

特集

1

CRESTが推進する「元素戦略」の現在、未来

世界が注目 日本の元素戦略

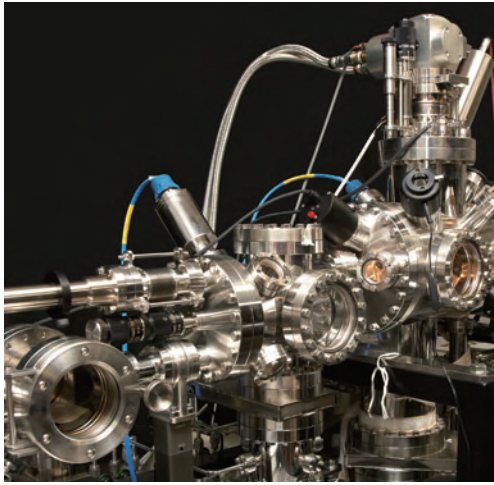
特集

2

「トンネルトランジスタ」で道が開けた！

理論限界を突破する省エネデバイス





JST NEWS

CONTENTS

2012 August 8

表紙写真

元素組成を三次元的に解析することができる「レーザー三次元アトムプローブ」。JST CRESTチームで「ネオジム磁石の高保磁力化」の研究を行う宝野和博さんが研究用に自ら設計した。本機を活用して希少元素を使わない強力なネオジム磁石の開発にめどをつけた。



特集
1

CRESTが推進する「元素戦略」の現在、未来 世界が注目 日本の元素戦略

3



特集
2

「トンネルトランジスタ」で道が開けた！ 理論限界を突破する 省エネデバイス

8



社会にひろがる新技術 ～JSTの研究開発成果から～Vol.4

12

歯科臨床教育用 「ヒト型患者ロボット“SIMROID[®]”を開発

人間の痛み、不快の表情、しぐさを再現する歯科用実習教育シミュレーター



News Clip

14



先駆ける科学人 Vol.4

16

新しい感染症のモデルを見つけたい

西浦 博 香港大学 李嘉誠医学院 公共衛生学院 助理教授

研究成果を特許に！

JST理事長 中村道治

発明、発見は人類共有の財産で、広く使われることで価値につながります。共有の財産を生み出した発明者に報いるために、一定期間権利を保護する「特許」という制度があるのです。今日特許は、科学技術イノベーションを支える意味で、これまで以上に重要な役割を担っています。

研究者にとって、論文を書くことは業績につながる大切な仕事ですが、研究成果を特許にすることも強く意識すべきだという声が強くなっています。研究者の中には、少しバリアがあると感じる方もいるかもしれませんが、まずは気

軽に特許出願してはどうでしょう。

国として基本的な特許をどれほど持っているかということは、国力に直結します。1998年の日本版パイドール法の施行以来、大学からの特許出願数が着実に増えてきたことは高く評価されています。これからは出願から活用に至るまで戦略的に取り組み、産業競争力の強化に結びつけることが、わが国の課題と言えましょう。

企業は論文より特許に注目することが多いものです。特許出願の多い大学には企業の共同研究提案が多いことが知られています。共同研究になれば大学は外部資金を得ることができ、研

究成果の産業移転も加速できます。企業との共同研究を誘引する上でも、大学の知財活動が重要なのです。

大学などで生まれたシーズを産業化するとき、個別の特許では十分でない場合が多いでしょう。さまざまな研究者の特許について有効性を確認、育成し、組み合わせる「群特許」として出願したり、特許パッケージとしてライセンスしたりすることも必要です。JSTは知的財産戦略センターが中心となり、大学の研究成果の特許化および活用を、幅広く支援していますので、気軽に声を掛けてください。



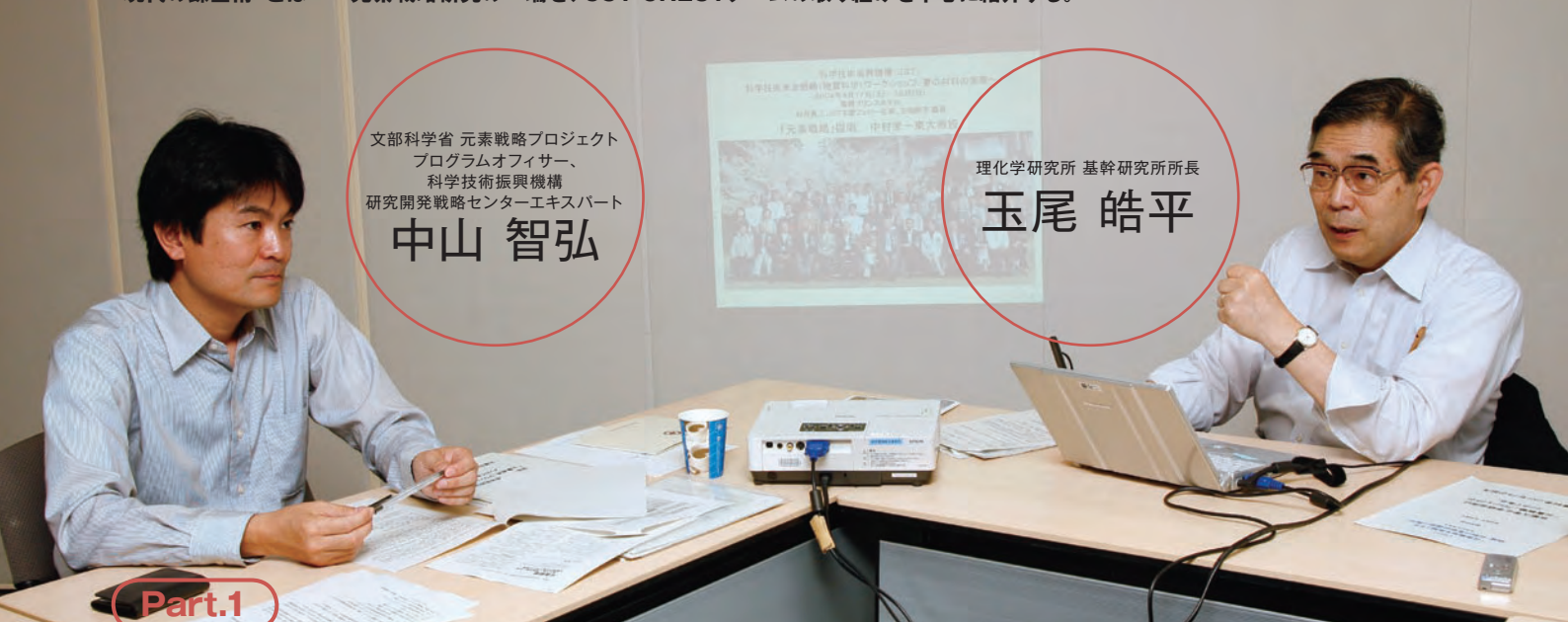
CRESTが推進する「元素戦略」の現在、未来

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
Li 3 リチウム	Be 4 ベリリウム	=金属元素														Ne 10 ネオン	
Na 11 ナトリウム	Mg 12 マグネシウム	=希少元素														Ar 18 アルゴン	
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 ルビジウム	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	57-71 ランタノイド	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	89-103 アクチノイド	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 ボーリウム	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 コベルギウム	Uut 113 ウーテニウム					
		ランタノイド → ランタン	La 57 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
		アクチノイド → アクチニウム	Ac 89 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」

