研 究

圧粉磁心をローターに適用した DC ブラシモーターの特性

植田 正輝^{☆1}, 上ノ蘭 聡^{☆2}, 中村 尚道^{☆3}, 浅見 淳一^{☆4}^{☆1}JFE 技研(株)数値解析研究室, 〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1.^{☆2}JFE スチール(株)スチール研究所, 〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1 番地.^{☆3}JFE スチール(株)鉄粉セクター部, 〒100-0011 千代田区内幸町 2-2-3.^{☆4}東京都立産業技術研究所, 〒115-8586 北区西が丘 3-13-10.

Characteristics of DC Brush Motors with Rotors Made of Iron Powder Cores

Masateru Ueta^{☆1}, Satoshi Uenosono^{☆2}, Naomichi Nakamura^{☆3} and Junichi Asami^{☆4}^{☆1}JFE R&D Corporation, Numerical Simulation Lab., 1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki 210-0855, Japan.^{☆2}JFE Steel Corporation, Steel Research Laboratory, 1 Kawasaki-cho, Chuo-ku, Chiba 260-0835, Japan.^{☆3}JFE Steel Corporation, Iron Powder Business Planning Department, 2-2-3 Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0011, Japan.^{☆4}Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, 3-13-10 Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-8586, Japan.

Received October 28, 2005

SYNOPSIS

Three types of rotors were made and installed into a commercial brush DC motor. Motor performances were measured to know the effects of magnetic properties of rotor materials. The materials used as a rotor were two types of iron powder cores with flux densities of 1.60 T or 1.70 T at 10 kA/m and a lamination steel (SPCC) core with a flux density of 1.82 T, respectively. The efficiencies of the iron powder motors were 68% or 70% and that of the lamination steel motor was 64%, therefore the motor efficiency was improved by about 6%. Two types of iron powder motors and the lamination steel motor gave almost the same output torques at the speeds of 4,250 to 5,350 rpm, although the flux densities of the iron powder cores were smaller than that of the lamination steel core. These results indicated that the iron powder cores enhanced the performances of the brush DC motor.

KEY WORDS

Iron powder core, insulated iron powder, DC brush motor, output torque, efficiency

1 緒 言

鋼板を積層した積層磁心に代わるモーターコア材料として、磁心内での渦電流を抑えるために表面を絶縁処理した鉄粉を加圧成形して作製される圧粉磁心の研究が進められている¹⁻⁶⁾。これは、圧粉磁心が高い材料歩留りで製造できることに加え、磁気特性に異方性がある積層磁心と違って、磁気特性が等方的なため、磁心形状として、積層磁心では採用が困難な3次元形状を採用できるという特徴をもつためである¹⁻³⁾。しかし、圧粉磁心は積層磁心に比べ、透磁率、磁束密度などモーター出力に関係する特性が低い⁴⁾。そこで、モーターコアの形状を最適化して、圧粉磁心の磁気特性の低さをカバーし、積層磁心を用いたモーターと同等の出力を得ようとする研究が近年盛んに行われている^{5,6)}。

しかし、従来の研究は、圧粉磁心を用いたモーターと積層磁心を用いたモーターで設計を違えているものが専らであり、モーターの設計を同一とすることにより、設計の違いによる

影響を排除して、ローターコア材料の磁気物性がモーターの特性へ与える影響に関する報告は少ない。

本論文では、まず冷延鋼板(SPCC)製の磁心と2種の圧粉磁心の磁気特性を評価した結果を示し、さらにそれぞれの磁心から同一形状のローターを試作して、それらを市販のDCブラシモーターに組みこんでモーター特性の比較、評価を行った結果を示す。これらの結果を元にモーターコア材料の磁気特性の違いがモーター特性に与える影響の検討を行う。

2 実験方法

2.1 磁気特性測定用試料の作製と評価

ローターコア材料の特性を評価するため、リング形状の圧粉磁心並びにSPCC磁心試料を作製した。圧粉磁心の原料粉には水アトマイズ鉄粉(JIP 304AS)を用いた。JIP304ASの特性をTable 1に示す。鉄粉間を渦電流が流れるのを防ぐために、高い絶縁性を示す被覆が得られる無機化合物からなる材

Table 1 Properties of the iron powder used (JIP 304AS).

