

# JST news

未来をひらく科学技術

7

July  
2019

特集

## 知の源泉 元素周期表



03 特集

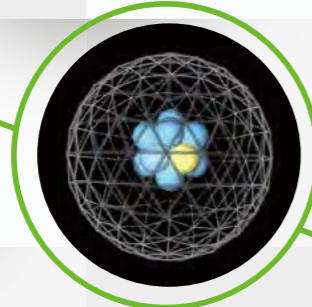
知の源泉 元素周期表



04 未知の物質を探求  
元素間融合の新しい地図



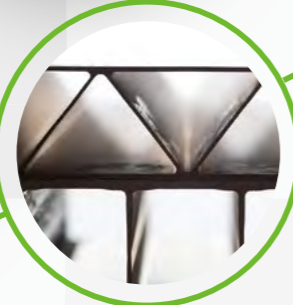
07 アトムハイブリッドで拓く  
サブナノワールド



10 保磁力の謎を明らかに  
最強の永久磁石を目指す

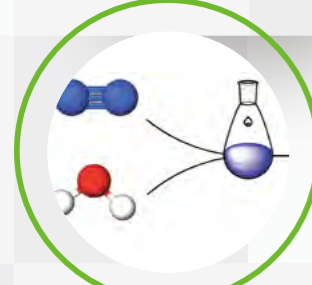


12 強くて軽い  
マグネシウム合金  
安価な元素で室温加工



14 NEWS & TOPICS

世界初、常温常圧で窒素ガスと水からアンモニアを合成  
次世代のエネルギー媒体として期待が高まる



16 さきがける科学人

数百年後の人類に貢献する

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系  
助教 平原 秀一



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標 (SDGs) の達成に積極的に貢献していきます。



編集長：安孫子満広  
科学技術振興機構 (JST) 広報課  
制作：株式会社伝創社  
印刷・製本：株式会社丸井工文社

特集

# 知の源泉 元素周期表

1	2											13	14	15	16	17	18	
1 H												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
2 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
3 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

2019年はメンデレーエフが元素の周期律を発見してから150年目にあたる。国連と国連教育科学文化機関 (ユネスコ) は「国際周期表年」を制定し、各国でこれを祝う行事が開催されている。

元素は多分野にわたる科学の共通言語で、元素を規則的に並べた周期表は科学のプラットフォームだ。周期表は科学者の知の源泉となり、化学だけに留まらず、物理学や生物学、地学や天文学など自然科学の進歩に大きく貢献している。特に物質・材料分野では、狙った機能を生み出す元素の組成を探るための羅針盤となり、多くの研究者を導いてきた。私たちの生活には一見無縁に思える周期表。だが、磁石

や半導体など便利で安全な暮らしを支える物質や材料は、元素の役割を理解し操ることで必要な機能を有効活用しようという努力の結晶なのである。

JSTは文部科学省と共に「元素戦略」を主導するなど元素研究を世界に先駆けて推進してきた。元素戦略は資源が少ない日本が持続的に発展するために、高価で希少な元素を使わずに高性能な「夢の新材料」を実現しようという試みだった。この挑戦は元素戦略のプロジェクト終了後も引き継がれ、多くの研究者が周期表を頭に描きながら、「元素の未知なる機能を引き出す」「違う元素で代替する」「機能を最大限に引き出す」「リサイクルして使う」と

いった取り組みを続けている。

実は周期表はまだ完成していない。メンデレーエフの時代に知られていたのは63種類の元素だったが、今では118種類の元素が確認されている。2016年に日本が初めて合成・発見した113番の元素が「ニホニウム」と名付けられたニュースは記憶に新しい。理論上は173番まで存在し、119番以上の元素の探求は既に始まっている。周期表には未知なる機能も眠り、新たな発見は尽きることはない。周期律に沿って元素が美しく並ぶ周期表——、21世紀はどんな形に進化していくだろうか。

中山 智弘 (研究開発戦略センター)



# 未知の物質を探求 元素間融合の新しい地図

元素Aと元素Bを混ぜて、異なる物性や機能を持つ擬元素Cを創り出す「元素間融合」。埋蔵量が少ない有用な元素や有害元素に代わる新物質に期待がかかる。現代の錬金術ともいわれる技術を編み出したのは、京都大学大学院理学研究科の北川宏教授だ。白金族のレアメタルであるパラジウム(Pd)やロジウム(Rh)の人工合成の成功を礎に、元素間融合のメカニズムを解明し、狙い通りの物質を合成するための機能設計や予測原理の確立に挑む。

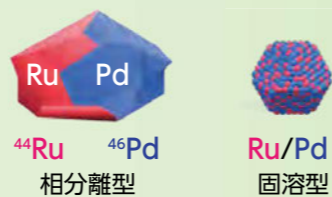
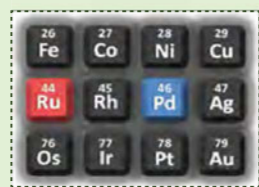
きたがわ ひろし  
**北川 宏**  
京都大学 大学院理学研究科 教授  
2015年よりACCEL研究代表者

## 混ざらないものを混ぜる 金属学の常識をくつがえす

わずかな量しか地球に存在しないレアメタルに置き換わる物質を人工的に合成し、しかも優れた性能を備えた金属を作製できる未来を拓くのが、京都大学大学院理学研究科の北川宏教授が開発した「元素間融合」だ。「発見に大事なことは、教科書や常識を信じ過ぎないこと」と語る北川さんは、金属学の教科書では「混ざらない」のが常識とされるパラジウムと白金(Pt)が、ナノスケールでは混ざるといふ現象を見逃さなかった。

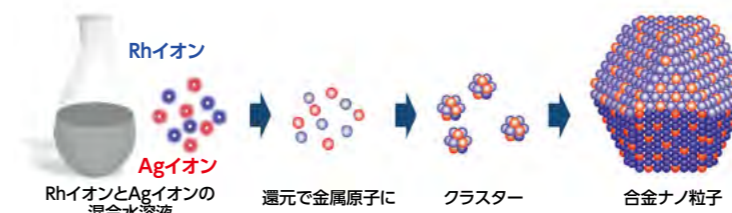
金属が「混ざる」とはどのような状態だろうか。金属を混ぜるには、異なる金属を高温で溶かすなどの方法があるが、全ての金属が混ざるわけではない。水と油のような関係にある金属元

素同士は高温で混ぜたように見えても時間が経つと分離し、原子レベルでは混ざらない。「体育館に男性と女性が50人ずついるとします」と、北川さんは原子を男女の集団に例える。「パラジウムと白金の場合、一見混ぜられていても、実は男性だけ、女性だけの集団で固まっている状態」で、「相分離」と呼ばれる。これに対して、「男女がランダムに並んで手をつないだ状態」が、金属元素が原子レベルで混ざった「固溶体」である(図1)。



