低減法などを述べた. 回転機の電磁力は

空間分布, 時間分布とも複雑で, 振動系も, 固定子の歯, 巻線, ハウジングとのはめあいなど複雑な構成になっており, 騒音の予測を困難にしている. この問題を埋めるのが, CAE による複合システムの高度シミュレーション技術であって, 回転機の高精度な回転性能と低振動・低騒音に対する要求が増加している中, 今後ますますその重要性が増してくると考えられる.

参考文献

- [1] 塩幡他: 電磁力励起による電動機の振動放射音解析法, 電学論 118-11, D (1998), pp.1301-1307.
- [2] G.H. Livens: The Theory of Electricity, Cambridge University Press, 1918.
- [3] 高橋: 磁界解析の誘導機設計への適用法, 日本能率協会, '98 磁気応用技術シンポジウム, 1998-4.
- [4] 小林他: 偏心がモータの電磁振動に及ぼす影響, 平成 9 年度 電気学会全国大会, p.1114.
- [5] 大西他: 永久磁石モータのコギングトルク低減の検討, 平成 6 年度電気学会産業応用部門全国大会.
- [6] 三上: 小形モータ技術, 最近の焦点, エレクトロニクス, (1997-2), p.22.
- [7] 兼田他: 各種 SR モータのトルクとラジアル力の評価, 平成 10 年度電気学会産業応用部門全国大会, p.16.
- [8] 佐藤他: タービン発電機電機子巻線電磁力分布の検討, 昭和 60 年電気学会全国大会, p.822.
- [9] 高橋他: 超電導発電機空隙電機子巻線に対する電磁力解析, 電学論 102-12, B (1984), pp.73-79.
- [10] 石橋他: 小形誘導機の電磁振動について, 電学論 112-3, D (1992), pp.307-313.
- [11] 高橋他: 磁性くさびによる誘導電動機の性能改善, 昭和 62 年電気学会全国大会, p.797.
- [12] チモシェンコ: 工業振動学, 392, 東京図書.
- [13] チモシェンコ: 材料力学 (上), 355, 東京図書.
- [14] チモシェンコ: 工業振動学, 306, 東京図書.
- [15] 志賀: 誘導電動機固定子鉄心の固有振動数, 機論 50-451, C (1984), pp.464-469.
- [16] 野田他 3 名: 二層円環におけるはめあい面圧と固有振動数, 機論 65-629, C (1999), pp.23-29.
- [17] R.N. Arnold et al: The Flexural Vibrations of Thin Cylinders, Proc. Inst. Mech. Engr. Lond. (1953), pp.62-80.
- [18] 高橋, 平野: 円板と円筒との結合系の振動, 機論 35-274, (1969), pp.1215-1222.
- [19] 岩田他 2 名: 回転子鉄心を持つロータの固有振動数, 機論 57-544, C (1991), pp.3748-3753.
- [20] 松原他 2 名: 小形誘導電動機におけるロータ剛体一次モードの避共振化, 機論 64-625, C (1998), pp.3327-3332.
- [21] 瀬川他: 多翼羽根車をもつ電動送風機軸系のねじり振動防止に関する研究, 機論 45-389, (1979), pp.31-39.
- [22] 堀: 任意形状の振動物体の放射音場の計算, 音学論, 34-9, (1979), pp.486-492.
- [23] S.J. Yang: Low-noise electrical motor, Oxford University Press, 1981.