Particle size distribution (mass%)	Size (μm)	Content (%)	Chemical composition (mass%)	C	0.003
	<45	23.7		Si	0.01
	45~63	17.3		Mn	0.03
	63~75	8.2		P	0.007
	106~75	24.7		S	0.003
	106~150	20		O	0.06
	150~180	4.7	Apparent density (Mg/m^3)		3.06
	180>	1.4	Flow rate(s/50g)		21

Table 2 Prepared ring specimens.

	Base Material	Insulation coating		Annealing Conditions		
		Material	Coating (mass%)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Atmosphere	Treating time (min)
Iron Powder Core A	JIP 304AS	Inorganic compound	0.20	200	Ambient	60
Iron Powder Core B	JIP 304AS	Silicone Resin	0.05	500	Nitrogen	60
SPCC core	SPCC	-	-	-	-	-

Table 3 Properties of the SPCC used.

	Chemical composition (mass%)				Tensile Strength(MPa)
	C	Mn	P	S	
SPCC	< 0.10	< 0.45	< 0.035	< 0.35	> 270

料又は500 $^{\circ}\text{C}$ 焼鈍可能な絶縁被覆が得られるシリコン樹脂を主成分とする材料を用いて鉄粉表面の絶縁被覆処理を行った。絶縁被覆処理した原料粉を、980 MPaの圧力で室温金型潤滑成形法により磁気特性測定用のリング試料(外径38 mm×内径25 mm×高さ6.2 mm)に成形した。金型潤滑材にはステアリン酸亜鉛を用いた。成形後、Table 2に示す条件で焼鈍した。

SPCC磁心の原料にはTable 3に示す特性を持つ厚さ1 mm冷延鋼板(SPCC)を用いた。リング試料(外径38 mm×内径25 mm)は、放電加工法により作製した。Table 2に上記3種類のリング試料の原料並びに作製条件を示す。

リング試料の特性として密度、比抵抗及び直流磁化特性を評価した。密度はリング試料の寸法及び重量を測定し、その値から算出した。比抵抗は試料に一定電流(1 A)を流し、そのときの測定端子間(端子間距離12 mm)の電圧から抵抗値を求める四端子法により測定した。直流磁化特性は、 $\phi 0.6$ mmのホルマル被覆線を1次側100巻、2次20巻したコイルを用いて、最大磁化力10 kA/mの条件で測定した。測定器にはメトロン技研製のDCループトレーサSK-110を用いた。直流磁化

特性として、最大透磁率、直流ヒステリシス損失及び10 kA/mでの磁束密度 B_{10k} を評価した。

2.2 測定用モーターの作製と評価

Table 3に示すSPCCを用いたローターを搭載した市販モーターに、そのローターと同一仕様の圧粉磁心製ローターを組み込み、モーターの特性を評価した。モーターの仕様をTable 4に、ローターの仕様をTable 5に示す。またローター上のコイルの巻き方をFig.1に示す。上節で準備した絶縁被覆鉄粉を用いてローターコア用の円筒形状試料(外径:45 mm×高さ:15 mm)を加圧成形し、さらにTable 2に示す条件で熱処理した。焼鈍後、放電加工法によりSPCC製ローターコアと同一形状に加工した。加工後、 $\phi 5$ mmのS45C製シャフトをローターコアに挿入した。その後、コアのスロット上に $\phi 0.29$ mmの被覆銅線を、Fig.1に示す要領で巻いて10個のコイルを作成した。コイル1個あたりの巻き線数は60巻とした。整流子を軸に取り付けた上で、コイル巻き線の端部を整流子の各端子に半田付けして、圧粉磁心製ローターとした。整流子とコイルの結線もSPCC製ローターと同一とした。作製したロー

Table 4 Characteristics of the motor used.

Specification	Rated DC supply voltage (V)	24
	Resistance of motor circuit (Ω)	5.1
Stator	Air Gap (mm)	0.5
	Material	Hard ferrite magnet
	Number of poles	2
Commutator	Number of brushes	2
	Number of segments	10

Table 5 Specifications of the prepared rotor.

Core	Number of rotor slots	10
Coil	Number of coils	10
	Type of rotor winding	Lap winding
	Number of turns per coil	60
Shaft	Material	Forged steel (S45C)

Fig.1 Lap winding pattern.

Fig.2 Appearance of the rotor.

