

二色成形磁石回転子の モータへの応用

Dual Mold Magnet Rotor for Permanent Magnet Motors

増澤正宏* Masahiro Masuzawa

三田正裕* Masahiro Mita

菊地慶子* Keiko Kikuchi

相牟田京平* Kyohei Aimuta

NdFeBボンド磁石と圧粉磁心とを組み合わせ、特徴ある磁石回転子を開発した。両部材を圧縮成形キャビティ内で一体化することで、高い組立精度と高い接合強度を両立した。なお、一体化により磁石部の形状を長方形や円弧状などの単純形状に限定せず、自由に設計可能とした。磁石部には等方性のほか、異方性ボンド磁石も適用可能としている。特に異方性ボンド磁石を使用した例において、磁気回路の工夫によりNdFeB焼結磁石とほぼ同等の磁束量を実現した。

A one-piece permanent magnet rotor, made with bonded NdFeB magnet and soft magnetic powders core, was successfully fabricated. By pressing these different powder in the same cavity, it is expected that the mechanical tolerance can be very accurate and that the bonding strength can be very strong. Furthermore, because the magnet and the iron yoke are bonded to be as one component in a series of process, various shape of magnet segment can be obtained, not like the previous designs such as rectangle or simple arc segment. For the bonded magnets, both isotropic and anisotropic bonded magnet can be used. Especially when oriented bonded magnet with $B_r=0.9T$ is used, we could get magnetic flux comparable to that with sintered NdFeB, when properly designed.

① 緒 言

絶縁皮膜を有する純鉄粉などの金属磁性粉末に樹脂を混合し成形・熱硬化させた圧粉磁心^{1)~3)}は、皮膜や樹脂が金属粉末の粒子間を電氣的に絶縁するため電気抵抗がバルク金属に比べて約2桁高くなり、渦電流損の抑制効果が大きいと期待できる。その効果は高周波側でより有利となるが、例えば交番磁界の周波数が数百Hz程度の一般的なモータ用途であっても、広く一般的に普及している珪素鋼板の絶縁積層品などとほぼ同等の低鉄損に抑えることができる。さらに、珪素鋼板の積層品に比べて3次元的に複雑な形状が得られやすいこと、原料粉が比較的安価でコスト競争力があること、なども利点として挙げられる。なお、バルク金属に比べて密度の低下率(約2割)にほぼ比例して飽和磁束密度も低下してしまうが、残留磁束密度が1Tに満たないボンド磁石と組み合わせる回転子鉄心として考えれば、必要十分な値であると言える。一方、圧粉磁心は圧縮成形の製造過程で材料内部に残留応力が発生して磁気特性が劣化するた

め、特にモータの固定子鉄心として使用する場合には、焼鈍処理を行って歪を除去し、透磁率の改善を図るのが一般的である。その熱処理温度は500℃前後⁴⁾にも達するため、圧粉磁心のバインダにはガラス系を用いることが多く、ボンド磁石のバインダであるエポキシ系樹脂とは硬化温度や線膨張率が大きく異なる。このため、従来それらを一体成形するのは困難と判断されてきたものと推察する。しかし、圧粉磁心を回転子鉄心として使用する場合、いわゆるバックヨークとしての機能が主となり交番磁界が加わることは少なく、また回転子と固定子間には磁気抵抗となる空隙が存在するために回転子鉄心側の透磁率の依存性は少なくなると考えた。そこで、成形・熱硬化後の焼鈍処理を行わないことを前提に、圧粉磁心のバインダをボンド磁石のそれと類似のものにして、一体化を試みることにした。本報では、エポキシ系のバインダを含むNdFeB系ボンド磁石と圧粉磁心との二色一体成形品の磁気特性、および機械強度について述べる。さらに、異方性ボンド磁石を用いて特徴ある磁気回路を実現した例について述べる。

