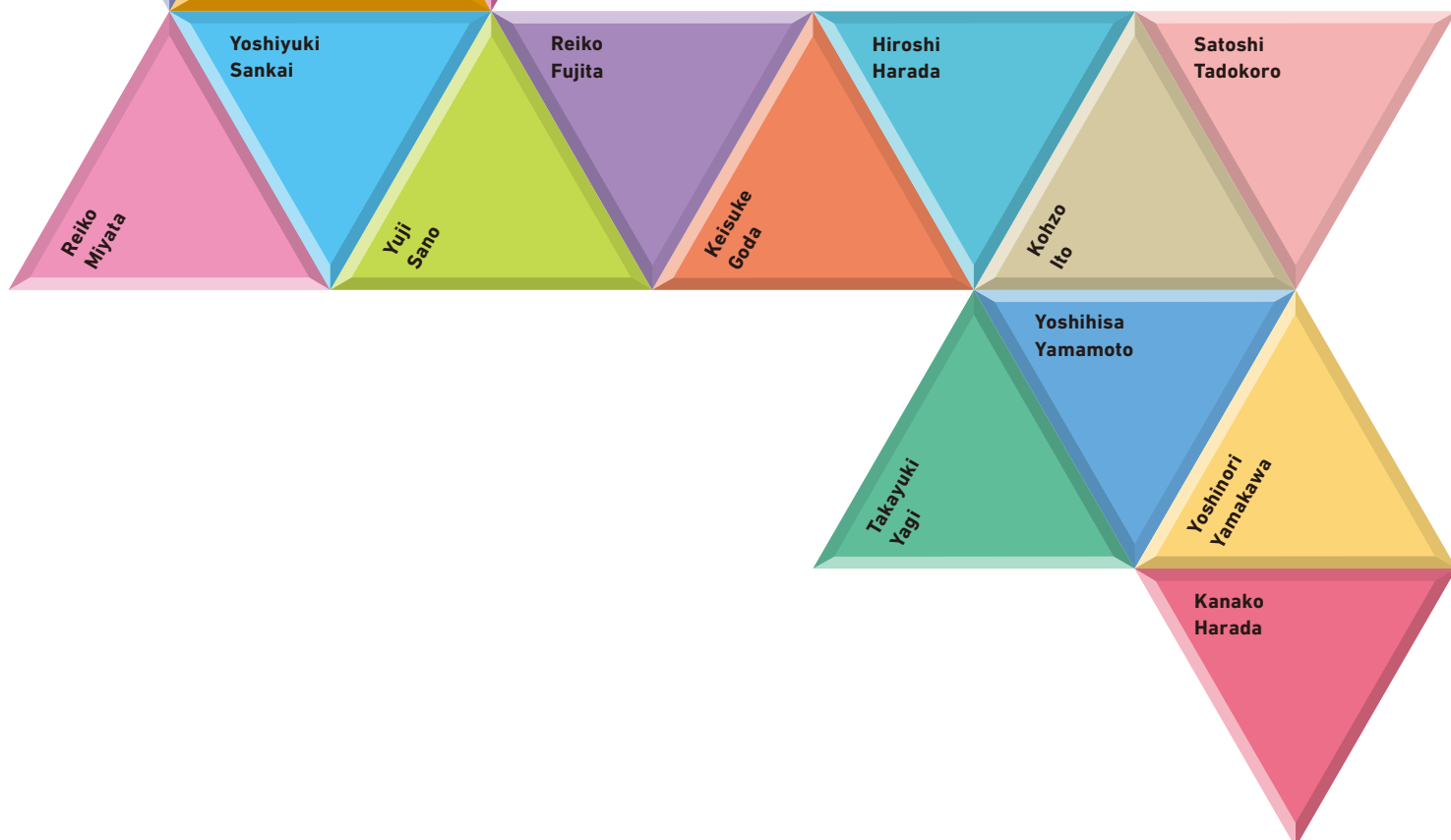
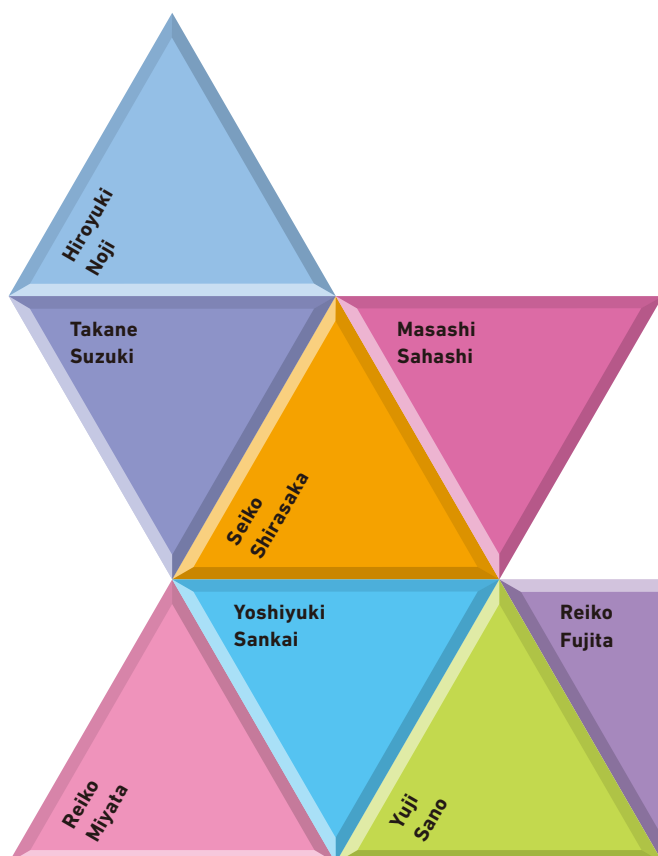


Impulsing  
Paradigm  
Change through Disruptive  
Technologies Program

Vol. **8** January 2017

# ImPACT

## NEWS LETTER



### 特集

光を操り、難問を解く  
新型コンピュータ…… 2

### プログラムの新たな展開

非連続イノベーションの  
実現に向けて…… 5

### プログラム・マネージャー紹介

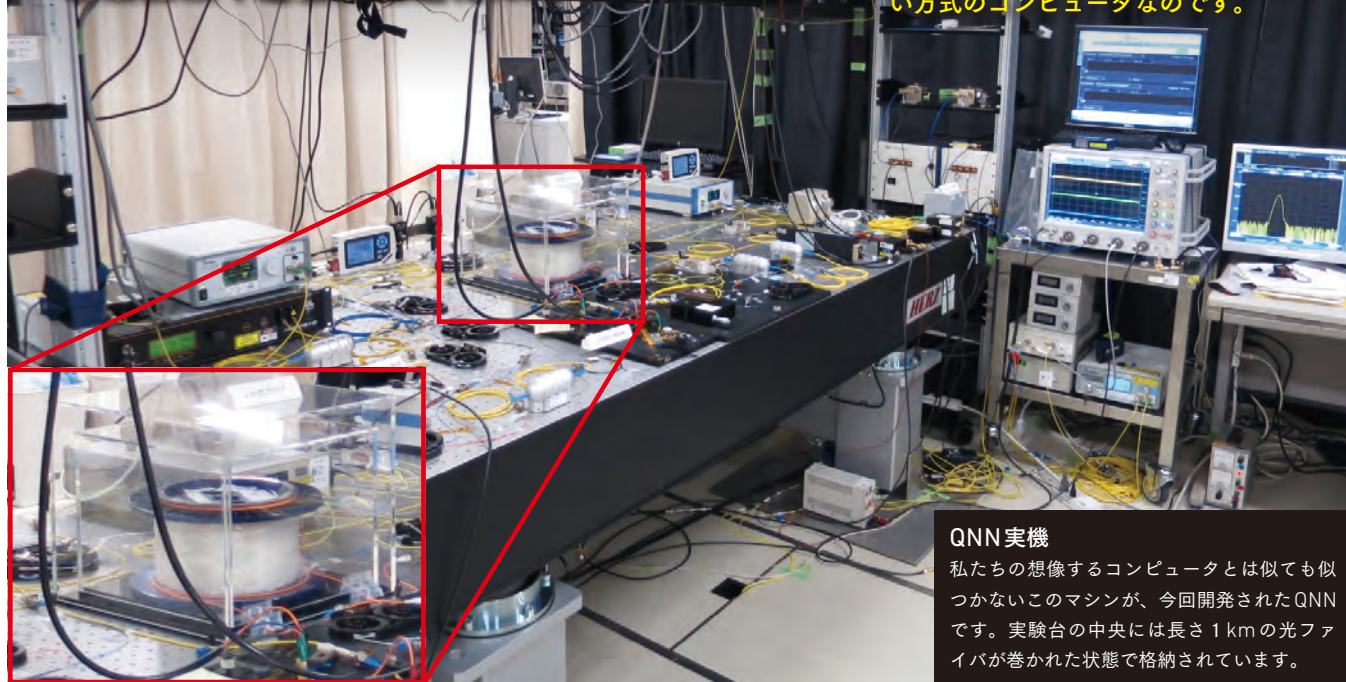
未来開拓者の系譜 8 …… 8

野地博行 PM

原田香奈子 PM

# 光を操り、 難問を解く 新型コンピュータ

～新薬探索や通信網最適化に光～



実験台の上に並ぶ光ファイバやレーザーが、多数の配線により複雑に繋が合わされたマシン…。これがどのような装置か、皆さんは想像することができるでしょうか？実はこのマシンこそ、現代のコンピュータにとって難敵である「組合せ最適化問題」を解くことのできる全く新しい方式のコンピュータなのです。

