

初等連載講座「永久磁石と応用」正誤表

回数 (巻, 号)	ページ, 行等	誤	正
第1回 (Vol.9, No.3)	p.125, (1.5)式	$H_d = -NM = -\frac{J}{\mu_0}$	$H_d = -NM = -N\frac{J}{\mu_0}$
	p.127, 左段6行	厚さ $l_d$	厚さ $l_m$
	p.127, (1.20)式	$l_{\text{mag}}$	$l_m$

## 永久磁石と応用

### 第1回 磁石の種類とその評価

#### Permanent Magnets and their Applications

##### I. Various Kinds of Magnets and their Evaluation

福永博俊 長崎大学大学院工学研究科

H. Fukunaga, Graduate School of Engineering, Nagasaki University  
Tel/Fax: +81-95-819-2552, E-mail: fukunaga@nagasaki-u.ac.jp

**Key words:** permanent magnet, metal magnet, ferrite magnet, rare-earth magnet, anisotropic magnet, isotropic magnet, casted magnet, bonded magnet, sintered magnet, hot-deformed magnet, SI unit system, magnetic polarization, demagnetizing field, permeance, working point, coercivity, remanence, maximum energy product, flux loss

#### 1. はじめに

電気自動車(EV)やハイブリッド自動車の普及によって、永久磁石の役割が広く知られるようになり、永久磁石に関する研究や技術開発に注目が集まっている。昨年、学会より「永久磁石材料とその応用」に関して初学者にもわかりやすく書かれた連載講座の執筆依頼を受けた。本学会では、本間基文、杉本 諭両氏によるハード磁性材料に関する連載講座が2001年に日本磁気学会誌に連載され、永久磁石材料に関して詳細に解説されている。そこで、本連載講座では、

- ①初学者にも理解できるように、基礎に重点をおいた記載とする。
- ②永久磁石の応用を念頭に、材料に関する分野で磁石に関する研究者や技術者を目指す方々だけでなく、永久磁石を応用する研究者や技術者（例えば、電気工学分野の研究者や技術者など）を目指す方々にも興味をもってもらえる内容とする。

を基本的なコンセプトとして、講座を構成することとした。上記コンセプトの下、本連載講座は、

- 第1回：磁石の種類とその評価
- 第2回：磁石特性と物性
- 第3回：磁石材料緒論1
- 第4回：磁石材料緒論2
- 第5回：次世代磁石
- 第6回：磁石応用最前線

の6回の講座で構成する。第6回については豊田工業大学大学院の藤崎敬介教授にご執筆いただく予定である。「ま

ぐね」には隔号での掲載となるので、2年間にわたる連載講座となる。

なお、大学等において、「磁気」に関する系統的な科目が組み込まれているカリキュラムは比較的少ないであろう。「磁気」について学ぶ一般的な科目としては、「電気磁気学」、「物理学」、「量子力学」、「材料科学」などが考えられる。しかしながら、必ずしも、すべての読者がこれらの科目を受講しているとは限らない。そこで、本連載講座では、一般的な「電気磁気学」の講義の受講を前提として内容を構成した。

第1回の本講座では、永久磁石の種類と永久磁石の評価指標について説明する。

#### 2. 永久磁石とは

永久磁石は、外部からのエネルギー供給なしで、その外部に磁界を発生させ続ける一つの部品と考えることができる。発生された磁界は、電磁力の発生に利用されたり（例えば、電動機）、磁気デバイスのバイアス磁界として利用されたりする。コイルに電流を流しても磁界を発生させることはできるが、流れる電流による銅損が発生する。永久磁石を使用すれば、銅損発生を回避できるので、永久磁石の使用は機器の効率改善に有効である。

永久磁石は、小型のものでは磁気センサー用のバイアス磁界発生装置やカメラの焦点用電動機から、大型のものでは風力発電機用の発電機やMRIの磁界印加装置まで、幅広く使用され、各用途での要求を満足するために、種々の磁石が作製されている。まず、永久磁石のおおまかな分類について説明しよう。

##### 2.1 材料による分類

永久磁石は、材料の観点からは、非希土類系金属磁石（以後、単に「金属磁石(metal magnet)」と呼ぶ）、「フェライト磁石(ferrite magnet)」および「希土類磁石(rare-earth magnet)」に大別される。図1-1に金属磁石（アル



(a) アルニコ磁石 (b) フェライト磁石 (c) Nd-Fe-B磁石

図 1-1 各種磁石.

ニコ磁石), フェライト磁石, 希土類磁石 (Nd-Fe-B磁石)の写真を示している. アルニコ磁石には金属光沢があるが, フェライト磁石は黒色である. Nd-Fe-Bにも金属光沢があるが, これは酸化防止のために表面に金属メッキが施されているためである.

**2.1.1 金属磁石:** 金属磁石の代表格はアルニコ磁石である. この磁石はMK合金<sup>1)</sup>を源流とする析出硬化型と呼ばれる磁石で, その名前が示すように, Fe-Al-NiにCoと少量のCu等を加えた合金である. 図1-1に見られるように, この磁石はほかの磁石に比べて長さが長いことに気づかれるであろう. この理由については, 3.3.3項で説明する.

この磁石の飽和磁気分極は1.4 T程度, キュリー温度は850°C程度である. フェライト磁石や希土類磁石が広く使われるようになるにつれて, その用途を狭めつつあるが, 高い磁気分極と高い熱安定性を必要とされる計測器などに使用されている.

