

保磁力の謎を明らかに 最強の永久磁石を目指す

永久磁石は豊かな現代社会を支える重要な材料だ。中でも日本で開発されたネオジム磁石は史上最強の性能を持ち、自動車などで使用されている。ネオジム(Nd)磁石は熱に弱いため、電気自動車用モーターなど動作温度が上昇する用途では重希土類元素のジスプロシウム(Dy)が添加されてきた。しかし、資源が限られている希少な元素の使用量削減や別元素への置き換えが求められている。そこで、希少元素であるジスプロシウムの使用を最小にして、最強の永久磁石を目指すのが、物質・材料研究機構の宝野和博フェローだ。

ほうの かずひろ

宝野 和博

物質・材料研究機構

理事/フェロー/磁性・スピントロニクス材料拠点長

2016年より産学共創基礎基盤研究プログラム 研究代表者

背後にあるのが3Dアトムプローブ。原子をイオン化させながら表面を観察すると、3次元の原子分布が得られる。

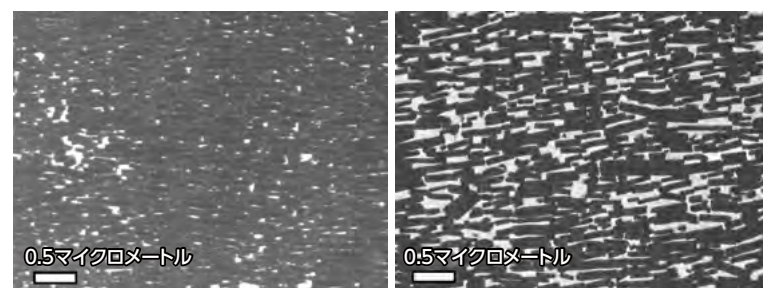
高まる性能向上への期待 希少元素の使用量を削減

環境にやさしい電気自動車や生活を便利にする電化製品には、さまざまなモーターが使われている。その小型・軽量化に貢献したのが、鉄(Fe)-ネオジム-ホウ素(B)合金に代表される強力なネオジム磁石だ。物質・材料研究機構の宝野和博フェローはさらに高性能な磁石の必要性を訴える。「電気自動車をはじめ、今後普及が期待されるロボットや飛行体でも、小型で軽量なモーターが求められています。このためには磁石の高性能化が必要です」。

工業利用されるネオジム磁石は、鉄、ネオジム、ホウ素という組み合わせで作られており、ネオジムの一部をジスプロシウムに置換して添加されることが多い。高温に弱いネオジム磁石に耐熱性をもたせ、保磁力(磁力を安定に保つ力)を高めるためだ。しかし、埋蔵量が少ないことから、需要の増大とともに価格がさらに高騰する恐れもある。そこで、宝野さんらはジスプロシウ

ム添加量を削減し、磁石の性能を向上させることに挑戦している。

添加量の削減には、もう1つ理由がある。ジスプロシウムを添加すると耐熱性は改善されるが、それと引き替えに磁束密度が減ってしまう。「磁束を生み出すのはスピンと呼ばれる電子の自転運動です。ネオジムや鉄はスピンの向きが共に上向きで強い磁束を生み出しますが、ジスプロシウムは反対の下向きです。このため、互いに打ち消し合い、磁石から取り出せる磁束が弱まるのです」と宝野さんは説明する。つまり、耐熱性を維持しつつ添加量を減らせば、高性能化が期待できるのだ。



■図1 通常の熱間加工磁石(左)とネオジム銅系共晶合金を粒界に浸透させた高保磁力磁石(右)の電子顕微鏡写真。灰色で観察されるのが結晶で、明るく観察されるのはネオジム濃度の高いところ。拡散処理後に結晶粒界に明るく観察されるネオジム-リッチ相が形成されている。

添加量ゼロで目標値を達成 成功の要因は装置と忍耐力

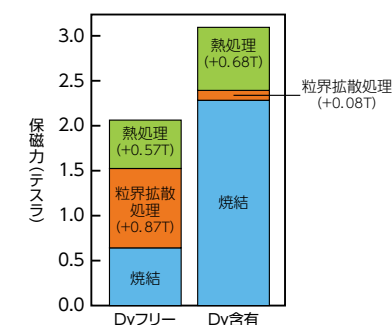
磁石を徹底的に調べた宝野さんは「この10年でネオジム磁石の微細構造をマイクロ、ナノ、原子レベルで精緻に解析できるようになってきました。私たちはさまざまな手法を統合したマルチスケール解析で、保磁力の仕組みを明らかにしました」と胸を張る。

宝野さんは電子顕微鏡でマイクロレベルの結晶粒やさらに小さいナノレベルの結晶粒の境界(粒界)を解析し、さらに粒界の化学組成を3次元アトムプローブにより原子レベルで詳細に調べた。このマルチスケール解析の結果、結晶粒

