

ImPACT

Newsletter

Vol. | 15 | Mar. 2019

Impulsing
Paradigm
Change through Disruptive
Technologies Program

〔特集〕

組合せ最適化問題を解決する
量子人工脳への挑戦———02

高出力レーザーのユビキタス化で
新技術・新産業の創出を目指す———06

超ビッグデータを真に有効活用し、
産業と医療分野のリスク低減を
目指す———08

山本プログラムが開発に取り組んできた量子ニューラルネットワークは、「組合せ最適化問題」を高速に解くことができる性能を持ち、私たちの生活に大きな変革をもたらす可能性を秘めている。山本喜久プログラム・マネージャーが目指す量子人工脳が実現できた時、どんな未来が待ち受けているのだろうか。



組合せ最適化問題を解決する 量子人工脳への挑戦

【写真1】スタンフォード大学における実験風景：ImPACT博士研究員Alireza Marandi（右：現在はカルフォルニア工科大学助教授）とPeter McMahon（左：現在はコーネル大学助教授）[Image credit：L.A.Cicero]

量子に発想を得たアクセラレータを開発する

山本喜久プログラム・マネージャーが取り組む「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」では、現代社会の様々な分野にあらわれ



【写真2】山本喜久プログラム・マネージャー

る「組合せ最適化問題」を高速に解くことができる量子ニューラルネットワーク（Quantum Neural Network: QNN）のハードウェアとソフトウェア技術の開発を行ってきました。

組合せ最適化問題の代表的なものに「巡回セールスマン問題」があります。ひとりのセールスマンが多数の都市を回る時にどういう順番に回れば、一番効率的かというものです。訪れる都市数が増えるにつれて、その組合せは爆発的に増えていきます。このような組合せ最適化は、創薬、通信・物流ネットワーク、圧縮センシング、機械学習、フィンテック（金融工学）など現代社会の様々な分野に現れます。量子効果を用いたコンピュータ（アクセラレータ）を使って、組合せ最適化問題を高速に解くことが期待されています。

そのため、量子コンピュータの研究開発が世界中で進められています。アメリカ、中国、EUなどが巨額の研究予算を投じている他、グーグル、IBMなど世界的なIT企業が激しい開発競争を繰り広げてい

ます。

ニューラルネットワーク型で挑む

量子効果を用いたコンピュータ・アクセラレータのアプローチには、ゲート型、アニーリング型、ニューラルネットワーク型の3つが知られています。グーグルやIBMはゲート型を研究し、カナダのベンチャー企業、D-Wave Systemsはアニーリング型を研究しています。しかしImPACTでは、これらと異なるニューラルネットワーク型での開発にチャレンジしています。

山本プログラムが目指すQNNでは、実装された2,000ビットの全てが同一の特性で有効に動作し、400万のシナプスで全結合されます。光パラメトリック発振器（OP0）と呼ばれる新型光源の量子力学的な特性を用いて計算が行われます。それにより2,000ビット以下の問題サイズなら、どのような組合せ最適化問題も解くことが可能となります。またゲート型、

アニール型の量子コンピュータは超伝導量子回路を用いているために、10ミリケルビンという極低温で動作させる必要がありますが、ImPACTのQNNは光パラメトリック発振器を用いているので、室温で動かすことができます。

QNNの基本的な考え方や使われている理論、基礎になっている実験技術は、NTTおよびスタンフォード大学で長年にわたって研究が行われてきたものです。

「NTTなら30年、スタンフォード大学なら50年にわたる研究の積み重ねがあります。その流れがようやくコンピュータ技術として使える段

階に到達した上に、ImPACTの取り組みがあります。特別に真新しいことをやっているわけではなく、歴史の流れの中で必然的に出てくるタイミングで出てきたと言えるでしょう」[山本PM]

ニューラルネットワーク型の研究グループが世界中で増加

2014年にImPACTがスタートした時点では、ニューラルネットワーク型に取り組んでいるのは山本プログラムぐらいでした。そのため、世界の潮流とは異なる研究に取り組むことに不安を感じる若い研究者もいたようです。

「われわれの研究基盤には歴史もあるし、テーマも必然性のあるものなので、何も心配する必要はないんです」[山本PM]

最終的にゲート型、アニール型、ニューラルネットワーク型の、どの技術が実用化を実現し、社会に貢献できるレベルに到達できるかは、現時点では分かりません。しばらくの間は技術競争が続き、互いに磨き合っていく状態が続くと考えられます。

「量子効果を用いたコンピュータ・アクセラレータの未来がどうなるかは、まだ誰にも分かりません。でも研究とは、本来

	ゲート型	アニール型	ネットワーク型
基本原理	線形干渉計	量子トンネリング	非線形発振器
主要開発機関	IBM/Google/Intel	D-WAVE/MIT	NTT/Stanford
ビット数*	20(50~100)ビット	2,000(8,000)ビット	2,000(100,000)ビット
有効ビットの割合	---	98%	100%
結線数	---	6,000(スパース結合)	4,000,000(全結合)
デコヒーレンス時間	1~10 μ sec	≤ 100 nsec	$>> 10$ msec
解ける問題サイズ	---	$N \leq 60 \sim 70$	$N \leq 2,000$
動作温度	極低温(10mK)	極低温(10mK)	室温(300K)
条件	超高真空	超高真空	常圧
物理系	超伝導量子回路	超伝導量子回路	光パラメトリック発振器 ネットワーク
量子性 $k_B T / \hbar \omega$	0.06	0.06	0.02
消費電力	---	25kW	1kW

