

---

自動車用のモータ鉄心材料とその評価方法

Core Materials for Motors Used in Automobiles and Evaluation Method

本田 厚人 (Atsuhito Honda) 石田 昌義 (Masayoshi Ishida) 島田 一男 (Kazuo Shimada)

---

要旨：

川崎製鉄は磁気特性に影響するさまざまな金属学的因子を最適に制御することにより、モータ用鉄心素材に適した、低鉄損の 35RM200, 高透磁率の RP シリーズ, 低鉄損かつ高透磁率の RMHE シリーズ, 高周波特性に優れた RMHF シリーズ, 接着型 B コート材などの新製品を開発してきた。ブラシレス DC モータの効率改善のためには、鉄心素材の高周波鉄損を低減することが有効であり、高トルク特性を得るには素材の磁束密度を増加させることが必要であることが分かった。回転中のモータの局所磁気特性を測定し、ティース部での鉄損が大きいことが判明した。

---

Synopsis :

For motor core materials, Kawasaki Steel has developed new products such as 35RM200 of low iron loss, RP series of high induction, RMHE series of low iron loss and high induction, RMHF series of low iron loss at high frequency, and B coating of self-adhesive type organic coating, by controlling the metallurgical factors in an optimum condition. In order to improve the brushless DC motor efficiency and torque, decrease of high frequency iron loss and increase of flux density in the core material were found to be effective, respectively. Localized iron loss measurement in the rotating motor proved that a high iron loss generates in the teeth part.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

## Core Materials for Motors Used in Automobiles and Evaluation Method



本田 厚人  
Atsuhito Honda

技術研究所 電磁鋼板  
研究部門 主任研究員  
(課長)・工博



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



島田 一男  
Kazuo Shimada

電磁鋼板セクター室  
主査(部長)

### 要旨

川崎製鉄は磁気特性に影響するさまざまな金属学的因子を最適に制御することにより、モータ用鉄心素材に適した、低鉄損の35RM200、高透磁率のRPシリーズ、低鉄損かつ高透磁率のRMHEシリーズ、高周波特性に優れたRMHFシリーズ、接着型Bコート材などの新製品を開発してきた。ブラシレスDCモータの効率改善のためには、鉄心素材の高周波鉄損を低減することが有効であり、高トルク特性を得るには素材の磁束密度を増加させることが必要であることが分かった。回転中のモータの局所磁気特性を測定し、ティース部での鉄損が大きいことが判明した。

### Synopsis:

For motor core materials, Kawasaki Steel has developed new products such as 35RM200 of low iron loss, RP series of high induction, RMHE series of low iron loss and high induction, RMHF series of low iron loss at high frequency, and B coating of self-adhesive type organic coating, by controlling the metallurgical factors in an optimum condition. In order to improve the brushless DC motor efficiency and torque, decrease of high frequency iron loss and increase of flux density in the core material were found to be effective, respectively. Localized iron loss measurement in the rotating motor proved that a high iron loss generates in the teeth part.

## 1 緒言

自動車においては、安全性や快適性を高めるためにさまざまなモータが用いられており、その数は乗用車一台当たり数十個にもなる。また最近では、地球温暖化問題や大気汚染などの環境問題、あるいはエネルギー問題への対応から、自動車の駆動自体を電動機化しようとする、いわゆる電気自動車、ハイブリッド車用のモータの開発の動きが活発になってきた。これらのモータの性能は、燃費や運転性に直接影響するため、高効率化、高性能化が強く求められており、ブラシレスDCモータの使用が加速化している<sup>1)</sup>。

従来広く使用されてきた誘導モータに関しては、著者らは先にモータの効率に及ぼす鉄心材料の影響を調査し、素材のSi量には最適値が存在し、回転数と設計磁束密度によりその最適Si量に変化することを明らかにした<sup>2,3)</sup>。

一方、ブラシレスDCモータは、ロータに永久磁石を使用して2次導体回路を持たないため、誘導モータに比べて銅損が小さく、効率が高くなるという特徴を持つ<sup>4)</sup>。このように、銅損が小さい分だけ相対的に鉄損比率が大きくなるブラシレスDCモータにおいては、誘導モータとは異なる鉄心材料が要求されると考えられる。