省庁を超えた共同プロジェクト

JST

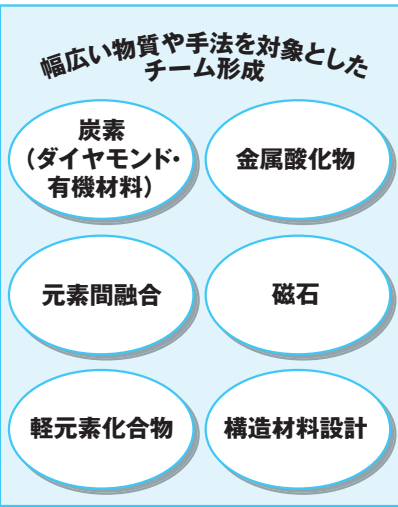
文部科学省
「元素戦略プロジェクト
(産学官連携型)」
2007年~ 16課題

文部科学省
「元素戦略プロジェクト
(研究拠点形成型)」
磁石材料、触媒・電池材料、電子材料、構造材料
2012年~ 4拠点

経済産業省
「希少金属代替材料開発プロジェクト」
2007年~ 10課題

CREST
「元素戦略を基軸とする物質・材料の
革新的機能の創出」
研究総括 玉尾皓平
2010年~ 9課題(2012年7月末現在)

さきがけ
「新物質科学と元素戦略」
研究総括 細野秀雄
2010年~ 24課題(2012年7月末現在)



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。

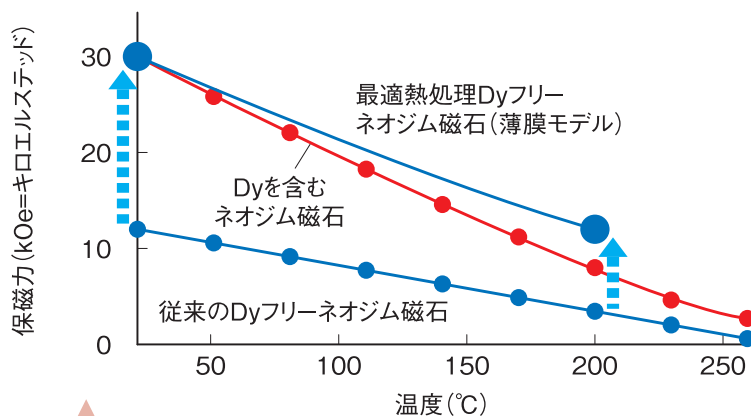
「ただ、Dyを使うと、本来のネオジム磁石に比べて性能が下がるのです。ネオジム磁石では、FeとNdのスピン (電子の自転運動) がすべて上向きのため高い磁界を得られますが、DyはFeやNdと反対向きのスピンであるため磁化を打ち消し合います。ですから、Ndの一部をDyで置換すると、確かに保磁力

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



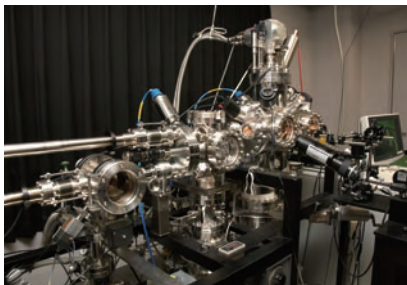
Dyを用いない最適熱処理ネオジム磁石 (薄膜モデル) は室温で約30kOeと、従来のネオジム磁石より20kOeも高い保磁力を獲得し、200℃でもDyを含むネオジム磁石をしのぐ保磁力を発揮した。



けん引する磁石を作る 宝野 和博

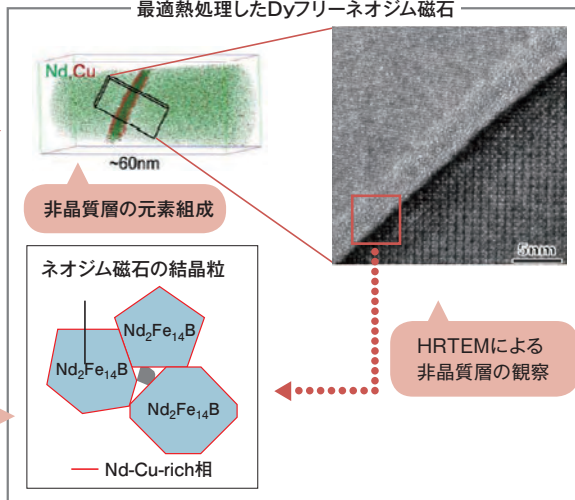
物質・材料研究機構フェロー、磁性材料ユニット長

■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、更には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。

特集

2

「トンネルトランジスタ」で道が開けた！

理論限界を突破する 省エネデバイス

パソコンやスマートフォンだけでなく、コンピュータで制御されるクルマや家電などに幅広く使われているLSI（半導体集積回路）。だが、高性能化、高集積化が進むに伴い、過剰な電力消費や発熱などの問題も深刻化している。「トンネルトランジスタ」はこれらの問題を一挙に解決する省エネデバイスだ。



シリコン基板上に化合物半導体の「ナノワイヤ」を作製するための結晶成長装置の前で。ゴミ、チリの混入を避けるため、クリーンルームでの作業が必要だ。

富岡 克広 とみおか・かつひろ

JSTさきがけ専任研究者
北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター

2003年群馬大学工学部電気電子工学科卒業、同大学大学院工学研究科電気電子工学科修士課程修了、北海道大学大学院情報科学研究科情報エレクトロニクス専攻博士課程修了。博士（工学）。日本学術振興会特別研究員、北海道大学大学院情報科学研究科グローバルCOE研究員を経て、09年から現職。

日進月歩でパソコンやデジタル家電は進化している。それを支えるのは、頭脳となるLSI（半導体集積回路）の高性能化だ。LSIは構成要素であるトランジスタ（電界効果トランジスタ：FET）を小さくして集積度を高め、数を増やすことで、高性能化してきた。最新のLSIで使われているトランジスタは最大で15億個、大きさは22ナノ（10億分の1）メートルだ。しかし、LSIの消費電力、発熱量が非常に大きく

なることが問題となり、集積度の限界が近づいている——そんな状況を打ち破る、新しいトランジスタの開発にJSTさきがけ専任研究者の富岡克広さんが成功した。

トランジスタは電圧をかけたときに電流が流れるか流れないかで1（オン）と0（オフ）を判定する。このスイッチ機能がコンピュータのデジタル計算に応用されているのだ。スイッチング性能を示す「サブスレッショルド

係数」という数値が小さいほど、電圧が低く、消費電力が少なくて済む。普通のトランジスタは半導体の中を“ソース電極”から“ドレイン電極”に向かって流れる電子の数を“ゲート電極”の電圧で制御して、電流をオン／オフしているため、この数値の理論限界は60mV/桁だ。しかし、富岡さんが開発に成功した新型トランジスタは21mV/桁と極めて小さな値になるのだ。



