同時発表：
筑波研究学園都市記者会（資料配布）
文部科学記者会（資料配布）
科学記者会（資料配布）

重希土類元素ジスプロシウムを使わない高保磁力ネオジム磁石

平成２２年８月３０日
独立行政法人 物質・材料研究機構

概要

１．独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）磁性材料センター（センター長：宝野 和博）はハイブリッド車の駆動モータに使われるネオジム磁石の高保磁力化に必須の重希土類元素（重レアアース）であるジスプロシウム（Dysprosium、以下 Dy）を用いずに、原料粉の保磁力を高める方法を開発した。

本研究では、水素化・不均化・脱水素・再結合(HDDR)法で製造されるネオジム磁石粉にネオジム銅合金を拡散させ、粉のなかにある無数の微細結晶の界面組成を制御することによって、ジスプロシウムなどの資源的に希少な重レアアースを使わなくても、保磁力を高めることができることを実証した。

２．通常のネオジム磁石（ネオジム・鉄・硼素の３元素からなる）は温度上昇に伴い、「保磁力」とよばれる磁石特性が低下する。そのため、駆動モータの動作により、磁石の温度が 200℃ 程度になるハイブリッド車の駆動部には、そのままでは使えない。

そのため、ハイブリッド車の駆動モータでは、ネオジムの 40%を重レアアースであるジスプロシウムで置き換えたジスプロシウム含有ネオジム磁石が使われている。

３．ジスプロシウムは地球上の存在比がネオジムの 10%程度であり、しかも 90%以上が中国で産出されている。そのため、大量供給の必要のある磁石はジスプロシウム量を少なくともレアアースの 10%以下に削減することが求められている。

４．従来のジスプロシウム量を削減する有効な方法としては、磁石の表面からジスプロシウムを結晶と結晶の界面（結晶粒界）に沿って拡散させる方法がある。結晶粒界部分のネオジムだけをジスプロシウムで置換することにより、必要なジスプロシウム量を大幅に減らすことができる。この拡散法では結晶粒界部分にジスプロシウムなどの重レアアースを使う必要があると考えられていた。

５．本研究では、結晶粒間の磁気的な結合を切ることにより、保磁力を強化できるという発想から、融点の低いネオジム銅合金を結晶粒界に沿って拡散させ、結晶粒界のネオジム組成を改善する方法を提案した。それにより、ジスプロシウムを全く使わずに保磁力を高めることが可能であることを見出した。

本研究は焼結磁石よりも約一桁微細な結晶粒径を持つ HDDR 法による磁粉に適用され、微細結晶粒の磁気的孤立化による高保磁力の発現を実証したものである。

６.本研究結果は９月６日につくば市で開催される日本磁気学会学術講演会にて発表される。また材料系速報誌である Scripta Materialia に受理されている。なお、本研究は文部科学省元素戦略プロジェクト「低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発」の一環として行われた。

研究の背景

磁石材料には酸化物系のフェライト磁石や合金系のアルニコ磁石など、さまざまな種類があるが、ハイブリッド車(HV)、電気自動車(EV)やハードディスクドライブ(HDD)のモータでは高価でも高性能なネオジム磁石を使う必要がある。特にハイブリッド車や電気自動車は希土類金属（レアアース）を大量に使用するが、90%以上のレアアースが中国で生産され、輸出量が制限されているために、レアアースの安定供給が懸念されはじめている。ハイブリッド車ではモータの動作により磁石の温度が 200°C 程度になるので、ネオジム(Neodymium、以下 Nd)、鉄(Fe)、硼素(B)の３元素からできる Nd-Fe-B 系磁石では「保磁力」とよばれる磁石特性が温度の上昇とともに低下してハイブリッド車の駆動モータに使えない。このため Nd の 40%をジスプロシウム(Dy)で置き換えた、Dy 含有 Nd-Fe-B 系磁石が使われている。ところが Dy は地球上の存在比が Nd の 10%程度であり、90%以上が中国で産出されている。このような事情から大量供給の必要のある磁石では Dy 量を少なくとも 10%以下に削減することが求められている。

Dy 量を削減する方法として有効なのが、磁石の表面から Dy やテルビウム(Terbium、以下 Tb)を結晶と結晶の界面（結晶粒界）に沿って拡散させて、結晶粒界の保磁力を強化する拡散法がある。これによって、Nd-Fe-B 系磁石全体の Nd を Dy で置換するのではなく、結晶粒界部分の Nd だけをを Dy や Tb で置換して、焼結磁石の保磁力を向上させるのに必要な Dy 量を削減することができる。しかし、このような拡散法では、依然として Dy や Tb などの重レアアース元素を使うことが必要である。