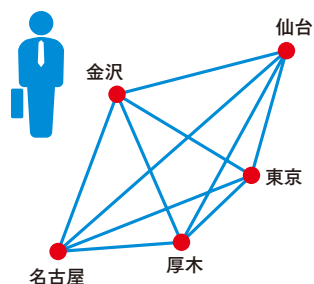
## QNN実機

私たちの想像するコンピュータとは似ても似つかないこのマシンが、今回開発されたQNNです。実験台の中央には長さ1kmの光ファイバが巻かれた状態で格納されています。

## 現代コンピュータの天敵、 組合せ最適化問題

複雑化する現代社会における交通渋滞の解消や次世代送電網による安定したエネルギー供給などの問題の多くは、様々な条件の下で発生する膨大な選択肢の中から最適なものを選び出す、組合せ最適化とよばれる問題に帰着します。組合せ最適化問題は、実社会に存在する問題を取り扱おうとした場合、

組合せの数は「天文学的」ともいえる膨大なものになり、現代コンピュータ、さらには量子的な重ね合わせを利用した超並列計算が可能な量子計算機であっても現在の技術水準では到底手に負えません(図1)。組合せ最適化問題における「膨大な数」に対しては、これまでのいわゆる「シラミ潰し」的な数学的手法とは異なる、全く新しい発想が必要です。



時間や費用が最小になる経路を求める

| 都市の数 N | 経路の全組み合わせ $(N-1)!/2$           |
|--------|--------------------------------|
| 5      | 12                             |
| 10     | 181,440                        |
| 60     | 観測可能な宇宙空間にある全原子数 $(= 10^{80})$ |

図1. 組合せ最適化問題

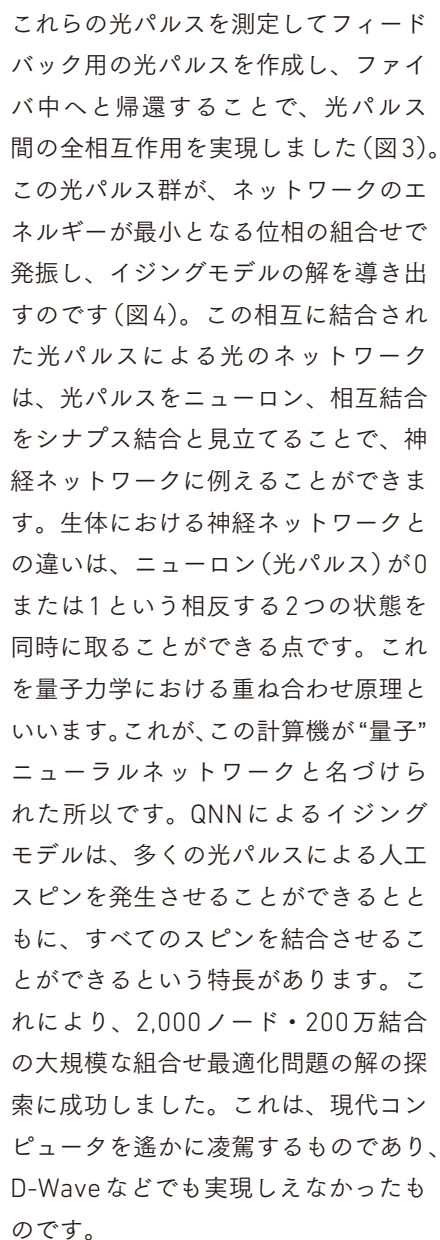
複数の地点を経由する最適な移動経路の決定は、組合せ最適化問題の代表的な例です。このような一見単純な問題でも、経路地の数が増えると選択肢が爆発的に増加する「組合せ爆発」が起こります。

## コンピュータに勝る自然現象 イジングモデル

組合せ最適化問題を解くヒントは、自然現象の利用にありました。その自然現象は、イジングモデルと呼ばれる、「上向き」か「下向き」かの2つの状態をとるスピン(小さな棒磁石のようなもの)群の振る舞いについて考える物理学上のモデルにより表されます。このイジングモデルがもつ「エネルギー」は、任意の2つのスピンの結合エネルギーの総和によって決定され、2つのスピン間の結合エネルギーはそれぞれの向きと結合の強さによって決まります。イジングモデルにおいては、全体の系のエネルギーを最小にしようとそれぞれのスピンが働くため、エネルギーが一番低くなるスピンの向きの「組合せ」を、物理法則がひとりでに導き出します(図2)。この現象を応用し

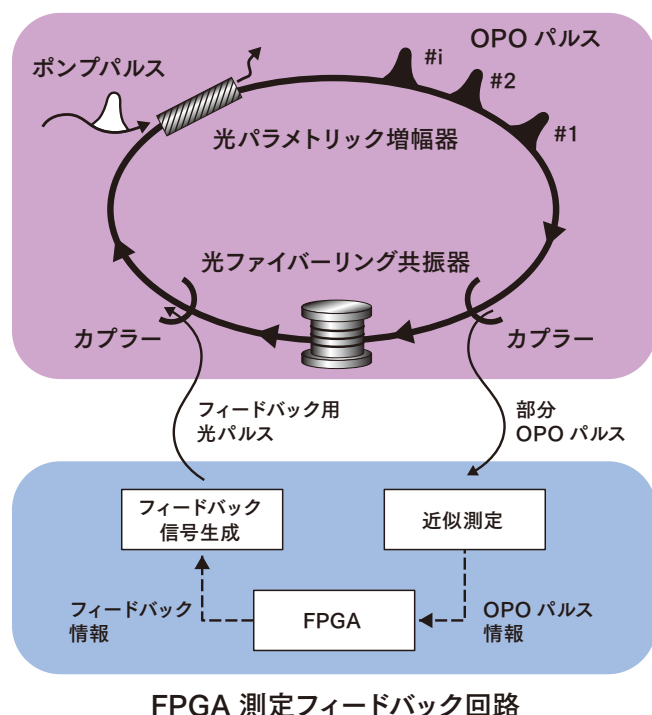
このような世界の潮流の中で、今回、山本プログラムにおいては、これまでとは異なる方法でイジングモデルを実装し組合せ最適化問題を解く、全く新しい方式のコンピュータ、量子ニューラルネットワーク(QNN)を開発しました。いったいどのような方法でイジングモデルを実装したのでしょうか。

その方法とは、光のもつ性質を巧みに利用したものです。QNNでは、レーザー光により発生させた数千もの光パルス(光パラメトリック発振器(OPO)パルス)を、長さ1kmにも及ぶ光ファイバ中に周回させます。この光パルスは、スピンの上向きに相当する0位相、スピンの下向きに相当する $\pi$ 位相の2つの状態しかとることができないため、人工スピンとして振る舞います。また、



QNNの開発に成功した大きな技術的なポイントの1つは、長距離光ファイバを用いた多数の光パルスの生成を実現したことにあります。光パルスは計算が終了するまでにファイバ中を同位相で実に数百kmも周回しますが、これは光パルスの波長(1.5マイクロメートル)より十分小さい精度で共振器長を制御する技術の確立なくしては成しえなかったことです。また、QNN開発成功のもう1つの大きなブレイクスルーとして、測定・フィードバック法によるスピン間全結合に成功したことも挙げられます。『『コヒーレント光通信』と『量子光学』という2つの異なる分野の知識、技術があったことで可能になりました」。QNN実現におけるブレイクスルーについて、ハードウェア開発の中心を担ったNTTの武居弘樹主幹研究員はこのように話しています。

