

学術論文

直流電動機の振動解析

Vibration analysis of DC motors

森本 峯世

(徳島大学院)

森田 郁朗

(徳島大学)

Mineyo MORIMOTO Member

Ikuro MORITA Member

As an environmental issue, there has been an increasing need for lower-noise and lower-vibration motors, specially smaller frame size dc motors. In this paper, firstly we discuss the natural vibration analysis of dc motor stator. Next, we analyze the vibration by "impulse response method" and discuss the vibration amplitude. Lastly, total vibration characteristics are analyzed by coupling the force wave characteristics and the natural vibration characteristics using finite element method. It is by "modal time history analysis" to couple the force wave characteristics and the natural vibration characteristics. Based on the force wave characteristic analysis, we give a multi-point excitation to the stator and investigate the vibration response.

Key Words: Natural vibration analysis, impulse response method, finite element method, modal time history analysis.

1 まえがき

電動機の振動・騒音に関して、従来より、固定子-回転子間のエアギャップの狭い誘導電動機については数多くの研究が行われてきた [1]-[9]。最近、多くの機器で小形・軽量化が進み、従来は問題にならなかった直流電動機が使われる分野においても、その静粛性が強く望まれるようになってきている [10][11]。直流電動機の振動・騒音の研究としては、電動機単体の電磁加振力の解析に関するもの [12][13]、加振力と固定子固有振動周波数との関係に関するもの [14] が報告されている程度で余り検討されていない。また、本論文と同様に、加振力と振動解析を結合して解析した例として、直流機主極の形状と振動との関係を検討したもの [15] があるが、これは船舶推進用の大形機の場合であり、余り一般的ではない。

本論文の目的は、直流電動機の振動・騒音を設計段階で定量的に評価することであり、その内容は、先に報告したサイリスタ整流電源に起因した直流電動機の

磁気加振力解析 [16] と電動機の固有振動解析とを結合した総合的な振動解析について検討したものである。

本論文では、まず、直流機の固定子の固有振動特性について、実測値と有限要素法による解析値を比較検討し、コイルの有無による特性の違いを明らかにする。次に、インパルス応答法による振動解析を行い、固定子の振動振幅特性について検討した。最後に、加振力解析と固有振動解析を結合させて総合的な振動解析を行った。なお、インパルス応答法による振動解析および加振力解析と固有振動解析の結合には、有限要素法によるモーダル時刻歴解析を用いた。これは、時間関数としての集中外力に対する構造物の応答を計算するもので、本論文では、加振力解析の結果をもとに固定子の多点加振を行い、その振動応答を求めた。

2 固定子の固有振動解析

2.1 有限要素法による解析 [17]-[20]

固定子の固有振動特性を解析するために、供試機の設計仕様をもとにして解析モデルを作成した。作成し

連絡先: 森本峯世, 〒792-0050, 愛媛県新居浜市萩生 1598-10, email: morimkt@shikoku.ne.jp

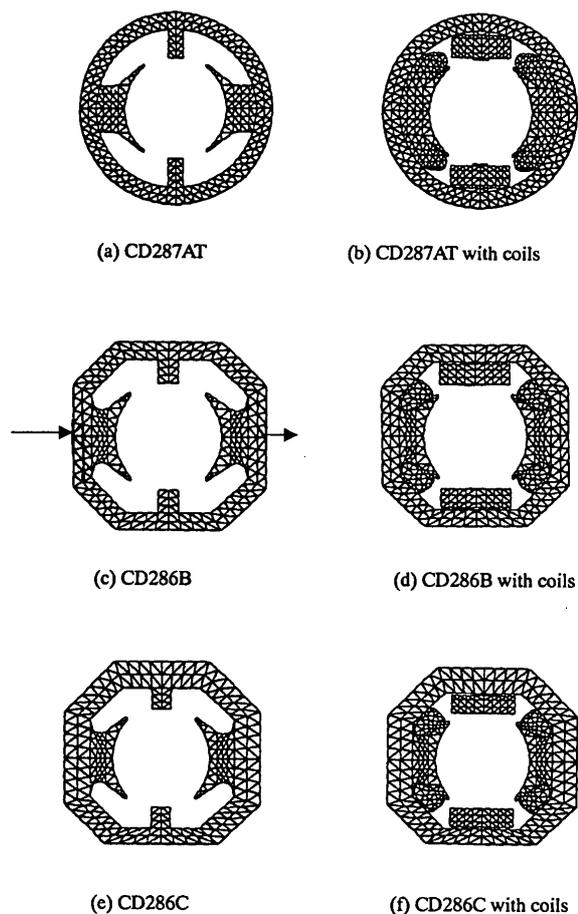


Fig. 1 Analytical models.

