

我が国で発明された世界最強の磁石—ネオジム磁石

宝野和博

物質・材料研究機構 フェロー

希土類磁石のひとつであるネオジム磁石は我が国で発明された史上最強の永久磁石で、モーターやアクチュエータ用の部品としてさまざまな工業製品に使われている。鉄を主成分として、希土類元素の中でも資源的に豊富なネオジム (Nd) を使うことから、発明後直ちに工業化され、当時の高性能磁石であったサマリウムコバルト磁石を瞬く間に置き換えた。ハイブリッド車の駆動モーターなど温度の上がる環境で利用されるネオジム磁石には資源的に希少な重希土類元素のジスプロシウム (Dy) の添加が不可欠で、Dy 量を削減することが重要な課題になっている。

1. はじめに

コイルに電流を流すと磁界が発生するが、電流を流さなくても永久磁石からは磁界取り出すことができる。ファラデーの電磁誘導の法則で知られるように、磁界中で導線を動かすと起電力が発生するので、永久磁石は運動から電気を取り出す発電機や、電気を運動に変換するモーターなどに使われている。小さな体積で大きな磁界を発生できる磁石を使うと発電機やモーター、それらを使う電子機器を小型化できるので、電力・交通・情報通信分野での省エネルギーにつながる。磁石が発生できる磁気エネルギーは最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ という性能指数で評価されるが、これは磁石の中に誘導される磁束密度 B と磁界 H の積の最大値である。図1に磁石の $(BH)_{max}$ の変遷が示されている。本多光太郎により発明されたKS鋼がもっとも古い高性能磁石で、それ以降三島徳七によるMK鋼、加藤与五郎によるフェライト磁石など日本人により開発された磁石は多い。1966年にStrnatらにより発明された $SmCo_5$ 磁石は希土類元素を用いた初めての磁石で、図1に見られるように従来の合金磁石の性能を飛躍的に更新した。

2. 希土類磁石

$SmCo_5$, Sm_2Co_{17} , $Nd_2Fe_{14}B$ などの希土類元素と遷

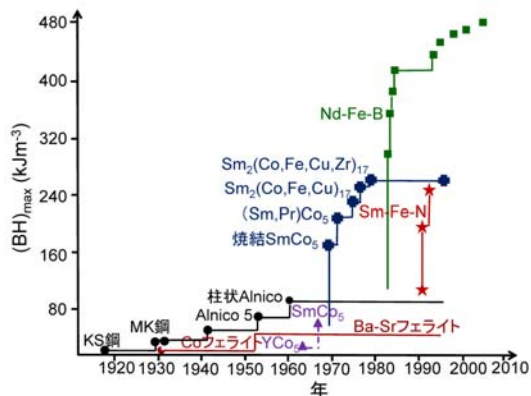


図1 永久磁石の最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ の年次推移

移金属から構成される強磁性化合物を主相とする磁石を総称して希土類磁石と呼ぶ。化合物の原子比から分かるようにこれらの磁石は強磁性元素のCoまたはFeが主な構成元素となる。これらの強磁性化合物の磁化は主にCoやFe原子が担うが、希土類元素のf電子の軌道が一軸方向に大きく伸びるために、スピンの特定の結晶方向に強く配向するようになる。つまり特定の方向で磁化されやすくなり、これを結晶磁気異方性と呼んでいる。結晶磁気異方性が高いと磁化を反対方向に向けるのに必要な磁界、つまり保磁力 H_c が高くなる。保磁力が高い磁石はモーターや発電機で動作中に高い磁界が発生しても、永久に磁石であり続けることができる。希土類元素を含む磁石化合物の結晶磁気異方性は、最外殻がd電子の遷移金属合金よりも一桁以上高くなる。 $SmCo_5$ 磁石はその後さまざまに改良され、ネオジム磁石が開発される前までは $Sm_2(Co,Fe,Cu,Zr)_{17}$ 磁石が磁石の王座を占めていた。ところが、この頃にアフリカの政情不安によってCo価格が高騰し、Feを主成分とする合金で高性能磁石が作れないかという研究が行われるようになった。

3. ネオジム磁石

資源的に豊富なFeを主成分とする希土類磁石の開発に先鞭をつけたのが、1982年に当時住友特殊金属に所属していた佐川真人である。Feと一連の希土類元素の化合物に注目し、C, B, Nなどの格子間にはいる侵入型元素を添加して、 R_xFe_y 化合物(R:希土類元素)の格子を膨張させることにより強磁性化合物を作ろうとしたことから、 $Nd_2Fe_{14}B$ という磁

