

## 1. はじめに

この講座では、知っているようで実はよく知らない磁石と磁性体について、身近な話題から、最近の展開までを基礎に立ち返って4回にわたって、連載します。第1回は、磁石の用途などを手始めに、磁石の歴史から、人工の磁石、さらには、磁性の学びへの手がかりを示します。

## 2. 自動車と磁石<sup>1, 2)</sup>

身の回りには、多くの磁石や磁性体が使われています。特に重要な用途がモーターです。

地球規模の環境保持のため、温室効果ガスの削減が求められ、電気自動車EVやハイブリッドカーHVに注目されています。EV、HVでは動力源にモーターが使われます。EVに限らず自動車には、図1に示すようにたくさんのモーターが使われています。窓

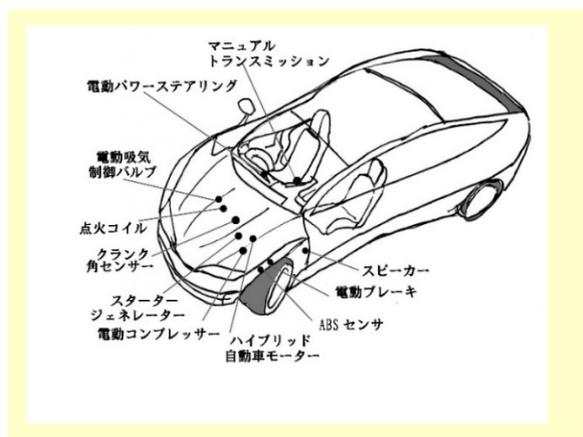


図1 自動車には多くのモーターが使われています。

の開閉、パワーステアリング、ワイパー、ブレーキ、ミラー等々、高級車では100個ものモーターが使われています。

図2はブラシレスモーターの仕組みを模式的に描いたものです。中央には永久磁石が回転子として使われています。回転子を多数の固定子を取り囲んでいます。固定子は磁性体にコイルを巻いた電磁石です。電磁石に流す電流を、隣の電磁石に電子回路によって次々に切り替えることによって電磁石が発生する磁界を移動させ、磁界に回転子がついていくことで回転します。

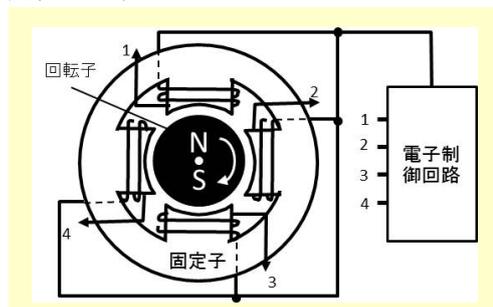


図2 ブラシレスモーターの模式図

## 3. 磁石の歴史

天然磁石(lodestone)を最初に論じたのはギリシャの哲学者タレス(紀元前 624-546 年)だといわれています。アリストテレスの記述によれば、タレスは「天然磁石には魂があって離れている物体(鉄)を引きつける」と説いたそうです<sup>3)</sup>。この天然磁石はギリシャの Magnesia 地方で羊飼いによって見いだされたとされ、magnetite(磁鉄鉱)や磁性(magnetism)の語源

になったといわれま  
す。因みに図1には天  
然の磁鉄鉱で、化学組  
成  $Fe_3O_4$  で表される  
スピネル構造の結晶  
の集まりです。



図3 天然の磁鉄鉱

中国では、紀元前  
3世紀に書かれた呂  
氏春秋という書物に「慈石が鉄を呼ぶ」という記  
述があります。慈州の地に見つかったので「慈石」  
と呼ばれたそうです。中国春秋時代の文献に現れ  
る「指南車」が方位磁石を用いていたのかどうか  
については諸説あり決着をみていませんが、12世  
紀の文献には方位磁石の作り方が記述されてお  
り、この頃には確立していたと考えられます。

