ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM 小型モータ

Highly-Efficiency Small IPM Brushless Motors Fabricated by Directly Molding Nd-Fe-B-Based Nano-composite Magnets with a Laminated Steel Core

山下 文敏, 小原 一浩, 山縣 芳和, 福永 博俊*

松下電器産業株式会社, 大阪府大東市諸福 7-1-1(574-0044) *長崎大学工学部, 長崎市文教町 1-14(852-8521)

F. Yamashita, K. Ohara, and Y. Yamagata (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 7-1-1 Morofuku, Daito, Osaka 574-0044)

H. Fukunaga (Faculty of Engineering, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo, Nagasaki, 852-8521)

(1999 年 10 月 25 日受理、2000 年 1 月 25 日採録)

Exchange-coupled nano-composite melt-spun powder is a nano-structured composite of soft and hard magnetic phases mutually coupled by exchange interaction at the grain boundaries. Its resource balance and resistance to oxidation are better than those of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ stoichiometric composition melt-spun powder, because it contains a smaller proportion of rare-earth elements such as neodymium. In order to apply this powder to high-efficiency small IPM (interior permanent magnet) brushless motors, we developed a modified molding technique using the slip-flow mechanism, which allows high-density molding of nano-composite melt-spun powder exceeding 95 wt.%. This technique was used to develop a small IPM rotor by directly molding the melt-spun powder with a laminated steel core. IPM motors using the above-mentioned rotor were found to have adequate stability with respect to aging and reverse magnetic fields, as well as high efficiency.

Key words: melt-spun powders, NdFeB bonded magnet, permanent magnet motor (IPM), injection mold, and nano-composite magnet.

1. はじめに

我々は以前に回転子鉄心の磁石スロットに磁石を埋め込んだ構造の回転子鉄心一体型 IPM (Interior Permanent Magnet) に、ナノコンポジット系磁石が適用できる可能性を示唆した¹⁾。そこで今回、1) リラクタンストルクが有効に活用できる磁石を 2 層構造とした²⁾磁石-回転子鉄心一体型 IPM の磁石スロットにナノコンポジット磁石粉末を高充填し得る高流動性コンパウンド、2) 実使用温度域での長期減磁に対する予測、3) 実使用温度域での逆磁界に対する減磁耐力を検討した。その結果、95 wt.% 以上の磁石粉末を充填した高流動性コンパウンドを得た。そして、ナノコンポジット磁石(パーミアンス係数, P_c -2.1)が低保磁力であるにも拘わらず、その実用域での 10 年後の長期減磁が 5% 以内であることを予測した。そこで、ナノコンポジット磁石粉末を 95 wt.% 充填したコンパウンドで、実用的な減磁耐力が得られる 2 層磁石-回転子鉄心一体型 IPM (P_c -4.9)を作成し、機械出力数 10~30W クラスの小型モータで使用される、Nd-Fe-B 系ボンド磁石を使った磁石-回転子鉄心一体型 SPM (Surface Permanent Magnet)、フェライト焼結磁石 SPM、フェラ

イトボンド磁石 SPM を比較対象に、モータ効率を検討した。その結果、ナノコンポジット磁石を適用した 2 層磁石-回転子鉄心一体型 IPM で、機械出力 10~30W の小型高効率モータを得たので報告する。

2. 実験方法

実験に用いたナノコンポジット磁石粉末は保磁力の異なる Fe_3B - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $\alpha\text{-Fe}$ - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系である。先ず, Fig.1 に示すように磁石粉末を窒素ガス雰囲気下でヘンシェルミキサーにより粒子径 $150\mu\text{m}$ 以下に粗粉碎した。その後、粗粉碎した磁石粉末[90~96 wt. %]と $500\mu\text{m}$ 以下の滑剤(ペンタエリスリトール C_{17} トリエステル化合物)[10 PHR], $500\mu\text{m}$ 以下の 12-ナイロン粉末[Balance]とを室温で混合した。次いで、前記混合材料を $220\sim 240^\circ\text{C}$ に加熱した押出機で混練し、吐出した溶融ストランドをホットカットしてペレット状コンパウンドとした。

最後に、外径 $50.03[\text{mm}]$ で薄肉磁石スロット(スロット幅 $0.8\sim 1.25\text{mm}$)を有する板厚 0.5mm の電磁鋼板を 19mm に積層した。その回転子鉄心に設けた磁石スロットに、 230°C で再溶融したコンパウンドを移送成形して 8 極 2 層の逆突極型 IPM を作成した。

Fig. 1 Experiment and evaluation of directly molding nano-composite magnet fabricated by directly molding IPM with a laminated steel core(8-pole 2-layer magnet slot thicknesses are 0.85mm to 1.25mm).

