

JFE スチールのモータ特性解析技術

Evaluation and Analysis Method of Motor Characteristics in JFE Steel

戸田 広朗 TODA Hiroaki JFE スチール 電磁鋼板セクター部 主任部員 (副部長)・博士 (工学)
尾田 善彦 ODA Yoshihiko 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)
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 (副課長)

要旨

無方向性電磁鋼板の打抜き・せん断加工時と圧縮応力付与時の鉄損劣化に及ぼす材料因子の影響を検討した。せん断加工時の鉄損劣化率は硬さ、板厚と良い相関を示し、硬さの高い材料および板厚の薄い材料では劣化率が小さかった。それらの材料ではせん断端面でのだれ高さが小さく、鉄損劣化率は材料端面のだれ高さと良い相関を示した。また、試作した埋込磁石型同期モータ (IPMSM) の鉄損測定結果は、打抜きによる電磁鋼板の磁気特性変化を考慮したモータ鉄損計算値とよく一致した。圧縮応力下の鉄損劣化割合は材料の磁歪と良い相関を示し、磁歪がほぼゼロである 6.5% Si 鋼では鉄損の増加は非常に小さかった。6.5% Si 鋼を用いて試作した IPMSM でも、焼きばめによる鉄損増加はほとんど認められなかった。

Abstract:

The influence of material hardness and thickness of non-oriented electrical steel sheets on iron loss deterioration due to punching and shearing process was investigated. The ratio of iron loss deterioration shows a strong correlation with hardness and thickness of the material, and the deterioration ratio is smaller as the increase of material hardness and the decrease of material thickness. The harder and thinner material has a shorter droop height in the sheared edge, and the ratio of iron loss deterioration has a good correlation with the droop height in the sheared edge. The measured iron loss of a model interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) agreed well with the calculated motor iron loss by considering the deterioration of magnetic properties due to punching process. The magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets under compressive stress were also investigated. The deterioration ratio of iron loss under compressive stress decreases with the decrease of material magnetostriction, and 6.5% Si steel sheet of nearly zero magnetostriction showed an extremely low deterioration of iron loss. In the tested IPMSM using 6.5% Si steel, the motor iron loss showed a little change after the heat shrinking.

1. はじめに

無方向性電磁鋼板はモータや発電機などの鉄心材料として広く用いられており、今日の社会を支える重要な軟磁性材料である。近年、エネルギーの効率的利用の観点から、各種モータに対する高性能化と省エネルギー化への要求はますます厳しくなっていて、無方向性電磁鋼板にも、それに応じたさらなる高性能化が求められている¹⁻³⁾。一方、モータの高性能化と高効率化のためには、その特徴に応じた鉄心材料の選択や最適な材料利用も必要と考えられる⁴⁻⁶⁾。

一般的に、モータ鉄心は無方向性電磁鋼板を打抜き加工して製造されるが、その際、打抜き端面近傍に生じる塑性ひずみや弾性ひずみによって電磁鋼板の磁気特性が劣化することが知られている⁷⁻¹¹⁾。したがって、最近では打抜き加工時のひずみを考慮したモータ特性の解析が行なわれている¹²⁾、鉄損とひずみ量の関係は実際の鉄損測定結果に基

づいている。

無方向性電磁鋼板の磁気特性は、通常、JIS C 2552 に準拠し、幅 30 mm、長さ 280 mm のエプスタイン試験片にせん断して、測定、評価されるが、実用モータでのステータのティース幅やヨーク幅は 30 mm より狭い場合が多い。したがって、素材の材料因子が打抜き加工時の鉄損劣化に及ぼす影響を明らかにすることは非常に重要であるが、そのような報告例は少ない^{7,8)}。

近年、モータ鉄損低減のために、素材の高 Si 化などによって比抵抗を高くした材料、あるいは板厚の薄い材料の適用が拡大しつつある¹³⁾。そこで、打抜き加工を模擬したせん断加工によって、無方向性電磁鋼板の鉄損劣化に及ぼす硬さと板厚の影響を検討したので、その結果を第 2 章で報告する¹⁴⁾。

さらに、埋込磁石型同期モータ (Interior permanent magnet synchronous motor: IPMSM) を試作してモータ鉄損測定を行なうとともに、エプスタイン試験片での磁気特性、試作ステータのティース幅やヨーク幅とほぼ同等幅 (10,

5 mm) にせん断した試験片での磁気特性を用いてモータ鉄損を計算し、その計算値に及ぼす加工による磁気特性変化の影響を評価した。その結果について第3章で述べる^{15,16)}。

また、電磁鋼板の磁気特性は一般的に無応力下で測定されているが、エアコンのコンプレッサモータなどではコアを固定するために焼きばめが施されており、電磁鋼板は数10~100 MPa程度の圧縮応力が付与された状態で使用されている¹⁷⁾。その他にも打抜き時の鋼板歩留り向上のために分割コアが使用される場合、鉄心を固定するため焼きばめや圧入が行なわれることも多い。このように電磁鋼板に圧縮応力が付与されると磁気特性が大きく劣化することが知られており、各種の電磁鋼板について圧縮応力下の磁気特性が評価されている¹⁸⁻²⁰⁾。しかし、圧縮応力下での鉄損に及ぼす材料因子の影響に関する報告は少ない²¹⁾。

