

# EV モーター用磁性材料の磁気特性評価・解析技術

## Evaluation and Analysis Techniques of Magnetic Materials for EV Motors

中田 崇寛 NAKADA Takahiro JFE テクノリサーチ 西日本ソリューション本部 倉敷材料評価センター 主査(係長)  
中西 匡 NAKANISHI Tadashi JFE テクノリサーチ 西日本ソリューション本部 倉敷材料評価センター 主査(課長)

### 要旨

JFE テクノリサーチでは、EV/HEV 用モーターに関し、エネルギー効率を決定づける磁気機能材料である無方向性電磁鋼板および永久磁石の磁気特性評価とともに、近年関心が高まっているモーター振動の調査、解析を行っている。本稿では、ステータコアにおける局所的な磁気測定技術、ネオジム焼結磁石の交流損失測定技術、モーター振動解析などの先端技術について述べる。接触式の局所磁束検出プローブ（以下探針）と局所磁界強度検出コイル（以下 H コイル）を用いた局所磁気測定により、磁束密度および磁界強度の空間的・時間的変化の可視化を実現し、ステータコアの溶接部の影響を明らかにした。また、ネオジム焼結磁石の交流損失測定により、分割による損失低減効果を明らかにした。さらに、モーター振動・騒音の原因を解明するため、モーター試験装置と 3 次元振動加速度センサーを用いたトラッキング解析を行った。

### Abstract:

In this article state-of-the-art technologies developed by JFE Techno-Research are described in the field of measurement and analysis of magnetic functional materials such as electrical steels and permanent magnets, which are key materials determining EV and HEV motor efficiency and performance. Distribution of magnetic flux and field strength around the welded in a stator core are analyzed using needle probes and H coils. AC eddy current loss measurement of sintered Nd-Fe-B magnets using a developed AC magnetizing device revealed that eddy current loss of divided magnet was greatly reduced even without any electrical insulation treatment in the contacting sides of the divided magnets. Measured result was relatively consistent with the results of magnetic FEM analysis. In addition, measurement technique in motor vibration is also featured, which are gaining emerging interest in EV and HEV applications. Motor vibration was analyzed by using a motor evaluation system and a three-dimensional vibration acceleration sensor.

## 1. はじめに

地球環境の保護がますます重要視される中、環境負荷の低い EV/HEV（電気自動車/ハイブリッド電気自動車）の生産台数は増加し続けている。モーターは EV/HEV のエネルギー効率を決定づける基幹モジュールであり、モーターコア材には、高効率化のための低鉄損、小型化・高トルク化のための高磁束密度が要求されている。JFE スチールでは、このようなモーターの要求性能に応じ、各種の優れた電磁鋼板を開発している<sup>1)</sup>。

一方、モーターコアの損失は、実測と解析で差が大きくなる場合がある。これは、電磁界解析で用いられる電磁鋼板の磁気特性値がエプスタイン法などの理想的な状態で測定されたものであり、モーター製造（打抜き、かしめ・溶接・接着・ボルト締め固定、巻線、フレーム圧入・焼き嵌め等）で生じる応力や歪、さらに励磁電流の波形歪等による磁気特性

の劣化が考慮されていないことが一因と指摘されている。最近ではモーター製造における加工歪を考慮した磁気測定や電磁界解析が行われているが<sup>2-7)</sup>、さらなる電磁界解析精度の向上のためにはモーターコア状態で磁束密度や鉄損、応力等を実測、可視化することが重要である。そこで、モーターのステータコアの局所的な磁束および磁界強度を測定するため、当社では絶縁被膜のついた無方向性電磁鋼板を非破壊で測定できる探針（探針間距離 3.5 mm）と微小な H コイル（2 mm × 2 mm）を用いた局所磁気測定法を導入し、モーター製造で生じる応力や歪による磁気特性への影響を調査してきた。これらの技術とその測定結果について 2 章で述べる。

