

© 1985 ISIJ

希 土 類 磁 石



下 田 達 也*

Rare Earth Permanent Magnet

Tatsuya SHIMODA

1. はじめに

磁石（永久磁石）は誰も子供の頃から親しんでいる物質であり、その上工業的には大切な機能材料である。それでは磁石の機能とは？と問われるとあまりにも親しみすぎているのですぐには答えられない。「一定の継続磁場発生機能」というところになるろうか。磁石の定義もまた明確にはなっていないようだ。理化学辞典には「残留磁化および保磁力が大で外部からの磁氣的擾乱によつても残留磁化の強さを容易に変えない強磁性体」と記されている。これは物理的定義であり、そのまま当てはめると磁気テープ、磁気ディスクの磁性体も立派な磁石となる。機能的にも当てはまる。しかし、これらは一般には磁石と呼ばれていない。一般に磁石と言われるのは、上記の定義を満たし、上記の機能を実現する物質でバルク状になっている物のようである。

さてこのような磁石は、世の中でどれくらい生産されているのであろうか。正確な統計はないが、1984年には世界すべてを合わせた生産額は2500億円と推定されている（米国、Wheeler Associateによる）。日本40%、米国32%、その他28%のシェアである。これによると日本の磁石市場はちょうど1000億円になる。世界の磁石市場は年率10%以上の成長を続けており、今後10年で3倍になると予想されている。1984年の日本の生産額の内訳を表1に示す。希土類磁石が意外と額が大きいのに驚かれた人も多いであろう。1975年頃には高々数億円であつたのが1983年には長い伝統を誇るアルニコ磁石を抜き昨年はその差をさらに広げた。日本における焼結希土類磁石の生産量と生産額の推移を図1に示した。

希土類磁石に利用される強磁性体は、希土類（R）とコバルト（Co）との金属間化合物を主体としたものである。RCO₅あるいはR₂Co₁₇化合物が利用され、前者は1-5型、後者は2-17型磁石と呼ばれている。Rとしてはもつばらサマリウム（Sm）が用いられている。しかしながら、一昨年発表されたNd-Fe-B（ネオジウム鉄

ボロン）磁石はり、R₂Fe₁₄Bという金属間化合物を利用した全く新しい希土類磁石である。現在市場に出ている希土類磁石はほとんどR-Co系であるが、将来は磁気性能に優れ、資源的にも有利なR-Fe-B系磁石は相当量生産されてゆくことと思う。

表1 1984年の日本における磁石の生産額の磁石ごとの内訳（電子材料工業会の資料より推定）

磁石の種類	フェライト		アルニコ	希土類		その他	合計
	焼結	ボンド		焼結	ボンド		
生産額 (億円)	536	121	129	180	22	2	990

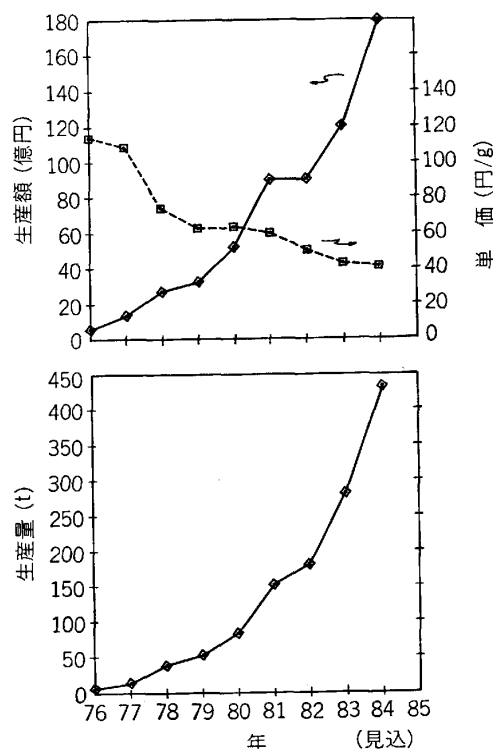


図1 日本の焼結希土類磁石の生産推移（電子材料工業会の統計より）

昭和60年2月14日受付 (Received Feb. 14, 1985) (依頼解説)

* (株)諏訪精工舎基礎開発部 (Research and Development Department, Suwa Seikosha Co., Ltd., 3-3-5 Owa Suwa 392)

希土類磁石の製造法としては焼結法が最も一般であるけれども、樹脂ボンド法によつて製造される希土類ボンド磁石も、その数々の優れた特徴により最近注目されている磁石である。筆者は合金開発をも含めて、このボンド磁石の研究開発に携わつてきている。

2. 歴史的経過

米国に始まつた希土類磁石の研究は、途中欧州勢の参加がありながら現在ではその主導権はすっかり日本の手にゆだねられている。しかしながら、米国も GM (ジェネラルモーターズ) を中心として Nd-Fe-B 磁石でこの劣勢を挽回しようと必死である。昨年の 3M 会議(磁性関係の国際会議)での米国勢のこの磁石に関係した発表の多さには驚かされた。

