

# JFE スチールのモータ特性評価技術

## Evaluation Techniques for Motor Characteristics in JFE Steel

吉崎聡一郎 YOSHIZAKI Soichiro JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (副課長)  
財前 善彰 ZAIZEN Yoshiaki JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (課長)  
大久保智幸 OKUBO Tomoyuki JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (副部長)

### 要旨

広域なモータ駆動条件におけるモータ特性を高精度に計測する技術を確立し、モータ効率におよぼす電磁鋼板の加工方法の影響を実験的に検証した。板厚 0.2 mm の 3% Si 鋼である 20JNEH1500 では、打抜き加工や焼きばめによって鉄損が増加し、低負荷トルク領域で効率が大きく低下した。一方、Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 を使用したモータは打抜き加工や焼きばめ応力による鉄損の増加とモータ効率の低下が小さかった。加工により鉄損が増加しにくい Si 傾斜磁性材料は、焼きばめを利用するモータやドローン用途などの小型で高効率が要求されるモータの鉄心材料に好適であると考えられる。

### Abstract:

JFE Steel established a technique to accurately measure motor characteristics under a wide range of motor drive conditions. Effect of core lamination and assembly methods on motor efficiency was experimentally evaluated by the technique. In 20JNEH1500, which is 3% Si steel with a sheet thickness of 0.2 mm, iron loss increased due to punching and shrink fitting, resulting in a significant decrease in efficiency in the low torque range. On the other hand, Si gradient steel 10JNHF600, which has Si distribution in the thickness direction, showed a smaller increase in iron loss than 20JNEH1500. From the above results, the application of Si gradient steel is suitable for shrink fitted motors and high efficiency small motors such as those used in drones.

## 1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、自動車に代表される様々な分野で電動化が進んでおり、これまで以上にモータの活躍の場が広がっていくと考えられる。世界の総消費電力に占めるモータの消費電力の割合は半分程度とされていることから、省エネルギー化に対するモータ高効率化の役割は極めて大きい<sup>1)</sup>。モータの鉄心材料として広く使用されている無方向性電磁鋼板は、モータ効率を左右する重要な構成材料である。電磁鋼板の鉄損低減によりモータ効率が向上するため、電磁鋼板に対してはさらなる低鉄損化の要求が強く、様々な材料が開発されている<sup>2-5)</sup>。

JFE スチールでは、新規開発した電磁鋼板を用いてモデルモータを製作および評価し、モータ特性の改善を実測評価により確認してきた<sup>6,7)</sup>。一方、近年の自動車駆動用モータは広域な動作範囲での運転が可能となる IPM (Interior Permanent Magnet) モータが主流となっており、ベクトル制御によるリラクタンストルクの活用や高速回転化による小型化などが進展している<sup>8)</sup>。また、電動車の電費評価では特定のモータ動作条件ではなく WLTP (Worldwide

harmonized Light duty driving Test Procedure) などのモード走行におけるエネルギー損失が考慮されるため、広域なモータ運転領域における効率マップ評価が必要となってきた。そこで、当社は広域なモータ駆動条件におけるモータ特性を高精度に計測する技術を確立した。図 1 に、確立した技術により実測評価したモータ効率マップの一例を示す。評価対象は、自動車駆動モータを模擬したモデルモータ