た解析モデルを Fig.1 に示す. 供試機は一体物の円形フレームの CD287AT, 8 角形の積層したフレームの CD286B と下部以外のフレーム肉厚を CD286B の 1.6 倍とした積層フレームの CD286C の 3 機種を対象とした. この CD286B と CD286C のコイル仕様等の電気的な仕様はまったく同一である. そして, コイルの無いモデルと主極および補極コイルを取り付けたモデルとを作成した.

2.2 固有振動特性の解析結果

各モデルの固有振動周波数とモード数の関係に対する実測結果と FEM 解析結果の比較を Table 1 に示す. なお, 同表の実測結果は 3.1 で述べる 2 チャンネル FFT アナライザを用いたインパルス応答法により行った. ここでモード数 m とは Fig.2 に示す変形形態であり, $m = 0$ とは全体を一様に伸縮しようとする形態を意味し, モード数 m は周上に m 個の波が現れるような変形 (振動形態) を示す. Table 1 より, モード 2 の場合, CD286C の固有振動周波数が CD286B

Table 1: Comparison of the measured results with the calculated results.

		The natural frequency [Hz]				
	Mode	2	3	4	5	
CD287AT	A	719	1957	2409	3324	5151
	B	619	1966	-	-	-
	B/A	0.86	1.00	-	-	-
CD287AT with coils	A	528	1486	1555	2145	-
	B	485	1690	-	-	-
	B/A	0.92	1.14	-	-	-
CD286B	A	727	1586	1832	2540	5556
	B	675	1425	1643	2675	5375
	B/A	0.93	0.90	0.90	1.05	0.97
CD286B with coils	A	600	1216	1455	1907	5068
	B	607	1214	-	2450	4825
	B/A	1.01	1.00	-	1.28	0.95
CD286C	A	938	1852	2115	2920	5824
	B	938	1964	2163	3050	6225
	B/A	1.00	1.06	1.02	1.04	1.07
CD286C with coils	A	791	1459	1690	2233	5105
	B	857	-	1857	2688	5075
	B/A	1.08	-	1.10	1.20	0.99

A : calculated results by FEM B : measured results

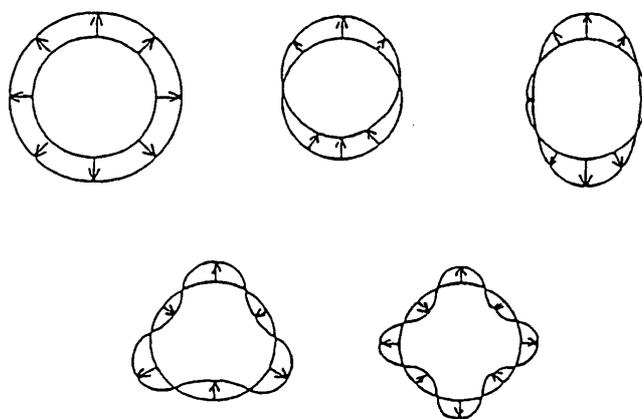


Fig. 2 The modes.

のそれより約 30% 高くなっていることがわかる. これは, 電動機フレームを円環で近似した場合, その固有振動周波数は h/R^2 (R : 平均半径, h : 厚さ) に比例するためである. このように, 固定子の固有振動周波数とサイリスタ電源駆動による加振力周波数 (三相ブリッジの場合, 電機子電流のリプル成分の基本周波数は交流電源周波数の 6 倍, すなわち 50 Hz では 300 Hz, 60 Hz では 360 Hz となるので, これらの 2 倍の加振力周波数) が近接し, 共振の可能性が高い場合

には、フレームの一部の肉厚を厚くして、お互いの周波数を遠ざけることで共振を防ぐことができるのがわかる。さらに、Table 1の解析結果のモード3に対して固有振動周波数が2種類存在するのは、2極機のために2種類の3次モードの振動形態が存在するためである。