本報では、まず最初に、鉄心素材用として用いられる無方向性電

磁鋼板の特性の支配要因を解説し、川崎製鉄の最近の新製品を紹介する。次に、ブラシレスDCモータの特性向上に有効な素材条件を明らかにするために、種々の無方向性電磁鋼板を用いてステータ鉄心を作製し、そのモータ特性を調査した結果を報告する。また最近川崎製鉄がモータ設計と素材評価のために新しく開発した、モータの局所的な磁気特性の評価技術を紹介する。

## 2 無方向性電磁鋼板

無方向性電磁鋼板は、特定方向に偏らない磁気特性を有することから、主として発電機や電動機など回転機の鉄心用素材として用いられている。一般に、大型の回転機用の鉄心素材には低鉄損であることが必要とされ、小型のものには高磁束密度であることが要求される。これに対応して無方向性電磁鋼板には、Si量を約3%含有する高級鋼板からほとんどSiを含まない低級品までの多くの種類と、厳格な板厚精度、打抜加工性、コーティングによる絶縁性、耐食性、加工法に応じた機械的性質、溶接性など多岐にわたる性能が要求される。

川崎製鉄では1930年代初期から電磁鋼板の製造を始め、それ以来RMコアの名称で各規格の品揃えを経て、質、量ともに安定した供給体制を確立してきた。以下に電磁鋼板における特性の支配因子について述べ、さらに最近の新製品を紹介する。

\*平成11年10月15日原稿受付

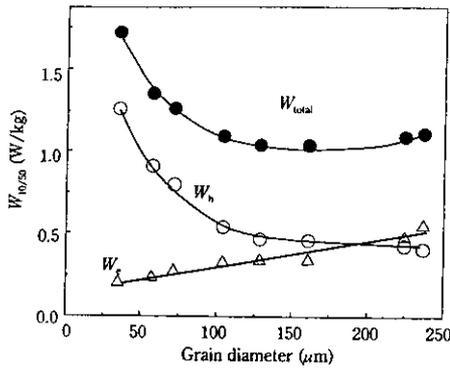


Fig. 1 Influence of grain diameter on hysteresis loss, eddy current loss and total iron loss

2.1 磁気特性に影響を及ぼす因子

最近ますます厳しくなってきた低鉄損，高透磁率などの要求を満足するために，磁気特性に影響を及ぼす金属学的因子を最適に制御して鋼板が製造されている。

2.1.1 Si, Al 添加量と板厚

鉄損はヒステリシス損とウズ電流損に分けられるが，さらにウズ電流損は古典的ウズ電流損と磁区構造を考慮した異常ウズ電流損に分けられる。このうち古典的ウズ電流損  $W_e$  は，

$$W_e = k(tfB)^2/\rho \dots \dots \dots (1)$$

で表わされる。ここで， $k$ ：定数， $t$ ：板厚， $f$ ：周波数， $B$ ：磁束密度， $\rho$ ：比抵抗を示す。

Si, Al 添加量が多くなるほど鋼板の比抵抗  $\rho$  が増加し上式にしたがって鉄損が減少する。しかし一方でこれら元素の添加は材料の飽和磁束密度の低下をもたらす磁束密度を低下させるため，無方向性電磁鋼板には目標磁気特性に対応した量の Si, Al が添加される。一般に，より低鉄損が要求される高級品種になるほど添加量が多い。また (1) 式より明らかなように，鉄損低減には板厚を減じることも有効である。

2.1.2 結晶粒径

無方向性電磁鋼板の鉄損は，結晶粒径が大きいほど渦流損が増大して履歴損は減少する<sup>9)</sup>。これは結晶粒径が大きいほど，磁区幅が大きくなり異常渦電流損が増加し，一方で磁壁移動を阻害する粒界の面積が減少することにより履歴損が減少するためである。したがって，両者の和である鉄損を最小とする最適な結晶粒径が存在する。また履歴損は介在物の存在や集合組織などによっても影響を受けるので，それらの条件も最適化する必要がある。高 Si 鋼では，Fig. 1 に示されるごとく最適粒径は 150 $\mu$ m 前後と比較的大きいため，工業的には短時間の焼鈍により十分に粒成長させるための材料制御が必要となる。特に，結晶粒成長を妨げる微細析出物や，介在物を極力低減することが重要となる。