## 光パラメトリック発振光(OPO)パルス



FPGA 測定フィードバック回路

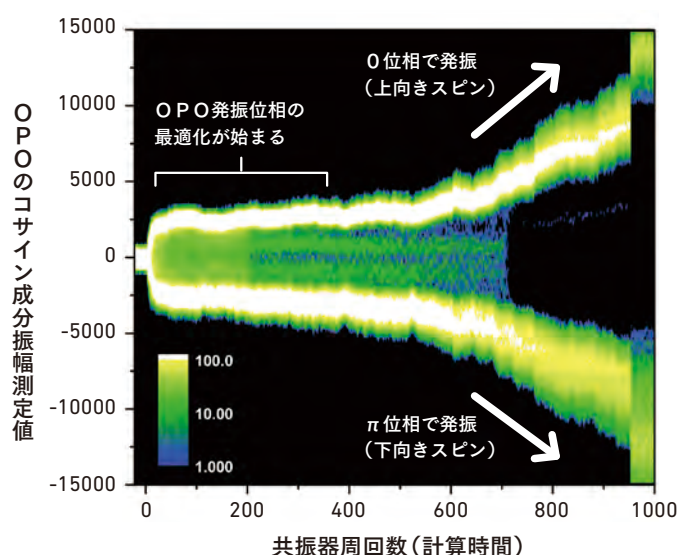


図3.QNNの構成

光ファイバーリング中に多数発生するOPOパルスがイジングスピンの、フィードバック用光パルスによるOPOパルス間の結合がスピンの相互作用に対応します。

図4.QNN解探索

OPOの発振位相が複雑な軌道を描きながら最適化問題の解を探索する過程を観測しました。計算が進むに従い、OPOの位相が0または $\pi$ になることが確認できます。

QNNの実現は、山本PMがこれまで築き上げてきた研究成果や研究ネットワークの集大成といえます。山本PMは、その道のりを、「QNNを構成する個々の装置は、自ら研究を行っていた、よく知っている技術です。QNNの研究開発は、自分が知っている世界の中で量子計算を行おうとするとどういう原理になるべきか、考えながら行っていたのかもしれない」と振り返っています。

そのような潜在的なコンセプトのもとで、QNNはデバイス技術、制御技術、測定技術など多くの技術の結集により実現しました。これらの技術は、山本PMが自ら研究を行ったものもあれば、長年、培った研究者ネットワークから得たものもあります。

「QNN実現のキーテクノロジーであるOPO、これはスタンフォード大学に所属していた時に同僚だったByer先生からいただいた知見です。コーヒブレイク中にQNNのアイデアについて話したところ、新しいレーザとしてOPOを薦められたことがきっかけでした」と山本PMはQNN開発エピソードの一端を語ってくれました。

## QNNが導く光ある未来とは

しかし、これでQNNの研究開発が完了した訳ではありません。QNNを社会実装するためには、社会の中にある問題を適用するためのアルゴリズムを開発し、実際に問題を解くことで、その有用性を実証する必要があるからです。

そのための第1歩として、QNNを創薬のための化合物探索などに適用することが計画されています。

新薬探索の研究に携わる理化学研究所の緒方浩二研究員は「活性をもつ化合物をこれまで以上の確率で、しかも短時間で探し出すことができる可能性があることから、創薬の研究開発を加速すると考えています」とQNNへの期待を膨らませています。

また、社会実装のための越えるべきハードルとして、マシンの大規模化が挙げられます。機械学習・深層学習や、医療・天体などの画像処理への応用は、より規模の大きな組合せ最適化問題を解く必要があり、スピン数を更に増やす必要があるためです。これにつ

いて山本PMは「マシンの大規模化への道筋は既に見えています。現在の目標は可搬型マシンの開発と、2年後に10倍以上のスピン数を実現することです」と自信をのぞかせます。スケールアップのための柔軟性が高いことも光を使うことの大きなメリットの1つといえます。

実問題に対する実証が進められているQNNですが、その潜在的な性能はどの程度なのでしょうか？

基本原理の探索を担当した国立情報学研究所の宇都宮聖子准教授は、「QNNを使うことでより効率的に解くことができる実社会の問題をさらに探索していきます。加えて、QNNの実現の方法は今回のシステムの他にも様々な方式が考えられます。これらについても検討を行い、実装の自由度、計算速度、物理系のスケールアップなど、解きたい問題の用途に応じた最適化計算機を実現したいです」と更なる進化について語っています。

プロジェクトでは、今回開発したQNNをインターネットを介して世界中の誰もが使えるクラウドサービスを本年中に開始する予定です。

# 非連続イノベーションの実現に向けて

ImPACT (革新的研究開発推進プログラム) は、16 名のプログラム・マネージャー (PM) を中心に、それぞれのプログラムが日々、目覚ましい成果を上げています。そうしたプログラムの最新動向をご紹介します。

**P**  
**M** **Tadokoro**

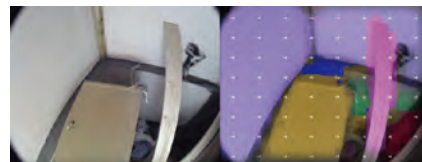
<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160907/>

## 被災環境下での搜索・状況確認活動を支援する画像認識システム

信州大学の山崎公俊助教とアーノルド・ソービ研究員は、タフ・ロボティクス・チャレンジにおける極限画像処理を担当し、被災した倒壊家屋などでの利用を目的とした画像認識システムを開発しました。このシステムは、被災現場の映像に映っているものの種類や材質を解析し、その結果をユーザに提示することで、搜索活動を支援します。

従来の画像認識器の構築には事前の学習が必要であり、手間と時間がかかるため、被災現場のように無秩序な環境への素早い対応が困難でした。山崎助教らはこの課題に対応するため、少ない事前情報から画像認識器をつくり出す技術を開発しました。今後、地震災害によって生じた瓦礫の中での人命救助などへの利用が期待されます。

信州大学 山崎公俊



入力映像(左)と映像解析の例(右)。壁や柱などが半自動的に色分けされ、被災屋内の状況把握に役立つ

**P**  
**M** **Tadokoro**

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20161101-2/index.html>

## 崩壊の危険性のある瓦礫上での移動が可能な脚型プラットフォーム

早稲田大学の高西淳夫教授と橋本健二助教の研究チームは、タフ・ロボティクス・チャレンジの一環として、脚型ロボットのプラットフォームWAREC-1 (WAseda REsCuer-No.1) を開発しました。災害現場でロボットが活躍するためには、刻々と変化する未知の様々な極限環境に適応しながら移動できることが必須です。今回新たに開発した

WAREC-1は4脚歩行、2脚歩行、腹ばい歩行、はしご昇降など、状況に合わせた柔軟な脚移動が可能です。今後は、他研究チームの研究成果 (ロボットハンドや遠隔操作システム、画像処理技術、音響処理技術など) を統合し、よりタフなロボットの実現を目指し、研究を進めていきます。

早稲田大学 橋本健二



WAREC-1の腹ばい歩行の様子。胴体部を積極的に接地させることにより、高い安定性を保つ

**P**  
**M** **Tadokoro**

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20161111-2/>

## 遠隔操作性と繊細な作業性を備えた災害対応重作業ロボットの開発

田所プログラムの一環として、大阪大学の吉瀬裕特任教授らの研究チームでは、従来の建設機械に比べて、飛躍的に作業性と機動性の高い災害対応重作業ロボットの実験機を開発し、東北大学のテストフィールドで公開実験を行いました。

実験機では、新制御システムによる運動特性の飛躍的な向上と力覚・触覚フィードバックを加えた遠隔操作シス

テムにより、自在で器用な作業性を実現しました。また有線給電ドローンと極限画像処理システムを搭載して、厳しい災害現場でも高い機動性を発揮することを確認しました。公開実験は新聞などでも報道されました。

