

JST news

未来をひらく科学技術

特集

未来の社会インフラを 軽くて強い 炭素繊維複合材料でつくる

5

May
2018

「新陳代謝」するセラミックスで ジェット機を飛ばそう!





表紙解説

特集1のCOIプログラムの金沢工業大学「革新材料による次世代インフラシステムの構築拠点」でいち早く実用化された「カポコーマ・ストランドロッド」の断面をモチーフにしたイメージ。炭素繊維を束ねたワイヤ状の複合材料には、北陸伝統の「組ひも」の技術が採り入れられた。ガラス繊維の鞘で炭素繊維の芯を包む「芯鞘構造」によって、しなやかなワイヤを実現している。

03

特集1

未来の社会インフラを
軽くて強い
炭素繊維複合材料でつくる

08

特集2

「新陳代謝」するセラミックスで
ジェット機を飛ばそう!

12

はかる 第12回

世界初! 液体中の1原子の
観察に成功

NEWS & TOPICS

漆ブラック調バイオプラスチックの
実用化に向けて優れた耐傷性と
蒔絵調印刷を実現 ほか

16

さきがける科学人

社会的使命感から
エネルギーの研究をスタート

東京大学 生産技術研究所 マイクロナノ学際研究センター
准教授 野村政宏

編集長: 上野茂幸
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: 株式会社丸井文社

特集1



うざわ きよし
鵜澤 潔

研究リーダー
金沢工業大学 教授
革新複合材料研究開発
センター 所長
COI 研究推進機構 副機構長
1985年 上智大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年 本田技術研究所入社。2003年 東京大学助手、07年 講師、特任准教授。12年 金沢工業大学教授、13年より現職。専門分野は複合材料を用いた軽量構造の設計開発技術。

いけばた しょういち
池端 正一

プロジェクトリーダー
大和ハウス工業 副理事
技術本部総合技術研究所
研究統括室部長
金沢工業大学
COI 研究推進機構 機構長
1976年 鹿児島県立鹿児島工業高等学校建築学科卒業。同年大和ハウス工業入社。2002年 同社本社住宅商品開発部次長、12年 同社総合技術研究所研究フロンティア技術研究室長、18年より現職。ビジネスマッチングを全国で展開し、多くの産官学の連携に参画している。

未来の社会インフラを
軽くて強い
炭素繊維複合材料でつくる

鉄の4分の1の軽さで、10倍の強度を誇る炭素繊維。10年後の社会に必要な技術開発を進める「センター・オブ・イノベーション(COI)プログラム」の金沢工業大学COI拠点は、鉄やコンクリートだけでは実現が困難な次世代インフラの構築を目指し、「革新材料」や「革新製造プロセス」を開発している。実用化に近い成果の1つが、北陸伝統の繊維技術を生かした耐震補強材だ。日本工業規格(JIS)の認証が見込まれ、描いた未来に向かって着実に歩んでいる。

金沢工業大学 COI 拠点が目指す未来像



図1

都市・住宅インフラ

深刻化する限界集落や独居老人の増加などの社会の変化に対応し、革新素材により柔軟な設計が可能で、建設後も移設やリサイクルが容易な都市・住宅インフラの実現へ。

社会インフラ

超軽量、高強度で腐食にも強い革新複合材料により、災害にも強く、維持費用が限りなくゼロに近い社会インフラが実現。現場施工の工期短縮も可能に。

海洋インフラ

深海掘削に必要な大型の長尺パイプや洋上風力発電に必要な大型ブレード(羽根)など、現状にない長大構造物を実現し、軽量で高強度、耐腐食性インフラを実現へ。

北陸地方の繊維産業を基盤に次世代インフラをつくる

高度経済成長期に集中的に整備された道路やトンネル、橋。半世紀を過ぎて、その多くが大規模補修の時期を迎えている。これらのインフラ構造物の材料である鉄やコンクリートは、風雨に曝されて経年劣化する。事故を防ぐには定期的なメンテナンスと補修が欠かせない。

くしくも同じ高度経済成長期半ばに誕生したのが、軽くて、強く、さびない、炭素繊維だ。材料として使うためには、樹脂を含ませた複合材料とする。この炭素繊維複合材料(CFRP)は、軽量化や低燃費化が必要な航空機や車体で需要が高まっている。CFRPの利用を土木建築や海洋の分野にも広げ、長期にわたって安全安心を保証する大型インフラの実現に挑むのが、2013年に発足した金沢工業大学COI拠点だ(図1)。CFRPをインフラ構造に使えば、軽量で施工が簡単になり、長寿命でメンテナンスが不要になる。風力発電の羽根に使えば、より大型化して発電効率が上がり、エネルギー自給につながる。

「さびない橋やトンネル、軽量で移設やリサイクルが簡単な住宅など、炭素繊維は今までの鉄やアルミニウムでは実現できなかったインフラ構造物を生み出します」と、プロジェクトリーダーを

務める大和ハウス工業の池端正一副理事は語る。鉄に比べると価格は高いが、「維持費用が少なく済むので、初期投資が大きいても費用低減につながります」と力を込める。

普及している複合材料製品の多くは、熱で固まる熱硬化性樹脂が使われているが、成形に時間や費用がかかる。その上、一度成形すると再成形できない。そこで、金沢工業大学COI拠点が着目したのが、熱可塑性樹脂だ。熱を加えると柔らかくなるので、短時間で連続成形が可能で、費用を低減できる。樹脂を改良することで、CFRPの硬さや耐熱性も変えられる。

価格の他、CFRPはリサイクルの難しさも課題で、従来の工法では航空機や自動車部材に加工される際の材料の歩留まりが低く、多くの廃材が出る。また、熱硬化性樹脂では炭素繊維と樹脂を分離するのに膨大な熱が必要で、環境負荷が大きい。熱可塑性樹脂であれば、熱を加えることで再加工が可能で、リサイクルも容易になる。

「CFRPの7割を日本が生産しているにもかかわらず、自動車や建材などの実用化は欧米が中心に進んでいます」と、研究リーダーで金沢工業大学の鶴澤潔教授は話す。かつては日本の経済を支えた繊維産業だが、近年は安い労働力を求め、多くの企業が生産拠点を

海外に移してきた。しかし、古くから繊維産業が盛んな北陸地方では、世界と対抗できる高いレベルの技術を持つ企業が地元で根付いている。「企業がすでに持っているCFRPの生産力や加工技術に磨きをかけ、大型構造物材の連続成形を実現すれば、これまで以上に多様な分野への進出が可能になります」と鶴澤さん。