2.1.3 介在物

鋼中には硫化物，酸化物，窒化物などの析出物や介在物が存在する。介在物の直径は約 0.1 $\mu$ m 以下から数十  $\mu$ m である。これらの介在物は結晶粒の成長を阻害することにより履歴損を劣化させるが，それに加えて，直接的にも磁気特性を劣化させる。これは介在物自体，あるいは介在物が静磁エネルギーを減少させようとして生成した周辺磁区が，磁壁の移動を妨げるためである。鋼中の介在物の個数が減少すると鉄損が低下する例を Fig. 2 に示す<sup>9)</sup>。このよう

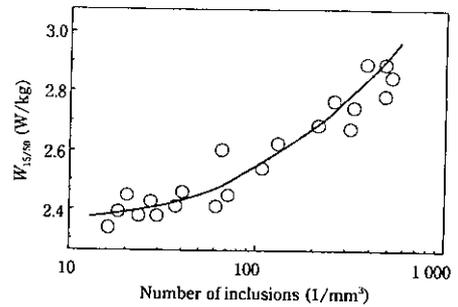


Fig. 2 Effect of inclusions on iron loss of 0.5 mm thick material

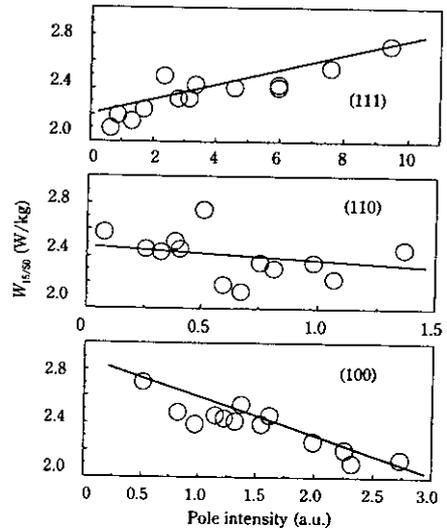


Fig. 3 Relationship between pole intensity and iron loss

に介在物の絶対量を減らすことがまず重要であるが，さらには介在物の大きさ，分布をできるだけ影響の少ない形態に制御することも重要となる。もし介在物の絶対量が同一であれば，できるだけこれらを粗大化させた方が粒成長および磁壁移動への悪影響は少ない。

2.1.4 集合組織

結晶粒が特定の方向に配列した，いわゆる優先方位を持った状態を集合組織と呼ぶが，電磁鋼板の磁気特性はこれらの集合組織に強く依存する。Fig. 3 に示すように，(100) 強度が増す程鉄損が減少し (111) 強度が強くなると鉄損が増加していることが分かる<sup>9)</sup>。これは電磁鋼板が強い磁気異方性を持ち，[100] 結晶軸方向に最も磁化されやすく，[111] 方向に最も磁化されにくいことによる。すなわち，(100) 結晶面内には多数の [100] 軸を有し，(111) 面には [100] 軸がないためである。さらに，Sb を添加すると集合組織が顕著に改善されることが見い出されており<sup>7,9)</sup>，特性向上に利用されている<sup>9)</sup>。

2.1.5 加工歪み

電磁鋼板は一般に剪断加工して用いられるが，剪断部の近傍にはかなりの歪みが残留し，磁性劣化の原因となる。したがって剪断時にはクリアランスなどの剪断方法を十分に管理して歪みの少ない剪断方法をとる必要がある。できれば，加工後には歪み取焼鈍を行うことが望ましい。

