



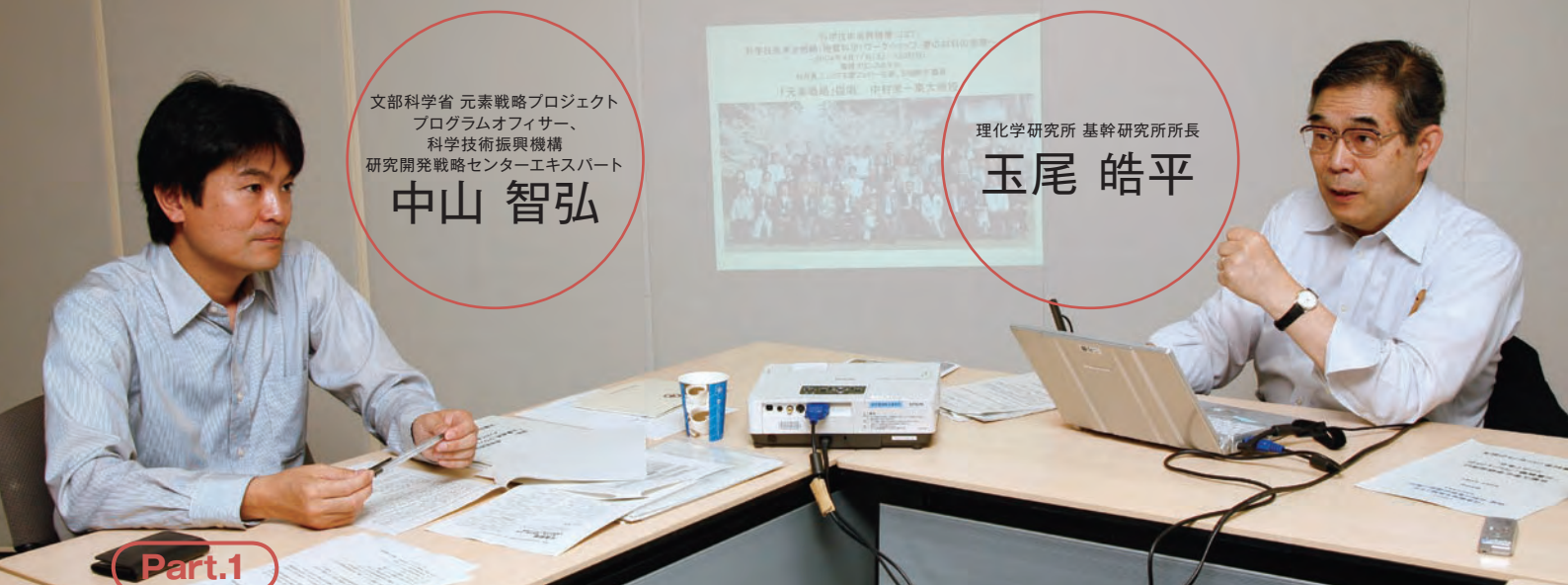
CRESTが推進する「元素戦略」の現在、未来

特集

1

世界が注目 日本の元素戦略

錬金術といえば「魔術、非科学的…」と言われるが、21世紀の日本において、「現代版・錬金術」とも呼ぶべき壮大なプロジェクトが動き始めている。「Made in Japan」の復権を狙う「元素戦略」とはどのようなものか、日本にはなぜ元素戦略が必要なのか、ナノテクに裏打ちされた驚くべき「現代の錬金術」とは——元素戦略研究の一端を、JST CRESTチームの取り組みを中心に紹介する。



文部科学省 元素戦略プロジェクト
プログラムオフィサー、
科学技術振興機構
研究開発戦略センターエキスパート

中山 智弘

理化学研究所 基幹研究所所長

玉尾 皓平

Part.1

元素の機能をデザインできるようにする!