北陸を中心に日本の基幹産業に育てようと、金沢工業大学を中核拠点到研究体制が生まれ、革新的なCFRPの開発と製造プロセスの開発が始まった。

異業種、異分野の共同研究で繊維企業が建材を開発

金沢工業大学COI拠点には、予想を超える29もの機関・企業が参画した。「一企業のみだけではなかなか開発が進まないことがあります。実用化に近づけようと、各企業が技術をCOI拠点到持ち寄りました」と鶴澤さん。これらの企業が金沢工業大学革新複合材料研究開発センター(ICC)に集い、まさにCOIプログラムの特長である「一つ屋根の下(アンダーワンルーフ)」で、異業種、異分野の専門家が知恵を出し合っ、CFRPの製造に革新を起こそうとしている。ICCには大型構造物材を実際に組み立てられる大空間が備わっ



図2 革新複合材料研究開発センター(ICC)中央の大型設備スペース。大型複合材料の成形加工や組み立て、材料試験評価などに取り組める。一企業ではそろえるのが難しい分析装置も並び、「アンダーワンルーフ」のコンセプトの下、異業種、異分野の企業の研究者や技術者が交流を深め、基礎研究から製品開発までオープンな環境で研究に取り組む。

ている(図2)。ラボエリアは壁のないオープンスペースで、機の仕切りを最小限にとどめるなど、技術者と研究者同士が自然とコミュニケーションを深められる設計だ。

「企業独自の研究をさらに加速できるように、知財ルールや拠点の運営方法を工夫しています」と説明するのは、ビジョン戦略チームの斉藤義弘リーダーだ。プロジェクトへの企業参画や研究領域の戦略策定を行っている。「COIより前に得られた成果は可能な限り権利化した上で参画していただき、他の企業や大学などの支援によって研究を発展させる仕組みです。参画企業の成果をしっかり守る一方で、研究開発上での課題を共有し、一企業だけでは克服し難い課題の解決も期待できるようになりました」。

「アンダーワンルーフ」が機能した好例が、繊維企業の小松精練(石川県能美市)と共同開発した炭素繊維を束ねたワイヤ状の複合材料、「カボコーマ・ストランドロッド」だ(図3、図4)。

「北陸地方の伝統産業である組ひもの技術を採り入れました」と、小松精練技術開発部の林豊主幹が開発の経緯を語る。「炭素繊維は軽量で高強度ですが、曲げには弱く、束ねただけでは曲げた時に折れてしまいます。炭素繊維を束ねた芯を、筒状に編み込んだが

ラス繊維の鞘で覆うという、組ひもの芯鞘構造で、強さとしなやかさを兼ね備えたワイヤを実現しました」。

建材企業ではなく、繊維企業による開発であることは業界から驚きをもって迎えられた。小松精練が特に苦心したのは、成形に合うように樹脂を改良することだった。形状を安定させるため、熱可塑性樹脂を炭素繊維の束に浸み込ませるが、樹脂の粘性を均一にすることが難しかったという。鶴澤さんがこう続ける。「樹脂企業出身の技術者の協力を得て樹脂を改良し、問題解決できました。単に浸み込みやすくなるだけでなく、今までよりも数倍早くつくる技術の開発に成功しました」。

COIの研究体制を生かせば、用途はさらに広がると鶴澤さんは予測する。



図3 芯材となる炭素繊維の束の周りをガラス繊維の組ひもで覆い、炭素繊維の束にゆるやかなより(ストランドロッド)を加えて強度を向上させた。

「金沢工業大学COI拠点の良さは技術シーズを持った企業だけでなく、そのシーズを利用する企業も参加していることです。例えば、鉄筋コンクリートに用いる鉄筋の代わりに、カボコーマ・ストランドロッドを構造材とすることも検討し始めています」。

カボコーマ・ストランドロッドは海外でも高く評価され、今年3月には複合材料の国際見本市であるJECワールド



図5 JECワールド2018「イノベーション・アワード」受賞トロフィー



図4 長さ約160メートルのロールで約12キログラムという軽さを実現した。



■図6 小松精練旧本社棟の改築工事に初めて「カボコーマ・ストランドロッド」が用いられた。建物に繊細なレースをかけるような印象的な外観で、同時に耐震補強を実現する。

日本で初めて炭素繊維による耐震補強材の標準化の実現へ

完成したカボコーマ・ストランドロッドは、まず耐震補強材としての実用化を目指し、小松精練の旧本社棟の改築工事に用いられた。地震大国の日本では、いつ何時大きな地震が起こっても不思議はない。新築のみならず、既存の建築物の耐震補強が求められる。旧本社棟の屋上から地面へと、1000本以上のカボコーマ・ストランドロッドが張り巡らされた様は、北陸の冬の風物詩「雪吊り」を思わせる(図6)。

これを皮切りに、長野県の善光寺の重要文化財「経蔵」の耐震補強にも使用された(図7)。鉄よりも柔らかく、さびや結露に強いので、建造物本体を傷つけることがない。作業現場への運搬も容易で、予定よりも工事期間を短縮できた。林さんがこう続ける。「補強材を取り付ける天井裏は、足を踏み外しそうになるほど狭い空間で、重い金属製の筋交いを持ち運ぶのは大変です。その点、カボコーマ・ストランドロッドは丸められて、その場で必要な形に自在に加工できます。作業が非常に楽になったと職人さんに好評でした」。善光寺での

実績が評価され、世界遺産の富岡製糸場など導入例は増え続けている。

耐震補強材としてのCFRPの性能や特性の評価は標準化されていない。新しい技術の標準化は、業界団体を組織して認証機関や関連省庁に働きかけていくのが通常だ。小松精練は経済産業省が新設した「新市場創造型標準化制度」を活用することにした。新たな市場の創出が期待できる技術であれば、業界団体が存在しない未成熟な産業でも、その標準化を後押しする制度で、これにより小松精練1社だけでも申請が可能になった。しかし、そのためにはカ

ボコーマ・ストランドロッドの性能を評価する膨大な試験が求められる。地震の揺れから建築物を守る強度があるのはもちろんのこと、長期間の使用に耐えられるかも確認する。

ここでもCOIの仕組みが機能した。金沢工業大学をはじめ、COI拠点に参画する石川県工業試験場、物質・材料研究機構の協力の下で評価試験を積み重ね、今秋には炭素繊維を使った耐震補強材として初めて日本工業規格(JIS)化の認証を受ける見通しだ。

耐震改修促進法では、増床と見なされなければ、炭素繊維を耐震補強材として用いることができる。一方で建築基準法では、建造物の柱や梁、土台部分に使用する構造材として炭素繊維の使用は認められていないため、標準化は大きな一歩だ。より安全安心で使いやすい建築材料として、耐震補強以外にも用途を広げ、普及が進むことが期待される。

革新材料を実用化して持続可能な社会を目指す

インフラ構造物の共通部材は大型平板と長尺構造材で、これらを超高速かつ連続成形するための材料や技術開発が進み、カボコーマ・ストランドロッドの他にも革新材料が生まれている。

