

Improvement of Motor Performance by Use of High-Efficiency Electrical Steels



石田 昌義
Masayoshi Ishida
技術研究所
電磁鋼板研究部門 主任研究員(課長)・理博



志賀 信男
Nobuo Shiga
技術研究所
電磁鋼板研究部門 主任研究員(主席掛長)



定廣 健一
Kenichi Sadahiro
技術研究所
電磁鋼板研究部門 主任研究員(主席掛長)

要旨

電気自動車やハイブリッド自動車用駆動モータとして使用されることの多い代表的モータ種であるブラシレス DC モータと誘導モータの性能、特にモータ効率に及ぼす鉄心材特性の影響を調査した。希土類磁石を使用した集中巻タイプのブラシレス DC モータの効率は鉄心材の 400 Hz における鉄損によって予測できる。このブラシレス DC モータに低鉄損高磁束密度電磁鋼板 RMHE を用いることにより、従来材と同一トルク定数の条件下で 0.5~1.0% 高い効率を得た。3 相誘導モータにおいては鉄心材の磁束密度 B_m が高い RMA を使用することにより高効率を得ることができる。また、探針法を用いた局所磁気特性測定法により、モータ鉄心における局所磁界強度・磁束密度・鉄損の分布における材料間の差異を明らかにした。

Synopsis:

The influence of the properties of core materials on the performance of a brushless DC motor and an induction motor, which are representative types often used as drive motors for electric and hybrid vehicles. The efficiency of the brushless DC motor of concentrated winding type can be estimated by the core material iron loss at 400 Hz. By using low-core-loss high-flux-density electrical steels RMHE for this brushless DC motor, efficiencies 0.5~1.0% higher than conventional materials were obtained with equivalent torque constants. In the three-phase induction motor, high efficiencies were obtained by using RMA having higher magnetic flux densities. The difference between materials in the distribution of local magnetic field strength, magnetic flux density and core loss in motor cores were clarified by local magnetic properties measurement using a contact probe method.

1 緒 言

電磁鋼板は、自動車産業において各種のモータ・アクチュエータ・変圧器などの自動車部品に用いられ、また製造ラインではサーボモータをはじめとして多くのモータが用いられており、これらの鉄心材料としても重要な位置を占めている。一方では、省エネルギー、省資源、地球環境保全への観点から¹⁾、電気自動車、ハイブリッド自動車が実用化され、急速に台数を伸ばすとともに、数多くの方式が開発されている^{2,3)}。

これらの駆動用に用いられる高効率モータをはじめとする各種のモータに対する高性能化・省エネルギーへの要求は、近年ますます厳しくなっている⁴⁾。鉄心材料である無方向性電磁鋼板に対してもこの目的に適した特性の改善が強く求められ、近來大きな進歩を見せている⁵⁻⁹⁾。このような各種モータのさらなる性能改善のためにはモータの特徴に合った鉄心材料の選択と材料設計、材料利用のための最適化技術が今後重要性を増していくと考えられる。

本稿では、特に電気自動車、ハイブリッド自動車用の駆動モータ

など、高効率モータの高性能化に適した電磁鋼板の最適適用を目的として、モデルモータによる電磁鋼板評価技術について述べる。

2 モデルモータによる電磁鋼板の評価法

誘導モータの効率に及ぼす鉄心材料の影響に関しては、正弦波駆動された単相誘導モータ¹⁰⁾、またインバータ駆動された 3 相誘導モータ¹¹⁾の効率に対して、設計条件により Si 含有量などの最適素材条件が変化することが明らかにされている。一方、ブラシレス DC モータでは、同一の体格では誘導モータに比べて銅損の大幅な低減が期待できるため¹²⁾、鉄心材料に要求される最適特性条件が誘導モータとは異なると考えられる。以下に、ブラシレス DC モータと誘導モータの特性、特にモータ効率と鉄損、磁束密度などの素材磁気特性との関連を調査した結果を述べる。

