

## 無方向性電磁鋼板の最近の進歩と応用特性

### Recent Progress in Non-Oriented Electrical Steels and Their Properties in Applications

石田昌義 川崎製鉄株式会社

M. Ishida, Kawasaki Steel Corporation

Recent progress in research on and development of new high-performance non-oriented electrical steels is described. This progress has been greatly promoted by a strong demand for high-efficiency motors to meet the current trends of energy conservation, environmental preservation, and higher performance in motors for applications in various fields. Material properties such as low iron loss, high flux density, and good workability are preferred in recent core applications such as brushless dc motors. In a series of studies on the application of core materials to motor core lamination, a brushless dc motor and an inverter-drive induction motor have been compared with respect to the direct dependence of the motor efficiency and partial losses on material magnetic properties such as iron loss and flux density, and a clear-cut difference has been found. Direct observation of local magnetic properties on the surface of an operating induction motor has also been attempted.

**Key words:** non-oriented electrical steel, iron loss, flux density, motor, core, efficiency, torque, frequency

#### 1. はじめに

無方向性電磁鋼板は、発電機、モータなどの鉄心材料として用いられ、今日の高度電化社会を支える重要な磁性材料である。一方、省エネルギー、省資源、地球環境保全政策などの観点から<sup>1)</sup>、各種のモータに対する高性能化・省エネ化への要求は、近年ますます厳しくなっている<sup>2)</sup>。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った特性の改善が強く求められ、これに対応することによって近年大きな進歩を見せている。このような各種モータの性能はエレクトロニクス、材料、シミュレーション技術などの進歩に伴って著しく向上してきているが、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設計が今後ますます重要になると考えられる。

本稿では、上に述べた観点から最近の無方向性電磁鋼板の進歩を概観するために、無方向性電磁鋼板の種類と基本特性、用途、さらに磁気特性支配要因を概説した後、モータの高性能化への要求に対応して新しく開発された電磁鋼板を紹介し、ついでモータ機種に応じた電磁鋼板の最適適

用、電磁鋼板に適合した最適設計を目的としたモデルモータによる電磁鋼板評価技術について述べる。

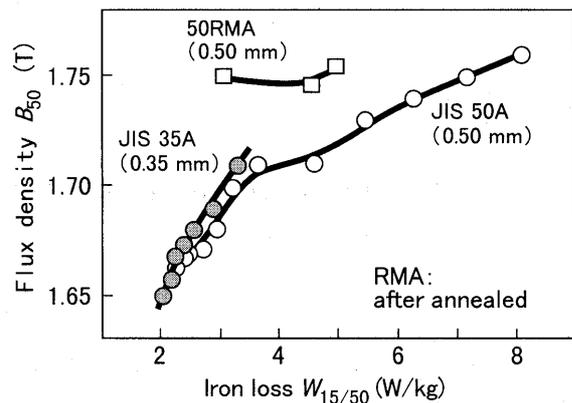
#### 2. 無方向性電磁鋼板の基本特性、種類と用途

無方向性電磁鋼板は通常約3%以下のSiを含有するFe基合金であり、結晶粒は鋼板面内でほぼランダムに配向している。その結果、鋼板面内の磁化特性の異方性が小さく、面内のどの方向に磁化された場合にも高い磁束密度を示すことが特徴である。そのため、モータ、発電機など回転機の鉄心をはじめ、小型の変圧器や電磁スイッチ、電磁石の鉄心、磁気シールドなど、種々の方向に磁化される用途に広く利用される。添加されたSiは鋼板の電気抵抗を増加させ、交流磁化された場合に生じる鉄損を著しく減少させる効果があるため、特に交流磁化を扱う用途に適している。

JIS規格においては、無方向性電磁鋼板の鉄損値は1.5 T, 50 Hzにおける値  $W_{15/50}$ 、磁束密度は磁界の強さ5000 A/mにおける値  $B_{50}$  が用いられる。2000年に改正された最新のJIS規格<sup>3)</sup>では、0.35 mm, 0.50 mm, 0.65 mmの3種類の板厚と鉄損値に応じて35A210~440, 50A230~1300, 65A800~1600の24種類が規定されている。

**Table 1** Magnetic properties of the non-oriented electrical steel sheet specified in JIS C 2552 (2000)

Class	Nominal thickness mm	Density kg/dm <sup>3</sup>	Iron loss $W_{15/50}$ W/kg	Magnetic flux density $B_{50}$ T	N.B.
35A210	0.35	7.60	2.10 max.	1.60 min.	New
35A230		7.60	2.30 max.	1.60 min.	
35A250		7.60	2.50 max.	1.60 min.	
35A270		7.65	2.70 max.	1.60 min.	
35A300		7.65	3.00 max.	1.60 min.	
35A360		7.65	3.60 max.	1.61 min.	
35A440		7.70	4.40 max.	1.64 min.	
50A230	0.50	7.60	2.30 max.	1.60 min.	New New
50A250		7.60	2.50 max.	1.60 min.	
50A270		7.60	2.70 max.	1.60 min.	
50A290		7.60	2.90 max.	1.60 min.	
50A310		7.65	3.10 max.	1.60 min.	
50A350		7.65	3.50 max.	1.60 min.	
50A400		7.65	4.00 max.	1.61 min.	
50A470		7.70	4.70 max.	1.62 min.	
50A600		7.75	6.00 max.	1.65 min.	
50A700		7.80	7.00 max.	1.68 min.	
50A800		7.80	8.00 max.	1.68 min.	
50A1000		7.85	10.00 max.	1.69 min.	
50A1300		7.85	13.00 max.	1.69 min.	