従来の熱可塑性CFRPシートは、プレス加工すると圧力でしわや破れが生じやすく、成形が難しかったが、サンコロナ小田(石川県小松市)は、高強度を維持したまま、短時間に複雑な形状にプレス成形できる熱可塑性樹脂シートを開発した(図8)。また、金型とプレス機を用いた場合、加工できるサイズは限られていたが、大同工業(石川県加賀市)は高速かつ低価格で長尺部材を成形する技術を開発し、金沢工業大学COI拠点が目指す建材や洋上風力発電用の大型ブレード(羽根)の実現に近づいた(図9)。

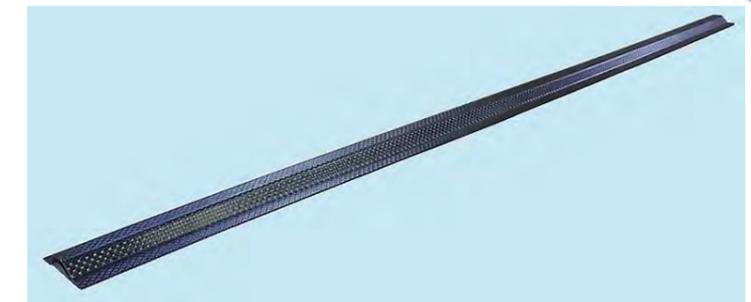
ICC内では、長尺の熱可塑性CFRPシートを連続成形できるダブルベルトプレスト装置も開発されている(5ページ図2右端の青い機械)。熱硬化性樹



■図7 2017年1月に行われた善光寺「経蔵」の耐震補強の施工状況



■図8 サンコロナ小田が開発したスタンパブルシート。炭素繊維のテープ片をランダムに配置することで、あらゆる方向に強く、変形させられる。短時間で複雑な形状に加工できる。



■図9 大同工業が開発したロールフォーミング(薄板を複数のロール間を通過させながら少しずつ加工する技術)で、長尺部材加工を実現し、熱可塑性CFRPを高速かつ低価格で成形する量産加工技術の確立を目指す。

脂を用いた場合よりも、格段に高速かつ低価格となる成形プロセスの確立を目指している。

企業が持ち寄った技術の蓄積はICCのノウハウや研究開発の核となり、複合材料分野における大規模な産学官連携プラットフォームの実現に寄与している。ドイツの炭素繊維産業の研究開発拠点「CFKバレー」とも連携協定を結んだ。「金沢工業大学COI拠点が描く未来像の全てを、COIプログラムの研究開発期間内で実現することは難し

いでしょう。民間資金を含め外部資金を積極的に獲得し、COIプログラム終了後も産学官連携の研究拠点として自立し、研究開発を続けていく予定です。日本のみならず、世界が抱える課題を解決していきます」と鶴澤さんは力強く語る。

10年先だけでなく、数百年先まで持続可能な安全安心な社会の実現へと、金沢工業大学COI拠点の挑戦は続く。



さいとう よしひろ
斉藤 義弘
 金沢工業大学
 COI 研究推進機構
 機構運営グループ
 ビジョン戦略チームリーダー

うざわ きよし
鶴澤 潔
 研究リーダー
 金沢工業大学
 COI 研究推進機構 副機構長

いけはた しょういち
池端 正一
 プロジェクトリーダー
 金沢工業大学
 COI 研究推進機構 機構長

はやし ゆたか
林 豊
 小松精練株式会社
 技術開発部 主幹

「新陳代謝」するセラミックスで ジェット機を飛ばそう!

地球温暖化防止に向け、航空機の軽量化が大きな課題となっている。ジェットエンジンの材料を金属からセラミックスに替えることができれば、大幅な軽量化が実現するため、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減につながる。しかし、セラミックスは、衝撃に弱い。この弱点が実用化を阻んできた。このような中、超高速で亀裂を自己修復する「自己治癒セラミックス」の開発でセラミックスの弱点を克服したのが、横浜国立大学の中尾航教授と物質・材料研究機構(NIMS)の長田俊郎主任研究員のグループだ。

二酸化炭素削減につながる 航空機の軽量化

現在、航空機のジェットエンジンにはニッケル合金が使われている。一方、セラミックスはニッケル合金に比べて比重が4分の1と軽量な上、高温に強く、耐腐食性がある。しかも、熱伝導性が低いため、エネルギー変換効率が高い。

従って、航空機のジェットエンジンのタービン翼を、ニッケル合金からセラミックスに置き換えることができれば、約15パーセントの燃費向上が見込める。これは国際線の場合で換算すると年間6億トン以上のCO₂削減効果であり、日本の現在の総CO₂排出量である約13億トンの約半分に相当する(図1)。しかし残念ながら、いまだに実用化に

は至っていない。最大の理由は、セラミックスがもろく衝撃に弱いからだ。横浜国立大学大学院工学研究院の中尾航教授と物質・材料研究機構(NIMS)構造材料研究拠点の長田俊郎主任研究員のグループは、ALCA実用技術化プロジェクトでこの弱点を克服し、亀裂を自己修復する「自己治癒セラミックス」の実用化に挑んでいる。

なか お わたる
中尾 航

横浜国立大学
大学院工学研究院 教授

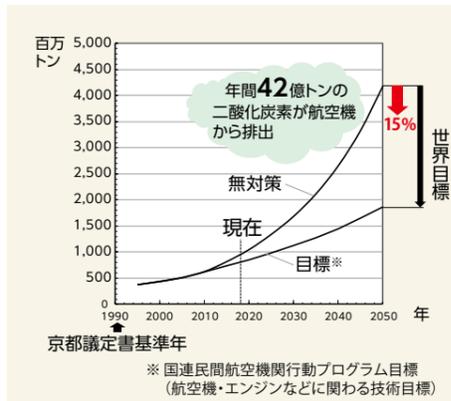
2003年 東京工業大学大学院理工学研究科修了。博士(工学)。横浜国立大学大学院工学研究院准教授を経て、17年より現職。12年よりALCA実用技術化プロジェクトにおいて「自己治癒機能を有する革新的セラミックスタービン材料の開発」に取り組む。