ターの外観をFig.2に示す。作製したローターを元のSPCC製ローターと入れ替えてモーターの特性を評価した。また比較のためにSPCC製ローターを組み込んだ元の市販モーターの特性も同時に評価した。

負荷トルクを変化させたときのモーターの回転数と入力電流の変化を測定した。測定に用いた評価回路及び装置をFig.3に示す。モーターの駆動には直流定電圧電源を用いた。モーターへの供給電圧は24 V一定とし、負荷トルクの変化範囲は0～0.050 Nmとした。モーターへのトルク負荷付与並びに回転数測定には菅原研究所製のトルクメーターTB-2Kを用いた。モーターへの入力電流は、モーター駆動回路に直列に接続した電流計で測定した。動作時のモーター効率 η (%)は、式(1)により算出した。

$$\eta = 2\pi T \frac{N}{60} \frac{1}{I \cdot V} \quad (1)$$

ここに T , N , I , V は、それぞれ出力トルク (Nm), 回転数 (rpm), 入力電流 (A), 供給電圧 (V) を示す。

3 実験結果及び考察

3.1 リング試料の特性

リング試料の特性測定結果を Table 6 に示す。圧粉磁心 A, B は SPCC 磁心に比べて、内部に存在する空孔のために密度が低く、さらに最大透磁率、磁束密度も低いことが分かる。直流ヒステリシス損失は、SPCC 磁心、圧粉磁心 B、圧粉磁心 A の順に増大した。加圧成形によるひずみが入る圧粉磁心は、SPCC 磁心に比べて直流ヒステリシス損失が増大するものと思われる。また、圧粉磁心 A と圧粉磁心 B で比較すると、熱処理温度が高い圧粉磁心 B のほうが直流ヒステリシス損失は低くなった。これは、500℃で熱処理されたため、成形ひずみが除去されたためと推定される。圧粉磁心の比抵抗は、SPCC 磁心に比べて100～1500倍高い値を示した。これは、圧粉磁心が表面を絶縁処理した鉄粉を加圧成形して作製されるためと推定される。

3.2 モーター特性

磁心の種類が出力トルクと回転数の関係に及ぼす影響を Fig.4 に示す。磁心の種類によらず、どのモーターも同じように出力トルクが大きくなると回転数が直線的に低下した。出

Fig.3 Schematic illustration of the circuit and the equipment for measuring the motor characteristics.

Table 6 Characteristics of the ring specimens.

	Density (Mg/m ³)	Resistivity ($\mu\Omega\text{m}$)	DC magnetic properties @H=10 kA/m		
			Induction (T)	Maximum permeability	DC Hysteresis loss (W/kg)
Iron powder core A	7.56	404	1.60	$370\mu_0$	0.33
Iron powder core B	7.60	25	1.70	$730\mu_0$	0.23
SPCC core	7.81	0.26	1.82	$2800\mu_0$	0.18

μ_0 : The permeability of free space ($7\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A}\cdot\text{m}$).

Fig.4 Relationships between load torques and rotation speeds in the motors fitted with the different type of cores.

出力トルクと回転数の関係は、磁心の種類によらず、ほぼ同一の直線となった。圧粉磁心の最大透磁率は、SPCC磁心の最大透磁率の1/8から1/4程度と低かったが、透磁率の違いによる出力トルクと回転数の関係の違いは認められなかった。磁心の種類が出力トルクと入力電流の関係に及ぼす影響をFig.5に示す。コアの種類によらず、出力トルクが大きくなると入力電流は直線的に増加した。圧粉磁心A、B及びSPCC磁心を用いたモーターの出力トルク0.020Nmとした場合の入力電流は、それぞれ0.69A、0.66A及び0.81Aとなった。圧粉磁心A

Fig.5 Relationships between load torques and input currents.

とBの入力電流はほぼ同等であったが、SPCC磁心の入力電流は圧粉磁心に比べ0.15A程度大きかった。出力トルクとモーター効率の関係をFig.6に示す。どの出力トルクにおいても、圧粉磁心を用いたモーターのほうがSPCC磁心を用いたモーターに比べて高い効率を示した。SPCC磁心、圧粉磁心A及び圧粉磁心Bをローターコアに用いた時のトルク0.050Nmとした場合のモーター効率は、それぞれ64%、68%及び70%となり、圧粉磁心BはSPCC磁心に比べ6%効率が高かった。圧粉磁心はSPCC磁心に比べてヒステリシス損失が高かったにも関わらず、圧粉磁心を用いたモーターの方が

Fig.6 Relationships between load torques and efficiencies of the motors.

