

## 1-1 磁気とは何だろう

### 1. 磁気の根源と磁場の不思議

さあ、「磁気とは何だろう？」から始めよう。細かい議論はしないで、ここではイメージを捉えることを主眼とする。

結論から言うと、電気と磁気は裏腹な物理現象である。電磁気学と一括りにするのは、電気と磁気が切り離せないからである。図1-1に示すように、微視的には電子が回転運動（スピン）する、すなわち電流が流れると、直交方向に磁場（磁界）が発生する。これをアンペールの法則といい、現在の磁気に関する主流の単位系：MKSA単位の基本的な考え方である。巨視的には同様な電気と磁気の不可分の挙動として、フレミングの左手や右手の法則および電磁誘導が挙げられ、モータや発電機やトランスとして実用化されている。また、電気と磁気を表裏一体性を利用すると、電波障害の回避策として磁気を遮断することも有効な手段となる。ここで、電気・磁気の「気」とは何らかの力の源であり、電場・磁場の「場」とはその力が及ぶ空間のことであると考えると理解しやすい。重力場では質量のある物体が引力を受けるように、磁場では磁性体が吸引力や反発力を受けることになる。

ところで、我々が直接見ることのできる大きな磁場現象は、オーロラである。オーロラは、図1-2に示すように、太陽からのプラズマを含む太陽風が地球の地磁気の磁場（磁力線）に曲げられて、北極と南極に到達して空気中の気体分子と衝突して発光する天体現象である。そして地磁気は、渡り鳥や回遊魚のナビゲーションにも役立っていることはよく知られている。また、映画「十戒」で、モーゼの祈りで紅海が割れるシーンがある。水は反磁性物質なので、強力な磁場を避ける性質がある。神様が紅海の真上に超々強力な磁場を発生させれば起こり得る現象である。事実、宇宙においては、 $10^{10}$ T(テスラ)という途方もない磁場を発生している「マグネター」と呼ばれる超高密度の中性子星の存在が確認されている。興味のある人は検索調査されたい。

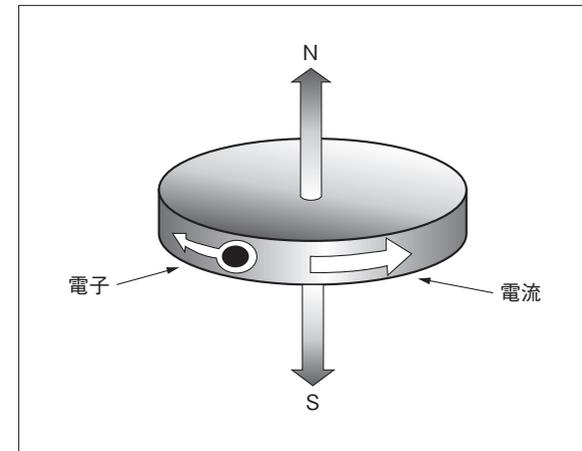


図1-1 電子の回転運動（スピン）により発生する磁場（磁気）  
 (出典) (社)未踏科学技術協会編：「おもしろい磁石のはなし」、日刊工業新聞社、p.41 (1998)  
 (注) 電子運動に基づく磁気発生は自転（スピン）の他に公転的な軌道運動によるものもある。