今回の実験結果をもとに、最終目標であるさらに作業性の高い2本腕ロボットの開発を目指します。

大阪大学 吉瀬 裕



被災車両のドアを開け、煙中の対象物を取り出すロボット

P M Ito

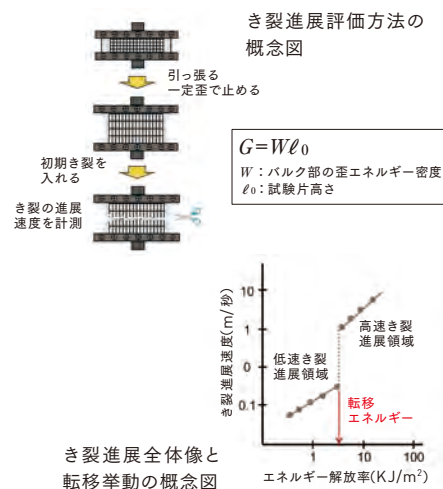
<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160928/>

## 強靱高分子複合体による省資源タイヤの実現

株式会社ブリヂストンは、伊藤プログラムの一環として、「強靱高分子複合体による省資源タイヤの実現」に取り組んでいます。これは、既存技術の枠を超えた強靱な材料を開発し、各部材の薄肉化により、さらなる低燃費性・省資源性の実現を目指すものです。今回、標準的な低燃費ゴム配合対比、燃費特性を大きく損なうことなく、開発指標である「き裂進展」の転移エネルギー

ギを4倍強向上させる材料の開発に成功しました。この材料をゴムクローラに用いて実証検証を行った結果、摩耗速度が60%低減し、設計指針の妥当性を確認しました。今後、さらなる強靱性向上と、低燃費性との両立を追求します。これまでに発表した研究成果は、新聞などでも報道されました。

株式会社ブリヂストン 角田克彦



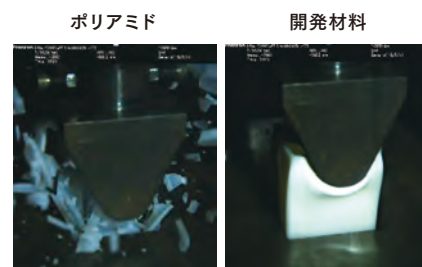
P M Ito

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160928-2/index.html>

## 環動ポリマー構造を導入し、竹のようにしなやかでタフなポリマー材料を開発

伊藤プログラムの一環として、東レ株式会社のグループは、分子結合部がスライドする環動ポリマー構造を分子レベルで導入することで、硬くても力を受け流す竹のような材料になる「しなやかでタフなポリマー材料」を開発しました。環動ポリマー構造の導入により、ポリマーのもつポテンシャルを最大限に引き出せる可能性があること

から、今後、自動車、家電、スポーツ用品など、幅広い分野への応用展開とポリマー材料市場の拡大が期待されます。最終段階として、実車スケールでのコンセプトカーを作製する計画に加え、新たに車以外の用途展開としてパラリンピックへの貢献も視野に、義足などへの応用についても検討していきます。



車体構造材を想定した衝撃試験の様子(衝突時速32km/hの衝突に相当)。ポリアミドは変形せずに破壊されたのに対し、開発材料はしなやかに変形しながら2倍以上のエネルギーを吸収する

東レ株式会社 小林定之

P M Ito

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20161111/>

## 凹み傷も切り傷も自己修復できるコーティング材料

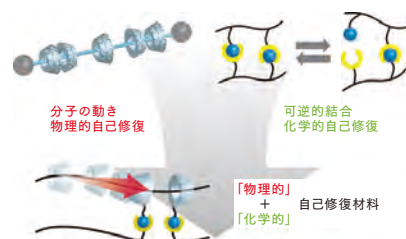
～車のコーティングから止血シートまで幅広い分野で製品化に繋がる可能性～

伊藤プログラムの一環として、大阪大学の原田明特任教授らは、新しい設計原理の自己修復材料を開発しました。

これまで材料の力学特性や切れても繋がる結合を利用した自己修復材料が開発されてきましたが、「硬い材料は傷ついても修復しにくい」という課題が残されており、これを解決する材料が求められています。今回の研究では、ポリロタキサンを可逆的な結合で繋い

だ設計の自己修復材料を開発し、従来設計の材料と比べて極めて速く効率のよい自己修復性を示しました。化成品から医用材料に至るまで、幅広い分野への応用が期待される成果です。本研究の内容は、特許出願し、学術雑誌*Chem*に発表しており、新聞・Web報道で大きな注目を集めています。

大阪大学 原田明、高島 義徳、中畑雅樹



ポリロタキサンのひも状分子に沿った輪分子の動きを利用した「物理的自己修復」(左上)と、分子レベルで切れても繋がる可逆的結合を利用した「化学的自己修復」(右上)の概念、それらを組み合わせた自己修復材料(本研究)の概念図

## イオン用超伝導加速空洞の高加速電圧試験に成功

～大強度イオンビームのより効率的な加速を可能に～

純ニオブ材料を用いた超伝導加速空洞を開発・建設している理化学研究所 仁科加速器研究センターの坂本成彦チームリーダーらは、高電圧を発生させる試験を行い成功したことを発表しました。

高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核分裂生成物 (LLFP) を核変換するためには、大強度のイオンビームを短時間で加速し、高電圧を発生する加

速空洞が必要です。しかしながら、従来の常伝導空洞では電気抵抗が大きくなり電圧を高くすることができませんでした。本チームで開発した超伝導加速空洞は、電気抵抗が小さく大電圧に耐えられるので、LLFP核変換用加速器だけでなく、核融合における重陽子用加速器のほか、医療用ラジオアイソトープ (RI) 製造や粒子線治療の加速器などへの貢献も期待されます。

製作した超伝導加速空洞



高エネルギー加速器研究機構内で超伝導加速空洞の試験

プログラム・マネージャー 藤田玲子

## 新国際無線通信規格 Wi-SUN FANに対応した無線機の基礎開発

京都大学の原田博司教授の研究グループは、ローム株式会社・小宮邦裕課長の研究グループと共同で、IPv6によるマルチホップを利用して、低消費電力で伝送可能なIoT向け新国際無線通信規格Wi-SUN FAN (Field Area Network) に対応した無線機の基礎開

発に成功したことを発表しました。今回開発した無線機は、原田教授が主体的に標準化を行ってきた1GHz以下の周波数を用いて、1ホップ当たり1km程度伝送可能な米国IEEE802.15.4g技術を核に、WiFi™システムで導入実績のあるインターネット接続用国際規格



およびマルチホップ国際規格を付加して、数km離れた場所に存在する数百のセンサーからの情報収集と機器制御を行うことが可能です。

プログラム・マネージャー 原田博司

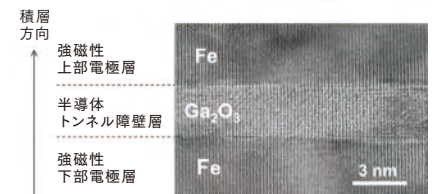
## 世界最高性能の半導体系トンネル磁気抵抗素子

～待機電力ゼロのトランジスタ実現へ道を拓く～

産業技術総合研究所スピントロニクス研究センターは、独自に開発した単結晶酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) の成膜プロセスを用いて、半導体  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  をトンネル障壁層とした単結晶だけからなるトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子の開発に成功しました。TMR素子の性能指数である磁気抵抗変化率は92%と高く、半

導体を障壁層としたTMR素子として室温における最高性能を達成しました。このTMR素子は、メモリー機能を持ち、待機電力がゼロの縦型のスピン電界効果型トランジスタの基本構造となるもので、佐橋プログラムの目指す究極のエコIT機器への貢献が期待されます。

産業技術総合研究所 齋藤秀和



今回開発したTMR素子断面の電子顕微鏡写真。下部の鉄(Fe)電極層から、半導体  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  障壁層、上部のFe層まで、各層の原子が積層方向に直線的に並んでおり、全単結晶TMR素子であることがわかる。

フジテレビインターネットチャンネル「ホウドウキョク」にて、山川プログラムにおける最近の成果(発表者: ATR 川人所長)が紹介されました。

成果プレスリリース: [http://www.atr.jp/topics/press\\_161122.html](http://www.atr.jp/topics/press_161122.html)

「ホウドウキョク」URL: <https://www.houdoukyoku.jp/pc/archive/0008/>

生物を超えるバイオ技術が見えてきた

# オーダーメイドの 人工細胞が繰り出す バイオ産業革命

日本が得意とするマイクロデバイス技術と生命現象の試験管内再構成技術を組み合わせることで、生体物質の計測やモノづくりに根本的な変革をもたらすのが野地博行PMが目指すプログラムの目的である。そのため現在、基礎科学に深く根ざしながら3つの意欲的なプロジェクトを進めており、広く社会に役立つバイオイノベーションを起こそうとしている。