■図1 2種類以上の金属を混ぜる合金は「相分離型」と「固溶型」に大きく分けられる。相分離型は2つの相に分かれてドメイン構造をとる。固溶型は原子レベルでランダムかつ均一に混ざり合っている。

発見はまったくの偶然だった。10年以上前、水素吸蔵材料や燃料電池用触媒の性能向上のため、パラジウムと白金をナノ粒子にして水素吸蔵性能(水素を吸着、貯蔵、反応させる能力)を確認する実験をしていた。水素の吸蔵と放出を繰り返すうちに、吸蔵量が急に上がった。パラジウムナノ粒子の周囲を白金ナノ層が覆うコア・シェル構造だったのが、2種類の金属ナノ粒子が均一に混ざった固溶体に変化していたのだ。北川さんは、固溶状態へと



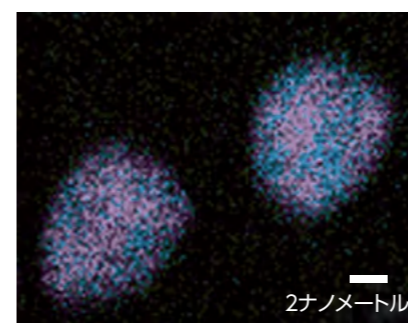
■図2 ロジウムと銀の合金ナノ粒子の合成。水溶液中で混合した金属イオンを同時還元して、異なる金属の集合体を形成する。

導く鍵はナノ構造に違いがないと仮説を立て、元素間融合の研究を始めた。

## レアメタルを人工合成 天然を超える触媒活性

最初に挑んだのは、周期表でパラジウムの左右にあるロジウムと銀(Ag)を混ぜて、パラジウムと同じ性質を示す物質を合成することだった。しかしロジウムと銀は「混ざらない」金属である。北川さんの手法は、金属塩を水溶液状態にして混合水溶液を作り、同時に還元することにより2つが混合したナノサイズの合金粒子として取り出すというもの(図2)。最適な条件を見つければ、合金ナノ粒子として取り出すのに3年近くかかった。「結果が出るまで諦めないことが肝心」と北川さん。「混ぜただけだけでなく、人工パラジウムはロジウムや銀にはなく天然パラジウムが持つ水素吸蔵性能を持っていました」。

埋蔵量が少なく高価なレアメタルであるパラジウムの人工合成は新聞の1面でも報道された。しかし実用化は困難だった。人工パラジウムを合成するために、より高価なロジウムを使うからだ。そこでロジウム自体を安く合成することを次の目標とした。周期表上

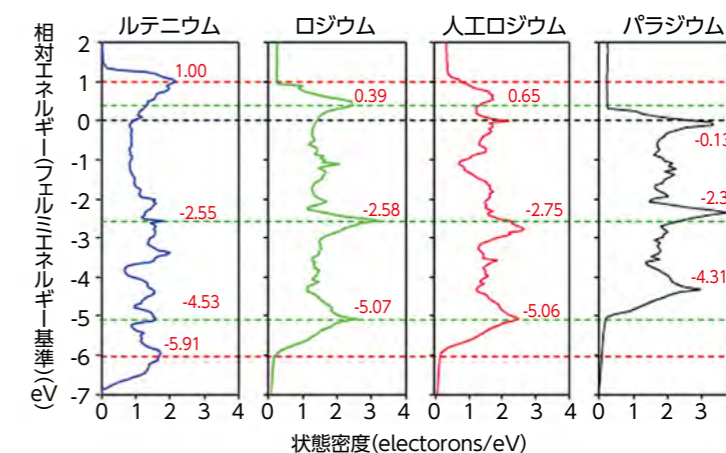


■図3 合成された人工ロジウムの電子顕微鏡による元素マッピング。紫はルテニウム、青はパラジウムを示し、1つのナノ粒子中にルテニウムとパラジウムが原子レベルで完全に混ざっていることがわかる。

でロジウムの左右にあるルテニウム(Ru)とパラジウムは同じ白金族だが、ロジウムよりは安価で入手しやすい。ロジウムは大気汚染の原因物質である窒素酸化物を無毒化できる唯一の触媒で、一酸化炭素を無毒化する能力にも優れていることから、産業的なインパクトも大きい。2年半に及び試行錯誤の末に合成された人工ロジウムは、ルテニウムとパラジウムの割合を調整することで天然ロジウムの10分の1程度のコストを達成した(図3)。それだけではなく、触媒としての働きを調べると、有害な窒素酸化物や一酸化炭素をロジウムよりも低温で無毒化できる優れた活性が明らかになった。

## 物質の電子状態を解析 ロジウムと類似の結果

単純なアイデアながら誰も思いつかなかった元素間融合について、「白金とパラジウムは絶対に混ざらないと常識にとらわれていたら、ちょっとした疑問も無視してしまっていたと思います。無知の知だからこそ見つけられました」と、北



■図4 金属材料内の電子のエネルギー分布を示す状態密度の理論計算結果。人工ロジウムとロジウムは、エネルギー状態を示すピークの位置と、幅や高さ(存在する割合)が良く似ていて、ルテニウムとパラジウムとは形状がまったく異なる。理論的にも人工ロジウムとロジウムの電子的特性が似ていることが明らかとなった。

川さんは振り返る。

金属学の専門家ではなく、化学者として錯体やナノ粒子を研究してきた北川さんは、常に物質の電子状態を念頭に置いて目の前の現象を考えてきた。いわば「土地勘」があったことが、化学反応によって異なる元素を混ぜてナノ粒子化する原理の発見をもたらし、数々の人工擬元素の合成を実現した秘訣だ。

金属や半導体では、電子の振る舞いが物質の物理的・化学的性質、具体的には「電気を通しやすい」「光を出す」「化学反応を起こしやすい」などの性質となって表れる。各エネルギーにおける電子軌道の数は一様な分布ではなく、エネルギーの高い状態から低い状態まで物質固有の分布がある。エネルギー準位の密度分布が物質の性質を特徴付けるという。これを「状態密度」と呼ぶ。パラジウムとルテニウムのナノ合金から成る人工ロジウムの状態密度を解析したところ、ロジウムと非常に良く似ていることがわかった。パラジウムとルテニウムが原子レベルで固溶したことで、ロジウムと同様の電子状態が人工的に作り出されたのである(図4)。

この発見によって、目的とする元素の性質や特徴を別の元素を原子レベルで混ぜることで実現できる可能性が、実験だけでなく理論面からも示唆された。「将来、望んだ性質や機能を持つ合金ナノ粒子を創るためには、どの元素をどんな割合で混ぜればよいのか、理論的に予測できるようにしたい」と夢を描く。



