

基礎講座

磁石に親しもう (1)

佐藤勝昭



Eri Ando

1. はじめに

この講座では、私たちの身近にありながら、多くの方にとって親しみの薄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6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

身のまわりには、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(文献1, 2)。

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ています。そんななか注目を集めているのが電気自

動車EVやハイブリッドカーHVです。EV、HVでは動力源にモーターが使われます。EVに限らず自動車では、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。窓の開閉、パワーステアリング、ワイパー、ブレーキ、ミラーなどなど、高級車では100個ものモーターが使われています。

磁石はこうしたモーターに必要な不可欠な部材です。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が取囲んでいます。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、電子制御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。

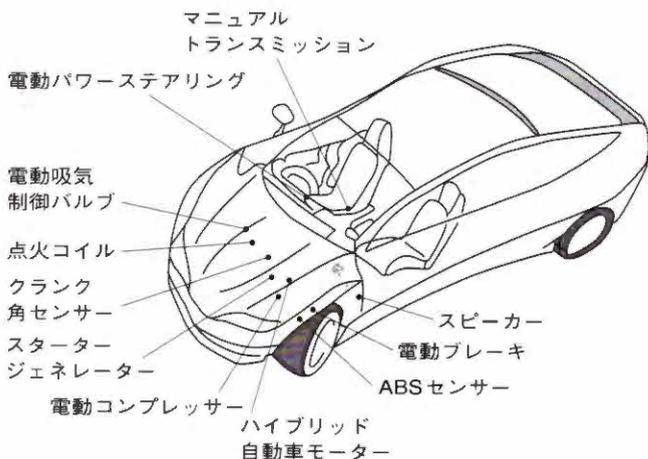


図1 自動車には多くのモーターが使われています

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

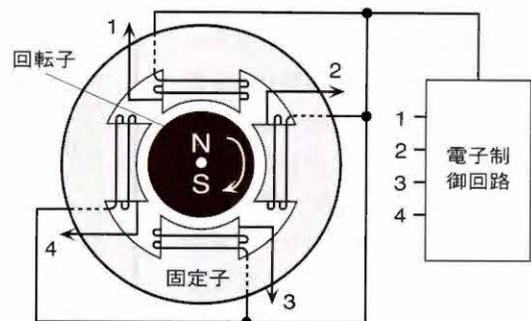


図2 ブラシレスモーターの模式図



図3 天然の磁鉄鉱

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（文献3）。この天然磁石はギリシャのMagnesia地方で羊飼いに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。ちなみに図3は天然の磁鉄鉱で、化学組成 Fe_3O_4 で表されるスピネル型構造の結晶の集まりです。

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「慈石が鉄をよぶ」という記述があります。慈州の地に見つかったので「慈石」とよばれたそうです。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つく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

市販の磁石は、鉄やコバルトなど遷移金属の合金や、鉄を含む氧化物です。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年代のはじめ、希土類の一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

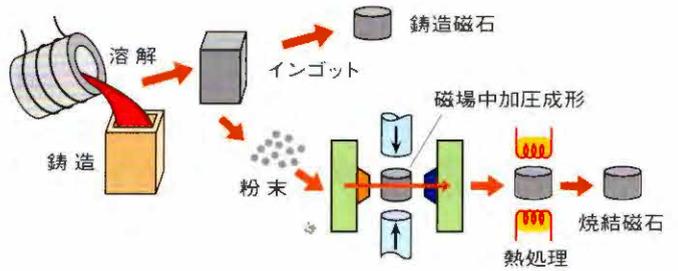


図5 磁石のつくりかた

金（ $SmCo_5$, Sm_2Co_7 ）の磁石が出現、希土類磁石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、希土類のなか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、現在車載用モーターとして使われる磁石の主流となっています（文献4）。

5. 磁石のつくり方

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（文献4）。

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溶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、強い圧力で押し出してつくったものです。

6. かたい磁性、やわらかい磁性

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 $Nd_2Fe_{14}B$ を主成分とするもので、温度特性を改善する目的でジスプロシウム（Dy）などほか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 BH_{max} が最も高く小型で性能のよいモーターがつけられるのです。

永久磁石に通常の方法で得られる外部磁界を加えてもN極・S極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