この磁石は, スピノーダル分解と呼ばれる変態により, 体心立方格子の母相が微細な2相 ( $\alpha_1$ および $\alpha_2$ 相と呼ばれ, 飽和磁気分極の値が異なる) に分解すること<sup>1-2), 1-3)</sup>による形状異方性を利用した磁石である. 形状異方性については, 第2回の講座で説明する.

**2.1.2 フェライト磁石:** 一般に $\text{Fe}^{3+}$ を含む酸化物をフェライトと呼んでいる. フェライトの中でマグネトプラムバイト (magnetoplumbite)型結晶構造<sup>1-4)</sup>を代表とする六方晶フェライトは強い軸磁気異方性 (詳細は第2回の講座で説明する) を示し, これを利用することにより磁石材料として応用されている.

マグネトプラムバイト型フェライトの組成は $\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{M}^{2+}\text{Fe}_{12}^{3+}\text{O}_{19}$ と表記することもある. M型化合物と呼ぶ) である. MとしてはBa, Sr, Pb, Caなどがあるが, 実用的には $\text{M}=\text{Ba}$ としたバリウムフェライトと $\text{M}=\text{Sr}$ としたストロンチウムフェライトが永久磁石に使われている.

図1-2にM型化合物における原子の配列<sup>1-5)</sup>を示す. M型化合物の原子配列は複雑なので, 図にはBaとFeのみを示している. 1単位胞は4配位と6配位の $\text{Fe}^{3+}$ を含む原子層 (Sおよび $\text{S}^*$ ) とMを含み5配位と6配位の $\text{Fe}^{3+}$ からなる原子層 (Rおよび $\text{R}^*$ ) がc軸方向に交互に積層された形となっており, 2化学式で1単位胞を形成する. 磁氣的

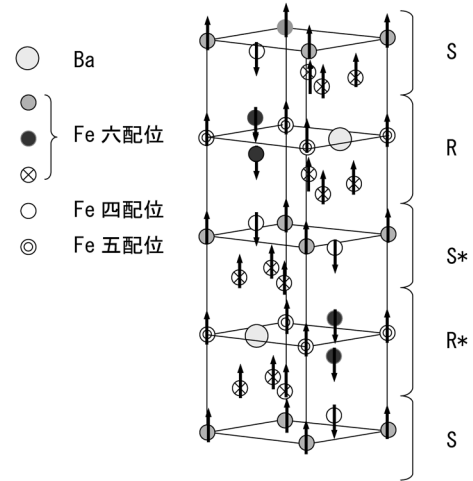


図 1-2 BaO·6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Mの原子配列 (酸素の位置は示されていない)<sup>1-5)</sup>.

にはフェリ磁性体であり, S原子層内の6配位の $\text{Fe}^{3+}$  (合計4個)の磁気モーメントの向きを上向きとすると, 4配位の $\text{Fe}^{3+}$  (合計2個)の磁気モーメントは下向きである. R位置では, 5配位 (1個)と6配位 (合計3個)の $\text{Fe}^{3+}$ の磁気モーメントが上向き, 6配位の $\text{Fe}^{3+}$  (合計2個)の磁気モーメントが下向きとなる.

飽和磁気分極は0.5 T程度とアルニコ磁石や後述の希土類磁石に比べて小さい. これは, フェライトがフェリ磁性体であるためである. キュリー温度は450°C程度である. 磁石としての性能は, 後述する希土類磁石より低いが, 廉価であることから広く利用されている.

**2.1.3 希土類磁石:** 前述した金属磁石やフェライト磁石において, 磁性を発生しているのはFeやCoなどの3d遷移金属である. これらの元素では主に3d電子が磁性に寄与している. 3d電子は外殻にあるため, 結晶場にさらされてその波動関数の縮退が解け, 軌道角運動量をほとんどたない. 磁気異方性には軌道角運動量が関与しているので, 3d遷移金属元素では極端に大きな磁気異方性は期待できない. これに対して, 希土類金属元素 (原子番号57番のLaから71番のLuまでの元素) では少し事情が異なっている. 希土類金属元素の磁性を担う4f電子は, その外側にある5s, 5p, 5d, 6s電子により保護されているため, その軌道角運動量が生き残っている. そのため, 希土類金属元素では, 3d遷移金属に比べて巨大な磁気異方性が発生する.

希土類金属元素は大きな磁気モーメントと磁気異方性を有しているが, キュリー温度は低く, 室温で強磁性となるのはGd ( $T_c=20^\circ\text{C}$ )のみである. したがって, 単体で磁石材料として利用することは困難である. 現在磁石材料として利用されているのは, 希土類金属元素とFeあるいはCoなどの3d遷移金属との合金であり, これらを希土類磁石と呼んでいる. 市販磁石に限れば,  $\text{SmCo}_5$ 系,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