■図5 パラジウムとルテニウムの合金ナノ粒子に、第3の元素を追加すれば、新たな性能が加わり用途開発につながる可能性を秘める。

元素間融合で創られる新物質の性質の予測原理を確立して設計の確度を高め、狙い通りの物質を合成できることを実証したいと考えている。

### 理論予測や構造設計 量産化技術の確立へ

ACCELの研究プロジェクトでは、北川さんを中心に合金ナノ粒子を合成し、そのナノ粒子の中で原子がどのように分布しているかを観測したり、触媒活性などの性質を測定したり、詳細に分析している。「得られた物質がまったく未知の構造のものなのか、教科書に書かれていない答えが真実なのかを知るためには、最先端の測定技術を使って確かめていくことが重要です」と北川さんは強調する。

元素間融合の可能性を確信できたのも最先端測定技術のおかげだった。「白金とパラジウムの固溶体を発見した時、最初は信じられませんでした。しかし放射光を用いた大型研究施設SPRING-8や原子分解能を持つ最先端の電子顕微鏡、世界最高レベルの大強度陽子加速器施設のJ-PARCで観察した結果、間違いないことが証明されました」。これらの最先端施設や装置は、原子・分子レベルで物質の形や性質を世界最高の精度で観察できる。

また、専門が異なる最先端のグループが研究結果を持ち寄り議論を戦わせていることもプロジェクトの強みだ。例えば、物性理論と理論化学という異

なるアプローチで、元素間融合の理論面での研究を進めることで理論予測の確度を高め、また合成や状態解析、触媒機能解析のチームが垣根を越えた議論を行っている。原子レベル、ナノスケールでの構造を解析し、新しい機能がなぜ発現されるのかという原理を明らかにし、新しい材料を体系的に創出する仕組みを構築していく狙いだ。

触媒分野が専門で、企業の最先端の現場で活躍している岡部晃博プログラムマネージャーの存在も大きい。社会のニーズや実用化という視点から研究の方向性を示すのがプログラムマネージャーの役割だ。「化学工業からヘルスケアまで、さまざまな分野で新材料として活用できる可能性があります。岡部さんの社会のニーズに関する豊富な知識は、自分たちの発想にはなかった使い方を提案してくれます」。

合成された合金ナノ粒子の量産化を見据え、金属メーカーもプロジェクトに加わり量産化技術の検討を進め、サンプルを実際に企業に提供して評価を求めるなど、実用化への道筋を探っている。「自分の研究が社会とどうつながっているかを意識するだけで基礎研究が進みます」と北川さん。「知的好奇心を追求しつつ、社会に貢献していきたいですね」。

### 活性や耐久性を向上 元素3つ以上の融合に挑戦

北川さんの研究室ではルテニウム

とパラジウム以外の組み合わせでも新たな合金ナノ粒子を生み出している。「人工ロジウムなど2元素系のナノ粒子を実現できたので、3元素系やもっと元素を増やしたナノ粒子の実現に向けた研究を進めています」。ルテニウムとパラジウムに、さらに第3の元素を加えることで、触媒活性や耐久性の向上を実現しようとしている(図5)。

118種類の元素のうち金属元素は50ほどで、2種類の元素の組み合わせは1250種類近くになる計算だ。「混ざらない組み合わせの方が多く、実際に合金として使用されている組み合わせは、そのうちの3割程度にしか過ぎません。混ざらないというのは経験的に知られていたもので、混ざらない理由については完全には研究されてきませんでした」。

混ざらない組み合わせの山にはきっと宝が眠っていると、北川さんは確信している。元素間融合によって、これまで混ざらないと考えられていた元素の組み合わせでも、自在に混ぜられる可能性が広がった。狙った材料や物質を合成できる組み合わせを探るため、北川さんは118の元素の膨大な組み合わせに果敢に挑み、望ましい性質や物性を引き出すための新しい地図を描いていく。



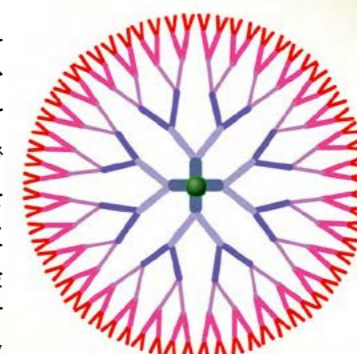
Q. 挑戦したい  
元素

### A. テクネチウム

モリブデンとルテニウムを元素間融合して、人工テクネチウムを合成してみたいですね。テクネチウムは1947年に命名された放射性元素です。自然界には存在しないという不思議な元素なので、合成できてもテクネチウムと同じ性質なのかは調べようがありませんが、存在しないものを創るからこそ面白いですね。

# アトムハイブリッドで拓く サブナノワールド

ナノテクノロジーの発展により、さまざまなナノ材料が開発され、触媒や電子機器、電池など幅広い分野で活用されている。その中で、ナノの領域よりもさらに小さいサブナノ(1ナノメートル以下)の領域では、元素が従来知られている性質とは異なる特性を示すことから、新材料として注目されている。東京工業大学科学技術創成研究院の山元公寿教授は、金属原子を精密に混ぜ合わせ新たな物質を作り出す「アトムハイブリッド」法を用いて、革新的なサブナノ研究に取り組んでいる。



やまもと きみひさ  
山元 公寿  
東京工業大学 科学技術創成研究院  
教授  
2015年よりERATO研究総括



### 原子1個で特性が大きく変化 周期表の法則を超える超原子

物質を原子や分子のサイズ(ナノメートルサイズ)まで小さくすると、通常のサイズでは現れない特性を示すようになる。例えば金(Au)は通常は不活性だが、ナノメートルサイズにすると、触媒として機能する。これは、物質の体積に対する表面積の比(比表面積)が極端に増大するためだ。ナノテクノロジーと呼ばれる分野は、このようなナノスケールでの特性を積極的に利活用しようとしている。

粒子状のナノ材料である「ナノ粒子」の直径は2~100ナノメートル程度で、数百~数万個の原子から成る。それに対し、ナノ粒子よりもさらに小さい直径1ナノメートル前後で、含まれる原子の数が2~30個程度しかない「サブナノ粒子」の特性を研究しているのが、東京

工業大学科学技術創成研究院の山元公寿教授だ(図1)。

ナノ粒子の場合、比表面積に比例して活性などの特性が向上していく。ところがサブナノ粒子のように原子サイズに近い世界では、量子効果と呼ばれる現象が顕著になるため、たった1個の原子の数の違いで特性が大きく変化する。「バルク(固体、塊の状態)やナノの世界の常識を覆すことが起きるのがサブナノの世界。だからサブナノワールドは面白いのです」と山元さんは研究の魅力語る。

このようなサブナノ粒子の性質は、約10年前に報告された論文をきっかけに注目を集めることになった。13個のアルミニウム原子(Al<sub>13</sub>)から成るサブナノ粒子がハロゲンの性質を示すことを理論的に示した研究だった。ハロゲンとは、フッ素(F)や塩素(Cl)などの元素周期表の第17族に属する元素の総称で、

電子を1個得て1価の陰イオンになりやすく、アルカリ金属やアルカリ土類金属の陽イオンと典型的な塩をつくる元素だ。

「サブナノ粒子が異なる元素の性質を示すという驚きの報告でした。元素の化学的な性質が周期律にのっとり、全て決まっていると考えられていたのに対し、新たな可能性を示唆したのです」と山元さん。この発表を機に、元来の原子を超えるという意味で、「超原子」という言葉も生まれた。