**Fig. 1** Typical iron losses at 1.5 T, 50 Hz  $W_{15/50}$  and flux densities at 5000 A/m  $B_{50}$  of non-oriented electrical steels.

Table 1 に板厚 0.35 mm および 0.50 mm の無方向性電磁鋼帯の鉄損、磁束密度の規格値を示す。低鉄損化への要求に対応して、最高グレードの 35A210, 35A230, 50A230 の 3 種類 (表中 New と付記) が今回追加された。規格記号の先頭の数字 2 桁は呼称厚さ (mm) の 100 倍を示し、「A」は無方向性電磁鋼帯を表す記号、続く 3 桁の数字は  $W_{15/50}$  (W/kg) の最大値の 100 倍を示す。

Fig. 1 に無方向性電磁鋼帯の鉄損  $W_{15/50}$  と磁束密度  $B_{50}$  (いずれも代表値) の関係を示す。一般に、高級品は Si 含有量が多く低鉄損であり、低級品は Si 含有量が少なく鉄損が高い。磁束密度は Si 含有量が少ないほど増加する傾向を示す。飽和磁束密度は Si 含有量にほぼ対応し、純鉄に近い 2.15 T 程度の値から、最も Si の多い成分系での 2 T 弱までの値をとる。

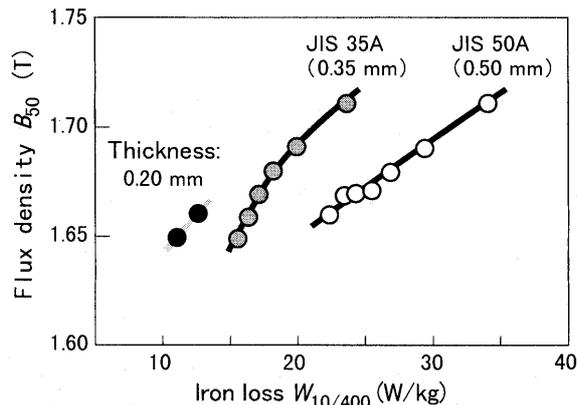
図中の RMA は歪取焼鈍後に高い磁束密度と低い鉄損を実現できる後述の新材料である。

通常、発電機などエネルギー効率が重視される大型機器では、電力損失を最小限とするために低鉄損の高級品が使用される。一方、家庭用電気機器などに用いられる小型モータや、駆動力・制御性が重視される産業用モータなどでは、従来 Si 含有量の少ない低品位の材料が主として用いられてきたが、近年では省エネルギー・環境適合性・高機能化への対応のため、機器の高効率化に有効な高級材に急速にシフトしてきている<sup>2)</sup>。

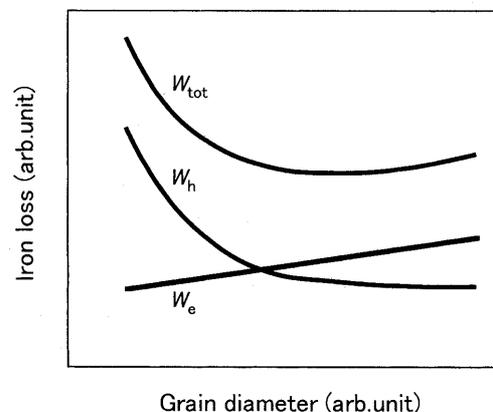
### 3. 無方向性電磁鋼帯の磁気特性を支配する要因

#### 3.1 元素添加量

電磁鋼帯の鉄損は渦電流損とヒステリシス損に分離されるが、渦電流損はさらに一様磁化を前提した古典渦電流損と磁区構造に依存する異常渦電流損に分けられる。古典渦電流損は、励磁周波数、板厚、磁束密度の 2 乗に比例し、比抵抗に反比例する。したがって、Si あるいは Al などの比抵抗増加元素を添加することによって、渦電流損を減少させることができる。同時に、 $\alpha$ - $\gamma$  転移温度を上昇させて



**Fig. 2** Typical iron losses at 1.0 T, 400 Hz  $W_{10/400}$  and flux densities at 5000 A/m  $B_{50}$  of non-oriented electrical steels with three different sheet thicknesses.



**Fig. 3** Influence of the grain diameter on the hysteresis loss  $W_h$ , eddy current loss  $W_e$ , and total loss  $W_{tot}$ .

