

EV 用モータの振動特性シミュレーション

Simulation of Motor Vibration Characteristics for EV

山 本 恵 一* 柳 木 孝 昭* 貝 塚 正 明* 瀧 澤 一 晃*
Keiichi YAMAMOTO Takaaki NAGI Masaaki KAIZUKA Kazuaki TAKIZAWA

要 旨

地球環境問題のクローズアップに伴い、ホンダは電気自動車の積極的な技術開発を行っている。その中でモータの研究・開発は特に重要である。現在まで、電気自動車に使われているモータには誘導モータが比較的多く採用されてきた。しかし、最近では高効率でしかも高出力密度を特徴とする永久磁石モータが使われるようになりそのポテンシャルが注目されつつある。

しかし一方で、この永久磁石モータの高効率化と高出力密度化を達成するため、モータ内部の各磁性体の磁束密度が増大すると、それに起因する磁歪が発生しやすくなる。その結果、ステータティース部などが振動し、モータの振動の原因ともなっている。

そこで、今回は特にステータティース部の振動に着目し、磁場解析によって磁歪や他の振動要因を調べ、さらに磁場解析と振動解析の連成解析を行った。その結果、モータ内部のステータティース部における振動メカニズムがモータ通電電流波形に起因することが明らかになりモータ振動の低減に大きく寄与する事ができた。

ABSTRACT

In order to address the global environmental issues, Honda has developed electric vehicles (EV) over the years. For the motor for its powertrain, among the most important technologies in its development, induction motors were widely used in the industry as a whole. They are now being superseded by more efficient and higher output power density permanent magnet motors, whose flux density in the magnetic substances must be increased for maximum performance of the motor. However, as flux density is increased, magnetostriction becomes more likely to occur and make the stator teeth vibrate, thus causing motor vibration.

This paper describes the analysis of the magnetic field and magnetostriction to identify the causes of vibration of the stator teeth. The results have revealed the vibration mechanism that can be attributed to the wave form of the motor current at the stator teeth inside the motor, thereby identifying the areas to examine for the solution, which led to a marked reduction of the motor vibration.

1. まえがき

電気自動車 (EV) にとって一充電走行距離をのばすことは大きな課題の一つである。このために原動機であるモータの高効率化と小型化を両立させ出力密度を大きくすることはこの課題を解決するための有効な手段の一つである。

一方、近年の磁石材料の進歩により高性能つまり高エネルギー積をもつ磁石が安価で容易に入手が可能となり永

久磁石モータの高出力密度化が進んできている。このことにより先に述べた EV の課題を永久磁石モータによって達成させることが可能となった。

磁性体が磁場を受けると磁場で直接誘起される磁歪と磁力による変形に基づく歪みが同時に発生する。

モータの出力を向上させるためにはモータ内部の磁性体の磁束量を増加させる必要があり、そのため各部の磁束密度が増大し、磁歪が発生する。モータの内部ではそ

* 栃木研究所

の磁束密度の分布や磁束の方向などからステータティース部で最も顕著に磁歪現象が生じる。一般的にモータの振動を抑えるためには構造的に剛性を上げて共振を回避したり、磁気的には空隙部磁束密度を平滑化してトルクリップルを低減するといった手法がある。従来から数値解析法を用いることにより、構造解析には有限要素法や境界要素法が、磁場解析には有限要素法や磁気モーメント法が使われてる。しかし、構造解析と磁場解析を別々に扱っていたり、モータの通電電流などの条件を簡素化して取り扱っていたためステータティース部の振動についての解析は十分になされていなかった。

本報告ではモータの通電電流の高周波成分を考慮に入れたうえで磁場解析を行いその結果からステータティース部の変形を磁歪に起因するものと、磁力に起因するものに分けて算出し、その振動について解析を行った。

2. 磁 歪

磁歪とは磁性体の結晶格子が発磁化にともないひずむことであり、言い換えると磁化したときに磁性体の外形が変形する現象をいう (Fig. 1)。

例えば、モータのステータ部などに使われているけい素鋼板では磁化の変化に伴う長さの変化の割合 $\Delta l/l$ (磁気ひずみ λ) は Fig. 2 のようになる¹⁾。

Fig. 2 にあるように磁気ひずみ λ は、磁界の強さ H とともに増加するが、やがて一定値となる。これは磁性体の磁化が飽和に達するためである。産業界では、超音波振動子や磁歪アクチュエータなどのように、この磁歪現