調査方法としては、種々の無方向性電磁鋼板を用いて各モータモデルのステータ鉄心を作製し、モータ特性に及ぼす鉄心材料特性の影響を調査した¹³⁾。

ステータ鉄心材料としては JIS 規格材 RM¹⁴⁾、垂直焼鈍後低鉄損高磁束密度材 RMA¹⁵⁾および低鉄損高磁束密度材 RMHE¹⁶⁾を用いた垂直焼鈍後の各試料の 1.5 T、50 Hz における鉄損 W_{Fe} および

* 平成14年4月30日原稿受付

Table 1 Magnetic properties of used stator core materials

Material	$W_{10/400}$ (W/kg)	B_{50} (T)
35RM1HE250	2.07	1.71
35RM1HE300	2.38	1.73
50RM1HE300	2.40	1.71
50RM1HE350	2.64	1.73
35RMA250	2.36	1.72
50RMA350	3.17	1.76
35RM300	2.39	1.68
50RM230	2.16	1.67
50RM400	2.86	1.71
50RM1300	5.16	1.77

Tests made on 25 cm Epstein samples (L-C) after stress relief annealed at 750°C for 2 h in N_2

Table 2 Specifications of tested brushless DC motor

Motor type	Surface permanent magnet type brushless DC motor
Rated power	300 W
Input voltage	48 Vdc
Stator dimensions	$\phi 178$ (OD) $\times \phi 75$ (ID) $\times 23$ (H) mm
Number of slots	12
Rotor dimensions	$\phi 74$ (OD) $\times 23$ (H) mm
Number of poles	8
Winding	3-phase star connection, 4 coils/phase

Table 3 Specifications of tested induction motor

Motor type	Inverter-driven induction motor
Rated power	400 W
Rated input voltage	120 V
Stator dimensions	$\phi 140$ (OD) $\times \phi 84$ (ID) $\times 66$ (H) mm
Number of slots	36
Rotor dimensions	$\phi 83$ (OD) $\times 66$ (H) mm
Number of poles	6
Winding	3-phase star connection

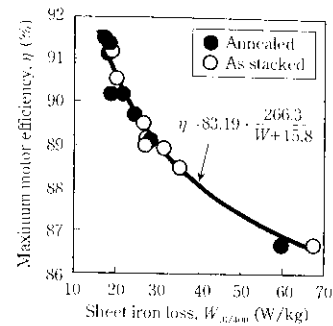
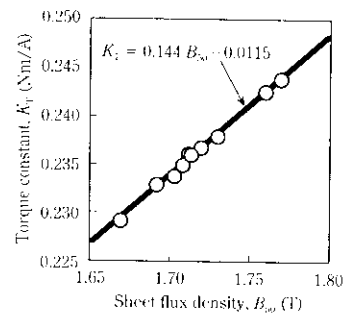
5000 A/m における磁束密度 B_{50} を Table 1 に示す。測定には圧延方向および圧延直交方向に平行に剪断したエプスタイン試験片を用い、JIS¹⁹⁾に準拠して測定した。

ステータの寸法・形状は機種ごとに一定とし、ロータはすべての測定を通じてそれぞれ同一のものを用いた。

用いたブラシレス DC モータの諸元を Table 2 に示す。供試ブラシレス DC モータには市販のブラシレス DC モータおよびその駆動回路系を用いた。定格出力は 300 W、ロータは希土類磁石表面型 (8 極) である。テストモータの駆動電圧を PWM ハルス幅によって調整し、一定の無負荷回転数に設定した後、負荷モータによりトルクを印加して回転数スweepによりモータ特性を測定した。

誘導モータの諸元を Table 3 に示す。供試モータとしては、定格出力 400 W の 3 相インバータ駆動モータを用い、PWM 波形は基本周波数の 40 倍の周波数のキャリア波形により発生させた。一定の無負荷回転数に設定した後、トルクを印加して回転数スweepによりモータ特性を測定した。

モータ特性としては、モータ効率、トルク-回転数特性などを測定したほか、損失分析²⁰⁾を行った。

Fig. 1 Relation between maximum motor efficiency of a brushless DC motor and sheet iron loss $W_{10/400}$ Fig. 2 Relation between torque constant of a brushless DC motor and sheet flux density B_{50}