希土類磁石の研究は 1959 年に米国のベル研の NESBITT が GdCo_5 の磁気異方性の研究を発表したことに始まる²⁾。1966 年には、米国空軍材料研の HOFFER は YCo_5 と Y_2Co_{17} の結晶磁気異方性の大きさを定量的に測定した³⁾。その結果、 YCo_5 は異方性エネルギーを $E_a = K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta$ とすると $K_1 = 5.7 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ (300 K) にものぼる大きな値であることが判明した。翌 1967 年、同研究所の STRNAT は YCo_5 粉末よりボンド磁石を作製し、 $(\text{BH})_{\text{max}} = 1.2 \text{ MGOe}$ を得、さらに同系列の SmCo_5 で同様な磁石を作製して $\text{Br} = 5.1 \text{ kG}$, $\text{H}_c = 3.2 \text{ kOe}$, $(\text{BH})_{\text{max}} = 5.1 \text{ MGOe}$ であることを発表し全世界の磁石材料研究者の注目を集めた⁴⁾。ここにおいて SmCo_5 磁石が産声を上げたのである。その後オランダで VELGE と BUSHOW により STRNAT の延長の方法で、 SmCo_5 化合物を用いて $(\text{BH})_{\text{max}}$ の記録は次々と塗り変えられていつた⁵⁾⁶⁾。しかしボンド法で作成する限り現実的な方法では 8MGOe 程度であり、工業的に可能な方法で高性能な磁石が得られることが示されたのは 1969 年に Raytheon 社の DAS が焼結法で $(\text{BH})_{\text{max}} = 20 \text{ MGOe}$ を発表してからであつた⁷⁾。 SmCo_5 磁石の工業化に関しては日本においても速やかに取り組まれ、70 年代中頃には既に $(\text{BH})_{\text{max}} = 23 \text{ MGOe}$ もの高エネルギー積の磁石も上市されていた⁸⁾。

一方、 R_2Co_{17} 化合物は、図 2 で示されるように RCo_5 よりも飽和磁化 $4\pi I_s$ が高い⁹⁾¹⁰⁾。さらに Co を Fe で置換するといつそう $4\pi I_s$ は向上するので SmCo_5 磁石よりも優れた磁石になる可能性がある⁹⁾¹⁰⁾。しかし、保磁力が満足に得られず基礎研究にとどまつていた。これに突破口を与えたのが俵らの研究であつた。彼らは $\text{Sm}(\text{CoCu})_5$ 合金の発想を R_2Co_{17} 系に拡張して、 $\text{SmCe}(\text{CoFeCu})_{7.2}$ 合金を焼結して保磁力 $\text{H}_c = 5.2 \text{ kOe}$, $(\text{BH})_{\text{max}} = 23 \text{ MGOe}$ を得た (1974)¹¹⁾。このことは 2-17 型を中心とした希土類磁石の研究の主導権を米国から日本に移すことにもつながつていた。以後ほとんどの発見および開発は日本で行われるようになった。1975 年

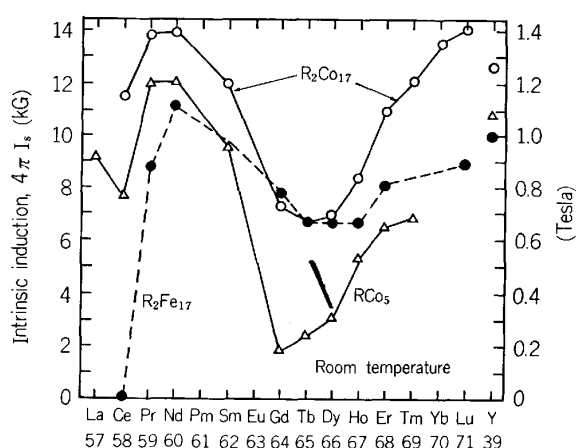


図 2 R-Co, R-Fe 化合物の飽和磁化 (室温)

には先納らにより $\text{Sm}(\text{CoFeCu})_{6.8}$ で $(\text{BH})_{\text{max}} = 26.4 \text{ MGOe}$ が¹²⁾、1977 年には $\text{Sm}(\text{CoCuFeZr})_{7.4}$ で 30 MGOe が尾島、米山らにより達成された¹³⁾。しかしながら H_c は 5~6 kOe とまだ低かつた。1979 年になり下田らは、同じ 5 元素ながらも低 Cu, 高 Fe, 高 Zr でしかも $\text{Sm}(\text{CoCuFeZr})_{8.4}$ と R_2Co_{17} の化学量論組成に近くすると、20 kOe (後の研究¹⁴⁾ によると 30 kOe) もの H_c が簡単な熱処理によつて達成されることを見出し、優れた合金を開発した¹⁵⁾。この成果はボンド磁石として発表されたので $(\text{BH})_{\text{max}} = 16.5 \text{ MGOe}$ であつた。この結果はすぐさま焼結法にも適用され $(\text{BH})_{\text{max}} = 33 \text{ MGOe}$ が達成された¹⁶⁾。この値は R-Co 系では現在までの最高値である。