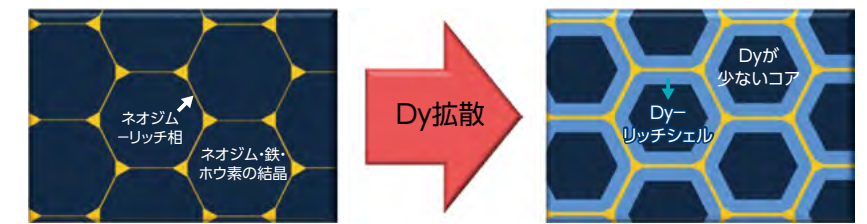
界にネオジムが多く含まれるナノメートルの領域(ネオジム-リッチ相)があり、これが高い保磁力の理由であることを突き止めた。さらに原子レベルの解析により、経験的に添加されていた銅(Cu)がその形成に重要な役割を果たすことを解明した。この発見を基に提唱したのが、解析結果やシミュレーションを駆使して粒界を最適化し、磁石の性能を上げる粒界エンジニアリングである。

その一例が、扁平なナノ結晶で構成される熱間加工磁石の粒界にネオジム-銅合金を浸透させて粒界を磁氣的に分断する方法だ。焼き固めてつくる焼結磁石では結晶粒径は約5マイクロメートルだが、熱間加工磁石では20分の1まで微細化できる。結晶粒が小さくなるほど保磁力は高まると期待されているのだが、実際には焼結磁石より少し高い程度にしかならなかった。そこで宝野さんらは触点の低いネオジム-銅合金を溶かして粒界に浸透させた。すると、熱間加工磁石の粒界に沿ってネオジム-リッチ相が均一に形成され、ジスプロシウムを使わなくても大きな保磁力が得られることがわかった(図1)。粒界の制御により、重希土類元素を加えずに強力な磁石が生み出せることを示したのだ。さらに、少量の重希土類元素を加えるとより優れた特性が得られることも見いだしている。

「成功の要因は装置と忍耐力」と宝野さん。「3次元アトムプローブというユニークな解析装置を磁石の粒界解析に使えるように改良し、他の手法で



■図2 Dyフリー磁石とDy含有磁石のDy粒界拡散処理過程での保磁力の比較。Dyフリーの磁石では粒界拡散処理により最高2テスラの保磁力しか得られないが、Dy含有磁石では最終的に3テスラの保磁力が得られる。Dyフリーで最高3テスラの保磁力にする方法が望まれている。



■図3 焼結磁石(左)をジスプロシウム拡散処理すると、コアを包むようにDy-リッチシェルが形成される(右)。ネオジム-リッチ相とDy-リッチ相の界面のジスプロシウム濃度が磁石の保磁力を決定する。

は得られないような解析によって、従来の常識を覆す結果が得られました。元素の量や配合、実験条件を少しずつ変えての解析は、時間と手間がかかる上、すでに研究が尽くされたと考えられていた磁石のテーマではなかなか論文になりません。諦めずに泥臭い実験に取り組んだことで、保磁力の仕組みを解明し、それを改善する方法を提案することができました」。

社会に求められる基礎研究を 設計指針の提示で産業に貢献

ジスプロシウム量を削減するために磁石メーカーはネオジム磁石の粒界にジスプロシウムを拡散させて保磁力を向上させる方法を実用化してきた。そのように高保磁力化された磁石の微細構造をマルチスケールで観察することで新たな知見が得られてきた。ジスプロシウムをまったく含まない磁石にこの処理をすると保磁力は0.87テスラ、熱処理後にはさらに0.57テスラ上昇し、最終的に保磁力は2テスラになる(図2)。一方、ジスプロシウムを含む磁石を同様に処理したところ、粒界拡散処理による保磁力の上昇は0.08テスラほどだが、熱処理後には0.68テスラ上昇して3テスラを超える高い保磁力に到達する。

このような違いが生じる原因に保磁力向上の鍵が隠されていると考え、各処理段階の微細構造を詳細に調べた結果、結晶の内側(コア)を包み込むようにジスプロシウムを多く含む殻状の構造(Dy-リッチシェル)が形成され、熱処理によりその外側に二次Dy-リッチシェルが形成されることを突き止めた(図3)。「一連の研究から、二次Dy-リッチシェルと粒界の界面のジスプロ

シウム濃度が保磁力を決定していることがわかりました。こうして保磁力の仕組みを明らかにしていくと、最初に使う磁石にジスプロシウムを合金化しなくても最終的に3テスラの高保磁力を実現できる方法を開発できると期待しています」。

宝野さんがこだわってきたのは、試行錯誤で磁石開発を行ってきた産業界に対して、開発の指針を科学的に示すことだ。長年の研究で磁石の製造条件は最適化されてきたが、なぜその条件が最適なのかは不明だった。宝野さんは企業と連携しつつ磁石の基礎的な理解を深め、開発の方向性を提案することで日本の磁石開発に貢献したいと考えている。「産学共創基礎基盤研究プログラムでは、産業界と学術界の研究者が集まり徹底的に議論する『産学共創の場』が開催されます。どのような基礎研究が社会から求められているかを知るための貴重な機会です」と対話の重要性を語る。

宝野さんは、マルチスケール解析など唯一無二の基礎研究を追求し、着実に目標を達成してきた。今後も日本の磁石研究をけん引し、希少元素を使わない最強の永久磁石を実現するだろう。



Q.

好きな
元素

A. ネオジム

どの元素も大事なので、この質問に答えるのは難しいですね。磁石の研究には必要不可欠で、一番お世話になっている元素という意味で選びました。