また、モーターコア材である無方向性電磁鋼板と並び、ロータに用いられる永久磁石も重要な磁性材料の一つである。EV/HEV 用駆動モーターには小型、高出力、高効率求められるため、高い残留磁束密度と保磁力を持つネオジム焼結磁石が主に用いられている。ネオジム焼結磁石はフェライト磁石に比べて電気抵抗が低いため、インバータのキャリア波形や回転機構造に起因するスロット高調波の影響により、

2020 年 9 月 30 日受付

磁石中に生じる渦電流が顕著になる。渦電流による損失が大きい場合、ジュール熱による磁石温度の上昇が、磁石特性を劣化させる懸念がある。EV/HEV用駆動モータでは、このような発熱を低減するため、分割構造とする場合がある<sup>8,9)</sup>。分割による損失低減の効果を把握するためには、ネオジム焼結磁石の交流損失を定量的に評価することが重要である。その評価方法と解析結果について3章で述べる。

モータの小型化・高出力・高効率化の他に、低振動・静音化も重要な技術開発要素である。EV/HEVは従来のエンジン車に比べ静粛性が高いため、エンジンの振動・騒音に埋もれていた他の振動・騒音が表面化し問題となることがある。例えば、電動パワーステアリング、エアコンのコンプレッサなどによる振動・騒音は、EV/HEVでは相対的に目立つようになった。このような背景もあり、モータの振動・騒音がこれまで以上にクローズアップされてきている<sup>10)</sup>ことから、当社では3次元振動加速度センサーおよび振動解析システムを導入し、モータにおける振動・騒音を調査してきた。それらの方法と測定結果について4章で述べる。

## 2. モータコアの局所磁気特性の測定技術

### 2.1 目的

鉄心の局所的な磁束測定法として探りコイル法が用いられているが、鋼板に穴をあける必要があるため磁束密度分布への影響が懸念される。これに対し、最近では非破壊で測定できる、探針を用いた方法が開発され適用されている<sup>11,12)</sup>。以下に、モデルモータにおけるステータコアに適用した局所磁気特性の測定技術と測定結果の一例を示す。

### 2.2 測定方法

探針およびHコイルを用いた局所磁気特性の測定原理を図1に示す。鋼板表面に接触させた探針間に生じる誘起電圧は、探針接触点の下部が挟み断面部の1/2の面積に鎖交する磁束が誘起する電圧に等しいとする理論に基づいて、ステータコアの局所磁束密度を求めた<sup>13)</sup>。探針間の距離は3.5 mmとし、磁束密度は次式によって計算した。

$$B_i = (2/S_{Bi}) \int e_{Bi} dt \quad (i: x, y) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $S_{Bi}$  は探針によって磁束が検出される有効面積、 $e_{Bi}$  は探針間電位差を示す。

鋼板表面の磁界強度は鋼板表面におかれたHコイルの誘起電圧により次式によって計算した。

$$H_i = (1/\mu_0 S_{Hi} N_{Hi}) \int e_{Hi} dt \quad (i: x, y) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $\mu_0$  は真空の透磁率、 $S_{Hi} N_{Hi}$  はHコイルの有効エリアターン、 $e_{Hi}$  はHコイルによる出力電圧を示す。

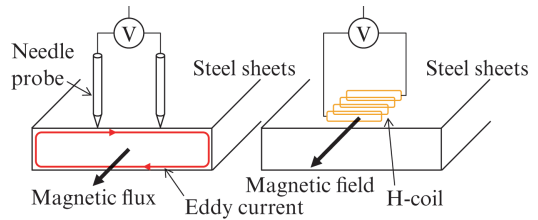


図1 探針とHコイルによる局所磁気測定方法

Fig. 1 Method of local magnetic measurement using needle probe and H-coil

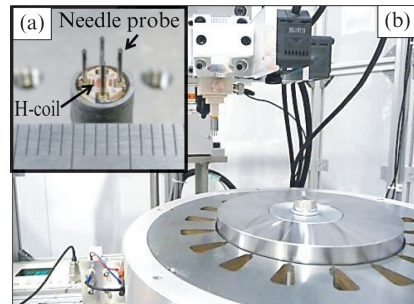


写真1 磁気センサーおよびモータ駆動システム

Photo 1 Magnetic sensor with (a) needle probe and H-coil and (b) motor drive system