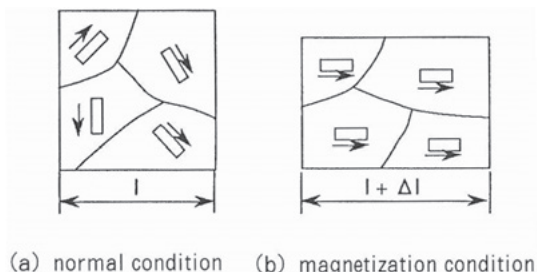


Fig. 1 Magnetostriction phenomenon

象を積極的に利用したものがあるが、EV 用の原動機であるモータにおいては振動の原因ともなる。しかし、この磁歪現象については現在の計測技術では実機における計測が困難であり、そのための計算手法の確立が望まれている。

ステータティース部の変形は、先に述べた磁歪によるものと主として巻線を発熱源とする熱膨張によるものとさらには磁力による吸引・反発力によるものがある。変形量の大きさは、熱による膨張が他の二つに比べてかなり大きく構造的には応力などを考慮することが必要であるが高周波成分を含まないため、振動には寄与しないといえる。

一方、磁歪による変形と磁力による吸引・反発力による変形は高周波成分をもつことが考えられるので、振動への寄与が予測される。そこで、本論文ではこの磁歪と磁力による吸引・反発力による変形について、数値解析法を用い解析を行った。

3. ステータティース部における変形解析

本報告において解析対象となる永久磁石モータのロータステータの概形を Fig. 3 に示す。

3.1. 磁歪によるティース部の変形解析

モータ内部の磁場解析を行うことにより、ステータティース部の各要素毎の磁歪を求めティース部全体の変形を算出した。この磁場解析には磁気モーメント法を用いた。磁性体内部の任意の磁気モーメントを M 、磁場の

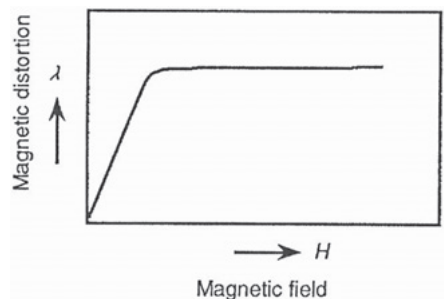


Fig. 2 Magnetic field H -distortion λ characteristics

強さを H 、磁化率を χ とすると

$$M = \chi H \quad \cdots(1)$$

また、磁場の強さ H は、コイルに流れる電流による磁場 H_c と磁性体による磁場 H_m の和として

$$H = H_c + H_m \quad \cdots(2)$$

ここで、Biot-Savart の法則により電流密度を J 、任意の点の位置ベクトルを $\vec{r}$ 、電流からの距離を r とすると

$$H_c = 1/4 \pi \int ((J \times \vec{r}) / r^3) dV \quad \cdots(3)$$

また磁性体中の位置ベクトルを $\vec{r}'$ とすると

$$H_m(r) = -1/4 \pi \int (M(r)(\vec{r} - \vec{r}') / (r - r')^3) dV \quad \cdots(4)$$

よって、

$$M / \chi = 1/4 \pi \int (J \times \vec{r} / r^3) dV - 1/4 \pi \int (M(r)(\vec{r} - \vec{r}') / (r - r')^3) dV \quad \cdots(5)$$

上記の式を磁気モーメントについて解くことにより任意の点の磁場を求める²⁾。この磁場解析に用いたメッシュ形状は Fig. 4 に、電流データは Fig. 5 に示す。