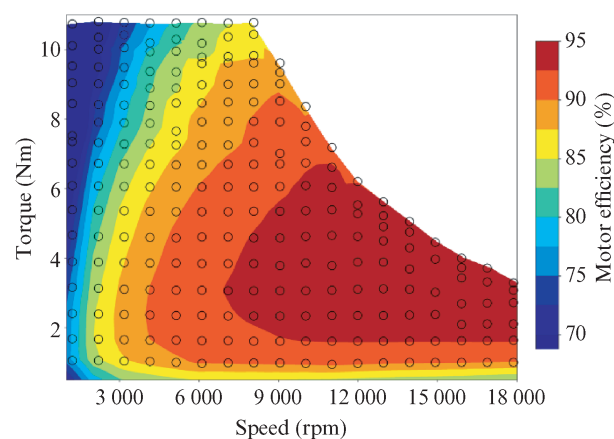


図 1 モータ効率マップの評価例

Fig. 1 Example of motor efficiency map evaluation

2023 年 4 月 11 日受付

(8極, 48スロット)であり, 0.20 mm 厚の無方向性電磁鋼板 20JNEH1500 を使用して製作したものである。電流の振幅, 進角および回転速度をステップ状に変化させ各条件におけるモータ効率を計測し, 最大効率となる電流進角条件で効率マップを描画した。ここで, 図中の○は実測評価ポイントである。この技術により, モータ特性におよぼす電磁鋼板の磁気特性や加工方法の影響を, 広域な駆動条件で実測評価することが可能となった。

電磁鋼板をモータ鉄心として利用する際, その加工方法によりモータ効率が変化することが知られている<sup>9,10)</sup>。図2にモータ鉄心の加工や組み立てに関連する鉄損の増加因子を模式的に示す。打抜きにより導入される加工歪, 焼きばめによる圧縮応力およびカシメなどが鉄損を増加させることが知られており, モータの高効率化を妨げる要因となっていることから多くの研究が報告されている<sup>11-13)</sup>。本稿では, 確立したモータ特性評価技術を活用し, モータ特性におよぼす電磁鋼板の加工の影響を評価した事例を示す。第2章ではIPMモータを対象にモータ鉄心の焼きばめ固定による影響を評価した結果について述べる。また, 第3章ではドローン用途を想定したアウトロータ形式の小型SPM (Surface Permanent Magnetic) モータを対象に, 打抜き加工およびカシメ積層の影響を評価した結果について述べる。

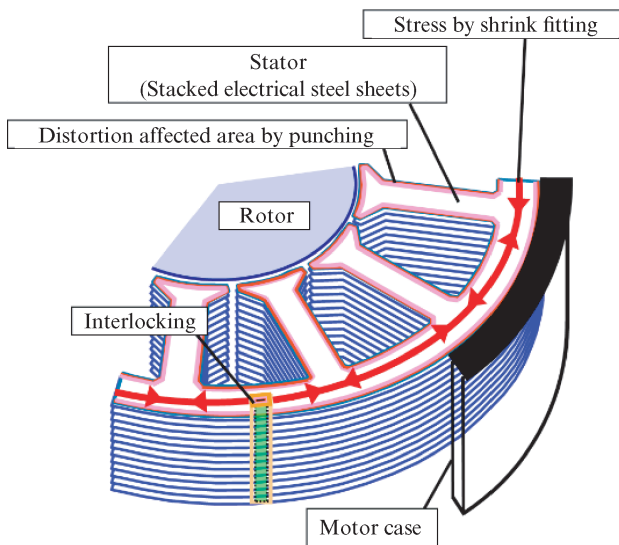


図2 モータ鉄心加工による鉄損増加因子

Fig. 2 Schematic diagram of iron loss increase factor

## 2. モータ特性におよぼす焼きばめの影響

本章では, 0.20 mm 厚の無方向性電磁鋼板 20JNEH1500 および Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 を対象として, 鉄損におよぼす圧縮応力の影響と, モータ特性におよぼす焼きばめの影響を評価した結果を示す。Si 傾斜磁性材料 JNHF<sup>®</sup>とは, 図3に示すように鋼板表層部の Si 量が 6.5%, 中心部の Si 量が 3%程度の Si 濃度勾配を有する材料であり, 高周波条件において低鉄損特性を示す<sup>14)</sup>。また, Si 傾斜磁性材料は加工による鉄損の変化が特異的に小さい材料としても知られており, モータの高効率化へ有効であると期待される<sup>15)</sup>。表1に各材料の代表的な磁気特性を示す。

### 2.1 実験方法

まず, 圧縮応力下での単板磁気測定について説明する。20JNEH1500 および Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 をせん断して 180 mm 長さ×30 mm 幅の単板サンプルを作製した。図4に評価に使用した単板磁気試験器 (Single Sheet Tester, SST) の模式図を示す。単板サンプルの磁化方向に圧縮応力を印加した状態で鉄損を測定した。なお, 板厚方向に対し 100 N の力で樹脂プレートを押し付け面圧を付与することで, 単板サンプルの座屈を防止した。