* 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所

* Advanced Electronics Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

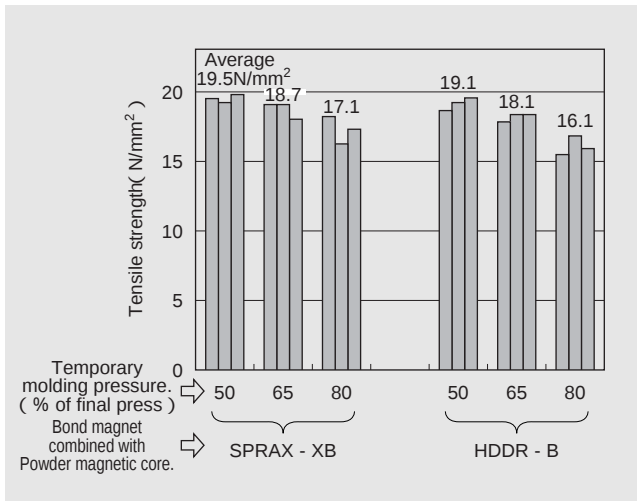


図5 二色成形体における接合界面の引張強度
Fig. 5 Interfacial tensile strength of dual molding materials.

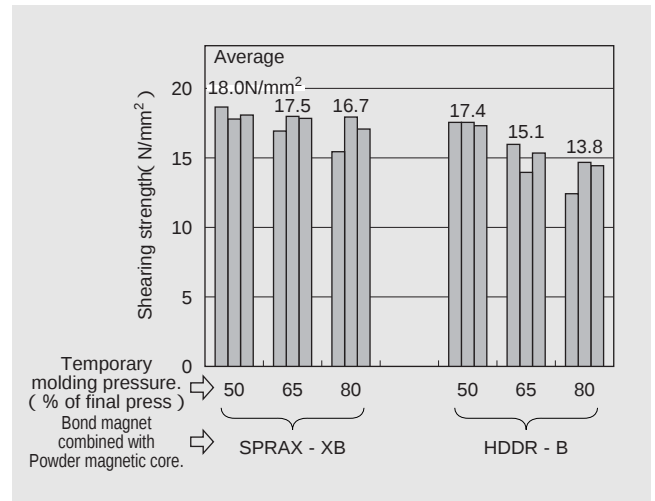


図7 二色成形体における接合界面のせん断強度
Fig. 7 Interfacial shearing strength of dual molding materials.

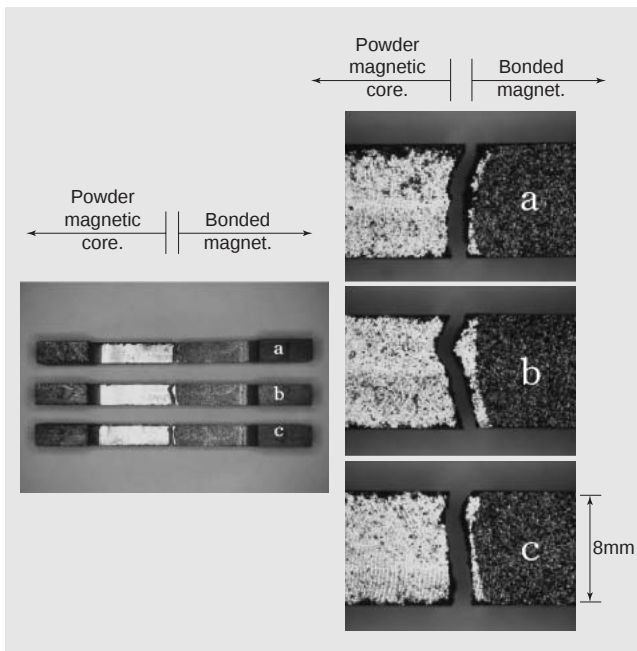


図6 引張試験片の破断部
Fig. 6 Rupture parts of tensile test pieces.