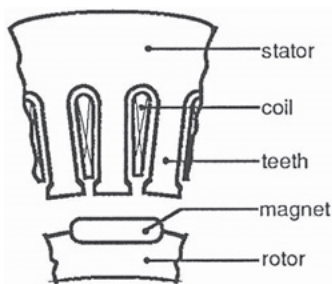


Fig. 3 The configuration of magnetic field circuit

磁場解析結果から求まる磁束密度から磁歪を求めるには Fig. 6 に示す試験片にて実測された磁束密度と磁歪の関係を用了^{3) 4)}。

この時モータ内部の磁束密度は周期的な変化をするので、一周期分の解析をした。

このようにして算出した各時刻に於けるステータティース先端部の磁歪による変形は Fig. 7 のようになる。

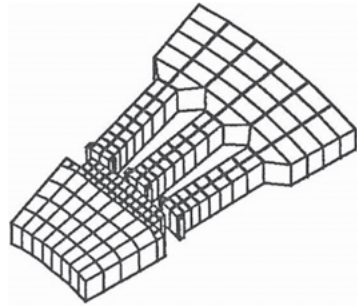


Fig. 4 Analysis mesh configuration

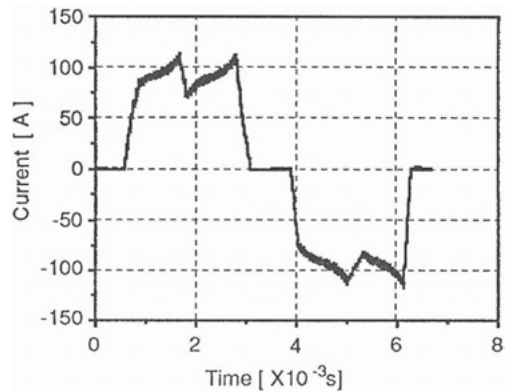


Fig. 5 Motor current wave form

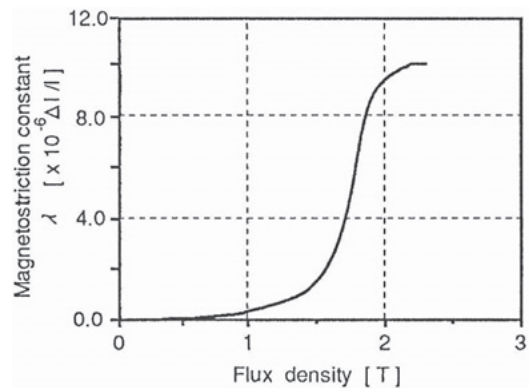


Fig. 6 Magnetic flux density-distortion λ characteristics

3.2. 磁力によるティース部の変形解析

モータのロータ（磁石）、ステータ間の磁力による吸引・反発でのティース部の変形を求めるために、まず Maxwell の応力法を用いてモータのトルクを算出した。Fig. 8 に示すように、物体の表面に於ける磁束密度の法線方向成分を B_n 、接線方向成分を B_t とした時、単位面積当たりの電磁力の法線方向成分 F_n と接線方向成分 F_t は次式で表される。

$$F_n = 1/2 \mu_0 (B_n^2 - B_t^2) \quad \cdots(6)$$

$$F_t = 1/\mu_0 (B_n \cdot B_t) \quad \cdots(7)$$

上の式をもとに実際の計算を行う場合は、解析領域内に閉局面を設定し力を計算する。さらに、トルクはロータ直径を D とすると

$$T = \sum F_t \cdot D/2 \quad \cdots(8)$$

次に、そのトルクから有限要素法を用いた静的構造解析を行い、ティース先端部の変形を求めた。この場合、Fig. 9 に示すように磁力はティース先端部に集中荷重が働くとして計算した。構造物にかかる荷重を $\{P\}$ 、剛性マトリクスを $[K]$ とすると、ある点での変位 $\{u\}$ は次式で表される。

$$[K] \{u\} = \{P\} \quad \cdots(9)$$

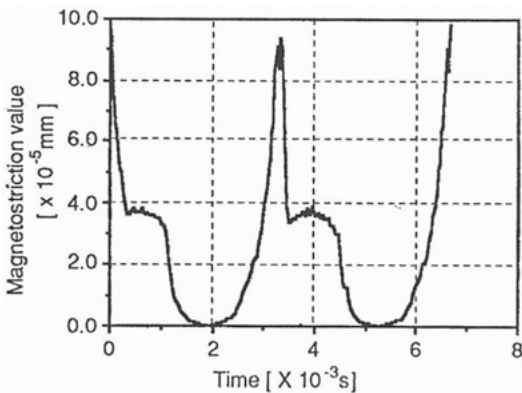


Fig. 7 Motor teeth distortion caused by magnetostriction

ここでは拘束条件としてステータ外周を完全拘束し、解析は、この場合微小変形であるので線形問題として取り扱った。磁場解析に使われたメッシュは、Fig. 4 と同じであり解析条件も磁歪算出の時と同じである。Maxwell の応力法によって求められたトルクがティース先端部に働くとして求めたティース先端の時刻毎の変形は Fig. 10 に示す。