3 ブラシレス DC モータにおける電磁鋼板の評価

3.1 モータ特性に及ぼす電磁鋼板特性の影響

無負荷回転数 2000 rpm から負荷トルクを増加させるスweepの過程で測定したモータ効率の最大値と、1.0 T、400 Hz における鉄損 $W_{10/400}$ (リング試料測定値) の関係を Fig. 1 に示す。ここでは、未焼鈍の素材による測定データも付加している。最大効率は歪取焼鈍の有無にかかわらず、また鉄心材の磁束密度 B_{50} によらず、 $W_{10/400}$ によってほぼ一意的に決定されることが分かる。

この関係は次の実験式でよく表現される¹⁹⁾。

$$\eta = 83.19 + 266.3 / (W + 15.8) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 η は最大効率 (%), W は素材鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg) を表す。

最大効率となる条件での回転数は 1300~1500 rpm であり、これに対応する同期周波数は 100 Hz 程度であることを考えれば、比較的高周波の鉄損によってモータの効率が決定されていたといえる。このようにモータ効率が高周波の鉄損により支配される原因としては、鉄心内部に発生する磁束における高調波の影響が考えられている¹⁹⁾。

数種の素材を鉄心に用いたモータのトルク-電流曲線からトルク定数を求め、素材 B_{50} に対してプロットすると Fig. 2 を得る。 B_{50} が高い素材ほどトルク定数が増加する傾向が明らかである。

トルク定数と素材 B_{50} との関係は次の 1 次式でよく表現される¹⁹⁾。

$$K_T = 0.144 B - 0.0115 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 K_T はトルク定数 (Nm/A), B は素材磁束密度 B_{50} (T) である。

モータ効率に対しては素材磁束密度の影響は小さいが、トルク特

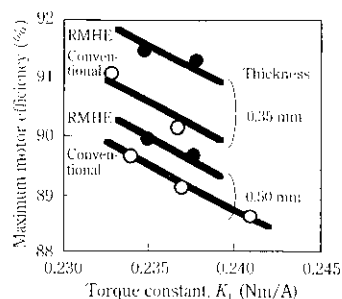


Fig. 3 Relation between maximum motor efficiency and torque constant

性に対しては素材磁束密度の効果が明らかに現れているといえる。

次に、モータ鉄心に適用した場合の鉄心材料の特徴を明らかにするために、最大モータ効率とトルク定数の関係を Fig. 3 に示す。ここでは焼鈍後の鉄心に関するデータのみを示し、RMHE とそれ以外の材料を別にプロットした。同レベルのトルク定数で見ると、RMHE はモータ効率が他の材料よりも高い値を示すことが分かる。この材料による効率の向上は板厚に依存し、0.50 mm 厚材では 0.5% (効率百分率の差) 程度であるのに対し、0.35 mm 厚材では 1% 近い向上を示す。また、同一効率条件でトルク定数の値を見ると、RMHE が、0.35 mm 厚材では約 3% (従来材に対する増分比)、0.50 mm 厚材でも約 1.5% 大きい値を示す。この結果から、RMHE を使用することによって、モータ効率とトルク特性を同時に改善することが可能であるということが出来る。

3.2 効率マップによる電磁鋼板の比較

モータが使用される回転速度・トルク・出力などの条件は多種多様であり、また同一のモータであってもこれらの条件は運転の状態により大幅に変化する。したがって、使用条件に適合した材料の選択に供するためには、駆動条件を変数としたマップの形でモータ特性を表現することが望ましい。以下では、回転数・トルクを変数とした特性マップを用いて、モータ鉄心に適用した際の各種電磁鋼板の特徴を説明する。

Fig. 4 には 5 種類の材料を鉄心に用いたブラシレス DC モータ (いずれも鉄心焼鈍後) の効率マップを示す。汎用材の 50RM1300 (e) と比較すると、50RM400 (d)、さらに 50RM230 (c) と材料の鉄損を減少させるとともに、モータ効率が全体的に向上することが明らかである。35RMA250 (b) では特に高トルクにおいて高効率の領域が広がることが特長である。35RMHE250 (a) ではさらに全体的に高効率の領域が広がり、すべてのトルク・回転数範囲で最も高効率となる。したがって、35RMHE250 は高トルクおよび高速運転時の性能が重視される自動車駆動用モータには最も適しているといえる。