写真1に探針、Hコイルおよびモータ駆動システムを示す。モータ駆動システムは被測定モータが外部駆動モータとプーリベルトを經由して連動し、所定の速度で回転する機構とした。被測定モータはステータ径 $\phi 200$  mm、ロータ径 $\phi 114$  mm、積厚30 mmの永久磁石型同期モータ（ステータ18スロット、ロータ12極）とした。ステータの積層間は溶接で固定した。

### 2.3 結果と考察

図2に探針で測定した磁束密度分布を示す。各測定点の値はロータ1回転における磁束密度ベクトルの絶対値の最大値とした。溶接部近くのスレータコアバック部において磁束密度の低い箇所が認められた。

図3にHコイルで測定した磁界強度分布を示す。磁束密度分布と同様に、各測定点の値はロータ1回転における磁界強度ベクトルの絶対値の最大値とした。溶接部近くのスレータコアバック部において、非溶接部とは異なる磁界強度分布が認められた。

図4に磁束密度分布および磁界強度分布の数値解析結果を示す。解析では熱・構造・磁界の連成解析を用いて、溶接によるステータコアの磁気特性への影響を調査した。応力を考慮しない場合、磁束密度分布および磁界強度分布ともに、溶接部周辺で変化は認められない。これに対し、溶接による残留応力を考慮した場合、磁束密度および磁界強度ともに実測値と同様な分布が得られた。

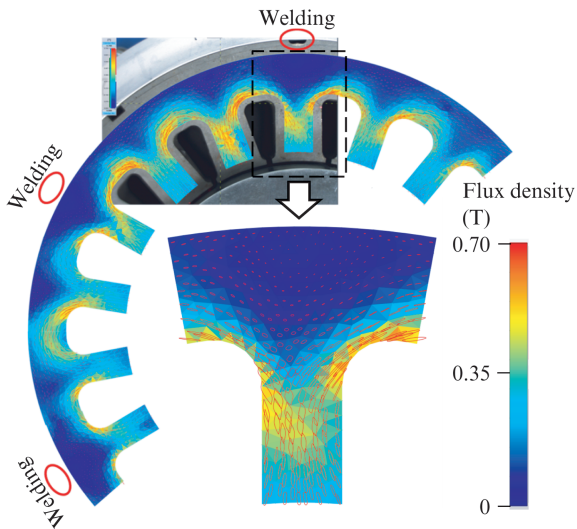


図2 探針で測定した磁束密度分布

Fig. 2 Magnetic flux density distribution measured by needle probes

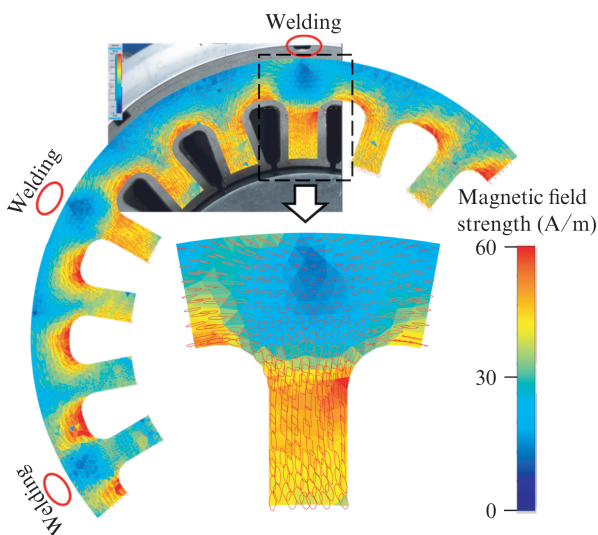


図3 Hコイルで測定した磁界強度分布

Fig. 3 Magnetic field strength distribution measured by H-coil

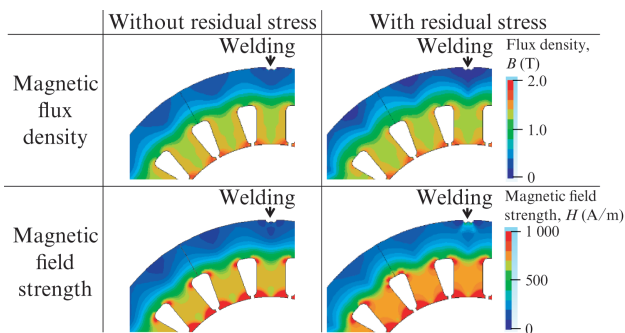


図4 磁束密度分布および磁界強度分布の数値解析結果

Fig. 4 Results of numerical analysis of magnetic flux density distribution and magnetic field strength distribution