特に、Siは磁気異方性を低下させるとともに、固有抵抗増加により効果的に鉄損を低減できることから、古くから活用されている元素であり、高グレード電磁鋼板では2~3%程度のSiが添加されている。そこで、Si量をさまざまに変化させた電磁鋼板の圧縮応力特性を調査し、磁歪の観点から検討するとともに、実際にIPMSMを試作して焼きばめ前後の特性を評価したので、その結果について第4章で報告する^{22,23)}。

2. せん断加工時の鉄損劣化に及ぼす無方向性電磁鋼板の硬さと板厚の影響

2.1 実験方法

モータ鉄心の加工は一般的に打抜きで行なわれるが、本検討では打抜きを模擬したせん断加工によって試料を作製した。

硬さの影響を評価する試料は、Si量が異なる素材から、板厚0.35 mm、結晶粒径70 μmの材料を用意した。板厚の影響を評価する試料は、Si 3 mass%の素材から、板厚0.20~0.50 mm、結晶粒径70 μmの材料を用意した(硬さHV0.5: 200一定)。

これらの材料の圧延方向(L方向)と圧延直角方向(C方向)から、幅30 mmと5 mmの試料をクリアランス15 μmのせん断加工により作製した。5 mm幅試料はセロハンテープで張り合わせて30 mm幅にした後、磁気測定をエプスタイン試験法で行ない、L方向とC方向試料の平均値で鉄損($W_{15/50}$)を評価した。せん断加工による鉄損劣化率 ΔW (%)は、30 mm幅試料の鉄損値 W (30 mm)と5 mm幅試料の鉄損値 W (5 mm)を用い、下記の(1)式で算出した。

$$\Delta W(\%) = [W(5\text{ mm}) - W(30\text{ mm})] / W(30\text{ mm}) \times 100 \quad (1)$$

2.2 実験結果および考察

鉄損($W_{15/50}$)劣化率に及ぼす硬さと板厚の影響を図1、2に示す。鉄損劣化率は硬さ、板厚とよい相関があり、硬さの高い材料および板厚の薄い材料では鉄損劣化率が小さいことがわかる。

上記の理由を調べるため、せん断加工端部の硬さ分布をマイクロビッカース硬度計で測定した。得られた硬さ分布は、加工の影響のない部分に対する硬さ増分率(%)で評価した。

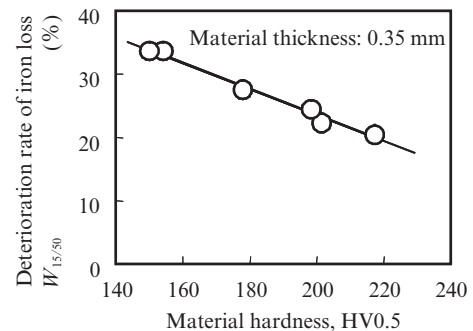


図1 鉄損劣化率に及ぼす硬さの影響

Fig. 1 Influence of material hardness on iron loss deterioration

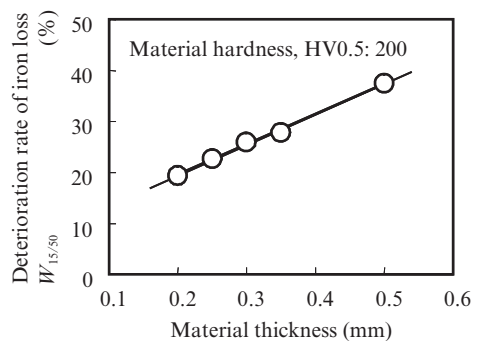


図2 鉄損劣化率に及ぼす板厚の影響

Fig. 2 Influence of material thickness on iron loss deterioration

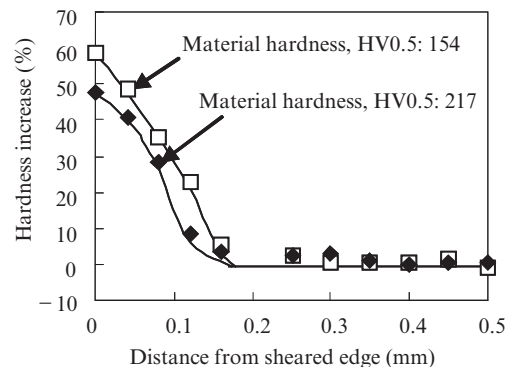


図3 0.35 mm厚で硬さが異なる材料のせん断加工端部付近の硬さ増分率の比較

Fig. 3 Influence of material hardness on distribution of hardness increase near sheared edge of 0.35 mm thickness material