$\alpha$  単相での高温焼鈍による粒成長を図ることができるため低鉄損化に有利となる。一般に低鉄損の高級品ほど Si, Al の添加量が多い。

#### 3.2 板厚

上述のように鉄損低減には板厚の低減が有効である。特に板厚低減は元素添加のように磁束密度を低下させることがほとんどない点有利である。Fig. 2 は 1.0 T, 400 Hz における鉄損  $W_{10/400}$  と磁束密度  $B_{50}$  の関係を示す。この図から明らかなように、薄厚材は特に高周波鉄損が大幅に減少することが特徴的である。

#### 3.3 結晶粒径

無方向性電磁鋼帯においては、結晶粒径が大きいほど磁区幅が広がるために異常渦電流損が増加し、一方、磁壁移動を阻害する粒界の密度が減少するためにヒステリシス損は減少する<sup>4)</sup>。この両者と全鉄損に及ぼす結晶粒径の影響をスキマティックに Fig. 3 に示す。図から明らかなように、渦電流損とヒステリシス損との競合によって、全鉄損が最小となる最適結晶粒径が存在する。

高級品では最適粒径は 150  $\mu\text{m}$  程度と大きいために、結

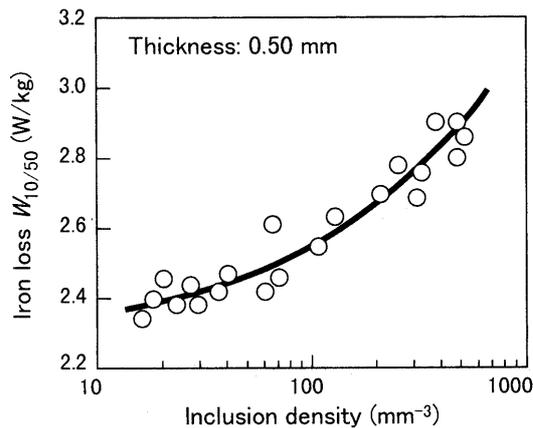


Fig. 4 Influence of the inclusion number density on the iron loss.

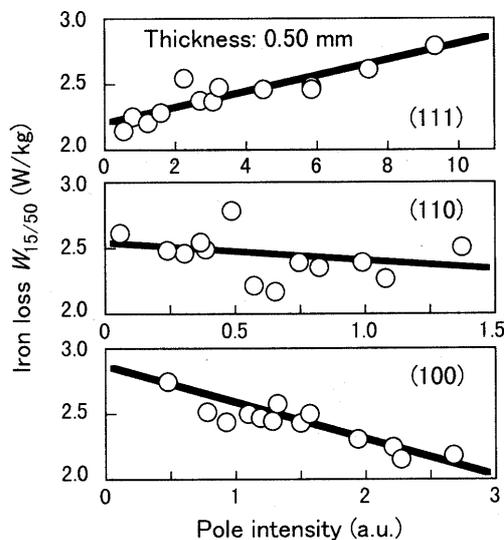


Fig. 5 Influence of (111), (110), and (100) pole intensities on the iron loss.

晶粒成長を妨げる介在物、微細析出物を低減することが重要となる。

### 3.4 析出物・介在物

鋼中に存在する硫化物、酸化物、窒化物などの析出物や介在物は、磁壁移動を妨げてヒステリシス損を増加させるほか、熱処理時の粒成長を妨げることによって間接的にも磁気特性を劣化させる<sup>5)</sup>。Fig. 4に示すように、このような析出物・介在物はその総体積を低減させるとともに、粗大化によって悪影響を抑制することが可能である。

### 3.5 集合組織

電磁鋼板の鉄損に及ぼす集合組織の影響を Fig. 5に示す<sup>5)</sup>。(100)面反射強度が強いほど鉄損は減少し、(110)面は中立的であるが、(111)面反射強度が強い場合には鉄損は増加する。このことは磁化容易軸である[100]方向が鋼板面内に多く存在する(100)面配向が磁気特性上優れていることを示している。

## 4. 新しい無方向性電磁鋼板

### 4.1 極低鉄損電磁鋼板

1999年に改正省エネ法が施行され、エアコンや冷蔵庫などのコンプレッサモータの高効率化が必須となり、従来の誘導モータからブラシレス DC モータへの移行とともに低鉄損電磁鋼板への要求が強まってきている。また、電気自動車、ハイブリッド自動車用駆動モータも、排ガス規制のクリアや燃費向上のために高効率化が極めて重要であり、国内ではブラシレス DC モータが多く採用されているため、鉄心材料としても低鉄損が強く要求される分野である。

最高度の低鉄損化を実現するためには、比抵抗を高めて渦電流損を低減するために Si, Al を最大限添加するとともに、溶鋼の高純度化、集合組織制御、鋼板面の酸化抑制などによりヒステリシス損を低減するなど、高度な製造技術が必要であり、これらの適用によって 50A230, 35A210 が実現している。

