

# サイエンスネット

物(化)生(地)...

数研出版株式会社

CIENCE NET

Contents

- ▶ 特集 1 / 小岩昌宏 ……2
- ▶ 特集 2 / 塚平恒雄 他…6
- ▶ 特集 3 / 松井孝夫…10
- ▶ コラム / 武村政春…14

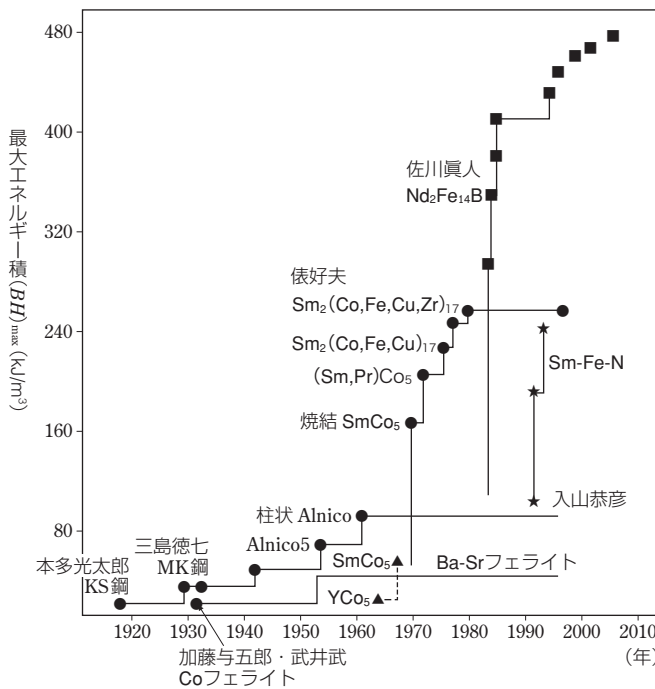


図 a 磁石の性能指数 最大エネルギー積\*

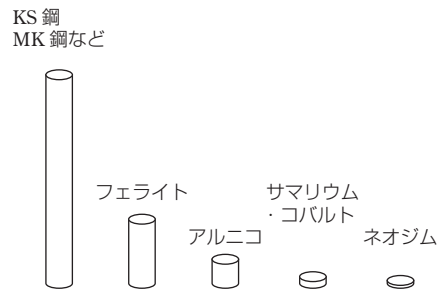


図 b 最大エネルギー積を同じにしたときの磁石の大きさ比較\*

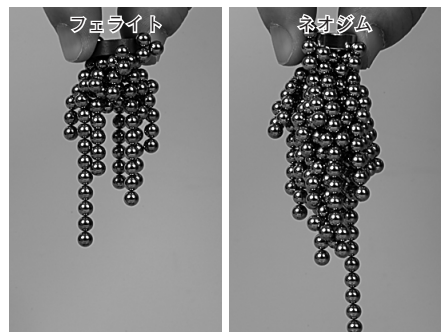


図 c フェライト磁石とネオジウム磁石の強さ比べ

※図 a,b は下記に掲載された図を元に作成した。  
 O.Gutfleisch 他:Advanced Materials,2011,Vol.23,  
 宝野 和博,本丸 諒:すごい磁石, 日本実業出版, 2015.

## 永久磁石のあゆみ

京都大学名誉教授 小岩 昌宏

永久磁石は、パソコン周辺機器やMRI(磁気共鳴画像装置)など現代社会に必須の電子機器の主要部に使われている。自動車1台当たり100個以上のモーターが積まれているそうで、モーターには磁石が使われているから「自動車は磁石で動いている」といってもよい。

人類が人工的に磁石を作ること始めたのは1917年のことである。その最初の人工磁石がKS鋼で、東北大学金属材料研究所の本多光太郎と高木弘<sup>ひろむら</sup>の発明による。以来、100年間に永久磁石の性能は、図aに見るように飛躍的に進歩した。この分野の研究での日本人研究者の貢献はまことに大きなものがある。

ちなみに、SmCo磁石で名前が出ている俵好夫さんは、短歌集「サラダ記念日」で知られている歌人俵万智さんの父君で、この歌集にも「ひところは「世界で一番強かった」父の磁石がうずくまる棚」と詠まれている。

(→特集1 p.2～5)