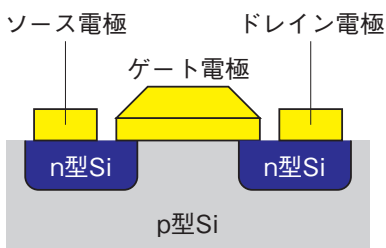
縦型で実用化できると考えていた

新型トランジスタはなぜ従来型の理論限界を大幅に突破することができたのか？ 従来のトランジスタは平面型だが、新型は縦型になっていることが大きい。

縦型のメリットは、平面型と比較して集積度を4倍に増やせることだ。また、縦型だと側面にゲート電極を付けられるので、水道の蛇口にバルブをいくつも付けたようなイメージで、リーク電流（漏れ電流）を抑えられ、待機電力を大幅に減らせる。

「ただ、縦型自体の発想は私ではなく、

■従来のトランジスタの平面構造



トランジスタ（電界効果トランジスタ：FET）では“ソース電極”から“ドレイン電極”に向かって半導体中を進む電子の流れを“ゲート電極”に加えた電圧で制御している。

1989年に東北大学の舛岡富士雄名誉教授が最初に提唱したものです。トランジスタを円柱状に立体化することで低消費電力化、高集積化、高速化が図れるという論文を発表されたのです」

平面型と比較すると、縦型は立体集積することになるので、三次元ゲート構造、電極構造の積層化など、技術的なハードルが高い。最近はリーク電流を抑えるために立体ゲート構造のトランジスタも登場しているが、縦型は実用化されていない。

富岡さんが縦型トランジスタに着目したのは、もともと化合物半導体の結晶成長の研究を専門にしていたためだ。群馬大学工学部、同大学大学院で学生時代から研究を重ね、北海道大学大学院で福井孝志教授のもと、Ⅲ-V族化合物半導体※1のナノワイヤ※2選択成長の研究を始めた。

「学生時代から、シリコン基板上に化合物半導体を成長させてデバイスを作りたいと思っていました。極微小な平面構造の中で原子を制御し並べる技術は限界に近づいています。そこで、ナノワイヤを垂直に結晶成長させる技術を開発すれば、縦型トランジスタを実用化できると思ったのです。そういった技術は80年代から研究されていますが、結晶の格子サイズが異なるため結晶欠陥が

縦型トランジスタの可能性を追究しました。



起こりやすいことが問題でした。また、シリコン基板上に化合物半導体を成長させても、熱膨張係数の差が大きいため基板が反ってしまい、使い物にならなくなるのです。私は『選択成長』という技術を使って、シリコン基板とⅢ-V族化合物をうまくつなげられるのではないかと思います。シリコン基板

【用語解説】

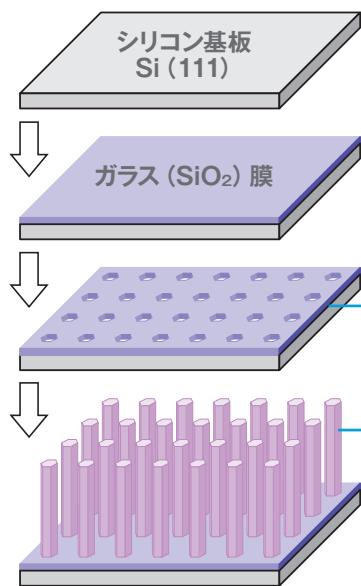
※1 Ⅲ-V族化合物半導体

Ⅲ族元素（アルミニウムやインジウムなど周期表の13族（3B族）に属する元素）とV族元素（リンやヒ素など周期表の15族（5B族）に属する元素）を組み合わせた半導体。

※2 ナノワイヤ

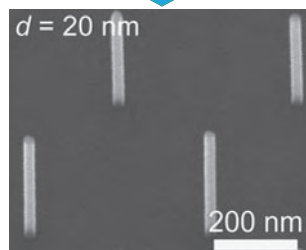
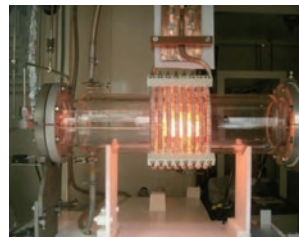
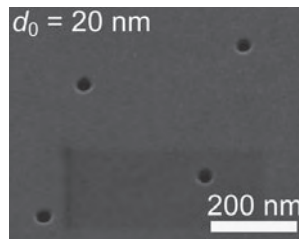
ナノメートル単位の細い線状の物体。

■新型トランジスタのナノワイヤ作成方法



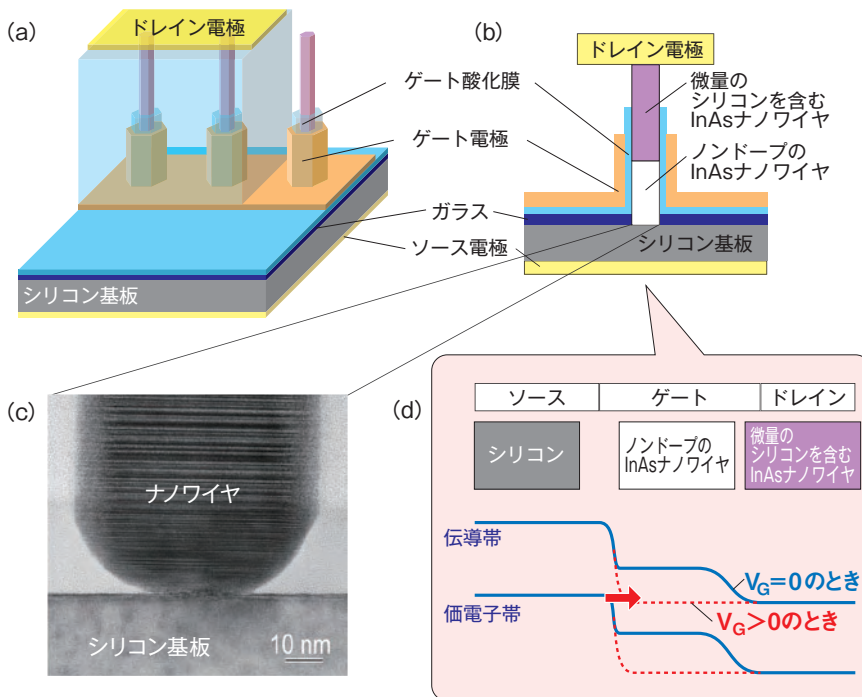
穴あけ

ナノワイヤの作製
(結晶成長)



シリコン基板（111）の上にガラス（SiO₂）膜を張り、ガラス膜に微細な穴を開けて穴の中にⅢ-V族化合物の結晶を成長させる。この技術を使うと、シリコン基板上に化合物半導体のナノメートルサイズの柱（ナノワイヤ）を立てられる。