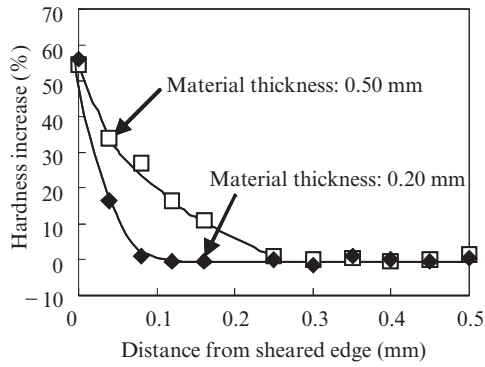
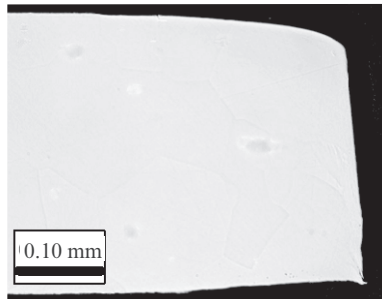
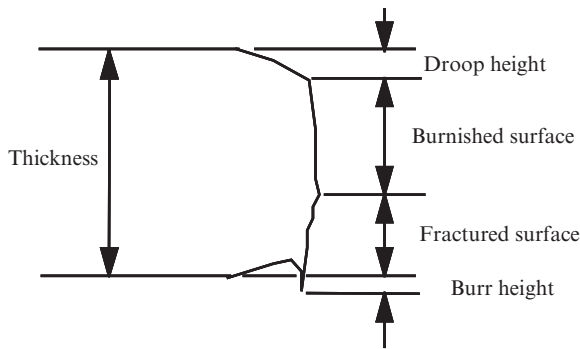


図4 硬さが同じ (HV0.5: 200) で板厚が異なる材料のせん断加工端部付近の硬さ増分率の比較

Fig. 4 Influence of material thickness on distribution of hardness increase near sheared edge for the same hardness (HV0.5: 200) material



(a) Optical microscope image of cross section of sheared edge of 0.35 mm thickness material



(b) Schematic view of cross section of sheared edge

図5 せん断加工端部の光顕観察結果と模式図

Fig. 5 Optical image and schematic view of sheared edge

0.35 mm 厚で素材の硬さが異なる材料 (HV0.5: 154, 217) の結果を図3, 素材の硬さが同じ (HV0.5: 200) で板厚が異なる材料 (0.20, 0.50 mm 厚) の結果を図4に示す。硬さの低い材料と板厚の厚い材料では、せん断端面近傍の硬さ増加領域が広がっていることがわかる。したがって、せん断による塑性変形量が大きいと推定されるため、せん断端面でのだれ高さを測定した。せん断端面の断面観察結果の一例 (0.35 mm 厚材) とせん断端面形状の模式図を図5に示す。図6, 7にだれ高さに及ぼす硬さと板厚の影響を示すが、硬

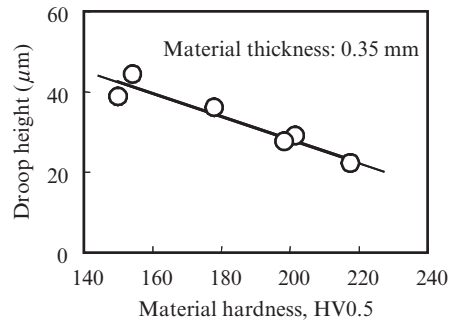


図6 せん断加工部のだれ高さに及ぼす硬さの影響

Fig. 6 Influence of material hardness on droop height

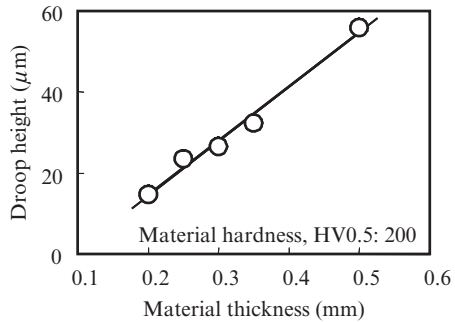


図7 せん断加工部のだれ高さに及ぼす板厚の影響

Fig. 7 Influence of material thickness on droop height

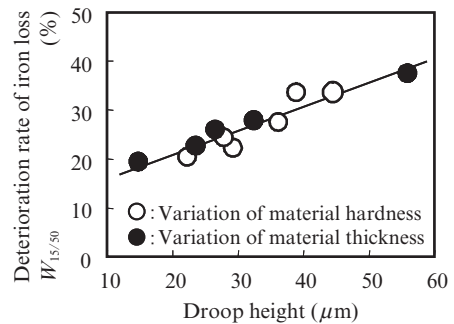


図8 鉄損劣化率に及ぼすせん断加工部のだれ高さの影響

Fig. 8 Influence of droop height on iron loss deterioration

さの低い材料と板厚の厚い材料では、だれ高さが大きいことがわかる。

したがって、だれ高さと鉄損劣化率に関係があると考えられたので、だれ高さと鉄損劣化率 ΔW (%) の関係を調べた。その結果を図8に示す。

この結果から、素材の硬さと板厚に関わらず、両者は良い相関を呈していることがわかる。したがって、だれ高さにより、せん断加工時に付与されるひずみ量の大きさが評価でき、素材の高硬度化や薄板化によって、せん断端面近傍に導入されるひずみ量が小さくなるため、鉄損劣化率が小さくなると考えられる。なお、せん断加工端部の硬さ増加領域は板厚の約半分程度であり、この範囲には塑性ひずみが蓄

