

# 世界最強の SmZrFeN 系等方性ボンド磁石粉

Isotropic SmZrFeN Bonded Magnet Powder with Highest Performance

中川 勝利  
NAKAGAWA Katsutoshi

川島 史行  
KAWASHIMA Fumiyuki

新井 智久  
ARAI Tomohisa

等方性ボンド磁石粉として、世界最強の磁石特性を持つ SmZrFeCoBN( サマリウム・ジルコニウム・鉄・コバルト・ホウ素・窒素 )合金を開発した。この磁石粉は、独自の製造プロセスと合金設計に基づき、均質なナノ結晶組織が得られるように金属組織制御を実施しており、最大エネルギー積は  $160 \text{ kJ/m}^3$  を超える値を達成している。開発した磁石粉は、耐熱・耐酸化性にも優れ、残留磁束密度の温度係数は、現在主流の NdFeB( ネオジム・鉄・ホウ素 )ボンド磁石粉の 1/2 以下である。

開発した強力ボンド磁石粉は、超小型ハードディスク装置(HDD)など、小型・薄型化や低消費電力化が求められるモータ用途、あるいは耐熱・耐食性などが従来以上に必要な分野への応用が期待される。

We have developed isotropic SmZrFeCoBN bonded magnet powder with the highest performance of maximum energy product over  $160 \text{ kJ/m}^3$ . The magnet powder has a microstructure with a fine and uniform grain size of 10 to 30 nm, which leads to a remanence enhancement effect. The magnet powder also has excellent thermal stability and corrosion resistance. For example, the temperature coefficient of a residual magnetic flux density is less than half that of conventional NdFeB bonded magnet powder.

Bonded magnets employing high-performance SmZrFeCoBN powder are useful for permanent magnet motors applied to micro or mobile electronic equipment which must be compact and lightweight with low power consumption, such as spindle motors for micro hard disk drives. They can also be used for applications requiring high thermal stability or corrosion resistance.

## 1 まえがき

希土類永久磁石は1970年代の後半以降、現在に至るまでエレクトロニクス産業の発展とともに、これを支える機能部品・材料として特性向上が図られてきた。

希土類磁石は、焼結磁石とボンド磁石に使い分けられる。ボンド磁石は、磁石粉と樹脂などの結合物を混合し、所定の形状に成形したものであり、下記に示すような、焼結磁石にはない優れた特長を持ち合わせていることから HDD のスピンドルモータなどに広く展開されている。

- (1) 形状自由度が大きい。そのため、薄肉リング状など多様な形状が容易にできる。
- (2) 割れ欠けが生じにくい。

ボンド磁石には、等方性ボンド磁石と異方性ボンド磁石がある。等方性ボンド磁石は、異方性ボンド磁石に比べ若干最大エネルギー積の点では劣るものの、生産性、着磁のしやすさなど、製造のしやすさ、使い勝手のよさに特長を持つ。このため、等方性ボンド磁石がボンド磁石の大半を占めており、スピンドルモータを主な応用分野として、パソコン(PC)市場の増大とともに急成長を遂げてきた。

最近の技術トレンドとして、HDDは超小型化と高速化が進められてきており、PC以外にもデジタルカメラや小型携帯機器の高付加価値化の一環として、これら機器への搭載が検討され始めている<sup>(1)</sup>。超小型化あるいは高速化を目指し

た HDD 用スピンドルモータは、いっそうの薄型化、高トルク化、低消費電力化などが要求されており、高性能磁石の適用が必須である。

希土類ボンド磁石の高性能化は、高エネルギー積を持つ磁石粉の実現で達成される。

当社では、高飽和磁化の TbCu<sub>7</sub>(テルビウム・銅)相の SmFeN 系合金を基本として、NdFeB 急冷粉を上回る等方性ボンド磁石粉の実現を目指してきた<sup>(2)</sup>。このため、広い分野で応用できるボンド磁石実現を念頭に、磁石相単体の構成で結晶粒の微細化と均質化が達成できるよう合金組成と製造プロセスの最適化を図り、高残留磁束密度と高保磁力を併せ持つ磁石粉を開発した<sup>(3)(4)(5)</sup>。以下に、その特性と特長について述べる。

## 2 SmZrFeCoBN ボンド磁石粉の開発

最大エネルギー積(以下、(BH)<sub>max</sub>と略記)の理論値は、残留磁束密度(以下、Brと略記)の二乗に比例するが、完全角形を仮定した場合には飽和磁束密度(以下、Bsと略記)の二乗に比例する。このため、SmZrFeCoBN 合金系で Bs が最大となる Fe/Co 比を見出すことが必要である。