成果の内容

本センターの最近の系統的な３次元アトムプローブによる原子レベル解析の結果から、ネオジム磁石の保磁力は結晶粒間の磁気的な結合を切ることにより強化できることが分かっていた。そこで本研究では Nd と合金化することにより融点が大きく低下する Nd-Cu 合金粉を拡散法に応用することを提案した。水素化・不均化・脱水素・再結合(HDDR)法で製造されるネオジム磁石粉は焼結磁石より約一桁微細な結晶粒を有し、それらの磁気的孤立化を促進すれば Dy や Tb を使用しないでも 20kOe 以上の高保磁力が発現できると期待された。そこで、HDDR 法で作製した磁粉に Nd-Cu 拡散法を適用した。磁粉と Nd-Cu 合金粉を混ぜ合わせ、それを加熱することにより Nd-Cu が溶ける。その結果、Nd が磁石粉中に無数に存在する結晶粒界に沿って拡散し、結晶粒界の Nd 組成を高めると同時に粒界層も 2 nm 程度に厚くなる(図 1,2)。それによって、Dy を全く使わずに 16 kOe の保磁力を 19.6 kOe にまで高めることに成功した。この保磁力は HDDR 粉としては最も高い保磁力であり、今後この磁粉を配向させて密度の高い焼結体を製造することにより、250 nm 程度の超微細結晶からなる高保磁力ネオジム磁石を製造できると期待される。今回の研究は HDDR 法によるナノ結晶を含む磁粉に適応されたが、同様の手法は焼結磁石にも応用できるものと期待される。

波及効果と今後の展開

今回の研究は微結晶組織から構成される HDDR 磁粉の結晶粒界の組成を制御すると、Dy なしで保磁力を大幅に高めることができることを示した。今後ハイブリッド車・電気自動車用の高性能磁石として使用するためには、この原料粉の結晶方位を配向させて、高い密度で固化する必要がある。この指針にそって実用に耐えうる緻密焼結体磁石の実現を目指す

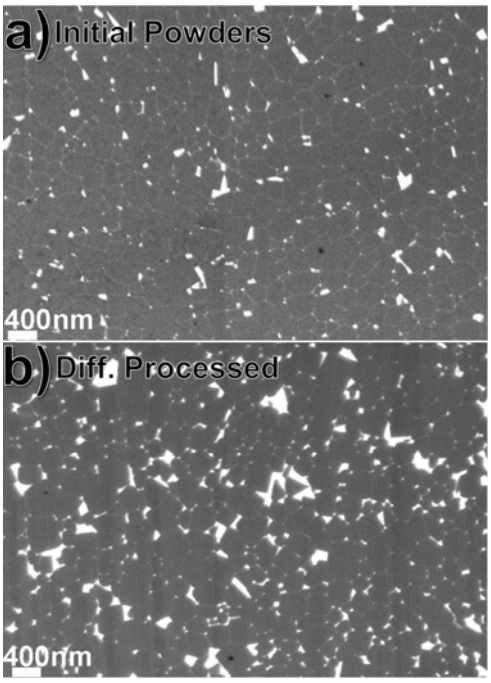

図 1　250 nm の微結晶から構成される Nd-Fe-B 系 HDDR 磁粉の走査電子顕微鏡像。(a)は拡散処理前の保磁力 16 kOe の磁石、(b)は Nd-Cu 合金の拡散処理後の保磁力 19.6 kOe の磁石の組織。(b)では暗く観察されている磁石の結晶が明るく観察される Nd の濃化した相により分断されている。