積されていると考えられるが、打抜き・せん断加工による磁区構造の変化は、板厚の約2倍程度まで生じていて、塑性ひずみが蓄積されている領域から鋼板内部側にも磁気特性に影響する弾性ひずみが付与されている領域があると報告されている^{9,11)}。それにも関わらず、せん断端面のだれ高さや鉄損劣化率の相関がよかった理由としては、鉄損劣化には塑性ひずみの影響が大きいこと、あるいは、加工による塑性ひずみの大小が弾性ひずみの大小にも反映することが考えられる。今後、これらを明確にするために、応力分布の測定や応力解析計算などの検討が必要と考える。

3. IPMSM の鉄損計算に及ぼす 打抜きによる磁気特性変化の影響

3.1 実験方法

検討に用いた IPMSM の諸元を表 1 に示す。ロータ 12 極、ステータ 18 スロットであり、巻線方式は集中巻である。表 2 にステータ鉄心に用いた材料のエプスタイン試験片での磁気特性を示す（圧延方向と圧延直角方向の平均値）。硬さがほぼ同じで板厚が異なる 5 種類の無方向性電磁鋼板を供試材にした。なお、ステータ鉄心素材の影響を明確にするため、ロータはすべての測定を通じて同一のものを用いた。

ステータは分割コアであり、図 9 に示すように素材の圧延方向（L 方向）がティース径方向と一致するように電磁鋼板を打抜いて使用した。したがって、ヨーク部周方向はほぼ素材の圧延直角方向（C 方向）に対応する。ティース幅

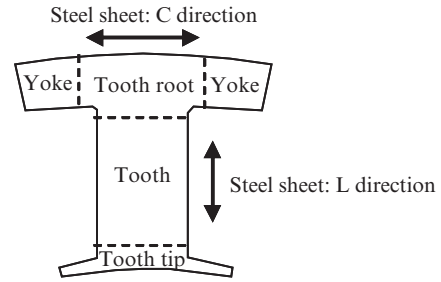


図 9 ステータ分割コアの模式図

Fig. 9 Schematic structure of segmented stator core

が 10 mm、ヨーク幅が 5.4 mm のため、30 mm 幅のエプスタイン試験片から打抜き模擬のせん断加工で 5、10 mm 幅試料を用意し、前章に記したと同様な方法で磁気測定を行なった。

モータ特性の測定は、ステータの温度を 40℃とした後、2500 min⁻¹、1 Nm の条件で特性評価を行なった。駆動方法は 120 度通電矩形波であり、電流位相の進角が 15°（電気角）になるように制御した。モータ損失の分離については、1 次巻線抵抗と電流値からジュール損失を求めて銅損とし、全損失から銅損と機械損（風損を含む）を減じてモータ鉄損とした。

3.2 実験および計算結果と考察

打抜き模擬のせん断加工による電磁鋼板の鉄損劣化率は、前述の (1) 式と同様、30 mm 幅試料（エプスタイン試験片）の鉄損値 W (30 mm) を基準とし、細幅にせん断した後の鉄損を W_i とするとき、 $[W_i - W (30 \text{ mm})] / W (30 \text{ mm}) \times 100$ として評価した。せん断幅が 5、10 mm 時の鉄損劣化率に及ぼす板厚の影響を図 10 に示す。鉄損は一般的な指標の $W_{15/50}$ と高周波鉄損を示す $W_{10/400}$ で評価したが、いずれの場合も板厚が薄い方が鉄損劣化率は小さく、せん断幅が狭い方がその傾向は顕著であることがわかる。

ステータ鉄損は、実測した電流波形を用いて電磁界解析で磁束密度変化を求めた後、下記式に基づいて算出した。

表 1 供試埋込磁石型同期モータ (IPMSM) の諸元

Table 1 Specifications of tested model interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM)

Item	Specification
Stator outer diameter	156 mm
Stator inner diameter	105.2 mm
Stator teeth width	10 mm
Stator yoke width	5.4 mm
Rotor outer diameter	104.6 mm
Rotor inner diameter	40 mm
Air gap	0.3 mm
Stack length	25 mm
Winding	3φStar-Connection

表 2 供試材料の磁気特性

Table 2 Magnetic properties of tested samples

Symbol	Thickness (mm)	Iron loss, $W_{15/50}$ (W/kg)	Iron loss, $W_{10/400}$ (W/kg)	Magnetic flux density, B_{50} (T)	Hardness, HV0.5 (T)	Grain size (μm)
A	0.20	1.97	11.3	1.69	195	86
B	0.25	1.87	12.7	1.70	194	95
C	0.30	2.06	15.0	1.70	191	88
D	0.35	2.14	17.0	1.71	193	92
E	0.50	2.57	25.3	1.72	193	85

(Tests were conducted by using 30 mm width Epstein samples (L + C) as sheared.)