また、ナノ結晶粒から構成される等方性磁石材料の Br は結晶粒の大きさに依存する。すなわち、一軸異方性を持つランダムな結晶体で個々の結晶間に磁氣的結合のない場合、

Brは飽和磁化の1/2であるが,数10 nm以下への結晶粒微細化と均質化を行うと remanence enhancement 効果<sup>(注1)</sup>が起り,Brが飽和磁化の1/2を大きく上回る。したがって,合金組成と製造プロセスの両面から結晶粒の微細化と均質化を図ることが重要である。

開発したSmZrFeCoBNボンド磁石粉の製造プロセスを図1に示す。上記の数10 nm以下の微細化と均質化を実現するには,単ロール法による超急冷でアモルファス化させ,その材料の結晶化温度以上で熱処理する方法がもっとも適している<sup>(3)</sup>。このアモルファス化を容易にするのがZr及びBである。これらの元素は,アモルファス化の条件である深い共晶をFeとの二元系で持つ。

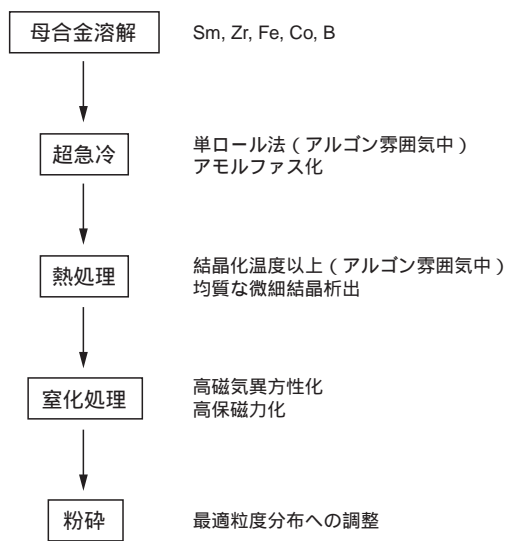


図1．開発したボンド磁石粉の製造プロセス 超急冷でアモルファス化してから熱処理することで,微細化と均質化を実現した。  
Process of fabricating newly developed SmZrFeN bonded magnet powder

B添加効果の一例を図2に示す。この図は超急冷した( $\text{Sm}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y$ ) $\text{B}_{0.1}$ について熱分析(DSC:示差走査熱量計)により,その結晶化温度を評価したものである。結晶化温度のCo量依存性はほとんどないが,Co量の増加とともに結晶化に伴う発熱量は徐々に小さくなり, $y$ <sup>(注2)</sup>=0.3では発熱ピークは観測されなくなる。すなわち,FeのCo置換量増加とともに超急冷によるアモルファス化が困難となる。

Bを添加していない系では $y=0.1$ で発熱ピークが観測されなくなっており,B添加でCo量の多い組成までアモルファス化が可能になる。また,SmZrFeCoBN合金におけるCoリッチ化はBsの向上をもたらし, $y=0.2$ で最大値1.63 Tを示

(注1) Brの向上のことで,磁石相の結晶が数十nm以下に微細化されると起る現象。

(注2) Feに対するCoの置換量。

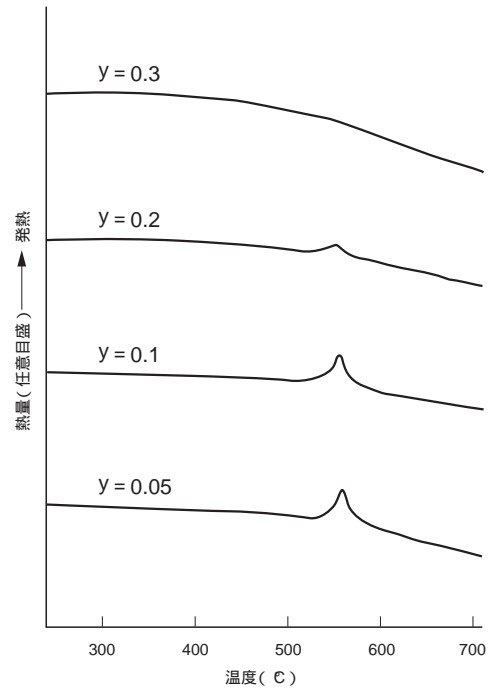


図2．超急冷したSmZrFeCoB合金の熱分析 ホウ素添加で, $y=0.2$ まではアモルファス化が可能になる。  
DSC curves of as-quenched SmZrFeCoB alloys