磁石の $(\text{BH})_{\text{max}}$ を向上させることは、半導体メモリのビット密度を上げるのと同様に研究の最大の指針の一つである。それを達成するのは当分の間 2-17 系 (理論的限界値は約 55 MGOe¹⁰⁾) を、高鉄系にしたり希土類を減らしたりして $4\pi I_s$ を高くして保磁力を出す工夫するのが最も近道であると思われていた。従つて 1983 年 6 月、新聞紙上に住友特殊金属が Nd-Fe 系 (B のことは未記載) で $(\text{BH})_{\text{max}} = 40 \text{ MGOe}$ を達成したとの発表は、磁石関係者に驚きを持つて迎えられた。この磁石は同年の 10 月、日本金属学会において、佐川らにより全貌が明らかにされた¹⁷⁾。Nd-Fe-B 磁石の誕生である。同じ頃米国でも GM が全く異なるアプローチからこの磁石にたどりついていたようである¹⁸⁾。しかし、組成は同じでも米国ではアモルファス金属を作製するのに用いるメルトスピニング装置で磁石特性を得ていたので $(\text{BH})_{\text{max}}$ は高々 14 MGOe と小さかつた¹⁹⁾。現在では米国でも焼結法で $(\text{BH})_{\text{max}} = 45 \text{ MGOe}$ が得られている²⁰⁾。

3. 種類と特徴

希土類磁石を結晶型と製法で分類すると表 2 のようになる。結晶型としては RCo_5 , R_2TM_{17} (TM は遷移金

属), $R_2Fe_{14}B$ で, 製法は焼結とボンドである. 表3に各結晶型の磁気特性を代表的な元素を選んで示した. 図

表 2 希土類磁石の分類. ○印…通常取られている組み合わせ, △印…稀に取られる組み合わせ, ×印…磁石として実現していない組み合わせ

製 法 \ 結晶型	RCo_5	R_2TM_{17}	$R_2Fe_{14}B$
焼 結	○	○	○
ボンド	△	○	×

表 3 各結晶型の代表化合物の磁気特性. T_c 以外はすべて室温における値

結晶型 (化合物)	飽和磁化 $4\pi s$ (kG)	異方性磁場 H_k (kOe)	キュリー点 T_c (°C)	磁壁エネルギー γ (erg/cm ²)	臨界径 D_c (μm)	密度 (g/cm ³)
$SmCo_5$	10.0	350	747	85~93	1.6~1.7	8.60
Sm_2Co_{17}	12.0	110	917	43	0.66	8.77
$Sm_2(Co_{0.7}Fe_3)_{17}$	14.8	65	850	42	0.51	—
$Nd_2Fe_{14}B$	15.7	150	312	32~37	0.27~0.32	7.55

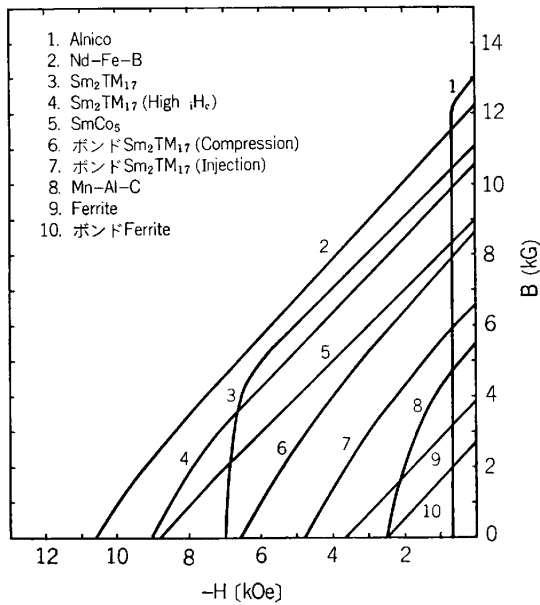


図 3 各種磁石の B-H 減磁曲線 (各社のカタログ参照)

表 4 各磁石の残留磁束密度 Br , 保磁力 iH_c の可逆温度係数 (室温から 100°C 付近まで)

磁石の種類	Br の温度係数 (ppm/°C)	iH_c の温度係数 (ppm/°C)
$SmCo_5$	-450	-2700
Sm_2TM_{17}	-150	-2100
Nd-Fe-B	-1260	-6000
フェライト	-1800	+4000
アルニコ	-420	-200

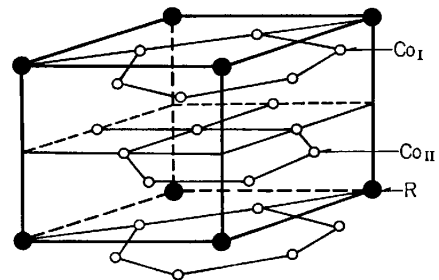
3には代表的な B-H カーブをアルニコ磁石, フェライト磁石もまじえて示した. ただし室温における値である. 各種磁石の温度による特性は表4に示してある. それでは以下, (a)R-Co系 (b) R-Fe-B系そして(c)ボンド磁石についてそれぞれの特徴および開発現状等を述べる.