次に、コイルを取り付けた場合には、コイルが付加重量として働くため、コイルを取り付けていない場合に比べて固有振動周波数が低くなっていることがわかる。なお、主極コイル部分は、主極鉄心と主極コイルが一体化した形でモデル化を行った。また、Table 1のFEM解析結果と実測結果を比較すると、それぞれ多少の差はみられるものの、全体的にはほぼ一致した結果が得られた。

3 インパルス応答法による振動解析

実際の振動・騒音を評価する場合、固有振動周波数だけでなく、加振力によって生じる振動振幅についても検討する必要がある。そこで、本論文では、振動振幅を考慮するためにインパルス応答法による振動解析を行った。

3.1 インパルス応答法の概要

インパルス応答法の最大の特徴は、加振器を用いずに、力の検出器のついたインパルスハンマを用いて加振を行う点である。測定システムの構成をFig.3に示す。加振器としてインパルスハンマを用い、構造体(電動機の固定子)を加振する。この加振力は、インパルスハンマの先端に取り付けられた圧電型加速度ピックアップで検出し、プリアンプで電圧信号に変換する。構造体の加速度応答信号は、構造体に取り付けた圧電型加速度ピックアップで検出し、同様にプリアンプで電圧信号に変換する。そして、加振力信号と応答信号を2チャンネルFFTアナライザでフーリエ変換し、伝達関数を求める。

3.2 有限要素法によるモーダル時刻歴解析

本論文では、インパルス応答法と同様の解析を計算機上で行うモーダル時刻歴解析を行った。モーダル時刻歴解析とは、時間関数としての集中外力に対する構造物の振動や応答を解析するものであり、この解析は通常モード法に基づいている。このため、本解析に

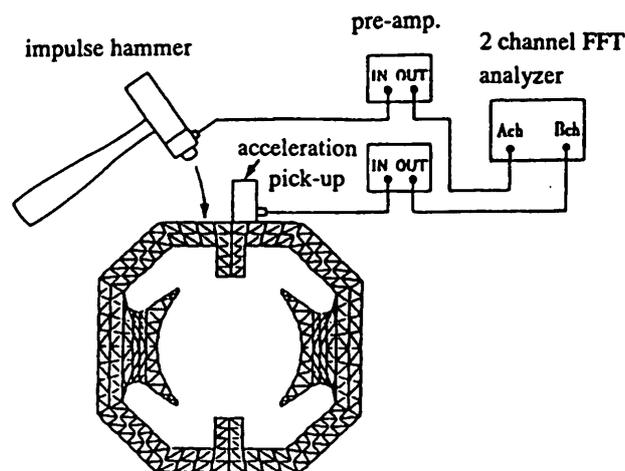


Fig. 3 Test system.

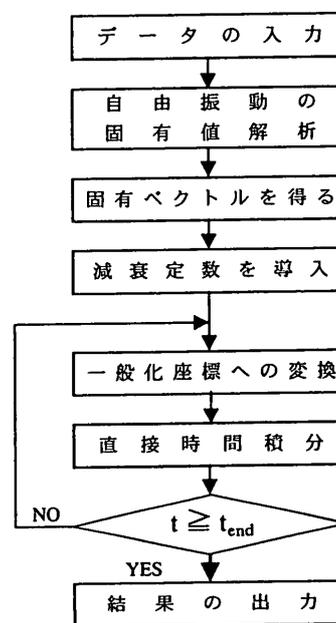


Fig. 4 Time history analysis.

先立って固有振動解析とモード解析を行う必要がある。すなわち、モーダル時刻歴解析は有限要素法による固有振動解析と直結した解析方法である。Fig.4にモーダル時刻歴解析の手順を示す [21][22]。

3.3 1点加振に対する振動応答解析

固定子モデルに対して1点加振を行い、その振動振幅特性を検討した。対象の固定子モデルは、Fig.1のCD286B, CD286Bコイル付き, CD286CおよびCD286Cコイル付きである。力を加える節点および振動加速度を検出する節点をFig.1(c)に示す。こ

の入力の加振力波形と出力の応答変位波形をFFT処理し、伝達関数を求めた。ここで、コイル付きモデルについて、コイルが振動を吸収するという現象を検討する。この現象を考慮していないCD286Bコイル付きの解析結果をFig.5(a)に、実測結果をFig.5(b)に示す。Fig.5(b)の実測結果では、コイルによって振動が吸収されるため、モード2から4のスペクトルはほとんど現れていないことがわかる。しかし、Fig.5(a)の解析結果では、このスペクトルが顕著に現れている。この結果より、コイル付きモデルの解析を行う場合、適切な減衰を考える必要があることがわかる。