SPCC磁心を用いたモーターに比べて効率が高くなった理由は不明である。ローター材料のヒステリシス損失と効率の関係については、今後さらなる検討が必要であると思われる。

3.3 透磁率と出力トルクの関係

圧粉磁心の最大透磁率は、SPCC磁心のそれに比べ1/4以下であったにもかかわらず、圧粉磁心製ローターを組み込んだモーターの出力トルクはSPCC磁心製ローターを組み込んだモーターの出力トルクと同等であった。この原因を明らかにするため、ローター材料の透磁率がモーターの出力トルクに与える影響を数値解析により検討した。

数値解析では、磁性材料のB-Hカーブをパラメーターとして与える必要がある。本検討では、透磁率 μ の磁性材料のB-Hカーブが式(2)で表されると仮定した。

$$B = \begin{cases} \mu H & (H \leq H_s) \\ \mu H_s + \mu_0 (H - H_s) & (H \geq H_s) \end{cases} \quad (2)$$

H (A/m)は磁界、 μ_0 (A/m)は真空の透磁率($4\pi \times 10^{-7}$ A/m)、 H_s (A/m)は磁心が飽和磁束密度 B_s にいたるときの磁界であり、 $H_s = B_s / \mu$ と定義される。なお、飽和磁束密度 B_s は圧粉磁心内で鉄粉が占める部分の体積比率を $1-x$ とすると、鉄粉粒子の飽和磁束密度 B_i を用いて式(3)で表されると仮定した。

$$B_s = (1-x)B_i \quad (3)$$

さらに、この磁心材料は、絶縁層や空孔などの非磁性物が占める部分の体積比率を x 、鉄粉の占める部分の体積比率を $1-x$ とすると、透磁率 μ が式(4)で表される高城の示す圧粉磁心のモデル材料⁷⁾であると仮定した。

$$\mu = \frac{\mu_0 \mu_i}{x \mu_i + (1-x) \mu_0} \quad (4)$$

この式において μ_i は鉄粉粒子の透磁率を示す。

以上の式(2)～(4)を用いて、ある透磁率 μ の磁性材料のB-H

Fig.7 Assumed B-H curves with different permeabilities.

Fig.8 Relationship between permeabilities and output torques.

カーブを求め、それをパラメーターとして数値解析を行った。なお、鉄粉粒子の μ_i 及び B_i は、鉄バルクと同等の値であると考えられるので、本検討においてはSPCC磁心での測定結果を元に、それぞれ $2800\mu_0$ 、2.0 Tと仮定した。透磁率 μ の検討範囲は、供試材中、最も大きな最大透磁率を示したSPCC磁心の最大透磁率が $2800\mu_0$ だったので、 μ_0 から $2800\mu_0$ とした。パラメーターとして与えたB-HカーブをFig.7に示す。

本検討では、ローターコア材料の透磁率を変化させたときの出力トルクを解析した。解析は、上節の測定において出力トルクが0.050 Nmとなったときの条件にあたる、入力電流1.4 A、回転数4,300 rpmで動作させた場合について行った。モーターのステーター磁石が発生させる磁束分布には、ステーター磁石を1000 kA/mの磁界で着磁したときの分布を用いた。その他の解析条件は実際に用いたモーターと一致させた。解析には、有限要素法(FEM)を用いた磁場解析ソフトJMAG(日本総研)を用いた。

ローターコア材料の透磁率の違いが出力トルクに与える影響をFig.8に示す。Fig.8には、上節で得られた各磁心での最

Fig.9 Calculated flux distributions inside cores with varying the permeability of the cores.

大透磁率と、それらをローターコアに用いたモーターの出力トルクの関係性を合わせてプロットした。出力トルクは、透磁率 μ_0 では0.020 Nmであったが、透磁率が上昇するにしたがって急激に増大し、透磁率が $100\mu_0$ になると0.050 Nmとなった。しかし、 $100\mu_0$ 以上の透磁率では出力トルクの上昇は緩やかとなり、ほぼ一定の値を示した。数値解析により求められた透磁率に対する出力トルクの関係は、実測値とよく一致した。今回評価したいいずれのモーターも、同等の出力トルクを示したのは、圧粉磁心、SPCC磁心の透磁率は $370\mu_0 \sim 2800\mu_0$ の範囲にあり、いずれも $100\mu_0$ 以上であったためと推定される。