(a) R-Co系(焼結)

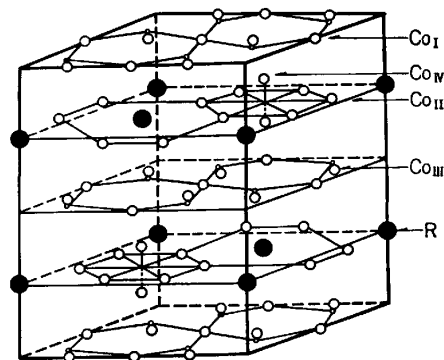
現在利用されているのは前述したようにほとんどこの系である. Rとしてはもっぱら Sm が使用される. 結晶系は $SmCo_5$ は六方晶 ($CaCu_5$ 型), Sm_2TM_{17} の母結

晶である Sm_2Co_{17} は高温で六方晶 (Th_2Ni_{17} 型) 低温側では菱面体 (Th_2Zn_{17} 型) である. RCo_5 , R_2Co_{17} (六方晶) の結晶構造を図4に示す.

$SmCo_5$ 磁石は, ほぼこの組成で生産されている. 一時 Sm を Pr で置換して高エネルギー積化が図られたが, Sm_2TM_{17} 磁石の出現によりその必要はなくなった. $SmCo_5$ 粉末は R/D プロセスとよばれる直接還元



(a) RCo_5



(b) R_2Co_{17} (Th_2Ni_{17} 型)

図 4 R- Co_5 , R_2Co_{17} (六方晶) の結晶構造

法で多くは作製されている。この磁石は現在でも米国では大半を占めている。市場に出ている磁石の $(BH)_{\max}$ は異方性のもので 16~22 MGOe である。ただし、異方性磁石とは磁石を構成する小さな磁石単位 (例えば結晶粒, 単磁区粒子) の磁化容易方向 (NS 方向) が、ある一つの軸に沿って配向している磁石であり、その特定方向のみに着磁可能であり、その方向のみ強い磁束を発生する。一方、小さな磁石単位がランダムに配向しているのは、等方性磁石と呼ばれ区別される。これはあらゆる方向に着磁可能である。

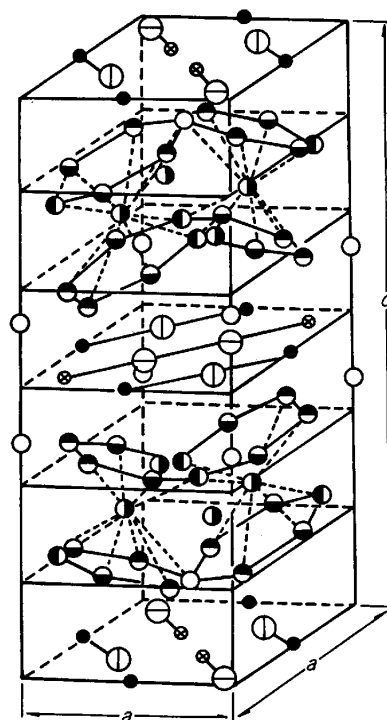
一方日本においては $\text{Sm}_2\text{TM}_{17}$ が主流である。 $\text{Sm}_2\text{TM}_{17}$ 磁石は保磁力, 角形性を得るため非常に制御された熱処理が施される。 $\text{Sm}:\text{TM}=1:7.5$ 付近が最適で, 組成は $\text{Sm}(\text{CoCuFeZr})_{7.5}$ と表される。 TM としては Ti^{21} , Zr , Hf^{22} , Ni^{23} と各社さまざまである。また Sm を少量の Y^{24} で置換して高エネルギー積にしたり, Ga^{25} , Er^{26} といった重希土類元素で置換して温度特性を向上させたりしている。一般的な磁石の $(BH)_{\max}$ は異方性のもので 24~31 MGOe である。 $\text{Sm}_2\text{TM}_{17}$ 系は SmCo_5 系に比べて, Sm と Co 量ともに少ないので, 材料コストは 2 割ほど安い。また最近 Sm を安価な Ce で 50 at% 置換した $\text{SmCe}(\text{CoCuFeZr})_{7.5}$ 磁石で 27 MGOe が得られているという報告があり低コスト化はさらに進んでいる²⁷⁾。高性能化に関しては, 発表論文数は少なくなつたが, 米国 Dayton 大の RAY は $(BH)_{\max}=40$ MGOe に向けて基礎研究に取り組んでいる²⁸⁾。

