



次代を担う高性能材料

希土類磁石

携帯電話やパソコンなど、電子機器の高性能化、小型化は、革新的なスピードで進んでいる。これらの製品の進化を支えているのが希土類磁石である。非常に高い磁気特性を持ち、時代のニーズに応える能力を備えている。その能力の高さを生かし、現在、希土類磁石は活躍のフィールドを確実に広げている。

現在、コンピュータやDVDレコーダのハードディスクドライブ (HDD) のボイスコイルモータ (VCM) には、希土類磁石が使用されている。磁気特性の高い希土類磁石はパソコン等の小型化、高性能化に大きく貢献している。(写真提供:富士通(株))

電子機器に不可欠な希土類磁石

1794年にフィンランドの学者ガドリッが、鉱物の中からイットリウム酸化物を発見し、希少鉱物から発見されたために希な(まれな)土類(アルミナや石灰を示す)という意味の希土類と名付けた。以後、希土類は、原子番号21番(Sc)、39番(Y)、57番(La)～71番(Lu)の17元素の総称となっている。かつては希少と考えられた希土類であるが、実際にはその多くは地球上に豊富に存在している。

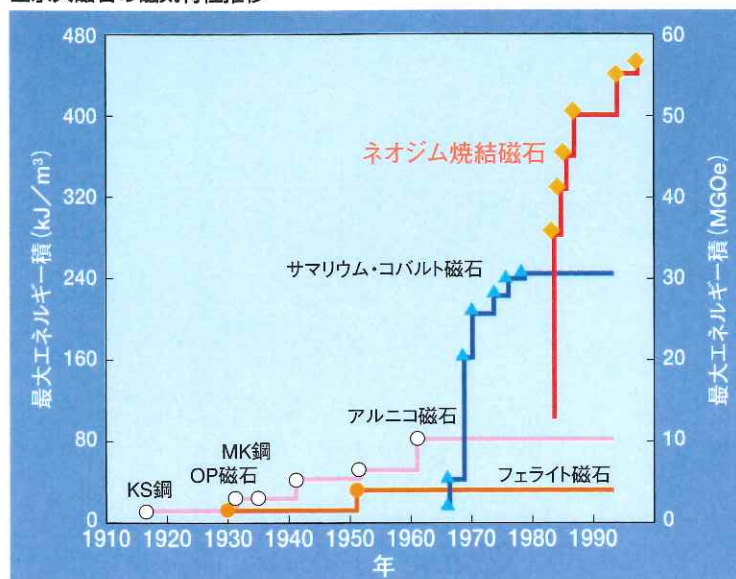
希土類元素の主な用途に磁石がある。希土類磁石は非常に高い磁気特性を持ち、その特性から、現在、小型で高性能な電子機器には不可欠となっている。例えば、ノート型パソコンから大型のコンピュータまで、そのハードディスクドライブ(HDD)には希土類磁石が使用されている。その他、携帯電話機やコンパクトディスク(CD)、ミニディスク(MD)など、多数の機器で希土類磁石は活躍し、我々は日常、無意識のうちに希土類磁石を多用しているのである。

HDD用VCMに使用されるネオジム磁石。VCMは、磁気ヘッドの駆動装置で、ネオジム磁石を使用することで高速、高精度に制御することができる



MRI (磁気共鳴装置) の磁界発生源として、希土類磁石が大量に使用されている

■永久磁石の磁気特性推移



1983年に発表されたネオジム磁石は、非常に優れた磁気特性を持ち、その後数年で性能はさらに向上した。



磁石の反発力を利用してパチンコ玉を持ち上げてみた。左からフェライト磁石、サマコバ磁石、ネオジム磁石。ネオジム磁石が最も多くの玉を持ち上げている。(社)日本電子材料工業会資料より

磁石大国・日本を支える希土類磁石

そもそも、我が国は磁石の研究で数多くの功績を残している。1917年に、東北大学の本多光太郎博士が「KS鋼」を発明したのを初めとして、1932年には、三島徳七博士が「MK鋼」を発明し、これは現在のアルニコ磁石の原型となっている。一方、MK鋼の発明とほぼ同じ頃、東京工業大学の加藤興五郎博士、武井武博士により「OP磁石」(コバルト・フェライト)が開発され、この磁石は、現在のフェライト磁石の原型となっている。このように我が国は永久磁石の基盤を築き、磁性材料研究とその実用化で世界を牽引してきた。