3.4 モード減衰の導入

振動解析において、摩擦などの減衰力を適正にモデル化することは困難である。一般的には、減衰マトリクス $[C]$ を式(1)で定義される比例粘性減衰とし、これを式(2)のモード座標に変形後、その物理的意味から設定しやすい式(3)のモード減衰率として与える方法が採用される。

$$[C] = \alpha_C[M] + \beta_C[K] \quad (1)$$

$$c_r = \alpha_C m_r + \beta_C k_r \quad (2)$$

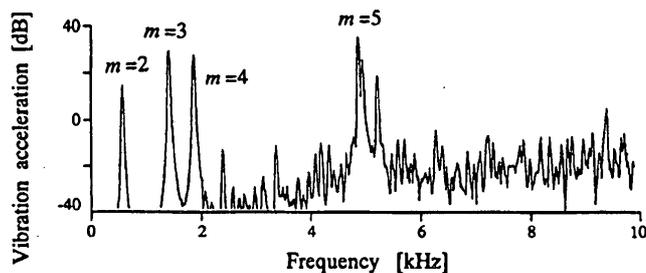
$$\zeta_r = \frac{c_r}{2\sqrt{m_r k_r}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_C}{\Omega_r} + \beta_C \Omega_r \right) \quad (3)$$

ただし、 $[M]$:質量マトリクス、 $[K]$:剛性マトリクス、 α_C 、 β_C :比例定数、 m_r 、 k_r 、 c_r : r 次のモード質量、モード剛性、モード減衰係数、 ζ_r 、 Ω_r : r 次のモード減衰率、固有角周波数。

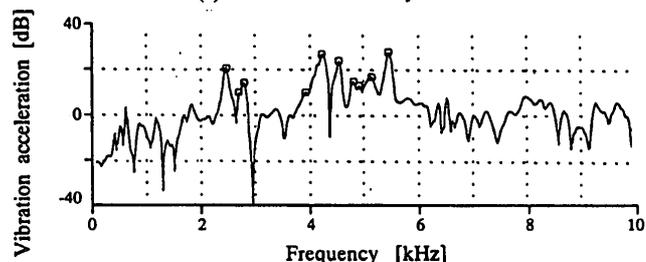
本論文では、コイル付きのモデルに対して、実測結果の振動応答とほぼ一致するように、モード減衰率を導入することとした。

3.5 実測結果の比較検討

ここでは、インパルス応答法による実測結果とモーダル時刻歴解析による解析結果を比較検討する。CD286Cコイル無しおよびコイル付きモデルの伝達関数をFig.6およびFig.7に示す。これらの図より、計算結果と実測結果は、ほぼ一致していることがわかる。また、Fig.6では各モード数に対する大きさについてもほぼ一致している。なお、コイル付きモデルの結果であるFig.7については、Fig.6の低周波数領域で現れていたモード2から4のスペクトルが小さく抑えられていることがわかる。このようにコイル付きの解析においては、

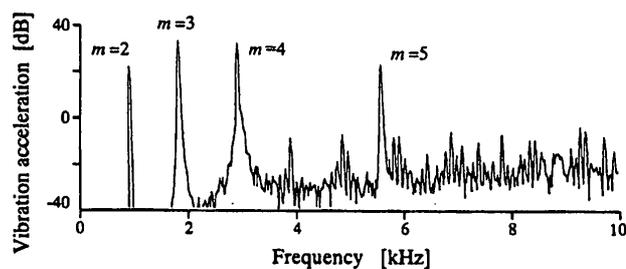


(a) Calculated results by FEM

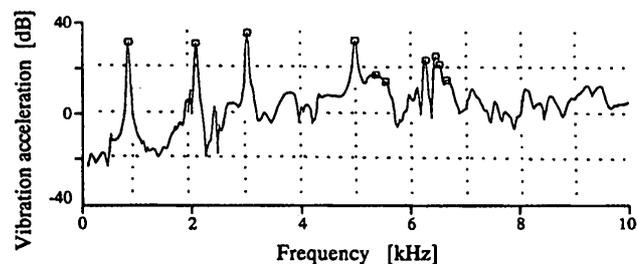


(b) Measured results

Fig. 5 Comparison of the measured results with the calculated results (286B with coils).