3.3 鉄損および銅損マップによる電磁鋼板の比較

一定出力におけるモータ効率は

$$\text{モータ効率} = \text{出力} / (\text{出力} + \text{損失}) \dots \dots \dots (3)$$

で表されるため、損失の分析が重要となる。モータにおける損失は銅損、鉄損、機械損、漂遊負荷損などに分類される。しかし、鉄損、機械損、漂遊負荷損の実験的分離は必ずしも容易ではないため、ここでは全損失から実験的に求められる銅損を除いた残部を広義の鉄損として損失分析を試みる。無負荷回転における機械損は表示した範囲では鉄損に比べて小さいことが確認されている。

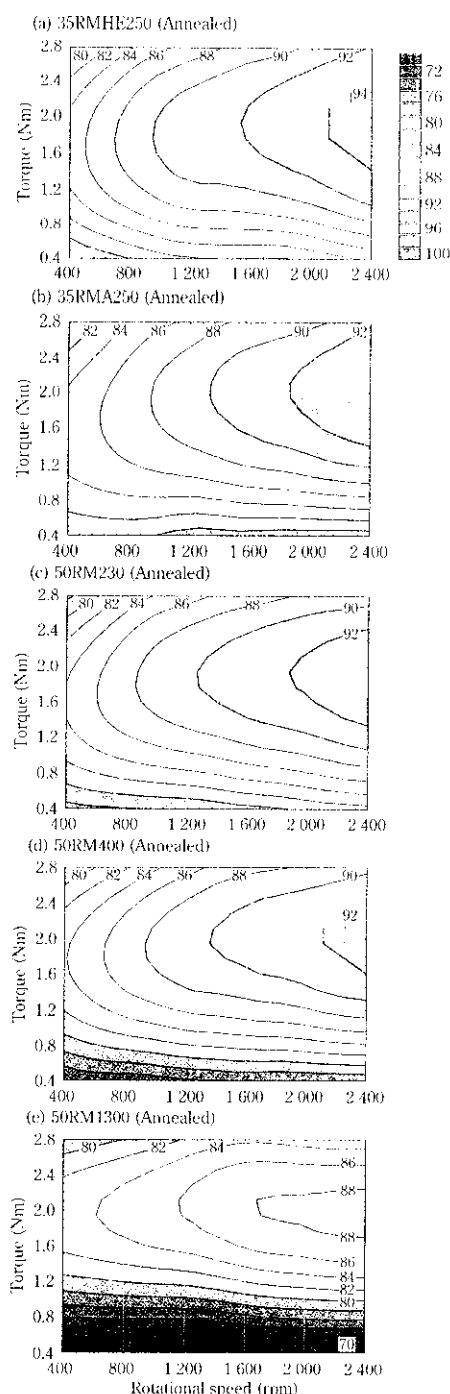


Fig. 4 Efficiency maps of brushless DC motors using (a) 35RMHE250, (b) 35RMA250, (c) 50RM230, (d) 50RM400, and (e) 50RM1300 (all annealed) as core material

一例として、50RM400 を用いたブラシレス DC モータ (鉄心焼鈍後) の全損失の回転数・トルク平面におけるマップ表示を Fig. 5 に示す。高速回転・高トルクとなるにしたがって損失は増加する傾向を示す。

次に、同じモータにおける銅損と鉄損を分離した結果を Fig. 6 に示す。図示した範囲内では、銅損はほとんど回転数に依存せず、トルクとともに増加する傾向を示す。一方、鉄損は回転数とともに増加するが、同時にトルクとともに増加する傾向をも示す。数値の上では、低速・高トルクの一部分を除き、銅損に比較して鉄損が大きい値を示す。