#### 4. 人工の磁石<sup>4)</sup>

市販の磁石は、鉄やコバルトなど遷移金属の合金  
や、鉄を含む酸化物です。図4は、さまざまな磁石  
の最大エネルギー積（蓄えているエネルギーの大き  
さ）の変遷を示すグラフです。古くは、本多光太郎  
博士のKS磁石など、鑄造でつくった鉄の合金を使  
っていました。その後、加藤与五郎・武井武両博士  
が発明したフェライト（酸化鉄）の磁石が出現しま  
した。1970年代の初め、希土類の1つであるサマ  
リウムSmと遷移金属（鉄の仲間）のコバルトCoの  
合金（ $SmCo_5$ 、 $Sm_2Co_7$ ）の磁石が出現、希土類磁石

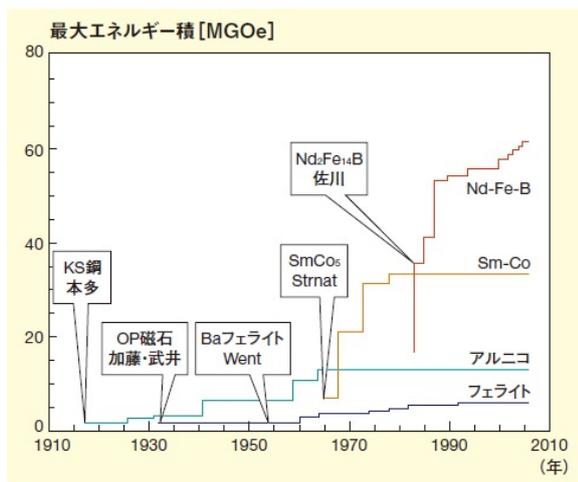


図4 人工磁石の特性の変遷

時代の幕が開きました。そして、1984年に日本の佐  
川真人博士によって、希土類の中でもサマリウムよ  
り豊富で安価なネオジムNdと安価な鉄を用いたネ  
オジム磁石が発明され、現在では磁石の主流となっ  
ています。

#### 5. 磁石の作り方<sup>4)</sup>

以前の磁石は鑄造磁石がふつうでしたが、現在で  
は「焼結磁石」と「ボンド磁石」が使われています。

それぞれの磁石の製法は、図5、および、図6に  
示すとおりです。焼結磁石は、図5に示すように、  
原料を融かして鑄型に入れて鑄物をつくり、これを  
粉砕して粉末にし、磁場中でプレス成形し焼結した  
ものです。ボンド磁石は、図6に示すように、焼結  
磁石の粉末をプラスチックに混ぜて、強い圧力で押  
しだしてつくったものです。

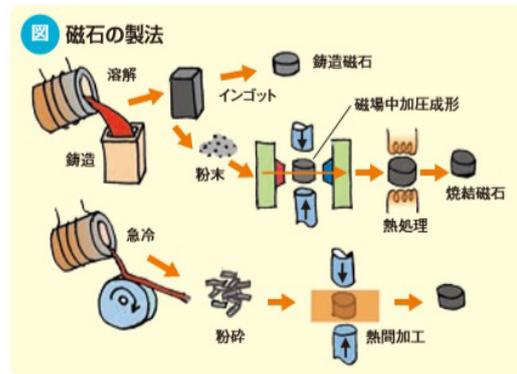


図5 磁石の作りかた



図6 ボンド磁石のできるまで

## 6. 硬い磁性、軟らかい磁性<sup>5)</sup>

EV用の永久磁石としては、日本で開発されたネオジム磁石が最もよく使われています。この磁石は、希土類のネオジム(Nd)と鉄(Fe)の化合物  $\text{NdFe}_2\text{B}_{14}$  を主成分とするもので、温度特性を改善する目的でディプロシウム(Dy)など他の希土類が添加されています。磁力の強さを表す最大エネルギー積  $\text{BH}_{\text{max}}$  が最も高く小型で性能のよいモーターが作れるのです。

永久磁石に通常の方法で得られる外部磁界を加えても  $\text{N} \cdot \text{S}$  をひっくり返すことができません。このように磁化反転しにくい磁性体をかたい磁性体(ハード磁性体)といいます。磁性体のかたさを表す尺度として、 $\text{N} \cdot \text{S}$  を反転させるために必要な磁界の強さ『保磁力』を使います。