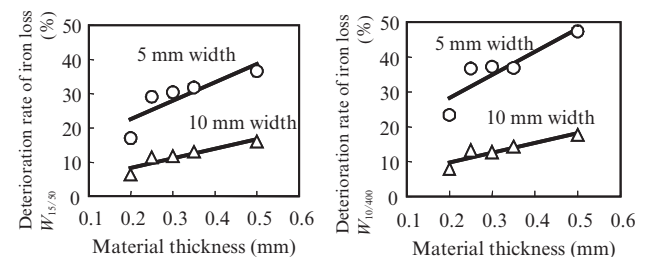


図 10 鉄損劣化率 (L+C 平均) に及ぼす板厚とせん断幅の影響 (L+C 平均: 圧延方向と圧延直角方向の平均値)

Fig. 10 Influence of material thickness on iron loss deterioration for the sheared width of 5 and 10 mm samples (L + C)

表3 ステータ鉄損計算に用いる材料データ

Table 3 Material data applied in iron loss calculation

Condition	Data of Magnetization curve	Data of loss constants
X	30 mm Width sample	30 mm Width sample
Y	30 mm Width sample	5 and 10 mm Width samples
Z	5 and 10 mm Width samples	5 and 10 mm Width samples

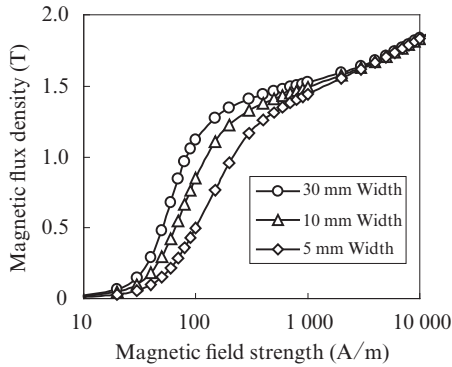


図11 素材Cの磁化曲線 (L+C 平均) に及ぼすせん断幅の影響 (L+C 平均: 圧延方向と圧延直角方向の平均値)

Fig. 11 Influence of sheared width on magnetization curve of material C (L + C)

$$P_t = k_h f B_m^\alpha K(B_m) + (\sigma/12)(d^2 f / \delta) \int_{1/f} (dB/dt)^2 dt + k_e f \int_{1/f} |dB/dt|^{1.5} dt \dots\dots\dots (2)$$

$$K(B_m) = 1 + (0.65/B_m) \Sigma \Delta B_i \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ΔB_i はマイナーループ内での磁束密度の変化、 B_m は磁束密度の最大値、 f は周波数を示す。 σ 、 δ 、 d は各々、鋼板 (鉄心) の電気伝導度、質量、板厚を表す。また、 k_h と α はヒステリシス損係数、 k_e は異常渦電流損係数である。回転磁界による鉄損は、モータの周方向と径方向別に鉄損を算出した後、両者を足し合わせることで求めた。

上記の鉄損係数および磁化曲線 (B - H 曲線) は、30 mm 幅のエプスタイン試験片、およびステータ形状幅とほぼ同じ試料幅 (10, 5 mm) の試片から求め、各々の結果を表3に示すように用いた。一例として素材Cの場合に、せん断幅の違いが磁化曲線に及ぼす影響を図11に示すが、せん断幅が狭くなると、低磁場から中磁場にかけての磁束密度の低下が顕著であることがわかる。したがって、鉄損のみではなく磁化曲線の影響を調べるために、上記条件での計算を行った。

また、モータ形状と電磁鋼板の打抜き方向を考慮して、いずれの場合もティース部にはL方向、ヨーク部にはC方向、ティース先端部とティース根元部にはL+C平均の磁気特性を入力して計算した。

なお、IPMSMのロータ鉄損は、モータ鉄損の約10%未満

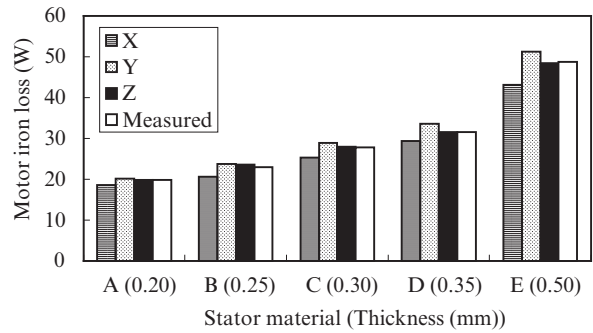


図12 モータ鉄損計算値と測定値の比較

Fig. 12 Comparison of calculated and measured motor iron loss

であり、かつそのほとんどは渦電流損で、ヒステリシス損は無視できると報告されている²⁴⁾。そこで、(2) 式中の渦電流損 (右辺の第2,3項) のみを計算してロータ鉄損とした。