R-Co 系の長はキュリー点が高く, 温度安定性に優れていることであり (表 4), 特に実際使用する状態での磁束の可逆温度係数 (Br の可逆温度係数に主として依存) は, フェライト磁石, Nd-Fe-B に比べ桁違いに小さい。

(b) Nd-Fe-B 系

ベースになつている結晶系は $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ である。Formula Unit を四つ持つ大きな正方晶 (図 5) から構成されている²⁹⁾。Nd と B は $z=0, 1/2$ の面内だけに存在する。表 5 に $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の R による格子定数, 密度および各種磁気特性を示した。La 以外はすべて上記化合物を安定に形成すると報告されている³⁰⁾。Nd 化合物は特に $4\pi I_s$ が高くこの値で磁石ができれば最高 $(BH)_{\max}=62$ MGOe という数字になる。

磁石にする時には $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ が最高値を示す。焼結すると $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相, $\text{Nd}_2\text{Fe}_7\text{B}_8$ 相および Nd-rich 相に分離し, 高保磁力の原因になる。焼結後の 600°C 付近の時効により保磁力は 2 倍程度大きくなる¹⁾。Fe を Co で置換してゆくとキュリー点が高くなるとともに Br の可逆温度係数も向上する³¹⁾。また Nd を少量の重希土類元素で置換すると保磁力は大きく向上する³⁰⁾。R として Ce ジム (ジウムは Nd と Pr の合金) を用いても $(BH)_{\max}=38.5$ MGOe が得られることが示さ



○ Nd_f ⊙ Nd_g ● Fe_e ○ Fe_e ⊙ Fe_{f_1}
 ⊙ Fe_{f_2} ⊙ Fe_{k_1} ⊙ Fe_{k_2} ⊙ B_g

図 5 Nd-Fe-B の結晶構造

表 5 各 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (正方晶) の格子定数, 密度, 飽和磁化 $4\pi I_s$, Formula Unit 当たりの磁気モーメント M , 異方性磁場 H_a , キュリー温度 T_c ³⁰⁾

化合物	格子定数 (Å)		密度 (g/cm ³)	$4\pi I_s$ (kG)	M ($\mu_B/\text{F.U.}$)	H_a (kOe)	T_c (°C)
	a_0	c_0					
$\text{Ce}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.77	12.11	7.81	11.6	22.7	46.3	151
$\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.82	12.25	7.47	14.3	29.3	125	291
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.82	12.24	7.55	15.7	32.1	150	312
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.80	12.15	7.73	13.3	26.7	basal	339
$\text{Gd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.79	12.09	7.85	8.6	17.3	76.3	388
$\text{Tb}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.77	12.05	7.93	6.4	12.7	350	366
$\text{Dy}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.75	12.00	8.02	6.5	12.8	313	329
$\text{Ho}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.75	11.99	8.05	8.6	17.0	250	303
$\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.74	11.96	8.24	9.3	18.1	basal	281
$\text{Tm}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.74	11.95	8.13	10.9	21.6	basal	268
$\text{Y}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	8.77	12.04	6.98	12.8	25.3	38.8	292

れ³²⁾、昨年話題を呼んだ。Nd-Fe-B 磁石の $(BH)_{\max}$ の最高値は口頭ではあるが 47 MGOe が報告されている (1984 年 11 月, 日本応用磁気学会での住友特殊金属の発表において)。

Nd-Fe-B 磁石は生まれたばかりの磁石であり, まだ応用例は少ないが, 高性能, Nd 資源の豊富さ, 機械的強度等 R-Co 系に比べて優れており, 今後多くの応用分野が開拓され多量に使用されるようになるであろう。

現在、この磁石の最大の欠点は $-6000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ にものぼる iH_c の何逆温度係数の大きさである。この欠点の克服は今後の研究開発の大きな課題になっている。

(c) ボンド磁石

ボンド磁石は、希土類磁石粉を有機バインダーで結合した磁石で、樹脂結合磁石およびプラスチック磁石とも呼ばれている。最近のこの磁石の性能の向上と製造技術および利用技術の発展は目ざましく、応用方面から注目

表 6 希土類ボンド磁石の各種成形法による性能等。PA はポリアミド(ナイロン), EVA はエチレンビニルアセテート

成形方法	(BH) _{max} (MGOe)	バインダー		生産地
		種 類	量 (Vol%)	
圧 粉	10~18	エポキシ	8~12	日本, ヨーロッパ
射 出	6~12	PA-6, PA-12, EVA	35~42	日本
押し出し	6~ 8	エポキシ	~20	イギリス