## 3本柱でバイオ技術の壁を 乗り越える

東京大学本郷キャンパス内の工学部。その新しい建物内の明るく広々とした研究室で、多数の学生や研究者がコンピューターの並ぶデスクに向かっている。一角にある白木のテーブルでは熱心にディスカッションする数人も。活気にあふれるこの研究室を率いるのが野地博行PMだ。

ImPACTでは、3つのプロジェクトを立ち上げ、バイオイノベーションを目指す研究開発とマネジメントに取り組んでいる。企業を含め多様な研究者が加わる大規模プロジェクトのマネジメントは簡単ではない。「確かなかなか大変ですが、基本はわかりやすい目標設定と十分なコミュニケーションだと思います」と野地PMは語る。

3つのプロジェクトは〈はかる〉〈つくる〉〈ふえる〉をそれぞれテーマとしている。

1つ目の〈はかる〉が変えようとしているのは遺伝子診断や臨床検査を含むバイオ分析の領域だ。例えば現在の遺伝子検査。感度は高いが作業が煩雑で時間がかかり、費用もかさむ。そのうえ定量性は高くない。一方、インフルエンザ、肝炎などのウイルス感染症などで使われる抗体検査法は、比較的迅速に結果が得られるものの感度が低い。そこで迅速で感度が高く、安価で便利な分析法と装置を社会に提供するのがこのプロジェクトの目指すところだ。1分子レベルで生体反応を検出しデジタル化処理することで、きわめて効率的な生体物質計測システムをつくる。

2つ目の〈つくる〉が目指すのは、天然に存在する酵素の能力をはるかに上回るスーパー酵素をつくり出すこと。活性が10倍以上高いバイオ分析用酵素や熱に安定な酵素をつくり出せば、臨床検査やバイオものづくりが激変するだろう。そのためにマイクロメートルレベルの超並列リアクターを開発し、

人工細胞が物質生産に使われるようになったとき、日本はそのコアとなる基盤技術を確保していきたい。



Hiroyuki NOJI

野地博行



|            |                      |
|------------|----------------------|
| 1993年      | 東京工業大学理学部卒業          |
| 1997年      | 東京工業大学総合理工学研究科博士課程終了 |
| 1998～2000年 | JST「CREST」博士研究員      |
| 2000～2001年 | JST「さきがけ」研究員         |
| 2001～2005年 | 東京大学生産技術研究所助教授       |
| 2005～2010年 | 大阪大学産業科学研究所教授        |
| 2010年～     | 東京大学大学院工学系研究科教授      |
| 2015年～     | ImPACT プログラム・マネージャー  |



効率のよいスクリーニングによりスーパー酵素を生み出すことを目指す。

3つ目の〈ふえる〉は、自己増殖する人工細胞を合成するという挑戦的なプロジェクトだ。人工ゲノムを合成し、人工細胞リアクタに導入し、生物と同じように自己増殖する系をつくるのである。難易度が高く、萌芽的な段階の研究開発だが、実現すれば生物を人工的に生み出すというとても挑戦的な研究開発だ。そしてこの研究は、人工的にデザインした細胞であるがゆえに、生体物質の生産等のプログラミングを容易に実現できるため、バイオ産業に革新的なイノベーションをひき起こすことが可能になる。

これらの取り組みによって、野地PMは「バイオものづくり分野に革命を起こす」ことを目指しているのである。

## ATP合成酵素で1分子計測を思いつく

小学生の頃、野地PMには1冊の愛読書があった。子ども向けの科学本で、その本の中で生命誕生について「海の中でコアセルバートという有機物の固まりから生物が発生した」というくだりがあった。その本が好きでボロボロになるぐらい読んだという。

コアセルバートとは有機物からなる液状の小胞のことで、1920年代に旧ソ連の生化学者アレキサンドル・オパーリンが著書『生命の起源』のなかで、コアセルバートこそ生命と非生命をつなぐ原始細胞体だと唱えた説のことである。小学生時代に野地PMはすでに「生命とはなにか」という生物の根本的な問いに魅了されていたようだ。

高校時代は、学科としては生物より物理や化学が好きだった。しかしバイオテクノロジーの将来性を強く感じて、東京工業大学の学部2年生から生命科学を本格的に学んだ。研究者としての基礎が培われたのは、大学院博士課程

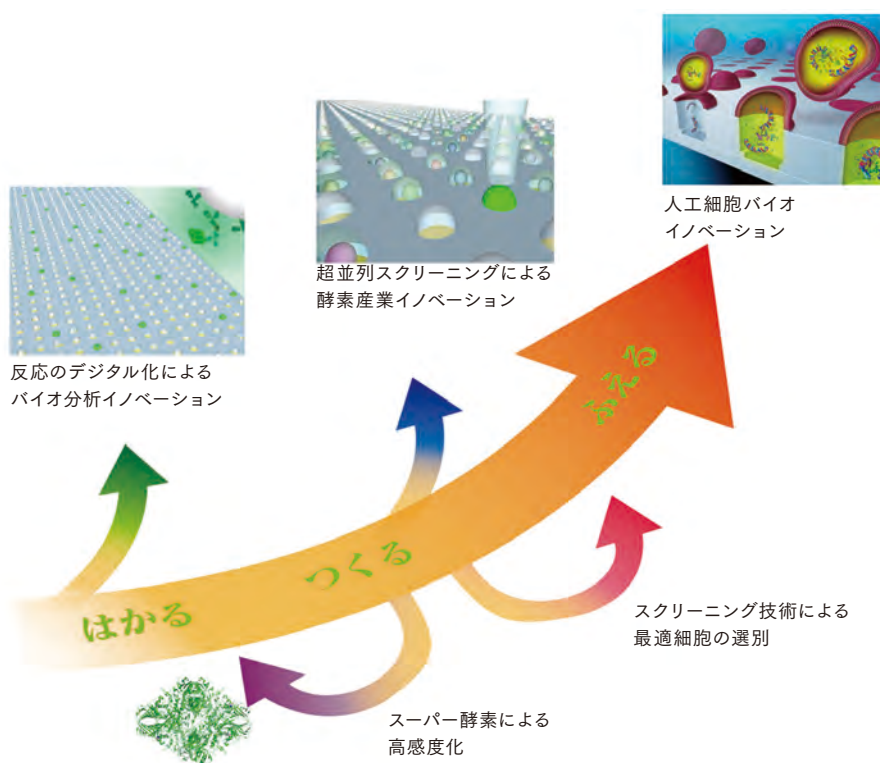


図1. ImPACT野地プログラムの全体を見通す図

の頃。その後の研究やImPACTのプロジェクトにもつながるテーマに巡りあった。それがATP(アデノシン三リン酸)合成酵素の回転という現象だ。

生体のエネルギー通貨といわれるATPは、エネルギーの需給事情に合わせて合成されたり、分解されたりしている。合成酵素には3つの活性部位があり、それが順番に働くためには回転しているはずだとする「回転説」が米国の研究者によって提起されていた。

大学院での研究テーマは指導教授から与えられたものだったが、教授自身は回転説にはまだ懐疑的で、酵素の別の構造変化によってATP合成が起こるのではないかと考えていた。ところが、「先生の仮説はどう実験しても否定的なデータしか出ない。そこで、回転説を検証することにしたが、それまでの生化学的手法ではどうしても証明できそうにない。これを突破するために、それまでの生化学とは全く異なる戦略を選びました」

それは多分子系で解析するのではなく、分子を1個で見る手法を工夫する

ことだった。この方法でATP合成酵素が毎秒100回も回転し続けているのを可視化することに成功し、回転説に決定的な証拠を提供した。

結果的に教授の考えとは違う仮説を立証することになったが、実験は1分子細胞生物学の始まりを告げた仕事として高く評価された。海外でも胸を張って成果を発表した。

## 「役に立つ」を知る

東京工業大学で基礎科学の研究者として育った野地PMは、その後東京大学生産技術研究所に勤務した。

ATP合成酵素の回転を顕微鏡で見ることに成功していたが、回転に伴う触媒反応を直接計測するには顕微鏡技術だけでは役に立たない。そこで東京大学では微細な反応容器をつくってタンパク質分子1個1個をそのなかに閉じ込めて測定するシステムを考案した。製作にあたっては東京大学生産技術研究所の半導体加工技術の研究者とともにデバイスを開発した。微細な空間に