(a) Calculated results by FEM



(b) Measured results

Fig. 6 Transfer functions (CD286C).

適切なモード減衰を与えることにより計算結果を実測値に近づけることができることを確認した。

4 固有振動解析と加振力解析の結合

4.1 多点加振解析の概要

径方向加振力はフレームの内側全体に連続的に分布しているが、ここでは、この径方向の分布加振力をFig.8に示すような集中荷重の多点加振力と考えて解析する

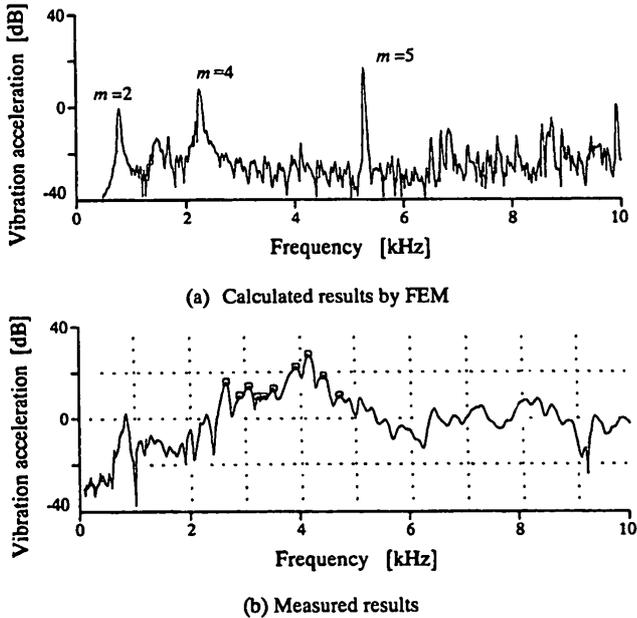


Fig. 7 Transfer functions (CD286C with coils).

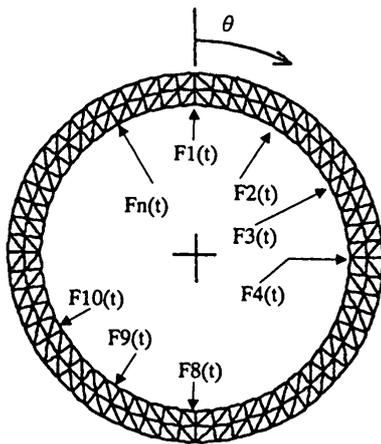


Fig. 8 Multiple force distribution.

方法について述べる。多点加振解析の手順を Fig.9 に示す。まず、加振力 $F_1(t)$ から $F_n(t)$ に対するある節点の変位 $D_1(t)$ から $D_n(t)$ をモーダル時刻歴解析によりそれぞれ求める。次に、 $D_1(t)$ から $D_n(t)$ を合成して $D(t)$ を得る。この $D(t)$ が $F_1(t)$ から $F_n(t)$ の n 点加振に対する変位波形であり、これを FFT 処理することにより変位のスペクトル $D(\omega)$ を求め、振動振幅の周波数特性について検討した。

本章では、固有振動解析に用いた有限要素モデルに加振力解析より得られた磁気加振力を加えて、その振動応答を求める。径方向加振力 $F(\theta, t)$ は、パーミアンス分布 $P(\theta, t)$ および起磁力分布 $f(\theta, t)$ より、次

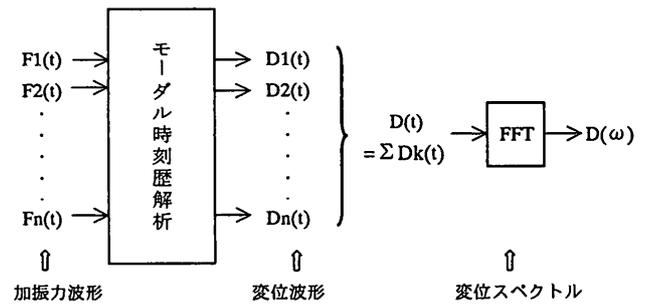


Fig. 9 Flow of multiple force analysis.