### 4.2 歪取焼鈍後低鉄損電磁鋼板

エアコンや冷蔵庫などのコンプレッサモータは稼働率が高く、家庭での電力消費に占める比率が高いため、高効率化の要請が強い。そのため従来から、打抜き加工後の歪みによる磁気特性劣化を回復させ、高効率化を図るために、鉄心に対して歪取焼鈍が行われることが多かった。

そこで、この歪取焼鈍を利用して結晶粒成長を促進することにより、焼鈍後の特性が従来の電磁鋼板に比べて低鉄損で、かつ高磁束密度とすることのできる電磁鋼板が開発されている<sup>6)</sup>。Fig. 1における RMA がその製品例である。その製造プロセスにおいては、析出物を粗大化させ、数密度を低減する新しい析出物制御方法が適用されている。

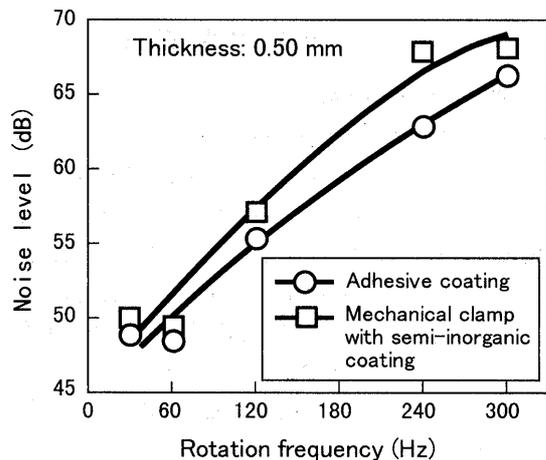
この製品は、歪取焼鈍後の鉄損と磁束密度が保証され、焼鈍後には JIS 規格品に比べていずれの特性にも優れることが特長である。

### 4.3 接着コーティング

電磁鋼板の表面に施されるコーティングは、積層間の絶縁性を付与するとともに、打抜き性、溶接性の確保などの機能を有する。しかし、積層時にかしめ、溶接などの接合方法が適用できない用途、鋼板積層間の気密性が要求される用途などには加熱接着が可能な有機接着樹脂製の接着コートが開発されている<sup>7), 8)</sup>。歪取焼鈍は不可能であるが、通常の上昇範囲では接着強度、層間絶縁などの機能を維持し、打抜き性に優れることが報告されている。Fig. 6に示すように、ボルト締めコアに比べて接着コアでは大幅に騒音が抑制されるというメリットがある<sup>9)</sup>。

### 4.4 良加工性電磁鋼板

モータ鉄心は通常打抜き加工により作製されるが、特にティース部などでは加工影響部の体積比率が大きいため磁気特性の劣化が著しい。鋼中 S の増加によりこのような加



**Fig. 6** Comparison of adhesive coating clamping and mechanical clamping with respect to the noise level of model motor cores. The rotor was fixed to eliminate mechanical noise.

工劣化を低減することができる電磁鋼板が開発されている<sup>9)</sup>。せん断による磁束密度の劣化が小さく、打抜き性、被削性に優れることが報告されている。

#### 4.5 高周波用電磁鋼板

近年、インバータ電源の大容量化などにより電流高調波の問題が顕在化しており、ノイズ除去効果が大きいリアクトルを用いたアクティブフィルタが使用されるようになってきている。このリアクトル鉄心には、高速スイッチングによる高周波鉄損の抑制が必要となるため、高周波特性に優れた6.5%ケイ素鋼板が用いられ、小型化、低騒音化の効果が報告されている<sup>10)</sup>。また、板厚方向にSi濃度分布をもち、残留磁束密度の低い低残留磁気鋼板、さらに高周波特性が良好な高周波超低鉄損鋼板が開発されている<sup>11)</sup>。

一方、JIS規格品からの薄厚化の方向では、先述の0.20 mm厚、さらには0.15 mm厚の極薄電磁鋼板などが高速回転小型モータ、マイクロモータなどに適する高周波材料として製品化されている。

### 5. モデルモータによる無方向性電磁鋼板の評価

最近では、上述したような多種多様な電磁鋼板が開発されており、同時に、コーティング、機械特性などに関しても従来からバリエーションが多いため、その最適使用条件も千差万別であり、適用上、細心の注意が必要である。

ここでは、ブラシレスDCモータと誘導モータの特性、特にモータ効率の向上に有効な素材適用条件を明らかにするために、モータ特性と鉄損、磁束密度などの素材磁気特性との関連について述べる。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。

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<sup>12)</sup>、またインバータ駆動された3相誘導モータ<sup>13)</sup>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が、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が顕著に減少すると考えられるため、鉄心材料に要求される最適特性条件が変化すると考えられる<sup>14)</sup>。

ステータ鉄心材料としてはJIS規格材および歪取焼鈍後低鉄損材RMA<sup>®</sup>を用いた。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。