1960年代から希土類元素と鉄、ニッケル、コバルト系の金属間化合物の磁性研究が活発になり、1967年には米国内でサマリウムとコバルトからなる化合物が優れた磁石になることが発見された。これがサマリウム(Sm)・コバルト(Co)磁石(サマコバ磁石)の始まりで、この磁石の出現により、永久磁石の分野に希土類磁石が登場することとなった。しかしサマコバ磁石の原料であるサマリウムとコバルトは比較的産出量が少なく、特に高融点なコバルトは軍事用に使用され高価であった。そのため、コバルトを使用しない磁石が世界中で求められていた。

1983年、日本の企業と米国の企業から、コバルトの代わりに鉄を使用した、ネオジム(Nd)・鉄(Fe)・ボロン(B)磁石(ネオジム磁石)が発表された。その磁気特性の高さは世界を驚かせた。発表された磁石は日本と米国で製法が異なり、日本は焼結磁石で、米国は溶融合金を高速急冷したボンド磁石であった。

その後、希土類磁石の生産規模は年々拡大を続け、生産金額で見ると1977年にフェライト磁石がアルニコ磁石等の casting magnets を上回り、1993年には希土類磁石がフェライト磁石を追い抜いている。コストの安いフェライト磁石は海外生産が進み、我が国の生産比率は低下しているが、希土類磁石は、日本が世界総需要の約7割を供給していると推定((社)日本電子材料工業会による)されている。

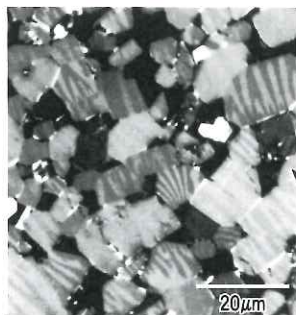
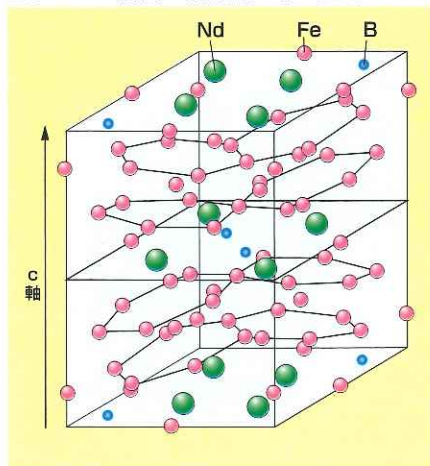
最強の磁石—ネオジム磁石の特徴

現在、希土類磁石は、ネオジム磁石とサマコバ磁石の2種類が代表的である。ネオジム磁石は、磁石の性能の目安となる最大エネルギー積*1が320kJ/m³(40MGOe)を超え、最強の磁気特性を持つ。1993年には、結晶組織と配合組成の最適化に加えて、プレス前粉末の粒度分布の最適化や磁界中プレス時の粉末の配向度向上などの技術改善により最大エネルギー積431kJ/m³(54.2MGOe)のネオジム磁石も登場している。

また、ネオジム磁石は比較的資源が豊富なネオジムと鉄を主原料としているため廉価で、またサマコバ磁石よりも比重が10%以上低く、小型化・軽量化のニーズに適用する。さらに機械的強度が高いため、欠けや割れが少なく、機械加工等の取り扱いが容易である。このような特性から現在では、希土類磁石の国内生産量の約95%がネオジム磁石が占めている。希土類磁石の主な用途は、コンピュータのHDD中のボイスコイルモータ(VCM)やMRI(磁気共鳴診断装置)、小型精密モータ等がある。

*1 最大エネルギー積:磁石の性能は、通常、磁石が作り出せる単位体積当たりの静磁エネルギーの最大値を用いる。この値を(BH)max(ビーエイチマキシマム)と呼んでいる。単位はkJ/m³かMGOe(メガガウスエールステッド)を用いる。