評価する項目は $150\mu\text{m}$ 以下に粗粉碎したナノコンポジット磁石粉末の酸化安定性、前記磁石粉末を高充填したコンパウンドの流動性改質である。モータ特性は、同一仕様の固定子を用いて環状 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ボンド磁石を回転子鉄心の外周面に一体成形

した SPM, フェライトボンド磁石およびフェライト焼結磁石 SPM を比較対象とした。

3. 結果および考察

3.1 磁石粉末の耐酸化性

熱重量分析(TGA)を用いて昇温速度 10°C/min で粒子径 150 μ m 以下の $\text{Fe}_3\text{B-Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $\alpha\text{-Fe-Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系各磁石粉末を加熱し, 所定温度で大気中 1 時間暴露した。その後, 室温の保磁力を VSM で求めた結果を Fig.2 に示す。図のように比較的 Nd リッチの合金組成で, 保磁力の高い $\alpha\text{-Fe-Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系磁石粉末は暴露温度が 200°C を越えると保磁力の低下が見られる。しかし, Cr を含む $\text{Fe}_3\text{B-Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系³⁾は暴露温度が 350°C まで達しても保磁力の低下はなく, 酸化による永久減磁が起こりにくい。この性質は, 比較的保磁力の低いナノコンポジット磁石を, 12-ナイロンのような熱可塑性樹脂で所定形状の磁石に加工する時, コンパウンドを再使用できるので好ましい。

Fig. 2 Changes in coercivity of various Nd-Fe-B based nano-composite melt-spun powders caused by heat treatment in air (exposure time: 1 h, after 4 MA/m pulse magnetization).

3.2 滑り流動を利用した磁石粉末の高充填

本実験に用いたペンタエリスリトール脂肪酸トリエステル化合物は, (1)式のように 1 モルのペンタエリスリトールと 3 モルの高級脂肪酸とをエステル化したものである。対象とする 12 ナイロンとナノコンポジット磁石粉末とのコンパウンドの加工温度は 220~240°C と高いので, 当該化合物に含まれる脂肪酸残基の炭素数は 17 以上として熱安定性を高めている。

上記, 化合物は炭素数 17 以上の脂肪酸残基 3 個と 1 個のアルコール性水酸基を有する。したがって, ナノコンポジット磁石粉末を高充填したコンパウンドを加工する際に, コンパウンド内部, 或いは加工機械や積層電磁鋼板による回転子鉄心磁石スロットとの摩擦を少なくするなどの物理的作用によって, コ

ンパウンドの加工時の安定化を図るものである。このような薬剤は一般に滑剤と称され炭化水素系, 脂肪酸アミド系, 脂肪酸エステル系, 高級アルコール系などがあるが, 代表的には脂肪酸系(ステアリン酸)とその金属塩類が知られている。

しかし, 脂肪酸系(ステアリン酸)とその金属塩類をナノコンポジット磁石粉末と 12 ナイロンとのコンパウンドに添加しても, ナノコンポジット磁石粉末を高充填できる効果を得られない。

ナノコンポジット磁石粉末と 12-ナイロンとのコンパウンドにおいて, ペンタエリスリトール C17 トリエステルを 12-ナイロンに対して 10 PHR 添加した場合の流動性の変化を Fig.3 に示す。図のように, ペンタエリスリトール C17 トリエステルの有無に関わらず, ナノコンポジット磁石粉末の充填量に応じて流動性は低下する。しかしながら, ペンタエリスリトール C17 トリエステルを添加すると, 熔融粘度の低下による剪断流動によらず, 滑り流動によるコンパウンドの流動性改質に顕著な効果がある。例えば, 95 wt. %のナノコンポジット磁石粉末を充填したコンパウンドでみると, ペンタエリスリトール C17 トリエステルの添加によってコンパウンド流動性は 1.7 倍改善された。この値は, 93 wt. %のナノコンポジット磁石粉末を充填したペンタエリスリトール C17 トリエステル未添加コンパウンドと, ほぼ同水準にある。換言すればペンタエリスリトール C17 トリエステルの添加によって, ナノコンポジット磁石粉末の体積分率で, 概ね 5 vol. %の高充填ができる。

Fig. 3 Changes in melt-flow according to slip-agent for Nd-Fe-B based nano-composite melt-spun powder compound (test method used by JIS K-6911 desk-flow. 5[g], 5[ton], 230[°C] $\pm$ 5[deg]).