式で表される [16].

$$F(\theta, t) = \frac{1}{2g} P(\theta, t) f^2(\theta, t) \quad (4)$$

式 (4) の $F(\theta, t)$ を 2 次元 FFT 解析すると $G(m, v)$ となる。この 2 次元 FFT の解析結果をまとめると、

$$F(\theta, t) = \sum_m \sum_{\mu_a} \sum_{n_a} [Q_1 \cos(m\theta) \cos\{(\mu_a \beta \pm n_a N_a \omega)t - \varphi_1\} + Q_2 \sin(m\theta) \cos\{(\mu_a \beta \pm n_a N_a \omega)t - \varphi_2\}] \quad (5)$$

となる。

ただし、 Q_1 : 加振力の $\cos(m\theta)$ の項、 Q_2 : $\sin(m\theta)$ の項、 g : 機械的最小ギャップ長、 θ : 主極中心からの機械角、 m : 空間周波数で力波のモード数、 N_a : 電機子スロット数、 n_a : 電機子パーミアンス調波次数、 ω : 回転角周波数、 t : 時間、 β : 電機子電流リプルの基本角周波数、 μ_a : 高調波次数、 φ : 高調波の位相、 v : 時間周波数で加振力周波数を表わす。

一方、モーダル時刻歴解析では、次式 (6) の形の調和関数により、式 (5) の加振力の主要な成分の力波モード次数 m とその周波数次数 μ_a の組合せで力を定義し、磁気加振力による多点加振解析を行う。

$$F(t) = \{A s \sin(t W s + P s) + A c \cos(t W c + P c)\} e^{ct} \quad (6)$$

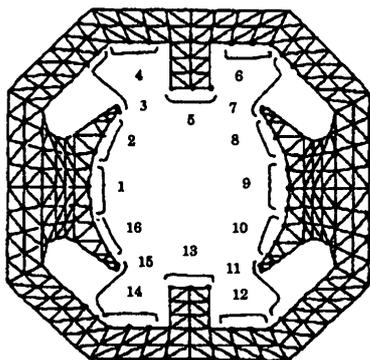


Fig. 10 Force partitions.

ただし,

$$As = Q_1' \cos(m\theta), \quad Ws = \mu_a \beta, \quad Ps = \pi/2 - \varphi_1$$

$$Ac = Q_2' \sin(m\theta), \quad Wc = \mu_a \beta, \quad Pc = -\varphi_2$$

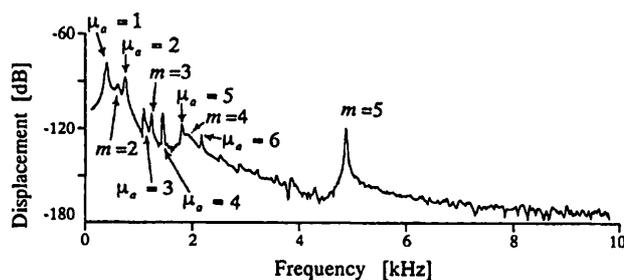
$$c = 0$$

$$Q_1' = k \frac{2\pi r l}{n} Q_1 \quad Q_2' = k \frac{2\pi r l}{n} Q_2$$

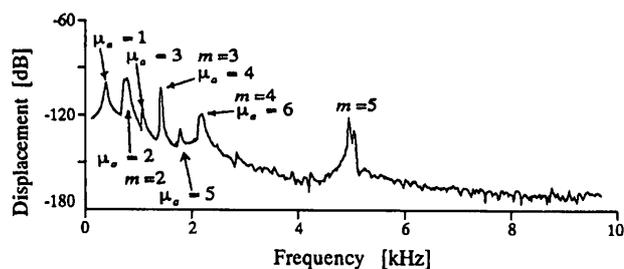
k : 単位の換算係数, r : 主極内側半径, l : 電機子および主極の積厚長さ, n : 等間隔の n 点加振 (Fig.8 参照) を表す.