続いて評価モータの製作方法について説明する。モータ特性におよぼす焼きばめの影響を評価するため, 20JNEH1500 および Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 で作製したモータ鉄心を, 焼きばめあり, 焼きばめなしの2条件でモータとして組み立て, モータ特性を実測評価した。なお, 焼きばめによる影響のみを抽出して評価するため, 歪が入りにくいワイヤ放電加工と接着積層によって鉄心を作製した。焼きばめ工程においては, アルミ合金 (AL5056) のケースを

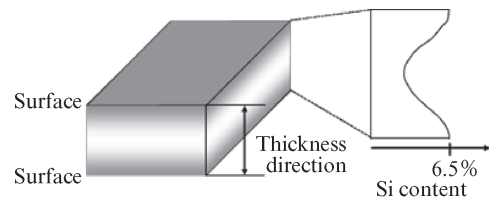


図3 Si 傾斜磁性材料 JNHF<sup>®</sup>の Si 濃度分布

Fig. 3 Silicon distribution in Si gradient steel JNHF<sup>TM</sup>

表1 各材料の磁気特性

Table 1 Magnetic properties of Si gradient steel and conventional electrical steel

Material	Thickness (mm)	Magnetic flux density at 5 000 A/m, $B_{50}$ (T)	Iron loss (W/kg)		
			$W_{10/400}$	$W_{10/1000}$	$W_{10/3000}$
Si gradient steel 10JNHF600	0.10 mm	1.53	10.1	30.0	100
3%Si steel 20JNEH1500	0.20 mm	1.66	12.5	47.3	231

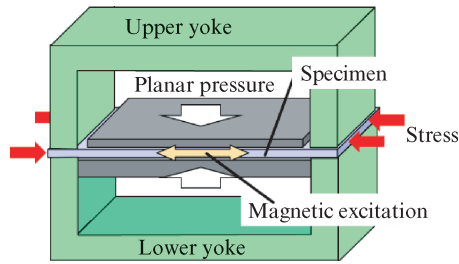


図4 応力下鉄損評価用 SST 試験枠

Fig. 4 SST for magnetic measurement under stress

表2 評価 IPM モータの諸元

Table 2 Specification of test IPM motor

Items	Specification
Rated power output	3 kW
Input voltage	220 V <sub>dc</sub>
Current limit	20.0 Arms
Current phase angle	0.0—20.0 deg
Number of poles/slots	12/18
Outer diameter of stator	156.0 mm
Stacking length	25.0 mm
Winding connection	Three phase star connection, concentrated

用い焼きばめ代を 0.045 mm とした。モータ鉄心のバックヨーク周方向に印加される圧縮応力は約 50 MPa と推定される。一方、焼きばめなしの条件では、鉄心外径よりも大きいモータケースへ鉄心を接着剤で固定し、モータ鉄心に圧縮応力が印加されないようにした。評価モータの諸元を表 2 に示す。モータ制御は PWM インバータを用いてベクトル制御により駆動し、各測定ポイントで最大効率となる電流位相角でモータ特性をマップ状に評価した。

## 2.2 実験結果および考察

まず圧縮応力下での単板磁気測定結果について述べる。図 5 に 20JNEH1500 および Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 の鉄損におよぼす圧縮応力の影響を示す。20JNEH1500 では圧縮応力付与によって鉄損が大幅に増加し、50 MPa 以上の応力下では 50% 程度の鉄損増加が認められた。一方、Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 は圧縮応力による鉄損の増加が 5% 以下であり、20JNEH1500 と比較して小さかった。Si 傾斜磁性材料は、板厚方向の Si 濃度差に起因する内部応力を有しており、これによって圧縮応力下の鉄損変化が小さくなったものと考えられる<sup>15)</sup>。

次にモータ評価結果について述べる。図 6 にモータの効率マップ評価結果を示す。20JNEH1500 では、焼きばめなしの条件に比べ、焼きばめを行った条件ではモータ効率の低下が認められた。一方、Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 では、