■開発したトンネルトランジスタ素子



- (a) 縦型トランジスタ素子の模式図。ナノワイヤの側面をゲート酸化膜とゲート電極で包んだ構造になっている。
- (b) 同素子の断面図。ナノワイヤは、不純物を入れていないノンドーブのInAs（インジウムヒ素）層と、不純物を入れたInAs層で作られている。シリコン基板とInAsナノワイヤの接合界面に「トンネル効果」が生まれる。
- (c) 同素子のInAsナノワイヤとシリコン基板の接合界面。
- (d) 同素子のバンド構造（結晶中のエネルギー準位）。電圧をかけていないとき ($V_G=0$:青線)、シリコンの電子はナノワイヤへ移動できない。正 ($V_G>0$) の電圧をかけると、バンド構造の一部は赤色破線のように変化、シリコン価電子帯とナノワイヤの伝導帯が近づき、シリコン側の電子がナノワイヤ側へトンネル（透過）する。

の表面にきれいにガラス(SiO₂)の膜を作り、そのガラスに微細な穴を開けてⅢ-V族化合物結晶を成長させる方法を試し、2008年にはⅢ-V族の一つである、インジウムヒ素のナノワイヤの柱をシリコン基板上に均一に位置制御して成長させる技術を確認できました」

この技術は単純に見えるが、シリコン基板の最表面原子をV族原子に入れ替えて接合界面をなじませるなど、富岡さんにより細かなプロセスが加えられている。

「縦型トランジスタの試作時は、垂直なナノワイヤに対して、立体的な加工を行わなければならない、その工程が一番困難でした。全部で20工程くらいありますが、そのうち一つでも失敗してはいけません」

トンネル効果が起こっていた

「シリコン上にインジウムヒ素の結晶を成長させたものの電気特性を測ってみると、シリコンとインジウムヒ素の間で不思議な振

る舞いを示す電子が数多く見られたのです。この電子の動きを制御できれば、縦型というだけでなく、新しいトランジスタを開発できるかもしれないと考えました」

電子の不思議な振る舞い、それは「トンネル効果」を富岡さんに期待させるものだった。

トンネル効果とは、超えることができないエネルギー（ポテンシャル）の壁を、粒子がある一定の確率でトンネル（透過）する現象のことを指す。半導体中のトンネル効果はノーベル物理学賞受賞の江崎玲於奈博士が1958年に発見した。トンネル効果はダイオードには利用されているが、トランジスタへの応用例はない。

「トンネル効果は、従来のトランジスタではリーク電流の原因の一つであるためタブー視されていたのです。しかし、トランジスタの微小化が限界に近づく中、トンネル効果を使えば、これまでの理論限界を超えることができることから、一躍、注目され始

めたのです」

だが、「トンネルトランジスタ」の研究は進んでいなかった。前述のように、従来のトランジスタは22ナノメートル（髪の毛1本の4000分の1）まで微小化が進んでいる。トンネル効果を制御するためにはこの小さな領域の中に不純物原子を規則正しく入れなければならない。それは現在の科学技術では不可能だと言われていた。

若い力で驚きの省エネデバイスを実現

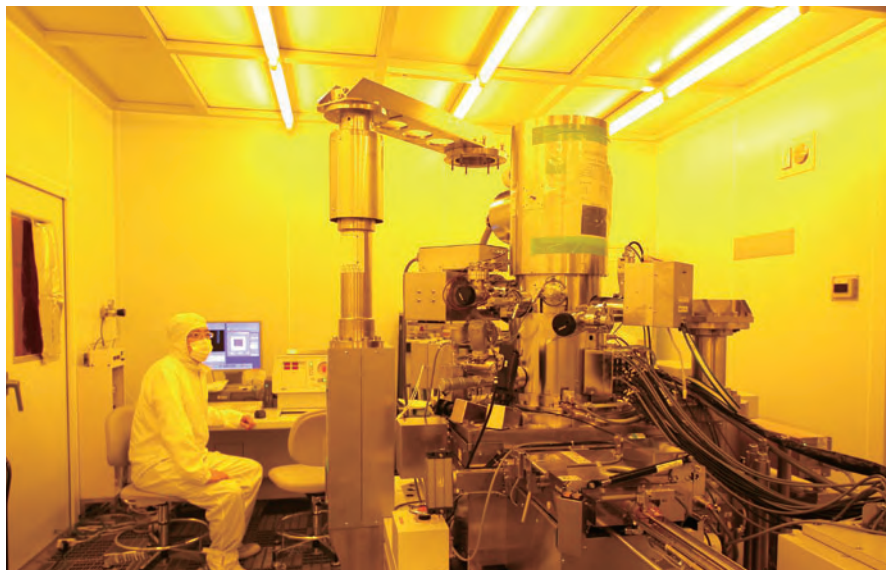
富岡さんのさきがけでの研究テーマは「Si/Ⅲ-V族半導体超ヘテロ界面の機能化と低電力スイッチ素子の開発」。機能化とは「トンネル効果」のことであり、低電力スイッチ素子とは、「トンネルトランジスタ」のことだ。

「さきがけに応募したときは、この構造でトンネル効果が生まれる可能性を感じていましたが、確証はありませんでした。トンネル効果を制御するため、ナノワイヤにどんな不純物を混ぜて、結晶をどのように成長させるかを考える必要がありました。実際には、延べ3万個くらいのサンプルを作り、実証する作業を繰り返しました」

福井教授らのアドバイスを受けながら、富岡さんは材料の検討・設計から、膨大な量のトランジスタの試作、実証までを一人でこなし、32歳という、さきがけ研究者の中でも若手の富岡さんならではのパワーだ。

「さきがけの課題はプレッシャーが大きくて、ある程度結果が出るまで、半年くらいは不安で眠れない日もありました（笑）。ただ、もしさきがけがなかったら、トンネルトランジスタの研究に着手できなかったかもしれません。追い込まれて、集中して研究したから、成果を上げられたのだと思います」

そして、完成したのが左上図(b)に示す積層構造の縦型トランジスタだ。この形だとバンド構造（結晶中の電子のエネルギー準位）は図(d)の青線のようになるが、正の電圧 ($V_G>0$) を加えると赤色破線のように変化し、シリコンの価電子帯の電子がナノワイヤの伝導帯にトンネル（透過）するので、急に電流が流れると考えられる。実験の結果、予測通り電流はわずかな電圧でも急激に流れ、冒頭に述べたように、サブスレッショルド係数は21mV/桁まで小さくなった。従来のトランジスタの理論限界を大きく超える、約3分の1の電圧で駆動させることができたのだ。



数十ナノメートルという超微細な穴を作成するための電子線リソグラフィ装置。紫外線を嫌う工程のため、紫外線をカットしたイエローランプの部屋で作業する。

「トランジスタのサブスレッショルド係数を半分にできれば、使う電圧も半分になります。電力はその2乗に比例するので、この係数を半分にできれば1/4、3分の1ならば1/9に減らすことができます」

トランジスタ自体の消費電力が抑えられるだけではない。このトランジスタは、電圧がオフの状態では、電子がシリコンとナノワイヤの間を通ることができないため、電流が流れない。現在、家庭のテレビなどの家電の待機電力だけで原子力発電所が数基分の電力が使われていると言われるが、このトランジスタを使えば、その分の待機電力はほぼ必要なくなる。また、スマートフォンなどモバイル電子機器の電池の持ちも格段によくなるはずだ。