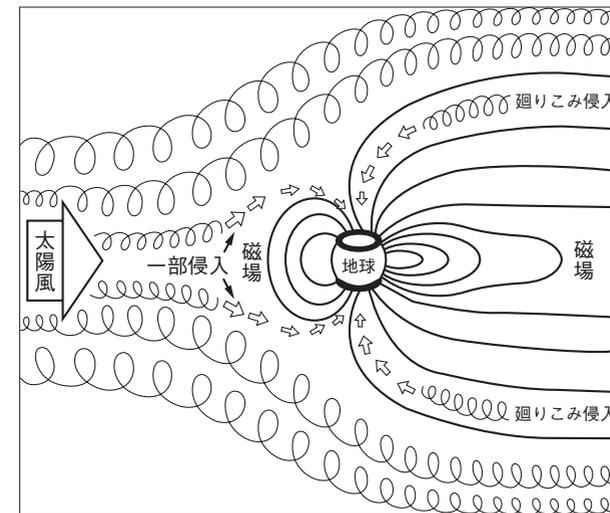


図1-2 オーロラ出現の原理  
 地球の上下の鉢巻状がオーロラの発光帯。最近の研究では、太陽風の量は廻りこみ進入の方が圧倒的に多い。

表 1-1 さまざまな物質の磁氣的挙動の分類

磁性体の種類		磁気モーメントの配列	J-H特性	J, 1/χ-T特性	物質例
強磁性体 (ferro-magnetism)	フェロ磁性体 (ferro-magnetism)	→ → → → → → → → → → → → → → → →			Fe, Ni, Co, Gd Alnico, Sm-Co合金 Nd-Fe-B合金
	フェリ磁性体 (ferri-magnetism)	→ → → → A ← ← ← ← B → → → →			フェライト、Fe3O4 MnO・Fe2O3 BaO・6Fe2O3
反強磁性体 (antiferromagnetism)		→ → → → ← ← ← ← → → → → ← ← ← ←			FeO, CoO MnO, MnF2
常磁性体 (paramagnetism)		↗ ↘ ↙ ↚ ↖ ↗ ↘ ↙ ↗ ↘ ↙ ↚ ↖ ↗ ↘ ↙			Al, Cr, Mn Pt, O2, 空気
反磁性体 (diamagnetism)		スピンのし ← ← ← ← e			Cu, Ag, Hg Bi, He, Ne H2O

注) J: 磁気分極、H: 磁場、χ: 磁化率 (帯磁率)、T: 温度 (絶対温度)  
(出典) 山元洋: 「電気電子機能性材料」5章「磁性体材料」、オーム社 (2003年)

## 2. いろいろな磁性材料

重力場 (引力) の影響を受けるのが質量を持った物体であるように、磁場の影響を受けるのは**磁性体**と呼ばれる物質である、とバツサリ言いたい。しかし、実はすべての物質は多かれ少なかれ必ず磁場の影響を受ける。鉄のように磁場に吸着されやすい金属や、逆に前述の水のように磁場が嫌いな分子もある。そこで、磁氣的挙動によって様々な物質を分類したのが表 1-1 である。

表中、**強磁性体**と指示された物質は、**磁気モーメント**と呼ばれる磁気ベクトルの整列 (自発磁化) により磁場に敏感に反応する。特に鉄、ニッケル、コバルトや磁石材料は**フェロ磁性体**として強い磁力を発揮する。次の**フェリ磁性体**はフェライト系酸化物に多く見られる。表の下側の**反強磁性体**や**常磁性体**は磁場に対して極々わずかにしか反応しないので、**反磁性体**と共に**実用上は非磁性材料**と呼ばれることが多い。

そして実用上の磁性材料である強磁性体も、用途的には**硬質 (ハード) 磁性材料**と**軟質 (ソフト) 磁性材料**とに分類される。図 1-3 にその磁氣的挙動の違いを模式的に示す。単位は後で論じるとして、物質が持つ磁気の強さを示す**磁化** (磁化の値) を縦軸に、外部からの**磁場** (磁場の強さ) を横軸にとると、磁化軸に向かって磁化曲線 (ヒステリシスカーブ) が縦長に針状に変化するのが**軟質磁性材料**であり、小さな磁場に対して急速に磁化が変化する性質を有する。この軟質磁性材料は別名、**一時磁石材料**、**高透磁率材料**とも呼ばれ、磁気良導体として磁気回路の構成材料として多用されている。一方、磁化曲線が膨らみを持つのが**硬質磁性材料** (永久磁石材料) であり、磁場の変化に対してある程度の耐久性を有している。図中の**保磁力**とは、外部に発揮する磁化がゼロになる時の磁場の値であるが、ソフト材ではより小さい方が良く、ハード材では磁化の値より大きいことが望ましいが\*、あまり大きくても実用上に支障が出る (着磁が困難) ので、程々に大きいことが望まれる。このためハード材は**高保磁力材料**とも呼ばれる。