## 永久磁石の発展—KS 鋼発明からの 100 年を振り返る

京都大学名誉教授 小岩 昌宏

### 1. はじめに

私たちの暮らしに必要なほとんどの電気製品のモーターや IH 調理器、スピーカーなどには磁石が使われている。現代の社会は磁石なしではなりたないといっても言い過ぎではないだろう。

天然の磁石は紀元前数百年ごろ発見された。これは天然に磁化された磁鉄鉱 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) で、木片に固定して水に浮かべ羅針盤として利用され、ロードストーン (lodestone) と呼ばれた (“lode” は中世英語で way, course を意味する)。電磁石が発明されたのは 1825 年で、20 世紀以前には軟鉄鉄心にコイルを巻いた電磁石が普及し、永久磁石に対する関心は低かった。20 世紀前後になると静磁場を作る永久磁石の必要性が高まってきた。各種の計器に使用される可動コイル型の検流計用の需要が高まったのである。この時期には、0.9% 程度の炭素を含む普通鋼が人類最初の人工磁石として用いられた。磁石材料そのものを目的として研究開発されたのは、本多光太郎(写真 1) による KS 磁石鋼が最初のものである。その発明 100 年にあたる今、KS 鋼の開発事情、その後の磁性材料の進歩を眺めてみることにしよう。



写真 1 本多光太郎  
(東北大学金属材料研究所蔵)

### 2. 磁性体の特性の表し方

#### —ヒステレシス曲線

物質に磁場を加えると磁化が生ずる。その磁化の向きと大きさにより反磁性体・常磁性体・強磁性体の 3 つに分けられる。強磁性体は、トランスの鉄心のように交流磁場を加えて使うことが多い。そのため磁場を  $+H$  から  $-H$  の範囲で交互に加えた場合の磁化曲線(図 1) が重要で、これをヒステレシス曲線(磁気履歴曲線)と呼び、磁性材料の評価の基準となる。

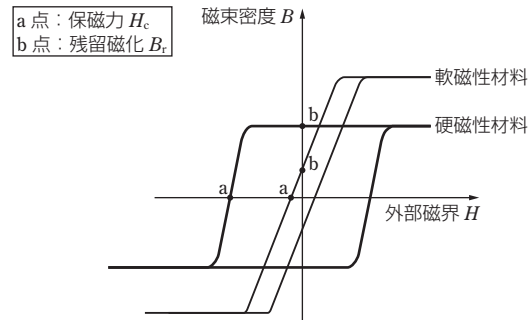


図 1 磁化曲線—軟磁性と硬磁性

横軸との交点  $a$  を保磁力 ( $-H_c$ )、縦軸との交点  $b$  を残留磁化 ( $B_r$ ) と呼ぶ。比較的簡単に磁化が消える、あるいは反転してしまう磁性体はソフト(軟質)磁性体と呼ばれ、そうでない磁性体はハード(硬質)磁性体と呼ばれる。軟質磁性材料は、変圧器、電磁石などに用いる。以下では、硬質磁性材料—永久磁石について述べる。永久磁石としては、残留磁化が大きければよいと考えがちであるが、反磁場(磁化することによって表面に現れる磁極により磁化方向と逆向きに生ずる磁場)を考慮する必要がある。保磁力が十分大きな材料を用いる必要がある。永久磁石としての性能は磁化曲線の  $B$  と  $H$  の積の最大値  $(BH)_{\max}$  で評価される。KS 磁石鋼発明前から現在までに開発された各種永久磁石の性能指数  $(BH)_{\max}$  を、表紙の図  $a$  に示した。

### 3. KS 鋼の開発

日本においては明治維新後、近代化がすすめられたが、鉄道のレール、鉄橋などの鋼材は輸入せざるを得ず、製鉄業の育成が急がれ八幡製鉄所が開設された(1901 年操業開始)。しかし、磁石などの特殊材料は輸入に頼る状況が続いた。第一次世界大戦(1914-1918)の勃発により、外国からの物資輸入が極度に制限され、とくに工業用諸機械、兵器用材料はほとんど途絶した。本多光太郎(1870-1954)が磁石鋼の開発に乗り出したのは、こうした背景のもとでの陸海軍の航空関係の要請による。本多自身は回想「KS 鋼発明前後」(『科学朝日』, 42, 1940)において、

当時最良の永久磁石タングステン—クロム鋼の鉄を一部コバルトに置換して残留磁化を増せば必ずいい磁石ができると考えて、「2, 3 回の試作で予想が的中したことが確かめられた」と言っている。ところが実際に試料の試作・試験を担当した高木弘(写真 2)の博士学位論文(東北大理, 1959)を見るとだいぶ話が違う。