おさだ としお
長田 俊郎

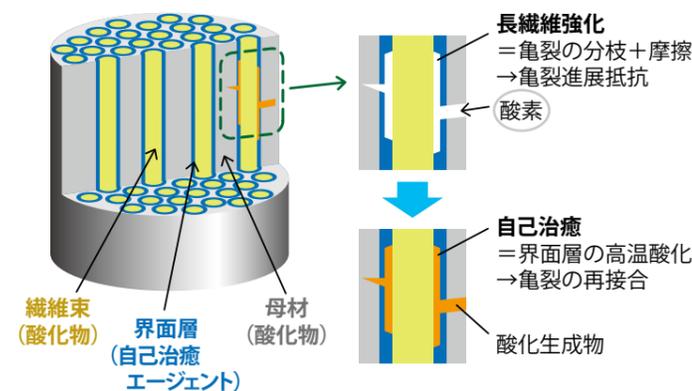
物質・材料研究機構
構造材料研究拠点
超耐熱材料グループ
主任研究員

2009年 横浜国立大学大学院工学研究院修了。博士(工学)。同年、物質・材料研究機構(NIMS)ポスドク研究員、12年 横浜国立大学特任教員、13年 NIMS研究員を経て、17年より現職。16年 オランダ・デルフト工科大学客員研究員(日本学術振興会海外特別研究員)。

■図1 国際航空セクター全体における
旅客機の二酸化炭素排出量



■図2 長繊維強化自己治癒セラミックスの模式図



セラミックスに新陳代謝の 機能を持たせる

自己治癒セラミックスとは、その名の通り、亀裂などの損傷を自己修復する機能を持つセラミックスのことだ。セラミックスの母材であるアルミナ(酸化アルミニウム、Al₂O₃)などの酸化物と、自己治癒機能を発現させる炭化ケイ素(SiC)などの「自己治癒エージェント」で構成される。

「生物の身体には、新陳代謝の機能が備わっています。傷や病気を自然に治す自己治癒も新陳代謝の一種です。この新陳代謝の機能を人工材料でいかに実現するかということに焦点を当てて、自己治癒セラミックスの研究開発を進めてきました」。こう説明するのは、2012年度よりALCAで研究開発代表者を務める中尾さんだ。

「自己治癒セラミックスでは、亀裂が入った箇所に自己治癒エージェントをいかに効率良く送り込み、適切な化学反応を起こさせるかが、研究開発の焦点となります。それを実現できたことが、大きなブレークスルーとなりました」と中尾さんは振り返る。

自己治癒セラミックスの研究開発の歴史は古く、1960年代頃から欧米を中心に進められてきたが、亀裂の完治と強度の回復は実現していなかった。これを実現したのが横浜国立大学の安藤柱名誉教授だ。1995年に見いだされたアルミナとSiCで構成された自己治癒セラミックスは一躍脚光を浴びた。

この自己治癒セラミックスでは、亀裂が入ると、自己治癒エージェントであるSiCが、亀裂に伴い侵入してきた酸素と化学反応を起こし、酸化ケイ素(SiO₂)を生成する。このSiO₂が亀裂を埋めることにより、亀裂が修復されるという仕組みだ。

中尾さんは安藤研究室に助手として着任した2003年から、この研究を始めた。「当時、亀裂はどこで発生するかわからないため、アルミナ全体に均一にSiCを分散させていました。しかし、それでは非効率で自己治癒力が弱いため、実用化には程遠いと感じていました。そこで発想を大きく転換し、自己治癒エージェントを亀裂に送り込むのではなく、自己治癒エージェントのあるところに亀裂ができるようにすれば良いと考えたのです」。

繊維状のセラミックスで 新陳代謝を実現

中尾さんはALCAに採択されたのを機に本格的に研究開発に着手し、2014年には「長繊維強化自己治癒セラミックス」を完成させた(図2)。

細長い繊維状のセラミックスを用意し、その表面をSiCでコーティングする。その繊維を束にしたものを一方向にきれいに並べ、さらにその周りをセラミックスの粉(母材)で覆う。一緒に焼き固めれば新陳代謝するセラミックスの完成だ。

SiCの存在する界面層は、芯となるセ

ラミックス繊維に比べて強度が低い。外部からの衝撃を受けると、表面から進行した亀裂は繊維にぶつかると方向を変え、強度の低い界面層に沿って広がる。亀裂をSiCの存在する界面層に誘導するという、界面層の強度の低さを逆手に取った大胆な発想で効率的な自己修復を実現したのだ。

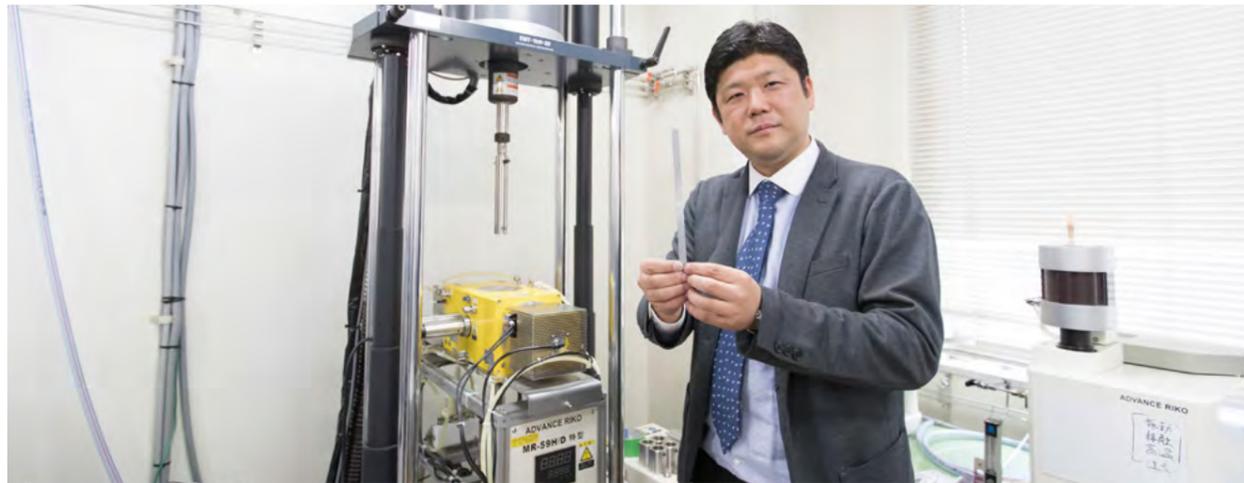
「SiO₂によって修復された箇所は亀裂が入る以前と同等以上の強度を示します。これは骨折が治癒した際に、骨折していない箇所よりも強度が増していることと似ています。つまり、長繊維強化自己治癒セラミックスは、自己治癒機能により使えば使うほど強度が増すという画期的なセラミックスなのです」。