モータ鉄損計算値と実測値の比較を図12に示す。条件Xの計算値は測定値より過小、条件Yの計算値は測定値より過大、条件Zの計算値は測定値とほぼ等しいことがわかる。

また、過小、過大の傾向は板厚の厚い材料ほど顕著であり、その理由は、板厚の厚い材料ほど細幅に打抜き、せん断した際の磁気特性変化が大きいためと考えられる。

したがって、モータ鉄損計算の精度向上には、実際のモータ形状に即した試料幅の磁化曲線や鉄損値を用いることが重要であることがわかる。板厚の厚い電磁鋼板ほど、エプスタイン試験片での磁気特性とそれより細幅に打抜いた際の特性の違いが大きいため、前者を計算に用いると真のモータ鉄損との差は大きくなる。

4. 圧縮応力下の鉄損に及ぼすSi量の影響

4.1 実験方法

Si量が0.4~5.5 mass%の鋼を実験室にて真空溶解し、インゴットにした。本インゴットを1100°Cで30分間加熱し、熱間圧延により板厚2.0 mmの熱間圧延鋼板を得た。熱間圧延鋼板に900°C×30 sの熱間圧延鋼板焼鈍を施した後、板厚0.20 mmまで冷間圧延し、20% H₂-80% N₂ 雰囲気中にて1000°C×10 sの仕上焼鈍を施した。また、磁歪がゼロの材料を作製するため、3.5% Si鋼の板厚0.10 mmの冷間圧延鋼板を作製し、実験室にてSiCl₄ ガス中にて1200°Cで浸珪処理を行ない、さらに1100°Cで拡散焼鈍を行なうことにより6.5% Si鋼を作製した。これらの材料から幅30 mm、長さ180 mmの単板試料を圧延方向が長手方向となるように切り出した。磁気測定には縦型ダブルヨーク式の単板試験器を用い、電力計法により鉄損を計測した。圧縮応力は試料の長手方向に付与し、同一方向の鉄損を測定した。この際、圧縮時の試料の座屈を防止するため、板厚方向に0.03 MPaの圧縮応力を加えた。なお、本章中では圧縮応力とは磁化方向に加えた応力を指すこととする。また、磁歪は圧延方向

に 400 Hz にて 1.0 T まで励磁した場合の peak to peak 値をレーザードップラー式磁歪測定器により測定した。

4.2 実験結果および考察

図 13 に Si 量を 0.4%~6.5% まで大きく変化させた材料の鉄損の応力依存性を示す。ここでは、一符号で圧縮応力を示した。これより、いずれの材料も圧縮応力により鉄損は増加するが、6.5% Si 鋼では鉄損増加は非常に小さいことがわ

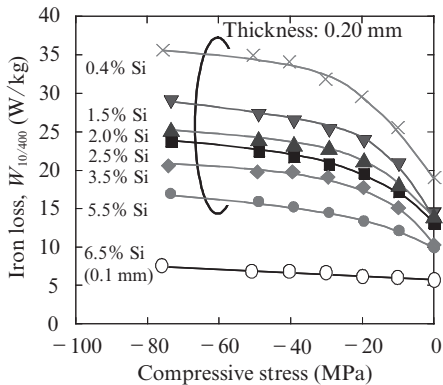


図 13 鉄損に及ぼす圧縮応力の影響

Fig. 13 Effect of compressive stress on iron loss

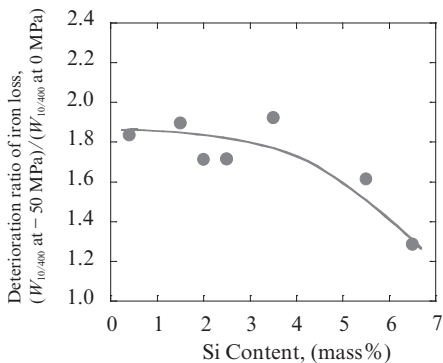


図 14 鉄損劣化率に及ぼす Si 量の影響

Fig. 14 Effect of Si content on deterioration ratio of iron loss

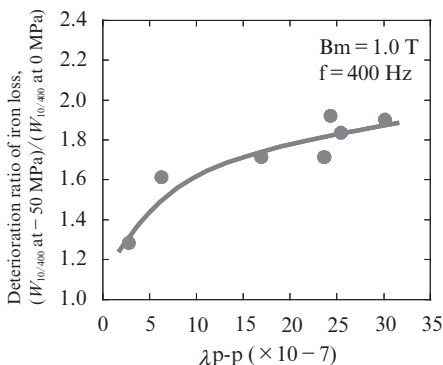


図 15 鉄損劣化率に及ぼす磁歪の影響

Fig. 15 Effect of magnetostriction on deterioration ratio of iron loss

かる。ただし、6.5% Si 鋼の板厚は 0.1 mm であり、他とは異なる。そこで、以下の (4) 式で定義する鉄損劣化割合で評価を行なった。

$$\text{鉄損劣化割合} = \frac{\text{圧縮応力 50 MPa 下の鉄損}}{\text{無応力下の鉄損}} \dots\dots\dots (4)$$