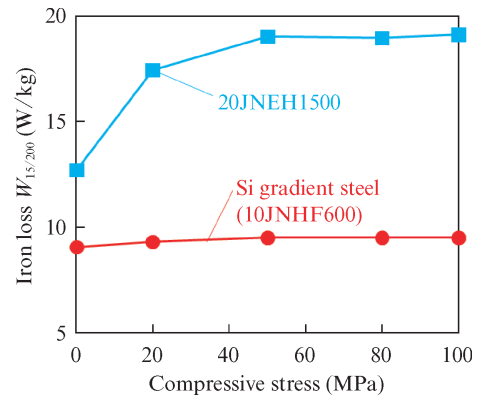
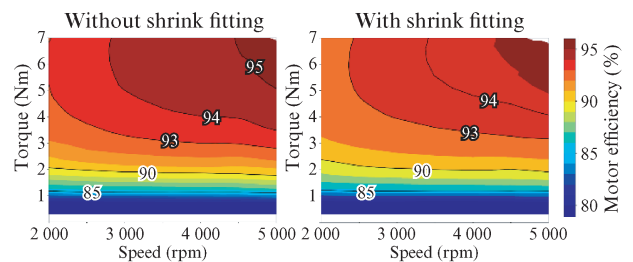
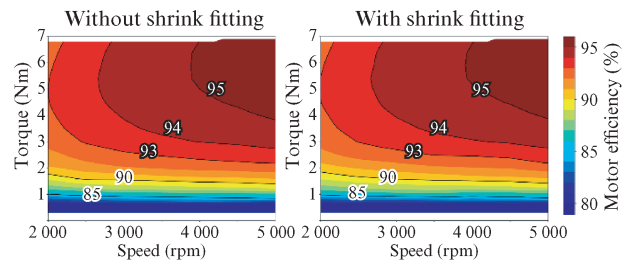


図5 鉄損におよぼす圧縮応力の影響

Fig. 5 Effect of compressive stress on iron loss



(a) 20JNEH1500



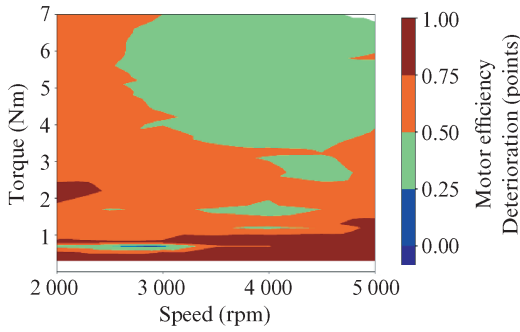
(b) Si gradient steel 10JNHF600

図6 モータ効率マップ評価結果

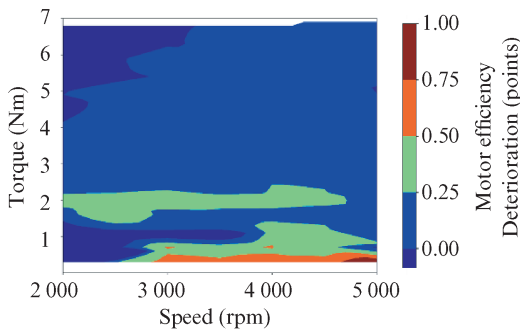
Fig. 6 Results of motor efficiency map evaluation

焼きばめを行うことによるモータ効率の変化は、ほとんど認められなかった。続いて、焼きばめありおよび焼きばめなしの組み立て条件で得られたモータ効率の差分を図 7 に示す。20JNEH1500 では広い領域でモータ効率が低下しており、低負荷トルク領域において最大 1 ポイント程度のモータ効率低下が認められた。低負荷トルク領域ではモータ損失に占める鉄損の割合が大きいため、鉄損増加によるモータ効率への影響が大きいと考えられる。一方、Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 では焼きばめによるモータ効率の低下が 20JNEH1500 と比較して明らかに小さかった。

続いて、焼きばめによって変化したモータ損失を分析するため回転速度 4 000 rpm、トルク 5.0 Nm で駆動したときのモータ損失を鉄損と銅損に分離した結果を図 8 に示す。なお、鉄損は下記 (1) 式により分離した値であり機械損や漏