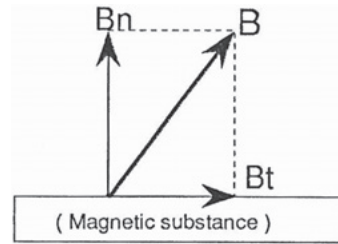


Fig. 8 Magnetic force direction

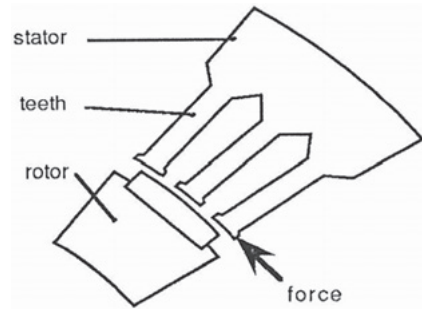


Fig. 9 Magnetic force direction at the motor

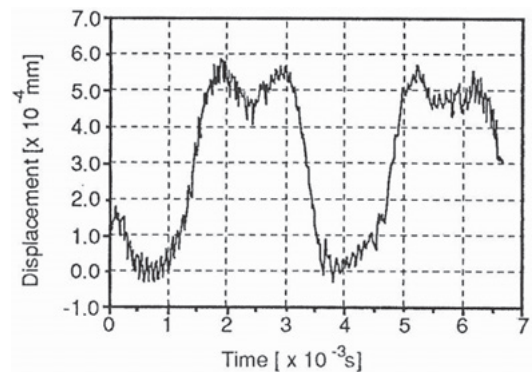


Fig. 10 Motor teeth distortion caused by magnetic force

4. ステータに於ける振動解析 (周波数応答解析)

先に求めた磁歪と磁力によるティース部の変形を入力条件としてティース部の変形加速度を求めるため、周波数応答解析を行った。解析の流れを Fig. 11 のフローチャートに示す。

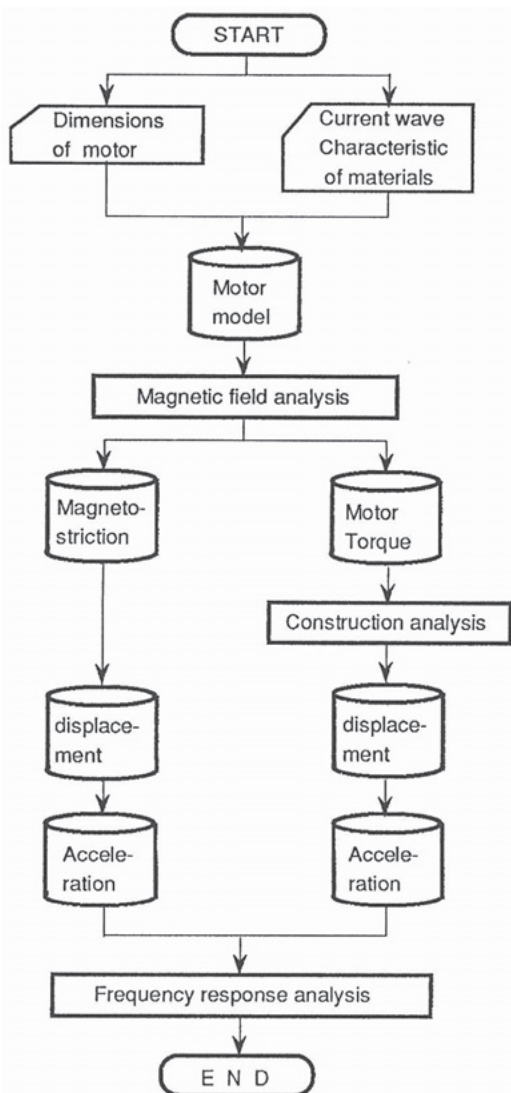


Fig. 11 Flow chart

フローチャートにあるように、まず既に求めた磁歪によるティース部の変形 $F_m(t)$ と磁力によるティース部の変形 $F_t(t)$ から加速度データ $A_m(t)$ 、 $A_t(t)$ を求めた。

$$A_m(t) = d^2 F_m(t) / dt^2 \quad \cdots \cdots (10)$$

$$A_t(t) = d^2 F_t(t) / dt^2 \quad \cdots \cdots (11)$$

更に求めた加速度データをフーリエ変換した⁵⁾。

$$A_m(t) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ a_k \cos \omega_0 k t + b_k \sin \omega_0 k t \} \quad \cdots \cdots (12)$$

$$A_t(t) = c_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ c_k \cos \omega_0 k t + d_k \sin \omega_0 k t \} \quad \cdots \cdots (13)$$