### 3. ネオジム焼結磁石の交流損失測定技術

#### 3.1 目的

永久磁石における渦電流損の評価方法としては、ソレノイドコイル中に磁石を設置して交流損失を測定する方法<sup>14)</sup>、熱電対を用いて損失を評価する方法<sup>15)</sup>、閉磁路で構成された試験器を用いた方法<sup>16, 17)</sup>が報告されている。しかしながら、永久磁石の発熱低減を目的とした、分割による渦電流損の実測事例は少ない。

本研究では閉磁路で構成される磁気測定用励磁枠を用いてネオジム焼結磁石の高周波損失およびヒステリシス損失を測定した。さらに損失分離により渦電流損を算出し、ネオジム焼結磁石の分割による渦電流損への影響について評価した。また有限要素法 (FEM) により求めた解析値と測定値との比較を行った。

#### 3.2 測定方法

試料としてネオジム焼結磁石 (未着磁, Niメッキ処理) を用いた。試料のサイズは長さ 20 mm × 幅 10 mm × 高さ 7 mm (磁化方向は高さ方向)、密度は 7 500 kg/m<sup>3</sup>、電気抵抗率は 1.3 μΩ・m である。図 5 に測定に用いた磁石分割構造を示す。分割した磁石の間の絶縁処理は行わず、分割のままとした。測定に用いた閉磁路磁気測定用励磁枠を写真 2 に示す。閉磁路を構成するヨークは高周波鉄損が少ない極薄電磁鋼板を使用した。正弦波励磁にて最大磁束密度 0.01 T, 0.05 T, 0.1 T, 周波数 1~8 kHz で測定をおこなった。交流損失は電力計で測定し、ヒステリシス曲線の面積から各周波数におけるヒステリシス損失を算出した。また、渦電流損は交流損失よりヒステリシス損失を減じて求めた。

#### 3.3 測定結果

図 6 に非分割磁石の渦電流損と励磁周波数・磁束密度の関係を示す。0.1 T における渦電流損の大きさは 0.01 T における渦電流損の約 100 倍であった。これは渦電流損が励磁