高木弘は 1911 年東北理科大学大学院に入学し、KS 鋼の開発などに従事した。1919 年に住友鑄鋼所に入り、KS 磁石鋼の生産技術の研究指導を担当した。KS 磁石鋼発明から 40 年以上も経って学位論文を提出したのは、林たけし教授(東北大学理学部)の勧めによる。



写真 2 高木弘  
(株式会社トーキン提供)

「KS 磁石の仕事は当然学位をさし上げていいものだったが、高木はずっと学位をとらないままであった。昭和 33 年頃、林が教室の最年長者になっており、ぜひ学位をとってほしいと思い、学位論文の執筆をすすめた。高木がもう手がふるえてこれ以上は書けないというのを、励まし励まし書いてもらった」(林教授談)。

学位論文は“KS 磁石鋼の研究 ならびにわが国地表面物質の磁性の測定”と題され、その 1 節に次のような記述がある。

#### Fe-Co-Cr 磁石鋼

Co-W-Fe 磁石鋼には特に注目すべき成績はなかった。当時教室の工場に成分不明の工具鋼があつてきわめて硬度が高く大切に居った材料があることを工具より聞いた。筆者は之を分譲してもらい之を Co-Fe 合金に W の場合と同様に配合した。その結果抗磁力 180 エルステッドの磁石が発見された、本多教授は非常に驚かれて早速分析を命じられた。その結果、抗磁力の増加は Cr 元素によるとの結論になった。その後フェロクロムにより Cr を配して試験した処  $I_r = 500-600 \text{ gauss}$  (5000 ~ 6000 の誤記か?)、 $H_c = 180-200$  エルステッドの磁石鋼が完成された。

「工具鋼を配合して合金試料を造った」というのはいかにも奇異に感じられるが、当時のよい磁石(磁氣的に硬い)は、機械的に硬いことを必要条件にしていた。したがって「硬い工具鋼」の成分をとりこむことは自然な発想であった。学位論文の記述をそのままに受け取ると「工具鋼添加は Cr 添加」に相当したと受け取れるが、切削用の工具鋼には数%の W が(通常は Cr より多量に)含まれているので、W と Cr の同時添加であったと見るのが自然である。学位論文は高木が 70 歳を超えて、KS 鋼発明から 40 年以上経過したのちに書いたものである。その自宅は仙台大空襲の折に全焼した(ご遺族高木康子さんによる)とのことであり、おそらくは実験データやノートもないままに執筆されたものと推測される。実際、東北大学理学部より取り寄せた学位論文のコピーを眺めてみると、「学位論文」というより「回想録」と呼ぶ方がふさわしい書きぶりである。“工具に分譲してもらった工具鋼を合金作成に際して添加した”といった経緯は、迫真性があるけれど、実験の詳細な経緯までそのとおりであったかどうかは疑問が残る。

KS 鋼の特許出願書(1917 年)には“トクニ磁石ヲ造ル為メ鋼鉄ト 20 ~ 60% ノ Co ヲ合金シ之ニ若干量ノ W, Mo, V 又ハ其ノ同族ノ金属ヲ加ヘ…”とあり、明細書では“20 ~ 60% ノ Co ト Cr トヲ合金シ…”と Cr を追加している。

当時最も優れていたタングステン鋼に比し抗磁力にして 4 倍近い値を示す KS 鋼は、高価なコバルトを大量に含んでいるため、製品価格は 20 倍もしたが、ドイツのジーメンス・ハルスケ社、米国のウェスチングハウス社は早速採用した。「KS 鋼」の名称は、本多光太郎の研究支援のため寄付をした住友家への謝意を表して当主(住友吉左衛門)のイニシャルを取ってつけられた。

### 4. MK 鋼の開発

KS 磁石鋼の発明から 15 年後の 1931 年、三島徳七により MK 磁石が発明された。これは当時最高性能の永久磁石材料であった KS 鋼の約 2, 3 倍の保磁力を有し、安定性にもすぐれたものであった。MK 磁石の発明前後の事情を、三島自身の発言(『電子材料』1962 年 6 月号)から拾い出してみよう。