#### 5.1 ブラシレスDCモータにおける評価

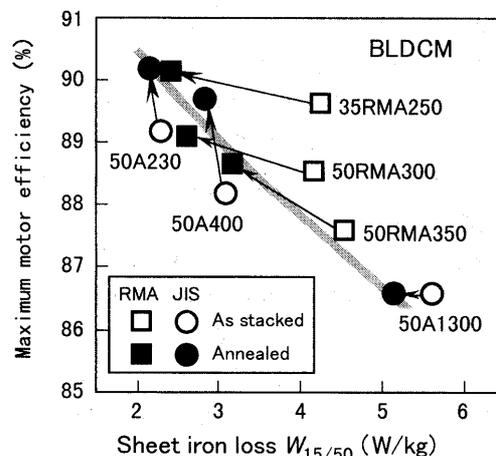
供試ブラシレスDCモータ(BLDCM)には市販のブラシレスDCモータおよびその駆動回路系を用いた。定格出力は300W、ロータは表面磁石型(希土類磁石、8極)である。

テストモータ駆動電圧はPWM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。

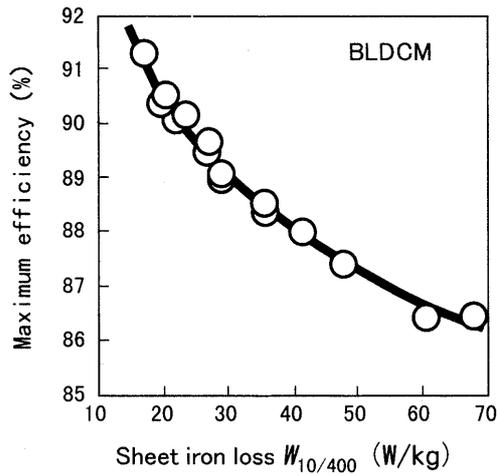
モータ効率最大値に及ぼす素材鉄損 $W_{15/50}$ の影響をFig. 7に示す。低鉄損素材ほどモータ効率は高くなる傾向がある。焼鈍後では特に相関がよく、 $W_{15/50}$ の1 W/kgの低減によりモータ効率は約1.3%向上する。一方、未焼鈍材については、JIS規格材の最大効率は焼鈍材のラインよりも低く、RMAでは高くなる傾向を示す。

400 Hzにおける鉄損 $W_{10/400}$ (リング試料測定値)が最大効率に及ぼす影響をFig. 8に示す。さらに低鉄損の素材のデータが付加してある。最大効率は歪取焼鈍の有無にかかわらず $W_{10/400}$ によってほぼ一意的に決定されることがわかる。したがって、このモータの効率に対しては比較的高周波の鉄損が支配的に影響しているといえる。

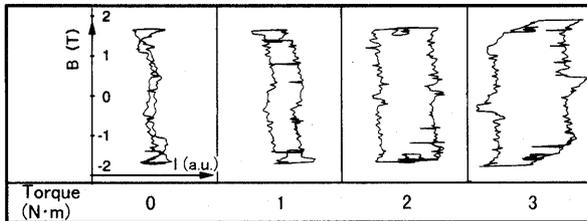
最大モータ効率となる回転数は1500 rpm前後であり、相当する基本周波数は100 Hz前後であるにもかかわらず高周波鉄損が強く影響している。その原因としては、磁束高調波の影響が考えられる。負荷トルクを変化させて採取



**Fig. 7** Relation between the maximum efficiency of a brushless dc motor and the sheet iron loss.



**Fig. 8** Influence of the 400-Hz sheet iron loss  $W_{10/400}$  on the maximum motor efficiency of a brushless dc motor.



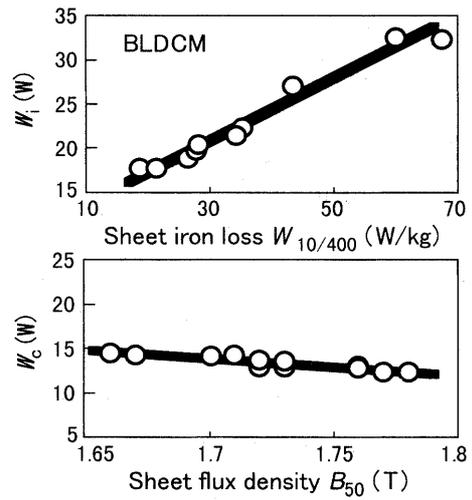
**Fig. 9** Flux density vs. exciting current hysteresis curves obtained in a tooth of a brushless dc motor core.

したティース部の磁束密度波形と電流波形により形成されるヒステリシスループを Fig. 9 に示す<sup>15)</sup>。ヒステリシスループには数百 Hz のパルス状の高調波成分が重畳して部分的にマイナーループを形成している。このマイナーループの面積は無負荷時のループ面積（無負荷損に対応）に比べても無視できない大きさになっている。このような高調波成分の存在がモータ効率に影響したことが示唆される。