分子を閉じこめると大幅に濃縮され、微量の計測ができるようになる。

「それまでは理学部の環境にいて、少し偏見をもっていたと思います。しかし、価値観や言葉の違いはあっても、工学者も創造的な技術的チャレンジに取り組んでいることを知り、考えが変わりました」

この研究は2005年に論文をまとめ、特許も出願した。だが、このときにはそれが何にどう役に立つという考えが必ずしもしっかり固まっていたわけではなかったという。「気持ちはまだ理学部に近く、十分に工学部的ではなかったのかもしれない。社会に役立つというより、何かに使えるのではという程度の認識でした」このように役立つという説得力が今ひとつだったせいか、この特許は大学には受け入れられず、結局ポケットマネーで維持するしかなかった。

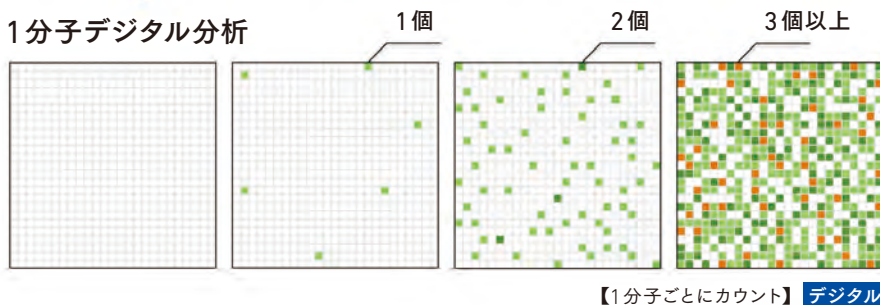
一方で、このデバイス研究が評価されて、大阪大学にあらたなポストを得ることになった。大阪大学ではデバイスにさらに改良を加え、ImPACTの〈はかる〉プロジェクトで使用しているものになりに近いものをつくり出した。

2010年にはこのデバイスをさらに

### 従来のバイオ分析



### 1分子デジタル分析



### デジタル計測のS/Nは濃度に依存しない

図2. はかる

拡張した1分子デジタルELISA法を提案して、5年間のCRESTに採用された。ELISA法は、酵素反応を利用して血液中の様々な生体分子を超高感度で測定する技術だ。それまでも臨床検査の現場で広く使われてきたが、野地PMが考案したデバイスを使えば1分子のデジタル臨床検査が実現し、飛躍的な超高感度で目的のマーカを検出できた。

「血液1滴の超高感度診断法」としてマスコミにも広く取り上げられ、企業からの引き合いも驚くほど多かった。これを契機として、多数の企業を対象に共同研究や技術指導を行うようになった。今回ImPACTに参加している企業も、このときからの付き合いだ。一人一人をよく知っており、方向性は一致している。

「企業と付き合ううちに、自分の研究は予想以上に社会の役に立ちそうだという実感が出てきました。そして自分の基礎科学的な興味と企業の関心とを1つにすることができないかと考えた時に、ImPACTならできるのではないか、社会の『役に立つ』ものができるのではないかと判断したのです」

### 基礎科学はイノベーションに 案外近い

野地PMがImPACTに応募した理由にはもう1つ大きな動機がある。それは「基礎科学者が視点を変えてその気になると、実はイノベーションに直接繋がるのではないかと考えたのである。基礎科学は、まさしく科学の基礎、



根源部分の研究開発である。生物学の根源部分で新たな知見、開発ができるなら、生物学に関わる領域全体にイノベーションとして波及するのではと考えたのである。

このプログラムで野地PMは、「人工細胞」という言葉をキーワードに掲げている。生命を自分の手でつくる「人工細胞」という試み、これは生命を人の手で生み出すという生物学の根幹に関わる領域である。野地PMの様々な研究、技術開発は、すべて子どもの頃に好きだった本が教えてくれたコアセルベートに始まっている。生命とは何か、生命がどうやって生まれたのかを知り、生命＝「人工細胞」をつくりたいと繋がっている。いったん「人工細胞」をつくり出す技術が確立することができれば、原理的に細胞の増殖、生体物質の製造等をプログラミングできることから、既存の生物、コントロールのきかない生物現象に依存するバイオ産業の突破口になり、社会の「役に立つ」イノベーションに繋がると考えているのである。

すでに研究室では、細胞を構成している脂質二重膜でできた反応器に細胞を融合したサイボーグバクテリアができています。現在は次の段階として人工ゲノムを試験管内で合成してそれを設計通りに起動させ、複雑な生命現象を

再現する反応をそのなかで生み出すことを目指している。そして最終的に細胞を自己複製させることが野地プログラムの3プロジェクト全体の最終的な集約点でもある。

### 人工細胞をつくる基盤技術を国内で

米国では設計した遺伝子回路を天然の細胞に組み込むことからさらに進んで、2010年にはグレッグ・ベンターらがゲノムを化学的に合成し、ゲノム構造を大きく改変した細菌をつくり出すことに成功した。ヒトゲノムを化学合成する大規模な研究プロジェクトも2016年に立ち上がっている。

活発化する世界のこうした動きに対して、ImPACTを進める人工細胞づくりにはどんな優位性があるのだろうか。野地PMは「優位性はある」と断言し、ベンターらの人工細胞合成を「確実に教科書に載る大きな成果」と評価する一方で、「古典的な遺伝子操作を積み上げた結果で、技術的イノベーションはあまりない」と見る。

それに対してImPACT〈ふえる〉プロジェクトでは、すでに試験管内でゲノムを指数関数的に増殖させることに成功し、細胞を使わないとできなかった遺伝子のクローニングや合成を試験管内で効率よく行う戦略で取り組んで



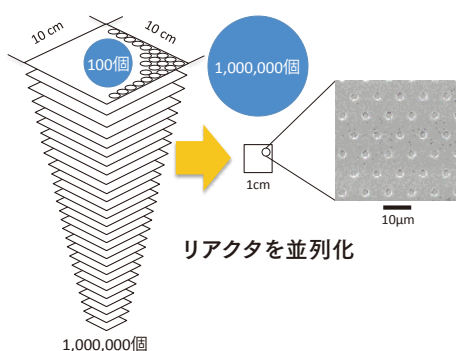
図4. ふえる

いる。ゲノムを効率よく合成する技術と、サイボーグバクテリアとを組み合わせれば、「人工細胞ができました」という1回きりの成功ではなく、工業的な生産に耐えられる高い再現性と拡張性を備えた技術が確立できるとも考えている。

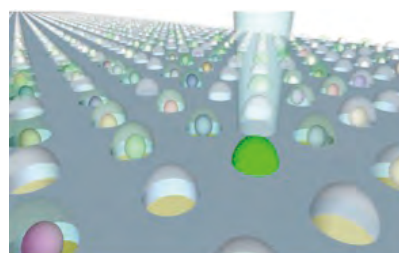
「天然の細胞は進化の記憶をもっていて、その時々環境に適応するために、いわば場当たり的にゲノムをつくってきたので、DNA配列構造はツギハギだらけ。人間がグランドデザインをもとにきちんと設計すれば、天然の細胞がもっていない能力や特徴を備えた人工細胞ができる。そして人工細胞を使うことで、日本発の化学合成、検出、機能性材料創出、創薬を行うことが期待できます。基盤となる人工細胞、コア技術を日本で、ImPACTで生み出し、様々な分野にイノベーションを起こす、まさに今、準備段階なのです」

野地PMは産業や生活の場の中で、まさに社会の「役に立つ」研究開発を、基礎科学の分野からのアプローチで起こそうとしているのである。

図3. つくる



遺伝子発現機能を搭載した人工細胞リアクタアレイの超並列スクリーニング技術によるスーパー酵素の探索



ヒットしたリアクタからDNAを回収

# バイオニックヒューマノイドが 新しい医療をつくる ヒトや実験動物の代わりに大活躍

大学や企業、病院、海外と多彩なキャリアをもつ原田PM。ロボットの国際共同研究プロジェクトのマネジメントに携わった経験をいかし、人体を精巧にモデル化した「バイオニックヒューマノイド」を開発している。このバイオニックヒューマノイドをプラットフォームにして、医療や産業に大きな革命を起こすことを目指している。