ハイブリッド自動車のモーターを支える高性能磁石にはジスプロシウムが、液晶などの透明電極にはインジウムが、半導体の研磨剤にはセリウムが欠かせない。いずれも希少元素と呼ばれるものだ。「それらを使わずにほかの元素で希少元素の機能を置き換えよう」という野心的な試みこそ「元素戦略」である。いわば、「現代版・錬金術」とも言えるだろう。JST発、文部科学省・経済産業省連携の共同プロジェクトに発展した「元素戦略」、サイエンスの常識を覆すプロジェクトの正体とは？

すべては「箱根会議」から始まった

「元素戦略」は、2000年頃、当時京都大学化学研究所の玉尾皓平教授（現・理化学研究所 基幹研究所所長）が「元素科学」を提案したことからスタートしている。

「『物質の特性や機能を決定づける役割とはいったい何なのか』、それを解明することを目指していました。その後、村井眞二先生（当時JST上席フェロー）から『夢の新材料の実現という、物質科学のワークショップをJSTで始めたいから、取り仕切ってくれないか』と言われたのです」

こうして有機化学、無機化学、高分子化学、バイオの4分野のリーダーたちが箱根

に集まり開催されたのが2004年4月17日～18日の「箱根会議」だった。

「メンバーみんなで徹夜で“夢の新材料”実現のために必要なことについてまとめ、東京大学の中村栄一先生が『元素戦略』というキーワードを提唱されました。『元素戦略』は正真正銘、この04年4月17日に産声を上げたのです」（玉尾さん）

当時はまだ、中国による希少元素※1の輸出規制なども行なわれていなかったため、希少元素の価格高騰や枯渇といった危機感も少なかったという。しかし06年、中国が資源保護計画を発表したこともあり、翌07年、「省庁を超えた初めての共同プロジェクト」として文部科学省の「元素戦略プロジェクト〈産学官連携型〉」と、経済

産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」がスタートした。経済産業省は実用に近い分野を、文部科学省は基礎研究に近い分野を進める形となった。10年度からはJSTも、CREST、さきがけで元素戦略のプロジェクトをスタートさせ、4つのプロジェクトが密な連携を取りつつ並走する形となった。

こうして、日本の元素戦略研究は世界に先駆けて始まった。今では「世界を5年リードしている」と言われ、各国にも注目されている。12年5月には「米国版・元素戦略プロジェクト」もスタートした。これに対し、日本でも文部科学省が「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」という大型プロジェクトを7月に新たに開始、経済産業省



2004年4月17日~18日に行われた箱根会議での集合写真

「これだけの人物が一堂に会した勉強会は、きっと日本の物質科学の歴史を変えるものになると直感し、記録に残そうと思いました。たまたま隣で結婚式が行われていて、その写真屋さんに急ぎよ、撮ってもらったのです。これは「元素戦略」というと必ず使われる、歴史的な写真です」(玉尾さん)

も新プロジェクトを準備しており、両省の協力も加速する。国際間でも、いよいよ元素戦略競争の時代に突入したのだ。

資源小国、日本の選択

「元素戦略」を最初に提案したJSTの意図を、このプロジェクトの立ち上げからかわっていたJSTの中山智弘氏は次のように話した。

「一言でいえば、『日本は今後、何で食べていくか』、その明確な戦略を立てなければいけない、と考えています。日本には資源が無いのですから、競争力のあるモノを作って売る以外に、GDPを伸ばす方策はありません。サービスや内需の拡大を中心に日本経済の発展を考える人もいますが、日本は輸出業が支えているのが実態です。確かにGDP比に占める輸出割合は低いように見えますが、競争力のある製品を輸出し、その

利潤をレバレッジにして、銀行、保険、サービスなどが成り立っているのです。もし競争力のある『タネ銭』がなくなれば、日本はたちまち立ち行かなくなるでしょう」

日本の強みといえば自動車産業が真っ先に挙げられる。いま、その自動車産業は「ガソリン車から電気自動車へ」という歴史的な転換時期に差ししかかっており、今後の主戦場はハイブリッド車や電気自動車に移ることは間違いない。それらに必要な高性能磁石を作ろうとすると、現時点では希少元素のジスプロシウムが欠かせないが、その供給は中国に完全に依存している。ジスプロシウムなどの希少元素を用いない次世代高性能磁石を作らない限り、「タネ銭」が危うくなるのは明白だ。

「私は当初から文部科学省、経済産業省、環境省、外務省などオールジャパンで、かつ既存の分野を超えて事に当たるべきだと考えていました。ですから、元素戦略は化学会

メンバーを中心とした箱根会議からスタートしましたが、鉄・磁石などの金属系学会や物理系の学会にも行きました。液晶や半導体の専門家とも意見交換し、もちろん各省庁も歩き回ってみなさんに主体的にかかわってもらえるよう話を続けてきました。いま、その通りに展開していることがうれしいです」