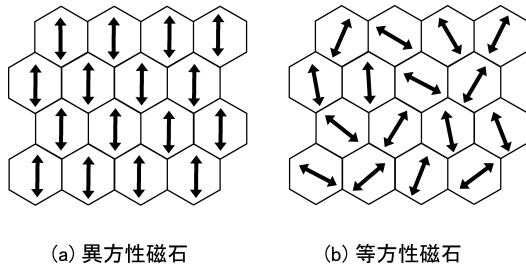


図1-3 磁化容易方向の分布モデル。六角形は結晶粒を、矢印は磁化容易方向を示す。

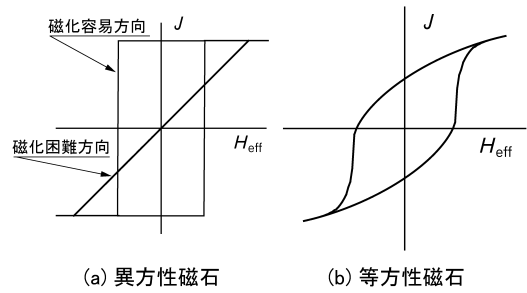


図1-4 異方性および等方性磁石のヒステリシス曲線（概念図）。

系、 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 系、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系の4種類がある。

飽和磁気分極は、1.1~1.6 T程度である。Sm-Co系のキュリー温度は700℃以上、Sm-Fe-N系のキュリー温度も470℃程度であるが、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ のキュリー温度は313℃と低い<sup>1-6)</sup>。高温に曝される用途（例えば、電気自動車の主電動機）では、低いキュリー温度が利用の支障となる。これを克服するための技術開発は、磁石の分野では最近の最もホットな話題の一つである。これについては第4回の講座で説明する。

## 2.2 結晶方位の配向度による分類

永久磁石材料を構成する結晶は「一軸磁気異方性 (uniaxial magnetic anisotropy)」を有している。一軸異方性については第2回の講義で説明がするが、2回の対称性を有する磁気異方性で、結晶の特定の方向およびそれと180度をなす方向が「磁化容易方向 (easy direction of magnetization)」となる。永久磁石には、結晶ごとの磁化容易方向の分布の違いにより、二つのタイプがある。図1-3(a)の磁石では、各結晶の磁化容易方向が、一つの方向にそろっている。このような磁石を「異方性磁石 (anisotropic magnet)」という。一方、図1-3(b)に示した磁石では、各結晶の磁化容易方向がばらばらになっている。このような磁石を「等方性磁石 (isotropic magnet)」と言う。

異方性磁石は、各結晶の磁化容易方向がそろっているのので、その方向に使えば、高い残留磁気分極が得られるが、それと垂直な方向に磁化するのは困難である（図1-4(a)）。一方、等方性磁石については、その残留磁気分極は異方性磁石に比べて低くなるものの（図1-4(b)）、どの方向に対しても同じ磁気特性を示す特徴がある。一つの磁石を多極に着磁する用途などに用いられている。

## 2.3 バルク化の方法による分類

磁石は外部に磁界を発生させるために用いられる。ある程度の広さの磁界発生空間を確保するためには、磁石にもそれなりの体積が必要である。磁石材料を構成する結晶のサイズはnmや $\mu\text{m}$ のオーダーなので、それらを固めてバルク磁石とする必要がある。バルク化の方法の観点から磁石を分類すると「鑄造磁石 (casted magnet)」、 「ボンド磁石 (bonded magnet)」、 「焼結磁石 (sintered magnet)」、 「熱間加工磁石 (hot-deformed magnet)」などがある。

鑄造磁石は合金を鑄造して作製する磁石で、その代表格がアルニコ磁石である。ボンド磁石は、粉末を樹脂で固めてバルク化した磁石である。樹脂を加えた分だけ磁性粉の割合が小さくなり、磁気分極の値が低くなるが、磁石の形状自由度が高い特徴がある。焼結磁石は磁性粉末を焼結してバルク化した磁石で、磁化容易方向のそろった磁粉を高密度でバルク化できることが特徴である。熱間加工磁石は、メルトスパン法で作製した等方性Nd-Fe-B磁粉から異方性バルク磁石を得るために開発された方法である<sup>1-7)</sup>。まず、等方性Nd-Fe-B磁粉をホットプレスによりバルク化し、さらに高温で塑性変形させると結晶粒が加圧方向に対して垂直な方向に伸びた扁平状の形状となる。このとき、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 結晶の磁化容易方向が加圧方向と平行になるように配向し、異方性磁石となる。Nd-Fe-B系熱間加工磁石の結晶粒径は、焼結磁石のそれより小さい。これを利用した、高温でも使用可能なNd-Fe-B磁石の開発が注目を集めている<sup>1-8)</sup>。

## 3. 永久磁石の評価指標

2章で述べたような永久磁石の応用を考慮すると、永久磁石に必要なとされる要件は、高い磁界を発生できること、および発生する磁界が外部からの擾乱により変化しないことである。以下、これらの要件を具体的にどのような物理量で評価するかについて説明する。

### 3.1 単位系—SI単位系とMKSA単位系—

手元の磁性体に関する教科書を見てみると、古いものと新しいものでは、用いられている単位系が異なっている。古い教科書では「MKSA単位系 (MKSA system of units)」が、新しい教科書では「国際単位系 (international system of units, 略称: SI単位系)」が用いられている。このことが、磁性材料を扱ううえで、初学者に混乱をもたらす一つの原因となっていると思われる。そこで、まず、単位系について簡単に説明しておく。

前述したように、現在、私たちが使用している単位系は、SI単位系である。この単位系では、磁界と磁束密度の関係は、

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.1)$$

と表される。B, H, Mは、それぞれ、「磁束密度 (flux den-

sity)], 「磁界 (magnetic field)」, 「磁化 (magnetization)」で, その単位は, T, A/m, および A/m である. また,  $\mu_0$  は「真空の透磁率 (permeability of vacuum)」で, その値は  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m である. 一方, MKSA 単位系 ( $E-H$  対応) では,

$$B = \mu_0 H + I \quad (1.2)$$

と表される. ここでは  $I$  が磁化であり, その単位は  $\text{Wb/m}^2$  ( $\text{Wb/m}^2$  の次元は T と同じ) である. 両式を見比べると, 磁化の値が  $\mu_0$  倍異なることが了解される. また, 単位も異なっており, 混乱を生じやすい. これを避けるために, SI 単位系で式 (1.1) を