(a) 20JNEH1500



(b) Si gradient steel 10JNHF600

図7 モータ効率マップの比較

Fig. 7 Comparison of motor efficiency maps

れ磁束による漂遊負荷損などの損失も含まれている。

$$P_{in} - P_{out} = P_{cu} + P_{Fe} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $P_{in}$  はモータへの入力電力、 $P_{out}$  はモータ出力、 $P_{cu}$  は銅損、 $P_{Fe}$  が鉄損であり  $P_{Fe}$  以外は直接的に計測評価される値である。いずれの材料でも銅損は加工方法によらず同等であった。焼きばめによる鉄損の増加挙動は材料により異なっており、20JNEH1500では焼きばめによってモータ鉄損が約14%増加した。一方、Si傾斜磁性材料10JNHF600では焼きばめによる鉄損増加はほとんど認められなかった。図5に示したとおりSi傾斜磁性材料は圧縮応力の影響を受けにくい材料であるためと考えられる。本検討により、Si傾斜磁性材料を用いて作製したモータは、焼きばめによるモータ効率低下や鉄損増加が起きにくいことが確認された。

以上の結果から、Si傾斜磁性材料は圧縮応力の付与による鉄損の増加が小さく、焼きばめによってモータを組み立てても高効率を維持できるため、焼きばめを利用するモータの鉄心材料として好適であると考えられる。

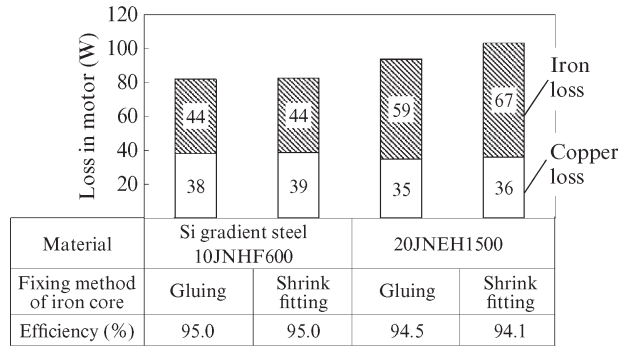


図8 モータ損失の比較

Fig. 8 Comparison of motor loss

### 3. モータ特性におよぼす打抜き加工の影響

本章ではモータ特性におよぼす電磁鋼板の打抜き加工の影響について検討した結果を示す。打抜き加工により電磁鋼板の端面近傍には残留応力が生じることが、放射光を活用した応力解析や数値解析により確かめられている<sup>16,17)</sup>。打抜き加工により導入される残留応力は圧縮の成分が多いため、鉄損増加の一因となる。このような鉄損増加は、材料や加工条件にも依存するが加工端面近傍の領域で生じると考えられる。そのため、ティースの幅が狭い小型モータでは、打抜き加工による鉄損への悪影響が顕在化しやすい。そこで、ドローン用途に用いられるアウターロータ形式の小型SPMモータを対象に電磁鋼板の打抜き加工によるモータ特性変化を評価した。評価対象材料は第2章と同様に20JNEH1500およびSi傾斜磁性材料10JNHF600とした。

#### 3.1 実験方法

打抜き加工による影響を模擬した材料の鉄損評価方法について説明する。図9に示す模式図のとおり、長さ180mmで幅が5mm、7.5mm、10mm、15mm、30mmのサンプル(圧延方向、および圧延直角方向)をせん断加工により作製した。磁気測定用のサンプルは通常30mm幅で加工されるが、幅の狭いサンプルほど加工により導入される残留応力の影響が大きくなる。なお、幅が狭いサンプルは幅方向にサンプルを並べてテープで固定したのち、エプスタイン試験により鉄損を評価した。

次に、モータ評価方法について述べる。評価対象のSPMモータの諸元を表3に示す。評価対象のSPMモータはティース幅が1.5mmの小型モータであり、打抜き加工によるモータ特性への影響が大きいモータであると考えられる。モータ効率におよぼす鉄心加工方法の影響を評価するため、「打抜き加工、カシメ積層」および「ワイヤ放電加工(Wire Electrical Discharge Machining, Wire EDM)、接着積層」の2種類の方法により鉄心を作製し、モータ効率を評価した。なお、カシメはV形状で押し込み深さ0.35mmとし、すべ