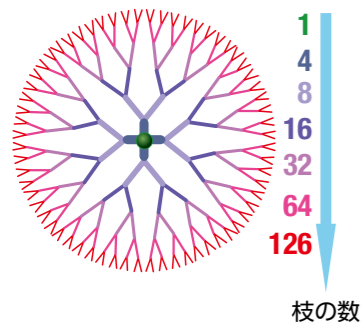
山元さんは、理論上でしか存在しなかった超原子を実際に合成し、その物性を調べたいと考えた。そこで挑戦したのが、あらゆる原子同士を自由に組み合わせ、新たなサブナノ粒子を作り出す「アトムハイブリッド法」の確立だ。

### 高分子の器デンドリマーに 金属イオンを捉えて酸化還元

新たな材料として注目を集めた超原子、サブナノ粒子は盛んに研究されたものの、研究例はなかなか増えなかった。



■図1 山元さんが研究対象としているサブナノ粒子はナノ粒子と原子の中間に位置する。



■図2 樹状で球状にした有機化合物の「デンドリマー」

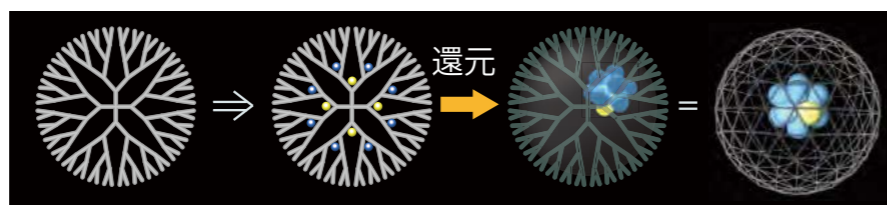
原子1つの増減で性質が変わるサブナノ粒子の合成は、原子数の精密な制御が必要だ。さらにあまりに小さく不安定なため、合成できたとしてもその状態を維持し、材料化するのが非常に難しかった。そんな中、研究に飛び込んだきっかけを「私が長年研究してきた高分子材料が突破口になるのではないかと考えたのです」と山元さんは振り返る。

その高分子材料とは、「デンドリマー」と呼ばれる有機化合物だ。一般的な高分子材料は、非常に長い鎖状をしている。一方、デンドリマーは、コアと呼ばれる中心分子から幾重にも枝分かれした構造が放射状に伸びる樹状の高分子になっている(図2)。

「2017年には、デンドリマーを使って $Al_{13}$ の合成に成功しました。この論文は科学雑誌『ネイチャー』が国際周期表年を祝って制作したインタラクティブ周期表でも取り上げられています」。 $Al_{13}$ は最も有名な超原子で、物質として扱うために溶液中での合成が待たれていた。山元さんがこれを達成したことにより、超原子の応用に向けた新たな一歩が踏み出されたのだ。

山元さんが開発したアトムハイブリッド法では、金属イオンと非常によく結合する窒素(N)などをもつデンドリマーを用いる。この窒素原子に金属イオンを結合させて還元すると、デンドリマーの内部で金属原子同士が凝集し、金属のサブナノ粒子が出来上がる(図3)。デンドリマーを反応の場となる分子の器として使用し、結合部位の種類や数を変えれば、集める順番や金属イオンの種類と数も制御できる。

都合の良いことに、デンドリマーは外



■図3 デンドリマーに金属イオンを結合させ、還元すると金属イオンが凝集しサブナノ粒子が形成される。

側に向かって枝分かれし、樹状の置換基が高密度化していく。金属イオン1個であれば出入り可能だが、複数個が集まりサブナノ粒子になると、外に出にくくなる。通常、ごく微小なサブナノ粒子は非常に不安定で、あっという間に周囲の原子や粒子と凝集してしまう。しかし、デンドリマーによって周囲と隔離されることで、サブナノ粒子はその状態を保持することができる(図4)。

### 原子数や組成も自在に制御 6種類の合金化にも成功

この方法でサブナノ粒子の原子数を制御するには、デンドリマーに結合する金属イオン数を全てのデンドリマーで均等にすることが求められる。山元さんはデンドリマーの構造を工夫した。中心分子のエネルギーが最も低く、外側に向かってエネルギーが高くなるようにエネルギーの勾配を作ったのだ。

水が高いところから低いところへ流れ込むように、デンドリマーの中に入った金属イオンは、内側から順番に結合していく。別のデンドリマーでさらに内側の結合部位が空いていれば、金属イオンはそちらに移動する。このようにして、最終的に全てのデンドリマーに均一に金属イオンが結合し、デンドリマーごとの金属イオン数のばらつきが少なくなるという。

例えば、6個の原子で構成される金属のサブナノ粒子をつくる場合には、デンドリマーと金属イオンを量比が1:6となるように調整すれば、望む個数のイオンがデンドリマーに結合する。あとは金属イオンを還元すれば、望む原子数のサ

ブナノ粒子が完成する仕組みだ。

山元さんはこの方法を発展させ、18年には、これまで不可能だった5種類および6種類の金属を、さまざまな比率(組成)や組み合わせで合金化した「多元合金サブナノ粒子」の合成に、世界で初めて成功した(図5)。

多種類の金属を合金化する場合、それぞれの比率の制御が必要だ。組成比の制御には、窒素などデンドリマーの結合部位と、それぞれの金属イオンとの結合の強弱が関係している。山元さんが合成したガリウム(Ga)、インジウム(In)、金(Au)、ビスマス(Bi)、スズ(Sn)が1:1:3:2:6の割合で混ざったサブナノ粒子では、仮にスズが先にデンドリマーの中に入り、内側の窒素と結合していたとしても、より強く窒素と結合するガリウムが後から入ってくると、スズを押し除けるようにガリウムが結合する。内側から順番に、窒素との結合性がより強い金属イオンが入っていくので、混ぜ合わせる金属イオンの量さえ計算しておけば、デンドリマーの中の金属イオンの比率を制御できる。

この方法により、原子の数と組成比があらかじめ決まったサブナノ粒子を自在



■図4 デンドリマーがサブナノ粒子を外部から隔てるカプセルのような役割を果たすため、サブナノ粒子同士、あるいは周囲の物質とくっついてしまうことなく存在できる。

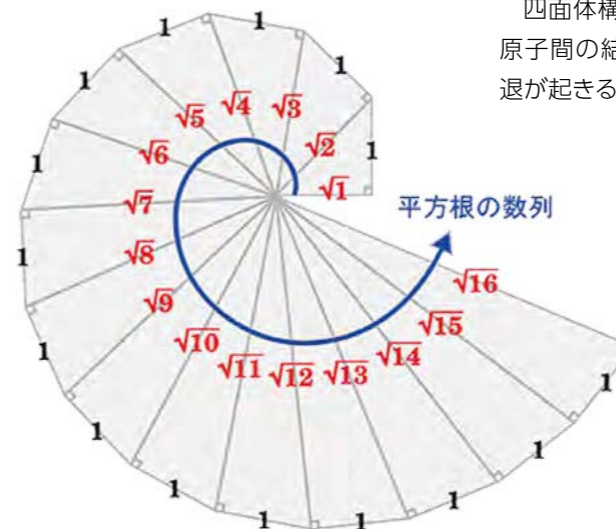
に作れるようになり、サブナノ粒子の特性や機能が少しずつ明らかになってきた。「これまでに知られていなかった性質や機能が見いだされていて、今後、画期的な高機能材料の開発や新物質の発見につながるだろうという期待が高まっています」と山元さんは目を輝かせる。