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + J \quad (1.3)$$

と変形し,  $J$  を「磁気分極 (magnetic polarization)」と定義する. 単位は T である. 式 (1.2) 右辺と式 (1.3) 右辺を見比べれば, 同じ形となっており,  $I$  と  $J$  が同じ値になる. そこで, 磁性体の磁化に関する情報として,  $J$  を使えば, MKSA 単位系に慣れた方にも不便が少ない. 最近のカタログなどには, 磁化の値ではなく, 磁気分極の値が記載されている. 一方で, 「鉄の飽和磁化 (『飽和磁気分極』が正しい表現) は 2.2 T である.」などと表現される研究者も (私も含めて) 多いのが実情である. 磁化 (MKSA 単位系) も飽和磁気分極 (SI 単位系) も値は同じなので, 特に気にしていただく必要はない.

前段に「 $E-H$  対応」という聞き慣れない言葉が使われている. この言葉は単位系の組み立ての考え方を表す用語であるが, ここでは説明を省略する. もっと勉強したい方はほかの解説等を参考にいただきたい<sup>1-9)</sup>.

なお, 磁気に関する単位と単位系間の変換については, 本学会の HP (<http://www.magnetics.jp/paper/unit.html>) を参考にいただきたい.

### 3.2 反磁界

永久磁石の評価指標の話をする前に, もう一つの重要な概念である「反磁界 (demagnetizing field)」について説明しておこう.

図 1-5 に示すように, 磁化された磁性体を作る磁界について考えてみよう. 磁性体が外部に作る磁界については, 方位磁針や砂鉄などを置くことにより知ることができ. この磁界は, 磁性体の端部に発生する分極「磁極 (magnetic charge)」が発生する磁界と考えることができる. 磁性体端部の磁極は磁性体内部にも磁界を作り, その磁界の向きは磁化の向きと逆向きになる. 磁化した磁性体とその内部に作る磁界を反磁界と言う. 外部から磁界が印加されている場合には, 磁性体内部の「有効磁界 (effective field)」,  $H_{\text{eff}}$ , は「印加磁界 (applied field)」,  $H_{\text{app}}$ , と反磁界,  $H_d$ , の和となるので,

$$H_{\text{eff}} = H_{\text{app}} + H_d \quad (1.4)$$

となる. ここで,  $H_d$  は常に磁気分極  $J$  と逆向きであることに注意する必要がある.

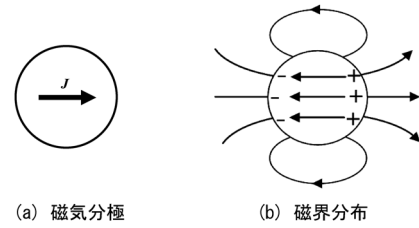


図 1-5 磁性体の磁気分極と反磁界.

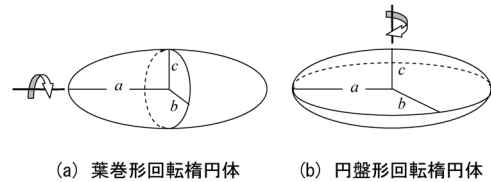


図 1-6 2 種類の回転楕円体.

反磁界は, 磁性体の磁化が作る磁界であるので, その大きさは磁性体の磁化の大きさにより決まる. すなわち,

$$H_d = -NM = -\frac{J}{\mu_0} \quad (1.5)$$

と表現される.  $M$  と  $J$  は, それぞれ, 磁化と磁気分極である. 式中の負号は  $H_d$  は常に磁気分極  $J$  と逆向きであることを表している.  $N$  は「反磁界係数 (demagnetizing factor)」とよばれ, 磁性体の形で決まる定数である. 別の言い方をすれば, 磁性体の大きさには依存しないことに注意していただきたい.

一様に磁化された回転楕円体では, 磁性体内で反磁界が一定値となる. すなわち, 回転楕円体の反磁界係数は場所に寄らず一定である. 葉巻形回転楕円体 (図 1-6(a)) では, 寸法比を  $m$  ( $=a/c$ ) とおくと,

$$N_a = \frac{1}{m^2 - 1} \left[ \frac{m}{\sqrt{m^2 - 1}} \ln(m + \sqrt{m^2 - 1}) - 1 \right] \quad (1.6)$$

$$N_b = N_c = \frac{1}{2} (1 - N_a) \quad (1.7)$$

と与えられる<sup>1-10)</sup>.  $m \gg 1$  の場合には, 式 (1.7) は,

$$N_a \approx \frac{1}{m^2} (\ln 2m - 1) \quad (1.8)$$

と近似される. 一方, 円盤形回転楕円体 (図 1-6(b)) の反磁界係数は

$$N_a = N_b = \frac{1}{2(m^2 - 1)} \left[ \frac{m^2}{\sqrt{m^2 - 1}} \cos^{-1} \frac{1}{m} - 1 \right] \quad (1.9)$$

$$N_c = 1 - 2N_a \quad (1.10)$$

となる<sup>1-10)</sup>. これらの式から明らかのように,

$$N_a + N_b + N_c = 1 \quad (1.11)$$

である.