■ネオジム磁石の結晶構造(正方晶)



ネオジム磁石の結晶組織
結晶粒 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 中にある
縞模様(磁区)は紙面の上下方
向にほぼ平行に配列している
(Kerr効果*による偏光顕微鏡
写真)。

* 磁気Kerr(カー)効果:磁性体に直線偏光を入射すると、磁化に応じて反射光の偏光状態が変わる現象。偏光変化を検出する光学系を構成することで磁性体の磁化変化をレーザ光で測定することができる。

■ネオジムボンド磁石



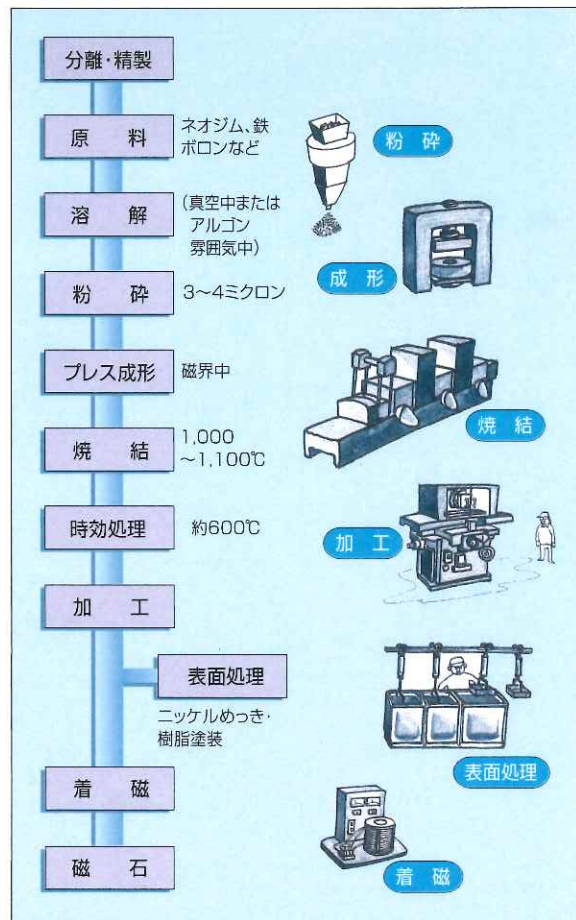
小型モータ用などに広く普及しているネオジムボンド磁石は、これまで等方性磁石のみで、長い間、異方性ネオジムボンド磁石の開発が望まれていた。近年、国内メーカーにより異方性磁粉の製造原理が発見され、異方性ボンド磁石の製品化が実現されている(写真提供:愛知製鋼(株))

成型法による分類では、原料粉の焼結による焼結磁石と合成ゴムやプラスチックをバインダーとしたボンド磁石がある。焼結磁石は異方性を与え易かつ高密度にできるため高い磁気特性が得られる。ボンド磁石は成形性が良好であるため小型モータ等に使用されている。ここでは比較的多く使用されているネオジム焼結磁石を中心に紹介する(本文中の「ネオジム磁石」はネオジム焼結磁石を意味する)。

まず、磁性材料が優れた永久磁石となるために求められる特性を挙げると、①飽和磁化*2が大きいこと、②キュリー温度*3が高いこと、③結晶磁気異方性*4が大きいこと、がある。ネオジム磁石は、特に①の飽和磁化が大きいことが特徴で、希土類磁石も含めた永久磁石の中で最も高い飽和磁化を持つ。そのため、磁気特性も最も優れている。これはネオジム磁石の結晶構造が正方晶(単位格子の底面が正方形の直方体)で、最も磁化し

■ネオジム磁石の製造工程

(社)日本電子材料工業会資料より



やすい磁化容易方向がc軸(長手の稜に平行な方向)を向き、Nd、Feの磁気モーメント*7の総和が大きいことによる。

では、ネオジム磁石がどのように製造されるか、その製造工程を簡単に記すと、まず希土類鉱石から希土類化合物を分離精製し、電解炉で還元し希土類金属を製造する。次に、製造する組成に合わせた各原料を溶解炉で溶解し、インゴットをつくる。インゴットは微細粉末化し、磁界中でプレス成形する。さらに、焼結、時効処理、加工、表面処理を行う。その後に磁場をかけて磁化する着磁を行い、磁石ができて上がる。

