ISSN 1349-6085

JST news

未来をひらく科学技術

5 May 2019

特集

人間と機械が調和する未来へ
声や視線で走る自動運転車

近付く人間と人工知能の距離
互いに寄り添う新しい社会へ

国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

JSTnews 5 May 2019

03 特集1

人間と機械が調和する未来へ
声や視線で走る自動運転車

08 特集2

近付く人間と人工知能の距離
互いに寄り添う新しい社会へ

12 数字に見る科学と未来

100パーセント細胞の人工組織が
再生医療の新時代を拓く

14 NEWS & TOPICS

世界初公開の冷凍標本多数
生命科学の最前線にも迫る
企画展「マンモス展」開催

16 さきがける科学人

視野の広さを生かし
研究チームを支える

ERATO水島細胞内分解ダイナミクスプロジェクト
研究推進主任　齊藤 知恵子

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。

3 すべての人に健康と福祉を　P12,15(下)
9 産業と技術革新の基盤をつくろう　P3,8,12, P15(上)(下)
10 人や国の不平等をなくそう　P14(下)
12 つくる責任 つかう責任　P8
17 パートナーシップで目標を達成しよう　P12

特集1

人間と機械が調和する未来へ
声や視線で走る自動運転車

ハンドルやブレーキに触れずとも、声や視線で自在に操作できる自動運転車が誕生した。名古屋大学未来社会創造機構の武田一哉教授らの産学連携プロジェクトは、高い運転技術とコミュニケーション能力を兼ね備えた自動運転システムを開発し、人間と知能機械が調和した社会を実現するプラットフォームの構築に挑む。

武田（たけだ） 一哉（かずや）
名古屋大学 未来社会創造機構
教授

2009～15年 CREST研究代表者。
16年よりOPERA領域統括。

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

人間の理解を深める技術で知能機械と協奏する社会へ

自動運転車でドライブを楽しむ未来は近い。歩行者や道路標識など周囲環境を認識するためのカメラやレーダー、自車位置を正確に把握するための衛星利用測位システム（GPS）や3次元地図など、完全自動運転の実現を目指して技術の精度は飛躍的に高まっている。

一方で、一般のユーザーが自動運転車を容易に操作するためのインターフェースは、十分に検討されてこなかった。「自動運転車が真に社会に浸透するためには、人間と自動運転車とのコミュニケーションが必要です」と名古屋大学未来社会創造機構の武田一哉教授は強調する。

自動運転車は人間の指示に従い、決められたコースに沿って目的地に向かって走る。しかし、そこに人間と車のコミュニケーションは存在しない。人間と機械は切り離された状態だ。「タクシーの運転手と乗客が言葉やジェスチャーでやりとりするように、人間の気持ちや行動を理解して走る自動運転車を作りたい」と武田さんは考えた。

自動運転車に限った話ではない。人工知能（AI）やセンサーの搭載で機械はどんどん賢くなり、人間が労働から得る対価や幸福は変容しつつある。知能機械は少子高齢化による労働力不足を補うと期待される一方で、人間の仕事を奪うという危機感があおられ、時には人間と対立する関係として描かれる。

人間と知能機械が協調・共生する新しい関係をつくるのが、武田さんが領域統括を務めるOPERA「人間機械協奏技術コンソーシアム」だ。「協奏」には、知能機械が人間の理解を深めながら適切に支援し協働する意味を込めた。「知能機械が人間とコミュニケーションできる技術を開発して、互いに調和して働ける社会を実現したい」と武田さんは願う。

目標はハーモウェア開発 6研究機関、29企業が集結

名古屋大学を幹事機関とする「人間機械協奏技術コンソーシアム」は、人間と知能機械が協奏するための基本ソフトウェア「ハーモウェア（Harmoware）」の開発を目指す（図1）。

ハーモウェアの出発点は、自動運転の基本ソフトウェア「オートウェア（Autoware）」だ。武田さんのCRESTチームで、名古屋大学大学院情報科学研究科の加藤真平准教授（当時）が中心となって開発した。車載専用のコンピューターにインストールするだけで自動運転を実現できる。高精度3次元地図を基に、周囲環境や自車位置の認識、的確な走行経路の策定、交通ルールに従った運転制御などの機能を備える。「オートウェアの持つ自動化の機能に、人間を理解する部品を加えたものがハーモウェアです」と武田さん。環境に応じて変化する人間の状態を捉える技術の開発や、人間の状態を評価するために参照するデータベースの構築によって、知能機械を活用したサービス向けのプラットフォームとして発展させる。

コンソーシアムには、早稲田大学、東京工業大学、産業技術総合研究所、徳島大学、九州工業大学の他、多種多様な分野から大学発ベンチャーを含む29の企業が参画している。それぞれの専門知識や得意とする技術を持ち寄るオープンイノベーションの体制で、ハーモウェア上で動作するアプリケーション、すなわち知能機械が人間を理解するための製品やサービスの開発に当たる。

「開発したアプリケーションそのものの仕様は各企業に帰属する機密ですが、アプリケーションで得られたデータやハーモウェアと接続する技術は公開してもらいます。コンソーシアムに参画する他の大学や企業も活用できるので、新しい製品やサービスを低コストで開発できます」。試作評価するための共通実験施設も提供し、短期間での製品開発を支援する。

イノベーションの創出を狙い、博士課程学生の活用と育成にも力を入れる。OPERA採択により、文部科学省と経済産業省が策定した「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン」に沿った大学改革の取り組みが強力に後押しされた。名古屋大学は、裁量労働制のフルタイム勤務の研究員として、博士課程の学生を大学で雇用する制度を整備した。学生としての研究と企業との共同研究の内容が一致していれば、従来学業としていた部分にも給与を支給するという画期的なものだ。

