

圧粉磁心用絶縁被覆純鉄粉（電磁郎[®]）

Insulated Pure Iron Powder for Soft Magnetic Composite Core (Denjiro[™])

1. はじめに

カーボンニュートラル社会実現に向け、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換や自動車電動化が急速に進むなかで、半導体のスイッチングにより電力制御を効率よく行うパワーエレクトロニクス（パワエレ）は、この変革の鍵を握る重要技術といえる。一般にスイッチング周波数を高めるほどパワエレ機器の小型化に有利となる。従来は半導体の制約により大容量電源の駆動周波数は数百 Hz 程度に留まっていたが、最近では半導体が高性能化し、太陽光発電用パワーコンディショナや EV 用インバータなど比較的大容量のパワエレ機器も数 kHz～数十 kHz で駆動され始めている。機器の小型化に向け、そこに使われるモータやリアクトルにも、飽和磁束密度が高く高周波鉄損の低い磁心材料が求められている。

現在 JFE スチールが圧延・焼鈍プロセスで生産している電磁鋼板は、主に数百 Hz 以下の周波数域で、産業機器用モータや送配電用変圧器の積層鉄心（または巻鉄心）として広く使われている。JFE 独自技術の CVD プロセスで生産している高い素電磁鋼板は、数百 Hz～数十 kHz の周波数域で、とくに低騒音性や高効率性を重視する電気機器の磁心として使われている。さらに、JFE ケミカルが生産している MnZn フェライトコアは、主に 100 kHz を超える周波数域で、電子機器のトランスやインダクタ用の焼結磁心として使われている¹⁾。

一方、数 kHz～数十 kHz で駆動されるパワエレ機器を想定した場合、電磁鋼板は渦電流損が大きいため磁心の発熱増大が懸念される。高い素電磁鋼板は候補材の一つであるものの、プロセスの性質上、高付加価値分野をターゲットとしている。MnZn フェライトコアは高周波損失が低く量産にも適する反面、飽和磁束密度が低い大型化が避けられない。

このような状況から、鉄粉を絶縁被覆して固めた圧粉磁心は、フェライトコアより飽和磁束密度を高く、電磁鋼板より渦電流損を小さくでき、比較的容易に量産に対応できるため、上記パワエレ機器の有力な磁心候補の一つとなりうる。そこで JFE スチールは、粉末冶金用鉄粉製造で培った水アトマイズ技術を応用し、このたび圧粉磁心用の絶縁被覆純鉄粉（電磁郎[®]）を開発した¹⁾。ここでは、電磁郎の主な特長、インバータ励磁下の鉄損評価、所定条件下でのアキシシャルギャップモータの試作・評価例について紹介する。

2. 絶縁被覆純鉄粉（電磁郎[®]）の特長

電磁郎は、磁心のヒステリシス損低減のため、不純物量低減による結晶粒粗大化や球形化などの粒子設計²⁾が施されている。電磁郎の外観と代表的な粒子形態を写真 1 に示す。粒子球形度が低い場合、加圧成形時にひずみが入りやすくヒステリシス損が増大するため、電磁郎製造の際は水アトマイズ条件を適正化し、一般の粉末冶金用鉄粉より球形度を高めている。一方、渦電流損低減のため、平均粒子径は 100 μm 以下としている。さらに環境負荷低減の観点から、有機溶剤を用いない処理法で表面に絶縁被覆を施している。

圧粉磁心の磁気特性評価は、電磁郎を 980 MPa で加圧成形し、600 $^{\circ}\text{C}$ 窒素中で熱処理したリング試料（外径 38 mm/内径 25 mm/厚さ 6.0 mm、密度 7.60 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）を用いて行った。

図 1 に直流磁化曲線を示す。磁束密度 B が 1.6 T を超える領域において比較的大きな傾きを有することから、電磁郎は大電流域まで大きなインダクタンスが必要とされる直流リアクトルの小型化に有効と期待される。

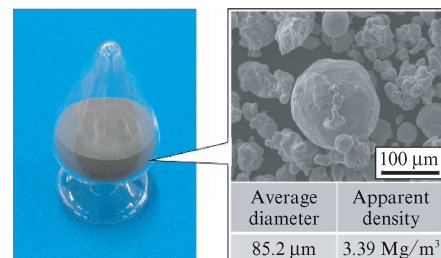


写真 1 絶縁被覆純鉄粉（電磁郎[®]）と代表的な粒子形態
Photo 1 Insulated pure iron powder (Denjiro[™]) and typical particle morphology