球形の磁性体については, 3 方向の反磁界係数は等しいので,

$$N_a = N_b = N_c = \frac{1}{3} \quad (1.12)$$

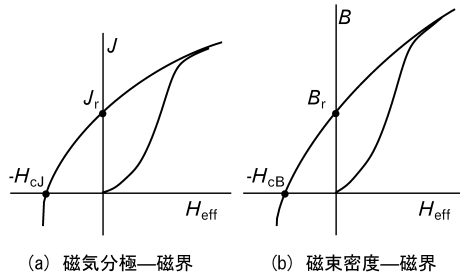


図 1-7 減磁曲線.

となる。また、無限に広い薄板状の磁性体については、面内方向に磁化されたときには反磁界が0となるので、

$$N_a = N_b = 0, \quad N_c = 1 \quad (1.13)$$

である。無限に長い針状磁性体については、長手方向の反磁界が0となるので、

$$N_b = N_c = \frac{1}{2}, \quad N_a = 0 \quad (1.14)$$

が成立する。

ここで注意していただきたいことは、回転楕円体以外の磁性体では、磁性体の磁化状態が場所により異なり、反磁界の大きさも場所により異なる、という点である。

回転楕円体の反磁界係数の計算結果については、簡単に計算できるし、多くの教科書にも記載されているのでここでは省略する。また、回転楕円体以外の形状の磁性体の反磁界係数が示されている教科書も多くある。例えば、文献 1-11 には円柱に対する反磁界計数も示されているが、示された反磁界係数は、対象となる円柱状磁性体での平均値であることにも注意していただきたい。この場合、透磁率が変わると磁化分布が変わり、平均的反磁界係数も変わることに注意する必要がある。

### 3.3 磁石の評価指標

**3.3.1 保磁力と残留磁束密度：**図 1-7(a)には、消磁された状態の磁石に正の磁界を印加したした後、磁界を0に戻し、さらに逆磁界を加えた際の磁気分極の変化を模式的に示している。このときの第二象限の曲線は「減磁曲線 (demagnetization curve)」と呼ばれる。図の横軸は、前節で述べた有効磁界であることに注意して頂きたい。図において、 $H=0$ における磁気分極の値を「残留磁気分極 (residual magnetic polarization, remanence)」,  $J=0$ における磁界の値 (正の値に取る) を「保磁力 (coercivity)」と言う。後述する  $B=0$ となる磁界 (これも保磁力という) と区別するために、「固有保磁力 (intrinsic coercivity)」と言われることもある。

電動機などへの応用においては、電流と磁界の相互作用により発生する力  $F$  を利用する。 $F$  は磁束密度  $B$  と電流  $I$  を用いて、

$$F = I \times B \quad (1.15)$$

と与えられるので、このような応用では、 $J$  よりも  $B$  が重

要である。このような場合は、 $B$  の変化に注目して減磁極線を描くのが一般的である (図 1-7(b))。図 (b) において、 $H=0$  における磁束密度の値を「残留磁束密度 (residual flux density)」言う。 $J$  と  $B$  の間には式 (1.3) の関係があるので、残留磁気分極と残留磁束密度の値は等しくなる。 $B=0$  となる磁界の値も保磁力と言われる。前述した  $J=0$  に対応する保磁力と、ここで説明した  $B=0$  に対応する保磁力を区別するために、前者を  $H_{cj}$ 、後者を  $H_{cb}$  と標記する (図 1-7(a), (b) 参照)。 $H_{cj}$  と  $H_{cb}$  の間には、

$$H_{cj} \geq H_{cb} \quad (1.16)$$

の関係が成立する。

残留磁束密度は、磁石が外部に作る事ができる磁界の強さに関連した評価指標である。残留磁束密度が高ければ高いほど、高磁界を作ることができる。保磁力は磁石の磁化の向きの安定性に関する指標である。保磁力が高ければ、磁化と逆向きの磁界が印加されても磁化はその向きを保つことができる。

優れた永久磁石には、高い残留磁束密度と保磁力が必要である。しかしながら、高残留磁束密度の磁石が高保磁力も有しているとは限らない。そこで、両者を勘案した総合的な評価指標として「最大エネルギー積 (maximum energy product)」があり、 $(BH)_{\max}$  と標記される。これについては、3.3.3 項で説明する。

**3.3.2 反磁界と動作点：**前述したように、永久磁石内には反磁界が存在する。永久磁石は、外部からの印加磁界がない状態で使用されるので、永久磁石内の有効磁界  $H_{\text{eff}}$  は、磁気分極  $J$ 、反磁界係数  $N$  を用いて

$$H_{\text{eff}} = -\frac{N}{\mu_0} J \quad (1.17)$$

と表される。さらに磁束密度  $B$  と  $H_{\text{eff}}$  の関係は

$$B = -\mu_0 \frac{1-N}{N} H_{\text{eff}} = -\mu_0 P_c H_{\text{eff}} \quad (1.18)$$

