< 総 説 >

(受理：平成 25 年 3 月 29 日)

ボンド磁石の磁粉の分散と磁石のエネルギー分野への応用 Dispersion of Magnet Powder of Bonded Magnets and Application of Magnets to Energy Field

芳賀 美次*

Mitsugi HAGA

1. はじめに

ボンド磁石 (Polymer bonded magnet) は、ポリマー (バインダー) に酸化鉄系フェライトや希土類系磁石粉末 (磁粉) を高濃度に混練・分散させた磁性コンパウンドを成形加工して得られる。今日工業的に使用されている永久磁石は、鋳造磁石、焼結磁石、ボンド磁石に分類される。

ボンド磁石は、鋳造磁石や焼結磁石に比べて非磁性であるバインダーの容量分だけ磁気特性が劣る。しかしながらボンド磁石は、複雑形状、寸法精度、薄肉化、割れ・欠けにくさ、金属との一体化成形、フレキシブルで長尺広幅磁石が得られる、量産性に優れるなど、工業材料として優れた長所を有していることから、電子・電気機器の小型化、高性能化に不可欠なものとして広くに使用されている。

磁粉の分散は、ボンド磁石の磁気特性や機械的特性を高め、品質の安定化に極めて重要である。永久磁石のエネルギー分野への応用では、モータや発電機の小型化・省エネ・効率化に有効に働き、今後ますます重要になる。

2. ボンド磁石の概要

2.1 磁石粉末 (磁粉)

表 1 にボンド磁石に使用されている磁粉の種類と平均粒子径、密度を示す。平均粒子径は、分散性や充填量に関連する他、約 $10\mu\text{m}$ 以下の微細な希土類系磁粉では、高温加工や静電気による発火に関連するため重要な粉体特性である。例えば、ネオジム系 (Nd-Fe-B) 磁粉の粒子径が

大きめで販売されているのは、取扱い時の発火を防止するためである。また、磁粉には、高い磁気特性の他、高充填性と混練性、さらに分散性や耐熱性などの特性が要求される。粉体特性の圧縮密度は、ボンド磁石への磁粉の充填量に関連し、圧縮密度が高いほど充填量も高くできる。

ボンド磁石の磁気特性は、磁粉の種類と充填量で大部分が決まるため、応用製品の要求特性に適した磁粉を選定し濃度を決めている。フェライトは、磁気特性が高くはないがコストパフォーマンスに優れ、複写機やプリンターの磁気ロールなど大物部品に多量に使用されている。高い磁気特性を発現するネオジム系等方性磁粉は、コンピューターのハードディスクドライブ (HDD) や光ディスクドライブ (ODD) などの小型で高出力のモータに多量に使用されている。ネオジム系磁粉の製法は、米国 GM 社が開発した液体急冷法による薄帯を粉砕して得られる。Sm-Fe-N 系磁粉は、Sm-Fe 合金粉末を窒化して得られ、平均粒子径 $4\mu\text{m}$ 程度で表面処理し、取扱い時の安全性を高めている。

芳賀 美次

略歴：1964年 秋田大学鉱山学部燃料化学科卒業
1964年 DIC (元大日本インキ化学工業(株))に入社
ナノ粒子分散技術を含む樹脂着色剤の研究開発
1970年 各種機能性コンパウンドの配合設計・生産技術の研究
1990年 ボンド磁石、導電成形品などの成形加工技術の研究
2000年 定年退職後、技術コンサルティングを開始し現在に至る
2006年 日本ボンド磁性材料協会 会長
趣味：テニス、ゴルフ、囲碁

* 日本ボンド磁性材料協会

東京都荒川区東日暮里 5-52-2 〒116-0014

(神谷ビル 6F602 号)

The Japan Association of Bonded Magnetic Materials (JABM)
Kamiya BLDG 6F-602, 5-52-2, Higashinippori, Arakawa-ku, Tokyo 116-0014, Japan