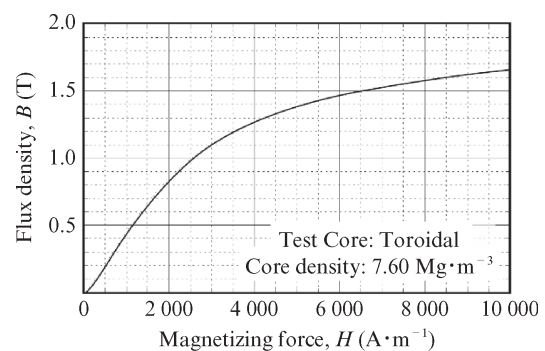


図 1 電磁郎[®] 圧粉磁心の直流磁化曲線
Fig. 1 D.C. magnetization curve of Denjiro[™]

2023 年 3 月 20 日受付

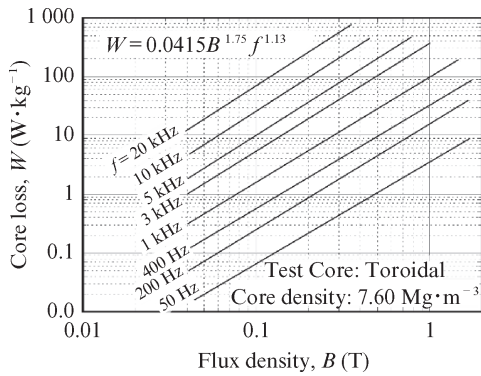


図2 電磁郎®圧粉磁心の高周波鉄損特性

Fig. 2 High-frequency core loss curves of Denjiro™

表1 電磁郎®と電磁鋼板の鉄損比較

Table 1 Core loss comparison of Denjiro™ and electrical steel sheet

	Core loss (W·kg ⁻¹)				
	W _{10/50}	W _{10/400}	W _{10/1k}	W _{2/5k}	W _{1/10k}
Denjiro™ (SMC core)	3.7	32	90	41	28
Electrical steel sheet: 35JN360	1.3	20	80	51	42

SMC: Soft magnetic composite

図2に、JIS準拠の正弦波励磁条件で測定した鉄損特性を示す。測定データからスタインメッツ型の鉄損回帰式として、 $W=0.0415B^{1.75}f^{1.13}$ が得られた。ここで、 W (W·kg⁻¹)は鉄損、 B (T)は励磁磁束密度、 f (Hz)は励磁周波数である。

表1に、同条件で評価した板厚0.35 mmの電磁鋼板(35JN360)との鉄損比較例を示す。1 kHzを超える高周波側において電磁郎の方が低鉄損となる。これは電磁鋼板に比べて圧粉磁心の渦電流損が小さく、高周波側での鉄損増加が抑制されるためである³⁾。このように、数kHz以上の高周波用途において、電磁郎は有力な磁心材料の一つとみなせる。

また、電磁郎は加圧成形でほぼ最終形状の磁心に加工でき、3次元で等方的磁気特性という特長を有するため²⁾、電磁鋼板では対応困難な小型複雑形状の磁心に好適といえる。

3. インバータ励磁下での鉄損評価

現在、高効率モータの多くは、定電圧のパルス幅を変調して交流出力を制御するPWM (Pulse Width Modulation) インバータシステムで駆動されている。従来のモータ設計では、正弦波励磁下で測定した磁性材料の鉄損データが使われてきたが、実際のインバータ出力は単純な正弦波交流ではなく、半導体のスイッチングに起因する高調波が含まれて