ナノテクによる驚きの「魔術」

どのようにして希少元素の機能を別の元素で置き換えようというのか。玉尾さんはいろいろな方法がある中の一例として、北川宏教授(京都大学大学院理学研究科)の「元素間融合」という「魔術」が面白いと言う。

「原子番号45のロジウムと47の銀は本来は混ざりませんが、ナノレベルで混ぜる技術を開発したところ、間に位置する46のパラジウムの機能を持った新しい『元素間融合物質』ができたのです。実は化合物半導体の分野では、これまでもこのような方法をとっていました。ガリウムとヒ素(いずれも典型元素)を混ぜてガリウム・ヒ素を作っているのですから、考え方は同じです。『典型元素ではなく、遷移元素(3族から11族の元素)で』とはこれまで誰も試みたことがありませんでした」

直感的に理解しやすい話ではあるが、そんなに都合よく「欲しい機能、狙った機能」を引き出せるものだろうか。玉尾さんは明快に答える。

「できると思います。例えば、銀とロジウムの混合割合は、この研究の手法を使えばナノレベルで自在に変えることができます。すると、この比率で混ぜるとパラジウムのXの機能が、この比率だとパラジウムのYの機能が、この比率だとZの機能が出る…とわかれば、狙った機能を引き出すための設計ができます。元素レベルで物質の特性や機能を理解して設計していくことこそ、元素戦略の狙いなのです。これまでどのような元素でも出せなかった全く新しい機能だって、生み出せるようになると思っています」

元素間の融合のために研究者間融合を

CRESTでは元素戦略を推進するために、磁石、金属酸化物、炭素、軽元素化合物、鉄触媒反応開発、そして元素間融合といった幅広い手法や対象物を見据えたチームを形成している。そして、それぞれのチーム内には「理論、創成、解析」という異なるアプローチの専門家を配置した。玉尾さんの狙いは明確だ。

「今回の研究では、ナノレベルでものを創り上げる技術(創成)、そこでどうなってい

希少元素の代替は、現実的な方法から革新的な原理の探究まで、戦略的に進めることが大事です。

中山 智弘 なかやま・ともひろ

文部科学省 元素戦略プロジェクト プログラムオフィサー、JST研究開発戦略センター エキスパート

1992年千葉大学工学部卒業。97年千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。博士(工学)。民間企業を経て2002年JST入社、同研究開発戦略センターフェローなどを経て09年から現職。