自己治癒の詳細な メカニズムを解明

長繊維強化自己治癒セラミックスの開発の成功により、航空機のジェットエンジンのタービン翼への応用という究



繊維状のセラミックスをコーティングし、束にして焼き固める。右手の細い糸が長繊維強化自己治癒セラミックス。



テスト用のセラミック片を手にする中尾さん。左の装置で熱や力を加え、強度を調べる。

極の目標が視野に入ったという中尾さん。しかし、実用化に向けては、乗り越えなければならない課題が2つあった。

1つ目の課題は反応する温度域を広げることだ。2014年に完成させた長繊維強化自己治癒セラミックの場合、SiCと酸素を化学反応させ亀裂を修復できる温度域は、1200~1300度と狭かった。しかし、航空機のジェットエンジンに適用するためには、タービン翼入口の約1500度から出口の約600度まで、幅広い温度域で機能させる必要があった。2つ目の課題は、治癒にかかる時間の短縮だ。1000度の温度域で1000時間という長い治癒時間では、役に立つ材料にはならない。

この課題の解決に向け頼もしい相棒になったのが、NIMSの長田さんだ。2人の出会いは2003年まで遡る。中尾さんが助手として着任し、初めて指導した学生が当時4年生の長田さんだったのだ。自己治癒材料は使いものにならないといわれていたが、「いつかジェット機を飛ばしてやる」という熱い思いで



メカニズムの解明に挑んだ長田さん

研究を続けてきた。

NIMSの研究者として物質の構造や機能の解析に携わっていた長田さんは、まずは自己治癒機構を詳細に明らかにしようと考えた。

「亀裂を修復する際、なぜか1300度付近で液体のようなものが発生していることが知られていました。しかし、その正体は不明でした。そこで当時、日本で唯一、世界最高水準の性能を誇っていたNIMSの走査透過型電子顕微鏡(STEM)やエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を使って、観察と分析を試みました。その結果、この液体は『過冷却融体』であることが判明したのです」。

過冷却融体とは融点以下の温度にも関わらず流動性のある物質で、SiO₂が周囲のアルミナと反応してできたガラスだった。さらに細かく観察したところ、この過冷却融体が亀裂の中に広がり充填していくことで、SiCと酸素の反応が進みやすくなり、より多くの過冷却融体が生成されることがわかった。

さらに、STEMによる観察結果から、

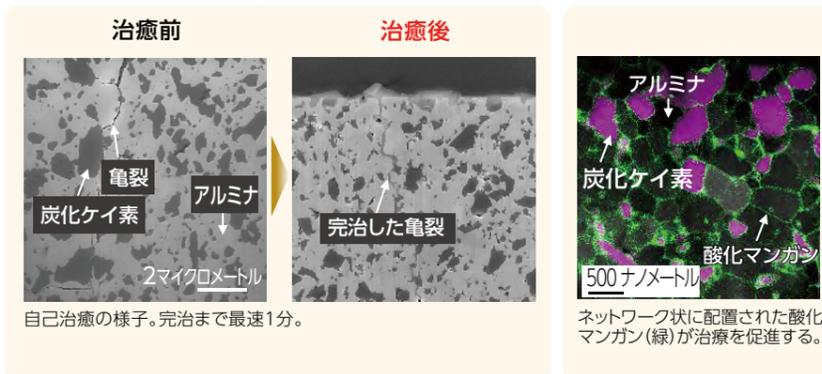
過冷却融体に変化したSiO₂の結晶や、SiO₂とアルミナの化合物でアルミナに匹敵する耐熱性を持つムライトと呼ばれる結晶などが亀裂部分を充填しており、強度が回復していることも確認された。

「骨折の自己治癒に例えると、SiCが酸素と反応してSiO₂が作られる過程を『炎症期』、SiO₂が周囲のアルミナと反応して一時的に過冷却融体を作り、亀裂を充填していく過程を『修復期』、そして過冷却融体が結晶化して強度が回復する過程を『改変期』ということができるでしょう。自己治癒セラミックは生体と同じようなプロセスで、組織を修復していたのです」と長田さんは説明する。

微量の酸化マンガンを修復時間を短縮

自己治癒機構の解明により、反応する温度域の拡大と、治癒にかかる時間の短縮の足がかりが得られた。修復の鍵と

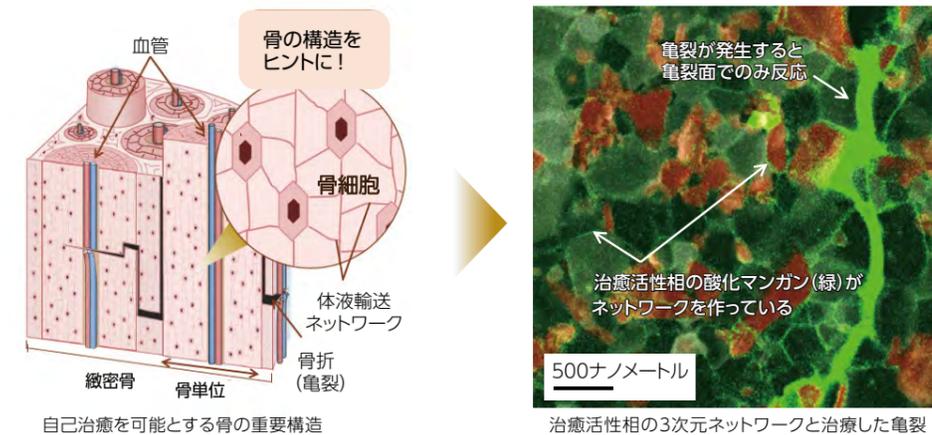
■図3 酸化マンガンの添加で完治時間を短縮



自己治癒の様子。完治まで最速1分。

ネットワーク状に配置された酸化マンガンを(緑)が治療を促進する。

■図4 骨の構造がヒントに! 活性相配置方法



自己治癒を可能とする骨の重要構造

治癒活性相の3次元ネットワークと治療した亀裂

なる過冷却融体をより低い温度で生成する物質を用いてはどうかと考えたのだ。「熱力学平衡計算」と呼ばれる手法を駆使し選んだのは、ガラスへの転移温度が低い酸化マンガンを(MnO)だ。

実際にMnOをアルミナに微量に混ぜた自己治癒セラミックを作ったところ、従来は1000度の温度域で1000時間かかっていた亀裂の完治時間を、なんと最速で1分程度にまで短縮できたのだ(図3)。

「添加するMnOの量によって反応速度は異なりますが、アルミナに対して、体積重量で約1パーセントのMnOを添加しただけで、反応速度を最大6万倍も上げることができた計算になります。また、STEMでこの自己治癒セラミックを観察したところ、MnOがアルミナの粒子と粒子の間の界面に偏析し、それが3次元の『体液輸送ネットワーク』の役割を果たしていることがわかりました」と長田さん。

私たちの体は骨折すると、血管から血液が流れ出し、折れた箇所に足場を作る。その後、周囲に張り巡らされた体液輸送ネットワークの働きにより、折れた箇所に修復に必要な細胞が効率よく集まるような仕組みを備えている。損傷がどこで起こっても修復に必要な物質が効率よく運ばれ、修復がより速く進むというわけだ(図4)。