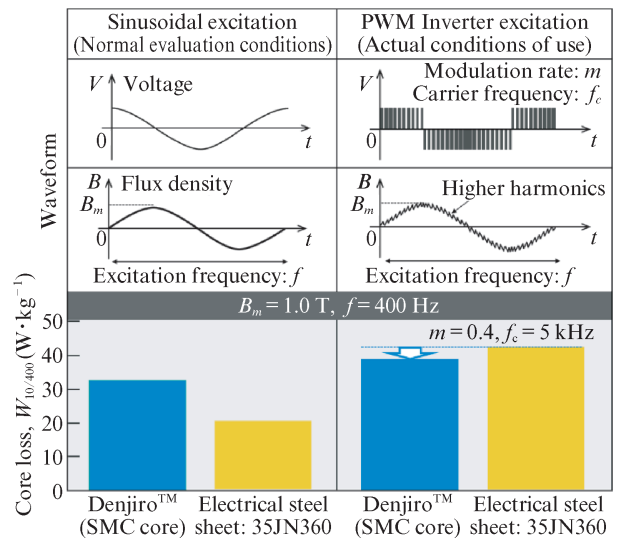


図3 正弦波励磁下とインバータ励磁下の鉄損比較

Fig. 3 Comparison of core loss under sinusoidal and inverter excitation

おり、その高周波成分による鉄損増加も無視できない。設計精度向上のため、最近ではPWM制御因子のキャリア周波数 f_c と変調率 m を指定したインバータ励磁鉄損の評価も行われている⁴⁾。

図3にSiCデバイス搭載のPWMインバータ励磁電源を用い、所定交流条件{磁束密度 $B=1.0$ T, 周波数 $f=400$ Hz}において正弦波励磁下とインバータ励磁下{キャリア周波数 $f_c=5$ kHz, 変調率 $m=0.4$ }で行った鉄損評価結果を示す。正弦波励磁下では、前章で示したとおり電磁郎より電磁鋼板の方が低鉄損であるが、インバータ励磁下では電磁郎の方が低鉄損となっている。これは電磁郎の渦電流損が電磁鋼板より小さく、インバータの高周波成分による鉄損増加が抑えられるためである³⁾。このようにインバータ用途を考えると、周波数1 kHz未満の交流条件においても、電磁郎は磁心材料の有力候補の一つと考えられる。

現在JFEスチールでは、正弦波励磁下の鉄損値を元に、PWMキャリア周波数と変調率の値を用いて比較的精度よくインバータ励磁下の鉄損値に換算する方法も検討中である。

4. アキシシャルギャップモータ試作・評価

半径方向の磁力で回転させる一般的なラジアルギャップモータと、軸方向の磁力で回転させるアキシシャルギャップモータの概形の比較を、図4に示す。構造上、アキシシャルギャップモータは大きなトルクを得やすく、モータの薄型化に有利とされている。しかし、三次元的な磁心設計が必要となるため、電磁鋼板の積層磁心での対応は難しく、現在実施例は少ない。これに対し電磁郎は、加圧成形により小型複雑形状の磁心を比較的容易に作製でき、得られた圧粉磁心の磁気特性も等方的であることから、アキシシャルギャップ

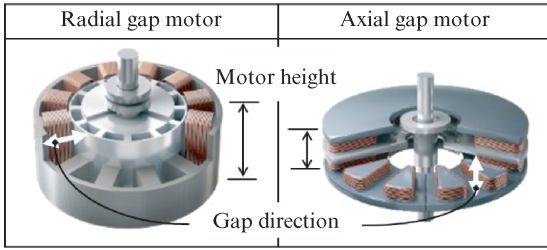


図4 モータ構造の比較

Fig. 4 Comparison of motor structures

表2 試作モータの仕様

Table 2 Specifications of prototype motor

Item	Specification
Driving	AC Synchronous
Configuration	Single rotor/Double stator, SPM
Number of slots/poles	24 (12×2)/14
Winding method	Concentrated winding
Max. efficiency	>92%
Max. torque	>4.5 N·m
Max. speed	~7 000 rpm

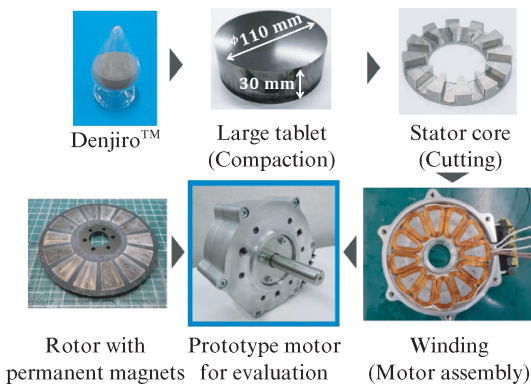


写真2 評価用モータ試作過程

Photo 2 Manufacturing process of axial gap motor

ブモータに適した磁心材料として期待される²⁾。

実際に電磁郎を使用した場合のメリットを定量化するため、市販EVより採取したエアコン用電動コンプレッサ（他社0.35 mm厚電磁鋼板使用/ラジアルギャップモータ）をモデルモータとして解析し、同等の効率、トルクが得られるように、電磁郎を用いたアキシシャルギャップモータとして小型化を検討した。表2にその基本仕様を示す。ここでアキシシャルギャップモータの構造は、シングルロータ/ダブルステータ型、14極24スロットとした。