2.2 新製品の開発

上述の磁性支配因子の最適化の観点から各工程条件を制御し，Fig. 4 に示す種々の無方向性電磁鋼板製品が開発されている。

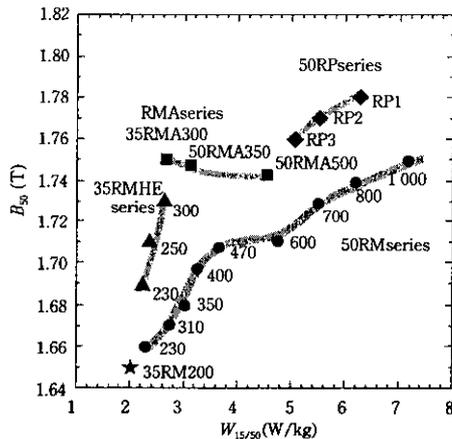


Fig. 4 Iron loss and flux density of non-oriented electrical steel produced by Kawasaki Steel

#### (1) 最高級無方向性電磁鋼板 35RM200

最高級鋼板の開発においては、結晶粒成長性を確保し、かつ磁壁の移動を容易にして低鉄損を実現するために、溶鋼の高純度化が第一に重要である。その上で圧延条件が許す範囲で比抵抗増加元素である Si, Al が添加される。徹底した高純度化と介在物分散制御、集合組織制御技術などの適用により現在では世界最高水準の 35RM200 ( $W_{15/50} \leq 2.0$  W/kg) を開発した。

#### (2) 高磁束密度鋼板 RP シリーズ<sup>10)</sup>

最近の機器の小型化、高効率化の要求の高まりに応えるため、磁束密度の高い RP シリーズが開発された。Si 量の低い順に RP1, 2, 3 があり、これらの鋼板は高度な集合組織制御技術により製造されている。

#### (3) 歪取焼鈍後低鉄損鋼板 RMA シリーズ<sup>11, 12)</sup>

磁束密度を確保しながら、お客様における歪取焼鈍後に効果的に低鉄損化する鋼板として、焼鈍時の粒成長性が特に優れた鋼板が開発されている。粒成長性の改善は介在物形態制御によって得られる。50RMA600 ( $W_{15/50} \leq 6.0$  W/kg) から 35RMA300 ( $W_{15/50} \leq 3.0$  W/kg) まで種々の製品が開発されている。

#### (4) RMHE シリーズ

鋼板硬度の上昇を抑え、低鉄損、高磁束密度を達成した製品を開発した。介在物形態制御により粒成長性を改善し、また高度な集合組織制御を施した材料である。最高級品は 35RMHE230 ( $HV \leq 200$ ,  $W_{15/50} \leq 2.3$  W/kg,  $B_{50} \geq 1.67$  T) が開発されている。

#### (5) 高周波用 RMHF シリーズ

高速回転小型モータ用などに適した、高周波特性に優れた極薄電磁鋼板であり、最高級品として 20RMHF1200 ( $W_{10/400} \leq 12.0$  W/kg) を開発した。

#### (6) 接着型 B コート<sup>13, 14)</sup>

電磁鋼板は、積層時のうず電流損の低減のための絶縁性の付与をはじめとして、打抜き性など、その表面に施されるコーティングに対してはさまざまな特性が要求される。半有機の Al コートは打抜き性を主体とする総合特性に優れており、現在最も多量にかつ一般的に用いられている。

ところで、かしめ、溶接などの接合方法が適用できない用途、あるいは鋼板の気密性が要求される用途には加熱接着が可能な有機接着樹脂の B コートが開発されている。Fig. 5 に片面膜厚 5 $\mu$ m の標準 B コートの接着温度と接着強度の関係を示す。150~300 $^{\circ}$ C の接

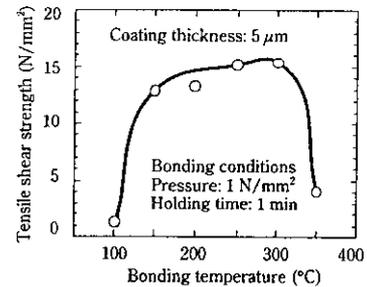


Fig. 5 Effect of bonding temperature on tensile shear strength at a room temperature.