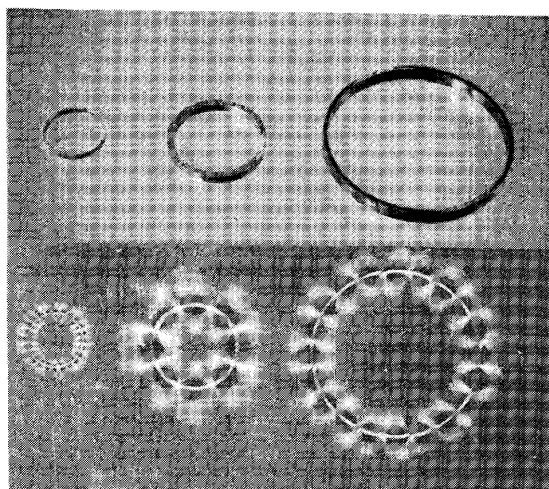


写真 1 希土類ボンドラジアル磁石と着磁パターン

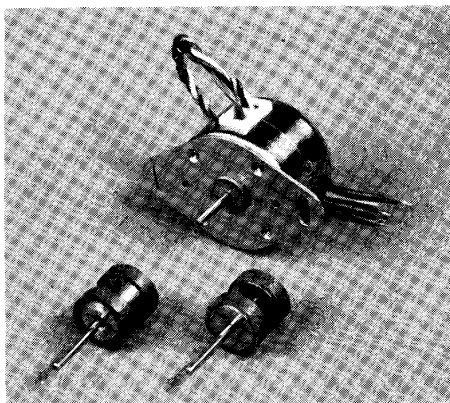


写真 2 希土類ボンド磁石とステップモータ

されている。希土類ボンド磁石の利点は、焼結希土類磁石に見られるような割れ欠けがなく機械的に安定していること、形状の任意性、生産性のよさ、磁性のばらつきのなさ(磁石間および磁石内)、寸法精度のよさ等である。製造法としては圧粉成形、射出成形、押出成形が採用されている。各成形法による、使うバインダーの種類と量、 $(BH)_{max}$ そして生産地を表6に示した。

ボンド磁石は一口で言うとユーザオリエンティッドな磁石であると言えよう。その一例を示そう。写真1のようなリング形状でしかもラジアル(動径)方向に異方性のある磁石はボンド法以外で作製するのは困難である。しかし、この薄肉のリング状ラジアル磁石は最近のOA機器用あるいはオーディオ機器用の精密小型モータ(PM型ステップモータ, DCサーボモータ)にとつては極めて利用価値が高い。筆者のところでも、この磁石を応用したPM型ステップモータを作製し、フェライト磁石利用のモータよりも、高トルク、小型、低コストを実現できた(写真2)。

磁石粉としては一般的に $\text{Sm}_2\text{TM}_{17}$ 系が用いられる。この系は本来磁気特性が SmCo_5 よりも高く、しかも析出硬化型であるため低磁力 iH_c は粒径に依存せず粒度調整可能であり磁石密度が高められ、結果として磁気特性は SmCo_5 を用いた時より著しく向上する。また温度に対しても安定で、耐熱性のあるバインダーを用いれば 150°C までの長期使用に耐えられる。Nd-Fe-B 磁石粉を用いればさらに高性能なボンド磁石が得られると予想されるが、残念ながら実現されていない。

4. 希土類資源

希土類磁石を語る時に資源問題は避けて通れない。一般に希土類元素とは La~Lu のランタン系列の 15 種類と Sc と Y を含めた 17 種類を指す。希土類元素の存在量はクラーク数からみると意外に多く、例えば Ce は Co, Zn よりも、Y は Pb よりも多く希土(Rare Earth)の名は今となつては適切ではない。希土類元素は化学的な性質がお互によく似ており、特定の鉱石から一諸に産出する。工業用に利用されてきた鉱石は、バストネサイト(Bastnasite), モナザイト(Monazite), セノタイム(Xenotime)である。これらの鉱石に含まれる各元素の比率を表7に示した。希土類の確定埋蔵量は資本主義諸国において REO(希土類酸化物)換算で 800 万 t とされている³²⁾。米国 500 万 t, インド 100 万 t, ブラジル 35 万 t がベスト3である。これらの国々の希土類とともに最近は中国のものも注目されている。中国には白雲鉱(内モンゴル自治区), 竜南鉱(江西省), 尋烏鉱(江西省), セノタイム鉱, モナズ鉱(共に広西省)と有望な鉱床が多くある。中でも白雲鉱は、これだけでも資本主義諸国の倍以上もあると推定されている。日本の中国からの輸入は、1976 年にスタートして昨年の 1~

表 7 希土類鉱石の組成例 (単位 wt%)