となる。 $P_c$  は「パーミアンス係数 (permeance coefficient)」と呼ばれ、 $N=1$  で  $P_c=0$ 、 $N=0$  で  $P_c=\infty$  となる。式 (1.18) は、 $B-H$  座標上で傾き  $-\mu_0 P_c$  の直線を表し、「パーミアンス線 (permeance line)」と言われる。パーミアンス線は、磁石の材料特性には依存せず、磁石の形状によって決まる。図 1-7 に示した減磁曲線は、磁石の材料特性を表しているので、磁石内の  $H_{\text{eff}}$  と  $B$  は減磁曲線とパーミアンス線の交点  $(-H_w, B_w)$  にあることになる。この点を磁石の「動作点 (working point)」と言う (図 1-8)。有限の大きさの磁石内の磁束密度は残留磁束密度より小さいことに注意して頂きたい。なお、磁化と逆向きの外部磁界  $H_{\text{app}}$  が加わると、図に示すように、その分だけパーミアンス線が平行移動し、動作点が変化する。磁化と同じ方向に外部磁界が加わった際には、図に示した変化とは異なる変化が生じるが、この現象については次回以降に説明する。

**3.3.3 最大エネルギー積：**永久磁石は、その外部に磁

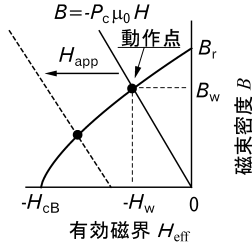


図1-8 減磁曲線とパーミアンス線.

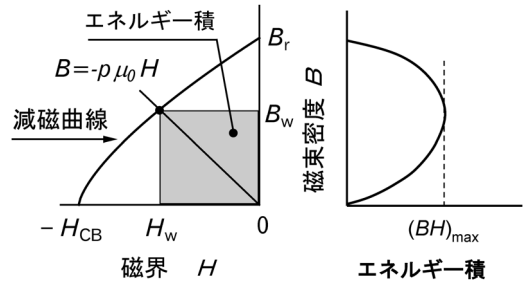


図1-10 減磁曲線とエネルギー積.

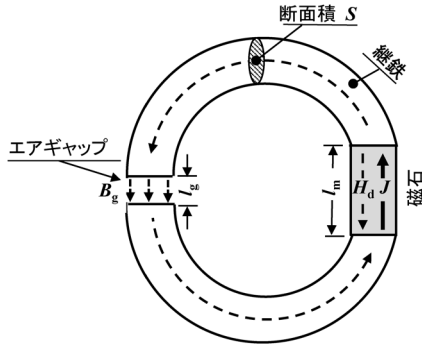


図1-9 磁石が外部に作る磁気エネルギーの計算モデル.

界を発生するために用いられるので、磁石が発生した磁界に蓄えられる磁気エネルギーで性能を評価することができ。まず、磁石が外部に作る磁界のエネルギーを計算してみよう。

計算を簡略にするために、図1-9に示す配置を考える。厚さ  $l_d$ 、断面積  $S$  の円筒形磁石に十分高い透磁率を有する継鉄が付けられ、継鉄の一部には狭いエアギャップ (幅  $l_g$ ) が設けられている。エアギャップは十分に狭く、ギャップ内の磁束密度  $B_g$  が一定であるとする。この磁気回路にアンペアーの周回積分の法則

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0, \quad (1.19)$$

を適用すると、エアギャップおよび磁石中の磁束密度、 $B_g$  および  $B_{\text{mag}}$ 、について、

$$B_g = B_{\text{mag}} = \frac{\mu_0 H_d l_{\text{mag}}}{l_g} \quad (1.20)$$

が成立する。 $H_d$  は磁石内の反磁界である。継鉄の透磁率は十分高いので、継鉄部の磁界は無視できるとしている。式(1.20)から、エアギャップ部の磁界による磁気エネルギーを計算し、磁石の体積で除すると、単位体積の磁石がその外部に作る磁界のエネルギー  $E_s$  が

$$2E_s = H_d B_{\text{mag}} \quad (1.21)$$

と得られる。図1-8と見比べると、 $H_d = H_w$ 、 $B_{\text{mag}} = B_w$  であるので、 $B_w \cdot H_w$  (「エネルギー積 (energy product)」) という  $E_s$  の2倍となる。

図1-10に示すように、エネルギー積は動作点と2本の座標軸が作る長方形の面積となる。図に示されているように、動作点が変わるとエネルギー積の値も変化する。エ

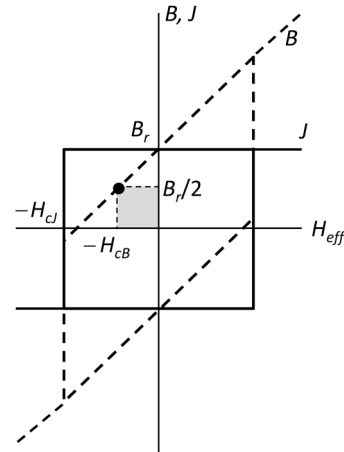


図1-11 角形のヒステリ曲線を有する材料の最大エネルギー積の計算.