ここで

$$a_k = 2/T \int_{-T/2}^{T/2} A_m(t) \cos \omega_0 k t dt \quad \cdots \cdots (14)$$

$$b_k = 2/T \int_{-T/2}^{T/2} A_m(t) \sin \omega_0 k t dt \quad \cdots \cdots (15)$$

$$c_k = 2/T \int_{-T/2}^{T/2} A_t(t) \cos \omega_0 k t dt \quad \cdots \cdots (16)$$

$$d_k = 2/T \int_{-T/2}^{T/2} A_t(t) \sin \omega_0 k t dt \quad \cdots \cdots (17)$$

$$(k = 0, 1, 2, 3 \cdots \cdots)$$

以上の周波数分解した加速度データを強制変位データとして入力し周波数応答解析を行った。この時の解析メッシュは Fig. 12 に示す。節点 A での半径方向の周波数応答特性は Fig. 13 に示す。

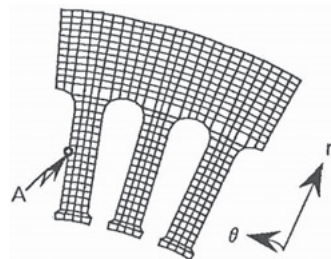


Fig. 12 Mesh division of frequency analysis

5. ステータティース部振動と電流波形との関連性

すでに述べたようにモータのステータティース部で発生する磁歪はモータの通電電流波形に大きく影響を受ける。従って、ここではシミュレーション技術を用いて、ステータティース部の振動とモータ通電電流波形の関連性について解析を行った。実測においてステータティース部は直接振動を検出するのが困難であるため、モータ全体の振動を測定することによりティース部の振動を推定する方法をとった。この振動はモータに近接したポイントでの音圧値で置き換え定量化した。今回の解析のベースデータとした時のモータの通電電流波形 (a) を Fig. 14 に示す。

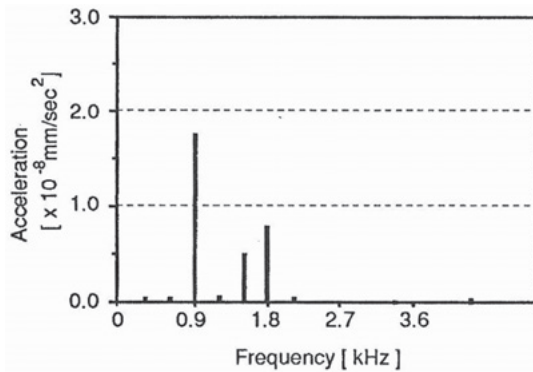


Fig. 13 Frequency response of stator teeth at Node 'A' (radial)

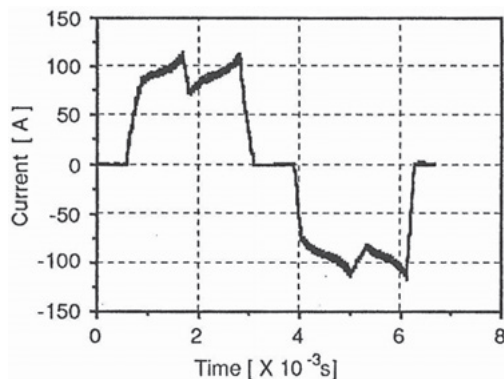


Fig. 14 Motor current wave form (a)

この時のモータ振動の実測結果を Fig. 15 に示す。Fig. 14 に示した電流波形と同一の波形の電流を流したときに発生する磁歪によるティース部の変形と、磁力によるティース部の変形のシミュレーション結果を Fig. 16 と Fig. 17 にそれぞれ示す。