一方、固定子の電磁石においてコイルを巻くための磁心(コア)は、モーターの外枠(ヨーク)に取り付けられています。コアやヨークに使う磁性体は、電流によって発生する磁界によって直ちに大きな磁束密度が得られる磁性体でなければなりません。このためには、保磁力が小さく、比透磁率  $\mu_r$  の大きなやわらかい磁性体(ソフト磁性体)が求められます。

モーター用のソフト磁性体としては、小型モーター用にはパーマロイ(鉄とニッケルの合金)が、大型のものにはケイ素鋼板(鉄とケイ素の合金)が使われます。

磁性体の「硬さ」を説明するには磁気ヒステリシスの知識が必要です。第3回で詳しく述べます。

図7は、磁性体を特徴付ける磁気ヒステリシス曲線です<sup>6)</sup>。横軸は、外部磁場  $H$  の強さ、縦軸は磁化  $M$  の大きさを表しています。くわしくは第2回に説明しますが、磁化  $M$  が反転する磁界  $H$  を保磁力  $H_c$  と呼び、磁性体の「かたさ」を表します。

図において、永久磁石材料である硬い(ハード)磁性体  $\text{SmCo}_5$  は磁化を反転させるのに 200 万  $\text{A/m}$ (約 25 kOe)もの磁界が必要なのでかたいと呼ばれます。一方、軟らかい(ソフト)磁性体センデルタでは地磁気の高さより小さい 10  $\text{A/m}$ (約 0.13 Oe)で簡単に反転するくらい軟らかいことがわかります。ハード磁性体は永久磁石や磁気記録に、ソフト磁性体はトランスの磁心や、インダクタなどに使われます。

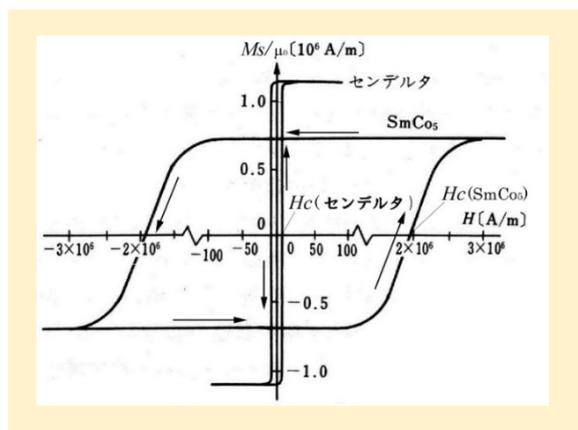
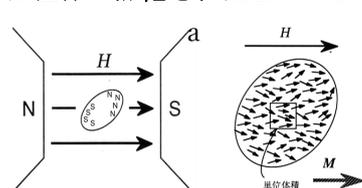


図7 ハード磁性体  $\text{SmCo}_5$  とソフト磁性体センデルタの磁気ヒステリシス曲線

### 磁化

磁性体に磁界  $H$  を加えたとき、図(a)に示すようにその表面には磁極が生じます。つまり磁性体は一時的に磁石のようになりますが、そのとき磁性体は**磁化された**といえます。



磁性体の中には図(b)に矢印で示す**磁気モーメント**がたくさんあります。磁気モーメントとは矢の先がN、後ろがSであるような原子サイズの磁石だと考えてください。

**単位体積内の磁気モーメントのベクトル和をとったものを磁化<sup>1)</sup>**といえます。磁界を加える前に磁気モーメントがランダムに向いておれば、ベクトル和つまり磁化  $M$  はゼロですが、磁界を加えると磁化はゼロでない値をもち、(a)のようにN極とS極が誘起されるのです。

$k$  番目の原子の1原子あたりの磁気モーメントを  $\mu_k$  とするとき、磁化  $M$  は式  $M = \sum \mu_k$  で定義されます。和は単位体積について行います。