現在、元素記号がついている元素は全部で118種類。そこから放射性元素や希ガス、毒性の強い元素を除いた70種類が、山元さんが実用可能と考えている元素だ。ナノ粒子と違ってサブナノ粒子では、原子の数が少なすぎて結晶構造を取ることができない。だからこそ、金属に限らずどの種類の元素同士であっても混合させることができるという。

「ERATOが始まった2015年当初、デンドリマーの器に集めることができる元素の種類は10種類でしたが、現在では50種類以上に増えました。あと少しで実用的な元素は完了します。デンドリマーも30種類以上開発し、より自在で精密な合成が可能になっています」と胸を張る。山元さんの部屋には元素周期表が貼られ、精密集積に成功した元素には印が付けられている。周期表は半分以上に印が付いていて、目標の70種類制覇は目前だ。

### 新物質が新時代をつくる 広がる周期表の可能性

デンドリマーやサブナノ粒子群を次々と作り出し、機能を解析する一方で、理論計算やコンピューターシミュレーションによる新材料の提案や性質



■図6 各三角形の底辺の長さが平方根の数列になる「テオドロスのらせん」。超縮退はこの法則に従って起きる。

の解明にも取り組んでいる。それにより明らかになったのが、従来の常識を覆すサブナノ粒子の性質だった。球対称の原子より高い対称性をもつ物質の理論的発見である。

原子の中心にある原子核が対称に配置されていると、複数の電子軌道が同じエネルギーを持つ場合があり、このエネルギー状態の重なりを「縮退」と呼ぶ。対称性の高い物質ほど縮退は起こりやすいが、縮退の度合いには限界があり、これまで複数の原子(原子核)を持つ物質では、正二十面体構造での5重の縮退が最大とされていた。

ところが、シミュレーションの結果、マグネシウム(Mg)、亜鉛(Zn)、カドミウム(Cd)など特定の金属元素から成る正四面体構造のサブナノ粒子では、なんと6重の縮退や10重の縮退といった、超縮退を起こすことが判明したのだ。既存の物質ではあり得ないほどエネルギー状態が重なる超縮退物質は、これまでにない磁性材料や電子材料の開発につながる可能性がある。さらにもう1つ面白い発見があった。

四面体構造の原子を増やしていくと原子間の結合は強まっていくが、超縮退が起きる時の結合の強さを計算する

と、その値は $\sqrt{1}$ 、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ 、 $\sqrt{4}$ といった具合に平方根の数列になっていた。「これは、2500年前の古代ギリシャ時代に発見された『テオドロスのらせん』と呼ばれる数列です。なぜ超縮退がこの法則に従うのかはまだ未解明ですが、物質化学と数学の新たな出会いで、新たな研究分野につながるのではないかと考えています」と山元さん(図6)。

これまでになかったサブナノ物質の発見は、新材料の開発につながるだけでなく、新たな法則性を見出すことにもつながりうる。「例えば、環状のサブナノ粒子を作りたい場合はどの金属を使えば良いかといった類推も可能になるかもしれません」と山元さんは期待する。周期表が生まれて150年が経った今、新たな考え方に基づく新周期表の提案も予定されている。

「新しい物質が、新しい時代の幕を開ける。これが私の研究哲学です。今後もサブナノワールドの研究を通して、これまでの常識を覆すような特性を持つ物質の発見を目指していきます」と山元さんは力強く語った。



### A. バナジウム

全て好きですが、1つと言われればバナジウム。硫黄ポリマーの合成に関わるバナジウム触媒を発見したのが、精密な高分子錯体の研究を始めるきっかけとなりました。

# 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。

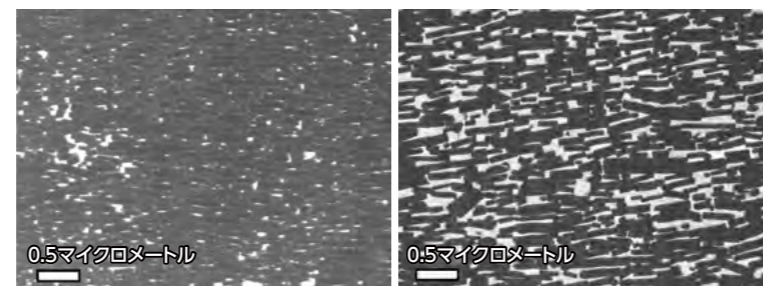
## 高まる性能向上への期待 希少元素の使用量を削減

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

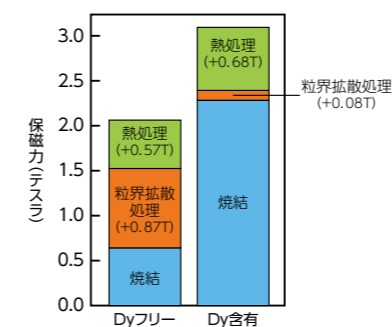
磁石を徹底的に調べた宝野さんは「この10年でネオジム磁石の微細構造をマイクロ、ナノ、原子レベルで精緻に解析できるようになってきました。私たちはさまざまな手法を統合したマルチスケール解析で、保磁力の仕組みを明らかにしました」と胸を張る。

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

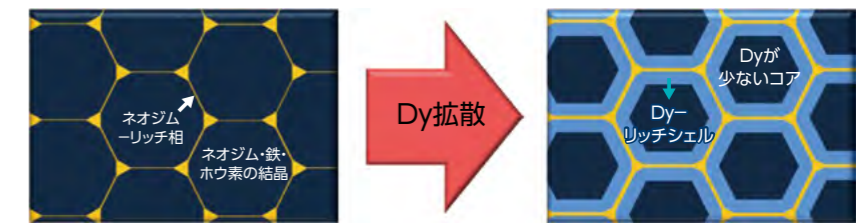
界にネオジムが多く含まれるナノメートルの領域(ネオジム-リッチ相)があり、これが高い保磁力の理由であることを突き止めた。さらに原子レベルの解析により、経験的に添加されていた銅(Cu)がその形成に重要な役割を果たすことを解明した。この発見を基に提唱したのが、解析結果やシミュレーションを駆使して粒界を最適化し、磁石の性能を上げる粒界エンジニアリングである。