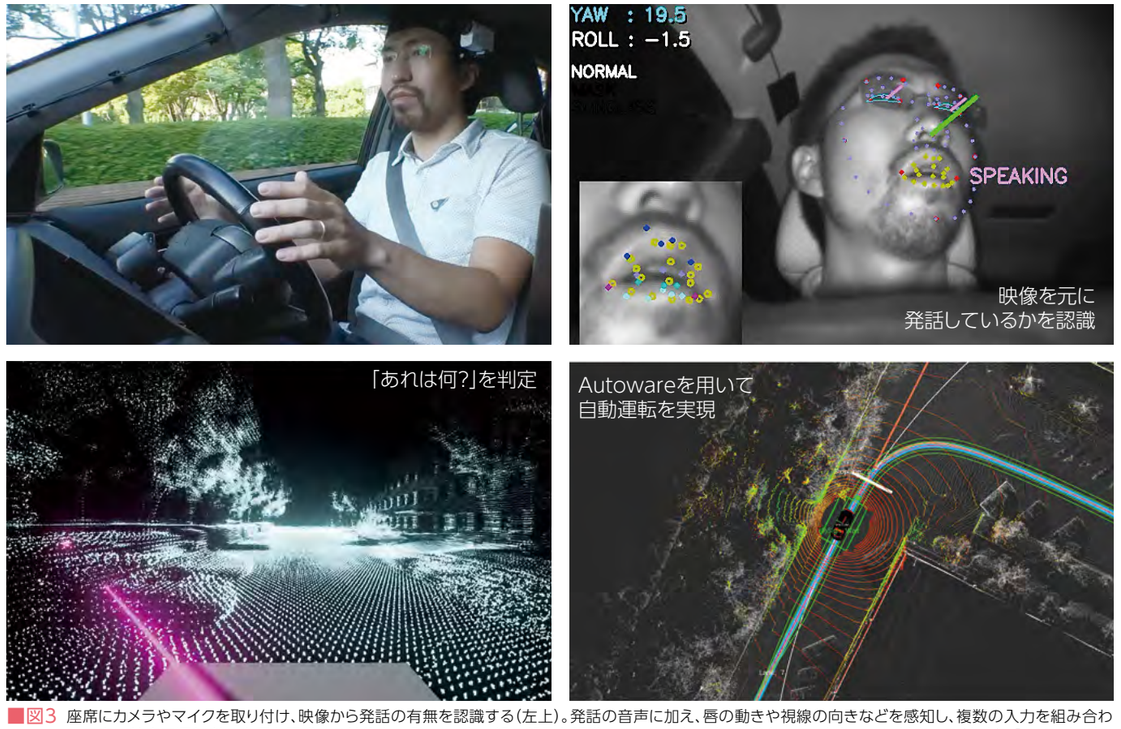
「これまで学生の本分はあくまでも勉強であり、企業との共同研究では実験補助者の位置付けでした」。大学と産業界が共同で人材を育てる新制度は、産学連携プロジェクトに参加する動機付けとなり、ひいては学生ベンチャー起業の意欲を高めることにつながる。「OPERAは基礎研究や人材育成における産学連携を拡大し、オープンイノベーションを加速する優れたシステムと心の底から思います」と武田さんは語る。

理想はタクシー 対話する自動運転車

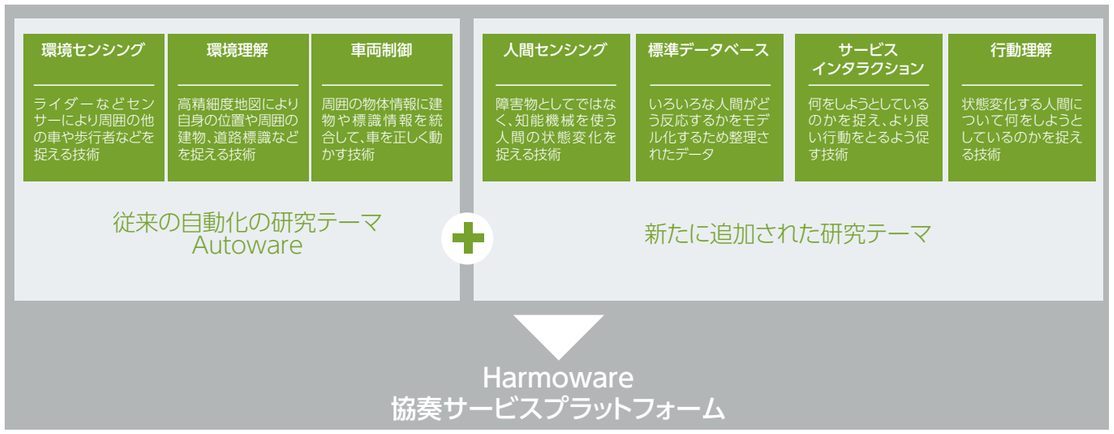
ハーモウェアを象徴する成果が、マルチモーダルインターフェースの自動運転車だ（図2）。マルチモーダルとは、入力手段（モダリティ）が複数あることを意味する。2018年10月、名古屋大学と徳島大学、アイシン精機は、音声や視線、ジェスチャーで操作できる自動運転車の開発を発表し、名古屋大学構内を走らせる実証実験を公開した（図3）。

座席にカメラとマイクを取り付け、入力手段が音声の場合は音声認識、ジェスチャーの場合は深度セン

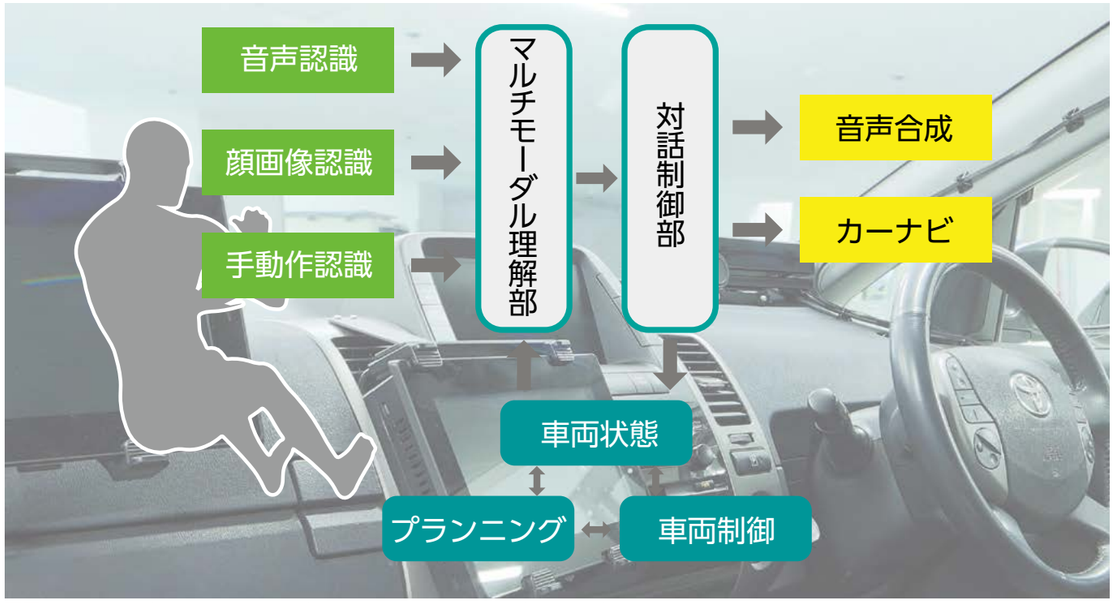
■図2　マルチモーダルインターフェース自動運転システムを搭載した車両。自動運転車は、カメラや各種センサーで、歩行者や道路標識など周囲環境の情報を入手し、自車位置を高精度3次元地図と照合して走行する。ルーフの上にあるのはライダーと呼ばれる装置で、赤外線を発することで周囲の物体までの距離や物体の形を判別する。