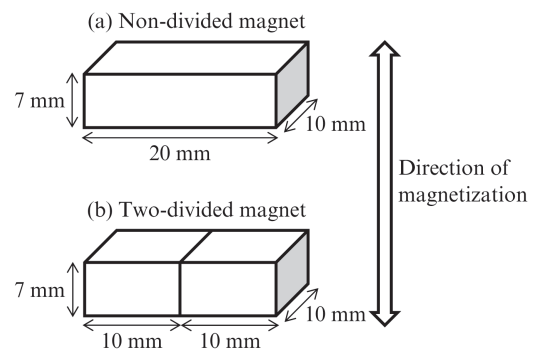


図5 分割磁石の模式図

Fig. 5 Schematic diagram of (a) non-divided magnet and (b) two-divided magnet



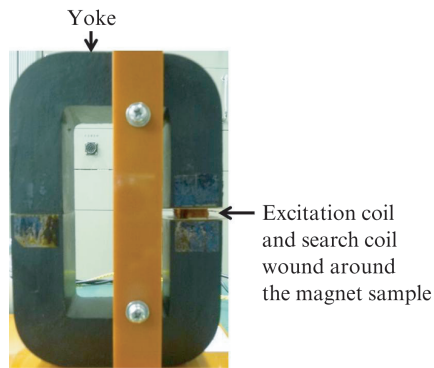


写真 2 閉磁路磁気測定用励磁枠

Photo 2 AC magnetizing device for magnet AC eddy current loss measurement

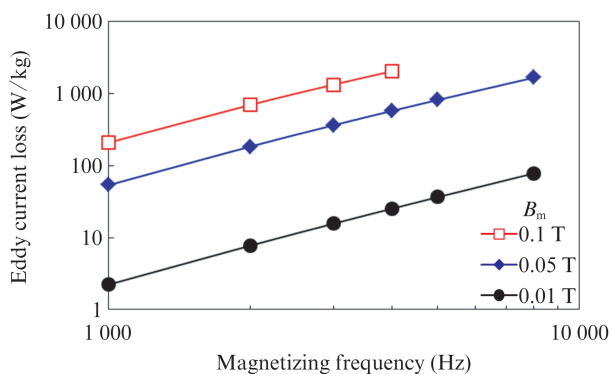


図 6 非分割磁石の渦電流損と励磁周波数の関係

Fig. 6 Eddy current loss measured in non-divided Nd-Fe-B sintered magnet

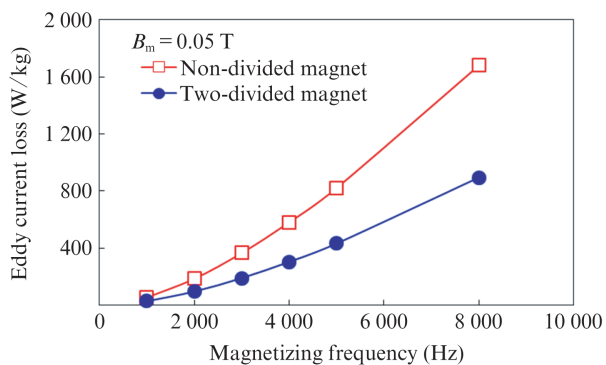


図 7 分割磁石と非分割磁石の渦電流損の比較

Fig. 7 Comparison of eddy current losses measured in divided and non-divided Nd-Fe-B sintered magnets

磁束密度の 2 乗に比例するためである。

図 7 に分割、非分割磁石の渦電流損測定結果の比較を示す。励磁周波数 8 kHz で、分割磁石は非分割磁石に比べて渦電流損が約 47% 減少した。本測定では分割磁石間に絶縁処理を行ってないことから、単純に分割するだけで渦電流損を大幅に低減できることがわかった。

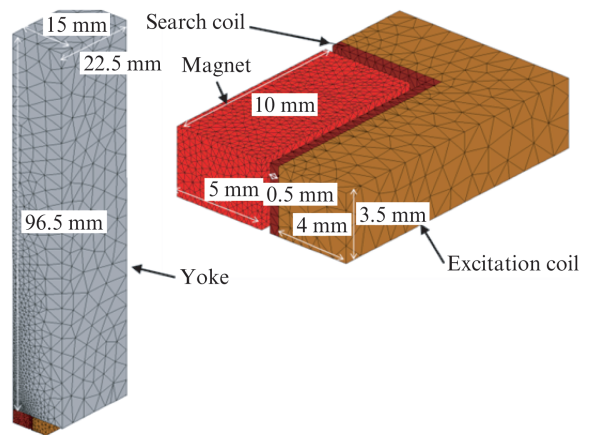


図 8 分割磁石の渦電流損解析モデル

Fig. 8 Analysis model of eddy current loss in divided and non-divided Nd-Fe-B sintered magnets

表 1 分割磁石の渦電流損解析条件

Table 1 Analysis conditions of eddy current loss in divided and non-divided Nd-Fe-B sintered magnets

Model		1/8
Number of elements		36 704
Density of magnet ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		7 500
Relative permeability of magnet		10
Electric resistivity of magnet ( $\mu\Omega \cdot \text{m}$ )		1.3
Dimension (mm)	Non-divided magnet	$20 \times 10 \times 7$
	Two-divided magnet	$(10 + 10) \times 10 \times 7$