当時世界的に有名な合金で、無磁性、非可逆鋼と呼ばれたニッケル 25～26%を含む高ニッケル合金は、加熱のときと冷却のときで変態点が著しくことなり、これを高温からやや早く冷やせば、常温に達しても変態を起こさず無磁性であった。この原因を追及解明しようと思った。…高ニッケル合金にアルミニウムを添加した試料を熔製して、いろいろ測定をしているうちに、アルミニウムの成分の変化につれて、磁性が非常に強くなることがわかった。そこで、最初の目的を変え強力なマグネットを作る方向にいった。強力な磁石をみつけることを目的に研究をはじめたのではなく、むしろ高ニッケル合金の無磁性であり、非可逆性である原因をつきとめようと思ってスタートしたことが、強力な永久磁石をみつける結果になった。MK 磁石という名前は、私の養家の三島の M と実家の喜住の K をとってつけた。

## 5. 新 KS 鋼の開発

三島徳七による MK 磁石は本多光太郎による KS 磁石鋼の性能を大幅に上回るものであり、東北大学金研の研究者に電撃的な衝撃を与えた。その状況を増本量(1895-1987)は『三島先生を偲んで』に寄せた追悼文で以下のように述べている。

…十五年という長い間、本多先生、高木博士の KS 磁石の上に眠っていた金属材料研究所のわれわれには大きなショックでもあった。…鉄・ニッケル系合金にアルミニウムと類似した金属を添加して…大きな保磁力を得んとする研究を始めることにした。…中でもチタンは比較的保磁力を大きくしたが、残留磁束密度を大きくするものは見つからなかった。本多先生には「それではコバルトを加えてみるといいわなあ」といわれた。それで直ちに鉄・ニッケル・チタン・コバルトの四元合金の試料をたくさん造り、焼き入れ、焼きもどしを行って測定してみたところ、残留磁気は弱いが保磁力は大きいものが得られた。本多先生は非常にお喜びになり、これに新 KS 磁石鋼と命名された。

## 6. MK 鋼と新 KS 鋼の特許係争

「新 KS 鋼は MK 鋼の改良品か、新規な発明か」を巡って、東大対東北大の争いを背景に、工業化した

二つの企業、住友金属工業(新 KS 鋼)と三菱鋼材(MK 鋼)のあいだで激しい特許論争が続いた。三島特許の中心は鉄-ニッケル-アルミニウムの 3 元合金であるが、新 KS 鋼は鉄-ニッケル-チタニウムの 3 元合金であるということになっている。問題はチタニウムを添加するときに使う原料のフェロチタンにアルミニウムが大量に混在しているので、結局熔製されたものが、鉄-ニッケル-アルミニウム-チタニウム合金になってしまうことだった。

新 KS 鋼という名称は「KS 鋼を改良したもの」という印象を与えかねないが、材料学的には MK 鋼を改良したものである。特許係争は(おそらくは軍の介入により)最終決着には至らなかったが、東北大学金研が優勢であったことは学問的には不可解で、鉄の神様ともいわれた本多光太郎の剛腕、政治力によると見る人も多い。現在ではアルニコ磁石(主要添加合金元素、Al, Ni, Co に由来する)と総称されるものは MK 鋼、新 KS 鋼に由来するものである。

## 7. 酸化物磁石(フェライト磁石)

この稿の初めに述べたように、人類が最初に出会った永久磁石は、金属ではなく天然に存在する酸化物-磁鉄鉱(マグネタイト:  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_3\text{O}_4$ )であった。世界で初めて人工的な酸化物磁石が発明されたのは 1932 年で、MK 鋼の発明とほぼ同時期である。亜鉛の精錬における亜鉛収率を上げることが当初の目的であった。金属亜鉛を製造する工程で、不純物に含まれていた鉄が酸化されて酸化鉄( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )となり、これが酸化亜鉛と結合して亜鉛フェライト( $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )ができて、最終的な亜鉛の収率を下げってしまう。この亜鉛フェライトが生成されない方法の探求が、昭和 4 年(1929)に東工大に赴任した武井武に、加藤与五郎が与えた研究課題であったという。武井は、ある雑誌に「亜鉛フェライトは磁性を持つ」とあるのを見つけ、磁性に興味を抱いてフェライトの研究を始めた。1932 年 OP 磁石という名称で特許出願されたのは、コバルトフェライト( $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )をベースに改良したものであった。この OP とは、Ookayama Permanent(東工大のある大岡山)と Oxide Powder(酸化物粉末)に由来する。

オランダのフィリップス社は、1952 年 OP 磁石の性能を上回るバリウムフェライト( $\text{BaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )