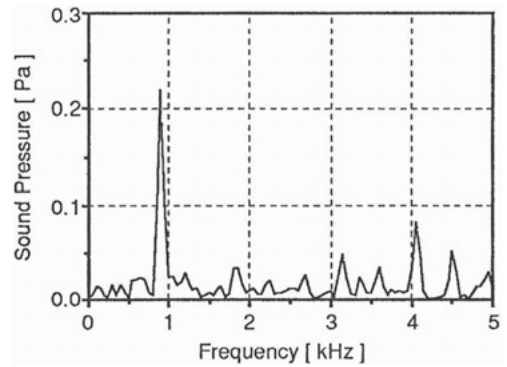


Fig. 15 Motor vibration-frequency characteristics

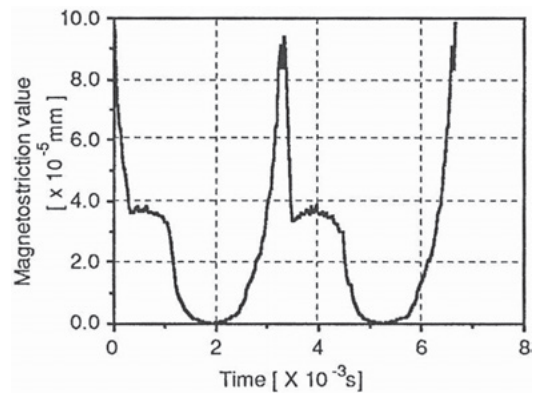


Fig. 16 Motor teeth distortion caused by magnetostriction

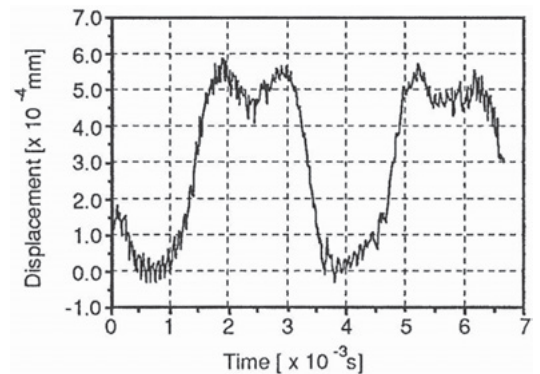


Fig. 17 Motor teeth distortion caused by magnetic force

この結果を加速度データに変換し、周波数応答解析を行うための入力条件とした。周波数応答解析結果は、Fig. 12の節点 A の半径方向成分と周方向成分に分けてそれぞれ Fig. 18 と Fig. 19 に示す。

900[Hz] 付近の周波数帯にピークが存在することがシミュレーションと実験の双方から確認できた。この時の (a) の電流波形の周波数分析結果が Fig. 20 である。これからわかるようにこの電流波形は 1～5 [kHz] の領域にエネルギーをもっている。

この領域のエネルギーを減らし、モータの通電電流のこの領域の寄与度と、シミュレーションと実測結果の相関をさらに調べるために Fig. 21 に示す (b) の通電電流波形を検討した。この周波数分析結果は Fig. 22 である。この場合の磁歪と磁力によるステータティース部の変形をそれぞれ Fig. 23 と Fig. 24 に示す。

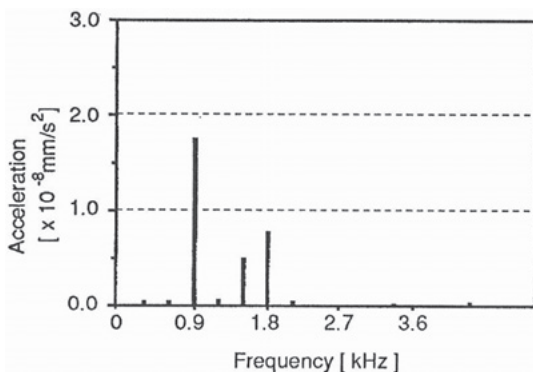


Fig. 18 Frequency response of stator teeth (radial)

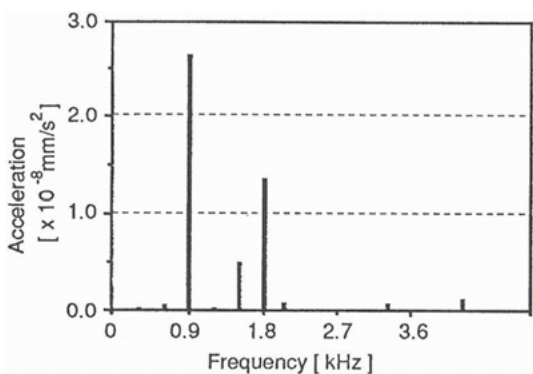


Fig. 19 Frequency response of stator teeth (circumference)