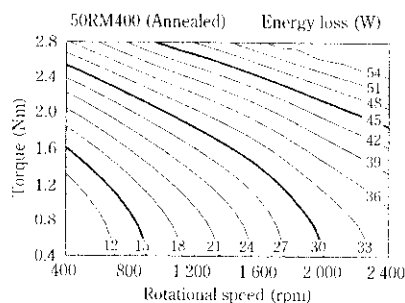


Fig. 5 Energy loss map of a brushless DC motor using 50RM400 as core material

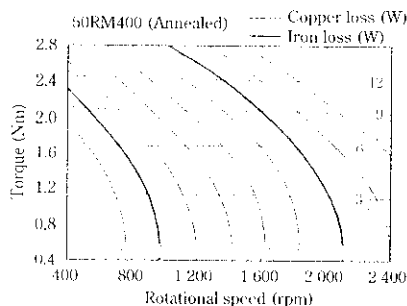


Fig. 6 Copper loss and iron loss map of a brushless DC motor using 50RM400 as core material

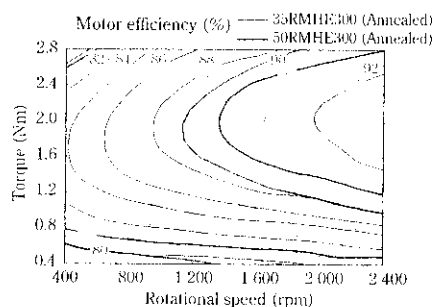


Fig. 7 Efficiency maps of brushless DC motors using 35RMHE300 and 50RMHE300

Fig. 5 と 6 を比較すると、損失の回転数・トルクに対する依存性は、鉄損の挙動を強く反映しており、損失、ひいてはモータ効率には鉄損（機械損・漂遊負荷損を含む）が支配的に影響していると判断される。

なお、鉄損がトルクとともに増加する傾向については、トルク増加に伴う電機子電流の増加とともに磁束高調波成分が増加することが影響していると考えられる²⁰⁾。

モータ効率に及ぼす板厚の影響を明らかにするために、同程度の $W_{15/50}$ を有する 35RMHE300 (0.35 mm 厚) と 50RMHE300 (0.50 mm 厚) (いずれも焼鈍後) を使用したモータの効率マップを Fig. 7 に比較して示す。低速回転では両者のモータ効率に大きな差異はないが、回転数が増加するとともに板厚の小さい 35RMHE300 の効率が高くなる傾向を示す。また、低トルクでは 35RMHE300 がより高効率を示す傾向がある。

上記の効率マップに示したと同じ 35RMHE300 と 50RMHE300 (いずれも焼鈍後) を使用したモータ鉄心の鉄損（機械損および漂遊負荷損を含む）のマップを Fig. 8 に示す。およそ 1200 rpm 以下の低速回転ではいずれのモータ鉄心も同程度のモータ鉄損を示すが、回転速度の増加とともに板厚の小さい 35RMHE300 の方がより

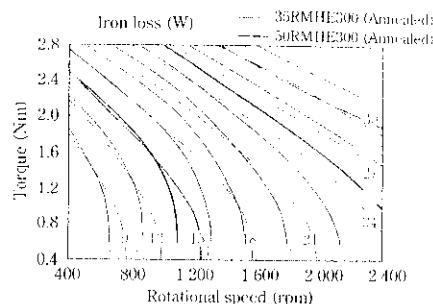


Fig. 8 Iron loss maps of brushless DC motors using 35RMHE300 and 50RMHE300 as core material

低鉄損となる傾向を示す。より高周波数において低鉄損となる薄厚材の特長が、回転数の増加にともなって鮮明に現れているといえる。このように、Fig. 7 に示されたブラシレス DC モータの効率の挙動は鉄損のマップによってよく説明できる。

4 誘導モータにおける電磁鋼板の評価

4.1 モータ効率に及ぼす鉄心材特性の影響

各種の電磁鋼板を鉄心材として用いた誘導モータにおける最大効率を素材鉄損 $W_{15/50}$ の関数として Fig. 9 に示す。ここでは焼鈍後の鉄心を用いた値を示している。材料別に見ると、低鉄損の素材ほど最大モータ効率が高くなる傾向はあるが依存性は緩やかであり、ある程度以上の低鉄損の材料を用いても効率が飽和する傾向が見られる。一方、ブラシレス DC モータの場合と異なり、鉄損値が同等の JIS 規格材 RM に比べて磁束密度 B_{50} が高い素材である RMA が明らかに高い効率を示す。