ポンド磁石の仮成形圧力で比較した、二色成形体の引張強度の相関を図5に示す。また、同試験片の破断部外観の写真を図6に示す。図5より、ポンド磁石の仮成形圧力が低いほど一体成形後に高い引張強度が得られるものの、その差は比較的少ないことがわかる。また、図6に示す引張試験片の破断部外観を見ると、何れも界面ではなく圧粉磁心側へ入り込んだ所で破断している様子がわかり、十分な接合強度が得られているものと判断する。

次に引張試験と同様の手法で、図4(B)に示す形状において、せん断強度を比較した結果を図7に示す。図7より、せん断強度においても引張強度と同様の傾向を示し、最大で18N/mm²程度の強度を得られることがわかる。これは、一般的なエポキシ系接着剤とほぼ同等の接合強度であり、必要十分な値であるといえる。

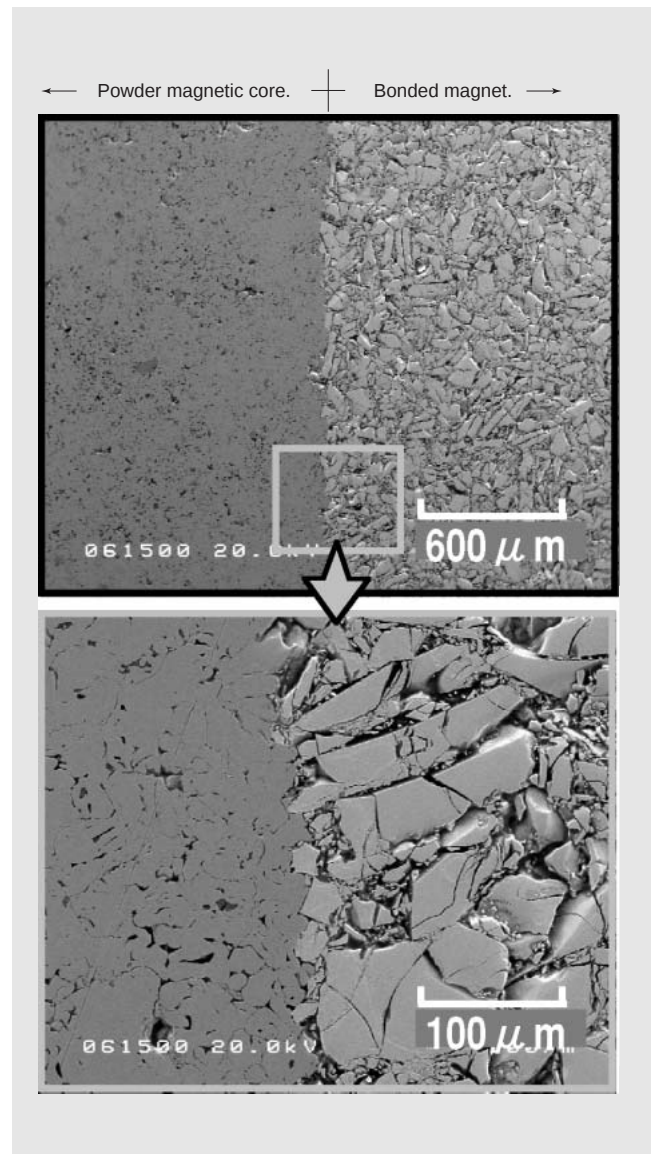


図8 接合断面の電子顕微鏡写真
Fig. 8 SEM images of joint section.