■元素周期表

1族	2族	3族	4族	5族	6族	7族	8族	9族	10族	11族	12族	13族	14族	15族	16族	17族	18族
H 1 水素	He 2 ヘリウム															Ne 10 ネオン	
Li 3 リチウム	Be 4 ベリリウム	=金属元素														Ar 18 アルゴン	
Na 11 ナトリウム	Mg 12 マグネシウム	=希少元素														Kr 36 クリプトン	
K 19 カリウム	Ca 20 カルシウム	Sc 21 スカンジウム	Ti 22 チタン	V 23 バナジウム	Cr 24 クロム	Mn 25 マンガン	Fe 26 鉄	Co 27 コバルト	Ni 28 ニッケル	Cu 29 銅	Zn 30 亜鉛	Ga 31 ガリウム	Ge 32 ゲルマニウム	As 33 ヒ素	Se 34 セレン	Br 35 臭素	Kr 36 クリプトン
Rb 37 ルビウム	Sr 38 ストロンチウム	Y 39 イットリウム	Zr 40 ジルコニウム	Nb 41 ニオブ	Mo 42 モリブデン	Tc 43 テクネチウム	Ru 44 ルテチウム	Rh 45 ロジウム	Pd 46 パラジウム	Ag 47 銀	Cd 48 カドミウム	In 49 インジウム	Sn 50 スズ	Sb 51 アンチモン	Te 52 テルル	I 53 ヨウ素	Xe 54 キセノン
Cs 55 セシウム	Ba 56 バリウム	La 57 ランタノイド ランタン	Hf 72 ハフニウム	Ta 73 タンタル	W 74 タングステン	Re 75 レニウム	Os 76 オスmium	Ir 77 イリジウム	Pt 78 白金	Au 79 金	Hg 80 水銀	Tl 81 タリウム	Pb 82 鉛	Bi 83 ビスマス	Po 84 ポロニウム	At 85 アスタチン	Rn 86 ラドン
Fr 87 フランシウム	Ra 88 ラジウム	Ac 89 アクチノイド アクチニウム	Rf 104 ラザホージウム	Db 105 ドブニウム	Sg 106 シーボーギウム	Bh 107 ボヘリウム	Hs 108 ハッシウム	Mt 109 マイトネリウム	Ds 110 ダームスタチウム	Rg 111 レントゲニウム	Cn 112 コペルニシウム	Uut 113 ウーテニウム					
		La 57 ランタノイド ランタン	Ce 58 セリウム	Pr 59 プラセオジウム	Nd 60 ネオジウム	Pm 61 プロメチウム	Sm 62 サマリウム	Eu 63 ユウロピウム	Gd 64 ガドリウム	Tb 65 テルビウム	Dy 66 ジスプロシウム	Ho 67 ホルミウム	Er 68 エルビウム	Tm 69 ツリウム	Yb 70 イットルビウム	Lu 71 ルテチウム	
		Ac 89 アクチノイド アクチニウム	Th 90 トリウム	Pa 91 プロアクチニウム	U 92 ウラン	Np 93 ネプツニウム	Pu 94 プルトニウム	Am 95 アメリシウム	Cm 96 キュリウム	Bk 97 バークリウム	Cf 98 カリホリウム	Es 99 アインスタニウム	Fm 100 フェルミウム	Md 101 メンデレヴィウム	No 102 ノーベリウム	Lr 103 ローレンシウム	

元素間融合
ナノレベルでRhとAgを混ぜるとPdの機能が出る。

るかをナノレベルで見る技術(解析)、なぜそうになっているのかをシミュレーションも含めて考える(理論) ことが必要です。一人の研究者では無理がありますので、それぞれの専門家を各チームに配置し、専門家を融合させて研究を進めています。

更に、CREST内のほかの研究チームを訪問したり、さきがけとの合同ミーティングで意見を戦わせています。さきがけは30代~40代前半の元気な研究者が多いのでCRESTチームも刺激を受けます。もちろん、他省のプロジェクトとも連携しています

この元素戦略は日本社会にどのような貢献をもたらすのか。

「わが国としての得意分野を獲得することで産業競争力が大幅にアップします。長期的には、科学技術によって希少元素の問題が解決されることでしょう」と中山氏は未来を見通している。

「元素戦略だから...ということではなく、国家的な戦略として取り組むことで、サイエンス全体がレベルアップするでしょう。『ナノレベルで元素を配置する技術、見る技術』が、ニュートンの時代とは全然違いますから、『現代版・錬金術』はありえます」と、玉尾さんも自信をのぞかせる。

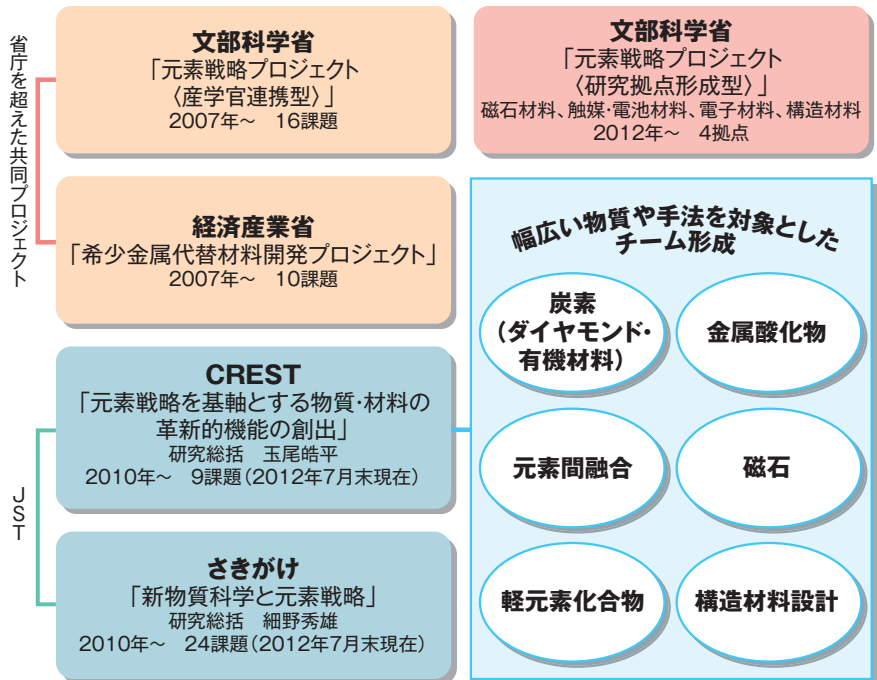
ニュートンが果たせなかった夢の扉を、いま元素戦略チームがオールジャパンで開こうとしている。