プレス成形時に外部から磁界を加えると、結晶方位が磁界を加えた方向に揃い、配向方向の磁気特性を向上させることができる。こうしてできた磁石を異方性磁石という。これに対し、どの方向にも磁気特性が同じ磁石を等方性磁石という。

*2 飽和磁化:磁石素材に加える磁界を増加していくと、素材は磁化を増し、やがて飽和状態になる。この量を飽和磁化という。

*3 キュリー温度:磁性体が温度上昇により完全に磁力を失う時の温度をキュリー温度とよぶ。

*4 結晶磁気異方性:原子の磁気モーメントが結晶中の特定の方向に強く束縛される結果、それ以外の向きに結晶が磁化し難くなる性質のことをいう。磁気モーメントの向きが一方向に固定されるので、それを反転しようとすれば大きな磁界が必要になる。つまり保磁力*5が大きいということになる。

*5 保磁力:磁石に最初の磁化方向と反対の向きに磁界を加えると磁束密度*6はその分だけ小さくなりやがてゼロになる。その時の磁界の強さを保磁力という。これとは別に、磁石の磁化が外部磁界の作用によって不可逆的に最初の着磁方向から反転してしまう磁界がある。この磁界強度は材料の減磁界に対する耐久力を表す性能指標であり、固有保磁力と呼ばれる。

*6 磁束密度:着磁により磁石素材は磁化されるが、このとき素材には一般に磁束が通るようになる。単位面積当たりの磁束を磁束密度と呼ぶ。

*7 磁気モーメント:電気における「電荷」に相当するものが「磁荷」であり、その符号がNとSで、N極とS極の磁荷とN極S極間の距離の積は力学のモーメントに相当し、これを磁気モーメントと呼ぶ。

高性能磁石の開発

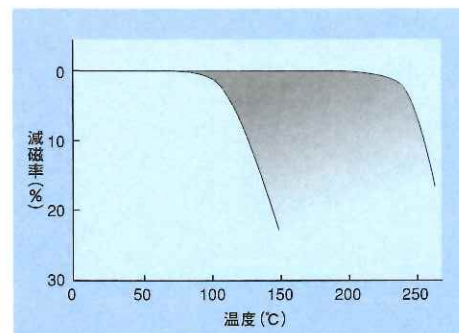
ネオジム磁石は非常に高い磁気特性を持つが、キュリー温度が比較的低く、その結果温度上昇とともに磁気特性が減少するという問題があった。また、耐食性が低いということも問題となっていた。このためネオジム磁石は高温多湿の環境下での使用が制限され、ネオジム磁石の耐熱性、耐食性の向上をめざした開発が進められた。

耐熱性向上のために、例えばネオジムの一部をジスプロシウム等で置換することで、保磁力向上を図ったり、鉄の一部をコバルトで置換することによってキュリー温度を高め、磁束密度の温度変化依存性を改善するなど、さまざまな改良が行われた。最近では、耐熱温度を高め、240℃の高温の環境下でも使用できるネオジム磁石が登場している。

一方、錆びの主な原因となる結晶粒界相の選択腐食を抑制するために、コバルトを添加し、化学的に安定な化合物(Nd₃Co)を析出させ、耐食性を大幅に改善している。さらに、製造工程において酸素や水分を極力遮断したり、ニッケルめっきや樹脂塗装などの表面処理を行うなどの酸化防止策が行われている。

今後の用途分野として期待されている自動車には、使用個所にもよるが耐熱温度は180～220℃程度が必要で、そのため、各メーカーでは、耐熱性、耐食性、磁気特性向上をめざした材料、製品開発が積極的に行われている。

■ネオジム磁石の温度特性



ネオジム磁石は温度上昇とともに磁気特性が急激に低下する性質を持つが、最近では技術開発により240℃でも使用できる磁石が登場している。

省エネルギーや環境負荷低減に貢献

ネオジム磁石の次の用途分野と考えられているのが自動車である。最近の自動車には永久磁石を用いたモータが数多く搭載されており、高級車などには80個以上のモータが使用されている。現在は主にフェライト磁石が、各種モータに使用されているが、最近ではアンチロックブレーキシステム(ABS)の車輪速センサなどに希土類磁石が採用されている。

