希土類-鉄系急冷薄片の固定の形態と 手段によるモータの進化

山下 文 敏*

1. 背 景

多様な民生機器の小型軽量化や大容量化の中で、その駆動源としての磁石モータの小型高出力化や損失低減が求められる。そこで、溶湯合金の急冷凝固で得られる $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 希土類-鉄系急冷薄片は、①磁気性能に形状依存性がない。② SmCo 系に比べて資源的に有利な Nd , Fe が主成分である。など磁石技術の変革⁽¹⁾に着目し、素材の磁気性能を、できる限り、モータ性能に反映するための応用開発を行った。

上記、溶湯合金の急冷凝固で得られる材料形態は一般に厚さ $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 薄片状である。したがって、モータに実装可能な磁石とするには薄片を、何らかの方法で固定する技術が必要となる。そこで、磁石モータへの応用の立場から急冷薄片の樹脂による固定形態と固定手段を開発し、多様な磁石モータの高性能化と、その普及に挑戦した。

2. 圧縮成形による小径環状磁石

マルチメディア PC 周辺機器を中心とした OA, AV 機器の小型化、高速化、大容量化の流れは、駆動源となる出力数 W 以下の小径環状磁石モータの小型化、高出力化の対応が求められる。そこで、1985年当時、小径環状磁石では最強と言われた SmCo 系ラジアル異方性樹脂磁石の小径化を試みた。当時、焼結磁石でのラジアル異方性は焼結時の熱膨張差のため困難であるが樹脂磁石では樹脂が熱膨張差を吸収するため容易とされていた。しかし、例えば、長さ L と外径 D の比 $(L/D)=1.5\sim 2.0$ の環状磁石外径を約 $25\ \text{mm}$ 以下とすると、小径化に伴ってラジアル異方化が困難となる。このことは、小径環状磁石を使用するモータでは小型化と高出力化が、相反する関係にあることを意味し、モータを小型化す

るほど希土類磁石の高磁気性能を、モータ性能に反映することができなかった。

そこで、製造段階での薄片廃棄物が、ほぼゼロ、および長期保存(5年以上)を可能とする固体エポキシとイソシアネート再生体で、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 希土類-鉄系急冷薄片の顆粒状コンパウンドとし、更に、そのコンパウンドを粉末成形した環状圧粉体をイソシアネート再生体の熱解離温度以上に加熱してエポキシ樹脂を硬化し、小径環状磁石とした⁽²⁾。

図1は、上記のような外径 $18\ \text{mm}$ の環状磁石の外周24極着磁した希土類-鉄系急冷磁石を基準として各種環状磁石の磁束量の比を示す。その結果、希土類-鉄系急冷磁石は 2-17 SmCo 系樹脂磁石を含め、既存の何れの小径多極着磁磁石よりも強い磁束量が得られた。

図2は、環状磁石の外径を $18\ \text{mm}$ から、更に小径化したとき 2-17 SmCo 系樹脂磁石を基準として希土類-鉄系急冷磁石の磁束量比の変化を示す。ただし、極間距離は $1.88\sim 2.78\ \text{mm}$ である。図のように希土類-鉄系急冷磁石は小径化するほど得られる磁束量比が優位となり、小径環状磁石モータの小型化と高出力化を両立させる。

上記、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 希土類-鉄系急冷磁石の最大エネルギー積 $[BH]_{\text{max}}$ は $64\sim 80\ \text{kJ}/\text{m}^3$ に過ぎないが、 $120\ \text{kJ}/\text{m}^3$ 以上と言われた 2-17 SmCo 系樹脂磁石に比べて、例えば外径 $8\ \text{mm}$ の外周面に10極着磁したステッピングモータの体積効率を50%も向上させ、モータ質量比40%減を実現した。

図1 各種環状多極着磁磁石の磁束量比較.