それに対しMnOは、過冷却融体といういわば血液の役割を果たす物質を高速で生成するとともに、それを3次元状に配置することにより、損傷がどこで発生しても、効率よく修復に必要な反応

を起こすことができる。

長田さんは同様の方法で、MnO以外の活性化物質の探索も行い、反応する温度域のさらなる拡大にも成功した。

「ジェットエンジンのタービン翼も、設置箇所によって環境温度が大きく異なりますし、最近ではより低温環境での利用ニーズが高まっています。今後は社会のニーズに応じて最適な自己治癒セラミックを効率良く開発できるように、学術的な整備を進めていきたいと思っています」と今後の抱負を語る。

実用化の鍵は国際標準化

ALCAのプロジェクトは昨年度で2期目を迎え、「実用技術化プロジェクト」の段階に入っている。実用化に向けて、新たな強度基準の提案を進めている。

「従来の構造材料の場合、もともと持っている強度に対して安全率を掛け合わせて設計します。しかし、ここには自己治癒という機能は含まれていません。今後、自己治癒セラミックを実用化していくためには、自己治癒性を加味した新たな強度基準を設定する必要があります。そのため現在『自己治癒限界応力』というものを提案しています」と中尾さん。

従来の構造材料では、異物衝突など突発的に大きな応力がかかって破壊される場合を除いては、経年劣化による破壊がその多くを占めている。そのため安全率を掛け、構造材料としての強度や寿命を算出し設計に生かしてき

た。しかし自己治癒セラミックの場合、小さな損傷に関しては自己治癒という機能が発揮されるため、経年劣化は抑制される。とはいえ、損傷の速度や度合いが自己治癒の速度を上回るような応力が加わった場合は、破壊を免れない。その応力を自己治癒限界応力とし、新たな強度基準に設定しようというわけだ。

「航空機の場合、国際標準化が鍵を握ります。世界に先駆けて開発したこの自己治癒セラミックを国際線の航空機に搭載すべく、まずは自己治癒限界応力を国際規格化していく計画です。実用化の目標は2030年代前半を想定しています。それにより日本の技術力の高さを世界に示すと同時に、地球温暖化防止に貢献したいと願っています」。

自己治癒材料の可能性を信じ、あえてジェット機という高いハードルを据え研究開発に取り組んできた。努力が実を結びつつある今、中尾さんと長田さんは1日も早い実用化に向けて、決意を新たにしている。



2019年には、自己治癒材料の国際会議が横浜で開催される。アジア地域で初の開催となり、この領域の研究で日本の存在感を示す機会として期待されている。

第12回 液体中の原子をはかる

世界初!液体中の1原子の観察に成功

物質を構成する最小単位である原子。物質内での原子の並び方や振る舞いを観察できれば、それぞれの物質の特徴を理解できる。しかし、原子は非常に小さいため、実際に観察できるようになったのは2000年のことだ。以降、固体の原子の観察技術は大きく発展したものの、液体や気体中の原子、分子を観察することはできなかった。このような中、昨年12月に世界で初めて液体中の原子1個1個の動きの観察に成功したのが、東京大学生産技術研究所の溝口照康准教授だ。

液体や気体で原子の観察に挑戦

物質の特徴を理解するには原子の種類や結合の仕方、そして原子の振る舞いを知ることが重要だ。しかし原子1個の大きさは0.1ナノメートル(ナノは10億分の1)と非常に小さいため、長い間原子を見ることはできなかった。電子顕微鏡の発展により、ようやく原子1個を観察できるようになったのは2000年になってからだ。以降、さまざまな物質の特徴を原子レベルで解き明かそうという研究が世界中で進められている。このような中、東京大学生産技術研究所の溝口照康准教授は、液体中の原子1個1個や気体中の分子の観察に挑んでいる。

物質は、原子や分子の結合の違いによって、固体、液体、気体といった状態に分類される。固体は、結合が強く安定しているため観察しやすいが、液体や気体は、原子や分子が活発に動いているため観察するのが難しい。そのため、固体の原子は盛んに観察されてきたものの、液体や気体の原子や分子の観察はあまり進んでこなかった。「それならば自分が液体や気体の原子、分子観察

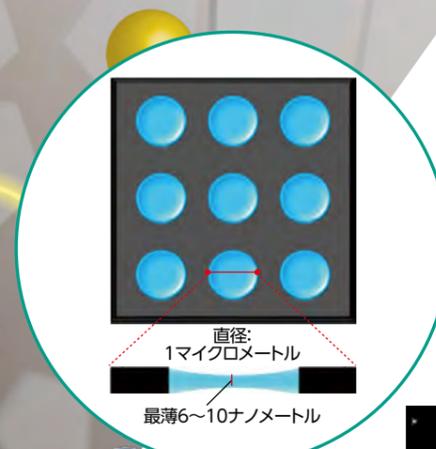
溝口 照康

東京大学 生産技術研究所 准教授

ナノ計測と理論計算、情報科学手法の融合により、物質の構造と機能の相関性を明らかにし、新たな物質設計指針の確立を目指す。JSTさきかけ研究者、京都大学 客員准教授。

(左: 金イオンの液体を見つめる溝口さん)

金イオンの動きの模式図。イオン液体中の五角形の分子に閉じ込められたり、そこから飛び出したりと、不均一に動く。



メッシュ状の基板にイオン液体の膜を張り、観察。



走査透過型電子顕微鏡

の第一人者になろう」と溝口さんは決意した。

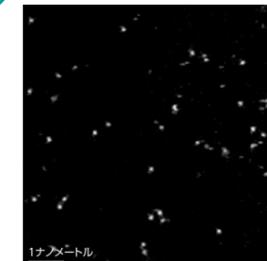
真空での液体観察の鍵、イオン液体

電子顕微鏡での観察は通常真空下で行われる。そこで着目したのが、液体でありながら真空下でも揮発しないイオン液体だ。イオン液体とは、プラスに帯電した有機分子とマイナスに帯電した有機分子からなる液体で、不燃性で電気伝導性を持つため、近年リチウムイオン電池の電解質などへの応用が期待されている。

溝口さんは、このイオン液体に金の原子がプラスに帯電した金イオンを溶かし、金イオンが液体中を動く様子を観察することにした。用いた電子顕微鏡は、走査透過型電子顕微鏡(STEM)だ。STEMは細く絞った電子線を観察したい試料に照射し、試料を透過してきた電子を検出することで像を可視化(イメージング)している。STEMには主に「明視野法」と「環状暗視野法」の2種類のイメージング手法があるが、重元素を優先的に可視化できる「環状暗視野法」を採用した。イオン液体を構成する有機分子は観察されず、重元素である金イオンのみ