数年以内には 実用化のめどをつける

今回の研究成果は、2012年6月にアメリカ・ハワイで開催された半導体国際会議の最高峰の一つ「VLSIシンポジウム

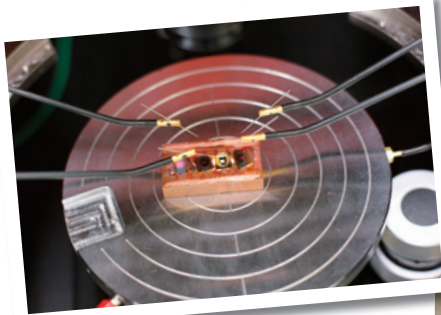
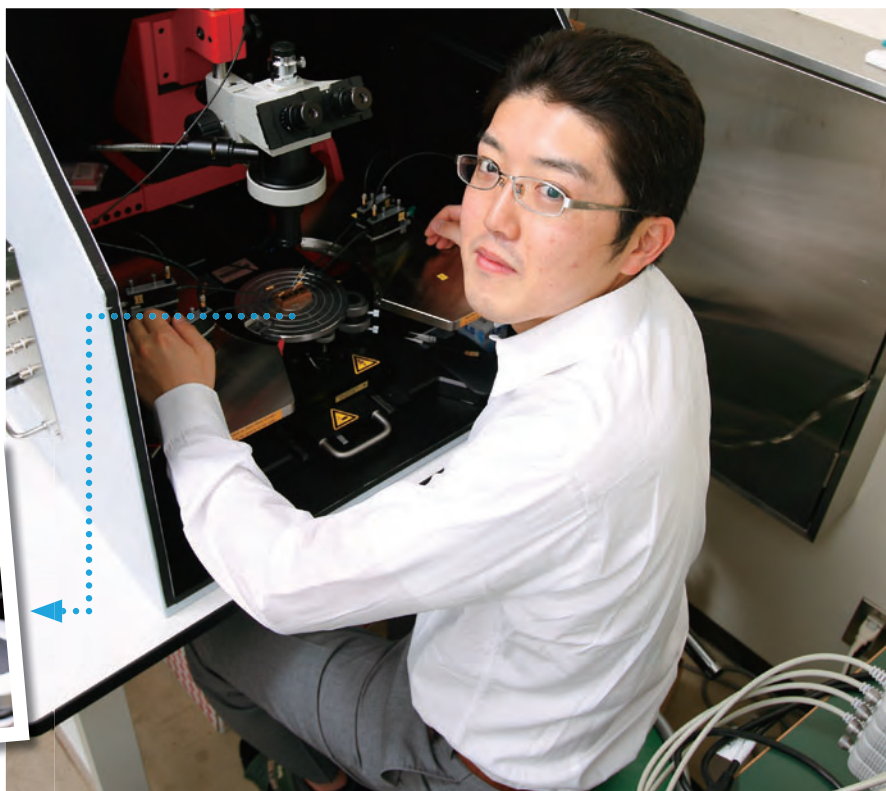
2012」で招待講演として発表され、大きな反響を呼んだ。世界中の企業が開発競争を繰り広げる中、日本の新進気鋭の研究者によって夢の省エネデバイスが実現する道筋が開かれたのだ。このデバイスの実用化には、どのような課題があるのだろうか？

「今回開発したトランジスタは、『n型』と呼ばれるタイプのもので、トランジスタには、電圧を加えるとスイッチがオンする『n型』と電圧を加えるとオフする『p型』があ

り、この二つを組み合わせることで回路としてCMOS（シーモス、Complementary Metal Oxide Semiconductor; 相補型金属酸化膜半導体）を動作させることができます。LSIに載せるにはCMOSにする必要がありますので、次のステップとして『p型』のトンネルトランジスタの開発に取り組んでいるところです。また、現在は“シリコン基板（111）”という特殊な面でナノワイヤを成長させていますが、一般にトランジスタの作成工程で使われている“シリコン基板（100）”の面でナノワイヤを成長させる技術の確立も、量産するための課題です」

今後の進展に期待を寄せる企業も多く、富岡さんは実用化のための産学官連携体制での研究推進も視野に入れているという。

「研究レベルでの実証はあと数年で終わらせて、それ以降は、実用化に向けての研究を進めたいと思っています。実用化するかしないかではなく、実用化させなければならないと考えています」



完成したトランジスタのスイッチ特性を測定する装置。さまざまな測定機器を用いて3万個もの試作品の実証作業を行い、「夢のトランジスタ」は誕生した。



社会にひろがる新技術

VOL.4

～JSTの研究開発成果から～

歯科臨床教育用「ヒト型患者ロボット“SIMROID®”」を開発

人間の痛み、不快の表情、しぐさを再現する歯科用実習教育シミュレーター

「口を開けてください」の声に反応して口を開け、「痛い!」という声と共に不快な表情をするロボットを前に、実習生たちの緊張が高まる——人の挙動、反応を正確に再現した患者ロボット「SIMROID®」は、診療器具を使った歯の切削などの診療実習に利用できる。このロボットを用いた統合トレーニングシステムの開発に成功した日本歯科大学附属病院の羽村章院長ら開発チームを訪ね、その先進性について聞いた。



写真左より、SIMROID®開発チームの日本歯科大学附属病院 矯正歯科医長・宇塚聡さん、モリタ製作所の西村巳貴則さん、磯川幸彦さん。

日本歯科大学附属病院
羽村章 病院長
SIMROID®
開発プロジェクトを統括

リアルな実習教育システムが熱望されていた

日本では、歯科医師国家試験は筆記試験のみで、技能試験は含まれない。学生の臨床能力を客観的に評価するため、臨床実習前に実技試験を実施しているが、「質」と「安全」が今後ますます重要とされる医療において、歯科医師のコミュニケーションスキルを向上させる総合的な臨床教育がいま、求められている。

医師が診療にあたる上で、知識・技術・診

療態度が三本柱として重視されている。歯科教育の現場ではこれまで、ファントム（人間の顔を模したマネキンに人工の歯をセットしたもの）が用いられ、実習生の技術・技能の向上に役立てられてきた。しかし、これはあくまでマネキン。実習生が不適切な診療を行っても人間のように表情・動作・会話を交えて反応することはない。臨場感ある実習は難しいのが現状だ。

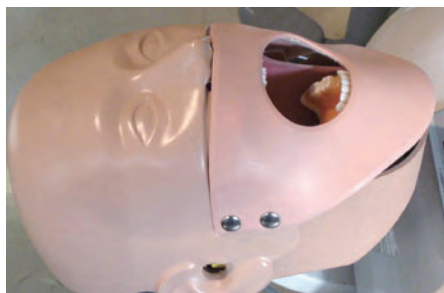
実習生が「診療態度」をレベルアップさせるためには、患者の動作や表情をきめ細かく観察して臨機応変に対処していく必要がある。このような背景から、リアルな診療を再現するインタラクティブ（対話形式）な教育シミュレーションシステムが望まれていた、と羽村さんは語る。