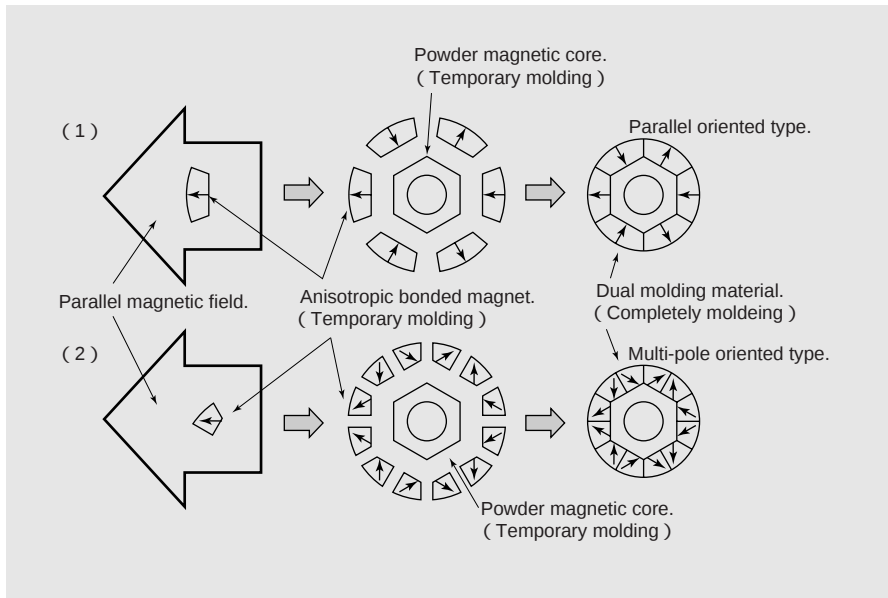


図10 異方性ボンド磁石の二色成形法
Fig. 10 Method of dual molding with anisotropic magnet.

ここで、ボンド磁石と圧粉磁心の接合部における、加圧方向断面の観察写真を図8に示す。図8より、互いの原料粉どうしが噛み込む様に接合している状態が観察され、本成形法ではこの噛み込み現象と、バインダ熱硬化の双方により、強固な接合強度を実現していることがわかる。

5 形状試作例

以上の検討から、エポキシ系のバインダを含むボンド磁石と圧粉磁心とをキャピティ内で一体化する目処を得た。そこで、内転型の磁石回転子を想定して形状試作を行なった。図9(a)は磁石部をリング形状にしたもので、図9(b)は磁石部を4分割して、極中央の肉厚を大きくしたものである。このように、本手法によると磁石や鉄心部の形状を複雑化するのも容易になる。例えば図9(b)を例にすると、モータの低コギング化を目的としてギャップ磁束密度の正弦波化を図る際に、磁石の肉厚で磁束分布を制御することが容易になる。また、q軸インダクタンスを向上させてリラクタンストルクを有効活用する様に、圧粉磁心の形状を設計するのも容易になる。さらに、磁石と鉄心とが強固に接合するため、SUSキャ

ンや炭素繊維などで回転子の外周を保護する必要もなくなる可能性が高い。

6 異方性ボンド磁石の適用例

図5や図7に示す様に、圧粉磁心と組み合わせるボンド磁石の材質は、等方性（SPRAX-XB）や異方性（HDDR-B）を問わずに十分な接合強度が得られることを確認した。ところが、異方性磁石は圧縮成形の製造過程で磁場を与えて磁化容易方向を予め定めておく必要がある。例えば、多極で且つ複雑形状の磁石回転子を想定すると、回転子の表面または内部に分散配置する磁石を全て一様に磁化させるには、複雑な磁場を発生する電磁石が必要になる。さらに、NdFeB系のボンド磁石を磁化するには、一般的に800kA/m以上の強磁場が必要であり、その分布制御と合わせて一度に磁化させるのは非常に困難である。

そこで、本報による二色一体成形の製造工程が、仮成形と本成形とに分割できることに着目し、仮成形の工程のみで磁石の磁化配向を行い、本成形の工程では磁場を与えない製造プロセスを適用することにした。図10(1)に6極の平行配向、また図10(2)に6極の極異方配向

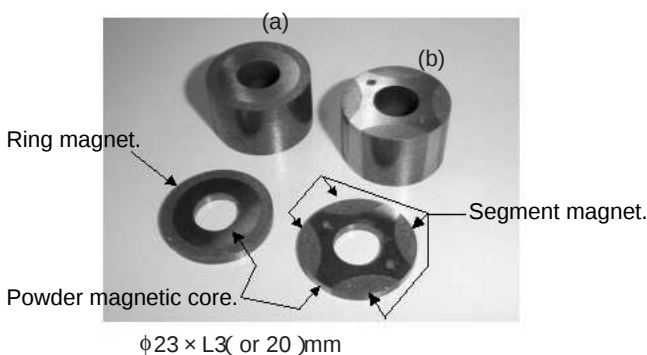


図9 二色成形回転子の試作例
Fig. 9 Prototype of a dual molding magnet rotor.