鉱石	バストネサイト	モナザイト	ゼノタイム	バストネサイト系
産出地	カリフォルニア	オーストラリア	マレーシア	中国(白雲鉱)
La ₂ O ₃	32.0	23.0	0.5	23.0
CeO ₂	49.0	45.5	5.0	50.7
Pr ₆ O ₁₁	4.4	5.0	0.7	6.2
Nd ₂ O ₃	13.5	18.0	2.2	19.5
Sm ₂ O ₃	0.5	3.5	1.9	1.2
Eu ₂ O ₃	0.1	0.1	0.2	0.2
Gd ₂ O ₃	0.3	1.8	4.1	0.5
Tb ₄ O ₇			1.0	0.1
Dy ₂ O ₃			8.7	0.1
Ho ₂ O ₃			2.1	—
Er ₂ O ₃	0.1	1.0	5.4	—
Tm ₂ O ₃			0.9	—
Yb ₂ O ₃			6.2	—
Lu ₂ O ₃			0.4	—
Y ₂ O ₃	0.1	2.1	60.8	0.3

9月の統計では全輸入額の22%を占めるまでになった³³⁾。もはや希土類資源については中国を除いては考えられなくなった。

現在の埋蔵量から Sm-Co 磁石の生産可能年数を推定してみる。仮定として、世界の確定埋蔵量(ソ連を除く)が 2000 万 t (REO), Sm メタルの含有量 1.8 wt%, Sm-Co 磁石中の Sm の含有量 30 wt%, REO のうち分離希土類元素として処理される割合を 50% とすると、 $2000 \times 0.5 \times 0.018 \div 0.3 = 60$ (万 t) の磁石合金が世の中に存在していることになる (Co は埋蔵量としては十分対応できる)。1984 年の世界の Sm-Co 合金の使用量は 850~1000 t と推定される。仮に 1000 t として、このペースで生産されるならば 600 年間生産が続けられることになる。

このように埋蔵量からは十分と言える Sm も現実には既にひつ迫し始めている。その証拠に酸化 Sm (Sm₂O₃) の価格が、1983 年 7~12 月には 8460~11360 円であつたのが、9870~11320 円 (1984 年 1~3 月)、16000 円 (1985 年 1 月) と高騰してきている³⁴⁾。というのは現在、世界の Sm の可能供給量はメーカの公表値で 300~350 t であり³⁴⁾、先に述べたような Sm-Co 合金の 1984 年の使用量からすると、260~300 t の Sm が消費されたことになり、需要と供給がほぼ等しくなり始めているからである。通常の原料であれば需要が多くなればそれに応じて設備を増強して生産を増やすことが考えられるが、希土類の場合には少し事情が異なる。もし 2% の Sm₂O₃ のために鉱石を処理したならば、残りの 98% は余ってしまう。その分を Sm のコストに乗せたならばとてつもなく高価になり非現実的である。希土類産業は、産出するすべての元素がバランスよく使われないと成立しない産業なのである。この意味でよく、「レ

ア・アース産業はバランス産業である」と言われる。

Sm はモナザイト、バストネサイトから主に抽出される。従つてより多くの Sm を得ようとするなら、大量に出てくる La, Ce, Pr, Nd の処置を考えなければならない。この中で La は光学ガラス、水素吸蔵合金等、Ce は触媒、研磨剤等に多量の需要がある³⁵⁾。Pr はタイル、ガラス等の着色剤に使用されると出る量が少ないのであまり問題にならない。一番問題なのは Nd である。Sm の 5~6 倍あると言われているが、ほとんど使用されることなく希土類メーカはデッドストックとして Nd 化合物をかかえ込んでいた。あるメーカでは 1000t もの Nd 化合物が眠つていと言われている。

しかしながら Nd-Fe-B 磁石の出現は、このような状況を一変させた。いまや Nd は希土類元素の中で最も注目される元素になつた。世界の希土類メーカはいつせいに Nd メタルの生産に取り組み始めた。このように Nd-Fe-B 磁石はその磁気性能が驚異的に高いことに加え、資源的観点からもそれにも増すメリットを有しており、Sm-Co 磁石だけでは制限のあつた高性能磁石の供給を 5~6 倍に引きあげた。

5. おわりに

希土類磁石の応用に関しては紙数の都合で割愛した。また希土類磁石と中心とした磁石の将来展望について「5. 将来展望」として原稿にはしてみたが、仮定が多く入りすぎたのと、それを説明するため長い文章になりすぎたので思い切つてカットしてしまつた。ただその中で確からしいと思われる予想を二つ紹介する。一つは、前文で述べたように 10 年後磁石の市場が 3 倍になつており、そして希土類磁石が従来どおりのペースで伸びたならば、R-Fe-B 系をもつてしても 10 年後は再び希土類の資源問題が浮上してくるという予想。もう一つは希土類磁石がそのように伸びてもフェライト磁石との差はあまり縮まらず、フェライト磁石は金額ベースで依然として市場の 70% を占めているという予想である。してみると現在も、そして将来も希土類磁石の役割は、量や金額で市場をリードするのではなくて、その高エネルギー積を十分利用した話題性のある応用製品を創り出し、磁石産業ならびにその関連産業を活性化することにあるように思える。