鉄心材として 50RM400 を使用した誘導モータの鉄損および銅損を回転数の関数として Fig. 10 に示す。駆動条件は Fig. 9 の最大効率条件にほぼ一致する。図示した回転数範囲は、Fig. 4 以下のブラシレス DC モータの特性マップとほぼ同じである。およそ 2000 rpm 以下の回転数範囲では、モータ鉄損よりも銅損が大きい値を示す。これは、誘導モータではロータにおける 2 次銅損が発生するため、同程度の体格のブラシレス DC モータに比べて、同程度の出力条件では銅損比率が大きくなることに起因すると考えられる。

モータ鉄損は素材の鉄損と、銅損は素材磁束密度と、それぞれ強い相関を示すため¹²⁾、誘導モータにおいては最大効率が素材磁束密度 B_{50} に強い依存性を示す結果となったと考えられる。その結果、同一鉄損 $W_{15/50}$ において、 B_{50} がより高い RMA が誘導モータにおいては効率の点で有利となったといえる。

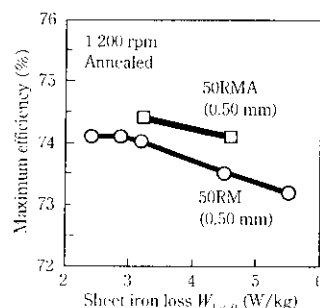


Fig. 9 Relation between maximum motor efficiency of an inverter-drive induction motor and sheet iron loss $W_{15/50}$

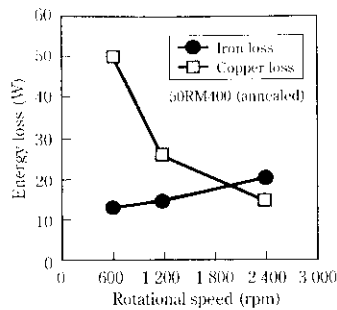


Fig. 10 Copper and iron losses in an inverter-drive induction motor using 50RM400

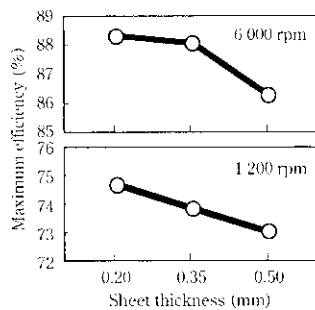


Fig. 11 Maximum efficiency of an inverter-drive induction motor using steels with different thicknesses

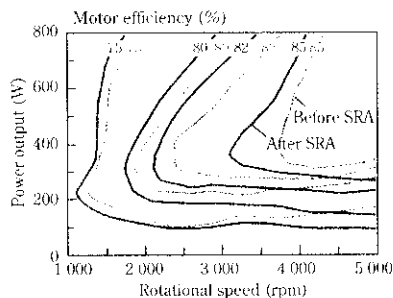


Fig. 12 Comparison of efficiency maps of an inverter-drive induction motor core before and after stress-relief annealing (SRA)

一方、 $W_{1/50}$ が 3 W/kg 以下の RM の低鉄損材を用いても効率増加が飽和傾向となった現象は、このような低鉄損材では合金元素添加量が多いために B_{50} が低下し、その結果銅損が増加したためであると説明される。

4.2 モータ効率における鉄損改善の効果

このように、元素添加による鉄損改善ではモータ鉄損と銅損のトレードオフが生じるが、電磁鋼板の板厚低減によれば磁束密度 B_{50} に大きな影響を及ぼさず鉄損を低減できる。板厚に対するモータ効率の依存性を Fig. 11 に示す。この場合には、回転数によらず板厚の低減にともなって効率が向上することが明らかである。

また、鉄心に歪取焼鈍 (SRA) を施すことによっても、 B_{50} に大きな影響を及ぼさず鉄損を低減できる。この歪取焼鈍による低鉄損化の効果を効率マップの形で Fig. 12 に示す。すべての回転数・出力領域において焼鈍後にはモータ効率が改善されることが分かる。