磁気モーメントの単位は  $[\text{Wb} \cdot \text{m}]$  ですから、磁化の単位は体積  $[\text{m}^3]$  で割って  $[\text{Wb}/\text{m}^2]$  となります。これは磁束密度  $B$  の単位である  $[\text{T}] = [\text{Wb}/\text{m}^2]$  と同じです。

## 7. 様々な磁性体

どんな物質もなんらかの磁性を示します。たとえばヒトの体でも、水分子のH+(プロトン)の核スピンの強い磁場中で電磁波を受けて磁気共鳴することを用いてMRIという診断が行われています。また、リングは磁石にくっつきませんが、強磁場中に置くと浮き上がります。この性質は反磁性と呼ばれます。このように、どんな物質も磁性をもつのです。

実際、物質の磁性は、反磁性、常磁性、強磁性、フェリ磁性、反強磁性、らせん磁性、SDW(スピン密度波)、傾角反強磁性などに分類されます。

### ・反磁性(diamagnetism)

銅など導電性の物体に磁場を加えると、物質内に回転する電流が生じて、磁界の変化を弱めようとしています。このような性質を反磁性と呼びます。導電体の多くは反磁性を示します。反磁性は磁気秩序も示しません。

### ・常磁性(paramagnetism)

ルビー ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ) のように遷移金属を含む絶縁物の多くは、ランダムな方向を向く磁気モーメントを持っており、強い磁場を加えると磁界方向に向きを変えて、磁場に引きつけられる性質、すなわち、常磁性を示します。液体酸素も常磁性をもつので磁石に引き寄せられます。

バナジウム、白金などの金属においては、自由電子が起源となるパウリの常磁性が見られません。常磁性も磁気秩序を持ちません。

### ・強磁性(ferromagnetism)

鉄やコバルトのように、磁場を加えなくても磁化を示す物質を**強磁性体**と呼びます。ハードディスクや電気自動車のモーターに使われるのは強磁性体です。強磁性には磁気秩序があり、原子磁石どうしが向きをそろえようとする「交換相互作用」が働いています。キュリー温度を超えると、熱擾乱が交換相互作用に打ち勝って長距離磁気秩序を失うため常磁性となります。キュリー温度の直上では短距離の磁気秩序は残っています。

### ・反強磁性(antiferromagnetism)

隣り合う原子の磁気モーメントが逆向きにそろえ合うような磁気秩序を示し、全体では磁化が打ち消されている磁性を反強磁性と呼びます。ここでは、原子磁石どうしを逆向きにそろえるような交換相互作用が働いています。ネール温度を超えると、磁気秩序を失い常磁性になります。

### ・フェリ磁性(ferrimagnetism)

隣り合う原子磁石の向きが逆向きで、隣り合う原子の磁気モーメントの大きさが違うため全体では正味の磁化が残っている磁性をフェリ磁性と呼びます。スピネルフェライトや磁性ガーネットはその代表格です。

### ・らせん磁性(screw magnetism)

磁気モーメントが空間的に一定周期で回転しているような磁気秩序をもち、全体として磁化を持たないような磁性をらせん磁性と呼びます。Mnはこのような磁性を示します。

### ・スピン密度波(SDW :spin density wave wave)

電子のスピンの大きさと向きが波状に分布している状態です。その結果、Crでは、全体として磁化が消滅しています。またMn<sub>3</sub>Siでは、一つの向きのスピンが優勢で正味の磁化を持ちます。スピン密度波の周期 $\lambda$ は結晶格子の周期 $a$ と一致しません。

### ・傾角反強磁性(canted antiferromagnetism)

反強磁性において逆向きの2つの原子磁石の向きが少し傾いていると、原子磁石との向きと垂直の方向に正味の磁化が生じる場合があります。これを傾角反強磁性、または、弱強磁性と呼びます。磁化方向に垂直な方向に傾ける交換相互作用をジャロシンスキー守谷相互作用と(DM相互作用)とよびます。希土類オルソフェライトなどに見られる磁性です。