すため<sup>(4)</sup>,高(BH)max化には有利である。

この結果,B添加はCoを多く含むSmZrFeCo系でのアモルファス化を容易にするため,高飽和磁化を持つ合金での結晶粒微細化と均質化が可能となる。

高Bsを示す( $\text{Sm}_{0.7}\text{Zr}_{0.3}\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ ) $\text{B}_{0.1}\text{N}_x$ 合金について,図1のプロセスを経たボンド磁石粉の透過型電子顕微鏡(TEM)写真を図3に示すが,結晶粒は10~30 nmであり,微細化と均質化を達成していることが確認できる。

一方,Zrはアモルファス化促進効果のほかに,Smとの置換で異方性磁場の調整を行う役割があり,等方性ボンド磁

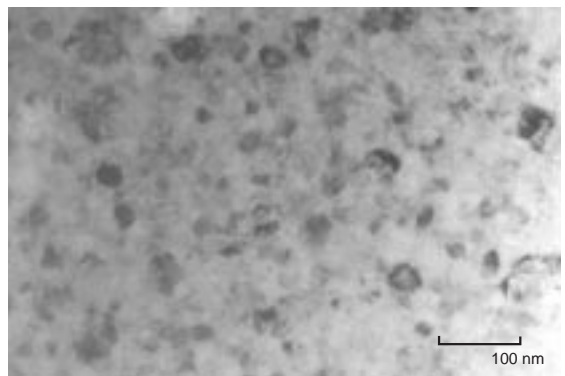


図3．開発した磁石粉のTEM写真 結晶粒は10~30 nmであり,微細化と均質化を達成している。  
TEM micrograph of nitrogenated magnet powder

石粉として特性の最適化を実現する。

( $\text{Sm}_{1-x}\text{Zr}_x \text{ Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ ) $\text{B}_{0.1}\text{N}_\alpha$  合金における保磁力(以下,  $i\text{Hc}$ と略記),  $\text{Br}$  ( $\text{BH}$ ) $\text{max}$ のZr量依存性を図4に示す。 $\text{Br}$ はZrの増加とともに上昇, $x^{(注3)}=0.3$ で $\text{Br}=1.07\text{ T}$ (テスラ)となり( $\text{BH}$ ) $\text{max}=180\text{ kJ/m}^3$ が得られる。この値は等方性ポンド磁石粉では世界最高値であり,開発した磁石粉の高飽和磁化(1.63 T),及び結晶粒の微細化と均質化による remanence enhancement 効果の最大活用によって初めて実現したものである。現在, $\text{Br}: 1.00 \sim 1.07\text{ T}$ ,  $i\text{Hc}: 640 \sim 880\text{ kA/m}$  ( $\text{BH}$ ) $\text{max}: 160 \sim 180\text{ kJ/m}^3$ の各特性範囲の高特性を持つ等方性ポンド磁石粉を開発している。

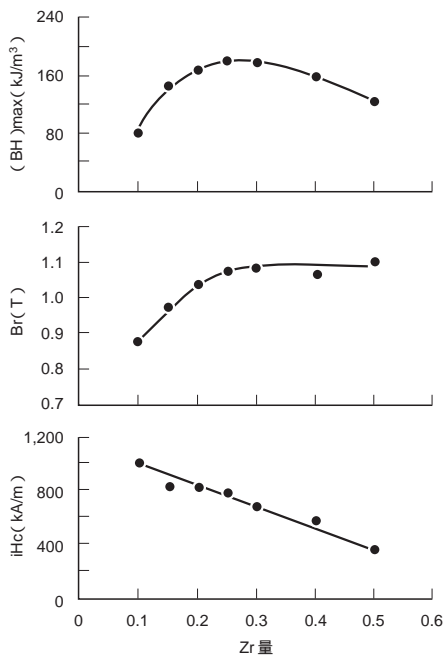


図4．磁石特性のZr量の依存性 SmとZrの構成比で磁石特性を制御できる。

Dependence of magnet characteristics on Sm/Zr ratio of magnet powder

開発したポンド磁石粉は上記のように高Br,高( $\text{BH}$ ) $\text{max}$ ,高*iHc*の高特性を持つが,更にキュリー温度が高いため( $\text{Tc} > 600\text{ }^\circ\text{C}$ ), $\text{Br}$ の優れた温度特性を期待できる。(  $\text{Sm}_{0.7}\text{Zr}_{0.3} \text{ Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ ) $\text{B}_{0.1}\text{N}_\alpha$  磁石粉の減磁曲線を図5に示すが, $\text{Br}$ の温度係数は  $-0.034\% / ^\circ\text{C}$  であり,この合金系ではNdFeB急冷粉の1/2以下の値が得られる。一方, $i\text{Hc}$ は  $-0.40\% / ^\circ\text{C}$  であり,室温で同じ*iHc*を持つNdFeB急冷粉と同等の値である<sup>(5)</sup>。なお,着磁性も同等の*iHc*を持つNdFeB急冷粉と同レベルにある。