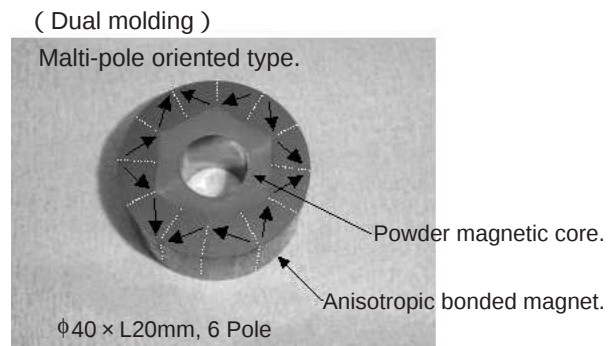


図11 異方性ボンド磁石の適用例（極異方配向）
Fig. 11 Apply of anisotropic bonded magnets to dual molding magnet rotor (Multi-Pole Oriented Type).

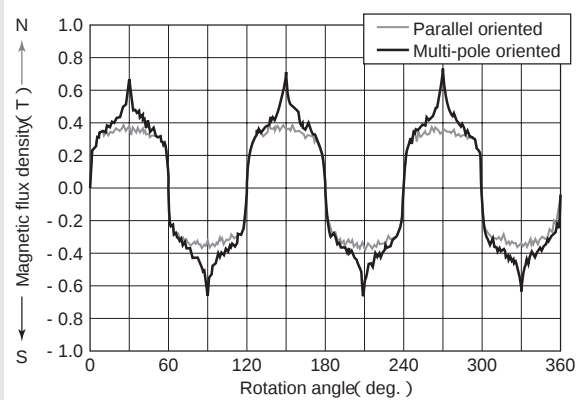


図12 ラジアル方向の表面磁束密度分布

Fig. 12 Magnetic flux density in radial direction.

に対する製造方法の模式図を示す。何れの場合も、必要十分な磁場強度が得られる平行磁界中で、ボンド磁石の仮成形体を磁化および脱磁して磁化容易方向を定め、それらを複数組み合わせる円筒キャビティ内へ再投入し、さらに鉄粉末を給粉して無磁場中で一体的に圧縮成形する手法である。なお、鉄粉末もボンド磁石と同様に予め低密度に仮成形しておくこともできる。このようにすると、多極でかつ複雑な配向の鉄心一体型磁石回転子を容易に実現可能である。

なお、図10に示す形状のものを従来手法で実現しようとすると、異方性ボンド磁石と圧粉磁心のそれぞれを単体で作製して接着固定するのが一般的であるが、接着強度への懸念ばかりでなく、固定位置の変動による着磁ピッチのばらつきや、外径振れの増大なども懸念される。これに対して、本報による二色一体成形法はその全てが金型精度によって大幅に改善可能な見通しである。図11に6極の極異方配向の試作例を示す。

図10や図11に示す一体成形品に対して、6極着磁ヨー

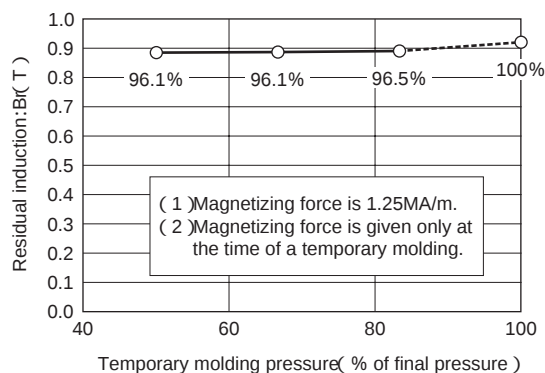


図13 仮成形圧力と残留磁束密度の相関

Fig. 13 Temporary molding pressure vs. residual induction.