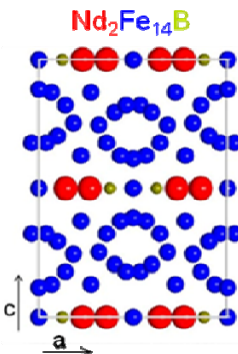


図2 $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物の原子配列の投影図

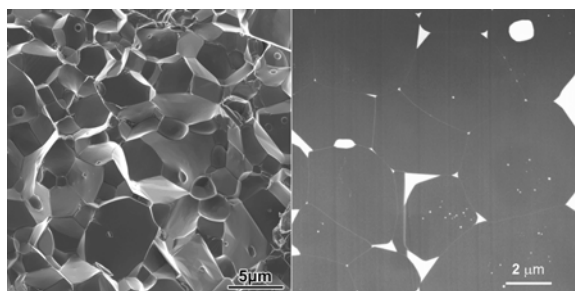


図3 (a)ネオジウム磁石の破面と(b)研磨した断面の走査電子顕微鏡像

束密度 1.6 テスラ(T), 結晶磁気異方性エネルギー 4.4 MJ/m^3 , キュリー温度 312°C という史上最強の磁石化合物発見に至った。この化合物の構造の原子の投影図を図2に示す。結晶構造は a, b 方向の長さが同じで, c 方向に伸張した立方晶であり, c 方向には Nd と B 濃度の高い層が Fe を 3 層はさんで周期的に積層している。この Nd の f 電子と Fe の d 電子が c 軸方向に強く伸張した軌道を構成して, c 軸方向に強い結晶磁気異方性が現れる。ただし, 優れた磁気物性をもった化合物が生まれても, 即磁石になるわけではない。図1に見られるように最初に見つかった SmCo_5 化合物も, 微細な粉を焼き固めて磁石をつくる焼結法が開発されるまで, $(BH)_{\text{max}}$ は低かった。微粉を磁場中で c 軸方向に配向させて焼き固める焼結法が開発されて, 初めて強力な磁石になった。このように, 磁束密度, 結晶磁気異方性, キュリー点は化合物特有の物性であるが, 保磁力は微細組織に依存する構造敏感な特性なので, ミクロな微細組織を最適化して初めて高い保磁力が得られる。例えば, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物でも単結晶だと, 保磁力はほぼ 0 T で, 磁化しても簡単に減磁してしまうが, 製品として使われているネオジウム磁石は約 1.2 T の保磁力を持つ。図3 (a)は商用ネオジウム磁石に衝撃を与えて破壊させた破面を走査電子顕微鏡の2次電子像で観察した像で, 磁石が $5 \mu\text{m}$ 程度の多数の微結晶からできていることが分かる。図3(b)は表面を研磨して観察した走査電子顕微鏡による反射電子像で, 平坦な断面から合金組成の変化を表すコントラストが観察されている。グレーに観察されるのが $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の結晶で, 明るく観察されるのが Nd 濃度の高い非磁性

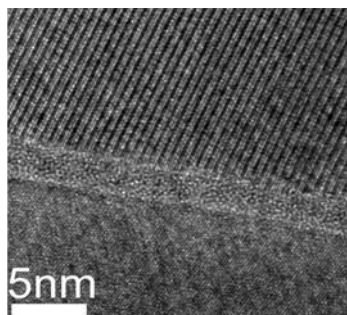


図4 ネオジウム磁石の結晶粒とそれらの界面の高分解能電子顕微鏡像

相である。結晶と結晶の境界が薄く明るく観察されているのは, Nd 濃度の高い数 nm の薄い層が存在するため, ネオジウム磁石の高い保磁力はこの結晶界面に存在するネオジウムリッチ相の薄層の存在が原因と考えられている。この層をさらに高分解能電子顕微鏡で詳細に観察したのが図4で, 周期的な構造を持つ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 結晶の界面に結晶構造を持たないアモルファス相の数 nm の層が存在していることが分かる。

4. 高保磁力ネオジウム磁石

Ndに限らず多くの希土類元素が $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物を作り, その中で $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ が磁石として使われているのは磁化がもっとも高く, 高い $(BH)_{\text{max}}$ が得られるからである。ところがより高保磁力をもたらす結晶磁気異方性が高い化合物は $\text{Dy}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ や $\text{Tb}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物である。このため高保磁力磁石は Nd の一部を Dy で置換した(Nd,Dy)-Fe-B 系合金である。Dy や Tb は重希土類元素と呼ばれて, 資源が希少な上に中国に偏在しているために将来の安定確保が難しくなってきた。このため現在, Dy を使わないで高い保磁力の実現できるネオジウム磁石の開発が重要な研究課題となってきた。磁石の保磁力は図3, 4で示されるような微細組織で大きく変わるので, 理想的な微細組織を得ることができれば Dy を使わなくても保磁力は今の2倍程度伸びるのではないかと期待されている。

5. おわりに

希土類元素を使わないで $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ と同等の磁石ができないかという夢の研究も行われているが, 希土類元素なしで高い結晶磁気異方性を達成するには白金族のより高価な元素を使うしかなく, ネオジウム磁石を超える特性を持ち, 経済的に成り立つ希土類元素フリーの磁石の発明は難しそうである。

ネオジウム磁石発明にいたる経緯は発明者自身がさまざまな学協会誌で述べてきたので, 広く知られている¹⁾。ネオジウム磁石は現在, ハードディスクドライブのモーターやアクチュエータ, 携帯電話のバイブレータ, エアコンのコンプレッサー, 医療用MRI, ハイブリッド自動車の駆動モーター, 大型風力発電機など多くの工業製品で使われる20世紀の大発明の一つである。

参考文献

- 1) 佐川真人監修 ネオジウム磁石のすべて アグネ技術センター 2011