■図3　座席にカメラやマイクを取り付け、映像から発話の有無を認識する（左上）。発話の音声に加え、唇の動きや視線の向きなどを感知し、複数の入力を組み合わせて高い精度で運転者の意図を認識する技術を開発した。点は顔の部品を認識するための参照点で、黄色は口、水色は目に対応する（右上）。「あれは何?」という指示語を含む発話も、視線の向き（ピンクの線）や地図情報から、具体的な位置を判定する（左下）。収集した情報に基づき、オートウェアを用いて自動運転を行う（右下）。



■図1　従来の自動化の研究テーマである「環境センシング」「環境理解」「車両制御」に、OPERAでは「人間センシング（早稲田大学）」「標準データベース（名古屋大学）」「サービスインタラクション（名古屋大学、産業技術総合研究所）」「行動理解（名古屋大学、九州工業大学）」を付加し、新しい協奏サービスプラットフォームを構築する。ハーモウェアのセキュリティー面に関連する研究は東京工業大学が担当する。



■図4 マルチモーダルインターフェース自動運転車の仕組み。マルチモーダル理解部が多様なセンサー情報を統合して処理し、人間の状態や意図を推定する。推定された意図に基づき、対話制御部は自動運転システムやカーナビに働きかける。この 2 つの仕組みにより、車、環境、人間を調和させることに成功した。

サー、視線の場合は映像処理を用いる（図4）。自動車に乗り込むと、車から声がかかる。「いつも通り、ナショナルイノベーションコンプレックスに行きますか」。人間が首を横に振ると、車は目的地の変更を認識する。「今日は『野依記念館』に行って」「わかりました。『野依記念学術交流館』ですね」。略称や通称であっても、目的地を推測できる。「右に曲がって」「減速して」と伝えれば、指示通りに方向や速度を変える。

複数の入力を同時に処理することも可能だ。走行中に「ここに止めて」「そこを曲がって」と指示語を含む発話があった場合、具体的にどこを指しているのかをジェスチャーや視線の向きから読み取る。「あれは何」と尋ねると、視線の向きや地図情報から「図書館です」などと建物の名前も答えられる。

目的地まで自動運転する技術は確立されていたが、走行途中に停車場所を指定したり、経路を変更したりするシステムが課題だった。理想はタクシーのように対話で操作できる自動運転車だ。「音声や視線、ジェスチャーなど人間の状態を捉えるセンサーが入ることで、質問や変更に車が答えてコミュニケーションできる自動運転システムに発展したというハーモウェアの成功例です」。

外食や物流の現場をデータ化 作業効率やサービスを向上

自然で使いやすいマルチモーダルインターフェースは、全ての知能機械に求められる機能でもある。また、環境の「認知」を踏まえて、進行方向や速度を「判断」し、ハンドルやブレーキを「制御」する自動運転の機能は、ロボットにも共通する。工場以外で働くサービスロボットの活躍が期待されるが、サービスでは従来の製造業分野よりも人間とのコミュニケーションが重要になってくる。

■図5 もともと資材を運搬する工業用ロボットだったが、和装の外観や琴の演奏による搬送表示音声、御簾を用いたドアなど、配膳ロボットとしてサービス提供の現場と調和するものに改装した。現場の従業員が使用できるように、ロボットの停止や発進など基本的機能の操作を容易にした。

コンソーシアムでは、労働力不足が深刻な外食や物流業界の現場で、ハーモウェアへの追加が望まれるアプリケーションの実証実験を行っている。「複数の人間や物が多様に動く現場をマニュアル化することは難しいですが、ハーモウェアをプラットフォームとして、限定された空間における人間と知能機械との協奏作業をデータ化する技術を開発しています」。

がんこフードサービス社（大阪府大阪市）は、無人搬送ロボットを同社の日本料理料亭で配膳用に導入した（図5）。厨房から客室前までの廊下は従業員や客が行き交うが、人間や障害物に近付くと、配膳ロボットのセンサーが感知して停止して衝突を回避するなど、安全面も考慮されている。

「配膳ロボットが仲居さんの代わりに料理を自動で運んでくれるので、仲居さんは接客に多くの時間を使えるようになります」。産業技術総合研究所が開発した屋内測位システムで従業員と配膳ロボットの動線を計測してデータ化する。オペレーションを可視化することで、配膳ロボットとの協働によりサービスの質や効率が向上するかどうかを検証する狙いだ。

19年からは、ベンチャー企業を含む3社の協業で、物流現場における実証実験を計画している。オートウェアを使った完全自動運転システムを開発するティアフォー社（愛知県名古屋市）は、工場・倉庫内での物流搬送を支える小型運搬ロボットを提供する。物流システムを構築・販売するフレームワークス社（東京都千代田区）は、人間の行動や機械の位置などを計測し、解析する。そして、物流AIの学生ベンチャーであるオプティマインド社（愛知県名古屋市）が、得られたデータをAIで分析し、効率的な配送ルートを見つけだす。

「従業員とロボットの配置や動線をシミュレーションすると、どこで人手が余っているのか、どのように従業員の気持ちが変わっていくのかが見えてきます」。分析結果に基づき、ロボットにできることはロボットが作業し、ロボットができないことを人間が行うなど、うまく協働するような役割分担を検討したり、サービスの質やロボット稼働率を向上させたり、作業システムの改善につなげる。

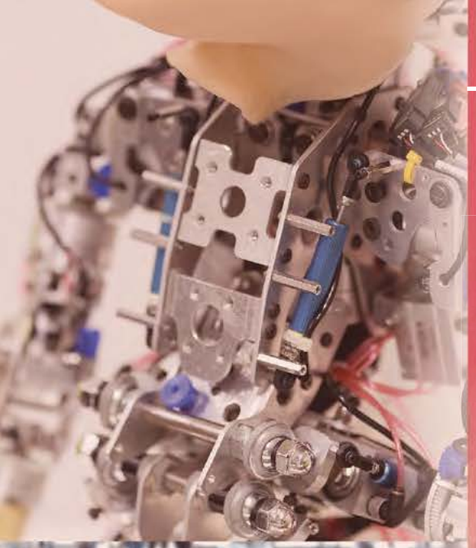
オープンソースで 研究開発を加速

オートウェアは自動運転用としては世界初のオープンソースとして無償で公開された。研究開発目的であれば誰でも利用できるばかりか、自由に改変することも可能だ。武田さんはオートウェアのような発展をハーモウェアにも期待している。