また近年、省エネルギーや環境負荷低減をめざし、電気自動

希土類磁石の再資源化技術

1983年にネオジム磁石が開発されてから、その需要は年々高まり、生産量は増加を続けている。製品の高性能化、小型化のニーズはますます高まるものと考えられ、今後、多分野において需要が増加することが考えられる。

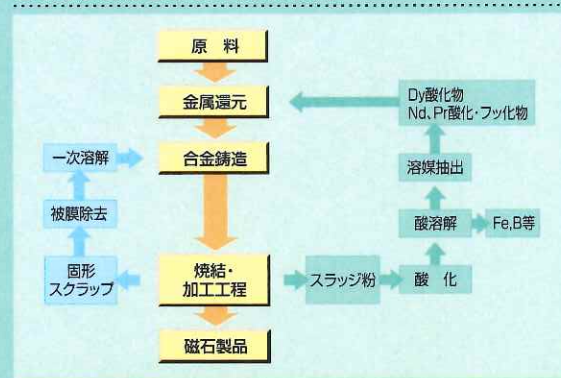
希土類磁石の原料となる希土類鉱石は、比較的豊富に存在するが、地球上に偏在しており、中国が世界生産量の約90%を占めている。そのため、今後の需要増加に伴い、価格の高騰等が懸念されている。

一方、現在1万トンのネオジム磁石製造には、その40%にあたる約4,000トンの工程スクラップが発生すると推定されている。また、市中に販売されたネオジム磁石は、リサイクルシステムが確立していないため、磁石回収が遅れているのが現状である。このような状況から、リサイクルをはじめとした希土類資源の再資源化が進められている。

ネオジム磁石の工程スクラップのリサイクルは、希土類成分の分離、回収、再生に関して種々の方法が提案され、スクラップの形態に合わせ選択されている。ネオジム焼結磁石の代表的なリサイクル工程を下に示す。この方法では、焼結工程で発生する割れ欠けや加工後の不良品などの固形スクラップは、一般的に原料合金として再使用し、研削や切断工程で大量に発生するスラッジ等は、主に酸溶解プロセスによって希土類金属を分離回収し、磁石原料として使用する。

(株)NEOMAXでは、この方法を用いて、製造工程で発生した固形スクラップのリサイクル率を95%、粉末スクラップのリサイクル率90%を実現している。

■ネオジム磁石のリサイクル工程



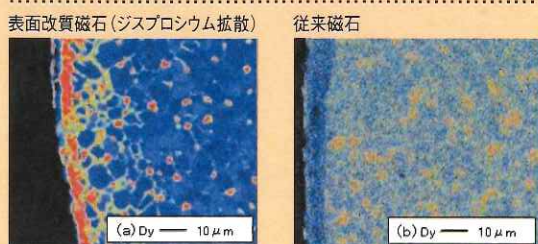
車やハイブリッドカーが積極的に開発されている。これらの駆動力は電気モータである。現在、種々の駆動用モータが検討されているが、中でもネオジム磁石を用いたモータが多く使用されている。最高の磁気特性を持つネオジム磁石を使用すれば、モータの小型化、高効率化が図れるからだ。最近発売されたハイブリッドカーには、ネオジム磁石が一台にkg単位で採用されている。さらに燃料電池車の開発も活発化しており、自動車のエレクトロ

ネオジム磁石搭載マイクロモータの開発

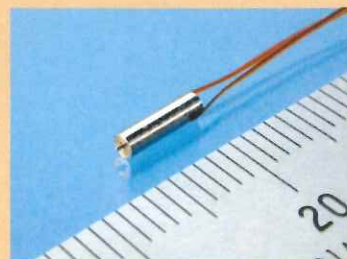
このほど、強力なネオジム磁石を搭載し、直径わずか1.7mmの世界最小実用モータの試作に大阪大学先端科学イノベーションセンターの町田教授らの研究グループが成功した。