着温度で良好な接着強度が得られる。

### 3 実機特性評価方法の研究

無方向性電磁鋼板の特性評価は通常、JIS2550 規定のエプスタイン試験により行われる。しかし、実際にその製品を用いた実機の特性が評価できれば、お客様のニーズに合ったより詳細な情報を提供し、またそれを鉄心製品開発に還元することができる。

川崎製鉄では、600 W 単相モータ<sup>2)</sup>、400 W 3 相 6 極誘導モータ<sup>3)</sup>、300 W 3 相 8 極ブラシレス DC モータ評価装置<sup>15)</sup> および局所鉄損測定装置<sup>16)</sup> を開発している。ここではブラシレス DC モータ評価装置および局所鉄損測定装置を用いた実験結果を紹介する。

#### 3.1 ブラシレス DC モータ特性に及ぼす鉄心素材の影響

前述したごとく、ブラシレス DC モータは、ロータに永久磁石を使用して 2 次導体回路を持たないため、従来広く使用されてきた誘導モータに比較して銅損が小さく、効率が高くなる。特に磁石製造において優れた技術を有する日本においてはこのタイプのモータが高効率化の主力となっている。

##### 3.1.1 鉄心素材と測定方法

供試モータとして市販の 3 相 8 極 300 W の永久磁石表面型ブラシレス DC モータおよびその駆動回路系を用いた。ステータ鉄心素材としては 50RM230, 50RM400, 50RM1300, 35RMA250, 50RMA300 を用い、ロータはすべての測定を通じて同一のものを用いた。各素材は打抜き積層し、 $N_2$  雰囲気中 750 $^{\circ}$ C $\cdot$ 2h の焼鈍を施した後、またはそのままの状態それぞれ巻線を施した。モータ駆動電圧は PWM (チョップ方式) パルス幅により設定し、負荷モータによりトルクを印加して回転数をスイープした (2000~1400 rpm)。

##### 3.1.2 最大効率と素材鉄損の関係

最大モータ効率に及ぼす素材鉄損  $W_{15/50}$  の影響を Fig. 6 に示す。低鉄損の素材ほど最大モータ効率の値が高くなる傾向がある。特に焼鈍後の素材鉄損と最大モータ効率の間には直線的な相関があり、 $W_{15/50}$  の 1 W/kg の低減によりモータ効率は 1.3% 向上する。しかし未焼鈍材はやや挙動が異なり、RM シリーズの最大効率は焼鈍材のラインよりも低いところに、また RMA シリーズでは高いところに位置する傾向を示す。この差異は、モータ鉄心における励磁周波数が  $W_{15/50}$  の測定周波数より高いため、粒径が微細で高周波鉄損が比較的小さい RMA 未焼鈍材が有利となったためと考えられる。400 Hz における鉄損  $W_{10/400}$  と最大効率との相関を Fig. 7 に示す。歪取焼鈍の有無にかかわらず最大効率が  $W_{10/400}$  によってほぼ一意的に決定されており、効率に対しては高周波鉄損が支配的であるこ

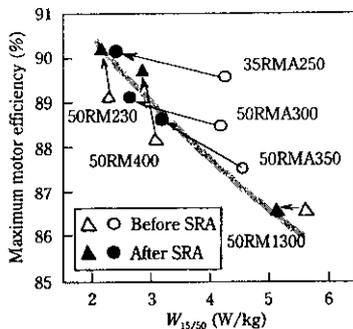


Fig. 6 Relationship between maximum motor efficiency and material iron loss before and after stress relief annealing (SRA)

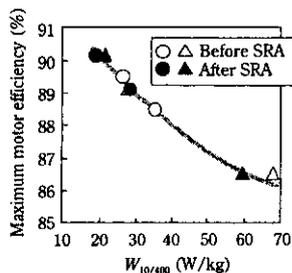


Fig. 7 Relationship between maximum motor efficiency and material iron loss at high frequency before and after stress relief annealing (SRA)