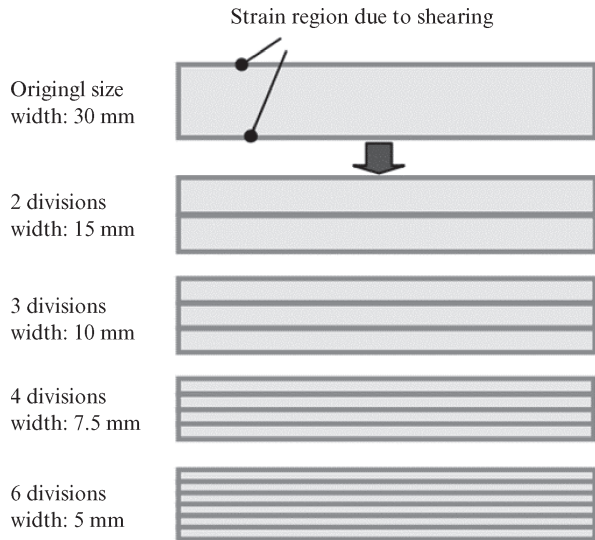


図9 試験片の模式図

Fig. 9 Schematic view of sample

表3 評価SPMモータの諸元

Table 3 Specifications of test SPM motor

Items	Specification
Rated power output	300 W
Input voltage	30 V <sub>dc</sub>
Current limit	20.0 Arms
Current phase angle	0.0 deg
Number of poles/slots	14/12
Outer diameter of stator	35.0 mm
Stacking length	10.2 mm
Winding connection	Three phase star connection, concentrated

でのティースに配置した。図10にSi傾斜磁性材料10JNHF600を使用して製作した鉄心の外観写真を示す。製作した各モータについて、最大回転速度10000rpmまでの各回転速度でモータ効率を評価した。

### 3.2 実験結果および考察

まずエプスタイン試験による鉄損評価結果について述べる。図11に磁気測定サンプルのせん断幅と鉄損の関係を示す。いずれの材料でもサンプル幅が狭いほど鉄損が増加する傾向が認められており、加工により導入される残留応力の影響により鉄損が増加したと考えられる。20JNEH1500では30mm幅サンプルに対し5mm幅サンプルの鉄損は約20%大きかった。一方、Si傾斜磁性材料10JNHF600での鉄損増加は5%以下であり、加工による鉄損の増加が小さいことが分かった。圧縮応力による鉄損増加が小さいSi傾斜磁性材料では、せん断加工によって残留応力が生じてても鉄損への影響が小さいためと考えられる。

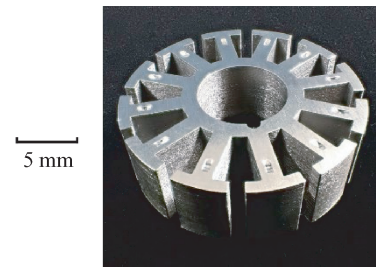


図10 モータ鉄心の外観

Fig. 10 Appearance of motor core

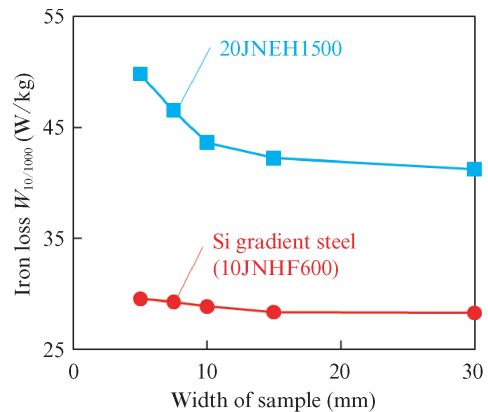


図11 鉄損におよぼすサンプル幅の影響

Fig. 11 Effect of sample width on iron loss

次に、モータ評価結果について述べる。図12にワイヤ放電加工および打抜き加工によるモータ効率マップを示す。20JNEH1500のワイヤ放電加工では85%を超える高効率駆動可能な領域が分布しているが、打抜き加工では認められなかった。すなわち、20JNEH1500では打抜き加工によりモータ効率の低下が認められた。一方、Si傾斜磁性材料10JNHF600はいずれの加工方法でもほぼ同等のモータ効率マップが得られており、加工方法の違いによるモータ効率変化が小さかった。