透磁率が $100\mu_0$ 以上の材料をローターコアに用いるとモーターの出力トルクがほぼ同等となる原因を考察する。DCブラシモーターのトルクは、ローターのスロットに巻かれたコイルによって発生する磁束とステーター磁石による磁界の間で発生するローレンツ力によって得られる。磁束の大きさは材料の透磁率とスロット上の起磁力 F (A)によって決まる。コイルが重ね巻きされているローターでは1スロットにかかる最大の起磁力 F (A)は、

$$F = nNI \quad (5)$$

と表される⁸⁾。なお、 N はコイル1個あたりの巻き線数、 n はコイル数、 I (A)は入力電流である。したがって、スロット長を l (m)とすると、スロットにかかる磁界 H (A/m)は、

$$H = F/l = nNI/l \quad (6)$$

と表される。今回使用したモーターのローターはスロット長15 mmであったので、入力電流が1.4(A)のときのスロットにかかる磁界 H は56,000 (A/m)程度と推定される。Fig.7から、56,000 (A/m)の磁界をかけた場合、透磁率が $100\mu_0$ 以上のコアの磁束密度は、ほぼ同等となることが分かる。Fig.9の(a)～(d)に、透磁率が $2\mu_0$ 、 $10\mu_0$ 、 $100\mu_0$ 、 $2800\mu_0$ の各コア内部の磁束分布を評価した結果を示す。透磁率が $100\mu_0$ を超えると、コア内部の磁束分布はほぼ同等となっている。この結果は式(6)を用いた上記の推定結果と一致している。

以上より、透磁率が大きく異なる材料をローターコアに用いたにもかかわらず出力トルクが同等となったのは、今回用

いたローターコアに用いた材料の透磁率がいずれも $100\mu_0$ 以上であったため、磁束分布が同等となったことが原因であると考えられる。

4 結 言

- (1) 圧粉磁心コアはSPCCコアに比べ、最大透磁率と磁束密度が低かった。しかし、圧粉磁心から作製したローターを用いたモーターの出力トルクと回転数の関係は、SPCCコア製モーターと同等であった。さらに、圧粉磁心から作製したローターを用いたモーターの効率はSPCCコア製ローターを用いたモーターよりも6%向上した。
- (2) 数値解析により、今回評価したモーターでは、コアの透磁率が $100\mu_0$ 以上になると磁束分布がほぼ同等になることが分かった。透磁率が低い圧粉磁心を用いた場合でも、SPCC磁心を用いた場合とほぼ同等の出力トルクが得られたのは、評価したコアはいずれも透磁率が $100\mu_0$ 以上であったため、磁束分布がほぼ同等となったためと推定される。

文 献

- 1) L.Hultman, O.Andersson and A.Jack: "The SMC Technology - From Idea to Reality", SAE SP 42 volt/soft magnetic materials and PM materials, 42 volt technology, (2003)69-77.
- 2) H.R.Kokal, J.H.Bularzik and R.F.Krause: "High-Density Pressed Soft Magnetic Components for ac and dc Applications", ADVANCES IN POWDER METALLURGY AND PARTICULATE MATERIALS, Powder metallurgy and particulate materials, (1997)1-61-76.
- 3) M.Suzuki and T.Nakamoto: "Development of Small DC Motor for ABS Pump", JSAE Proceedings, No.90-02, (2002)17-20.
- 4) O.Andersson and A.Jack: "Iron Powder in Electrical Machines, Possibilities and Limitations", ADVANCES IN POWDER METALLURGY AND PARTICULATE MATERIALS, Powder metallurgy and particulate material, (2001)7-26-35.
- 5) B.C.Mecrow, A.G.Jack, D.J.Atkinson and S.Swaddle: "High torque machines for power hand tool applications", IEEE CONFERENCE PUBLICATION International conference on power electronics machines and drives, No. 487, (2002)644-649.
- 6) P.Marchal: "Production of Automotive DC motors Fitted up with SMC Armature", Workshop on Production and Applications of Soft Magnetic Materials for Electric Motors, (2000)67-74.
- 7) S.Takajo: "Tetsukei appun oyobi shouketsu jishin zairyou no jikitokusei kaiseki to seizou ni kansuru kenkyuu", Doctor thesis, Tohoku University, (1987)3-8.
- 8) H.William and W.Alan: Handbook of small electric motors, McGraw-Hill, (2001)4.29-10.53.