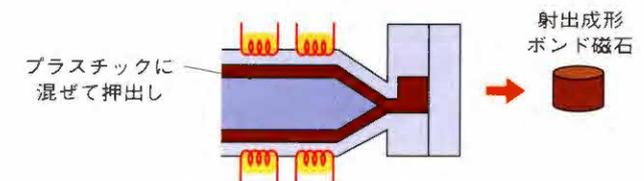


図6 ボンド磁石のできるまで

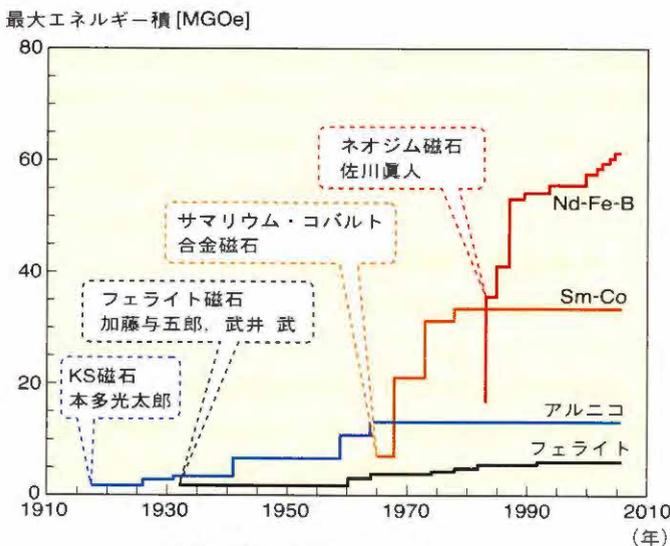
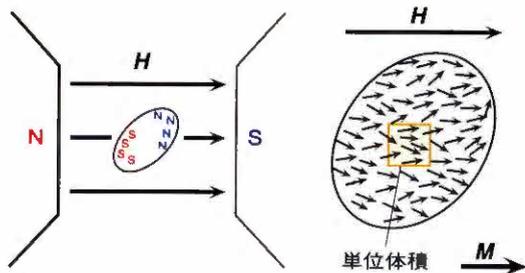


図4 人工磁石の特性の変遷

磁 化

磁性体に磁場 H を加えたとき、左図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。



磁性体のなかには右図に矢印 H 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極、後ろがS極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(文献1)といいます。磁場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、磁場を加えると磁化はゼロでない値をもち、左図のように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 μ_k とすると、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。

います。磁性体のかたさを表す尺度として、N極・S極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、わずかな磁場によって磁束密度が大きく増加するやわらかい磁性体(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、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。これについては第4回で詳しく述べます。

図7は、磁性体を特徴づける磁気ヒステリシス曲線です(文献6)。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。詳しくは第2回で説明しますが、磁化 M が反転する磁場 H を保磁力 H_c とよび、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かたい(ハード)磁性体 SmCo_5 は磁化を反転させるのに200万A/m(約25 kOe)もの磁場が必要なのでかたいとよべれます。一方、やわらかい(ソフト)磁性体センドルタでは地磁気の大きさより小さい10 A/m(約0.13 Oe)で簡単に反転するくらいやわ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。

7. さまざまな磁性体

どんな物質も何らかの磁性を示します。たとえばヒトの体であっても、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ると磁気共鳴が起きます。この現象を利用して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よべれます。このように、どんな物質も磁性をもつのです。

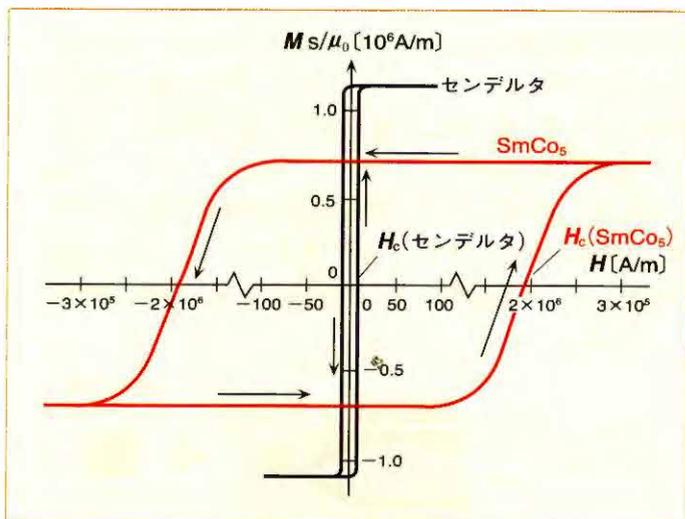


図7 ハード磁性体 SmCo_5 とソフト磁性体センドルタの磁気ヒステリシス曲線

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ます。このような性質を反磁性とよびます。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もっており、強い磁場を加えると磁界方向に向きを変えて、磁場に引き付けられる性質、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す。常磁性も磁気秩序をもちません。