鉄心加工方法の違いによるモータ損失の変化を比較するため、最大効率条件近傍の回転速度10000rpm、トルク0.1Nmにおけるモータ損失を鉄損と銅損に分離した結果を図13に示す。なお、モータ損失の分離は2.2節と同様の方法で行った。20JNEH1500では、ワイヤ放電加工に対し、打抜き加工におけるモータ鉄損が大きくなった。一方、Si傾斜磁性材料10JNHF600では、ワイヤ放電加工と打抜き加工の鉄損の違いは小さかった。

以上の結果から、Si傾斜磁性材料は打抜き加工による鉄損の増加が小さく、モータの高効率化に有効な材料であることが確認された。加工による鉄損増加の小さいSi傾斜磁性材料は、鉄損におよぼす打抜き加工の影響が顕在化しやすい小型モータ用途の鉄心材料として好適であると考えられる。

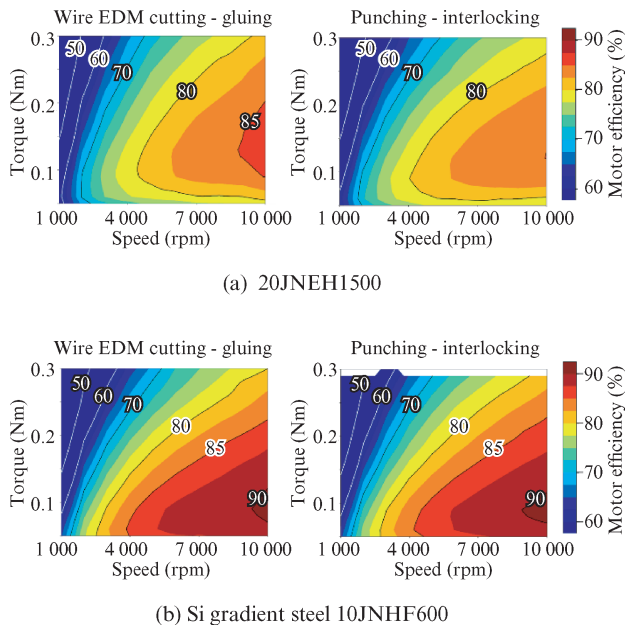


図 12 モータ効率マップ評価結果

Fig. 12 Evaluation results of motor efficiency map

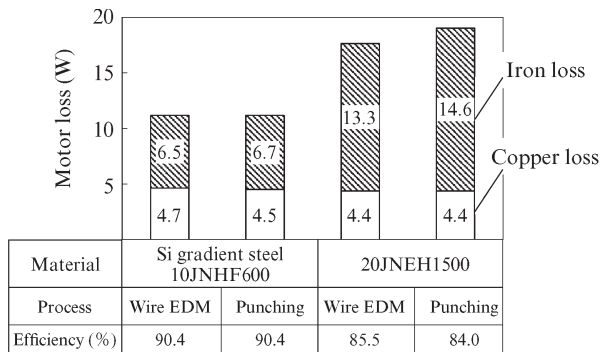


図 13 モータ損失の比較  
Fig. 13 Comparison of motor loss

#### 4. おわりに

本稿では、広域にわたる高精度なモータ評価技術を活用してモータ効率におよぼす電磁鋼板の加工方法の影響について実験的に検証した。また、電磁鋼板の鉄損におよぼす焼きばめや打抜きによる応力の影響を模擬した材料評価を実施した。その結果、一般的な電磁鋼板である 20JNEH1500 では、モータ評価および材料評価の両方で加工による鉄損増加が認められた。また、このような鉄損増加により生じるモータ効率の低下は、低負荷トルク領域で影響が大きいことが広域なモータ特性評価により実証できた。

一方、Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 は、加工による鉄損の増加が小さく、加工方法によらずモータの高効率化に寄与できることが示された。モータ内部の熱をケーシングへ抜熱するために焼きばめを行うモータおよび打抜き加工を行う小型モータでは、電磁鋼板の加工の影響により高効率化が難しいため、加工の影響を受けにくい Si 傾斜磁性材料の活用が期待される。