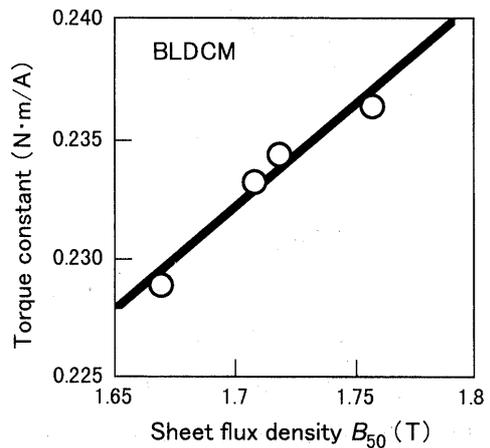
出力 400 W における損失分析により分離されたモータ鉄損と素材鉄損  $W_{10/400}$ 、銅損と素材磁束密度  $B_{50}$  の相関を Fig. 10 に示す。損失分析は文献 16 の方法に準じて行った。モータ鉄損は  $W_{10/400}$  と強く相関し、銅損は  $B_{50}$  と弱い相関を示す。

以上から、今回のブラシレス DC モータにおいては、素材鉄損  $W_{10/400}$  はモータ鉄損を通じて、また素材磁束密度  $B_{50}$  は銅損を通じてモータ効率に影響を及ぼすが、このうち素材鉄損の影響が支配的であり、素材磁束密度の影響は小さいと判断できる。

数種の素材を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. 11 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。モータ効率に対しては素材磁束密度の影響は明確ではないが、トルク特性に対しては素材磁束密度の効果が現れているといえる。



**Fig. 10** Relation between the motor iron loss  $W_i$  and sheet iron loss  $W_{10/400}$ , and between the copper loss  $W_c$  and sheet flux density  $B_{50}$ , both obtained from loss analysis of a brushless dc motor.



**Fig. 11** Influence of the sheet flux density  $B_{50}$  on the torque constant of a brushless dc motor.

### 5.2 誘導モータにおける評価

誘導モータについても上記と同様に各種鉄心材料を用いてモータを作製し、モータ特性に及ぼす鉄心材料特性の影響を調査した<sup>13)</sup>。

供試誘導モータ (IM) として定格出力 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。無負荷回転数はブラシレス DC モータにおいて最大効率となる条件に近い 1200 rpm とし、回転数スイープによりモータ特性を測定した。

この誘導モータにおける最大効率に及ぼす素材鉄損  $W_{15/50}$  の影響を Fig. 12 に示す。ここでは焼鈍後の鉄心を用いた。JIS 規格材、RMA 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、ある程度以上に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

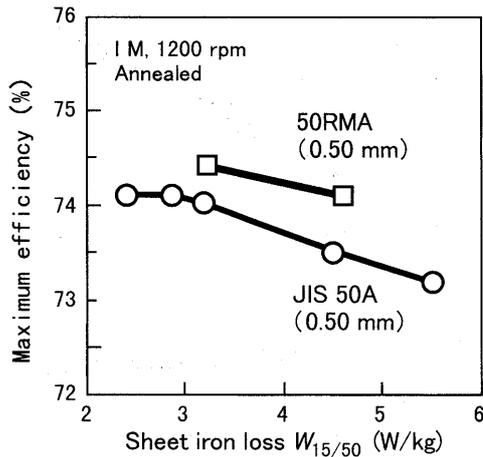


Fig. 12 Influence of the sheet iron loss  $W_{15/50}$  on the maximum motor efficiency of an inverter-drive induction motor.

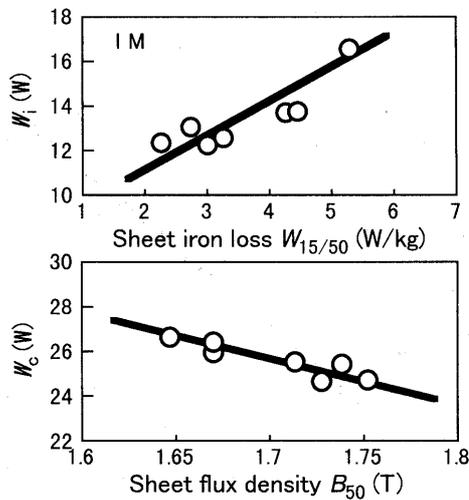


Fig. 13 Relation between the motor iron loss  $W_i$  and sheet iron loss  $W_{15/50}$ , and between the copper loss  $W_c$  and sheet flux density  $B_{50}$ , obtained from loss analysis of an inverter-drive induction motor.

と異なり、鉄損値が同等の JIS 規格材に比べて磁束密度  $B_{50}$  が高い素材である RMA が明らかにより高い効率を示す。

前記の 1200 rpm におけるモータ損失を鉄損と銅損に分離し、素材特性と比較した結果を Fig. 13 に示す。モータ鉄損は素材鉄損  $W_{15/50}$  と、またモータ銅損は素材磁束密度と、それぞれ強い相関を示す。Fig. 10 と Fig. 13 とを比較してみると、誘導モータの場合 (Fig. 13) には、ブラシレス DC モータの場合 (Fig. 10) に比べて銅損の比率が高く、しかも素材  $B_{50}$  に対する依存性がより強いことがわかる。