### 3.4 ネオジウム焼結磁石の渦電流損解析

有限要素法 (FEM) を用いて、分割磁石における渦電流損低減効果を解析した。図 8 に渦電流損解析に用いたモデルを、表 1 に解析条件を示す。解析に際し、周波数 1~8 kHz に対し、磁石面を上下に貫く磁束密度の振幅が 0.05 T となるよう、各周波数における電流振幅を調整した。解析は対称性を考慮し、1/8 モデルで行った。

図 9 に分割磁石における渦電流損の計算値と測定値の比較を示す。有限要素法により求めた渦電流損は測定値に比べて小さいが、比較的よい一致を示した。計算値と測定値の乖離の要因としては、表面処理部分 (Ni メッキ) の損失への影響<sup>14)</sup> や電気抵抗率の異方性による影響などが考えられる。

## 4. モーターの振動評価技術

本章では電動パワーステアリングなどのモーターに用いられる埋め込み型磁石 (IPM) モーターの振動評価例を紹介する。

モーター振動の評価は写真 3 に示すモーター試験装置を用いておこなった。



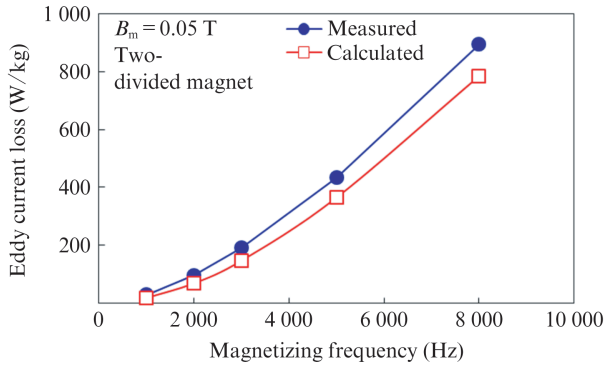


図9 分割磁石における渦電流損の解析値と測定値の比較  
Fig. 9 Comparison of calculated and measured eddy current loss in divided Nd-Fe-B sintered magnet

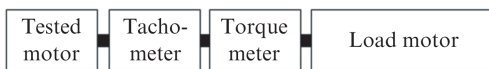


写真3 モーター試験装置  
Photo 3 Motor evaluation system

供試モーターはIPMモーターとし、12極、ステータ外径 $\phi 156$  mm、積厚25 mmのコア寸法とした。供試モーターの駆動条件は、トルクを0.3 Nmに固定し、回転数を500 rpmから3000 rpmへ毎秒+5 rpm増加させた。この間に供試モーターのケースに取り付けた加速度センサーを用いて振動加速度を測定し、FFTアナライザーでトラッキング解析をおこなった。

トラッキング解析の結果を図10に示す。図10では、横軸を加速度センサーにより測定した振動加速度の周波数、縦軸を供試モーターの回転数とし、加速度センサーによる振動加速度の周波数成分をマッピングした。このマッピングには特徴が2つある。以下にその特徴について述べる。

1つ目の特徴は、図10に赤矢印で示した斜めの直線上で振動加速度が大きくなっていることである。これは供試モーターの回転数に比例して振動加速度の周波数が増加していることを示しており、モーターの回転が直接原因の振動である。なお赤矢印で示す直線が複数存在するのは高調波成分の影響である。

2つ目の特徴は、図10中の青矢印の周波数範囲で振動加速度が大きくなっていることである。この範囲はモーター回転数には関係なく、モーターおよび試験装置の機械的構造に起因する共振周波数を表している。