自動運転技術は多様な最先端技術で成り立つため、1つの企業が閉鎖的に開発していては世界の最前線で戦えない。オートウェアは、早い段階でオープンソース化し、他の研究機関の力を借りることで開発のスピードを上げて、自動運転車の早期実現に貢献することを目指した。オートウェアはすでに国内外200近くの大学や企業に採用され、30車種以上に搭載されている。

「資本が少なくても新しい技術を試せるのがオープンソースの利点です。誰もが思ったように使えますし、ベンチャーも立ち上げやすくなります」。今ではオートウェアを基盤としたベンチャー企業も生まれ、オートウェアの部品が世界中で開発されている。ハーモウェアの継続や社会への普及の推進に、ベンチャー企業が果たす役割は大きい。

武田さんはハーモウェアを構成するソフトウェアやセンサーなどの部品をレゴブロックに例える。「子供たちにレゴブロックを与えると、それぞれが思い思いに作品を作り出します。誰もが何でも作れる開発プラットフォームとして、ハーモウェアから新しい企業、製品やサービスが次々と飛び立っていくことが夢です。1つ1つは小さいかもしれませんが、いつしか素晴らしい作品が出来上がるのを楽しみにしています」。コンソーシアムは20年度に終了する予定だが、「ハーモウェアは最後までオープンソースを貫きたい」と、未来を見据える武田さんの言葉は力強い。



特集 2

近付く人間と人工知能の距離 互いに寄り添う新しい社会へ

間もなく、本格的な人工知能時代が到来する。それを迎える私たちに、心の準備はできているのだろうか。大阪大学先導的学際研究機構の浅田稔特任教授、京都大学大学院法学研究科の稲谷龍彦准教授らは、自然科学と人文社会科学の垣根を越え、さらに社会との対話を踏まえて、人間と人工知能が寄り添って暮らすための新たな社会システムの必要性を提言している。

あさだ みのる
浅田 稔
大阪大学 先導的学際研究機構 特任教授
2005～11年 ERATO浅田共創知能システムプロジェクト研究総括。17年よりRISTEX研究代表者。

一緒に写っているのは研究室で開発した子供型アンドロイドの頭部。ニュアンスを含む複雑な表情を再現できる。

自律システムが犯すミスを私たちの社会は許せるのか

人工知能は目覚ましい進化を遂げている。画像認識などすでに人工知能の判断力が人間を凌駕（りょうが）する分野もあり、日常生活にも急速に浸透しつつある。しかし、大阪大学先導的学際研究機構の浅田稔特任教授は、こう指摘する。

「画像認識課題では、人間の正答率が95パーセントのところ、人工知能では99パーセントということもあります。しかし、人間の5パーセントのエラーの中に人工知能の1パーセントのエラーが含まれている保証はありません。人間にはまったく理解できないようなミスを犯す可能性があるのです。現在の人工知能でも、車に搭載すれば危険を認識する精度は上がり、事故を回避できる確率は上がるでしょうが、問題は人工知能の判断ミスによって重大な事故が起こった時に、私たちの社会が人工知能を許せるかどうかなのです」。

人工知能は100パーセント正しい判断ができるわけではなく、人間より低い確率であってもエラーは生じる。自動運転中の判断ミスや画像診断での重大な誤診は人間の命を左右する場合があるし、コミュニケーションロボットが企業の受付や独居老人宅などでセキュリティーを担う場合、来訪者と誤って犯罪者を招き入れることも起こり得る。

人間の判断ミスによる事故であれば、刑事訴追ができる。しかし、「自由意志を持った人間」のみを対象とする現在の法制度の下では、人工物である人工知能に刑事罰を科すことはできない。また、人工知能の自律性は、人間の誘導無しでシステムを動かすレベルや限定された範囲のみで判断するレベルなど多様であり、どこまでが人工知能の判断による行動なのかは曖昧だ。例えば身体装着型のサポートロボットなど、使用者もある程度操作に関与するシステムによる事故では、人間の誤操作によるのか、人工知能の誤作動によるのかを線引きすることが難しい。

事故の際にその責任は誰が負うのかといった議論を深めないまま、人工知能の実用化や普及が進めば、大きなあつれきが生じかねない。そこで「人と情報のエコシステム」研究開発領域で研究代表者を務める浅田さんとグループリーダーの京都大学大学院法学研究科の稲谷龍彦准教授は、人工知能と人間が寄り添って暮らす「なじみ社会」の実現を目指し、法整備を含む新たな社会システムを模索している。

プロジェクトでは、浅田さんが人工知能のさまざまな自律性のレベルについて考察し、大阪大学先導的学際研究機構の河合祐司特任講師が人工知能を搭載したロボットとのコミュニケーションの際に人間が抱く印象や責任の感じ方を検証していく。これらをつなぐ鍵となるのが、稲谷さんが担当する法学の視点で、人工知能を受け入れる上でどのような社会ルールが求められるのかを検討する。このため、法的な責任理論についての現状を整理し、新たな提案を始めている。

見えてきた従来法の限界 誰が責任を取れるのか

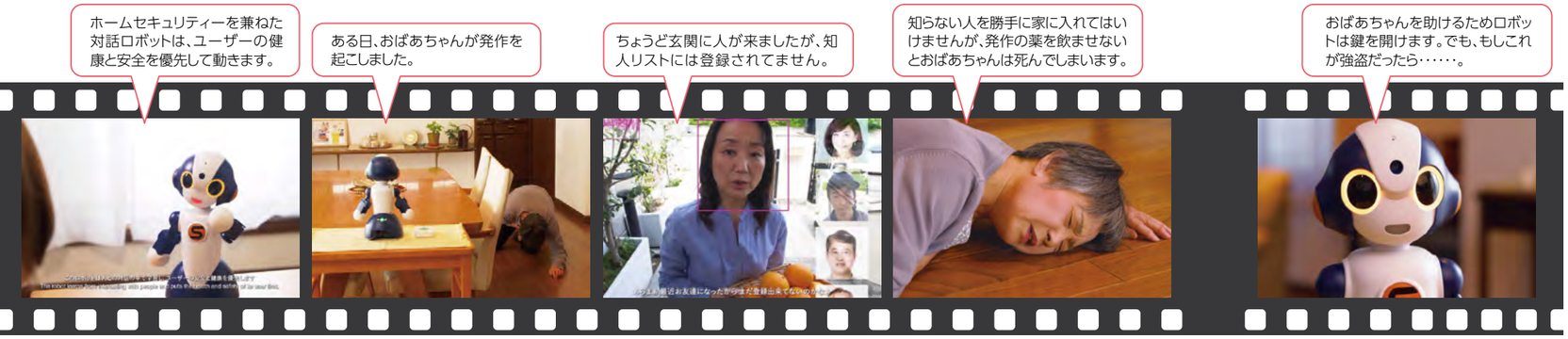
人工知能が原因で事故が起こった際、どのような法的措置を取れば良いのか。1つ考えられるのは、システムを開発した研究者や企業を刑事罰の対象にすることだ。しかし、ここにも人工知能ならではの問題が存在する。従来の電子機器は開発者が書いたプログラム通りに動くため、その誤作動による事故の場合、企業側に何らかの刑事罰を科すことは可能だ。ところが人工知能は、蓄積され続ける膨大なデータを学習してより高い判断力を身に付けていくため、そのメカニズムは変化し続け、開発者にもわからないほど複雑化していく。メーカーや開発者に刑事罰を科すことは成人した子供の犯罪に対する責任を親に課すようなもので、現実的ではない。リスクが高すぎて誰も開発に取り組まなくなるだろう。