誘導モータにおいて最大効率が素材磁束密度  $B_{50}$  に強く依存するという結果は、今回の測定条件では、誘導モータの損失に占める銅損の比率がブラシレス DC モータよりも高く、かつ  $B_{50}$  に対する銅損の依存性がより強いために

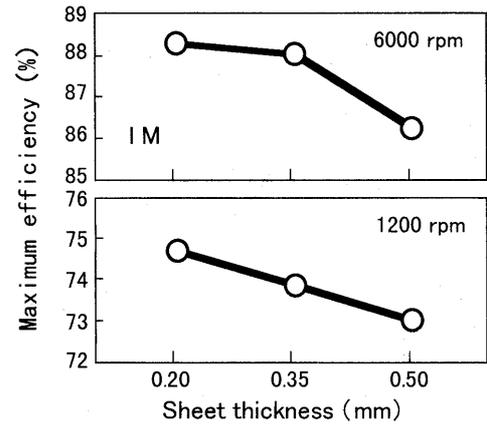


Fig. 14 Influence of the sheet thickness on the maximum motor efficiency of an inverter-drive induction motor.

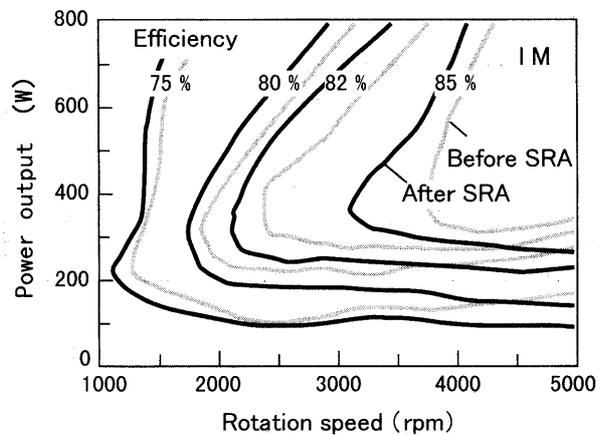


Fig. 15 Influence of stress-relief annealing on the efficiency of an inverter-drive induction motor.

$B_{50}$  の影響がより強く現れたことに起因すると考えられる。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。同様に、添加元素量が多い高級材を用いた場合に効率が飽和傾向となった現象は、 $B_{50}$  の低下によって銅損が増加したためであると説明される。

上述のような鉄損と磁束密度のトレードオフを離れた、鉄損単独の効果を確認するため、板厚の変化に対するモータ効率の依存性を Fig. 14 に示す。各素材の  $B_{50}$  は板厚にかかわらずほぼ一定である。この場合には、回転数によらず板厚の低減に伴って効率が向上することが示される。同様に、鉄心の歪取焼鈍 (SRA) による低鉄損化の効果を効率マップの形で Fig. 15 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わかる。したがって、鉄心材の鉄損低減そのものは誘導モータにあっても効率の向上に有効であり、中でも薄厚化は効果が大きく、また磁束密度もほとんど変化しないため、加工性など他の条件を阻害することがなければ理想的な手段であるといえる。

上述のように誘導モータにおいても鉄心材の鉄損低減は有効である。このような素材鉄損に対する依存性は、ロータにかご型導体をもたないスイッチトリラクタンスモータ<sup>17), 18)</sup>やシンクロナスリラクタンスモータ<sup>19)</sup>, あるいは集中巻線を施した分割コアモータ<sup>2)</sup>, さらに数万 rpm といった高速回転モータなどにおいてより強く現れると考えられる。これらのモータ機種では、また材料の機械的強度や、加工性などに特別な特性が要求されることにもなる。詳細はそれぞれの文献を参照されたい。

### 5.3 モータ鉄心局所磁気特性分布の動的評価<sup>20)</sup>

本項においては、回転状態のモータ鉄心における磁氣的挙動の直接測定を目的として、探針法とホール素子による磁界測定法を用いた局所磁気特性測定法を開発し、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結果を述べる。局所磁束密度測定に用いた探針法は、電磁鋼板における局所磁気測定に用いられており、鋼板内部の磁化状態や鉄損の発生状況を実験的に解明するうえで極めて有効な手段である<sup>21), 22)</sup>。

本報で試みた方法は、モータ鉄心材料としての無方向性電磁鋼板の最適適用について微視的な視点からの解明にも寄与できると考えられる。

ここでは、定格出力 600 W の単相誘導モータ鉄心を測定対象に用いた。鉄心材料として 50A400 相当材を用い、コアに積層後、焼鈍、巻線を施した。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、ティース上に空隙を設けてある。

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、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。

$$W_{2d} = (f/\rho) \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} = W_r + W_\theta$$

$$W_{r,\theta} = (f/\rho) \oint H_{r,\theta} dB_{r,\theta} \quad (\text{下付記号同順}).$$