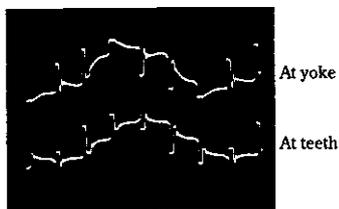


Fig. 8 Differential wave form of fluxdensity in stator core

とが示唆される。

ステータ鉄心ティース部の磁束微分波形を Fig. 8 に示す。最大効率条件においては同期周波数は 100 Hz 前後であるが、正弦波に近い基本波に第 6 調波に対応する強いパルスが重畳しているために、数 100 Hz の高周波鉄損成分がモータ効率に強く影響したと考えられる。

### 3.1.3 モータ損失分析

モータ鉄損・銅損に及ぼす素材 Si 量の影響を Fig. 9 に示す。最大効率条件では素材ごとに出力・回転数が異なるため、駆動条件を出力 400 W に固定してデータを整理した。400 W の高出力においても、鉄損の方が銅損よりも大きくかつ素材依存性が強い。

以上から今回のブラシレス DC モータにおいては、素材高周波鉄損がモータ鉄損を通してモータ効率に支配的影響を与えたと判断できる。この結果を、Fig. 10 の誘導モータにおける結果と比較すると、同等出力・同等回転数領域ではブラシレス DC モータの方が銅損の寄与分が小さい傾向が表れている。

### 3.1.4 モータ効率の出力依存性

モータ出力の増減による効率の変化を Fig. 11 に示す。一般に

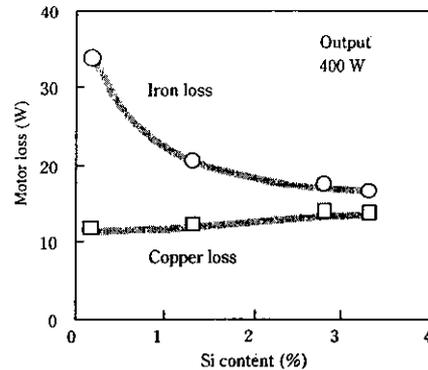


Fig. 9 Effect of Si content of core materials on iron loss and copper loss in a brushless DC motor

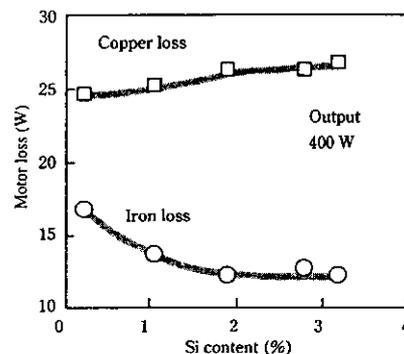


Fig. 10 Effect of Si content of core materials on iron loss and copper loss in an induction motor

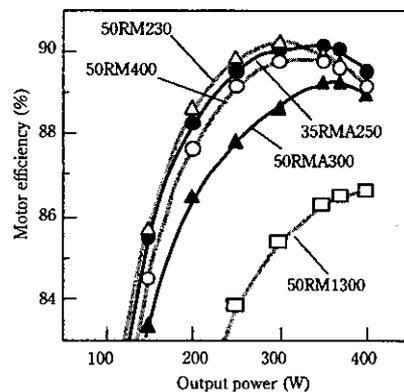


Fig. 11 Relationship between motor efficiency and output power

$B_{50}$  の高い素材ほど高出力側で高効率となる傾向が認められる。特に約 330 W 以上の出力では 35RMA250 が 50RM230 よりも高効率となる。これは高出力側ほど銅損比率が増大し、高  $B_{50}$  材が有利となったことによると考えられる。

### 3.1.5 トルク特性に及ぼす素材の影響

無負荷回転数 2100 rpm からトルクを印加し、1500 rpm に達した時点でのトルクを素材  $B_{50}$  に対してプロットすると Fig. 12 を得る。高  $B_{50}$  素材ほど高トルクとなる傾向が明らかである。