この磁石粉は,耐酸化性にも優れている。図6は,開発した( $\text{Sm}_{0.7}\text{Zr}_{0.3} \text{ Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ ) $\text{B}_{0.1}\text{N}_\alpha$ 系ポンド磁石粉と,NdFeB

(注3) Smに対するZrの置換量。

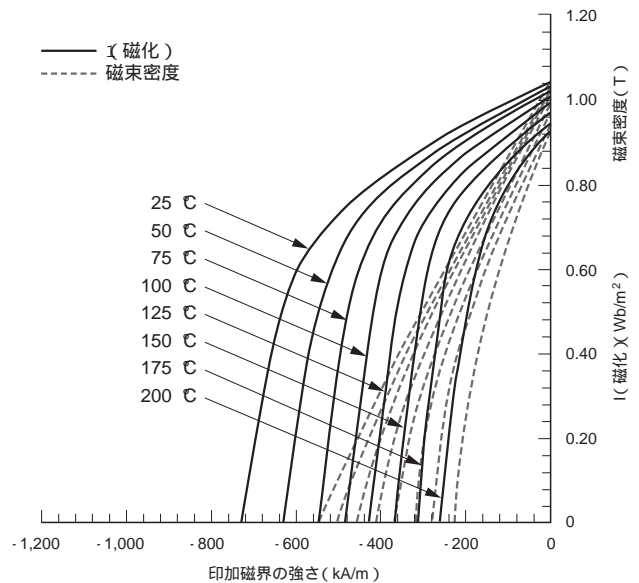


図5．開発した磁石粉の減磁曲線  $\text{Br}$ の温度係数は  $-0.034\% / ^\circ\text{C}$  であり,優れた温度特性を示す。

Demagnetization curves at various temperatures

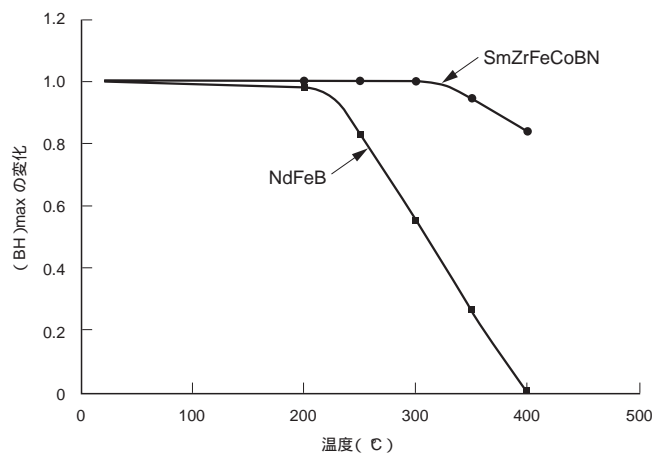


図6．大気中での暴露試験 SmZrFeCoBN磁石粉は300℃まで最大エネルギー積の変化がなく,極めて耐酸化性に優れる。

Results of atmospheric exposure tests at various temperatures

急冷粉についてそれぞれ大気中で各温度で1h放置し,室温に戻した後,試料振動型磁力計(VSM)で( $\text{BH}$ ) $\text{max}$ を評価した結果である。両者とも室温から200℃までその値は変化しないが,それ以上の温度では,開発した磁石粉の( $\text{BH}$ ) $\text{max}$ 値が安定であるのに対して,NdFeB急冷粉は急激に劣化する。これは酸化による劣化と考えられる。

このように,開発した磁石粉は熱に対する特性劣化が少ないため,射出成形で必ず生ずるランナ,ゲート部などの不要部分のリサイクルに有利である。また,ポンド磁石化する樹脂の選択肢が増え,特長ある新規なポンド磁石を提供できる可能性がある。なお,この耐酸化性のよさは熱減磁にも