写真2にモータ試作過程の概略を示す。本来、ステータの加工は電磁郎を専用の金型に入れ加圧成形するが、今回の試作では1 000トンプレス機を用いて面圧980 MPaで電磁郎を加圧成形し、 $\phi 110\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ （密度 $7.60\text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ）の大型タブレットとした後、切削加工により所定の形状とした。なお、モータの新規設計・組立、および永久磁石を含

表3 試作モータ評価結果

Table 3 Evaluation result of prototype motor

Item	Model motor (Radial gap)	Prototype motor (Axial gap)	
	Analysis	Design	Measurement
Core diameter (mm)	90	110	
Core weight (g)	1 270	760 (40%↓)	
Motor height (mm)	62	32 (48%↓)	
Max. efficiency %	92-94	94	93
Max. torque (N·m)	4.4	5.2	5.4

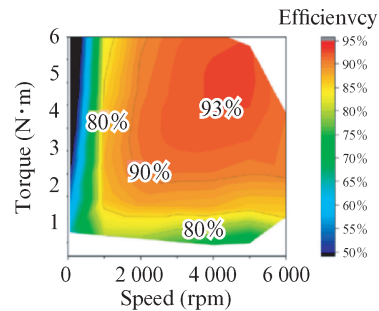


図5 試作モータの効率マップ（測定）

Fig. 5 Efficiency map of the prototype motor (measurement)

むロータの作製は、大学発ベンチャー企業の協力を得た。

表3に、モデルモータ解析値、アキシシャルギャップモータ設計値とともに、電磁郎を用いて試作したモータの評価結果を示す。ラジアル型のモデルモータに対し、今回のアキシシャルギャップモータは、あらかじめ電磁界シミュレーションを用い、重量で40%の軽量化、モータ高さで48%の薄型化が図れるように設計している。実際に試作したモータを計測した結果、設計で予測したとおり、最大効率93%、最大トルク $5.4\text{ N} \cdot \text{m}$ とモデルモータとほぼ同等の性能を発揮できた。

図5に、回転速度とトルクに対する効率マップ測定結果を示す。モータは様々な条件で駆動されるが、試作モータは比較的広い条件範囲で高効率であることがわかる。

アキシシャルギャップモータの普及に向けては、モータ設計の簡略化、寸法・組立精度向上、量産体制確立など課題はあるものの、本結果は現行モータの小型化・高効率化に対し、電磁郎が十分貢献していることを示している。

5. おわりに

今回、電磁郎®の活用例としてアキシシャルギャップモータの試作評価を紹介したが、他の磁性部品への展開も期待される。今後は、お客様への製品および基礎特性の提供のみならず、実使用条件を考慮した特性評価、写真2に示した大型タブレットの提供、モータの試作評価なども含め、お客様との技術交流を進めながら、新規材料開発、タイムリーな

ソリューション提案を図っていく予定である。

材料開発への応用. まてりあ. 2023, vol. 62, no. 2, p. 132-136.

4) 藤崎敬介編. モータ駆動システムのための磁性材料活用技術. コロナ社. 2018, 449 p.

参考文献

- 1) 尾田善彦, 山口広, 高下拓也, 吉田裕史. JFE スチールグループの磁性材料. JFE 技報. 2023, no. 52, p. 1-7.
- 2) 高下拓也, 平谷多津彦, 中村尚道. 保磁力発現機構定量化による圧粉磁心の低鉄損化指針提案. JFE 技報. 2023, no. 52, p. 55-61.
- 3) 高下拓也, 中村剛慶, 竹原万莉那. 純鉄圧粉磁心の保磁力定量解析と

〈問い合わせ先〉

JFE スチール 鉄粉商品部 営業室
TEL: 03-3597-4063 FAX: 03-3597-4567