Kanako HARADA

みんなの技術を合わせて  
画期的なロボットを開発し、  
技術と社会の懸け橋にしたい。

## 諦められなかった 医療工学への夢

「子どもの頃から医療に興味がありました」と原田PM。医学部に入るかどうかは別として医療と関係する仕事に就きたいと、進学先は医療に関わる工学系の専攻を選んだ。4年生になると、手術支援工学の研究室に入り、直径1センチほどの開頭部から脳を手術するロボットの研究を始めた。

2001年に修士課程を終えると、日立製作所に就職。3年ほど勤務したが、手術支援工学への夢を諦めることができなかった原田PMは退職を決め、早稲田大学の博士課程に進学し、21世紀COEプログラムに参加した。原田PMは、途中から国立成育医療センターの病院で胎児用手術ロボットの開発を行いながら、大学の研究を続けるという生活を続けた。

胎児外科とは母親の腹壁を通して子宮に術具を挿入し、胎児や胎盤の手術をするという当時としては画期的なものだった。病院では、医師と2人で研究を進めたが、原田PMは医師と一緒に機器を開発することの難しさを痛感した。「専門用語をはじめ、私と医師では暗黙知がかなり異なるのです。分野が違う専門家同士でお互いに理解することの難しさと重要さを感じました」

## 研究マネジメントを体験する

原田PMは21世紀COEプログラムの支援を受けて1か月間イタリアにある聖アンナ大学院大学に留学した。ロボット工学で有名な大学で、手術ロボット研究の権威や世界中のロボット研究者、学生が集まっている。わずかな期間だが、胎児手術用のセンサーを研究し、試作までこぎつけた。この時の経験に基づいて、博士号取得後に博士研究員として3年間働くことになった。

### 原田香奈子

2001年 東京大学大学院 博士前期課程修了  
2001～2004年 株式会社日立製作所  
2005～2007年 (財)医療機器センター 流動研究員  
2007年 早稲田大学大学院 博士後期課程修了 博士(工学)  
2007～2010年 イタリア聖アンナ大学院大学 博士研究員  
2010～2012年 東京大学大学院 特任助教  
2012～2015年 東京大学大学院 特任講師  
2015年～ ImPACTプログラム・マネージャー  
2016年～ 東京大学大学院工学系研究科准教授





写真：イタリアでの仲間たちと  
留学生はみなそれぞれの国に帰ったが、交流は続いている

2007年に博士研究員として着任すると、原田PMは手術ロボットやモジュールロボット、産業機械など3つの大型国際共同研究プロジェクトに参加し、チーム内のマネジメントにも関わった。

「1つは未来の手術ロボットとして、体内で合体するロボットをつくるというプロジェクトでした。小さなパーツを患者が飲み込み、体の中で合体してロボットになって手術をするというもの。手術が終わったらまたバラバラにして体の外に出します」斬新なコンセプトが評判になり、メディアにも取り上げられた。

「ヨーロッパの大型国際共同研究プロジェクトではいろいろな国の大学、大企業、中小企業などが共同研究をしないと成果がでないような仕掛けをつくっている。ひとつひとつの国が小さいので、このようなやり方で共同研究ができる人材を育成しているのでしょう」このため、多くの人と話し合いを重ねながらプロジェクトを進めなければならない。「みな自己主張が強いので、どう決着点を見つけるかはずいぶん考えましたね」

英語が通じず、イタリア語でしかやり取りできないこともあった。特に専門用語は難しく、交渉は苦労した。「イタリア語の専門用語を事前に調べておくなど努力を重ねると、だんだん相手のいうことがわかるようになり、自分の意思を伝えることもできるよう

なってきました。努力をして誠意を示すとともに相手に尊敬の念を抱けば、交渉できるのではないかと思います。もっとも外国人だからと大目に見てもらったこともあります」と原田PMは笑う。

## イタリアの生活で変わった 人生の価値観

「イタリアに行って、人生の価値観がずいぶん変わりました。イタリア人は、仕事と生活のバランスをうまくとり、人生を楽しんでいました」。研究室には、遅くまで仕事をする人や休日に仕事をする人は少なかった「夜遅くまで残っているのは私を含め、アジア人ばかりでした。ヨーロッパでは、家族と過ごすことをとても大切にしています。子供の迎えのために会議に遅れたり、早退したりする人を非難する人も全くおらず、各々の家庭の幸せを皆で支えているようでした」

原田PMも夜は研究室の人たちと海辺で過ごしたり、休日に格安チケットで海外旅行をしたりと、研究以外ではのんびり過ごすことができた。

研究室にもすっかり溶け込み、意欲的に研究を進めていた原田PM。そのまま大学に残ることを勧められたが、法律などの事情で難しくなってしまった。そこで原田PMは、日本に戻るこ

とにした。

## みんなの技術を合わせて ロボットをつくる

原田PMのプログラムは、ヒトや実験動物の代わりとなるセンサー付精巧人体モデル「バイオニックヒューマノイド」を開発し、それをプラットフォームとすることで医療や新しい産業に革命を起こすというものだ。研究開発プログラムは、プロジェクト1「バイオニックヒューマノイド」、プロジェクト2「スマートアーム」、プロジェクト3「医療応用」、プロジェクト4「産業応用」で構成され、研究が進んでいる。

「ImPACTに応募したのは、これまでの経験をいかして研究マネジメントに挑戦してみたかったからです。ヨーロッパのようにみんなの技術を組み合わせる1つのものをつくりたかったのです」と原田PMは意気込みを語る。日本では従来このような形で研究を進めることはまれであったが、ImPACTの制度が誕生しPM制度を活用すればできるのではと考えたからだ。専門性をもった多様な研究者・技術者がみんなで1つのものをつくれば、それぞれの強みが生かされると確信して、工学や医学など様々な分野の世界トップレベルの研究者を指名した。



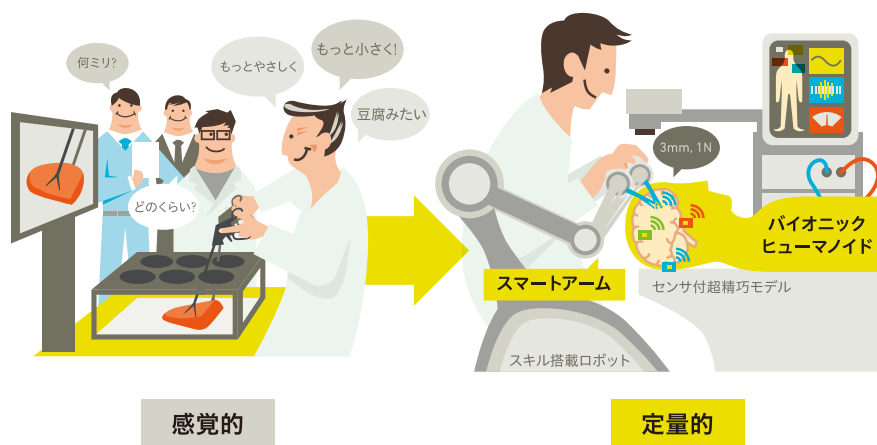


図1. 研究のコンセプト

センサー付の精巧な人体モデル「バイオニックヒューマノイド」を開発し、感覚的な表現を定量的に理解し、試行錯誤をなくすことで、技術をいち早く社会に届ける。また、これを活用してロボット技術によるスマートアームを開発し、小さな切開部から精密な手術を行うという医療革命を実現する

「ImpACT応募のもう1つの動機は、試行錯誤をなくすためのプロセス革命を提案しなかったことにあります」

このプログラムで開発しているバイオニックヒューマノイドは、手術手技の教育や訓練に活用するだけでなく、医工連携を容易にするプラットフォームとすることも目的としている。手術手技やノウハウはあいまいな感覚的な言葉で表現されることが多い。例えば、医師が「ここは優しく掴む」といっても、それはその人の感覚で判断されたものである。技術を習う側の若手医師や医師の要望を聞く工学系研究者には、いわれた言葉の感覚が具体的にはどのようなものか、実は伝わりづらい。そこで、人の特性を再現したロボット（バイオニックヒューマノイド）にセンサーを搭載し、熟練者に模擬手術をしてもらい操作を記録する。患者がどのように手術されたかという視点で手術操作のデータをとって解析すれば、その人の癖に関わらず熟練の技術を客観的に示すことができる。「優しく掴む」という感覚について、掴む力

を定量的に示すことができるので、熟練の手技や必要な技術を定量的かつ効率よく伝えることができるのだ。「バイオニックヒューマノイドをプラットフォームにして、さまざまな研究開発や教育、訓練などを加速させ、医療をはじめとして、いろいろな産業に革命を起こしたいと考えています」