表1 磁石粉末の種類と平均粒子径, 密度

種 類	組 成	平均粒子径 (μm)	密 度 (g/cm^3)
フェライト系	バリウムフェライト ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)	1.0~1.3	4.9
	ストロンチウムフェライト ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)	1.0~1.7	5.0
ネオジム・鉄・ボロン系	Nd-Fe-B 系 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)	厚さ: 30 長さ: 150	7.6
サマリウム・コバルト系	1-5 型 (SmCo_5)	5~10	8.3
	2-17 型 ($\text{Sm}_2(\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})_{17}$)	20~50	8.5
サマリウム・鉄・窒素系	Sm-Fe-N 系 ($\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$)	2~5	7.65
アルニコ系	Al-Ni-Co 系 ($\text{Al}+\text{Ni}+\text{Co}+\text{Cu}+\text{Fe}$)	50~80	7.30

る¹⁾。

2.2 バインダー

バインダーは、成形加工機の種類と応用製品の要求特性に合わせて選定される。ボンド磁石用バインダーは、高充填性が要求されるため、全ての樹脂が使用できるわけではない。バインダーは、磁粉を高充填でき、しかも充填後の機械的強度や流動性、耐熱老化性、耐溶剤性、耐水性、耐薬品性などに優れたものでなければならない。現在使用されているバインダーを表2に示す。また、特性については後述する「バインダーの特性と分散」の項で述べる。

2.3 ボンド磁石の成形加工方法

ボンド磁石は、バインダーに磁粉を高充填した磁性コン

パウンドを成形加工して得られる。その加工方法は、プラスチックを成形加工する全ての方法で行われている。表2に成形加工方法、バインダー、磁粉の種類及び充填量を示す。充填量は、射出成形用コンパウンドで50~70 Vol.%, エポキシ樹脂を使用する圧縮成形では、80~90 Vol.%も充填している。このように成形加工ができる極限まで磁粉を高充填する理由は、磁気特性が充填量の容量に大略比例するからである。

2.4 射出成形機によるボンド磁石の成形方法

成形加工方法の一例として、射出成形機によるボンド磁石の製造工程を図1に示す²⁾。磁気特性の高いボンド磁石を得るには、磁粉、磁性コンパウンド、金型、成形加工技術、脱磁・着磁技術などが優れていなければならない。ま

表2 ボンド磁石の成形加工方法とバインダー及び磁石粉末材料

成形加工方法	バインダー(樹脂)	磁石粉末(磁粉)	磁 粉 充 填 量
射出成形	GPA, 12PA, PA6T PPS, EVA, EEA, 他	フェライト(Ba, Sr)、Sm-Co 系 Nd-Fe-B 系、Sm-Fe-N, Al-Ni-Co 系	50~70
押出成形	PVC 系、CPE 系、EEA 系 12PA, NBR, ポリエステル系	フェライト(Ba, Sr), Nd-Fe-B 系 Sm-Fe-N 系	50~70
圧延成形 (カレンダー成形)	PVC 系、CPE 系、EPM, EPD NBR, クロロプレン、他	フェライト(Ba, Sr/板状) Nd-Fe-B 系	50~70
圧縮成形	エポキシ樹脂 (EP)	Nd-Fe-B 系、Sm-Co 系 Sm-Fe-N 系	80~90

(磁粉充填量: Vol.%)

図1 射出成形ボンド磁石の製造工程図

図2 ボンド磁石の磁場配向 SEM 写真

た、ボンド磁石には、磁粉結晶のC軸がランダムな方向を向いている等方性ボンド磁石とC軸が一定方向を向いている異方性ボンド磁石がある。異方性ボンド磁石は、磁場射出成形機を使用し金型キャビティ内に磁場を形成し、そこに熔融した磁性コンパウンドを射出し磁粉を配向させる。配向した磁粉は、磁力線が走る方向を向いたまま樹脂の固化によって固定される。異方性磁石の磁気特性は、C軸方向に強い磁力を発現する。図2にフェライトボンド磁石の磁粉が配向している状態を示す³⁾。配向磁場の強さは、フェライト系で10kOe（800 kA/m）以上、希土類系で13kOe（1040 kA/m）以上の磁場発生装置が望ましい。配向磁場が十分でないと配向度が低く、磁気特性も低くなる。