ネルギー積の最大値を、「最大エネルギー積 (maximum energy product)」と言い、 $(BH)_{\text{max}}$  と標記する。

大きな  $(BH)_{\text{max}}$  が得られる減磁曲線はどんな形であろうか。答えは図1-11のように、 $J-H_{\text{eff}}$  曲線が長方形となり、 $H_{\text{CB}}$  が十分に高い場合である。 $J-H_{\text{eff}}$  曲線が長方形の場合には、 $B-H_{\text{eff}}$  曲線は、 $\mu_0 H_{\text{eff}}$  の傾きをもった平行四辺形になる。このときは、 $\mu_0 H_{\text{CB}} = B_r$  が成立するので、 $\mu_0 H_w = B_w = B_r/2$  のときにエネルギー積が最も大きくなり  $(BH)_{\text{max}} = B_r^2 / (4\mu_0)$  となる。 $B_r = J_s$  ( $J_s$ : 飽和磁気分極) なので、

$$(BH)_{\text{max}} = \frac{J_s^2}{4\mu_0} \quad (1.22)$$

となる。この値は飽和磁気分極  $J_s$  を有する材料で得られる  $(BH)_{\text{max}}$  の限界値である。

使用する磁石の量に制限を加えなければ、 $B_r$  が大きいほど強い磁界を作ることができる。兎にも角にも、外部からの大きな磁界に対する安定性を重視するなら、保磁力の高い磁石が良い。最大エネルギー積  $(BH)_{\text{max}}$  は、単位体積の磁石が外部に作る磁気エネルギーの1/2を示しており、磁石を総合的に評価する指標である。

一方で、外部磁界が蓄える磁気エネルギー (エネルギー積) は磁石のパーミアンスによって変化するので (図1-10参照)、磁石を有効に使用するためには、パーミアンスが適当な値になるような磁気回路の設計が必要であるこ

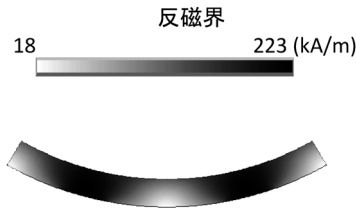


図1-12 12極に着磁したリング状Nd-Fe-B磁石内の反磁界分布の例。1/6の領域での分布が示されている。

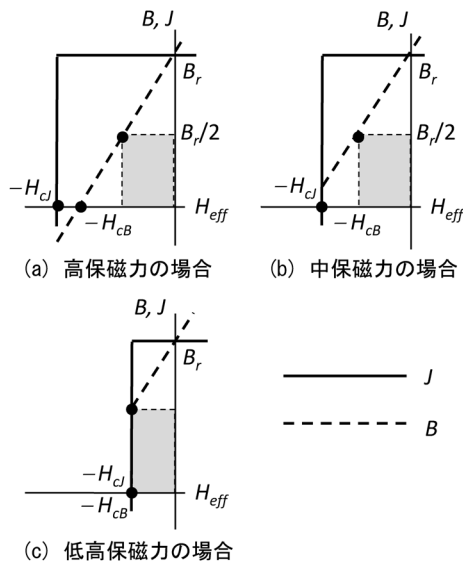


図1-13 保磁力と $(BH)_{\max}$ の関係。図中の黒丸は $(BH)_{\max}$ を与える動作点を示す。

とを忘れてはならない。2.1節で、アルニコ磁石の長さが他の磁石に比べて長いことを述べた。これは、アルニコ磁石の保磁力が他の磁石に比べて低いため、最大エネルギー積を得るためには、パーミアンスを大きく取る必要があるためである。

図1-12には、12極着磁したリング磁石（Nd-Fe-B系ボンダ磁石）内の反磁界分布の例を示している<sup>1-12</sup>。反磁界は18 kA/mから223 kA/mまで広く分布しており、磁石を最適動作点で使用することは必ずしも容易なことではない、エンジニアの腕の見せ所である。

**3.3.4 もう一度「保磁力と残留磁束密度」:**前項で、磁石の総合的な評価指標とし最大エネルギー積 $(BH)_{\max}$ があることを説明した。この項では、保磁力および残留磁束密度と最大エネルギー積 $(BH)_{\max}$ の関係を考えてみよう。図1-13に三つのタイプの磁石材料の減磁曲線（磁気分極—磁界および磁束密度—磁界）を模式的に示している。理解を容易にするために、長方形の $J-H_{\text{eff}}$ 曲線を仮定している。(a)は保磁力が十分大きな場合で、磁気分極 $J$ が反転する前に磁束密度 $B$ の値が負になる。(b)に示した例では、 $B$ が負になる前に磁気分極の反転が起こるが、 $(BH)_{\max}$ を与える点は固有保磁力 $H_{\text{cj}}$ より低磁界側にある。(c)の例は保磁力の小さな場合で、 $(BH)_{\max}$ を与える磁界は $H_{\text{cj}}$ とな

る。材料の $H_{\text{cj}}$ の増加は、(c)の場合には最大エネルギー積の増加をもたらすが、(a)、(b)の場合にはエネルギー積の増加は期待できない。(a)、(b)の場合にはむしろ残留磁束密度 $B_r$ の増大が最大エネルギー積の増大に効果的である。

現在、主に使われているフェライト磁石や希土類磁石は(a)あるいは(b)のタイプに属するので、残留磁束密度を増大させることがエネルギー積の増大にも有効である。

このような背景から、高飽和磁気分極の材料が求められている。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bを主相とするNd-Fe-B磁石で高い $(BH)_{\max}$ 値が得られるゆえんは、その高い飽和磁気分極(1.6 T<sup>1-6</sup>)にある。

**3.3.5 熱安定性の評価:**永久磁石が種々の機器に応用される場合には、環境の変化や機器の運転による発熱により、磁石の温度が変化し、磁石から発生する磁界強度が変化する。また、温度変化が磁石から発生する磁界強度の経時変化を加速する場合がある。本項では、温度変化による発生磁界の変化の評価について説明する。

