

第1章 磁性材料を正しく理解するために¹⁾

東京農工大学 名誉教授

佐藤 勝昭

1. はじめに

磁性材料は、エネルギー変換機器（モーター・発電機・アクチュエータなど）、音響機器（マイク・スピーカー・ヘッドホンなど）、情報記録装置（磁気テープ、磁気ディスクなど）、高周波機器（インダクター、電波吸収体など）、医療用機器（心磁計、MRI）など広い領域で私たちの暮らしを支えている。

磁性材料を正しく理解し、開発するには、物質の磁性がなぜ生じるかというミクロな立場から出発して、軟質（ソフト）磁性・硬質（ハード）磁性など磁性体の応用につながるマクロな性質までを連続的に知る必要がある。

2項では、原子レベルから出発して、磁性のミクロな起源を述べる。次いで、3項では、なぜミクロな磁気がそろって強磁性・反強磁性などの磁気秩序を持つのか、磁化はなぜ温度変化するかなどに迫る。4項で、なぜ磁気ヒステリシスが生じるのか、なぜ磁区に分かれるのか、マクロな磁化過程はどのように起きるのかを説明し、ソフト磁性・ハード磁性の違いを述べる。

2. 磁性のミクロな起源

磁石は図1のようにいくら分割しても小さな磁石ができるだけで、両端に現れる磁極の大きさ（磁荷の面密度；単位 Wb/m^2 ）はいくら小さくしても変わらない。N極のみ、S極のみを単独で取り出すことはできない。

磁性体を原子のレベルにまで微細化すると、原子があたかも磁石のような働きを持っていることが分かる。磁性の起源は原子磁石である。しかし、原子にN, Sという磁極はなく、量子力学によれば、電子が原子核の周りに雲のように分布しているという描像で表される。原子の磁気的な性質は電子雲が本来持つ磁性から生じているのだ。

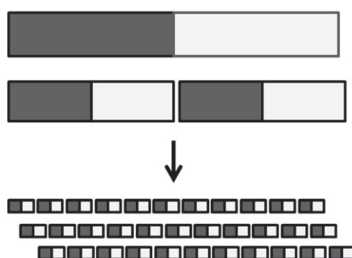


図1 磁石をいくら分割しても磁極の大きさは変わらない

この項では、原子核の周りに電子が回って環状電流を作り磁気をもたらすというボーア模型から出発し、必要に応じて量子論の言葉に置き換えることとする。まず、電子の軌道運動が作りだす磁気モーメントと磁極 NS の対がもたらす磁気モーメントが等価であることを古典力学の考え方で説明しよう。

(a) 電子軌道の古典論

原子の中では、図 2 のように、電子が原子核の周りをくるくる回っている。電荷 $-e[C]$ を持つ電子が動くとき電流が生じ、この電流が磁気モーメントを作る。そこで「電流が作る磁気モーメントは、磁極の対が持つ磁気モーメントと等価である」という仮説を立てる。

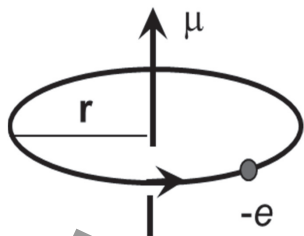


図 2 原子内の電子の周回運動は磁気モーメントを生じる

これを証明するには、両者を静磁界中に置いたときに、同じ形で回転するトルクを受けるかどうかを見ればよい。周回電流による磁気モーメントを磁界中に置いたときのトルク T_{curr} を計算しよう。

$-e[C]$ の電荷が半径 $r[m]$ の円周上を線速度 $v[m/s]$ で周回すると、1 周の時間は $t=2\pi r/v[s]$ なので、電子が 1 周するときに流れる電流 I は

$$I=-e/t=-ev/2\pi r[A] \tag{1}$$

となる。

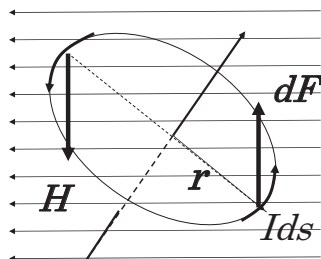


図 3 磁界中に置かれた円電流に働く力

図 3 に示すように、この環状電流を一様な静磁界 $H[A/m]$ の中に置いてみると、円周上の微小な円弧 $ds[m]$ に働く力のベクトル $dF[N]=[m\text{ kg/s}^2]$ は、フレミングの左手の法則か

ら ($\mathbf{E}$ - $\mathbf{H}$ 対応の SI 系)、 $d\mathbf{F} = I d\mathbf{s} \times \mu_0 \mathbf{H}$ となり、 $\mathbf{r}$ の位置に働くトルクは

$$d\mathbf{T}_{\text{curr}} = \mathbf{r} \times d\mathbf{F} = I(\mathbf{r} \times d\mathbf{s}) \times \mu_0 \mathbf{H} \quad (2)$$

と $\mathbf{r}$ と $\mathbf{H}$ の外積で表される。トルク $\mathbf{T}_{\text{curr}}$ [Nm] は、この微小トルクを円周にわたって積分すると求めることができる。 S を環状電流の囲む面積 $S = \pi r^2$ 、 $\mathbf{n}$ を環状電流の法線方向を向く単位ベクトルとして、環状電流があるときの静磁界中でのトルクは、

$$\mathbf{T}_{\text{curr}} = \oint d\mathbf{T}_{\text{curr}} = (I/2)(\oint \mathbf{r} \times d\mathbf{s}) \times \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 I S \mathbf{n} \times \mathbf{H} \quad (3)$$