以上のように、誘導モータにおいては鉄心材の磁束密度の増加が

効率改善の上で有利であることとともに、鉄心材の鉄損低減そのものは効率向上に有効であることが明らかとなった。

5 誘導モータ鉄心の局所磁気特性

回転状態のモータ鉄心における磁気的挙動の直接測定を目的として、探針法^(21,22)を用いた局所磁気特性測定法が開発されている⁽²³⁾。この方法を小型の単相誘導モータ鉄心の動的局所磁気測定に適用した。

測定対象として定格出力 600 W の単相誘導モータ鉄心を用いた鉄心材料として 50RM400 と 50RMA350 を使い、コアに積層後、焼鈍、巻線を実施した。巻線端部には、ティース部にもプローブを挿入できるように、ティースと巻線の間に空隙を設けた。ステータ鉄心端面における磁束密度は 2 対 (半径方向および周方向) の接触式探針により測定し、磁束密度測定点近傍の磁界強度は小型のホール素子により検出した。測定はモータを単相 60 Hz 、 100 V で回転させた状態で行った。

各測定点における鉄損値は、無負荷時に磁束密度および磁界強度の半径方向および円周方向成分の波形からヒステリシスループの面積を次式により求め、その和を 2 次元鉄損値 W_{2d} とした。

$$W_{2d} = (f/\rho) \oint H \cdot dB = W_r + W_\theta \dots \dots \dots (4)$$

$$W_{rm} = (f/\rho) \oint H_{r0} dB_{r0} \text{ (添字記号同順)} \dots \dots \dots (5)$$

ここで f は同期周波数、 ρ は電磁鋼板の密度を示す。周回積分は同期周期 1 回転について行う。

鉄心材として 50RM400 を用いた単相誘導モータを 60 Hz 、 100 V で無負荷回転させた状態で測定したステータ鉄心における局所鉄損の分布を Fig. 13 に示す。局所鉄損はティース部で大きく、ヨーク部では小さくなる分布を示す。また、スロット外周に沿ってやや大きくなる傾向をしている。

鉄心材として 50RM400 と 50RMA350 を用いた場合の磁界強度 H_m 、磁束密度 B_m 、鉄損 W の局所測定値 (動径方向成分) の差分の分布を Fig. 14 に示す。磁界強度はティース部では 50RM400 が大きく、ヨーク部では同程度である。磁束密度はティース部では同程度であるのに対し、ヨーク部では 50RMA350 が大きい値を示す。磁束密度分布におけるこのような差異は、50RM400 に比べて 50RMA350 の方が高い磁束密度をもつことを反映していると考えられる。鉄損の分布は磁束密度の分布を反映しており、ティース部では 50RM400 の方が大きく、ヨーク部では 50RMA350 が部分的に大きい値を示す。その結果、鉄心全体では 50RMA350 の鉄損が 50RM400 に比べて小さくなる。

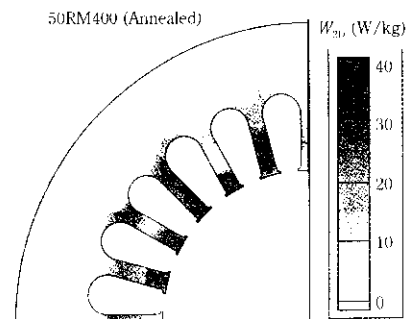


Fig. 13 Distribution of iron loss in stator core using 50RM400 as core material

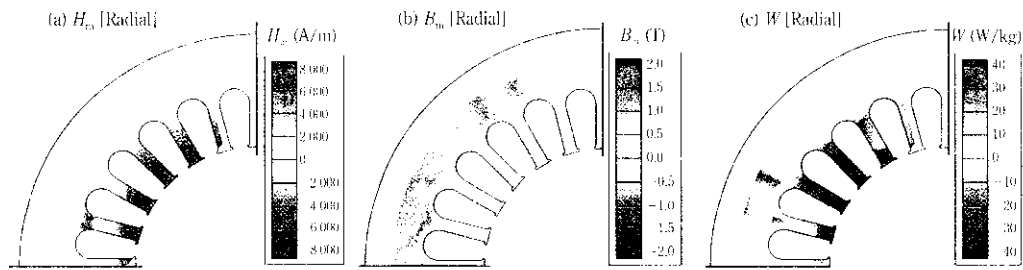


Fig. 14 Difference in distribution of magnetizing force (a), flux density (b) and iron loss (c) between 50RMA and 50RM400 (f [RMA350]- f [RM400])