従来の歯科実習に使われているファントム。実習生の感想では「SIMROID®はファントムと比べて格段に緊張する」とのこと。

「教育現場にあるシミュレーターは技術を習得するためのもので、態度やコミュニケーションスキルの向上を目的としたものではありませんでした。歯科医師の養成には、態度教育ができ、なおかつ客観的な評価をしっかりとフィードバックできるシミュレーターが求められていたのです」

ロボットメーカーと医療機器メーカーとの強固なパートナーシップ

羽村さんらは、ヒト型ロボットをベースとした実習シミュレーターの開発に着手。人間そっくりのロボット開発で実績のある株式会社ココロ、そして歯科治療器具の製造を始め、教育実習用機器についても十分な知見のある医療機器メーカーの株式会社モリタ製作所とパートナーシップを結ぶことになった。



※独自のシーズ展開事業 委託開発は、平成21年度から、研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）実用化挑戦タイプとして再編されています。

操作ソフト CCDカメラ マイクを装着



ヒト型患者ロボット

SIMROID[®]システムの構成

ヒト型患者ロボット、治療器具を配置した歯科用ユニット、ロボットの動作を制御し実習を記録する専用ソフトウェア、動画記録用のCCDカメラ(2台)、音声認識用マイクで構成される。



専用ソフトウェアにより、実習中の動画を再生し、教官が評価コメントを追加できる。英語版にも対応している。

人間の歯の咬合(かみ合わせ)やその時のあごの動きは、歯科ロボットの肝となる部分だ。

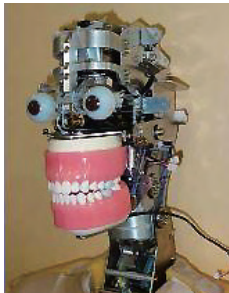
「モリタ製作所が人間の口腔周りの構造を熟知していたため、患者ロボットの駆動可能部位の開発はスムーズに進みました。また、私たちが歯科医療の現場で体感している環境を再現するにあたり、技術者にうまく橋渡ししてくれたのも、大きなアシストになりました」

このシミュレーターの開発では、ロボットのみならず、制御するシステムも重要となる。モリタ製作所の西村さんは、ロボットの操作および実習の記録・再生・評価を綿密に行う専用ソフトウェアの開発にも注力したと振り返る。

「患者ロボットは単独で動くわけではありません。動作させるためのGUI(グラフィカルユーザーインターフェース)や実習内容を記録するためのカメラが必要で、それらを統合的に制御するソフトウェアと多彩な臨床実習シナリオのプログラミングも必要でした。羽村先生方と密なやり取りを重ね、歯科実習での実地運用に十分適応するシステムとプログラムを構築していきま

した。また操作ソフトにはタッチパネルを使用し、実習中の使いやすさや操作性も考慮しました」

こうして、ココ



患者ロボットの駆動可能部位

眼球(上下左右)・まぶた・口首(前後左右)・左手といった部位を動かすことができる。

口の全身型ロボットにモリタ製作所の技術を組み合わせる形で「SIMROID[®]」が誕生することになる。

改良を重ね、リアルなロボットに

患者ロボットのリアルな挙動や反応を実現するためのポイントは三つあると羽村さんは説明する。一つは音声認識機能を備え、実習生の言葉に反応してロボットが動くこと。二つ目は口の中などに備えたセンサーと連動し、診療動作に鋭敏に反応すること。そして三つ目が、人間に近いスキン(皮膚)材を起用したことだ。

「シリコンなどの素材は、診療中の引張る動作を通して、どうしても破れてしまいます。そこで、ある程度強く引張ったり、治療器具が当たっても破れにくい素材を選定しました。また、音声認識については、精度を上げすぎてもいけないのです。実際の診療を想定した場合だと、例えば口ごもった話し方などには反応してほしくない。患者さんがしっかり理解できる言葉づかい、音量が必要だからです」

モリタ製作所は音声認識の精度を自在に変えてさまざまな実習に応用する技術で特許を取得している。歯科特有の用語や言い回しをNGワードとして登録することで、平易な言葉にしか反応しないよう、患者ロボットの反応を制御することもできるという。

「このロボットには口の中に二つ、胸に一つのセンサーがあります。歯を削りすぎると『痛い』と反応し、歯の型を取る際に使う印象材という材料を入れすぎたり、胸付近に手や器具を置いたりしたら『不快感』を示すリアクションをします」

今後は、センサーをきめ細かくし、更によりリアルな反応を実現したいと西村さんは考えている。

他分野でも臨場感ある臨床教育を

SIMROID[®]は診療実習後の評価システムも備えている。2台のCCDカメラが手技や態度のプロセスを記録し、ロボットが受けた負担をモニター画面上でフィードバック。履歴として残すことで、事後の態度評価や学習に役立てられる。

「診療の状況やプロセスをそのまま録画しますから、治療器具の配置や細かなしぐさまで記録できます。実習生が細部にわたり納得するまで確認することで、その後の学習に役立てられるでしょう」

多言語(日本語・英語など)対応機能も備え、グローバルな展開も視野に入る。平成24年度中の販売開始を前に、日本全国の歯科大学からの問い合わせは多い。今後は歯科医療の枠を越えた利用も考えられる。

「態度教育は歯科医療教育に限ったものではありません。患者中心の医療の確立に向け、介護を含めたほかの医療分野への転用も期待できるでしょう」

メカニズムの小型化、高密度化を進めることで、老人や子供型のロボット開発にも大いに可能性がある、西村さんも意欲を見せた。

汎用性を高めることで、SIMROID[®]の存在感がますます高まっていくことは間違いない。

株式会社モリタ製作所(本社:京都府京都市)

【設立】1916年

【事業内容】歯科、耳鼻咽喉科、産婦人科、泌尿器科、小動物用医療機器の開発、製造・販売



パリで開催された「日本再生展」で科学技術を生かした震災復興の取り組みが紹介されました

ロベール・ドアノーの写真で有名なパリ市庁舎で、6月21日から7月7日まで「東日本大震災後の日本再生展」が開催されました。被災地の復興にさまざまな角度から焦点を当てる中、科学技術を活用した復興支援として、JST社会技術研究開発センター「東日本大震災対応・緊急研究開発成果実装支援プログラム」の二つの取り組みが紹介されました。

一つは、海中でマイクロバブル（髪の毛1本の1/4程度の極小さな泡）を大量に発生させ、震災前カキの養殖で知られた大船渡湾の水質浄化とカキの成長促進を行い、津



パリ市庁舎（上）のホールに展示された簡易トイレ。大きな反響を呼び、別イベントでの展示も決定した。

波でいかだや船などを失った水産業の方に大きな希望をもたらしたプロジェクトです。

もう一つは、上下水道が破壊された被災地に、水を使わずに衛生的かつ臭わない快適な排泄環境を作る簡易トイレのプロジェクトです。パネルと共にプラスチック段ボール製の実物を展示し、高い関心を集めました（写真左）。