影響し、SmZrFeCoBN磁石粉は、NdFeB急冷粉に比べ良好な結果が得られている。

NdFeBボンド磁石では防錆(ばうせい)コーティングが必須であるが、開発した磁石粉では優れた耐酸化性のため防錆コーティングはほとんど不要となり、発塵(はつじん)防止対策程度の簡単な表面処理だけで済む。したがって、例えばスピンドルモータの場合、磁石の寸法精度が得やすく、また、ステータとのギャップを狭くすることも可能となり、モータの小型・高性能化が図れる。

開発したSmZrFeCoBN磁石粉を用いてラポレベルで試作した圧縮成形タイプの等方性ボンド磁石(密度:  $6.29 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )は、世界最強の(BH)<sub>max</sub>=213 kJ/m<sup>3</sup>を達成した。

### 3 応用分野

開発したSmZrFeCoBN等方性ボンド磁石粉は、現行のNdFeB等方性と比較すると、高Br、高(BH)<sub>max</sub>が特長である。したがって、開発したボンド磁石粉の応用キーワードは“超小型”、“モバイル”と考えている。すなわち、高Brを活用すると高トルクを要求されるモータ用途に最適であり、従来と同一トルク仕様の場合には小型・軽量化、あるいは薄型化モータを実現できる。具体的には超小型HDD、あるいは光ディスクなどであり、その他、超小型精密アクチュエータなどにも適すると思われる。また、低消費電力化にも有効であるため、電池駆動の携帯機器に搭載されるモータとして有効と考えている。

特に、超小型モータ用ボンド磁石の場合、ボンド磁石の小型化に伴い、磁石粉の大きさにボンド磁石の着磁パターンが影響を受けることがある。開発した磁石粉は、超小型ボンド磁石に要求されるレベルまで微粉化しても特性変化はほとんどないため、上記用途に最適と思われる。また、射出成形ボンド磁石の場合、上記のように磁石粉の耐熱性、耐食性が高いため、新たな樹脂との組合せで、新規コンセプトを持つボンド磁石とその応用製品への展開が可能となる。

### 4 あとがき

等方性ボンド磁石粉として、NdFeB急冷粉を大幅に上回る磁石特性と耐酸化性、温度特性を持ち合わせるSmZrFe-

CoBN系磁石粉を開発した。独自の合金設計と製造プロセスで、微細、かつ均質なナノ結晶組織を実現し、高飽和磁束密度とremanence enhancement効果の最大活用で、世界最強の等方性ボンド磁石特性を達成した。開発した等方性ボンド磁石粉は組成及びプロセスの制御により保磁力調整が容易であり、例えば高iHc側では1,200 kA/mが得られている。

このため、今後はニーズに適した磁石特性のシリーズ化を実施し、希土類ボンド磁石応用分野で特長ある製品群を作り上げ、現行のNdFeB急冷粉とすみ分けた重要な位置を占める磁石粉になると期待している。

### 文 献

- (1) 青柳充彦,ほか. 1インチ型ハードディスクドライブ“マイクロドライブ”. 日本応用磁気学会誌. 24, 1, 2000, p.19 - 24.
- (2) Sakurada,S., et al. Structural and magnetic properties of rapidly quenched (R,Zr)(Fe,Co)(subscript:10)N<sub>x</sub> (R=Nd,Sm). J.Appl.Phys. 79, 8, 1996, p.4611 - 4613.
- (3) Kawashima,F., et al. Magnetic Properties and Microstructure of Rapidly Quenched SmZrFeCoN Magnets. IEEE Trans. Mag. 35, 5, 1999, p.3289 - 3292.
- (4) Sakurada,S., et al. "Isotropic Sm-ZrFe-Co-B-N bonded Magnets with High (BH)<sub>max</sub>". Proc. of 16<sup>th</sup> International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications. Sendai, Japan, 2000-09, The Japan Institute of Metals. 2000, p.719 - 726.
- (5) 沢 孝雄,ほか. 世界最強の最大エネルギー積を持つ等方性SmZrFeN系ボンド磁石粉. 工業材料. 48, 12, 2000.



中川 勝利 NAKAGAWA Katsutoshi  
ディスプレイ・部品材料社 材料部品事業部 材料開発担当。  
磁石材料の開発に従事。  
Materials & Components Div.



川島 史行 KAWASHIMA Fumiyuki  
ディスプレイ・部品材料社 材料部品事業部 材料開発担当  
主務。水素吸蔵合金・磁石材料の開発に従事。応用物理学  
学会会員。  
Materials & Components Div.



新井 智久 ARAI Tomohisa  
ディスプレイ・部品材料社 材料部品事業部 材料開発担当  
グループ長。希土類磁石・磁性蓄冷材などの材料開発・製  
造技術開発に従事。  
Materials & Components Div.