3.3 ナノコンポジット磁石の長期減磁

保磁力が 247~539kA/m と異なる 5 種類のナノコンポジット磁石粉末($\text{Nd, Dy})_x(\text{Fe, Co})_{1-x-y}\text{Ga}_y\text{B}_{19}\text{Cr}_z$ ($x=4-6$, $y=0-1$, $z=0-5$) からなるボンド磁石(P_c -2.1)の, 80°Cおよび 120°Cでの対数時間当たりの長期減磁率 $dFL/d\{\ln(ta)\}$ と室温での保磁力の関係を Fig.4 に示す。図のように, ナノコンポジット磁石の長期減磁率は 80°Cと 120°Cでの差は小さいが, 何れも保磁力の大きさとともに小さくなっている。また, その値は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ボンド磁石と比較しても保磁力の割には小さい。永久磁石としての実用性を

考慮すると、長期減磁は5%以内とする必要がある。10年間の減磁を5%以内に制御するには、対数時間当たりの減磁率が0.44%以下の必要がある。Fig.4の結果より、測定した全てのナノコンポジット磁石粉末からなるボンド磁石は、暴露温度80℃および120℃では長期減磁率が5%以内に抑制される。とくに、保磁力が400kA/m以上ならば、Nd₂Fe₁₄Bボンド磁石と同等となることが期待される。

Fig. 4 Coercivity dependence of the irreversible flux loss in relation to logarithmic time $dFL/d\{\ln(t_a)\}$ (NC: nano-composite bonded magnet; RQ: Nd-Fe-B bonded magnet; exposure temperatures = 80°C, 120°C).

長期減磁は主に磁気余効によると考えられるが、有限長の磁石における磁気余効は(2)式で示される⁹⁾。

$$\Delta I = S_v \chi'_{irr} (\ln t_a - \ln t_0) (1 - N \chi'_{rev} / \mu_0) \quad (2)$$

ここで、 ΔI 、 χ'_{irr} 、 χ'_{rev} 、 S_v は、それぞれ磁気余効による磁化の変化、不可逆帯磁率、可逆帯磁率、磁気余効定数である。また、上付添え字のダッシュはそれらの値が反磁界に影響された見かけの値であることを表している。

Fig.5は不可逆帯磁率と保磁力の関係を示す。ナノコンポジット磁石の磁気余効定数は他の磁石と同じと言われており⁹⁾、低保磁力であるにも拘わらず長期減磁が少ない。その原因は、ナノコンポジット磁石の不可逆帯磁率が小さいことにあると考えられる⁹⁾。減磁界を含めた初期減磁が従来の磁石と同等であれば、ソフト磁性相をもったナノコンポジット磁石も従来磁石と同様の扱いで永久磁石としての応用を考えることができる。

Fig. 5 $\chi'_{irr} / (1 - N \chi'_{rev} / \mu_0)$ as a function of the coercivity at room temperature (NC: nano-composite bonded magnet; RQ: Nd-Fe-B bonded magnet; exposure temperatures = 80°C, 120°C).

3.4 ナノコンポジット磁石 IPM の減磁耐力

Nd₂Fe₁₄B 化学量論組成に近い合金組成の等方性ボンド磁石と同等の長期減磁が期待される保磁力400kA/m以上のナノコンポジット磁石を95 wt.%充填した、10 PHR のベンタエリスリトール C17 トリエステルを含む12-ナイロンとのコンパウンドを用いて、外径50.3 mm、8極2層の回転子鉄心一体型 IPM を作成した。ただし、磁石スロットの磁化方向の厚さは、外層が0.8, 1.0, 1.2mmであり、それに対応する内層は0.85, 1.05, 1.25mmとした。

一方、Nd₂Fe₁₄B 単相からなる磁石粉末95 wt.%を含むエポキシ樹脂との顆粒状コンパウンドを圧縮して、磁石の厚さ1.65 mmを含む外径50.3 mm、8極回転子鉄心一体型 SPM を作成した。

Fig.6は、4 MA/m のパルス着磁後のナノコンポジット磁石と比較 SPM に用いた Nd-Fe-B 系ボンド磁石、フェライト焼結磁石、フェライトボンド磁石の減磁曲線と磁気特性を示す。図から、ナノコンポジット磁石は構成する磁気回路のパーマナンス係数 P_c を概ね3以上とすれば、Nd-Fe-B ボンド磁石を上回る磁束が得られることが期待される。

Magnet	Remanence (T)	Coercivity (kA/m)	[BH]max (kJ/m³)
① Nano-composite bonded magnet	0.68	430	55
② Nd-Fe-B bonded magnet	0.60	730	64
③ Ferrite sintered magnet	0.42	280	33
④ Ferrite bonded magnet	0.29	199	16

Fig. 6 Comparison of the demagnetization curves and magnetic properties of nano-composite bonded magnet and other magnets, after 4 MA/m pulse magnetization.