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。

# 強くて軽い マグネシウム合金 安価な元素で室温加工

自動車や鉄道を軽量化すれば燃費が向上し、二酸化炭素の排出を大幅に削減できる。次世代の軽量構造材料として注目される元素がマグネシウム(Mg)だ。長岡技術科学大学工学研究院の鎌土重晴教授は、既存の鉄鋼材料やアルミニウム(Al)合金に匹敵し、室温での強度と加工性を併せ持つ画期的なマグネシウム合金を開発している。

かまど しげはる  
**鎌土 重晴**  
長岡技術科学大学 理事・副学長  
工学研究院 教授  
2012年よりALCA研究開発代表者

## アルミニウム合金に代わる 次世代材料マグネシウム

世界に誇る高速鉄道である新幹線。長岡技術科学大学工学研究院の鎌土重晴教授が右手に持つのは、新幹線の構造材料だ(写真上)。従来のアルミニウム合金であれば2.5キログラムの重さがある構造材料を鎌土さんが軽々と持ち上げられるのは、マグネシウム合金でできているからだ。比重がアルミニウムの3分の2と、実用金属の中で最も軽い。

強度と軽さを兼ね備えるアルミニウム合金は、新幹線をはじめとした鉄道の他、自動車や航空機など輸送機器の構造材料として多用されている。さらに軽いマグネシウム合金が注目されているが、パソコンやカメラのフレームなどへ

の利用は拡大しているものの、いまだ輸送機器への応用は進んでいなかった。室温での強度や加工性の面で課題が残り、板材や棒材の作製が難しいのが理由だ。そこで鎌土さんはアルミニウム合金のように加工しやすい熱処理型展伸マグネシウム合金の開発に挑んだ。

## 強度の鍵はG.P.ゾーン 高速押出に成功

従来のマグネシウム合金は、主にダイカストと呼ばれる金型鑄造法で作られている。高温で溶かした合金を金型に入れ、冷やし固める方法だが、これでは十分な強度が得られない。

強度を高める加工方法には、押出成形と圧延の2通りがある。ところが既存のマグネシウム合金は加工しにくい。

押出成形の場合、マグネシウム合金の押出速度は建築用のサッシや自動車のボディに使われている6000系という中強度アルミニウム合金の半分以下で、成形に時間がかかっていた。

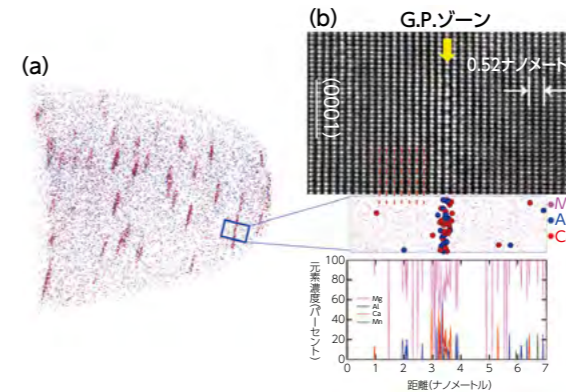
「マグネシウムの加工性が低いのは『六方最密充填構造』と呼ばれる正六角柱の結晶構造をしているからです。結晶内の面の数が限られるため、硬くてもろく、室温では変形しにくくなります」。それに対し、従来のマグネシウム合金に、微量のアルミニウム、マンガン(Mn)の他、新たにカルシウム(Ca)を加えることで、6000系アルミニウム合金に匹敵する強度と加工性が得られるようになった(図1)。

両立の鍵は、原子層レベルの薄い板状の原子集合体である「G.P.ゾーン」だ。添加したアルミニウムやカルシウムを高温で溶解すると合金の塊が作られる。これを押出成形した後、約200度の環境の中に一定時間入れる時効処理で、強度が大幅に向上する。G.P.ゾーンが合金の中に形成されるからだ(図2)。

量産を見据えて試行錯誤を繰り返す中、2013年に1分間に60メートルの速度での押出成形を成功させた。「約40年間にわたるマグネシウム合金の研究人生の中で最も嬉しい瞬間でした。

■図2

アルミニウムとカルシウムを添加し、成形後に時効処理をすることでG.P.ゾーン(黄色い矢印に沿った1原子層の面)を形成し、強度を高めることができた。(a)アトムプローブ電界イオン顕微鏡による原子分布像。(b)透過電子顕微鏡による格子像(上)と、その位置に対応するアトムプローブ像(中央)、元素濃度分布(下)。



実験ではひび割れを恐れ、1分間に10メートル、20メートルと徐々に押出速度を上げていったのですが、まだ行ける、まだ行けると続けていくうちに、最終的には60メートルを達成しました。気付けば夜中の12時を回っており、同じように夢中で実験を続けてくれた学生と喜びを分かち合いました」と、鎌土さんは当時の興奮を振り返る。

さらに、このマグネシウム合金に約200度で15~30分程度の時効処理を施すことにより、新幹線の車体に利用されているアルミニウム合金をも上回る強度を持つことを確認した。

## 亜鉛添加で室温加工を実現 シミュレーションも駆使

続いて、圧延加工の開発にも着手した。コストの面からも、室温で加工できることは実用化の必須条件だ。

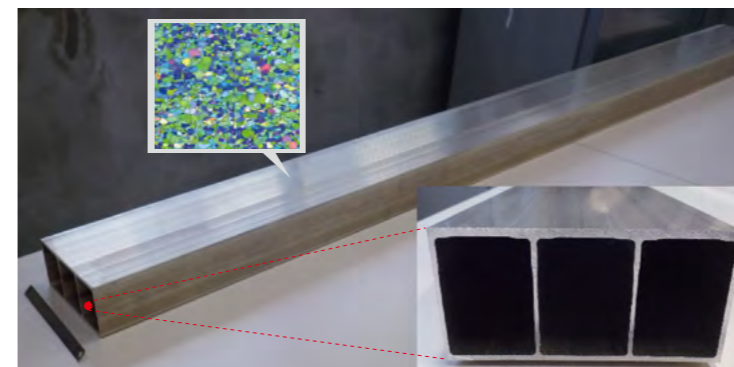
「押出成形に成功したマグネシウム合金に亜鉛(Zn)を添加したことにより結晶配向を制御し、ひび割れることなく丸く成形できることを世界で初めて確認しました」。微量の亜鉛とマンガンの添加は、従来よりも微細な結晶組織の形成を可能にし、優れた加工性を実現

した。さらに170度で20分間の時効処理を施すと強度が高まった。

レアアースのような高価な元素を添加すれば、強度と加工性を上げられることもわかってきている。しかし自動車や鉄道に応用するには、より安価であることが不可欠だ。「開発した2種類のマグネシウム合金は、いずれもありふれた元素しか使っていませんので、次世代材料として十分に汎用性が高いと考えています」。実用化に向けて自動車用の大型部材の試作にも着手している(図3)。