節点 A での半径方向成分と周方向成分の周波数応答結果を Fig. 25 と Fig. 26 に示す。そして、(b) の通電電流波形のときのモータ振動の実測データを Fig. 27 に示す。

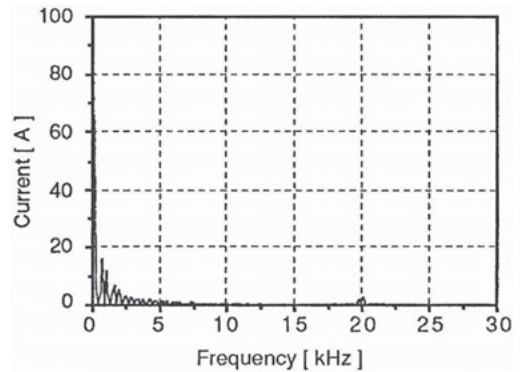


Fig. 20 Spectrum of current (a)

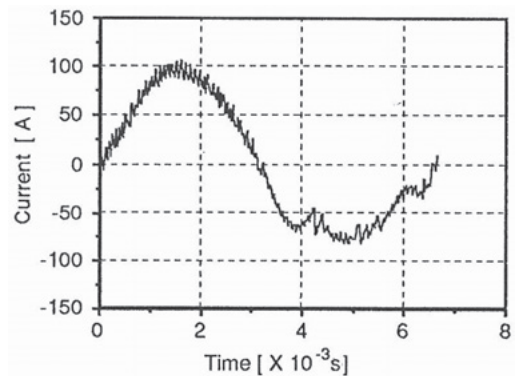


Fig. 21 Motor current wave form (b)

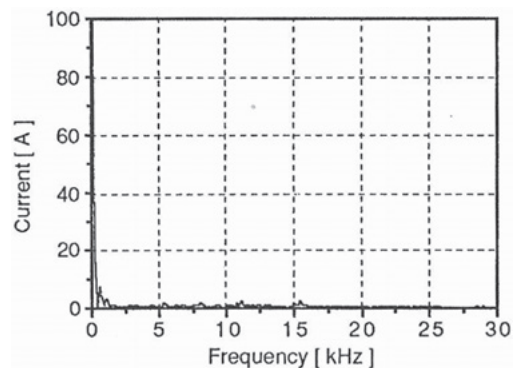


Fig. 22 Spectrum of current (b)

(a) と (b) の通電電流波形によるシミュレーション結果と実測データから、ステータティース部の振動に電流波形が大きく寄与していることがわかる。

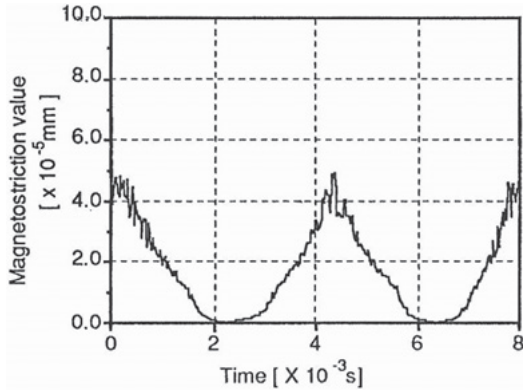


Fig. 23 Motor teeth distortion caused by magnetostriction

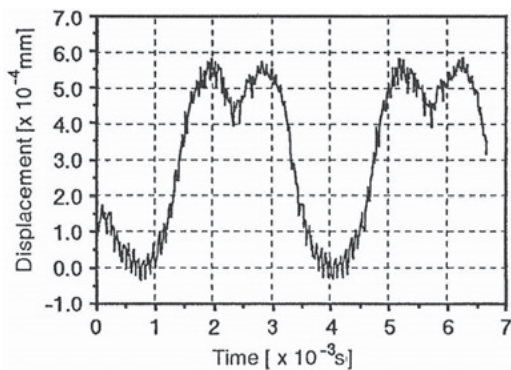


Fig. 24 Motor teeth distortion caused by magnetic force

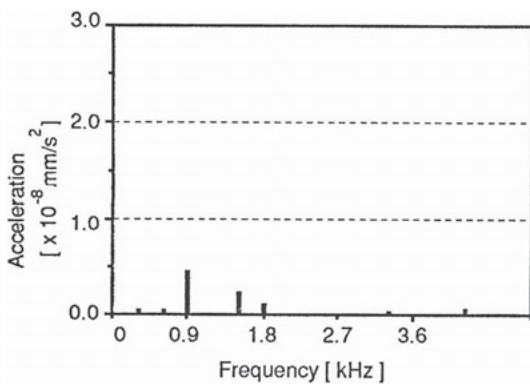


Fig. 25 Frequency response at stator teeth (radial)