一方、人工知能のミスの責任を利用者が負うことになれば、誰も製品を買わなくなるだろう。自分の意志や判断で起こったわけではない事故の責任など取りたくないからだ。つまり、現在の法制度では人工知能の判断ミスによって被害が発生したとしても誰かを罰することは困難なのだ。人工知能の判断により引き起こされた事故の責任に、空白が生じ得る状況が想定され始めているのである。

こうした状況に対し、法学者としてプロジェクトの推進役を担う稲谷さんは「メリットとデメリットを天秤にかけ、メリットが大きければ人工知能を普及させた方が良いと判断できます。社会的便益を優先させ、何らかの事故が起こったとしても処罰はしないという功利的な考え方もできるのではないでしょうか」と提起する。自動運転車を例に取ると、人間が運転する時より事故を減らせるという社会的な恩恵を優先し、事故の際には被害者に対する民事的な補償のみで、誰にも刑事罰を科さないという選択があっても良いという考えだ。

許容できるリスクを決め、そのリスクの範囲で起こった事故ならば、刑事罰を科さない。さらに一歩進んで、許容すると決めた範囲内で起こった事故だと企業が証明できるなら、「捜査すら行わないという選択もあり得ます」と稲谷さんは語る。

いなたに たつひこ
稲谷 龍彦
京都大学 大学院法学研究科 准教授



■図1 制作した動画では、人工知能が活躍するさまざまなシーンで起こり得る事故や犯罪をドラマ仕立てで紹介する。

罰の代わりに改善を義務化 技術の進歩を妨げない制度を

しかし、事故の際に誰も罰を受けないのでは、被害者やその周囲の人々の処罰感情を蔑ろにしているという声が上がるかもしれない。これに対し、稲谷さんが導入を検討するのが、事故を引き起こした人工知能を流通させた企業に対して原因究明に必要なあらゆる情報の提供や、必要な場合には再発防止に向けた具体的な改善などを義務付ける代わりに、関係者の訴追を一定期間延期する訴追延期合意（DPA）や、訴追しない不訴追合意（NPA）という制度だ。米国において企業の構造改革を目的として作られた制度なので、企業と同じく人間ではない人工知能の改善を目的として応用できると考えている。

「米国では、企業の努力が十分ではないと判断された時には訴追され、結果的に市場から締め出されます。企業は経営の仕組みから見直し、必死で改善に取り組まざるを得ません。このような制度を人工知能による事故にも適用すれば、企業は事故に対する責任をある程度は果たすことになり、被害者の処罰感情も多少和らぐでしょう」と稲谷さんは説明する。

単に企業や開発者を罰するだけでは技術の進歩が抑制されかねないが、企業が同じような事故が起こらないよう改善に向け努力し、人工知能の改良が期待できるなら、その意義は大きい。事故が発生した場合には、日本版のDPA、NPAに基づき、必要ならばその製品を開発した企業に製品の改良を促し、それが十分に果たせない時に刑事罰を科すという仕組みが構築される。

このような仕組みを実現した場合、社会は人工知能に付きまとう「リスク」を受け入れることになる。このため、社会としてどの程度のリスクなら許容できるのかをあらかじめ決めなくてはならない。しかし、一部の大手企業が存在感を示す人工知能分野の現状では、市場の原理でなし崩し的に基準が決まりかねない。

「実用化に当たっては、関係省庁が中心になり研究者や企業の意見を取り入れガイドラインを作成することになるでしょう。恩恵と共にリスクを受け入れることになるのは一般市民ですから、パブリックコメントなど意見が反映される手続きが不可欠です」と稲谷さんは訴える。

人工知能とどう生きたいか 能動的に考える社会へ

浅田さんが「人間の感情は複雑で、第三者視点では受け入れられたリスクも当事者になると受け入れられなくなる」と話すように、万人が許容できるリスクを定めることは難しい。また、法的な整理だけでは不十分で、怒りや悲しみなど被害者の心情に寄り添い得る新たな仕組みも必要となるだろう。価値判断には倫理観や意思決定プロセスも大きく関わることから、人文科学と科学技術の対話が不可欠だ。「法は世界をつなぐ力を持つ」と話す稲谷さんはその橋渡し役になろうと、工学者の浅田さん、河合氏に加え、同じ研究開発領域で別のプロジェクトを進める脳科学や心理学が専門の葭田貴子東京工業大学准教授、哲学が専門の松浦和也東洋大学准教授とも連携を始めた。その一環として取り組むのが、一般市民への啓発活動だ。

河合氏、葭田氏、松浦氏と稲谷さんは人工知能の判断ミスによって起こり得るさまざまな事故や犯罪を描いた動画を制作した（図1）。日本科学未来館や東京工業大学で開催したワークショップでは、動画を見せた上で人工知能の判断ミスを許容できるか、誰が責任を取るべきかといったアンケートの実施やグループでの議論を通じて、人工知能と人間との間にどのような関係性が生じるのかを共に考えようとしている（図2、3）。

日本科学未来館で実施したアンケートでは、事故の被害者になった場合には人工知能の判断ミスを許せないという回答が多くあったという。浅田さんは「人工知能のミスを許容するのは簡単ではないでしょう。一方で、人工知能は否応なしに私たちの生活に入り込んできます。人工知能と共生する意識が必要だということを訴えていきたいです」と話す。こういったワークショップをきっかけに「自分は人工知能とどう生きたいのかを考えてほしい」と浅田さんと稲谷さんは口をそろえる。