### 生体膜組織までも再現する

プロジェクト1の目標は脳と眼球を正確に再現した頭部モデルをもつバイオニックヒューマノイドを開発するこ

とである。脳や眼球のモデルを開発するのは、動物では手術の訓練ができないからだ。例えば、眼科では眼の底の膜（内境界膜）をはがす手術をするが、動物の眼球にはこの膜はないので、医師は練習する機会がない。先輩の医師に「膜をさっとはがす」といわれても、膜がちぎれないようにはがすには、どれくらいの力や速さでどの方向に引っ張ればいいのか。はがす感覚は、やってみないとわからないのが現状だ。そこで、実際に手術を行った感覚を感じることができるモデルをつくりトレーニングをできるようにしたいというわけだ。「事前に十分なトレーニングができれば、安心・安全の医療につながります」

このバイオニックヒューマノイドは、脳や眼球、血管だけでなく、手術操作に重要となる厚さ6～600μmの生体膜組織をも人工物で精密に再現し、できる限りヒトの特性に近づけることが一番の目標だ。「それぞれの部分はつくりこめばきりがありません。トレーニング効果を出すにはどこまでつくりこむべきか、ということも重要な研究です。バイオニックヒューマノイドは、つくりこみの程度によっては、手技の上手下手を判断する手術手技評価用、医療機器の性能と安全性を評価す



図2. デザイン中の統合プラットフォーム

眼球や脳など部位ごとにモデルを開発し、統合することで精巧なヒトモデルを開発する



図3. プロジェクト2で目標とするスマートアーム

アームやツール、センサーを統合したスマートアームにスキルを搭載し、正確な操作と安全性を備えた手術の実現を目指す

るための医療機器評価用などに展開することも想定しています」

## 産業用ロボットを応用

プロジェクト2では、バイオニックヒューマノイドで定量化した医師からの要求に応じるための匠の手術ロボットであるスマートアームを開発している。産業用ロボットを応用した手術用ロボットで小さな切開部から精密な手術を行うことを目指す。

日本では産業用ロボットの開発が進んでいるので、その技術を医療に応用したいと原田PMは考えた。産業用ロボットをベースに研究を進めればコストも安く、研究のスピードもあがる。

「医師が操作することになりますので、ある程度は自動で安全を保証したり、難しい操作はロボットが自動で熟練の動きをしたりするなどの機能を搭載することを考えています」

例えば、手術中に視野外で器具と生体組織がぶつかりそうになったら、自動で操作を修正してくれるものを想定している。

産業用ロボットの技術者が加わると高度なロボット技術が開発できるのだが、一方で、滅菌対応など医療機器開発の暗黙知をしっかりとシェアしなければならない。「これが医工連携の難しいところなのですが、うまく組み合わせればいいものができるので、議論を重ねていきたいです」

さらにプロジェクト3には、医師が

入っており、バイオニックヒューマノイドとスマートアームに必要なデータを提供し、また、試作品の評価を行っている。このように、研究段階から医師としっかり連携していくことが極めて重要である。

プロジェクト4では、産業応用として痛みを感じることができるダミーの開発をスタートした。従来のダミーは生死やけがの有無を判断するものであったが、例えば、街中を移動するサービスロボットは周囲のヒトに痛みを与えないように設計しなければならない。ヒトや動物で痛みを評価しながら試行錯誤で開発を進めるのではなく、センサー付の精巧な人体モデルのコンセプトを展開することで定量的・効率的・倫理的な研究開発を実現する。

## プロジェクトが動き出したことを実感

ImPACTのプログラムが始まり、医学と工学の考え方の違いをいっそう強く感じるという。医師は、患者によって判断が異なるという文化なので、医療機器開発でもできたものを見て判断し、使い道を考える、というスタンスだ。一方で工学系の研究者にとっては要求仕様がしっかり定まっていないと研究は進めにくく、途中での大幅な仕様変更は歓迎されない。

「そのバランスをいかにうまくとるかが重要なのです」と原田PMはいう。最初はこのような違いを踏まえた上でコンセプトをどのように共有し実現するか、その調整に手間取った。しかし半年ほどかけて両者の調整をはかることで、研究のコンセプトを踏まえた上でみんなの意思が統一され、プロジェクトが動き出した。

「これまでにないスピードでプロジェクトが進んでいると感じています」と原田PMは研究が軌道に乗っていることを実感している。「プロジェクト期間内に一部でも社会実装するこ

とが目標ですが、もっと長いスパンでみていきたいです」

このプログラムで多様な分野の研究者が協力し、そこから生まれる信頼関係や新しい技術は、ImPACT終了後の共同研究や産業化を進めていくための重要な基盤を築くことになるかと原田PMは確信している。

## 技術と社会の懸け橋に

「試行錯誤をなくすプロセス革命という発想は、これまでの延長線上にない、非連続なイノベーションだと思っています」と原田PMは自信を見せる。バイオニックヒューマノイドのようなセンサー付の精巧なモデルを用いて、感覚的表現を定量化し、効率よく伝えるという考えは革新的だ。また、人や実験動物を使わなくてすむので、倫理的問題も解決される。

しかし、「このプログラムで、医療を主な目的にしているのはあくまでも第1段階です」と原田PMはいう。医療を目的に選んだのは、社会的なインパクトが大きい分野だと考えたからだ。センサー付の精巧なモデルを使って感覚を定量化し、技術を伝承する、あるいは伝承された技術をロボットに応用するという考え方は、医療ばかりでなく介護や製造業、農業など感覚的表現が多用され試行錯誤が多い分野に発展できる。

「私たちが提案するセンサー付精巧モデルによるプロセス革命は、様々な分野でヒトや動物で評価するというプロセスを減らし、また研究開発や評価・訓練の試行錯誤をなくすことに貢献すると考えています。日本の技術が定量的・効率的・倫理的なプロセスを経て社会に加速度的に普及する手助けとして、技術と社会の懸け橋になると考えています」。

バイオニックヒューマノイドのようなプロセス革命が様々な分野で起こる日はそう遠くないことだろう。

## 革新的研究開発推進プログラム [ImPACT]

ImPACT は、実現すれば社会に変革をもたらす「非連続的なイノベーションを生み出す新たな仕組み」です。成功時に大きなインパクトが期待できるような、ハイリスク・ハイインパクトなチャレンジを促し、企業風土を醸成することを特徴としています。また、内閣府「総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）」が設定するテーマについて優れたアイデアをもつ 16 名のプログラム・マネージャー（PM）を厳選し、大胆な権限を付与し、優秀な研究者とともにイノベーション創出することも特徴のひとつです。



| プログラム<br>マネージャー<br>[PM]     | プログラム                             |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 伊藤 耕三<br>Kohzo Ito          | 超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現          |
| 合田 圭介<br>Keisuke Goda       | セレンディピティの計画的創出による新価値創造            |
| 佐野 雄二<br>Yuji Sano          | ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現     |
| 佐橋 政司<br>Masashi Sahashi    | 無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現        |
| 山海 嘉之<br>Yoshiyuki Sankai   | 重介護ゼロ社会を実現する革新的サイバニックシステム         |
| 鈴木 隆領<br>Takane Suzuki      | 超高機能構造タンパク質による素材産業革命              |
| 田所 諭<br>Satoshi Tadokoro    | タフ・ロボティクス・チャレンジ                   |
| 藤田 玲子<br>Reiko Fujita       | 核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化        |
| 宮田 令子<br>Reiko Miyata       | 進化を超える極微量物質の超迅速多項目センシングシステム       |
| 八木 隆行<br>Takayuki Yagi      | イノベティブな可視化技術による新成長産業の創出           |
| 山川 義徳<br>Yoshinori Yamakawa | 脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現           |
| 山本 喜久<br>Yoshihisa Yamamoto | 量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現     |
| 白坂 成功<br>Seiko Shirasaka    | オンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ衛星システム     |
| 野地 博行<br>Hiroyuki Noji      | 豊かで安全な社会と新しいバイオものづくりを実現する人工細胞リアクタ |
| 原田 香奈子<br>Kanao Harada      | バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命             |
| 原田 博司<br>Hiroshi Harada     | 社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム         |



企画・編集・発行

国立研究開発法人 科学技術振興機構 [JST] 革新的研究開発推進室

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's五番町

電話：03-6380-9012 E-mail：impact@jst.go.jp URL：http://www.jst.go.jp/impact/