## 3.2 モータ鉄心における局所磁気特性分布

モータ設計を効率的に行うためには、計算機によるシミュレーション

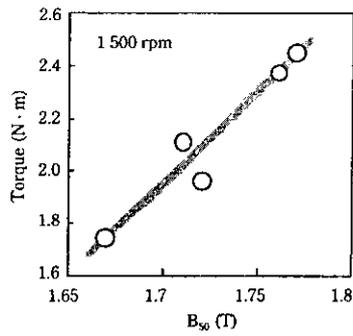


Fig. 12 Effect of  $B_{50}$  of core material on motor torque

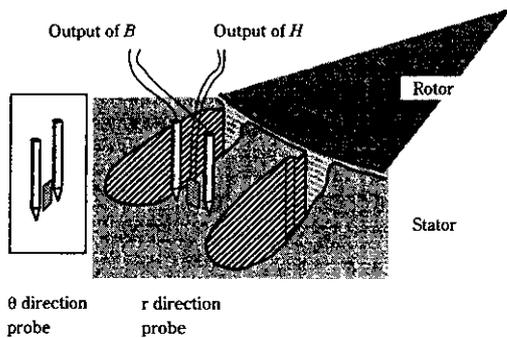


Fig. 13 Schematic diagram of measuring method of  $B$  and  $H$

の技術が高めることが必要である。このためには、磁性材の非線形特性や異方性、ヒステリシス特性を取り込む技術の開発が必要である。一方、基礎となる実測データに関しては、マクロなものだけでなく、局所的なものが求められていた。このようなニーズに対して川崎製鉄は探針法の技術を応用して<sup>17, 18)</sup>、はじめて回転状態のモータ鉄心の局所的磁気特性挙動を解析したのでこれを紹介する。

### 3.2.1 鉄心素材と測定方法

評価したのは、鉄心素材には、無方向性電磁鋼板 50RM400 を用いた単相 600 W の誘導モータである。巻線は、ティース部にもプローブを挿入できるように、ティース幅×約 20 mm 高さの空隙を設けた。

ステータ鉄心端面における磁束密度は探針法により測定した。Fig. 13 に探針およびホール素子の配置を示す。2 本の探針間の距離は 2 mm とし、半径方向と円周方向測定用の 2 組を使用した。またステータ鉄心表面近傍の磁界強度は、小型のホール素子により測定した。

各測定点について半径方向 ( $r$  方向) および円周方向 ( $\theta$  方向) 成分測定の 2 回に分けて行い、波高サンプル数は 1 同期周期あたり 1000 点として 2 周期測定し、それぞれ 100 回の平均をとった。

各測定点における鉄損値は次式により求めた。鉄損値は  $r$  方向成分  $W_r$  および  $\theta$  方向成分  $W_\theta$  に分けて計算し、その和を 2 次元鉄損値  $W_{2d}$  とした。