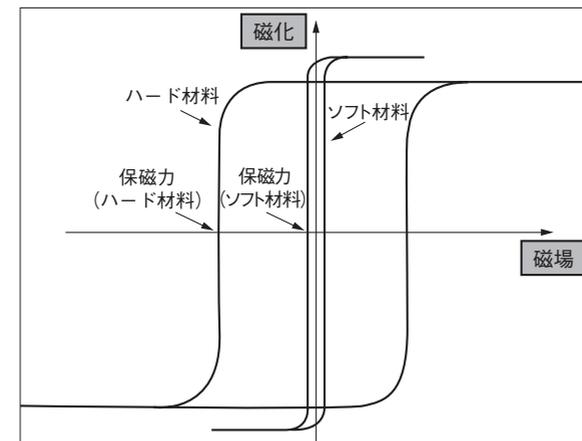


図 1-3 硬質 (ハード) 磁性材料と軟質 (ソフト) 磁性材料の類型的な磁化曲線 (ヒステリシスループ)

(出典) 寺子屋 BM 塾資料 (浜野正昭講師)、日本ボンド磁性材料協会 (2011年9月2日)

\* 例えば、磁化と磁場の単位をテスラ (後述) でそろえた場合の比較

## 1-2 永久磁石の基礎知識

### 1. 磁気の単位と用語

誠に遺憾ながら、現在、磁気の単位として3種類の単位系が使われている。これこそが初心者が磁気に取り組む際の弊害となっていることは残念である。しかし、国際化が進むにつれて単位統一の機運が高まっており、趨勢は国際単位であるSI単位へ移行しようとしている。ただし、現在はその途上であるので、旧来の単位である cgs-Gauss (ガウス) 単位や、移行への過渡期的単位である MKSA 単位が、それぞれ産業界や学会を中心に使われている。

3種類の単位について、磁気に関する基本式を以下に示す<sup>1)</sup>。

$$\text{cgs-Gauss 単位系} : B = H + 4\pi M^* \dots\dots\dots (1.1)$$

$$\text{MKSA 単位系} : B = \mu_0 H + I \dots\dots\dots (1.2)$$

$$\text{SI 単位系} : B = \mu_0 (H + M) \dots\dots\dots (1.3)$$

ここで、 $B$  : 磁束密度 [ $\text{Wb}/\text{m}^2$ ] または [ $\text{T}$ ] (テスラ)、 $H$  : 磁場 [ $\text{A}/\text{m}$ ]、 $\mu_0$  : 真空の透磁率 (磁気定数 :  $4\pi \times 10^{-7}$  [ $\text{H}/\text{m}$ ]) であり、 $M^*$ 、 $I$ 、 $M$  はそれぞれの単位系の磁化 (の値) であるが、当然その次元や大きさなどが異なる。また、次の項で出てくる磁化曲線 ( $J$ - $H$  曲線) の縦軸として表示される磁気分極  $J$  とは  $J = I = \mu_0 M$  の関係があり、永久磁石の分野では、この磁気分極  $J$  を磁化と同様に物質が有する磁気量を示す代表的単位として取り扱うことが多い。この場合は、式 (1.2) は、 $B = \mu_0 H + J$  となる。本書でもこの式に従った MKSA 単位を使用している。

また、表 1-2 に磁石と磁気に関する単位とその換算値を掲げたので、随時参考にされたい<sup>2), 3)</sup>。なお、 $1\text{Wb} = 1\text{H} \cdot \text{A}$  および  $1\text{J} = 1\text{Wb} \cdot \text{A}$  の関係は覚えておくと便利である。それぞれの物理記号の読みは、 $\text{Wb}$  : ウェーバー、 $\text{H}$  : ヘンリー、 $\text{A}$  : アンペア、 $\text{J}$  : ジュール (磁気分極の  $J$  と区別すること)、 $\text{m}$  : メーターであり、 $\text{T}$  : テスラ ( $1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$ ) である。