このように、鉄心における鉄損の分布は、材料の磁化特性によって決まる磁束密度分布をほぼ反映した結果が得られていると考えられる。この結果は、材料の磁束密度の向上が誘導モータの効率改善の上で有効であることの一つの傍証となっていると考えられる。このような実測結果を定量的に説明することは、今後の興味深い課題である。

6 結 言

電気自動車やハイブリッド自動車用駆動モータとして使用されることの多い代表的モータ種であるブラシレス DC モータと誘導モータの性能、特にモータ効率に及ぼす鉄心材料特性の影響を調査し、次

の結果を得た。

- (1) 希土類磁石を使用した集中巻タイプのブラシレス DC モータの効率は鉄心材の 400 Hz における鉄損によって正確に予測することができる。
- (2) このブラシレス DC モータに低鉄損高磁束密度電磁鋼板 RMHE を用いた場合、従来材と同一トルク定数の条件下で 0.5～1.0% 高い効率を得ることができる。
- (3) 3 相誘導モータにおいては鉄心材の磁束密度 B_{50} が高い RMA を使用することにより高効率を得ることができる。
- (4) 探針法を用いた局所磁気特性測定法により、モータ鉄心における局所磁界強度・磁束密度・鉄損の分布における材料間の差異を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁監修：「1999/2000 資源エネルギー年鑑」，(1999)
- 2) 大聖泰弘：自動車技術，**56**(2002)1, 18
- 3) 電気学会電気自動車駆動システム調査専門委員会編：「電気自動車の最新技術」，(1999)
- 4) 広瀬久士，丹下昭二：自動車技術，**56**(2002)1, 36
- 5) 電気学会小型モータの高性能化に関する調査専門委員会編：「小型モータの高性能化」，電気学会技術報告，(1999)744
- 6) 石田昌義：日本応用磁気学会誌，**25**(2001)1, 3
- 7) 本田厚人，千田邦浩，定廣健一：川崎製鉄技報，**34**(2002)2, 85
- 8) 河野正樹，藤山寿郎，青木哲也：川崎製鉄技報，**34**(2002)2, 96
- 9) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, **12**(1990)1, 141
- 10) 本田厚人，佐藤圭司，石田昌義，大山 勇：電気学会回転機研究会資料，RM-97-148, (1997)
- 11) 石田昌義，福永章子，本田厚人，大山 勇：電気学会回転機研究会資料，RM-98-147, (1998)
- 12) 石田昌義，志賀信男，河野正樹，本田厚人，小松原道郎，大山 勇：日本 AEM 学会誌，**7**(1999)3, 248
- 13) 「RM-CORE 川鉄の無方向性電磁鋼帯」，川崎製鉄カタログ
- 14) 高島 稔，篠原雅典，本田厚人，岡村 進，森戸延行：まてりあ，**36**(1997)4, 385
- 15) 酒井敬司，河野正樹，藤山寿郎：川崎製鉄技報，**33**(2001)2, 92
- 16) JIS C 2552, (2000), 日本工業規格
- 17) 澤畑隆夫，宮川雅春，伊藤 浩，守本康司，嶋崎哲夫：National Tech. Rep., **33**(1987)5, 617
- 18) 定廣健一，志賀信男，石田昌義：川崎製鉄技報，**33**(2001)3, 103
- 19) 志賀信男，石田昌義，大山 勇：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-00-269, (2000)
- 20) 石田昌義，志賀信男，定廣健一：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-01-125, (2000)
- 21) 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：電気学会論文誌，**115-A**(1995)1, 50
- 22) 千田邦浩，石田昌義，佐藤圭司，小松原道郎，山口俊尚：電気学会論文誌，**117-A**(1997)9, 942
- 23) 石田昌義，本田厚人，小松原道郎，佐藤圭司，大山 勇：電気学会回転機研究会資料，RM-99-22, (1999)