ロボット工学の第一人者として第一線を走り続けてきた浅田さんが理想とするのが、鉄腕アトムやドラえもんといった作品に見られる人間と自律ロボットの関係性だ。「人間と人工知能が融和的になれるなら、人間同士が信頼し合えないはずはない」という思いを抱き、研究を続けてきた。プロジェクトが見据える先には、人間と自律ロボットのどちらかが一方を使役するのではなく、対等な立場で、お互いを信頼し思いやって暮らす「なじみ社会」がある。「私は人工知能とこう生きたい」という1人1人の思いが、新しい社会を作っていくだろう。

■図2 東京工業大学で開催したワークショップでは講演後、グループに分かれて誰が責任を負うべきかを話し合い、活発に意見が交わされた。

左から松浦氏、稲谷さん、葭田氏、河合氏

■図3 日本科学未来館で開催したワークショップでは、参加者からの質問やコメントも紹介。終了後には浅田さん（帽子の男性）も加わり参加者のコメントについて意見を交わした。回収したアンケートは、プロジェクトの研究で活用される。

数字に見る科学と未来 Vol.9

100パーセント細胞の人工組織が再生医療の新時代を拓く

ヒトの細胞を培養して、さまざまな臓器を再生する研究が進んでいる。しかし、広く実用化されるまでには、さまざまな課題がある。その1つが細胞を培養して立体構造を持つ組織を作ることだ。細胞用の3Dプリンターを利用して、患者の細胞から血管などの立体構造を持つ組織を作る新しい技術の開発に挑戦しているのがサイフューズの秋枝静香代表取締役だ。

秋枝 静香（あきえだ しずか）
サイフューズ
代表取締役

患者のリスクを減らしたい 足場材無しで立体構造を実現

再生医療では、自然には再生（治癒）することができない細胞や組織、臓器を人工的に再生し、その機能を回復させることを目指している。すでに承認された再生医療製品には、患者から採取した骨髄液中の間葉系幹細胞を体外で培養し増殖させ、再び患者の体に戻すヒト（自己）骨髄由来間葉系幹細胞やシート状に培養した細胞を用いたヒト（自己）表皮由来細胞シートなどがある。液状、シート状に続いて期待が高まっているのが、立体構造を持つ組織の再生だ。

サイフューズが取り組む立体構造の1つに血管がある。「腎臓病などで週に複数回の血液透析を受ける患者さまの中には、自身の血管への負担を減らすために樹脂などでできた人工血管を埋め込む方もおられます。しかし、体内に異物を入れるため、拒否反応や感染症のリスクを抱えることになります。自己細胞のみでできた血管はこの問題を解決できる可能性があるのです」と秋枝さんは立体構造実現の意義を語る。

立体構造の実現に向け、これまでにもさまざまな技術が開発されている。しかし、細胞を支える足場材（スキャホールド）として動物由来の材料を必要としたり、型を使って積み上げた細胞に酸素や栄養が届かずに内側の細胞が壊死してしまったりといった問題があった。これらの問題を解決したのが、サイフューズが開発したバイオ3Dプリンターを用いる方法だ。細胞100パーセントで任意の立体構造を作る画期的な方法として、注目が集まる。

剣山に細胞を積み上げ造形 3Dプリンターで自動化に成功

足場材や型無しで立体構造を可能にしたのが、サイフューズの創業者でもある佐賀大学医学部の中山功一教授が開発した「剣山メソッド」だ。特定のプレート（シャーレ）中で同じ種類の細胞を培養すると、細胞は集まり塊になる。この細胞塊を剣山状に設置した細い針に積み立てていくことで望み通りの形状が得られる（図1）。出来上がった立体構造を剣山ごと熟成させると細胞同士が融合し、剣山を引き抜いても立体構造が維持される。また、積層された細胞の間には適度な隙間があるため、培養液や酸素が内部まで届き、細胞が生き続けることができる。

当初は細胞塊を1つずつ手作業で剣山上に積み上げ、数十時間かけて立体構造を作っていたが、国や澁谷工業など企業からの支援もあり自動化に成功した。しかし、開発の道のりは決して平坦ではなかった。「新しい技術なので、消耗品や実験に使用する器具は市販されていません。試行錯誤しながら自作したり、オーダーメードで作ったりと大変でしたが、やりがいがありました」と研究開発部の國富芳博マネージャーは開発の苦労を語る。

特に困難だったのは、「針」の開発だった。細胞塊を傷つけない細さと、何度使ってもたわまない強度を兼ね備えた針を作るために、十数社のメーカーと交渉した。今では用途に合わせ、さまざまな形状や長さの剣山を開発している（図2）。

このようにして開発されたバイオ3Dプリンターによる組織作製は着実に進んでいる。細胞で作った血管をブタに移植したところ、高い生着率や組織再生が確認された。一般的な人工血管では血管に空いた穴が自然にふさがることはないが、細胞で作った血管では指で押さえるだけで止血できることもわかった。

「患者さま自身の細胞を培養して使えば、拒否反応の心配はありません。安心して使える高品質なものを提供したいので、強度や耐久性など品質は厳しくチェックしています。新たな治療の選択肢として、病気や怪我で苦しむ方々の希望になれば」と秋枝さんは力を込める。

機器開発の鍵は細胞の串団子 より早く自由な積層が可能に

開発したバイオ3Dプリンター「レジェノバ（Regenova）」では、細胞塊を1つずつ吸い上げ、剣山の目的位置まで運ぶことを繰り返して1層ずつ積み上げる。サイズが均一な細胞塊を使うこともあり、精密な立体構造が作製できる（図3）。さまざまな細胞で利用可能で、多くの研究者の関心を集めた。一方、設置スペースやコストを気にせず、もっと手軽に使ってみたいという声も上がった。そこで新たに開発したのが「スパイク（S-PIKE）」だ。多くの実験室に設置されているドラフト内に置けるサイズまで小型化し、積層の自由度も高めた。研究者がより手軽に導入できるエントリーモデルとして位置付け、研究開発の段階に応じてレジェノバと使い分けてもらうことを想定している。

「研究者のニーズは多様ですから、より早く、より自由に使えるように改良しました。針を動かして培養液中の細胞塊を連続して拾い、細胞塊が串団子状に並んだ針を土台に立てて並べます。細胞塊が予定より小さ過ぎても大きく育ち過ぎても、針間隔を調整すれば対応できます」とシステム開発部の岸井保人マネージャーは胸を張る。