【用語解説】

※1 希少元素

いろいろな理由で供給が不足する可能性のある元素の総称。レアメタルとも呼ばれる希少金属のほかにレアアースという言葉もある。レアアースとは希土類元素のことを指し、周期表のランタノイドに属する15元素とスカンジウム、イットリウムを合わせた17元素をいう。資源の偏在や分離精製が難しいためレアメタルの一種とされる。本稿ではすべて「希少元素」という言葉で統一した。

■オールジャパンで取り組む「元素戦略」



ニュートンの錬金術の頃とは、理論、創成、解析の総合力が違うのです。

玉尾 皓平 たまお・こうへい

理化学研究所 基幹研究所所長

1965年、京都大学工学部合成化学科卒業。70年、京都大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。京都大学化学研究所教授、所長、理化学研究所フロンティア研究システム長などを経て現職。2010年からCREST研究総括。



Part.2 元素の特性を理解し、産業を

希少元素として常に話題になるのがジスプロシウム (Dy) だ。ハイブリッド車、電気自動車のモーターには、Dyを添加した永久磁石が使われている。今後、「ガソリン車→電気自動車」へと移り変わる自動車業界にとっては、モーターに使われる磁石の性能が自動車の性能を左右するといつてよいだろう。

しかし、その大切なDyは、中国に偏在しており、ほぼ100%を中国に依存している。近年、中国は環境破壊を理由に輸出規制の強化を進めている。そこで、「Dyを使わないで強力な磁石を作れないか」という発想で研究を進めているのが、CREST元素戦略グループの一人、物質・材料研究機構 宝野和博フェローだ。



宝野 和博 ほうの・かずひろ
 物質・材料研究機構フェロー、磁性材料ユニット長
 東北大学工学部卒業、同大学院工学研究科、ペンシルベニア州立大学大学院材料科学専攻Ph.D.、科学技術庁金属材料技術研究所室長などを経て、現職。筑波大学大学院数理物質科学研究科教授を兼任。専門は磁性材料、スピントロニクス材料など。

ネオジム磁石はコバルト代替のために生まれた

1966年に初めて「サマリウムコバルト」という希土類元素を使う磁石ができた。コバルトを大量に使うこの磁石はその後、改良が重ねられ使われてきたが、70年代後半のアフリカでの政情不安により、原料のコバルト価格が急騰した。そのため、「コバルトを使わない磁石を作れないか」と考え、82年、当時民間企業の研究者だった佐川真人さんによって発明されたのが、Nd (ネオジム)、Fe (鉄)、B (ホウ素) を使った「ネオジム磁石」だ。

磁石としての能力は「最大エネルギー積」つまり、「小さな体積でどれだけ大きな磁界を出せるか」ということで決まる。ネオジム磁石は最大エネルギー積が高いので、小さな体積でも大きな磁界を発生でき、モーターや発電機の小型化にもつながるものだ。

ネオジム磁石の弱点克服を5年以内に

強力なネオジム磁石にも大きな弱点がある。高温環境に弱いことだ。ネオジム磁石の保磁力 (外部磁場に対する磁化の安定性) は室温で10kOe (キロエルステッド) 程度だが、温度を上げると保磁力は下がっていく。ハイブリッド車や風力発電のように、駆動モーターの動作によって200℃の高温となる環境で使うと、大幅に減磁し永久磁石として