Fig.7は逆磁界に対する誘起電圧低下率の関係を示す。ただし、ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM と Nd-Fe-B ボンド磁石一体型 SPM を、固定子に空隙0.3mmで組込んだ。先ず室温で誘起電圧を測定し、その後100℃で固定子巻線を励磁して逆磁界を加え、室温に戻して再び誘起電圧を測定し、逆磁界の強さに対する誘起電圧低下率を求めた。図のように、ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM の減磁耐力は、磁石スロットの厚さに依存する。例えば磁石スロットの厚さが外層0.8mm、内層0.85 mmでは、逆磁界の起磁力320ATで10%以上減磁する。しかし、外層1mm、内層1.05 mm以上とすると、定格電流の3~5倍の逆磁界でも、誘起電圧低下率をNd-Fe-B系ボンド磁石-回転子鉄心一体型 SPM と同等の5%以内に抑制

することができる。すなわち、ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM は磁石スロット形状の高 P_c 化によって、他の磁石を使った SPM モータと同等な減磁耐力を確保できる。なお、起磁力 320 AT の場合の逆磁界は約 170 kA/m と見積もられる。

Fig. 7 Comparison of the stability with respect to a reverse field of a nano-composite bonded magnet IPM rotor and an Nd-Fe-B bonded magnet SPM (T_1 and T_2 are the thicknesses of the outside and inside layers, respectively.).

3.5 モータ効率

Table 1 は、ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM と比較磁石を使用した SPM の磁石材質、厚さ、ロータ長さ、パーミアンス係数、および同一固定子を使用したときの誘起電圧とその波形を示す。例えば、8 極 2 層ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM を、逆磁界に対する減磁耐力を考慮した磁石厚さとしたとき、そのパーミアンス係数 P_c は 4.9 となり、Nd-Fe-B ボンド磁石、フェライト焼結磁石、フェライトボンド磁石 SPM よりも高い誘起電圧が得られ、その誘起電圧波形は Nd-Fe-B ボンド磁石 SPM に近い。

Table 1 Typical structure of rotors used for experimental evaluation and generated voltage waveforms of various rotors.

Rotor	Magnet	Thickness mm	Length mm	P_c	Generation voltage (mV/rpm)
	Nano-composite	1.2+1.25	19	4.9	59.3
	Nd-Fe-B bond	1.65	19	2.9	54.6
	Sintered ferrite	5.25	21	9.2	50.9
	Ferrite bond	7.00	21	(15)	43.7

Fig.8 は誘起電圧とモータ効率の関係を示す。ただし、固定子は同一仕様として Table 1 に示した磁石の 8 極 SPM を、8 極 2 層ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM と比較している。

図のように、定格電流の 3~5 倍の逆磁界に対する減磁耐力

を有する、磁石厚さ外層 1.00 mm、内層 1.05 mm 以上の 8 極 2 層ナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM は、この種の機械出力 10~30 W のモータに使用されるフェライトボンド磁石 SPM の 78.6 %、フェライト焼結磁石 SPM の 80.3 % を上回る 81.1~82 % の効率を得られた。

Fig. 8 Relation between the generation voltage of various magnet rotors and motor efficiency (Generation voltage at 1000 [rpm], Motor efficiency at 2 [kg-cm]-1200 [rpm], 8-pole-2-layer IPM nano-composite magnet directly molded. Here, T_1 and T_2 are the thicknesses of the outside and inside layers, respectively. 8-pole-SPM: Nd-Fe-B bonded magnet directly compression molded, arc-segment sintered ferrite magnet adhesive laminated steel core, and nylon-based ferrite bonded magnet directly molded with a rotor shaft).

4. まとめ

1. ペンタエリスリトール脂肪酸トリエステル(脂肪酸残基の炭素数 17)の流動性改質で、耐酸化性の優れたナノコンポジット磁石粉末を体積分率で 5 vol. % 程度高充填できる。
2. 厚さ 1mm 程度の狭い磁石スロットにコンパウンドを充填し、磁石-回転子鉄心一体型 IPM をつくることができる。
3. 保磁力 400 kA/m 以上のナノコンポジット磁石-回転子鉄心一体型 IPM は機械出力 10~30W モータで定格電流の 3~5 倍の減磁耐力と 10 年後の長期減磁を 5% 以下に抑えることができる。
4. 上記 IPM モータは Nd-Fe-B ボンド磁石、フェライト焼結磁石、フェライトボンド磁石 SPM より高効率を得られる。

文献

- 1) 山下文敏, 山縣芳和: 日本応用磁気学会誌 Vol.23, No.4-2, pp 1117-1120, (1999).
- 2) 本田幸夫, 村上 浩, 檜崎和成, 檜垣俊郎, 森本茂男, 武田洋次: 電気学会論文誌 117-D, No.7, p898-904 (1997)
- 3) 三野修嗣, 広沢哲: Material Technology Vol.17, No.2, pp46-54, (1999).
- 4) H. Nishio, IEEE Trans. Magn., 24, 3188 (1988).
- 5) 西尾博明, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-96-208(1996).
- 6) H. Fukunaga, S. Hayashida, Y. Kanai, and F. Yamashita, 1999 InterMag Conf., Kyongju, Korea (1999), ER-06