針を立てる土台には特殊なシリコン素材が使われているが、柔らか過ぎれば針が倒れ、硬過ぎれば針が土台に刺さらないため、素材選びや厚みの調整にも苦労したと岸井さんは振り返る。

「多くの研究者がレジェノバやスパイクを使うことで、新しいアイデアやシーズが生まれるでしょう。バイオ3Dプリンターの普及が再生医療の研究を加速することを期待しています。待っていてくださる患者さまのためにも、研究者や企業と積極的に連携し、研究開発のサイクルを上手く回していきたい」と秋枝さんは意気込む。

細胞から希望を作りたい 創薬から治療まで幅広く支援

血管は今年中に臨床試験を開始予定だ。軟骨についてはすでに臨床試験が始まっている。神経再生などさまざまなプロジェクトも進行中だ。原理的にはサイフューズのバイオ3Dプリンターを用いて消化器官や循環器なども作製可能であり、国内外から注目が集まっている。

ただし、再生組織の実用化は臨床試験などが必要なため、やや長期的な目標だ。一方、創薬支援のツールとしての立体細胞の利用は、より短期間での実用化が期待される。薬の候補物質が細胞に与える影響を評価する際、細胞に立体構造を持たせると、より生体に近い反応を示すことがわかってきたのだ。サイフューズでは肝臓の細胞から作ったミニ肝臓を、毒性の評価などに使用する研究を進めている。候補物質の安全性試験の精度を向上できれば、創薬のコスト低減や開発期間の短縮にもつながるだろう。

バイオ系ベンチャーの成功は難しいといわれる中、サイフューズは来年で起業から10年目を迎える。「技術を1つずつしっかりと積み上げた結果」だと振り返る。細胞を意味する「Cyto」と融合を意味する「fusion」に由来する社名には、生物学と工学の融合による技術革新への願いも込めた。その名の通り多彩な背景を持つ社員が集い、革新的な技術を生み出している。「細胞から新しい医療という希望を作りたい」という強い思いを共有し、サイフューズは次の10年に向かい歩み続けていく。

■図1 「剣山メソッド」によって細胞から立体構造を作製できる。

step1
細胞を培養し、直径0.5ミリメートルほどの細胞塊を作る。

step2
剣山に細胞を1つずつ積み上げて積層し、望んだ形状を作る。

step3
細胞塊同士を融合させるため、数日間熟成させる。

step4
剣山を引き抜き、さらに熟成させると、血管などの組織が完成する。

■図2 用途に合わせてさまざまな形状の剣山を開発した。上は細胞で作製した立体構造。

■図3 専用のソフトウエアを使えば、複雑な形状も自由に作ることができる。写真はデモンストレーションで作成した「JST」の文字。

日本科学未来館

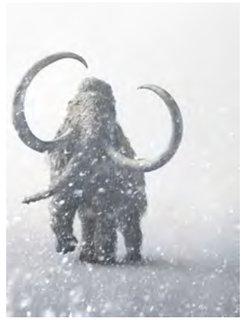
イベント

世界初公開の冷凍標本多数
生命科学の最前線にも迫る企画展「マンモス展」開催

ロシア連邦サハ共和国の永久凍土から発掘されたマンモスや古代の動物の世界初公開を含む冷凍標本を展示する、企画展「マンモス展」を6月7日（金）から11月4日（月・振替休日）まで日本科学未来館（東京・お台場）で開催します。本展のために新たに製作された史上最大級の冷凍展示室で、マンモスの鼻や皮膚など貴重な冷凍標本の生々しい様子が観察できます。さらに、世界各国で研究が進むマンモスの復活プロジェクトも紹介し、過去、現在、未来の視点からマンモスに迫ります。

マンモスが発掘されてから100年以上にわたり、研究が続けられていますが、今日では生命科学の進歩に伴い、マンモスなど冷凍状態で発見される動物の遺伝子やたんぱく質などから生命の情報を取り出すことが可能になりました。その情報を用いて、太古に起こっていただろう生命現象を再現しつつあり、ベールに覆われたマンモスの真の姿の解明へ一歩ずつ近付いています。

マンモスをはじめとした生命科学研究がもたらす技術革新は、絶滅危惧種の保護やマンモスなど絶滅種の再生の糸口になるだけではなく、先端医療や食料問題、地球環境問題などさまざまな分野で役立つ可能性があります。しかし絶滅種の復活は、倫理的な側面や生態系への影響など多くの課題もあります。本展では、生命科学研究の最先端を紹介しながら、これからの生命科学のあり方も考えていきます。



「マンモス展」イメージ

特設サイト
https://www.mammothten.jp/

産学共同実用化開発事業 NexTEP
開発課題「ナノ結晶化チタン酸リチウムを用いたハイブリッドキャパシタ」

研究成果

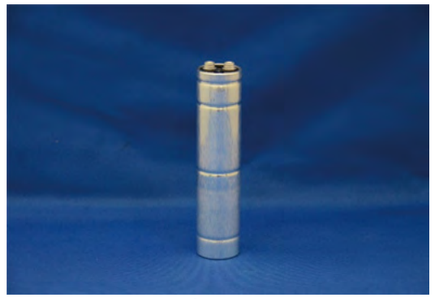
高出入力と高エネルギー密度を両立
ハイブリッドキャパシターを開発

自動車からの二酸化炭素排出量削減のため、車が減速する時に無駄にしている運動エネルギーを電気として回収する「減速エネルギー回生システム」の重要性が増しており、このシステムに適した蓄電デバイスが求められています。

エネルギー回生システム用の蓄電デバイスには、急速充電と急速放電が可能であること、体積当たりのエネルギー密度が高いこと、長寿命であること、安全性が高いことなどが求められます。従来の蓄電デバイスには、二次電池（充電式の電池）や電気二重層キャパシターがありますが、それぞれ課題を抱えていました。

日本ケミコンは、東京農工大学大学院工学研究院の直井勝彦教授らの研究成果を実用化し、2つの電極のうち、陽極に電気二重層キャパシターの原理、負極に酸化還元反応を利用した、ハイブリッドキャパシターを開発しました。負極にはキャパシター向けに調整したチタン酸リチウムを用いており、急速な充放電が可能な電気二重層キャパシターの利点を生かしました。体積当たりのエネルギー密度は従来品の電気二重層キャパシターに比べて1.91倍、かつ、10万回の充放電を繰り返した後でも、容量劣化は10パーセント以内と小さく、長期にわたり特性を維持できることを確認しました。