となる。

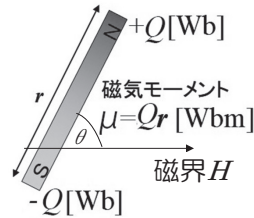


図4 磁界中に置かれた、磁極 NS 対に働くトルク

一方、図4に示すように、磁極 NS の対 $+Q$ [Wb]、 $-Q$ [Wb] の作る磁気モーメント $\mu = Qr$ [Wbm] を磁界 $\mathbf{H}$ の中に置いたときに働くトルク $\mathbf{T}_m$ [Nm] は

$$\mathbf{T}_m = Q\mathbf{r} \times \mathbf{H} = \mu \times \mathbf{H} \quad (4)$$

と表される。

$\mathbf{T}_{\text{curr}}$ を表す (3) 式と $\mathbf{T}_m$ を表す (4) 式はどちらも磁界 $\mathbf{H}$ とのベクトル積の形であるから、電流が作る磁気モーメントと磁極の対が作る磁気モーメントは等価であることが分かる。したがって、電流が作る磁気モーメント μ [Wbm] は、(3) 式と (4) 式を比較することによって、

$$\mu = \mu_0 I S \mathbf{n} \quad (5)$$

と求めることができる。この式から、環状電流 I および電流が囲む面積 S に比例する磁気モーメントが生じること、その向きは電流が囲む面の法線方向 $\mathbf{n}$ であることが分かる。

電流に $I = -e/t = -ev/2\pi r$ (式 (1)) を、面積に $S = \pi r^2$ を代入して、電子の軌道運動による磁気モーメントを求めると、

$$\mu = -(\mu_0 e v r / 2) \mathbf{n} = -\mu_0 (e/2) \mathbf{r} \times \mathbf{v} \quad (6)$$

となるが、角運動量は $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$ と表されるので、これを使って式 (6) を表すと

$$\mu = -\mu_0 (e/2m) \mathbf{\Gamma} \quad (7)$$

となり、原子磁石の磁気モーメントは電子の持つ角運動量に比例することが示された。

(b) 量子論の導入

ここまでは、古典力学で記述したが、原子中の電子を表すには量子力学を使わなければならない。量子力学によれば、電子は古典的な周回運動をしているのではなく、原子核の周りに雲のように分布して運動していると考えられており、電子軌道の角運動量は $\hbar$ を単位とするとびとびの値をとり、軌道角運動量を表す量子数を l とすると、 $\mathbf{L}_{\text{orb}} = \hbar \mathbf{l}$ と表すことができる。これを (7) 式に代入すると 軌道磁気モーメント μ_{orb} は、

$$\mu_{\text{orb}} = -\mu_0(e\hbar/2m)\mathbf{l} = -\mu_B \mathbf{l} \quad (8)$$

となり、軌道角運動量量子数 l とボーア磁子 μ_B を使って記述される。ここにボーア磁子 $\mu_B = \mu_0 e\hbar/2m$ は原子磁気モーメントの基本単位で、その大きさは、**E-H** 対応の SI 系で、

$$\mu_B = 1.16 \times 10^{-29} [\text{Wbm}] \quad (9)$$

となる^{A)}。この値の導出には、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{Wb}/(\text{Am})]$ 、 $e = 1.60 \times 10^{-19} [\text{As}]$ 、 $\hbar = 1.055 \times 10^{-34} [\text{Js}]$ 、 $m = 9.11 \times 10^{-31} [\text{kg}]$ を用いた。

(c) 原子の軌道と量子数

原子内の電子の状態は、量子力学の言葉で書くと、主量子数 n と軌道角運動量 l 、更に l を量子化軸に投影した軌道角運動量の成分があり、磁気量子数 m で指定される。主量子数 n が決まると軌道角運動量量子数 l は、0 から $n-1$ までの 1 ずつ増える値をとることができる。例えば、 $n=1$ だと l は 0 しかとれないが、 $n=2$ のときは、 l は 0 と 1 の 2 値をとれる。

軌道角運動量量子数を l とすると、その量子化軸方向成分（磁気量子数） $m = l_z$ は、 $l, l-1, \dots, -l+1, -l$ の $2l+1$ 通りの値を持つことができる。

表 1 主量子数と軌道角運動量量子数

n	l	M							軌道	縮重度
1	0				0				1s	2
2	0				0				2s	2
	1			1	0	-1			2p	6
3	0				0				3s	2
	1			1	0	-1			3p	6
	2		2	1	0	-1	-2		3d	10
4	0				0				4s	2
	1			1	0	-1			4p	6
	2		2	1	0	-1	-2		4d	10
	3	3	2	1	0	-1	-2	-3	4f	14

A) **E-B** 対応の SI 系では $\mu_B = e\hbar/2m = 9.27 \times 10^{-24} [\text{Am}^2]$ と表され、cgs-emu 系では、 $\mu_B = e\hbar/2mc = 9.27 \times 10^{-21} [\text{emu}]$ と表される。