4.2 多点加振解析

ここでは, 有限要素法により磁気加振力による多点加振解析を行う. 解析モデルは, CD286B コイル付きおよび CD286C コイル付きの 2 機種とした. また, 力を加える節点を Fig.10 に示す. 力を加える節点数は, 固定子の内側を対称に 16 分割し, 1 組 3 節点, 計 48 節点とした. この 48 点について, (1) 加振力モード次数 m を 0 次から 5 次まで, また, (2) 電機子電流高調波次数 μ_a を 1 次から 10 次までの条件で振動解析を行った. したがって, $16(\text{分割}) \times 6(\text{次}) \times 10(\text{次}) = 960(\text{回})$ の結果を重ね合わせると全体の解析結果を得ることができる. CD286B コイル付きと CD286C コイル付きの解析結果である変位スペクトルを Fig.11 に示す. 同図より, CD286B コイル付きは, 電機子電流リプルの基本周波数である $\mu_a = 1(360 \text{ Hz})$ の成分が最も大きくなっていることがわかる. また, $\mu_a = 2(720 \text{ Hz})$ の周波数では, CD286B コイル付きと CD286C コイル付きの変位スペクトルの大きさはほとんど同じである. しかし, CD286B コイル付きの場合, $m = 2$ の固有振動周波数 (600 Hz) の変位スペクトルが $\mu_a = 1$ と $\mu_a = 2$ の間に存在するため, 低周波数領域での振動が CD286C コイル付きに比べて大きくなっている.



(a) CD286B with coils



(b) CD286C with coils

Fig. 11 Displacement spectra.

一方, CD286C コイル付きでは, $\mu_a = 4(1440 \text{ Hz})$ と $\mu_a = 6(2160 \text{ Hz})$ がそれぞれ $m=3(1459 \text{ Hz})$, $m=4(2233 \text{ Hz})$ と共振を起こしているが, CD286B コイル付きの最大変位スペクトルより小さくなっている.

4.3 実測結果との比較検討

ここでは, CD286B コイル付きモデルに対する多点加振による解析結果と実測結果を比較する. 測定条件は, 電機子電流 $I_a = 100 \text{ A}$, 回転速度 $N = 500 \text{ min}^{-1}$ である. また, 実測では圧電型ピックアップにより振動加速度を検出し, FFT アナライザで周波数解析を行った. なお, 電源は 3 相純ブリッジの直流電源を用いた.

振動加速度の比較を Fig.12 に示す. 同図より高調波次数 $\mu_a = 1, 2, 3, \dots, 6$ およびモード $m = 2$ の成分の大きさおよび周波数ともほぼ計算値と実測値が一致している. $m = 3, 4$ については大きさこそ異なるが, 周波数帯はほぼ一致している. このように解析をする際にモード減衰を与えることにより各スペクトルの裾が広がり, 実測結果のようにはっきりとしたスペクトルが現れていないが, その周波数特性は 2500 Hz までの範囲では, ほぼ実測結果と一致している. それ以上の周波数では, 固有振動のモード次数を $m = 5$ まで, 電機子電流の高調波次数を $\mu_a = 10$ までしか考慮していないこともあり, 大きく異なっている.

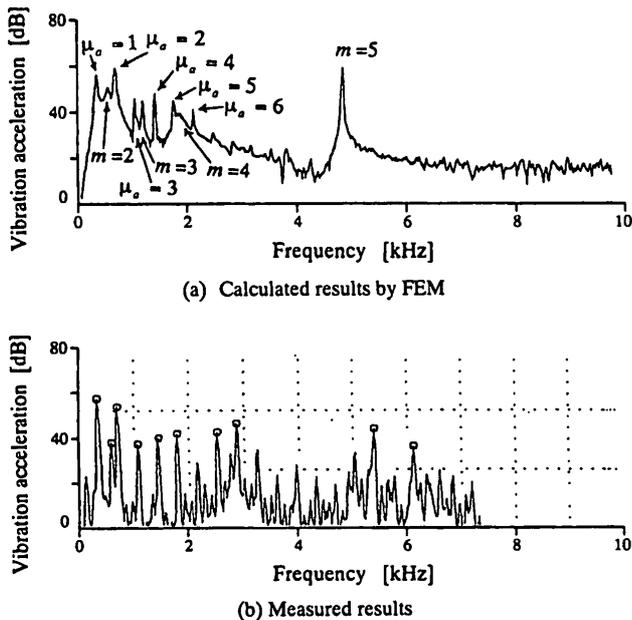


Fig. 12 Vibration acceleration.