■ **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よびます。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。ある温度を超えると、熱擾乱が交換相互作用に打勝って長距離磁気秩序を失うため常磁性となります。この温度をキュリー温度とよびます。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を逆向きにそろえ合うような磁気秩序をもち、全体では磁化が打消されている磁性を反強磁性とよびます。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。ある温度を超えると、磁気秩序を失い常磁性になります。このときの温度をネール温度とよびます。

■ **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よびます。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、全体として磁化をもたないような磁性をらせん磁性とよびます。マンガンMnはこのような磁性を示します。

■ **スピン密度波 (SDW: spin density 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、クロムCrでは、全体として磁化が消滅しています。またMn₃Siでは、一つの向きのスピンの優勢で正味の磁化をもちます。スピン密度波の周期 λ 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二つの原子磁石の向きが少し傾いていると、原子磁石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、弱強磁性とよびます。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い合うという磁気秩序をもつので全体では磁化が打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？

実際に使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。磁石に付くという点では、オルソフェライトなど傾角反強磁性体もくっ付きますが非常に弱い磁化しか示しません。反磁性、常磁性、反強磁性などは脇役にすぎません。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・傾角反強磁性をさし、そのほかは非磁性体とよんでいます。

cgs-emu 単位系と SI 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 B 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、

$$1 [\text{Oe}] = 1000/4\pi [\text{A/m}] = 79.6 [\text{A/m}]$$

$$1 [\text{A/m}] = 4\pi/1000 [\text{Oe}] = 0.01257 [\text{Oe}]$$

です。一方、磁束密度については、SIとcgsの換算が簡単です。

$$1 [\text{T}] = 10000 [\text{G}]$$

9. 磁気の世界における学術用語

■ **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** もう一つ、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 の四つのパラメーターを使う）とEB対応系（電界 E 、電束密度 D 、磁界 B の三つのパラメーターを使う）があることです（文献6）。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立ちます。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。

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、磁性体を特徴づけるのは、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かたさ・やわ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迫ります。

参考文献

1. 佐藤勝昭, 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. N. Kono 編, 『Geomagnetism: Treatise on Geophysics』, Elsevier (2009).
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. 小林久理真 著, 『したしむ磁性』, 付録A.15, 朝倉書店 (1999).

固体材料の科学

R. J. D. Tilley 著
滝澤博胤・田中勝久・大友 明・貝沼亮介 訳
B5判 302ページ 本体4600円+税



物質と材料の根源や性質を体系的に学ぶのに適した入門書。物質や材料に関する理工学(物質科学, 固体化学, 材料工学など)のみならず, 地球物質科学, 固体物理学から電子工学や機械工学に至る多様な分野を専攻する学生あるいは技術者にとっても有用。

主要目次 I. 微視的構造と巨視的構造(原子の構造/化学結合/原子の凝集状態/相図/結晶学と結晶構造) II. さまざまな固体物質(金属, セラミックス, ポリマー, 複合材料) III. 反応と相転移(拡散とイオン伝導/相変態と反応/酸化と還元) IV. 物性と機能(固体の機械的性質/絶縁性固体/磁性体/固体の電気伝導/固体の光学的性質/固体の熱的性質)

固体化学 第2版

田中勝久 著
A5判 2色刷 352ページ 本体3500円+税



固体化学をより体系的に理解できるように章立てを再考し, 改めて化学の立場から固体の反応と合成, 構造, 物性と機能について記述した改訂版。初版同様, 無機物質・有機物質を問わず固体の合, 構造, 物性の基礎と, 材料としての応用に興味のある読者を対象とし, 固体化学をはじめて学ぶ大学生や大学院生から, 研究者・技術者まで有用。

主要目次 固体化学の領域/化学結合と結晶構造/固体状態の熱力学/固体の反応と合成/固体の構造解析とキャラクタリゼーション/格子振動と熱的・弾性的性質/電子構造と電気伝導/誘電体/磁性体/超伝導/光学的性質

東京化学同人