* 松下電器産業株式会社 モータ技術研究所主席技師
High-efficiency Magnet Motors by Solidification form and
Process Fixed of Melt Spun Powders; Fumitoshi Yamashita
(Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)
1998年10月27日受理

図2 多極着磁環状磁石の小径化と磁束量の比。

1990年代に、HDD、FDD、CD-ROM、DVD、PD、MD など各メディアのスピンダルモータの小径環状磁石を主体に、磁石モータの小型高出力化、低消費電流化の決め手として広く一般に普及したのは周知である。本技術に関する特許は、特許2136664、2599387、USP4,689,163、DE3,642,228、FR8,700,277、などがある。

3. 回転子鉄心一体型磁石

モータ出力 P 、損失を L とすると効率 η は $[P/(P+L)]$ であり、出力数～数百 W の家電、空調、FA モータなどでは小型化とともに、高出力化や低損失化が求められる。磁石を界磁とする磁石モータの損失は電機子巻線の銅損、電機子鉄心の鉄損、機械損であり、整流子モータのブラシ損、誘導モータの1次電流の励磁分による2次銅損がないため本質的にモータの損失低減や高効率化に有利である。

図3は、それらの出力数～数百 W の代表的な磁石回転子の構造を示す。図中 SPM(Surface Permanent Magnet)とは表面磁石型回転子、IPM(Interior Permanent Magnet)とは磁石埋設型回転子である。

出力数～数百 W の磁石回転子は一般に外径 40～60 mm 程度であり、SPM は環状または円弧状、IPM では磁石の極面積を増やすため逆円弧状の磁石が回転子鉄心に配置される。そこで、本技術は回転子鉄心の一部を利用して $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 希土類-鉄系急冷薄片を固定し、回転子鉄心一体型磁石とする固定形態を開発した。

(1) 圧縮成形による回転子鉄心一体型 SPM

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 希土類-鉄系急冷薄片は環状の成形型で一般に

図3 代表的な磁石回転子の構造。

8～10 ton/cm² で圧縮する。そのため、型から離型すると通常0.65～0.70%のスプリングバックがある。そこで、スプリングバックを抑制するため粒径約 20 μm の液体エポキシ樹脂内包カプセルを配合した希土類-鉄系急冷薄片の顆粒状コンパウンドをつくり、更に、そのコンパウンドを回転子鉄心の外周面を利用して粉末成形した。圧縮圧力でカプセルが機械的に破壊すると液体エポキシ樹脂が系外に流出し、スプリングバックを抑制する効果が出るため、回転子鉄心一体型 SPM をつくることができる。

図4は外径 48 mm の回転子鉄心外周に厚さ 1 mm の環状磁石を圧縮成形した回転子鉄心一体型 SPM において希土類-鉄系急冷薄片量に対するスプリングバック、および磁石と回転子鉄心とのせん断力の関係を示す。急冷薄片を 95 mass% 以下とすればスプリングバックは通常の 1/10 以下の 0.07% 以下となり、せん断強度も高位安定化する。

図5は回転子鉄心一体型 SPM の回転子鉄心と磁石の境界部分の断面を示す。圧縮によって 95 mass% の希土類-鉄系急冷薄片が機械的に配列し、回転子鉄心との間に空隙がなく、磁石が鉄心と一体的に固定されている。

出力数十 W の上記、回転子鉄心一体型 SPM モータは、フェライト焼結磁石体積比14%で、120%の高出力化が可能である。

上記モータは、1989年以降、家電、空調用として実用化し、更に鉄の一部をコバルトで置換した合金組成 $\text{Nd}_{12}(\text{Fe}_{66-52}\text{Co}_{16-30})\text{B}_6$ を特定し、残留磁化の温度係数 α -0.13%/°C から -0.07%/°C とし、サーボモータへ応用した。本技術の特許は特許2615781、2558790、2558791、USP 5,190,684、5,149,477、4,981,635、などがある。