2.5 ボンド磁石の磁気特性

ボンド磁石の磁気特性は、磁粉の種類、成形加工方法、異方性・等方性によって大きく異なる。表3にボンド磁石の磁気特性例を示す⁴⁾。この中の最大エネルギー積（BH）max. は、単位体積当たりの磁石から取り出せる最大磁束量の目安を示す値である。値が大きいほど磁力が強い磁石と言う。

3. ボンド磁石の磁粉の分散

ボンド磁石に使用する磁性コンパウンドは、磁粉、バインダー、添加剤などがよく分散し、均質な複合体を形成し

ている必要がある。分散が良いコンパウンドは、成形されたボンド磁石の機械的強度が高く、熔融時の流動性もよくなる。流動性が高いと、磁粉の配向度が上がり磁力の高いボンド磁石になる。すなわち分散は、ボンド磁石の成形加工性や機械的強度、磁気特性などの性能を引き出す重要な手段である。

一方、磁粉を分散させる際の難易度については、それ程難度の高いものではない。磁粉の平均粒子径は、表1に示すようにカーボンナノチューブや有機顔料のような100nm以下のナノ粒子でないため、混練時に二次凝集体が多量に発生するようなことは少ない。しかしながらボンド磁石は、磁力を高めるため磁粉を極限まで高充填しており、容量的に少ないバインダーを一つ一つの粒子表面に均一に行き渡らせるところに困難さがあり、混練・分散技術が必要になる。

分散に関わる主な要因は、磁粉の粉体特性、バインダーの特性、磁粉の表面処理と添加剤、適正な混練装置などである。以下これらの要因と分散について述べる。

3.1 磁粉の粉体特性と分散

機械粉碎で得られる磁粉の粒子群は、径や形状が不均一な粒子で構成されている。図2はフェライトの例を示す。粉体物性は、最終製品に大きな影響を与えることから、粉体特性を把握することは分散にとっても大変重要である。ボンド磁石で多用される粉体特性は、平均粒子径、粒子形状、真密度、嵩密度、圧縮密度、比表面積、吸油量、粒度分布などである。ボンド磁石に使用されている各種磁粉の平均粒子径は、1～100μmに含まれており、比較的大きいため、混練時に二次凝集が多発することは少ない。そのため取扱いも比較的容易ではあるが、高充填性が要求されているためボンド磁石の分散には、平均粒子径、粒子形状、圧縮密度などの粉体特性の把握が特に重要である。

3.2 バインダーの特性と分散

高充填された磁粉が高分散状態にあるときのバインダーは、磁粉粒子一つ一つの表面を薄い樹脂膜で包み込んでい

表3 各種ボンド磁石の磁気特性例

磁気特性	単位	射出成形				圧縮成形		
		フェライト	Sm ₂ Co ₁₇	Nd-Fe-B	Sm-Fe-N	Sm ₂ Co ₁₇	Nd-Fe-B	Nd-Fe-B
残留磁束密度 (Br)	T	0.31	0.64	0.55	0.81	0.89	0.69	0.98
保持力 (bHc)	kA/m	180	360	340	533	540	410	—
固有保持力 (iHc)	kA/m	195	450	690	756	950	720	1034
最大エネルギー積 (BH) max.	kJ/m ³ (MG·Oe)	18	72	49	115	135	80	159
		2.25	9.0	6.1	14.4	16.9	10.0	19.9
等方・異方性	—	異方	異方	等方	異方	異方	等方	異方
バインダー	—	PA6	PA12	PA12	PA12	エポキシ	エポキシ	エポキシ

る状態とも言える。また、磁粉の高充填性と高い機械的強度を得るには、薄く強い樹脂膜であると同時に、磁粉表面とバインダーの親和性の高いものが要求される。現在多用されているバインダーの特性を分類すると次のようになる。

- ①溶融粘度が低く結晶性樹脂：PA6, PA12, PPS など。
- ②極性を有し、他のポリマーや可塑剤と相溶する樹脂：EVA, EEA, PVC, CPE など。
- ③架橋によって耐熱性、耐油性、機械的強度に優れる樹脂：NBR, EPDM, クロロプレンゴム。
- ④エポキシ基を有し、金属磁粉との密着性が強く硬化時に収縮が少ない樹脂：エポキシ樹脂。