このイベントはデザイナーの高田賢三氏らパリ在住日本人有志とパリ市が企画し、JSTパリ事務所など公的機関・企業が協力し開催されたものです。多くのパリ市民が訪れ、震災復興への理解を深めました。

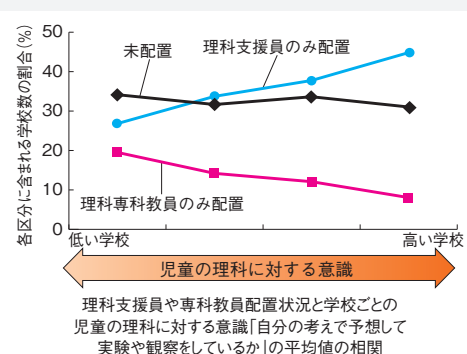


全国約1,000校を対象にした小学校理科教育実態調査の報告書を発表

JST理数学習支援センターは、平成23年1月に全国約1,000校の小学校で理科を教える約2,200名の教員と約25,000名の第6学年の児童を対象に、理科の教育環境や児童の意識などの実態を探る「平成22年度小学校理科教育実態調査」を実施。調査データの分析から得られた知見をまとめました（http://rikashien.jst.go.jp/elementary/cpse_report_015.pdf）。

分析では、学校及び教員の状況について平成20年度と同調査結果と経年比較すると共に、児童の状況について「平成15年度小・中

学校教育課程実施状況調査」との経年比較を行いました。その結果、設備品費の児童1人当たりの平均額が516円（平成20年度391円）に増加し、理科の観察や実験が「好きだ」と回答した児童が54%（平成15年度48%）に増加するなどの改善が見られました。一方で、設備品費の予算額が0円の学校が約4割と依然高い割合を示すなど、厳しい実態も明らかになりました。また、理科支援員配置は理科教育にとって効果の大きい支援策であったことも確認されました。



理科支援員配置校では、児童の理科に対する意識が未配置校や理科専科教員のみ配置校より高い傾向が見られる。



最先端設備の共同利用を促進する「ナノテクノロジープラットフォーム」事業がスタート

JSTは、ナノテクノロジー・材料科学技術分野の産学官の研究者を支援する、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業を、物質・材料研究機構との共同受託により7月2日からスタートしました。

対象となるのは、「微細構造解析」「微細加工」「分子・物質合成」の三つの技術領域です。全国の大学等が所有し、他の機関では整備が困難な最先端のナノテクノロジー研究設備を有する24機関が領域ごとに「プラットフォー



全国24か所の研究拠点に高性能電子顕微鏡など、最先端の計測、分析、加工設備が準備されている。

ム」を形成。産学官の研究者のニーズを結び、高度な設備を共同で利用できる環境を提供することで、各領域の研究基盤を強化することを目指しています。JSTでは、全国5か所（北海道・東北地区、関東地区、中部地区、関西地区、九州地区）に、新たに産学官連携推進マネージャーを配置。各地域における企業ニーズの調査・分析などにもとづいて、プラットフォームと研究者とのマッチングを図りながら、共用設備の利用を促進します。



微生物が金属微粒子を「電線」にして 互いに電子をやり取りする「電気共生」現象を発見

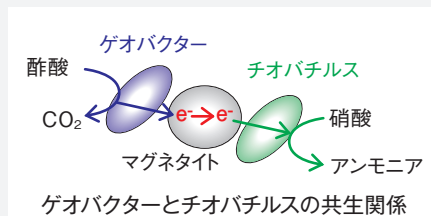
ERATO「橋本光エネルギー交換システムプロジェクト」の加藤創一郎研究員（現・産業技術総合研究所研究員）らの研究グループは、微生物が導電性金属粒子を通して細胞間に電気を流し、互いに電子のやり取りをする（共生的代謝を行う）ことを発見しました。

この発見は、クリーンエネルギー分野において期待される微生物燃料電池の研究開発を行う過程で得られました。微生物燃料電池は、酸素の代わりに電極（アノード）を使って呼吸する微生物を用い、有機物を燃料として電気エネルギーを作り出す装置です。さまざまな有機物を燃料として利用でき、省エネ型廃水処理システムなどとしての活用に大きな期待が寄せられています。しかし、微生物がなぜ人工的な電極に電気を流す能力を持っているかについては不明でした。

研究グループは、自然環境中にも電極や「電線」が存在し、それらを使って微生物が電子の授受をしている可能性を考えました。この考えを実証するため、2種の土壌微生物（ゲオバクターと

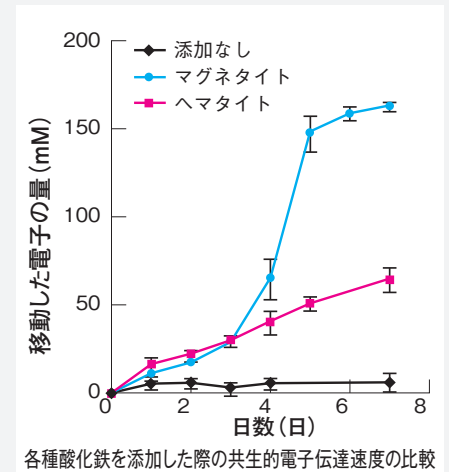
チオバチルス）が共生しているところに、環境中に普遍的に存在する導電性酸化鉄のマグネタイト粒子を添加したところ、従来の共生的代謝に比べて代謝速度が10倍以上に上昇することを発見しました。このことは、導電性酸化鉄中を電子が流れ、2種の微生物の代謝が促進されたことを意味しています。この現象を「電気共生」と名付けました。

今回の発見は、環境中の微生物の共生関係を説明するものとして、またバイオエネルギープロセスを高効率化するための基盤として、広くインパクトを及ぼすものです。今後は導電性



細菌の細胞の間にマグネタイト粒子が入り込み、それらを通して電子のやり取りが行われていると考えられる。

金属粒子を利用する微生物に関する知見を深めると共に、微生物燃料電池やバイオガス生産プロセスの高効率化に応用していきたいと考えています。



同じ酸化鉄でも、半導体のヘマタイト（赤鉄鉱）を添加したものより、導電性酸化鉄のマグネタイト（磁鉄鉱）を添加したものが、格段に早く電子が移動する。



空気中の物質を鋭敏に感知して発光する フィルム（有機／金属ハイブリッドポリマー）を開発

物質・材料研究機構 先端的共通技術部門 高分子材料ユニット電子機能材料グループの樋口昌芳グループリーダーと佐藤敬博士研究員は、空気中の物質を感知して発光する特性を示す有機／金属ハイブリッドポリマー※を開発しました。

熱や電気などの外部刺激によって発光、消光する物質は、発光センサーや表示素子としての利用が大いに期待され、実用化が始まっているものもあります。一方、蒸気などの気体を検知して光る物質は「ベイボルミネセンス物質」と呼ばれますが、報告例は少なく、実用化を見据えた研究もされてきませんでした。