図4 回転子鉄心一体型 SPM の寸法精度と強度。

図5 回転子鉄心一体型 SPM の境界部の断面構造。

—100 μm

図6 回転子鉄心一体型PMの境界部の断面構造。

図7 回転子鉄心一体型IPMによるモータ効率改善例。

(2) 移送成形による回転子鉄心一体型IPM

IPMのように回転子鉄心に磁石を埋設する構成ではSPMのようにコンパウンドを強圧縮することはできない。理由は①鉄心の変形、②摩擦に伴う圧力損失で圧力が鉄心スロットの奥深くまで伝達せず、高い密度にならない。③鉄心に埋設した希土類-鉄系急冷薄片の防錆処理やダスト対策を施すことが困難である。そこで、 $\text{Fe}_3\text{B}-\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ や $\alpha\text{Fe}-\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ のようなナノコンポジット希土類-鉄系急冷薄片をコンパウンドとし、回転子鉄心スロットへ移送する回転子鉄心一体型IPMをつくった。

具体的には、①必要に応じスロット位置をスキューしながら電磁鋼板を積層して回転子鉄心とし、成形型として固定する。②コンパウンドを回転子鉄心スロットへ移送し、再圧縮する。

図6は希土類-鉄系急冷薄片を95 mass%含む回転子鉄心一体型IPMの鉄心と磁石の境界部分の断面構造を示す。回転子鉄心一体型IPMもSPMと同様に鉄心と磁石は空隙な

く固定されている。

IPMは磁石を回転子鉄心に埋設した構造であるから、比較的低 H_{CJ} でも磁気安定性は確保し易い。また、PPSなどで回転子鉄心へ移送する際は、加工温度が300°Cを越えるため、高温で耐酸化性のよい低希土組成のナノコンポジット系急冷薄片⁽³⁾が有利である。

図7は $\text{Fe}_3\text{B}-\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 混合系95 mass%の($H_{\text{CJ}}=416 \text{ kA/m}$, $B_r=0.70 \text{ T}$, $[BH]_{\text{max}}=56 \text{ kJ/m}^3$)磁石一体型IPMモータの速度と効率の関係の一例を示す。ただし、回転子鉄心外径は56 mm、鉄心の積厚は70 mmである。

なお、比較例はフェライト焼結磁石($H_{\text{CJ}}=256 \text{ kA/m}$, $B_r=0.42 \text{ T}$, $[BH]_{\text{max}}=32 \text{ kJ/m}^3$)を回転子鉄心に挿入したIPMである。磁石材質と実装方法以外はすべて同じ条件でモータ誘起電圧比をみるとフェライト焼結磁石基準で回転子鉄心一体型IPMは1.32であった。

回転子鉄心一体型IPMとすると、出力280~750 Wの全速度領域でモータ効率が概ね1%改善される。これは、回転子鉄心一体型IPMでは、鉄損が1~3 W程度増加するが、銅損が4~7 W低減し、全体の損失が低減したことによる。その結果、最高効率は97%以上に達する。

5. ま と め

個々のOA、AV、家電、空調、FAモータのために必要な磁石の具備すべき条件は、①空隙に必要な静磁界を与え得る磁気特性、②非可逆減磁に代表される安定性、③求める形状に応じられる形状任意性、④原料の資源確保から実装に至るまでの総合的な経済性の4点において、最も高い整合性を獲得しなければならない。そこでは、磁石とモータづくりとの融合が、更に進展する可能性もある。

本技術開発は磁石モータの高性能化のために行った希土類-鉄系急冷薄片の固定形態と固定の方法に関するもので、1987年、弊社では高性能モータの普及のための磁石生産を開始し、1997年には国内外6つのモータ工場で年間250トン、約8000万個の $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 希土類-鉄系急冷磁石生産を行っている。

今後も、多様化する希土類-鉄系急冷薄片の磁気性能をモータ性能に活用するため、それらの固定形態と固定の方法を更に工夫し、多様な磁石モータの高性能化の実現と、普及を図りたい。

文 献

- (1) J. J. Croat *et al.*: J. Appl. Phys., **55**(1984), 2078.
- (2) 山下文敏：日本応用磁気学会第97回研究会 97-3(1996)。
- (3) 広沢 哲，富澤浩之：日本応用磁気学会誌，**21**(1997)，160。