ハイブリッドキャパシターを組み込んだ減速エネルギー回生システムの開発により、自動車の燃費改善や二酸化炭素排出抑制に貢献できると期待されます。



開発したハイブリッドキャパシターセル

科学技術情報連携・流通促進事業
J-STAGEセミナー

イベント

科学技術の発信力を強化、4学会が取り組み報告
6月には論文公開の国際動向を解説

J-STAGE（科学技術情報発信・流通総合システム）は、日本で発行された学術論文を読める、日本最大級の総合電子ジャーナルプラットフォームです。J-STAGEに登載するジャーナルの質を上げ、世界への発信力を強化していくために、登載誌を発行している日本の学協会などに向けた個別コンサルティングやセミナーを展開しています。

2018年度は日本薬学会、日本水環境学会、日本リハビリテーション医学会、日本プロテオーム学会の4学会に個別コンサルティングを実施しました。今年3月のセミナーでは、4学会がコンサルティングの内容やそれを受けての学会内での取り組み、現状を報告しました。コンサルティングを担当した豪州 インレキシオ（INLEXIO）社は、ジャーナルの質を向上するためのポイントを紹介しました。参加者からは「他の学会が抱える課題や解決方法を具体的に知ることができた」と好評でした。

近年、学術出版を取り巻く環境は大きく変容しています。インターネットを通じて誰もが無料で研究成果を閲覧できるようにする取り組みが進められており、18年9月に欧州のファンディング機関らが、論文の即時全文公開を20年までに実現するための計画「Plan S」を策定しました。これが世界標準となっていくか、動向が注目されます。

今年度はこうした国際動向に焦点を当て、6月に開催する第1回目のセミナーでは、「Plan S」が定めている要件、その対応方法などを解説します。

日本の学協会などが参加するJ-STAGEセミナー

J-STAGE ワークショップ&セミナー
https://www.jstage.jst.go.jp/static/pages/News/TAB4/PastIssues/-char/ja

研究成果展開事業 リサーチコンプレックス推進プログラム
健康"生き活き"羅針盤リサーチコンプレックス

研究成果

健診データをアプリで確認
自分に最適な健康アドバイスも受けられる

大学、研究機関、企業が集積した地域で研究開発を基礎にイノベーションを継続的に興す仕組みを作ることを目的として、JSTはリサーチコンプレックス推進プログラムを実施しています。

健康"生き活き"羅針盤リサーチコンプレックス（中核機関：理化学研究所）は、神戸医療産業都市を実施拠点とし、ヘルスケアのエコシステムをつくる取り組みを進め、神戸市と共に市民パーソナルヘルスレコードシステム「マイ・コンディション・コウベ（MY CONDITION KOBE）」を開発しました。

このシステムは、医療保険者ごとに分散している特定健康診断データをマイカルテとして統合し、スマートフォン向けアプリをダウンロードしたユーザーが毎日の食事や運動など「からだ」や「くらし」の情報を入力することで自分の健康を管理できるシステムです。利用者は自身で入力しなくても健診データをアプリ上で確認でき、また食事や運動情報の登録、健康目標の達成、健康診断の受診などによって特典を受けられる健康ポイントが貯められます。登録データを基に個人に最適な健康アドバイスも受けられ、健康な生活を送ることができます。

将来、集積したデータを匿名加工して解析し、政策立案、学術研究、ヘルスケア周辺産業の活性化などに利用することも想定しています。神戸市は、住民登録者を対象に今年4月からシステムの運用を開始し、健康寿命の延伸、社会経済的要因による健康格差の縮小を目指して取り組んでいます。

アプリケーションの健康データのページ
左は健診結果の分析例、右は健診データの表示例

さきがける 科学人

vol.85

視野の広さを生かし研究チームを支える

ERATO水島細胞内分解ダイナミクスプロジェクト
研究推進主任
東京大学 大学院医学系研究科　特任准教授

齊藤 知恵子
Chieko Saito

Profile

青森県出身。1999年 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士（理学）。理化学研究所専任研究員や東京大学大学院理学系研究科特任准教授、JST研究開発戦略センターフェローを経て、2018年より現職。

Q1 印象に残っている言葉は？

A1 持って生まれたものを深くさぐって強く引き出す人

by 高村光太郎

出身高校の「目指す人間像」を表す言葉であり、高村光太郎の「少年に与ふ」という詩の一節です。自分の強みや得意なことは何か、意外と自分では気付けないこともあります。人生のさまざまな段階や置かれた立場によって変化するものもあると思います。これは、大学院時代の恩師にも言われ続けた、「自分（の特長）を知りなさい」という言葉に通じており、長年心にとどめて日々過ごしています。

Q2 今の仕事に就いたきっかけは？

A2 異分野融合のプロジェクトで自分の適性を知ったこと

幼い頃から学研の「科学」を愛読し、小学校の授業で顕微鏡を使ったことがきっかけで夢中になりました。大好きな気持ちは衰えることなく、大学院生の時に顕微鏡を用いた研究の第一人者である黒岩常祥先生に師事しました。

東京大学で研究所や大学が参画する異分野融合のプロジェクトに加わり、自分の強みである顕微鏡の知識を使って、さまざまな研究をサポートするようになりました。そこでは他の研究者にアドバイスをしたり、論文になるようなデータの支援を行ったりしました。そのうちに、いろいろな人とコミュニケーションを取りながら仕事を進めていくことが自分の新たな強みだと気付きました。プロジェクトを通して、若手研究者の論文が通った時や就職が決まった時など、サポートのやりがいを感じました。研究の現場を離れた研究開発戦略センターでの3年間では研究者以外の方との出会いがあり、広く物事を俯瞰し、分析した結果を提言する、という貴重な経験ができました。

現在はERATO水島細胞内分解ダイナミクスプロジェクトの研究推進主任として働いています。プロジェクトの進捗や成果の把握、企画調整、メンバーの相談などさまざまなサポート業務を行っています。さらに、これまでの顕微鏡の知識を生かして研究にも一部携わっています。

Q3 休日の過ごし方は？

A3 家事をこなしつつ、子供たちと趣味を楽しむ

平日になかなかできない家事をこなしたり、小学生の子供たちと趣味のカラオケを楽しんだりしています。カラオケは海外の著名な科学雑誌の編集者とご一緒させていただいたという貴重な経験もあります。最近は娘と行くのが楽しみです。息子の野球チームの練習やプロ野球のゲームを見にいくこともあります。野球を見ていると、スタープレイヤーだけでなく多様な人がいて、それぞれの役割を果たしているからこそチームが成立していることを実感します。研究室もいろいろな人が役割を担って研究室が成り立っています。自分をしっかりと見つめ、個性を生かして仕事に携わることが大切だと思います。

リサイクル適性Ⓐ
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
May 2019

発行日／令和元年5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