を可視化できるからだ。

実はこれまでも液体中の原子を観察する試みは世界中で行われてきた。誰も成功しなかった理由の1つは、試料作製の難しさだ。STEMを使って原子の鮮明な像を得るには、試料の厚みをできるだけ薄くする必要がある。そのため、これまで透明な基板上に液体の膜を薄く張り



電子顕微鏡写真。白い輝点が金イオン。

観察する、といった試みがなされてきた。しかし、基板を電子線が透過する際に電子が散乱してしまうため、像をうまく得ることができなかったのだ。

観察のヒントはクライオ電子顕微鏡

そこでヒントにしたのが、昨年ノーベル化学賞を受賞したクライオ電子顕微鏡だった。クライオ電子顕微鏡は、透過型電子顕微鏡の一種で、たくさんの小さな穴が開いたメッシュ状の基板に凍結させたたんぱく質などの試料を固定し観察する。穴の上に乗っている試料に電子線を照射し、透過した電子を観察するため、基板による散乱の影響を考えなくて済む。これにヒントを得た溝口研究室の学生が、この基板の小さい穴にイオン液体の薄い膜を張って観察すれば、基板の影響を受けない薄い試料を作製できると考えた。実際、基板に開いた直径1マイクロメートルの穴に金イオンを溶かしたイオン液体を滴下すると、最薄で6~10ナノメートルのイオン液体の膜が作製できた。そして、この膜をSTEMで観察することで、イオン液体中の金イオン1個1個の挙動を捉えることに世界で初めて成功したのだ。

「この観察により、金イオンはイオン液体中に均一に存在しているわけではなく、液体中で五角形の分子に囲まれたごく狭い領域に長く留まったり、そこから飛び出すように大きく移動したりと、かなり不均一な動きをしていることがわかりました。理由は、イオン液体を構成する有機分子の構造や、金イオンの電荷によるものと考えられます。これはコン

ピューターシミュレーションにより以前から予測されていたことではありませんが、今回その正しさが裏付けられたこととなります」。

また、金イオンの移動量から、液体中の金イオンの拡散しやすさや、金イオンが持つ運動エネルギー量を見積もることに成功した。今後は、金イオンだけでなく、他の原子の液体中での挙動などを観察していくことで、液体中で起こっているさまざまな現象の解明を進めていく。

顕微鏡技術とシミュレーションの相乗効果を狙う

溝口さんは顕微鏡技術の開発に加え、新たなコンピューターシミュレーション手法も開発している。電子顕微鏡で得られたスペクトルを理論計算により解析することで、より多くの情報が得られるのだ。液体原子の観察と並行して、従来法では困難だった気体分子の観察にも成功している。「『分光シミュレーション』は、私の研究室が最も得意としている手法です。これを電子顕微鏡で測定した電子分光と融合することにより、ナノメートルレベルで気体の挙動を解析できるようになりました」。

計測手法と計算手法を組み合わせ、固体、気体、液体の界面での挙動を高い空間分解能や時間分解能で捉えることができれば、化学反応がどのようなプロセスで進行しているのかが詳細にわかるようになる。

これまでに2次元での可視化に成功している溝口さん。原子の挙動をより詳細に理解するため、次に目指すのは3次元だという。観測技術とシミュレーションをさらに進化させ、原子や分子の動きから、反応の仕組みを明らかにできれば、新たな溶媒や触媒反応、燃料電池の開発などさまざまな材料開発の道が開けるだろう。

「原子と電子は全ての物質の根源です。私の夢は、液体や気体に限らず、原子と電子の挙動を理解し、物質の特徴がどのように生まれるのか、その根本原理を解明することです。それにより、画期的な材料や製品開発に結び付けられたいですね」。

研究成果

戦略的創造研究推進事業ALCA
研究領域「ホワイトバイオテクノロジー」
研究開発課題「革新的合成法による高性能な高分子多糖類バイオプラスチックの創製と高機能部材化」

漆ブラック調バイオプラスチックの実用化に向けて 優れた耐傷性と蒔絵調印刷を実現

NECはこれまで、炭素循環型社会を実現するバイオプラスチックの普及拡大に向けて、非食用植物由来のセルロースを原料とする高度な環境調和性に加え、新たな付加価値として高級漆器が持つ独特の美しい漆黒(漆ブラック)を塗装無しで実現する「漆ブラック調バイオプラスチック」を、漆芸家の下出祐太郎氏(京都産業大学教授)と共同で開発してきました。

今回、漆ブラックの光学特性を保持しながら、布や紙で擦っても傷が入りにくい独自の添加成分の配合技術を開発しました。ガーゼ摩擦試験では100回程度擦っても光沢が保持され、一般的なプラスチックの中で最高レベルの耐摩耗性を実現しました。



耐傷性の改良(左)と蒔絵調印刷を施した漆ブラック調バイオプラスチック(右)

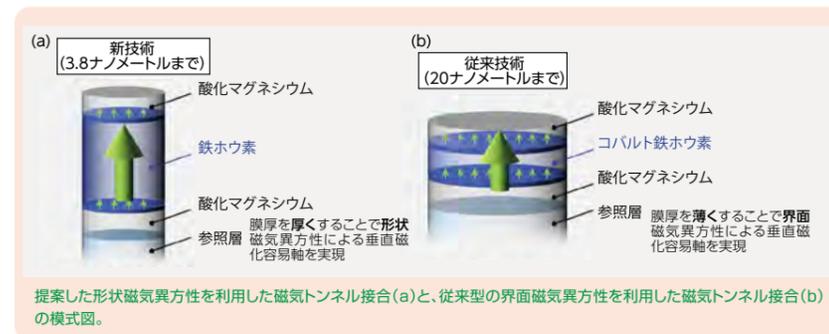
さらに、下出氏が描いた最高級の蒔絵をモデルとして、特殊印刷に強いメーカーなどの協力を得て、インク組成や印刷条件を最適化しました。これにより、射出成形されたさまざまな形状の漆ブラック調バイオプラスチックに、精緻かつ立体感のある高品質な蒔絵調

印刷が可能となり、量産品の大幅な付加価値向上を実現できます。今後、実用化に向けて改良を進めると共に、樹脂材料メーカーと連携体制を構築して、装飾性と環境調和性を重視する耐久製品や高級日用品などでの利用を目指します。

研究成果

産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)
革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)

世界最小直径3.8ナノメートルサイズの 磁気トンネル接合素子の開発に成功



磁石の向きを電氣的に制御して情報を記憶し、電気信号に変えて情報を読み出す不揮発性磁気メモリー(STT-MRAM)は世界中で研究開発が行われ、年内には本格的に量産が開始される見通しとなっています。このメモリーには、2つの磁石層で絶