加える元素の配合比率を少し変えるだけで、マグネシウム合金の特性は大きく変化する。ナノ・マイクロ組織組成の予測は欠かせない。多様なコンピューターシミュレーションを駆使し、G.P.ゾーンに形成される化合物、そして形成された化合物の成長を再現したことが成果につながった。「実験結果とシミュレーション結果が一致したことで、形成された化合物を検証することができました。化合物が強度に寄与するメカニズムも原子レベルで明らかになってきました。新たにどのような元素を添加すれば性能向上に役立つかを探っていく計画です」。

今後は、押出成形や圧延により形成



■図3 自動車バンパー部材を模擬した大型中空部材の試作品。微量元素添加により、優れた加工性を得られるような微細結晶組織(吹き出し内)を形成した。結晶粒径の平均は10マイクロメートルと、従来の3分の1を達成した。

される合金の組織構造をコンピューターシミュレーションで詳細に調べていく。「どのような温度領域で加工すればよいか、どのような熱処理を施せばよいかなどが明らかになり、製造プロセスの最適化を図れると期待しています」。

## 東京パラリンピックの 競技用車椅子に採用

最終目標は自動車や鉄道など幅広い輸送機器への応用だ。実用化の第一歩として、2020年の東京パラリンピックのテニス競技用車椅子に、鎌土さんが開発したマグネシウム合金が採用されることが決まっている。

この車椅子は軽量で機動性が高いので、片手だけでも操作できる。マグネシウム合金は振動を吸収する能力が高いため、長時間座っていても疲労感が少ないという。しかも価格は、競技用車椅子で多用されている炭素繊維強化プラスチックに比べて10分の1という安さだ。

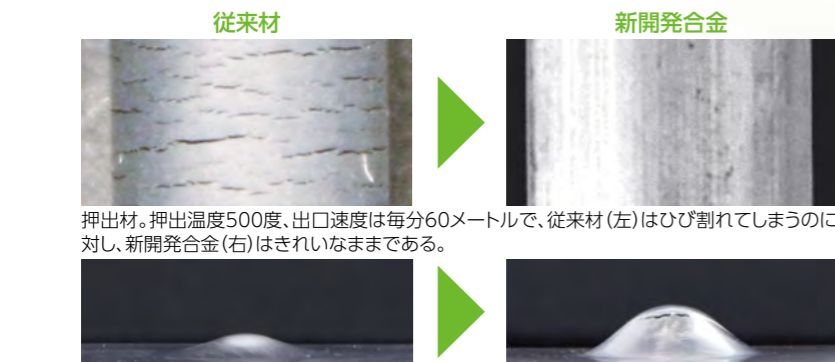
「2016年のリオデジャネイロ・パラリンピックでは既存のマグネシウム合金製の車椅子が使われ、車椅子テニスで日本代表が銅メダルを獲得しました。2020年が今から楽しみです」と笑顔を見せる。



Q. 好きな元素

## A. マグネシウム

やはりマグネシウムです。研究に携わったのは、恩師に「マグネシウムの研究者は他にいないから一番になれる」と勧められたのがきっかけでした。おかげでトップランナーとして研究を続けられてきたことに感謝しています。マグネシウムを表す漢字もいいですね。中国語の周期表では、マグネシウムは金偏に美しい(鎂)と書きます。



■図1 室温での加工しやすさを調べるエリクセン試験を行った。新開発合金(右)は、従来材(左)と比較して、室温でもアルミニウム合金並みに大きく加工できていることがわかる。

戦略的創造研究推進事業CREST

研究領域「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」  
研究課題「分子触媒を利用した革新的アンモニア合成及び関連反応の開発」研究  
成果

## 世界初、常温常圧で窒素ガスと水からアンモニアを合成 次世代のエネルギー媒体として期待が高まる

アンモニアは窒素肥料や工業製品などの原材料として幅広く利用されています。また、温室効果ガスである二酸化炭素を発生させずにエネルギーを取り出し、貯蔵や運搬も容易なことから、次世代のエネルギー媒体としても期待されています。

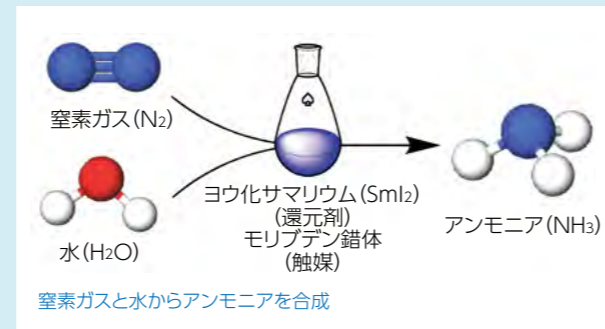
現在、アンモニアはハーバー・ボッシュ法で合成されていますが、膨大な化石燃料を使い、二酸化炭素を排出しています。一方自然界では、マメ科植物に共生する根粒菌などが持つニトロゲナーゼという酵素が、常温常圧で水を水素源として窒素ガスからアンモニアを合成しています。東京大学の西林仁昭教授らは、この仕組みをまねたアンモニア合成を目指しました。

ニトロゲナーゼの活性中心を模倣した金属触媒として、研究グループはモリブデン錯体を開発してきました。さらに、還元剤としてヨウ化サマリウムを使うと、ニトロゲナーゼに匹敵する速さで常温常圧でのアンモニア生成が進むことを発見しました。ヨウ化サマリウムと水やアルコールとの組み合わせは、炭素-酸素二重結合(C=O)の還元試薬

として古くから有機合成で使われてきたものです。これを窒素-窒素三重結合(N≡N)の還元に用いることを思い付きました。

サマリウムは希土類(レアアース)の1つで比較的安価ですが、工業化に際しては再利用する必要があります。研究グループは企業と共同で、実用化に向けた研究開発に取り組んでいます。

このアンモニア合成法が実用化されれば、環境・エネルギー問題の解決に大きく寄与すると期待されます。



研究開発戦略センター(CRDS)

話題

## 「研究開発の俯瞰報告書 統合版(2019年)」を公開 科学技術イノベーションの全体像を示す地図に

科学技術政策や研究開発戦略の立案には、国内外の科学技術や社会の動向などを把握し、科学技術が今後どのように発展していくのかを見通すことが重要です。

そこでJST研究開発戦略センター(CRDS)では、「研究開発の俯瞰報告書」を2年ごとに発行しています。最新の2019年版は、延べ1500人の有識者の協力を得て、「環境・エネルギー」、「システム・情報科学技術分野」、「ナノテクノロジー・材料分野」、「ライフサイエンス・臨床医学」の各分野版、「主要国の研究開発戦略」、そして新たに追加した「日本の科学技術イノベーション政策の変遷」の計6冊を作成、4月に公開しました。