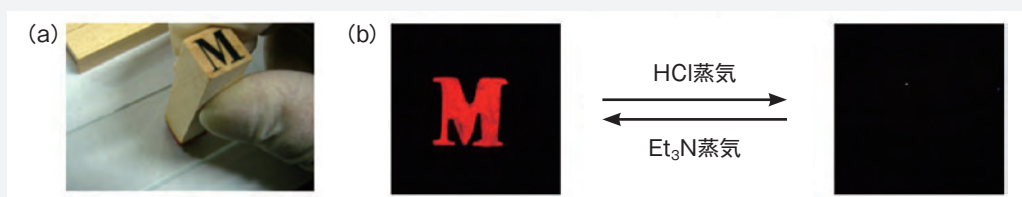
樋口グループリーダーらは、希土類金属イオンであるユウロピウムイオンと有機分子が数珠つなぎになった有機／金属ハイブリッドポリマーを合成。このポリマーが赤色に発光する特性を持ち、酸性の蒸気にかざすと赤色発光が消え、アルカリ性の蒸気にかざすと再び赤色発光することを発見しました。

これまでのベイボルミネセンスは、蒸気を受けたときの発光強度の変化がわずかだったり、変化に時間がかかったり（数分から数十分）と、実用性に問題がありました。しかし、今回開発したベイボルミネセンスは、①蒸気を感知して発光

状態から消光状態へ大きく発光強度が変わる ②応答が速い（蒸気をかざして数秒で変わる） ③発光、消光を繰り返し行える ④フィルム化したり印字したりできる——といった優れた特性を持っています。

今回の成果により、人体に危険な気体の発生やその存在を文字などで直接発光表示できるセンサーディスプレイの開発など、応用に向けた研究が大きく進むことが期待されます。

※有機／金属ハイブリッドポリマー
有機分子と金属イオンがナノスケールで精密に複合化（ハイブリッド化）した高分子（ポリマー）の総称。



(a) ユウロピウムイオンを含む有機／金属ハイブリッドポリマーを印字する。
(b) 印字部分をアルカリ性のトリエチルアミン (Et₃N) の蒸気にかざすと赤く発色し、酸性の塩酸 (HCl) の蒸気にかざすと赤色発光が消える。



戦略的創造研究推進事業さきがけ 生命現象の革新モデルと展開
研究課題「歴史統計を活用した非特異的感染症対策の予防効果推定」

新しい感染症のモデルを見つけない



にしうら・ひろし 1977年生まれ。
神戸市立工業高等専門学校電気工学科を3年修了・中退後、宮崎医科大学医学部卒業。マヒドン大学熱帯医学学校、ロンドン大学インペリアルカレッジ医学部感染症疫学教室客員研究員、チュービンゲン大学医系計量生物学研究所研究員、コトレヒト大学博士研究員、長崎大学熱帯医学研究所准教授などを経て、2011年4月から現職。保健学博士。09年～現在、JSTさきがけ研究員(兼任)。趣味はトライアスロン、マラソン。

香港大学 李嘉誠医学院 公共衛生学院
西浦博 助理教授



電気工事士から医師志望へ 医学から理論疫学へ

中学の頃は、太陽光発電や常温核融合など次世代エネルギーに関心を持っており、エンジニアになりたくて、工業高等専門学校の電気工学科に進学しました。2年生の冬に阪神淡路大震災が起こり、緊急時に医師が果たす社会的貢献の素晴らしさを肌で感じました。悩んだ末に医大へ進路変更し、宮崎で太陽の下、6年間を過ごしました。医大では発展途上国でフィールドワークばかりしててまじめな医学生ではなかったのですが(笑)、途上国の保健医療現場を目の当たりにして、予防医学や疫学の大切さを身に染みて感じました。例えば、途上国ではしかのワクチン接種を計画する時、流行がどのような状況にあって、それに対して何の対策をすべきか、対象集団の事情が分かっていると、予防接種に高い効果を望み難くなります。「どのように感染症は広がるのか?」、「どのようにワクチンを接種すれば最大の効果が上げられるのか?」そういうことを考えていた頃出会ったのが、感染症の理論疫学研究でした。

理論疫学は、数理モデルと観察データの両方を利用して、感染が拡大するメカニズムや効果的な予防策を理論的に解明していく学問です。医学生時代にこの分野の第一人者であるロンドン大学のロイ・アンダーソン教授が執筆した専門書に出会い、自らも入門研究を報告して研究の面白さに魅了されました。1年間の研修医生活の後にマヒドン大学熱帯医学学校に進むためにタイに渡り、その後アンダーソン教授に弟子入りを直談判して温かく受け入れていただきました。イギリスの後も、ドイツのチュービンゲン大学、オランダのユトレヒト大学、香港大学など専門研究が活発な現場で働く機会に恵まれてきました。



過去の記録やカルテが 新しい発見の宝庫になる!

現在、JSTさきがけで「歴史統計を活用した非特異的感染症対策の予防効果推定」を研究課題にしています。この研究では、膨大な過去の感染症の流行記録やカルテを徹底的に調べ上げ、流行の疫学的特徴や対策の有効性などを統計学的に明らかにしています。例えば、天然痘患者の検疫や隔離がどの程度有効であったか、肺ベストがどれくらいヒトからヒトへ伝播しやすいのかについて、遠い過去のデータを数理モデルによって分析しています。最近では見られなくなった感染症について知りたい時や、今日の社会では経済的あるいは倫理的な問題を理由に試験的に実施できない流行対策の有効性などについて、歴史資料に基づいて実証的研究ができることがこの課題の最大の魅力です。また、さきがけ研究を開始した2009年には、新型インフルエンザの世界的流行がありました。リアルタイムで情報を入力し、分析結果を即座にWHO(世界保健機関)や政府機関に提供する研究活動も、さきがけ研究の歴史統計分析の一貫として実施してきました。



パンデミックを経て 研究課題がより明確になった

さきがけ研究では、パンデミックを始めとする感染症流行のリアルタイム分析を通じて、感染・死亡リスク、水際対策やワクチンの有効性などの研究課題について掘り下げる機会を得ることができました。また、流行初期における感染リスクの推定や予測方法の見直しなどを通じて、数理モデルを利用した研究の問題点や改善すべき課題について少しずつ明らかにしつつあります。

今後、感染症流行のリアルタイム分析のために必須のデータを明らかにし、既存の数理モデルを実践的に適用するための課題を明確にしたいと考えています。現実の問題を分析するためには、既存の数理モデルはさまざまな技術的欠陥を抱えており、十分でないことが明らかにされてきました。本当に重要な情報だけを抽出するために、観察データに対応した新しいモデルを提唱し、自分が生きている間にその応用を確立するという野望を抱えています。

マラソンが趣味という西浦さんは、香港・マカオなどのマラソン大会にも多数出場経験を持つ。写真は「マカオマラソン」(2011年12月)での激走の模様。



スペイン風邪が大流行した1918~19年当時に日本帝国内務省が発行したマスク着用を啓発するポスター。「恐るべし『ハヤリカゼ』の『バイキン』!」「マスクをかけぬ命知らず!」と書かれている。



TEXT: 羽柴重文 / PHOTO: 坂口トモキ