磁石を開発した。さらに、1961 年アメリカのウェスチングハウス社により一回り特性がアップしたストロンチウムフェライト磁石が発表された。これらのフェライト磁石は原料が比較的安価なため工業用磁石として大量生産された。その後のエレクトロニクス時代のニーズにマッチしたフェライト磁石は合金磁石の生産量をあつという間に上回り、現在でも世界で最も多く利用されている磁石となった。

## 8. 希土類磁石

磁性材料の開発としては、元素自体が強磁性である「鉄、コバルト、ニッケル」の 3 種類のみが注目されてきたが、1960 年代に入ると「希土類元素」と呼ばれる、すこし毛色が変わった元素に注目が集まった。鉄、コバルトなどの磁石材料に希土類元素を混ぜ合わせると、磁石性能が劇的に改良されることが分かったのである。

1966 年に米国の研究者が、コバルトに希土類元素であるイットリウム Y を混ぜた化合物が磁石に適した特性を持つことを発表した。70 年代には別の希土類元素サマリウム Sm をコバルトに混ぜたら飛躍的に性能が増加した。サマリウム磁石はアメリカで発明されたが、この系統の磁石で最高性能のものは  $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{17}$  という多元素を組み合わせた化合物で、俵好夫博士の発明である。

## 9. 最強のネオジム磁石の誕生

自然界に存在するおよそ 90 の元素のうち、磁石の本体として使えるのは「鉄、コバルト、ニッケル」の 3 元素だけである。

資源量が多く、価格も安い鉄を主体としてほかの元素を加えて強力な磁石を作る努力が続けられた。こうして 1982 年に生まれたのが佐川真人によるネオジム磁石で、現在でも史上最強の磁石である。原子組成はネオジム 2、鉄 14、ホウ素 1( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ )だ。

磁石の磁化の強さは、温度が上がると次第に小さくなり、ある温度で 0 になる。この温度のことをキュリー温度( $T_c$ )と呼ぶ。 $T_c$  は鉄で 771°C、サマリウム磁石( $\text{Sm}_5\text{Co}$ )では 747°C、ネオジム磁石は 315°C である。ネオジム磁石の場合、使用温度が 200°C 付近だとかなり保磁力が落ち、例えば自動車の駆動モーターなどには使用できなくなる。様々な実験の結果、希土類元素であるジスプロシウム Dy を添加するこ

とにより、温度上昇による保磁力低下を抑えることができた。ネオジムが埋蔵量・生産量ともに比較的豊富であるのに対し、ジスプロシウムはネオジムの 10 分の 1 しか存在せず、価格が高く乱高下もはげしい。代替元素の探究も行われている。ネオジム磁石は家電製品の小型化を推し進めた。その典型がハードディスクであるが、今後ハイブリッド車、電気自動車などのモーター利用が主要な用途になると考えられている。

磁石の性能を表す指標は最大エネルギー積であると述べたが、「工業製品の小型化」の視点からは、最大エネルギー積を同じにした時の磁石の大きさが問題になる。表紙の図 b は種々の磁石についてその大きさを比較したもので、ネオジム磁石の優位性が直観的に理解できよう。

## 10. 材料開発のむつかしさと面白さ

すでに述べたように、強磁性を示す元素は Fe, Co, Ni である。強い磁石は Fe をベースに、これにほかの元素を加えてより優れた合金を探すというやり方で始まった。現在では材料研究の有力な武器である X 線回折、電子顕微鏡といった方法・機器がない時代の研究は「目隠し、手探り」であった。KS 鋼開発における工具鋼添加、MK 鋼開発が磁性に関係ない元素であるアルミニウム添加の効果を調べる実験から始まった、などのエピソードは材料開発におけるセレンディピティの重要性を示す典型例だ。

KS 鋼発明から 100 年の今日では、アトムプローブ法による原子配列の直接観察、第一原理計算による予測などの手法により、より性能が優れた磁石を求めて研究が行われている。

### 参考文献

- 1) 小岩昌宏: 永久磁石材料- KS 鋼, MK 鋼, 新 KS 鋼の開発事情-(金属学プロムナード-セレンディピティを追って, 第 5 章) アグネ技術センター, 2004.
- 2) 佐川真人, 浜野正昭, 平林真(編): 永久磁石-材料科学と応用-, アグネ技術センター, 2007.
- 3) 宝野和博, 本丸諒: すごい磁石, 日本実業出版社, 2015.