金属系磁石や希土類磁石では、温度上昇とともに磁気分極と保磁力が低下し、磁石から発生する磁束の総量が減少する（当然のことながら磁界も弱くなる）。これを「減磁(flux loss)」と言う。減磁には「可逆減磁(reversible flux loss)」と「不可逆減磁(irreversible flux loss)」がある。前者は温度を元に戻せば回復する減磁であり、後者は温度を元に戻しても回復しない減磁である。

可逆減磁の大きさは、磁石材料のキュリー温度に影響されるが、必ずしもそれだけでは決まらない。実用的には、残留磁束密度 $B_r$ 、保磁力 $H_{\text{cb}}$ 、固有保磁力 $H_{\text{cj}}$ の温度変化率、それぞれ $\alpha(B_r)$ 、 $\alpha(H_{\text{cb}})$ 、 $\alpha(H_{\text{cj}})$ 、を評価する。

不可逆減磁は、短時間で生じる初期減磁(initial flux loss)と時間とともに増加する長期減磁(long-term flux loss)に分類される<sup>1-13</sup>。初期減磁は、主に、磁石の温度上昇による保磁力の減少や減磁曲線の角形比の低下により生じる。一方、長期減磁は、主に、「磁気余効(magnetic aftereffect)」と磁石の物理的劣化によって生じる。初期減磁や磁気余効による減磁は、磁石を再着磁すれば回復するが、磁石の物理的劣化による減磁は再着磁しても回復しない。このような減磁は「永久減磁(permanent flux loss)」と呼ばれる。

一般に、磁石の不可逆減磁は、磁石から発生する磁束量の室温での測定、その磁石の高温暴露、磁石の温度を室温に戻しての磁束量の再測定、を繰り返すことにより評価される(図1-14挿入図)。このとき、不可逆減磁率 $FL$ は

$$FL = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{\Phi_0} \quad (1.23)$$

と定義される。ここで、 $\Phi_0$ と $\Phi_1$ は暴露前後の磁束量である。永久減磁が抑制された磁石では、不可逆減磁量は対数時間とともに図1-14に示すように変化する。短時間での大きな減磁が初期減磁、対数時間に対して直線的に増加す



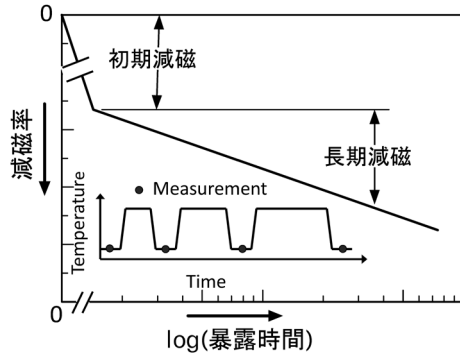


図1-14 不可逆減磁率の評価.

る減磁が長期減磁である.

なお、フェライト磁石では、保磁力の温度係数が正となり、温度を下げることにより減磁が起こる場合がある。これを低温減磁と呼んでいる。

#### 4. おわりに

今回の講座では、永久磁石の特性を理解する観点から、磁石の種類と評価指標について説明した。今回は以後の講座を理解するうえで是非必要な指標に絞って説明したので、説明した指標のほかにも多くの指標がある。今後の講座の中で、その都度説明することにする。

次回の講座では、今回説明した評価指標と材料の物性がどのように関係しているかについて説明することにする。

#### References

- 1- 1) 三島徳七: *Ohm*, **19**, 353 (1932).
- 1- 2) 岩間義郎: 硬質磁性材料 (丸善, 1976), 第3章.
- 1- 3) R. A. McCurrie, *Ferromagnetic Materials*, ed. by E. P. Wohlfarth (North-Holland, Amsterdam, 1982), Vol. 3, Ch. 3.
- 1- 4) J. Smith and H. P. J. Wijn: *Ferrites* (Philips Tech. Library, John Wiley and Sons, 1959).
- 1- 5) V. Adelsköld and Arkiv Kemi: *Mineral. Geol.*, **12A**, 1 (1938).
- 1- 6) M. Sagawa, S. Hirose, H. Yamamoto, S. Fujimura, and Y. Matsuura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, 785 (1987).
- 1- 7) R. Mishra: *J. Appl. Phys.*, **62**, 967 (1987).
- 1- 8) 日置敬子, 服部 篤: 素形材 **52**(8), 19 (2011).
- 1- 9) 例えば, 福永博俊: 日本磁気学会初等磁気工学講座テキスト (2008年版~2014年版).
- 1-10) 例えば, 近角聰信: 強磁性体の物理(上) (裳華房, 東京, 1978), p. 15.
- 1-11) R. M. Bozorth: *Ferromagnetism* (D. Van Nostrand Company Inc., 1951), p. 849.
- 1-12) H. Fukunaga, S. Narikiyo, H. Koreeda, T. Yanai, M. Nakano, and F. Yamashita, *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 4108 (2011).
- 1-13) A. G. Clegg, I. M. Coulson, G. Hilton, and H.Y. Wong: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 1942 (1990).

(2014年5月3日受理)

福永博俊 ふくなが ひろとし

昭50 九州大学工学部電気工学科卒業, 同大学院工学研究科修士課程・博士課程を経て, 昭55 九州大学工学部助手 (電気工学科), 昭59 長崎大学工学部助教授 (電気工学科), 平5 同教授, 平16 同大理事・副学長, 平20 同大工学部教授 (電気電子工学科), 平25 同大理事・副学長, 現在に至る. (工学博士)