永久磁石を用いたモータの性能は、磁石の磁気特性に左右されるため、磁気特性の高いネオジム磁石を使用すれば、高性能化または小型化が図れる。しかしこれまでネオジム磁石を用いたマイクロモータの製造には、微細加工時に劣化が起こり、保磁力が急激に低下するという問題があった。ネオジム磁石は焼結工程で約50%の体積収縮が起こるために、厳しい寸法精度を満たすためには表面切削加工などが必要になる。加工した表面には μ 単位の加工劣化層が生じ、この部分の磁気特性は低下する。通常の磁石の大きさであれば問題にはならないが、微小な磁石になればなるほど、その体積に占める劣化層の割合が大きくなり、明らかな特性劣化につながる。そのためネオジム磁石を用いた、高性能マイクロモータの製造は困難となっていた。

■表面改質磁石の内部構造



開発されたネオジム磁石搭載世界最小モータ。マイクロマシンや医療機器への応用が考えられている。



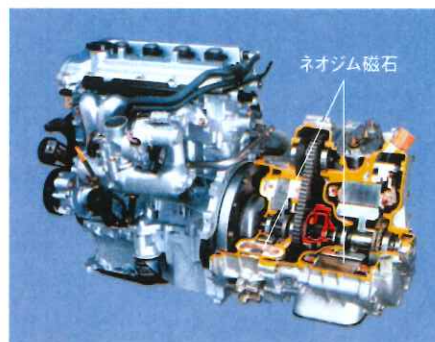
今回の研究((株)NEOMAX、並木精密宝石(株)との共同による)では、加工後の微小ネオジム磁石の内外表面に、保磁力向上に効果を発揮するジスプロシウムをスパッタリング蒸着し、加熱処理でジスプロシウムを磁石内部へ拡散させることで、微小磁石の磁気特性を大幅に回復させることに成功した。特に成膜条件を最適化することで、微細加工前の素材磁石とほぼ同程度の磁気特性まで回復させることができた。この処理を施した円筒形ネオジム磁石(外径0.9mm ϕ 、内径0.3mm ϕ 、長さ2.9mm)を搭載したマイクロモータは世界最小のサイズ(外径1.7mm ϕ 、長さ6mm)となっている。

この研究は、科学技術振興事業団(現(独)科学技術振興事業機構)の支援プロジェクト「希土類磁石を用いたマイクロアクチュエータの開発」に関する研究で、平成13年度から行われている。開発された超小型モータは、人間の手の代わりとなって作業を行う手術用アクチュエータなど、医療機器やマイクロマシンなどへの応用が期待されており、今後は量産技術の確立などが望まれている。

ニクス化はいつそう進むものと考えられている。このような傾向を受け、2010年には、自動車分野全体で8,000~1万トンのネオジム磁石の需要があると算定している関係者もいる。ただし、自動車での使用は、高温の環境下におかれるため、磁石の耐熱性がきわめて重要となる。最近では自動車での使用に耐える耐熱性の高いネオジム磁石も登場しているが、いずれの自動車部品も安全性能と運転制御に関わることから、いつそうの耐熱性、耐食性の向上が求められている。

時代のニーズに応え、希土類磁石は、今や永久磁石の主役と言われるほどに成長している。一般的に、画期的な発明があっても、それを実用化に結びつける事は非常に難しいが、そのなかで、ネオジム磁石は着想から約5年という材料開発としては異例の速さで実現した超高性能磁石である。それだけ波及効果

の高い発明であったことは言うまでもなく、我が国の優れた磁性材料技術があればこそ実現した磁石である。自動車は今、次世代型自動車の開発を積極的に進めている。省エネルギー、環境負荷低減が各分野における大きなテーマとなるなか、それらに大きく貢献するのが希土類磁石である。今後のダイナミックな製品の進化を根底から支えるのは、高い磁性材料技術から生れた希土類磁石であろう。



ハイブリッドカーの駆動モータや発電機に、耐熱性が高められたネオジム磁石が採用されている。

●取材協力 (社)日本電子材料工業会、(株)NEOMAX
●取材・文 杉山 香里