このうち反磁性、常磁性は磁気秩序をもちません。つまり、磁気モーメントがそろえあっていません。反強磁性は、隣り合う原子の磁気モーメントが互いに逆向きにそろえ合うという磁気秩序をもつので全体では磁化が打ち消されている磁性です。

## 8. 磁性材料に使えるのはどの磁性か？

実際につかわれる磁石にくっつく磁性体は自発磁化（磁場を加えなくてももつ磁化）を示す強磁性体とフェリ磁性体だけです。磁石につくという点では、オルソフェライトなど傾角反強磁性体もくっつきますが非常に弱い磁化しか示しません。反磁性、常磁性、反強磁性等は脇役に過ぎません。このため、磁性体というと自発磁化のある強磁性・フェリ磁性・傾角反強磁性を指し、そのほかは非磁性体と呼んでいます。

## 9. 磁気の世界における学術用語について

### ・磁場と磁界

磁気の学術用語や使われる単位系は、学術領域によって異なります。同じ magnetic field という英語が、物理学会では「磁場」と訳し、応用物理学会や電気系の学会では「磁界」と訳します。また、electric field の和訳も、「電場」と「電界」があります。superconductivity も電気系の学会では「超電導」、その他の学会では「超伝導」と書きます。この講座では磁場、電場、超伝導を使います。

### ・EH 対応系と EB 対応系と単位系<sup>6)</sup>

もうひとつ、やっかいなのが、電磁気学には、**EH** 対応系(電場 **E**、電束密度 **D**、磁場 **H**、磁束密度 **B** の4つのパラメータを使う)と **EB** 対応系(電界 **E**、電束密度 **D**、磁界 **B** の3つのパラメータを使う)があることです。**EH** 対応系では、磁気系にも、電気系の電荷に対応する磁荷があるとして、クーロン力を考えて場を定義するやり方をとります。これに基づいた単位系が cgs-emu 系です。

一方、**EB** 対応系では、磁束密度は電流から発するという立場にたちます。この系では、**EH** 対応系の磁場 **H** を用いません。これに基づいた単位系が SI 系です。

磁場 **H** は、磁性体が存在する場において磁化電流を考えずにアンペールの法則が成立するように便宜的に導入されています。

### cgs-emu 単位系と S I 単位系

cgs-emu 系で、磁場 **H** の単位は [Oe] (エルステッド)、磁束密度の単位は [G] (ガウス) です。

一方、SI 系では、磁場の単位は [A/m]、磁束密度の単位は [T] (テスラ) です。

cgs-emu 系と、SI 系の変換は磁場 **H** については、

$$1 [Oe] = 1000 / 4\pi [A/m] = 79.7 [A/m]$$

$$1 [A/m] = 4\pi / 1000 [Oe] = 0.01256 [Oe]$$

です。一方、磁束密度 **B** については、SI と cgs の換算が簡単です。

$$1 [T] = 10000 [G]$$

## 10. まとめ

連載第1回では、おなじみの永久磁石から出発して、さまざまな磁性体があることを学びました。実際に役に立つ磁性体は、自発磁化をもつものに限られることや、磁性体を特徴付けるのは、磁気ヒステリシス曲線であること、保磁力の大きさによって磁性体の硬さ・柔らかさが生じていることを学びました。第2回以降において、磁性の起源や磁気ヒステリシスの起源などにせまります。

### 参考文献

1. 佐藤勝昭著、まぐね (日本磁気学会誌)、7、79 (2012)
2. 佐藤勝昭著、「磁気工学超入門—ようこそ、まぐねの国へ—」、第1章、共立出版 (2014)
3. Treaties of Geophysics, Vol.5 “Geomagnetism” (ed., N.Kono)
4. 佐藤勝昭著、「理科力をきたえる Q&A—きちんと答えられる大人になるための基礎知識」、第3章、SBクリエイティブ (2009)
5. 佐藤勝昭編著、「応用物性」、第5章、オーム社 (1991)
6. 小林久理眞著、「したしむ磁性」、付録 A.15、朝倉書店 (1999)