クを作製して一体着磁をおこない、回転式マグネットアライザ（日本電磁測器(株)NDK6800）でラジアル方向の表面磁束密度分布を測定した。その結果、図12に示す様に何れの配向においても磁束密度のピーク値のばらつきが $\pm 2.5\%$ 、着磁ピッチのばらつきが $\pm 0.15^\circ$ 、外径振れが0.02mm以下と良好なものであった。

なお、異方性を付与したボンド磁石の仮成形体を無磁場中で本成形すると、配向が乱れて磁気特性が劣化することが懸念されたため、仮成形圧力を制御因子として、本成形後における磁石の残留磁束密度の変化率を調べた。なお、仮成形時の配向磁場強度は1.25MA/mに統一した。仮成形圧力が100%とは、すなわち無磁場中の追加圧を行なわないことを示す。その場合に得られる磁石の残留磁束密度で規格化すると、十分な接合強度が得られる50%の仮成形圧力では、図13に示す様に本成形後に約4%の残留磁束密度の低下が確認された。これは、許容できる範囲内の低下率と判断する。

7 結 言

ボンド磁石と圧粉磁心との一体化を試みるうえで、圧粉磁心のバインダをボンド磁石のそれと同じエポキシ系にして熱硬化温度を揃え、また熱硬化後の焼鈍処理を不要にした。その結果、ボンド磁石の磁気特性は勿論のこと、圧粉磁心においても必要十分な軟磁気特性を確保し、さらにバインダ変更に伴い靱性が向上して、モータ用回転子に相応しい機械強度も実現することができた。以下に本報で得られた知見をまとめる。

- (1) エポキシ系バインダを含むNdFeBボンド磁粉を仮成形した後、同キャビティ内へエポキシ系バインダを含む鉄粉末を給粉し本成形して一体化し熱硬化させる手法により、界面接合強度を15N/mm²以上にできることがわかった。
- (2) 前記手法を応用して、異方性ボンド磁粉を磁場中で仮成形したものを複数準備し、それらと鉄粉末または鉄粉末の仮成形体とを組み合わせる無磁場中で本成形し一体化する手法により、ピーク磁束密度や着磁ピッチ、外径振れ等のばらつきが少ない磁石回転子を得る見通しをつけた。
- (3) エポキシ系バインダを含む圧粉磁心は、焼鈍なしのままで600程度の初比透磁率と、400A/m以下の保磁力、および1.6Tの飽和磁束密度を示し、ボンド磁石用の回転子鉄心として十分な軟磁気特性を示すことがわかった。

今後、モータ組み込み時の回転特性について、評価を続けていく予定である。最後に、ボンド磁石の試作にあたりご協力頂いた(株)NEOMAXに謝意を表したい。

参考文献

- 1) Steve Minett, Curt Jonsson : Magnetic powder a breakthrough for electric motor design: Metal powder report by hoganas AB FEB.2003(2003-2)
- 2) Steve Minett, Curt Jonsson : Creative solutions from magnetic powder components : Metal powder report by hoganas AB FEB.2003(2003-2)
- 3) Steve Minett, Curt Jonsson : More powder call

speaks soft compact research : Metal powder report
by hoganas AB MAY.2003(2003-5)

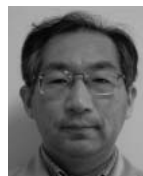
- 4) 榎本裕治，伊藤元哉，正木良三，山崎克之，浅香一夫，石原千生，大岩昭二：圧粉磁心の磁気特性比較及びモータ特性の評価：日本電気学会論文誌 D (2005-1)



増澤正宏

Masahiro Masuzawa

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所



三田正裕

Masahiro Mita

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所



菊地慶子

Keiko Kikuchi

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所
工学博士



相牟田京平

Kyohei Aimutao

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所