※JNEH および JNHF は JFE スチールの登録商標です。

#### 参考文献

- 1) Waide, P.; Brunner, C. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. IEA Energy Papers. 2011, 128 p.
- 2) Toda, H.; Senda, K.; Ishida, M. Effect of Material Properties on Motor Iron Loss in PM Brushless DC Motor. IEEE Trans. Magn. 2005, vol. 41, p. 3937-3939.
- 3) 吉沢 克仁. 軟磁性材料の開発動向と展望. まてりあ. 2017, vol. 56, no. 3 p. 186-189.
- 4) 早川 康之. 無方向性電磁鋼板の最近の開発動向. 鉄と鋼. 2020, vol. 106, no. 10, p. 683-696.
- 5) JFE スチールの EV 駆動モータ用電磁鋼板. JFE 技報. 2021, no. 47, p. 82-84.
- 6) Toda, H.; Oda, Y.; Kohno, M.; Ishida, M.; Zaizen, Y. A New High Flux Density Non-Oriented Electrical Steel Sheet and its Motor Performance. IEEE Trans. on Magnetics. 2012, vol. 48, no. 11, p. 3060-3063.
- 7) Toda, H.; Senda, K.; Morimoto, S.; Hiratani, T. Influence of Various Non-Oriented Electrical Steels on Motor Efficiency and Iron Loss in Switched Reluctance Motor. IEEE Trans. on Magnetics. 2013, vol. 49, no. 7, p. 3850-3853.
- 8) 水谷 良治. ハイブリッド自動車モータの技術変遷. IEEJ Journal. 2018, vol. 138, no. 5, p. 288-291.
- 9) 吉崎 聡一郎, 財前 善彰, 大久保 智幸, 尾田 善彦. ドローン用モータの効率に及ぼす打抜き加工の影響. 令和 4 年電気学会産業応用部門大会講演論文集. 2022, ronbun no. 3-66, p. 314-315.
- 10) 吉崎 聡一郎, 千田 邦浩, 財前 善彰, 尾田 善彦. Si 傾斜磁性材料を使用した焼きばめ IPM モータの広域効率評価. 令和 3 年電気学会全国大会講演論文集. 2021, ronbun no. 5-041, p. 74-75.
- 11) 土井 智史, 青木 哲也, 岡崎 恵一, 高橋 康人, 藤原 耕二. 加工残留応力による磁気異方性を考慮した鉄損解析手法の検討. 電気学会論文誌 B. 2018, vol. 138, no. 1, p. 36-44.
- 12) 山口 信一, 大穀 晃裕, 谷 良浩, 田中 敏則, 藤野 千代. 鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータの磁界解析手法. 電気学会論文誌 D. 2015, vol. 135, no. 1, p. 1107-1115.
- 13) Toda, H.; Zaizen, Y.; Namikawa, M.; Shiga, N.; Oda, Y.; Morimoto, S. Iron loss deterioration by shearing process in non-oriented electrical steel with different thicknesses and its influence on estimation of motor iron loss. IEEJ Journal of Industry Applications. 2014, vol. 3, no. 1, p. 55-61.
- 14) 浪川 操, 二宮 弘憲, 山路 常弘, 高周波リアクトル用として優れた磁気性能を有する高 Si 電磁鋼板. JFE 技報. 2005, no. 8, p. 11-16.
- 15) 尾田 善彦, 平谷 多津彦, 笠井 勝司, 大久保 智幸, 千田 邦浩, 千葉 明. Si 傾斜磁性材料の鉄損に及ぼす圧縮応力の影響. 電気学会論文誌 D. 2015, vol. 135, no. 12, p. 1199-1206.
- 16) 福村 勝, 財前 善彰, 大村 健, 千田 邦浩, 尾田 善彦. 打抜き端面形状と残留応力分布のシミュレーション. 塑性と加工. 2018, vol. 59, no. 688, p. 65-70.
- 17) Zaizen, Y.; Omura, T.; Fukumura, M.; Senda, K.; Toda, H. Evaluation of stress distribution due to shearing in non-oriented electrical steel by using synchrotron radiation. AIP Advances. 2016, 055926.