縁体を挟んだ「磁気トンネル接合素子」が用いられますが、2010年東北大学のグループは、磁石の向きが絶縁体との界面に垂直に向こうとする性質を利用したSTT-MRAMの実用化のためのコア技術を開発しました。今後、STT-MRAMを大容量化、高性能化するためには、磁

気トンネル接合素子を持続的に微細化していく必要があります。しかし、微細化すると情報の忘れにくさと磁石の向きの反転のしやすさを両立することが難しくなります。研究グループは、磁気トンネル接合素子を縦に長い形状にすることで磁石が長手方向に向こうとする性質を用いて、2つの要件の両立が可能であることを発見し、直径3.8ナノメートルの世界最小サイズの素子の作製に成功しました。この技術によって、将来、現行の約100倍の100ギガビットクラスのワーキングメモリーが開発されれば、人工知能(AI)システムや自動運行システムの中核となる超低消費電力インテリジェントAIチップが実現されると期待されます。

話題

社会技術研究開発センター(RISTEX)
「科学技術イノベーション政策のための科学 研究開発プログラム」

科学に基づく政策へ情報発信サイトを公開

日本が直面する多くの社会的課題を解決するとともに、これをイノベーションに結びつけていくためには、客観的根拠と科学的方法に基づいた政策形成を実現することが欠かせません。今年2月、プログラムの研究成果の発信を目的としたポータルサイト「POLICY DOOR(ポリシードア)～研究と政策と社会をつなぐメディア～」を立ち上げました。雑誌や新聞といった一般的なメディアの手法を用いることで、研究成果をわかりやすく紹介しています。また、一般メディアと連携し、読者層の拡大にも挑戦しています。第1弾は、東日本大震災から7年となることを踏まえ、東京大学大学院工学系研究科の古田一雄教授らの研究成

果である「災害復旧シミュレーション」を取り上げ、シミュレーションから得られる情報を基に、迅速な復興に向けた対策や計画の策定の重要性を解説しています。「POLICY DOOR(ポリシードア)」では、コンテンツの拡充とともに、外部のメディアとの連携を進めることにより、プログラムの成果が政策形成に活用されるための支援を進めていきます。



開催報告

次世代人材育成事業 第7回科学の甲子園全国大会

埼玉県で初の開催 47都道府県の高校生が科学で熱戦

科学の甲子園全国大会は、各都道府県で選考された高校生らが6~8人でチームを組み、理科や数学、情報分野での知識、技能を競い合います。その第7回目が、3月16日から4日間にわたり埼玉県さいたま市で開催されました。今年度の都道府県選考会には、過去最多となる698校、8725人が参加し

ました。代表に選ばれた47校、361人が全国大会に出場し、筆記競技と3つの実技競技に取り組みました。会場となった体育館の広さと高さを生かした実技競技③では、各校4人が参加し、ワイヤレス給電を行う「受電コイル」とモーターで動く「羽ばたき機」を製作し、機体をラインに吊ってレースを行



いました。予選で順調にゴールした機体が決勝ではスタート直後落下するなどハプニングが続出する中、1位となったのは福井県代表藤島高等学校でした。優勝は神奈川県代表の栄光学園高等学校。7大会連続出場を果たし、念願の優勝旗を手に入れました。第2位は広島学院高等学校(広島県)、第3位は筑波大学附属駒場高等学校(東京都)という結果でした。栄光学園のキャプテンは、「メンバーがそれぞれの得意分野を生かして助け合い、大会を楽しめたことが勝因」と振り返りました。第8回大会(2019年3月)も埼玉県さいたま市で開催される予定です。

Profile

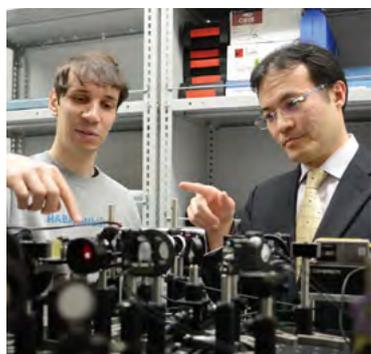
東京都生まれ。2005年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士(工学)。東京大学ナノエレクトロニクス連携研究センター特任助教、同学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構特任助教を経て、10年より現職。現在研究室は外国籍の研究者が過半数を占め、日々多様な言語が飛び交っている。



社会的使命感から エネルギーの研究をスタート

東京大学生産技術研究所
マイクロナノ学際研究センター
准教授

野村政宏
Masahiro Nomura



Q 研究テーマを一言でいうと？

A 「熱のマネジメント」。どこにでもある「熱」から「電気」を作り出す。

わずかな熱を集めて電気エネルギーに変換するデバイスを研究しています。例えば、トンネル内の排気ガスの熱を利用して電気を生み出し、センサーで収集した環境情報を定期的に発信するような装置です。

東日本大震災を経験して、研究者には物理的興味だけでなく社会的使命感も大切だとより強く感じ、エネルギーを研究しようと思い立ちました。熱は今世紀の重要テーマになると感じたため、熱からの電気エネルギー創出をテーマに選びました。自分が見いだした物理が原動力となって製品ができ、使用されて人や社会の役に立つことはとてもうれしいことですし、必ず実現したいと思っています。



Q 物理の面白さとは？

A 「世界で最初の人になれる」のが物理学の魅力。

数字が好きで子供でした。2歳の頃、私の好きなものを知るために母親がさまざまな図鑑を買ってくれたのですが、一番興味を示したのが古い電話帳で、びっしりと細かな数字が並んだページを面白そうに読んでいたそうです。算数が好きだったので小学校3年の時には高校の数学まで解いていて、将来は数学者になりたいと思っていました。

その後、自然科学や物理に興味を湧いてきました。大学受験では医者と物理学者の道迷ったのですが、一度きりの人生だからこそ好きなことをやりたいと、物理学の道に進みました。物理の魅力は、世界で初めての現象を発見した人間になれることです。10年くらい前のことですが、ナノ共振レーザーの実現に挑戦をして、世界で初めて発振に成功した時は、思わず歓声を上げてしまいました。あの感動は今でも忘れられません。



Q 人生で大切にしていることは？

A 走ることも研究も、仲間と一緒に取り組んでいく。

中学、高校と陸上部でしたので、走ることは大好きです。留学先のドイツにいた頃、現地のマラソン大会に参加してから日本に寄って、次の週末にはハワイのマラソン大会で走って直後に学会に出席、といったこともありましたが、第2回東京マラソンにも参加しました。人と一緒に何かをするのも好きなので、ランニングクラブの仲間と駅伝に参加することもあります。

走ることで研究でも、人との関わりを大切にしています。共に研究しているスタッフや学生が成長して社会に出て、さらに多くの人を育ててくれることは、社会の大きな財産になると思っています。「世界で最初」を実現する経験と感動を彼らにつなげることも、私の社会的な役目かもしれません。