図 14 に磁束密度 1.0 T, 周波数 400 Hz における鉄損劣化割合の Si 量依存性を示す。Si が 0.4~3.5% の範囲では圧縮応力付与による鉄損劣化割合はほぼ一定であり、それ以上の Si 量で劣化割合が低下していることがわかる。

Si 量増加により変化する電磁鋼板の物理量として固有抵抗、結晶磁気異方性、磁歪などがある。これらの内、Si 量が 3.5% 以上で急激に変化するものとして磁歪があり、図 14 の鉄損劣化割合の Si 量依存性は磁歪変化に対応したものではないかと考えられる。そこで、各材料の磁歪を測定し、磁歪と圧縮応力下の鉄損劣化の関係を調査した。

図 15 に鉄損劣化割合を磁歪で整理した結果を示す。これより磁歪 $\lambda p-p$ と鉄損劣化割合とは良い相関があり、磁歪を低減することにより圧縮応力付与による鉄損劣化を抑制することが可能になることがわかる。

4.3 低磁歪材料によるモータ評価結果

4.2 節の検討において圧縮応力下の鉄損劣化を抑制するためには、材料の磁歪を低減することが効果的であることが明らかとなった。上述したように 6.5% Si 鋼は磁歪が非常に小さく、圧縮応力付与による鉄損劣化が小さいことから、焼きばめなどの圧縮応力が加わるモータに 6.5% Si 鋼を適用すると、焼きばめ劣化することなく、素材本来の磁気特性を発揮すると考えられる。

そこで、モータ特性に及ぼす低磁歪材の効果を確認するため、6.5% Si 鋼 (0.1 mm 厚) および比較として 3% Si 鋼 (0.2 mm 厚) を用いて、図 16 に示す 8 極、12 スロット、積み厚 25 mm のコアをワイヤークットにより加工し、定格出力 0.3 kW の IPMSM を作製した。

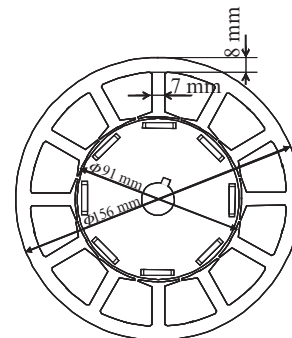


図 16 供試埋込磁石型同期モータ (IPMSM) の模式図

Fig. 16 Schematic diagram of tested interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM)

表 4 各材料のモータ鉄損測定値の比較

Table 4 Comparison of motor iron loss of tested materials

Material	Thickness (mm)	Heat-shrinking	Motor iron loss (W)
3.0% Si	0.2	Before	21.78
		After	27.41
6.5% Si	0.1	Before	10.27
		After	10.53

外部駆動により 5000 min^{-1} で本モータを回した場合の無負荷トルクを、トルクメータを用いて測定し、無負荷トルクからモータ損失を求め、機械損を差し引くことにより焼きばめ前の無負荷鉄損を求めた。その後、ステータをアルミニウム合金製のケースに焼きばめ代 $30 \mu\text{m}$ で焼きばめ、焼きばめ後の無負荷鉄損を測定した。

焼きばめ前後の無負荷鉄損測定結果を表 4 に示す。磁歪の大きい 3% Si 鋼では、焼きばめによりモータ鉄損は約 2 割増加した。一方、磁歪がほぼゼロである 6.5% Si 鋼では、焼きばめによる鉄損劣化がほとんど認められなかった。

以上の結果から、圧縮応力下の鉄損劣化を抑制するためには電磁鋼板の磁歪を低減するのが効果的であることが明らかになった。特に磁歪がほぼゼロになる 6.5% Si 鋼では圧縮応力付与による鉄損劣化はほとんど認められないことから、今回実験を行なった範囲内の電磁鋼板では、焼きばめなどの圧縮応力が加わるモータ用材料として最適であるといえる。

5. おわりに

モータ設計の高精度化には、モータ製造工程に付随する加工や組み立て時の鉄心の磁気特性劣化を把握すること、モータ効率向上には、その際の劣化量を低減することが必要である。その観点に基づき、本論文では下記を明らかにした。

- (1) せん断・打抜き加工時の鉄損劣化抑制には、無方向性電磁鋼板の高硬度化や薄板化、すなわち高グレード電磁鋼板の適用が有効である。
- (2) 打抜きままの電磁鋼板を鉄心素材として用いる場合、磁界解析を用いたモータ鉄損計算の精度向上には、実際のモータ形状を反映した鉄損と磁化曲線を適用することが必要である。
- (3) 圧縮応力下の鉄損劣化割合は磁歪と相関があり、磁歪を低減することにより、鉄損劣化を抑制することが可能になる。磁歪がほぼゼロである 6.5% Si 鋼では、圧縮応力付与による鉄損増加は非常に小さく、焼きばめモータでもそのことを確認した。