このようにトラッキング解析をおこなうことにより、モーター

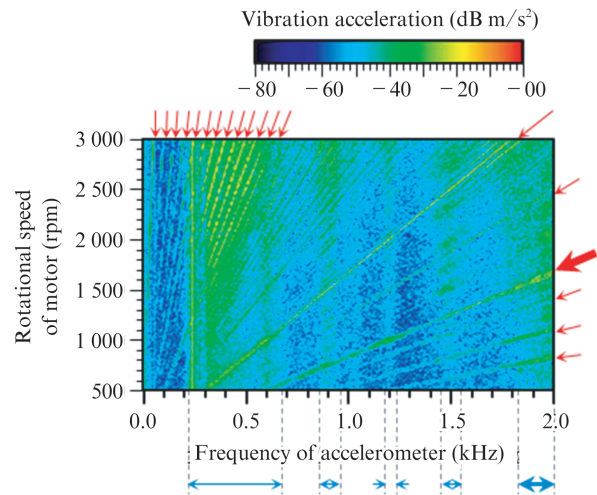


図10 モーター振動のトラッキング解析  
Fig. 10 Tracking analysis of motor vibration

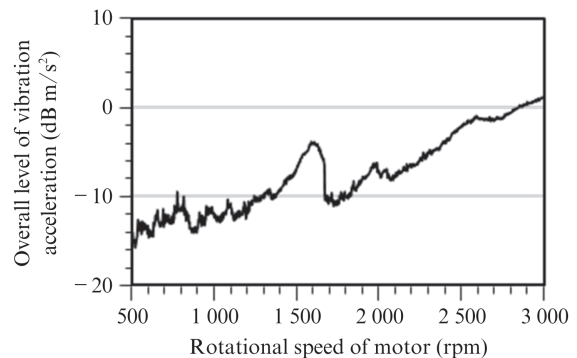


図11 振動加速度のオーバーオール値  
Fig. 11 Tracking analysis of motor vibration

の回転が直接原因である振動と機械的構造による共振を区別して把握することが可能である。そして振動が特に大きくなるのはこれら2つの振動の周波数が重なったときである。振動加速度のオーバーオール値は、図11に示すとおりモーターの回転数が1600 rpm付近のところで極大になっている。一方、図10において、太い赤矢印で示すモーターの回転が直接原因である振動の直線と、太い青矢印の範囲（横軸が1.8~2.0 kHz）が示す機械的構造による共振周波数範囲が、1600 rpm付近で重なっている。1600 rpmにおけるオーバーオール値の極大は、モーター回転による振動が共振により増大したことが原因と考えられる。

図12にモーターの回転数が1600 rpmと1400 rpmの振動スペクトルを示す。振動加速度の最大値は、1400 rpmでは周波数0.85 kHz付近での $-15$  dB m/s<sup>2</sup>なのに対し、1600 rpmでは周波数1.92 kHz付近での $-7$  dB m/s<sup>2</sup>となっている。すなわち、振動加速度の周波数成分の最大値は、1600 rpmの方が1400 rpmよりも8 dB m/s<sup>2</sup>大きくなっている。オーバーオール値は概ね周波数成分の最大値に依存するため、図11

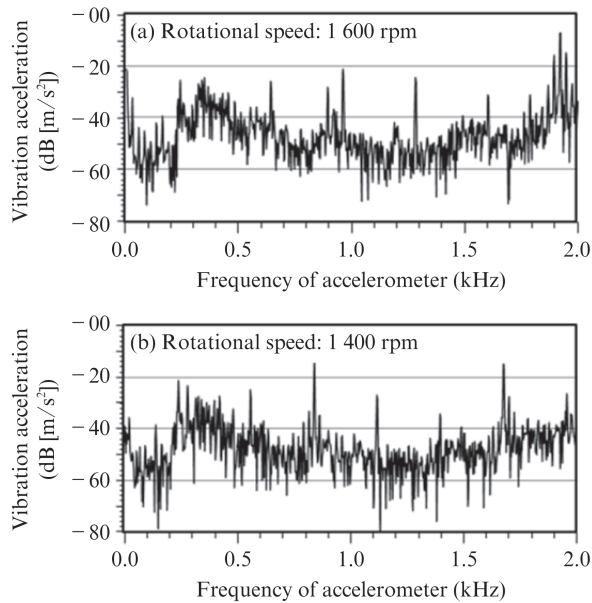


図 12 振動加速度スペクトル

Fig. 12 Vibrational acceleration spectrum

におけるオーバーオール値は 1 600 rpm で極大になったと考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、EV/HEV モータ用磁性材料の先端的磁気特性評価・解析技術として、ステータコアの局所磁気測定技術、ネオジム焼結磁石の損失測定技術、モータ振動解析技術を紹介した。今後、電動化の進展にともない、EV/HEV 用モータは高効率化が強く求められると考えられる。JFE テクノリサーチは多様化するお客様のニーズに対応する磁気測定・モータ解析技術を開発し、「ものづくり」のベストパートナーとして、これらの技術をご提供させていただき所存である。