の機能が果たせなくなってしまう。

そこで考えられたのがNdの一部をDyに置換した (Nd,Dy) -Fe-B系の磁石だ。これならば200℃でも8kOeの保磁力を持つ。これが現在、Dyを含むネオジム磁石をハイブリッド車の磁石に採用している理由である。

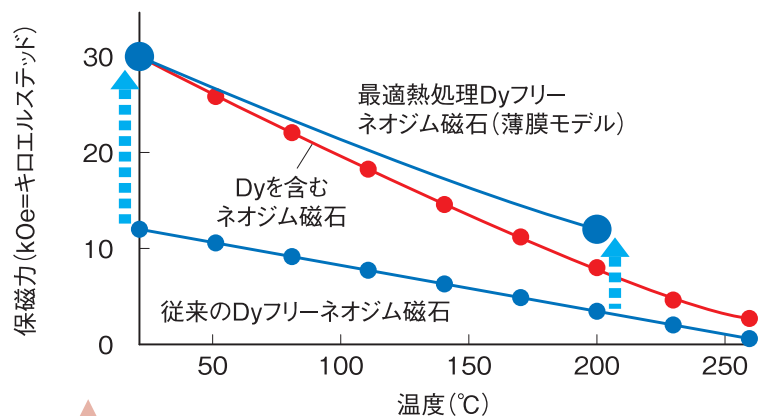
「ただ、Dyを使うと、本来のネオジム磁石に比べて性能が下がるのです。ネオジム磁石では、FeとNdのスピン (電子の自転運動) がすべて上向きのため高い磁界を得られますが、DyはFeやNdと反対向きのスピンであるため磁化を打ち消し合います。ですから、Ndの一部をDyで置換すると、確かに保磁力

は高められますが、最大エネルギー積という磁石としての性能を犠牲にすることになります。現在のハイブリッド車に使用されている磁石は、妥協の産物なのです」

もう一つの問題は、Dyの価格高騰だ。中国の輸出制限により1年間に10倍以上も価格が急騰し、1kgあたり1000ドルを超え、入手も困難になりつつある。これに対して、Ndは同じ希少元素ではあっても、Dyに比べ10倍も豊富に存在し、地域的偏在も少ない。

「Dyを使わず、200℃の高温環境でも使える強力な磁石を作ること。それも5年以内に大量生産につなげられるような技術革新を

■各種ネオジム磁石の保磁力比較



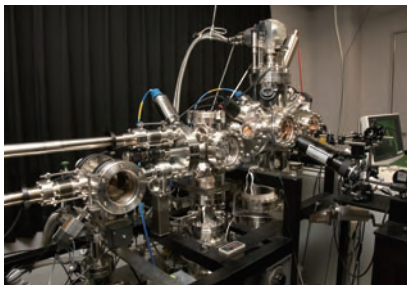
Dyを用いない最適熱処理ネオジム磁石 (薄膜モデル) は室温で約30kOeと、従来のネオジム磁石より20kOeも高い保磁力を獲得し、200℃でもDyを含むネオジム磁石をしのぐ保磁力を発揮した。



けん引する磁石を作る 宝野 和博

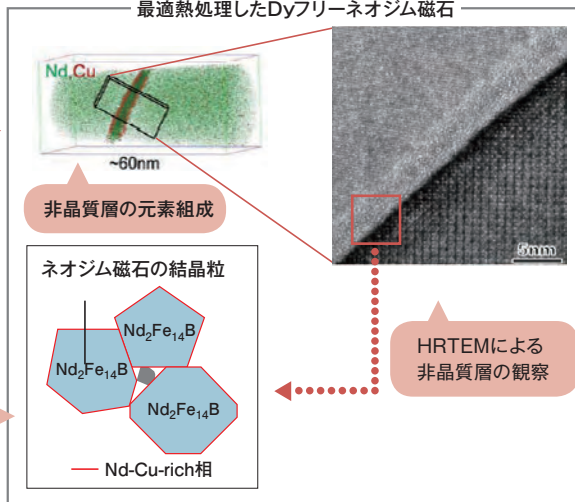
物質・材料研究機構フェロー、磁性材料ユニット長

■強力な磁石をデザインするためのマルチスケール解析



レーザー三次元アトムプローブ

3ナノメートルの非晶質層の部分は、NdとCu濃度が高い強磁性であることがわかった。これは、熱処理によりNdとCuを多く含む液相が結晶粒の間に入り込んだためだと考えられる。