参考文献

- 1) Oda, Y.; Kohno, K.; Toda, H. "Recent Development of Non-oriented Electrical Steel Sheet for Automobile Electric Devices." Proc. 4th International Conference Magnetism and Metallurgy (WMM10). Freiberg, Germany, 2010, p. 299-309.
- 2) 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. Magn. 2012, vol. 48, p. 3060-3063.
- 3) Wajima, K.; Marukawa, Y.; Toda, H.; Ichihara, C.; Kosaka, T. "Recent Technical Trends in Magnetic Materials." Proc. 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014). Hiroshima, Japan, 2014, p. 1984-1989.
- 4) Honda, A.; Kawano, M.; Ishida, M.; Sato, K.; Komatsubara, M. "Efficiency of Model Induction Motor Using Various Non-Oriented Electrical Steels." J. Mater. Sci. Technol. 2000, vol. 16, p. 238-243.
- 5) 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.
- 6) 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. Magn. 2013, vol. 49, p. 3850-3853.
- 7) Schoppa, A.; Schneider, J.; Wuppermann, D. C. "Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels." J. Magn. Mater. 2000, vol. 215-216, p. 74-78.
- 8) Rygal, R.; Moses, J. A.; Derebasi, N.; Schneider, J.; Schoppa, A. "Influence of cutting stress on magnetic field and flux density distribution in non-oriented electrical steels." J. Magn. Mater. 2000, vol. 215-216, p. 687-689.
- 9) 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, p. 241-246.
- 10) Kurosaki, Y.; Mogi, H.; Fujii, H.; Kubota, T.; Shinozaki, M. "Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets." J. Magn. Mater. 2008, vol. 320, p. 2474-2480.
- 11) Kaido, C.; Mogi, H.; Fujikura, M.; Yamasaki, J. "Punching Deterioration Mechanism of Magnetic Properties of Cores." 電気学会論文誌 A. 2008, vol. 128, p. 545-550.
- 12) 柏原義之, 藤村浩志, 岡村一男, 今西憲治, 屋敷裕義. "電磁鋼板の打抜き加工による磁気特性劣化量の推定技術の開発." 電気学会論文誌 A. 2011, vol. 131, p. 567-574.
- 13) Okubo, T.; Hiratani, T.; Toda, H.; Oda, Y. "Recent Development of High Silicon Electrical Steel Sheet." Proc. 6th International Conference Magnetism and Metallurgy (WMM14). Cardiff, UK, 2014, p. 157-167.
- 14) 財前善彰, 戸田広朗, 尾田善彦, 千田邦浩, 福村勝. "電磁鋼板のせん断加工による鉄損劣化に及ぼす硬度, 板厚の影響." 平成 25 年電気学会全国大会. 2013, 2-148.
- 15) 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 Thickness and Its Influence on Estimation of Motor Iron Loss." IEEE J. Ind. Appl. 2014, vol. 3, p. 55-61.
- 16) 戸田広朗, 財前善彰, 浪川操, 森本茂雄. "IPMSM の鉄損計算に及ぼす打ち抜きによる電磁鋼板の磁気特性変化の影響." 平成 26 年電気学会全国大会. 2014, 5-020.
- 17) 山本健一, 霜村英二, 山田一夫, 佐々木堂. "電動機鉄心の磁気特性に及ぼす外部応力の効果." 電気学会論文誌 A. 1997, vol. 117, p. 311-316.
- 18) Lobue, M.; Sasso, C.; Basso, V.; Fiorillo, F.; Bertotti, G. "Power losses and magnetization process in Fe-Si non-oriented steels under tensile and compressive stress." J. Magn. Mater. 2000, vol. 215-216, p. 124-126.
- 19) 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." 応用磁気学会誌. 2006, vol. 30, p. 196-200.
- 20) Miyagi, D.; Miki, K.; Nakano, M.; Takahashi, N. "Influence of Compressive Stress on Magnetic Properties of Laminated Electrical Steel Sheets." IEEE Trans. Magn. 2010, vol. 46, p. 318-321.

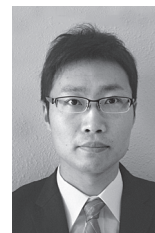
- 21) 千田邦浩, 藤田明, 本田厚人, 黒木直樹, 八木正昭. “無方向性電磁鋼板の応力下での磁気特性と磁区構造.” 電気学会論文誌 A. 2011, vol. 131, p. 884-890.
- 22) 尾田善彦, 戸田広朗, 志賀信勇, 笠井勝司, 平谷多津彦. “電磁鋼板の圧縮応力下の鉄損に及ぼす Si 量の影響.” 電気学会論文誌 A. 2014, vol. 134, p. 148-153.
- 23) Oda, Y.; Toda, H.; Shiga, N.; Kasai, S.; Hiratani, T. “Effect of Si Content on Iron Loss of Electrical Steel Sheet Under Compressive Stress.” IEEE Trans. Magn. 2014, vol. 50, issue 4, article no. 2002304.
- 24) 山崎克己, 瀬戸嘉朗, 谷田誠. “キャリア高調波を考慮した IPM モータの鉄損解析.” 電気学会論文誌 A. 2005, vol. 125, p. 758-766.



戸田 広朗



尾田 善彦



財前 善彰