3.3 磁粉の表面処理剤・添加剤と分散

表面処理剤や添加剤は、磁粉表面の濡れ性を高め分散を良くすること、磁性コンパウンドの流動性を高める重要な働きをする。表面処理剤としては、主にシランカップリング剤が使用される。特にポリアミド樹脂にフェライトを高充填する場合は、アミノシランで表面処理しないと流動性、機械的強度、磁気特性、成形品の外観など全く悪く製品にならない。シランカップリング剤の表面処理で重要なことは、適正な添加量を添加すること、処理剤がフェライト表面とポリアミド官能基がしっかり反応するようにすることである。例として、平均粒子径：1.26 μm 、比表面積：1.76 m^2/g のストロンチウムフェライトにアミノシラン $\text{H}_2\text{NC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ を約 0.5% 添加し、PA6 に 90 重量% 混練・分散させたものが磁性コンパウンドである⁵⁾。

金属間化合物の希土類磁粉とエポキシ樹脂の場合は、エポキシ基と金属系磁粉との密着性が高いためフェライトほど表面処理効果が顕著ではない。しかし、エポキシシランを使用することによって、樹脂との密着性がより高くなり、界面から進入する水分を抑え、防錆効果も得られるという報告もある。

添加剤としては、脂肪酸系界面活性剤などがよく使われ分散の改良の他、コンパウンドの流動性改良、離型性を高める目的で添加されることもある。

3.4 混練装置と分散

磁性コンパウンドの混練装置は、バインダーの種類によって異なる。ポリアミド樹脂や PPS の場合は、二軸押出機が多用されている。磁粉を高充填するためその分散には、スクリーンの形状や長さ (L/D) が重要になり、さらに磁粉濃度のバラツキを防止するために原料供給方法にも工夫がされている。押出成形や圧延成形に使用するフレキシブルな磁性コンパウンドは、加圧ニーダーで混練・分散した後、それぞれの成形加工機に供給されることが多い。圧縮成形用のエポキシ系希土類コンパウンドの混練には、高速混合機も使用されている。いずれの混練機も高分散と品質の安定化を図るため、各社それぞれのノウハウをもって、製造条件を定めている。

4. 磁石のエネルギー分野への応用

磁石がエネルギー分野に応用される際、大きく二つに分けることが出来る。一つは省エネルギー、高効率、軽量化などエネルギーを節約する分野であり、もう一つは、発電機でエネルギーを生む分野である。

4.1 希土類系ボンド磁石と焼結磁石の応用

表 4 に示すように磁石は、モータや発電機に多用されているが、現状では殆どがモータ分野である。ボンド磁石は、モータの小型化、軽量化、高効率化、省エネ化などエネルギーに関連する応用分野に欠かせない部品として重要な役割を果たしている。特にハードデスクドライブ (HDD)、光デスクドライブ (ODD) の駆動機構には、小型で瞬発力と持久力の双方が要求されるため、磁力が高いネオジム系ボンド磁石やネオジム系焼結磁石が多量に使用されている。

モータの巻線を永久磁石に替えると、電力消費を伴わない磁束発生という機能によって、効率が 1~5 % 程度向上すると言われている⁶⁾。また磁力が高いほど効率を高くすることができる。例えば日本中のモータの効率が 1 % 向上すると 50 億 kWh の省エネになり原発 1.5 基分の電力消費を抑えることが出来ると試算されている⁶⁾。

今や小型モータ以外的大型モータ分野でもネオジム系焼

表 4 希土類ボンド磁石と焼結磁石の応用分野

応 用 分 野	希土類ボンド磁石 ^(a)	希土類焼結磁石 ^(b)
自動車用モータ・発電機	23 wt. %	37 wt. %
HDD・ODD／ボイスコイルモータ	37	34
MRI／核磁気共鳴画像法	0	11
民生・家電用品、FA	17	15
事務機器	15	0
その他	8	3
合 計	100	100

出典：(a) MQI 西津正晃／2011BM シンポジウム

(b) 藤森信彦 第 14 回磁気応用シンポジウム 2006 年