6. 結び

電気自動車用永久磁石モータの高出力密度化を達成するためには、モータ内部磁性体の磁束密度を増加させる必要がある。このため、特にステータティース部には磁束が集中して、モータの回転に伴って磁束が交錯するため、磁束密度の変化による機械的な歪み、すなわち磁歪変動が大きくなる。また、モータトルクの変動つまり磁力の変動によるティース部の変形も磁束密度の増加に伴って大きくなる。この磁歪による動変形と磁力による動変形は、永久磁石モータの振動原因となっている。

本論文ではこの磁歪変動と磁力変動による振動に着目し、モータの通電電流に含まれる高周波成分を考慮に入

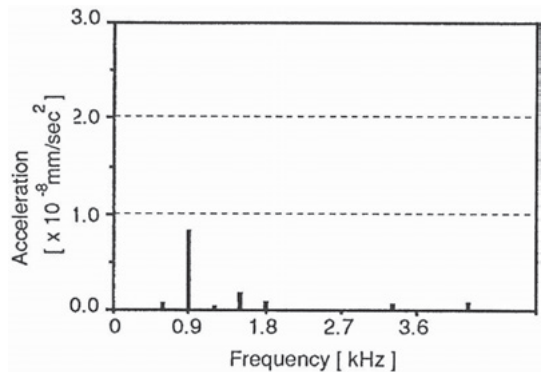


Fig. 26 Frequency response at stator teeth (circumference)

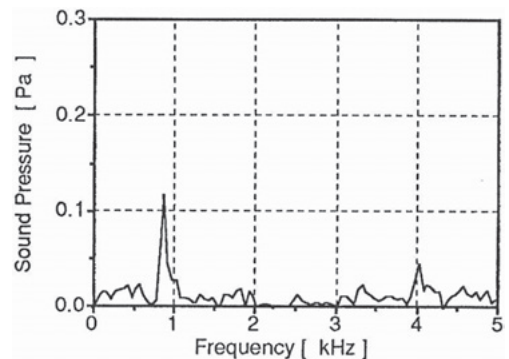


Fig. 27 Motor vibration-frequency characteristics

れた上で、磁気モーメント法による磁場解析から磁歪に起因する動的変動を求め、その結果から有限要素法による構造解析により、磁力に起因する動的変形を求めた。更に、モータ全体の振動との相関関係を調べるために、磁歪・磁力による動的変形を入力条件とした周波数応答解析を行い、2種類のモータ通電電流波形によるシミュレーション結果と実測データの比較から相関関係を確認し、永久磁石モータのステータティース部の振動メカニズムを明らかにした。その結果、この解析手法は永久磁石モータの振動解析にとって有効な手法であることがわかった。本報告の磁場解析を中心としたシミュレーション技術はステータティース部の振動解析を可能とし、モータ振動の低減に大きく寄与することが出来た。

参考文献

- 1) 齊藤 兆吉、早野 誠治、宮崎 淳：強磁性体の磁化機構とその巨視的構成式、第3回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集、p449-452 (1991)
- 2) 河内 健：「コンピュータによる磁界解析入門」、株式会社トリケップス 1992
- 3) 細谷 浩之、加川 幸雄、土屋 隆生、村山 健一：磁歪と磁歪振動の有限要素シミュレーション、第14回日本シミュレーション学会計算電気・電子シンポジウム、p19-24 (1993)
- 4) 細谷 浩之、土屋 隆生、加川 幸雄：磁歪の有限要素シミュレーション - 二次元モデル -、第13回日本シミュレーション学会計算電気・電子工学シンポジウム、p95-100 (1992)
- 5) Julius S. Bendat, Allan G. Piersol、徳丸英勝 他訳：「ランダムデータの統計的処理」、倍風館 1993

■ 著 者 ■



山 本 恵 一



棚 木 孝 昭



貝 塚 正 明



瀧 澤 一 晃