文 献

- 1) M. SAGAWA, S. FUJIMURA, N. TOGAWA, H. YAMAMOTO and Y. MATSUURA: J. Appl. Phys., 55 (1984), p. 2084
- 2) E. NESRITT: J. Appl. Phys., 30 (1959), p. 365
- 3) G. HOFFER: IEEE Trans. Magn. MAG-2 (1966), p. 487
- 4) K. J. STRNAT: Cobalt, 36 (1967), p. 133
- 5) W. A. J. J. VELGE and K. H. J. BUSHOW: J. Appl. Phys., 39 (1968), p. 1717

- 6) K. H. J. BUSHOW: Philips Tech. Rev., 29 (1968), p. 336
- 7) D. K. DAS: IEEE Trans. Magn., MAG-5 (1969), p. 214
- 8) 原田英樹: 電子材料 (1973年11月), p. 143
- 9) K. J. STRNAT: Proc. 1972 INTERMAG Conf., Kyoto, Japan (1972) Apr., p. 511
- 10) K. J. STRNAT and A. E. RAY: GOLDSCHMIDT informiert... Nr. 35 (1975), p. 47
- 11) H. SENNO and Y. TAWARA: IEEE Trans. Magn. MAG-10 (1974), p. 312
- 12) H. SENNO and Y. TAWARA: Japan J. Appl. Phys., 14 (1975), p. 1619
- 13) T. OJIMA, S. TOMIZAWA, T. YONEYAMA and T. HORI: IEEE Trans. Magn. MAG-13 (1977), p. 1317
- 14) Sun TIAN-DUO: Proc. 6th Intl. Workshop R-Co Mag. (1982), p. 433
- 15) T. SHIMODA, K. KASAI and K. TERAISHI: Proc. 4th Intl. Workshop R-Co Mag. (1979), p. 335
- 16) T. YONEYAMA, A. FUKUNO and T. OJIMA: Proc. ICF 80 (1980), p. 97
- 17) 佐川真人, 藤村節夫, 戸川雅夫, 山本日登志, 松浦 裕: 日本金属学会講演概要 (1983・10月), p. 551
- 18) ジョン・ジェー・クロート: 公開特許公報, 特願昭 58-160620 「高エネルギー積稀土類-遷移金属磁石合金」
- 19) J. J. CROAT, J. F. HERBST, R. W. LEE and F. E. PINKERTON: J. Appl. Phys., 55 (1984), p. 2078
- 20) K. S. V. L. NARASIMHAM: Abstract Booklet 30th MMM Conf., San Diego, California (1984) Nov., p. 13
- 21) K. INOMATA, T. OSHIMA, T. IDO and M. YAMADA: Appl. Phys. Letters, 30 (1977), p. 669
- 22) T. NEZU, M. TOKUNAGA and Z. IGARASHI: Proc. 4th Intl. Workshop R-Co Mag. (1979), p. 437
- 23) A. HIGUCHI, N. ISHIGAKI, Y. MATSUURA and H. YAMAMOTO: Proc. 3rd IFC (1980), p. 336
- 24) 今泉伸夫, 若菜和夫: 日本金属学会講演概要, 29 (1976), p. 338
- 25) 熊坂一裕, 星野耕一, 小野堅一: 電子通信学会技術研究報告 CPM 83-36; 信学技報, 83 (1983) 151, p. 1
- 26) H. A. LEUPOLD, E. POTENZIANI and A. TAUBER: J. Appl. Phys. 55 (1984), p. 2097
- 27) 本島正勝: 電気学会マグネティックス研究会, MAG-84-79 (1984), p. 13
- 28) A. E. RAY: IEEE Trans. Magn. MAG-20 (1984), p. 1614
- 29) J. F. HERBST, J. J. CROAT, F. E. PINKERTON and Y. B. YELON: Phys. Rev., B 29 (1984), p. 4176
- 30) 佐川真人: エレクトロニク・セラミクス, '85 冬号 (1985), p. 32
- 31) M. SAGAWA, S. FUJIMURA, H. YAMAMOTO, Y. MATSUURA and K. HIRAGA: IEEE Trans. Magn. MAG-20 (1984), p. 1584
- 32) 米国鉱山局: Mineral Facts and Problems (1980)
- 33) レアメタル・ニュース No. 1283 (1984. 11. 24), p. 2
- 34) レアメタル・ニュース No. 1251 (1984. 11. 24), p. 1
- 35) 大町良治: 工業レアメタル (1984) 84, p. 43