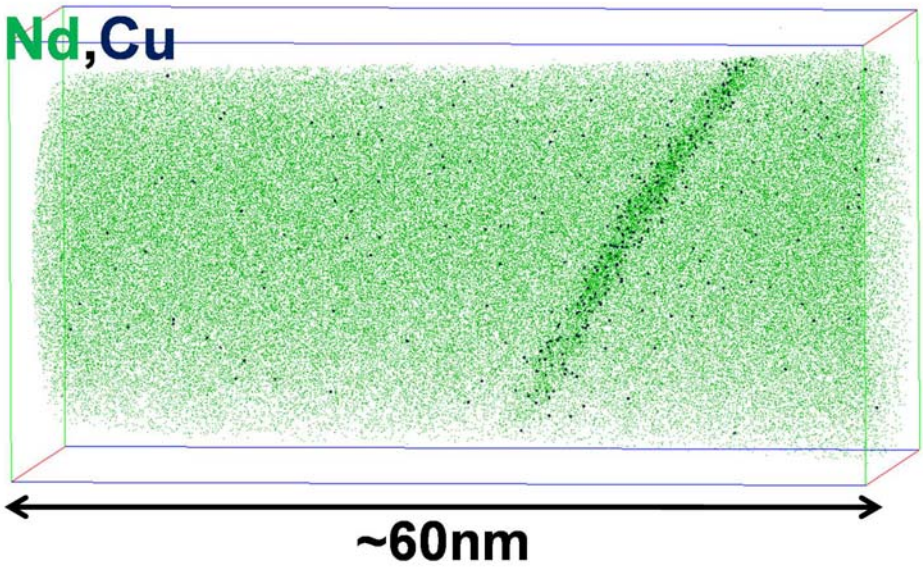

図 2　Nd-Cu 合金の拡散処理後の磁石の 3 次元アトムプローブによる元素分布。結晶粒界のところで Nd 濃度と Cu 濃度が高くなっている。この 2 nm 程度の Nd 濃化層の存在により、結晶間の磁気的な結合が弱くなり、保磁力が向上する。

問い合わせ先：
〒305-0047　茨城県つくば市千現１－２－１
独立行政法人物質・材料研究機構
　広報室　TEL:029-859-2026

研究内容に関すること：
独立行政法人物質・材料研究機構
　磁性材料センター長
　宝野和博（ほうのかずひろ）
　TEL: 029-859-2718
　FAX: 029-859-2701
　E-mail: Kazuhiro.HONO@nims.go.jp

用語解説

1）ネオジム磁石

ネオジム(Nd)、鉄(Fe)、ホウ素(B)を主成分とする希土類磁石で、主相が $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物でこの組成よりも若干 Nd 濃度が高い組成の合金の粉体を焼結して作製される。1982 年に住友特殊金属の佐川らによって発明され、磁石の性能指数である最大エネルギー積が最も高い永久磁石。Nd の資源が比較的豊富なことから高性能が要求される用途で広く使われている。弱点はキュリー温度が低いことで、高温での応用に向かない。

2）焼結磁石

粉末を焼き固めることにより製造される磁石で、ミクロサイズの結晶の方位を磁場中で一方向にそろえた磁石を製造できるために、高いエネルギー積が必要な高性能磁石は焼結法で作られる。

3）ボンド磁石

方位のそろっていない多数の結晶からなる粉体を樹脂でかためた磁石で、結晶の方位がそろっていないために高いエネルギー積はえられない。一般家庭用マグネットなど、安価な低・中特性磁石の多くはボンド磁石。

4）HDDR 磁石

主相が $Nd_2Fe_{14}B$ の Nd-Fe-B 系合金粉末に水素を吸蔵させると、水素化物、鉄、硼化鉄で構成されるナノ組織が形成される（不均化反応）。これを脱水素するとこれらの化合物が再結合し、主相が $Nd_2Fe_{14}B$ 相のナノ結晶組織が形成される。これらのナノ結晶の方向は最初の粗大な $Nd_2Fe_{14}B$ の結晶と同じ方向に配列する。これによって、$Nd_2Fe_{14}B$ のナノ結晶を含む粉末を作ることができ、高い保磁力が得られる。また磁界中で配向させると異方性のボンド磁石を作ることができる。最近は、超微結晶異方性焼結磁石製造の原料粉としても注目されている。

5）保磁力

磁界をかけて一方向に磁化した磁性材料に反対方向の磁界場をかけて磁化が反転し、磁化がゼロになるときの磁場の値。保磁力が高いと、一旦磁化すると容易に磁化を消去することが困難。保磁力は一般に温度の上昇とともに小さくなり、ハイブリッド車に使われる Dy 含有ネオジム磁石では、室温の保磁力として 30 kOe 程度のものが使われている。また Dy を含まないネオジム磁石の保磁力は 12 kOe 程度。

6）３次元アトムプローブ

先鋭な針の先端に高電界をかけて、その先端から平板の検出器に放射状に飛行するイオンの飛行時間を測定して原子種を同定し、検出器上の座標から原子位置を測定する方法で、原子を見て、かつ個々の原子を同定することができる。この方法を使うと３次元実空間で数 100 万個の原子から構成される原子トモグラフィーを得ることができ、しかもその情報からナノ領域の元素の組成も決定することができるので、究極的なナノ分析法。焼結磁石の結晶粒界の解析に成功しているのは世界で NIMS のみ。