ここで  $f$  は同期周波数、 $\rho$  は電磁鋼板の密度を示す。周回積分は同期周期 1 回分について行う。

Fig. 16 に無負荷時における鉄損  $W$  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。

$W_r$  は、ティース部で大きい値を示す。一方、 $W_\theta$  は全体的に小さいが、ティース先端部で大きくなる部分がある。

$W_{2d}$  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。

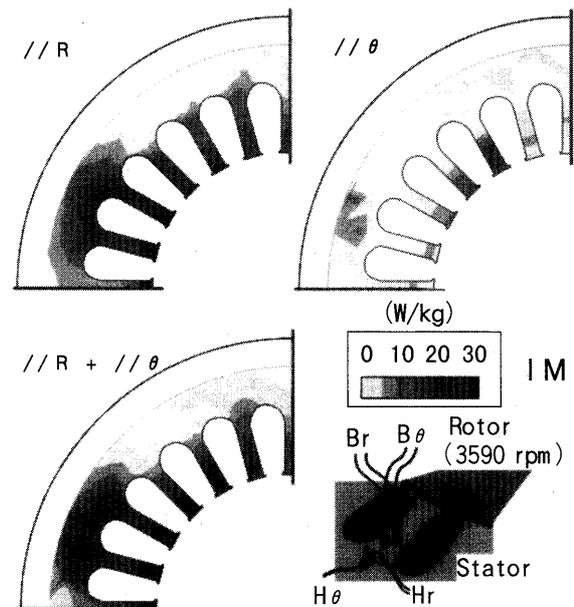


Fig. 16 No-load loss distribution measured on the surface of an induction motor stator core sinusoidally excited, with the rotor rotating at a speed of 3590 rpm.

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。

## 6. おわりに

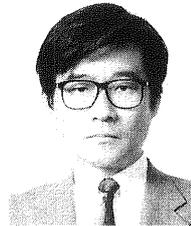
近年の各種モータにおける高性能化、省エネルギー、対環境性といった要請に対応して、低鉄損、高磁束密度、高周波特性などの磁気特性の向上に加え、加工性、低騒音性、耐食性、環境適合性など、さまざまな性能に優れた無方向性電磁鋼板が開発されつつある。エネルギー効率だけを考えると、総電力消費量のうち 52% をモータが占めている (1996 年度国内用途別電力消費統計) ことを考えれば、モータの高効率化に貢献する電磁鋼板の特性向上の効果は極めて大きいといえる。今後さらに多くの高い機能性を備えた材料が開発されてくると考えられるが、同時にこれらの材料の特性を機器特性として最大限に引き出し、あるいはひるがえって材料開発に活用する材料エンジニアリングの分野も今後並行してさらに発展していくものと期待される。

## 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) 電気学会技術報告, 第 744 号, 「小型モータの高性能化」(1999).
- 3) 日本工業規格 JIS C 2552 (2000).
- 4) K. Matsumura and B. Fukuda: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-20, 1533 (1984).
- 5) 松村 洽, 福田文二郎, 木下勝雄, 今井卓夫, 小畑良夫, 宮

- 崎重紀：川崎製鉄技報，**15**, 208 (1983).
- 6) 高島 稔, 篠原雅典, 本田厚人, 岡村 進, 森戸延行：まてりあ，**36**, 385 (1997).
  - 7) 開道 力, 脇坂岳顕, 溝上正人, 竹田和年, 棟田孝司：電気学会回転機研究会資料，RM-97-149 (1997).
  - 8) 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資料，MAG-99-69 (1999).
  - 9) 屋鋪裕義, 土井光代, 石川皓巳, 本荘法之, 中山大成：まてりあ，**38**, 169 (1999).
  - 10) 高田芳一, 阿部正広, 田中 靖, 岡田和久, 平谷多津彦：まてりあ，**33**, 423 (1994).
  - 11) 浪川 操, 高田芳一：電気学会半導体電力変換研究会資料，SPC-98-117 (1998).
  - 12) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, **12**, 141 (1990).
  - 13) 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).
  - 14) 石田昌義, 志賀信勇, 河野正樹, 本田厚人, 小松原道郎, 大山 勇：日本 AEM 学会誌，**7**, 248 (1999).
  - 15) 志賀信勇, 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) に掲載予定.
  - 16) 澤畑隆夫, 宮川雅春, 伊藤 浩, 守本康司, 嶋崎哲夫: *National Tech. Rep.*, **33**, 617 (1987).
  - 17) 會澤敏満, 西濱和雄, 沢 孝一郎：電気学会回転機研究会資料，RM-98-152 (1998).
  - 18) 中村和平, 家名田敏昭, 渡辺忠昭, 一ノ倉 理：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-00-101 (2000).
  - 19) 本田幸夫, 川野慎一郎, 桐山博之, 桧垣敏郎, 森本茂雄, 武田洋次：電気学会論文誌 D, **118-D**, 1177 (1998).
  - 20) 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).
  - 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 A, **115-A**, 50 (1995).
  - 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 A, **117-A**, 942 (1997).

(2000年10月9日受理)



石田昌義 いしだ まさよし

昭60 東北大学大学院理学研究科博士後期課程物理学第二専攻修了, 昭61 川崎製鉄(株)入社, 現在に至る.

専門 磁性材料

(理博)