5 むすび

固定子の固有振動解析, 1点加振に対する振動応答解析および固有振動解析と加振力解析の結合を行うことにより, 積層フレームおよび一体フレーム構造の固定子をもつ直流電動機の総合的な振動特性を把握することができた。以下に得られた結果を述べる。

(1) 固定子の固有振動解析について

- 1 固有振動周波数の解析結果はほぼ実測結果と一致した。
- 2 コイルを取り付けた場合, それが負荷重量として働くため, コイルを取り付けていない場合に比べて当然, 固有振動周波数は低くなるが, これはコイルの固定法などコイルのモデル化でも変化する。
- 3 本論文のCD286Cの例のように, 軸高は同じとするため下部以外のフレームを厚くすることにより, 固有振動周波数を高くすることができる。この方法により, CD286Cの固有振動周波数をサイリスタ電源による加振力周波数から遠ざけることができた。

(2) 振動応答解析について

- 1 コイルが無いCD286BおよびCD286Cの周波数特性の解析結果は実測結果とほぼ一致した。

2 コイルを付けた場合, コイルが無い時に現れていた各モードの固有振動周波数のピークは小さく抑えられるので, モード減衰を考慮する必要がある。しかし, モード減衰の理論的な決定は困難で, 本論文では実測結果に近づくように決定した。

(3) 固有振動解析と加振力解析を結合した総合的な振動解析について

- 1 本論文により振動の総合的な解析が可能になった。
- 2 振動特性は主として固有振動特性に左右される。

なお, 今後の課題としては,

- 1 主極や補極のコイルに関しては絶縁ワニスの浸透度や使用電線の太さ等の違い等についての検討が必要である。
- 2 磁束の飽和および時間遅れを考慮した加振力解析についても検討する。

などがあげられる。

(2001年8月10日受付)

参考文献

- [1] 石崎, かご形誘導電動機の振動および騒音について, 電気学会論文誌, 75, 5 (1955), pp.451-458.
- [2] P.L. Alger, Induction Machines 2nd ed., Gordon and Breach Pub., (1970), pp.365-390.
- [3] 電気学会技術報告 部, 第120号, 誘導電動機の負荷時の騒音について, (1977), pp.1-18.
- [4] B. Heller and V. Hamata, Harmonic Field Effects in Induction Machines, Elsevier Scientific Pub., (1977), pp.187-218.
- [5] S.J. Yang 著, 齊藤 (訳), ローノイズモータ, 総合電子出版社, (1983).
- [6] 伊藤, 藤本, ほか3名, 三相誘導電動機におけるギャップ高調波磁束低減のための固定子構造の改良, 電気学会論文誌, B-105, 4 (1985), pp.392-398.
- [7] 石橋, 野田, 森, 小形誘導電動機の電磁振動について, 電気学会論文誌, D-112, 4 (1992), pp.307-313.
- [8] 小野寺, 山沢, 誘導電動機の電磁振動に対する固定子スロット開口幅の影響, 電気学会論文誌, D-113, 5 (1993), pp.1301-1309.
- [9] 塩幡, 根本, ほか5名, 電磁力励起による電動機の振動放射音解析法, 電気学会論文誌, D-118, 10 (1998), pp.1301-1307.
- [10] 電気学会技術報告, 第648号, 最近の直流機の技術動向と高性能化技術, (1998).

- [11] 高橋, 森田, 森本, 林, サイリスタ電源駆動直流電動機の磁気騒音の低減化, 平成元年電気学会全国大会, 662, (1989).
- [12] 坪谷, 戸田, 直流機の電磁音に関する一考察, 電気学会回転機研究会資料, RM-78-6, (1978).
- [13] 阪部, 佐々木, 宮崎, 直流機の磁気加振力の解析, 電気学会回転機研究会資料, RM-80-5, (1980).
- [14] V. Hamata, Magnetic Noise of D-C Machines, *Acta Technica CSAV*, No.2 (1966), pp.202-226.
- [15] 矢内, 遠藤, 主極鉄心形状変更による電磁加振力の低減, 電気学会回転機研究会, RM-94-32, (1994).
- [16] 森本, 森田, 直流電動機の磁気加振力解析, 日本 AEM 学会誌, Vol.10, No.2 (2002), pp.
- [17] J.P.Den Hartog 著, 谷口, 藤井 (訳), 機械振動論, コロナ社, (1960).
- [18] S.P. Timoshenko 著, 谷口, 田村 (訳), 新版工業振動学, コロナ社, (1977).
- [19] 川井, 岸, 機械のための有限要素法入門, オーム社, (1983).
- [20] 下関, 藤沼, PC-9801 有限要素法プログラミングの実際 [I], 日刊工業新聞社, (1989)
- [21] 日本機械学会編, モード解析の基礎と応用, 丸善株式会社, (1986).
- [22] モード解析ハンドブック編集委員会編, モード解析ハンドブック, コロナ社, (2000).