さらに今回、日本の科学技術イノベーションの全体像を捉えることを目指して、「統合版～俯瞰と潮流～」を公開しました。主要国の動向や各分野のポイントを1冊に凝縮するとともに、データ駆動型科学技術の進展、ビッグサイエンス化、異分野融合といった研究開発のトレンド、社会が科学技術にける期待や責任が高まっている状況などをまとめ、その上で、日本が今後も研究開発で世界と伍してい

くために挑戦するべき課題を提案しています。

激動のさなかにある世界で、この報告書が科学技術イノベーションの全体像を示す地図となり、将来の「あるべき社会」の実現に向けた議論の出発点となることを期待しています。



研究開発の俯瞰報告書  
<https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/index.html>

戦略的創造研究推進事業ACT-I  
研究領域「情報と未来」開催  
報告

## 情報分野の若手研究者が個性豊かな先端研究を発表 ACT-Iの2期生による成果発表会を開催

情報学とそれに基づく技術開発の目覚ましい進展は、未来社会を創造する中心技術として、重要性が高まっています。

2016年度に発足したACT-I「情報と未来」研究領域では、大学院生を含む若手研究者の支援に取り組んでいます。その一環として、3月に研究期間が終了した2期生の成果発表会「ACT-I先端研究フォーラム～「情報と未来」研究者講演会～」を4月20日に日本科学未来館(東京・お台場)で開催しました。

当日は、2期生29人がそれぞれ工夫を凝らしたショートプレゼンテーションやデモを含むポスター発表を行いました。産業界や研究機関などの他、1期生、3期生も集結して約210人が参加し、活発な議論が行われ、研究に対する関心の高さがうかがえました。

会の終わりには、後藤真孝研究総括からの研究者同士のネットワークのさらなる充実などの期待を込めたあいさつに続き、今年度発足したACT-X

「数理・情報のフロンティア」研究領域について、ACT-Iの領域アドバイザーでもある河原林健一研究総括が数理を加えた情報系の研究を志す若手研究者への支援の継続をアピールしました。

若手研究者たちの挑戦的な研究が学術や産業、社会、文化を変える新たな価値の創出につながることを期待されます。



全員でACT-Iの「A」のポーズ

戦略的創造研究推進事業ERATO  
蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト開催  
報告

## 企業との連携強化を図る研究会発足へ 自動運転車の安全保証技術のシンポジウムを開催

製品の品質を高い信頼性で保証する設計手法は長年研究されていますが、コストがかかるため、あまり普及していませんでした。しかし、工業製品の機能が複雑化、高度化し、製品の品質を支える技術が重要になっています。

蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクトは、工業製品の品質を効率的に保証する技術を研究開発しています。中でも、自動運転車の事故を防ぐための機能の安全保証は重要な研究テーマの1つです。企業が抱える個別問題を、数理理論を駆使して汎用的な問題として捉え直して解決手法を導き、安全な自動運転車を開発できるソフトウェアを構築することを目指しています。

プロジェクトは産業界との連携を深めることを目的に、5月21日に自動運転車の安全保証技術のシンポジウムを開催しました。蓮尾一郎研究総括らから、時々刻々と変わる交通状況に対応して安全を保証するための数理的手法や、将来、機能の安全を保証して自動運転車を設計するプラットフォームの研究などが紹介されました。参加者の6割近くは企業で、情報交換の希望や研究への期待

感が寄せられ、企業が機能の安全に問題意識を持って、この研究に注目していることがわかりました。今後は研究会を発足し、研究成果の普及、産業界との関係強化を図っていく予定です。



ホームページに講演ビデオが公開されています。

<https://group-mmm.org/eratommmsd/ja/vvav-symposium-201905/>



Q1 好きな言葉は?

A1

が しんしょうたん  
臥薪嘗胆

計算量理論の分野は成果を出すことが非常に難しいといわれています。2000年にアメリカのフレイ数学研究所が数学上の7つの未解決問題に100万ドルの賞金を懸けました(ミレニアム懸賞問題)。そうまでして解決したい難問があることに興味を持ち、挑戦したいと決意しました。生きている間に解けるかどうかかわからないので、苦勞も絶えないと思いますが、問題の解決に貢献し数百年後も自分の名が残る偉業を成し遂げたいです。

Q2 研究テーマを一言でいうと?

A2 暗号が真に安全であることを証明する

暗証番号やビットコインの取引など、現代の情報通信社会の通信の秘密を守ってくれているのが公開鍵暗号方式です。しかし、本当に安全なのかはまだ証明されていません。特にミレニアム懸賞問題の1つである「 $P \neq NP$ 予想」を解決する必要があります。もしこの予想が外れると、ビットコインの価値がなくなったり、暗証番号などが役に立たなくなったりします。暗号が真に安全であることを証明するためには $P \neq NP$ 予想の解決が必要なのです。

ただ、残念ながら $P \neq NP$ を示すだけでは暗号の安全性を証明するには不十分で、最悪時計算量と平均時計算量という2つの異なる計算時間の概念をつなぐ「帰着」を構成する必要があります。既存研究の帰着は「ブラックボックス帰着」と呼ばれ、限界があることがわかっていました。私は回路最小



# さきがける 科学人

vol.87

## 数百年後の 人類に貢献する

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系  
助教

平原 秀一

Shuichi Hirahara

Profile

千葉県出身。2019年 東京大学大学院  
情報理工学系研究科博士課程修了。  
博士(工学)。19年より現職。17年より  
ACT-I研究者。

化問題という中心的な計算問題に着目することによって、世界で初めて非ブラックボックス帰着手法を開発することに成功し、日本人として初めてMachtey賞(FOCS'18, 最優秀学生論文賞)を受賞しました。また、約40年間未解決だった深さ3段に制限された回路最小化問題のNP完全性も解決しました。

Q3 研究で大切にしていることは?

A3 興味のあるテーマを見つけること

中学生くらいまで勉強ができる方ではありませんでした。勉強よりもゲームに夢中でした。一晩中やっていたこともあり、親に心配されていたほどです。今も息抜きにやるのですが、面白いと熱中し過ぎてしまうので、なるべく熱中しないゲームを探しています。もともと数学は得意でしたが、高校の少し専門的な数学がわかるようになってきてから面白さに気づき、冬休み中は寝る

間も惜しんで「コラッツの予想」という未解決問題に挑んでいました。解けませんでした。これがきっかけで数学をもっと勉強したい、研究したいと、研究者を目指しました。

研究者にとって大切なのは自分の興味のあるテーマを見つけることだと思います。シンポジウムや学会で話を聞くのもきっかけになります。学生時代にプログラミングコンテストに参加したことも良い経験になりました(写真下)。自分が何に興味があるかを見極めることは簡単ではありませんが、生きがいとなるテーマを見つけてほしいですね。



リサイクル適性(A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。

R70

古紙パルプ配合率70%再生紙を使用

JSTnews

July 2019

発行日/令和元年7月10日

編集発行/国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)総務部広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3サイエンスプラザ

電話/03-5214-8404 FAX/03-5214-8432

E-mail/jstnews@jst.go.jp JSTnews/https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/



最新号・バックナンバー