高分解能透過型電子顕微鏡 (HRTEM)

起こす。それがCREST元素戦略における私のミッションです」

薄膜モデルでは解決済み

期待の膨らむ宝野さんのミッションだが、どこまで進んでいるのだろうか。

「古くから、結晶サイズを小さくしていくと保磁力が上がることは知られています。ところが、3マイクロメートルを境に保磁力が急に落ちてしまいます。この理由は、全然わかっていませんでした」

高分解能の電子顕微鏡で見ると、保磁力の低いときには結晶粒の界面には何もなかったものが、550℃で熱処理してみると、結晶粒の界面に3ナノメートルの非晶質層ができていることがわかった。三次元アトムプローブと呼ばれる界面の原子組織を定量的に解析できる方法でその部分を見ると、Nd濃度が高い層であった。

「私たちは従来、これを非磁性層だと思っていましたが、実際に元素濃度を解析し、同じ組成の薄い膜を作ってみると、強磁性の非晶質層ができたのです。他にも、Ndリッチ相の中を見ると、誰も知らなかった小さな斑点があることがわかりました。これはNdとCu(銅)の小さな析出物でした。

宝野さんは、550℃で熱することでNdとCuが溶け、液体になって結晶粒の界面に侵入し、結晶粒をNdとCuが多く含まれる相で覆ったことで磁気的交換結合を弱め、保磁力が上がったと考えた。このことから、Nd-Cuの合金を結晶粒界に沿って拡散させ、結晶粒

の界面のNd組成をコントロールする方法を確立したのだ。

問題を単純化するために「最適熱処理した薄膜モデルでどこまで保磁力が上がるか」を試したところ、従来のネオジウム磁石では室温で12kOeの保磁力しか得られないのに、薄膜モデルでは約30kOeに上がることが確認できた。また、200℃でも、12kOeを記録した(P6グラフ参照)。

完璧な解析が機能デザインを可能にする

このように目を見張る成果を上げてきた宝野さんの研究手法は、「構造と機能」という点に大きな特色があるようだ。

「レーザー方式の三次元アトムプローブは自前で作りました。私たちの研究スタイルの特徴は『マルチスケールでの解析』ができることです。マイクロ(100万分の1)メートルからナノ(10億分の1)メートル、更には原子一つひとつまで、さまざまなスケールで徹底的に磁石を解析したグループはありません。磁石全体を走査型電子顕微鏡で見ながら、機能の核となっている部分を探り、高分解能の透過型電子顕微鏡で観察し、更にその部分の元素組成をレーザー三次元アトムプローブを使って完璧に解析します。それによって、何が起きているのか正しく理解することで、新しい機能をデザインできるのです」

CRESTチーム内での連携も進んでいる。「例えば、『結晶粒の界面の非晶質は磁性

を持っているのではないかと考えたとき、理論シミュレーションの専門家佐久間昭正先生(東北大学)が『磁性を持つ可能性』『Nd濃度と磁性の関係』などを明らかにしてくれたので、私たちとしても目指すものははっきりと見えました。薄膜モデルを作るときは実績のある東北学院の嶋敏之先生に協力していただきました。

あとはどうやって産業化に必要なバルク磁石※2にするか、それが残された課題です」

世界から注目される宝野さんの研究だが、一番乗りへの自信はどののだろうか。

「Dyに頼らない磁石の開発ができれば、自動車産業の強みを国内に残すことができます。それが大事なことです。いま日本国内の金属学会の磁石セッションは活性化しています。企業関係者も多数参加し、基礎研究の成果を吸収して持ち帰ろうとする真剣さを感じます。磁石の分野で、イノベーションが起きようとしています。私たちが一番乗りできればそれは幸いです。私たちの研究をヒントに国内の企業やほかの研究グループがそれを実現してくれればよいのです」

「元素戦略」というミッションの達成が日本産業の復活を促すだけでなく、資源を国際的な争いに利用する愚をモトから絶つ契機になってほしい。そのことに貢献する研究者に声援を送りたい。

【用語解説】

※2 バルク磁石

焼結磁石のように、塊として製造される磁石のこと。