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

$$W_{r,\theta} = (f/r) \oint H_{r,\theta} dB_{r,\theta} \dots \dots \dots (3)$$

ここで  $f$  は同期周波数、 $r$  は電磁鋼板の密度を示す。周回積分は同

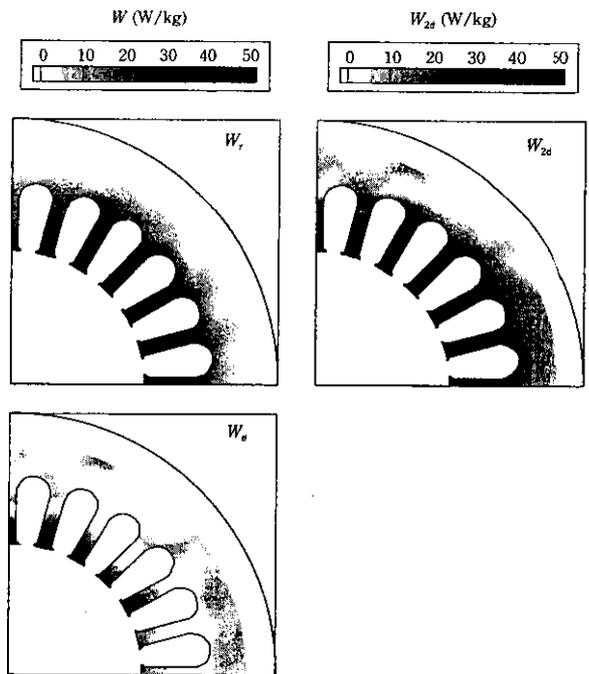


Fig. 14 Local iron loss distribution

期周期 1 回分について行う。

測定はモータを交流単相 100 V で回転させた状態で行った。

### 3.2.2 局所磁気特性の分布

Fig. 14 に無負荷時(実測トルク, N·m)における鉄損  $W$  の  $r$ 、 $\theta$  成分および 2 次元鉄損のステータコアにおける分布を示す。 $W_r$  の分布は、鉄損の発生している全体的傾向は  $r$  方向の磁化力分布とほぼ一致し、ティース部で大きい。 $W_{2d}$  は、ほぼ  $W_r$  に近い分布状態、すなわち、ティース部で大きく、スロット外周に沿ってやや大きくなる傾向を示す。 $W_r$  と  $W_\theta$  が相補的に分布しているため、全体に分布状態が滑らかになっている。

上記の測定を行った状態においては、モータは完全な同期状態ではなく、若干トルクが発生しているため、上記の鉄損測定値には無負荷損失に加えて相当量の出力分が含まれているものと思われる。実際、磁束密度の分布状態にかかわらず、ティース部分で鉄損値が大きい傾向があり、電機子電流から受けた仕事の一部がティースからロータに受け渡されていることを反映しているものと推定される。

## 4 結 言

川崎製鉄は、モータ用鉄心素材に適した、低鉄損の 35RM200、高透磁率の RP シリーズ、低鉄損かつ高透磁率の RMHE シリーズ、高周波特性に優れた RMHF シリーズ、接着型 B コート材などの新製品を開発してきた。

ブラシレス DC モータの効率改善のためには、鉄心素材の高周波鉄損を低減することが有効であり、高トルク特性を得るには素材の磁束密度を増加させることが必要であることがわかった。

また、探針法の技術により回転中の誘導モータの局所磁気特性を測定し、ティース部での鉄損が大きいことを明らかにした。

## 参 考 文 献

- 1) 村上 浩, 伊藤 浩, 浅野能成, 榎崎和成, 長谷川杉松: *Matsushita Tech. J.*, **44**(1998), 149
- 2) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, **12**(1990), 141
- 3) 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
- 4) 澤畑隆夫, 宮川雅春, 伊藤 浩, 守本康司, 嶋崎哲夫: *National Tech. Rep.*, **33**(1987), 617
- 5) K. Matsumura and B. Fukuda: *IEEE Trans. Mag.* MAG-20(1984)5, 1533
- 6) 松村 治, 福田文二郎, 木下勝雄, 今井卓雄, 小畑良夫, 宮崎重紀: *川崎製鉄技報*, **15**(1983)3, 208
- 7) 入江敏夫, 松村 治, 莊野保之, 中村広登, 嶋中 浩: *鉄と鋼*, **64**(1978)11, S765
- 8) 入江敏夫, 松村 治, 中村広登, 莊野保之, 伊藤 庸, 嶋中 浩: *鉄と鋼*, **65**(1979)11, 1056
- 9) 小松原道郎, 中村広登, 松村 治: *CAMP-ISIJ*, **2**(1989)6, 1935
- 10) 尾崎芳宏, 小林義紀: *川崎製鉄技報*, **29**(1997)3, 183
- 11) 高島 稔, 篠原雅典, 本田厚人, 岡村 進, 森戸延行: *まてりあ*, **36**(1997), 385
- 12) 高島 稔, 小野智睦, 西村恵次: *川崎製鉄技報*, **29**(1997)3, 185
- 13) 小森ゆか, 足立重好, 寺嶋 正: *川崎製鉄技報*, **29**(1997)3, 187
- 14) 小森ゆか, 江口邦彦, 本田厚人, 小松原道郎, 大山 勇: 電気学会マグネティックス研究会, MAG-99-69
- 15) 石田昌義, 稲永章子, 本田厚人, 大山 勇: 電気学会回転機研究会資料, RM-98-147
- 16) 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
- 17) 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 A*, **115**, 50, (1995)
- 18) 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 A*, **117**, 942, (1997)