### 参考文献

- 尾田善彦, 大久保智幸, 高田正昭. JFE スチールにおける無方向性電磁鋼板の最近の進歩. JFE 技報. 2015, no. 36, p. 6-11.
- 千田邦浩, 石田昌義, 中須洋一, 八木正昭. 剪断加工による無方向性電磁鋼板の鉄損および磁区構造の変化. 電気学会論文誌 A. 2005, vol. 125, no. 3, p. 241-246.
- 河野雅昭, 千田邦浩, 早川康之. 自動車電装品の小型化, 高機能化に貢献する打抜加工性に優れた電磁鋼板. 川崎製鉄技報. 2003, vol. 35, no. 1, p. 1-6.
- 谷良浩, 大穀晃裕, 中野正嗣, 有田秀哲, 山口信一, 都出結花利. 応力下における無方向性電磁鋼板の鉄損特性. 日本応用磁気学会誌. 2006, vol. 30, no. 2, p. 196-200.
- 千田邦浩, 河野正樹, 石田昌義. かしめによる鉄心磁気特性劣化の要因解析. 電気学会マグネティクス研究会資料. 2005, MAG-05-42, p. 21-26.
- 栗田直樹, 高橋康人, 藤原耕二, 石原好之. 無方向性電磁鋼板の磁気特性の応力依存性評価と IPM モータの磁界解析への適用. 電気学会静止器・回転機合同研究会資料. 2011, SA-11-25/RM-11-25, p. 61-66.
- 戸田広朗, 尾田善彦, 財前善彰. JFE スチールのモータ特性解析技術. JFE 技報. 2015, no. 36, p. 24-31.
- 戸田広朗, Wang, J.; Howe, D. 永久磁石ブラシレスモータの損失評価. JFE 技報. 2005, no. 8, p. 17-21.
- 村上亮. EV・HEV 用モータにおける磁石応用の取り組み. 電気学会マグネティクス研究会資料. 2015, MAG-15-164, p. 57-60.
- 吉桑義雄. モータの電磁加振力発生要因と低減技術. 日本機械学会誌. 2007, vol. 110, no. 1058, p. 62.
- 千田邦浩, 石田昌義, 本田厚人. 回転中の誘導モータにおける固定子鉄心の磁気特性分布の直接測定. 川崎製鉄技報. 2003, vol. 35, no. 1, p. 16-20.
- 千田邦浩, 石田昌義, 本田厚人, 大山勇. 回転状態におけるブラシレス DC モータの局所磁気特性. 電気学会回転機研究会資料. 2003, RM-03-42, p. 49-54.
- 山口俊尚, 今村正明, 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 本田厚人, 山本孝明. 探針法による局所磁束測定精度の理論的評価. 電気学会論文誌 A. 1995, vol. 115, no. 1, p. 50-57.
- 伊藤馨, 橋場豊, 堺和人, 八木澤猛. 希土類永久磁石の交流磁気損失. 電気学会論文誌 A. 1998, vol. 118, no. 2, p. 182-187.
- 青山康明, 大橋健, 宮田浩二. 交番磁界中の永久磁石における渦電流損失の解析と実験. 電気学会回転機研究会資料. 2002, RM-02-135, p. 13-18.
- 金澤真一, 高橋則雄, 久保武春. ネオジム焼結磁石の交流磁気損失の測定並びに解析との比較. 電気学会論文誌 A. 2004, vol. 124, no. 10, p. 869-875.
- 清水修, 藤本博志, 中田崇寛, 米山勝也, 武田啓司, 榎戸靖. 永久磁石における損失の単体計測と解析による評価. 2019 年電気学会産業応用部門大会講演論文集. 2019, no. 4-5, p. 99-102.



中田 崇寛



中西 匡