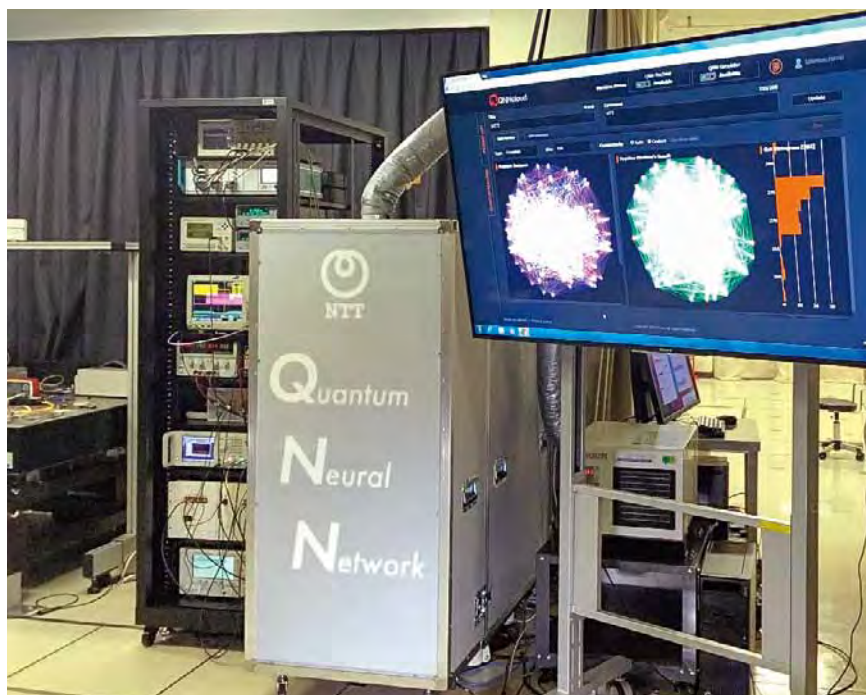
*カッコ内の数字は次期マシンのビット数

【図1】量子効果を用いたコンピュータの比較

そういうものではないでしょうか。このような基礎研究段階においては、もしかすると第4、第5の研究アプローチが登場する可能性も十分あると思います」[山本PM]

近年、ImPACTと同様にニューラルネットワーク型で研究開発に取り組むグループが世界中で増えてきました。北米ではスタンフォード大学、カルフォルニア

大学バークレー校、カルフォルニア工科大学、マサチューセッツ工科大学、コロンビア大学、コーネル大学などで研究がスタートしています。欧州でも同様な動きがあります。これらのグループ間で意見交換を行うフォーラム設立の気運が高まったことから、2019年3月に日本で「Coherent Network Computing」という国際会議が開催されることが決まっ



【写真3】筐体に納めたQNN計算装置

ています。

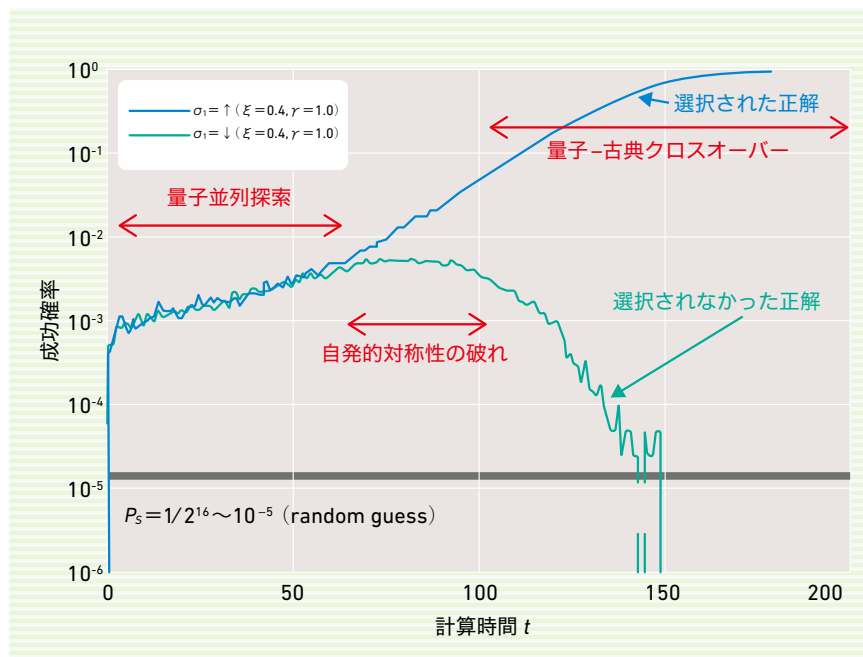
インターネット上で体験できる「QNNcloud」を一般公開

2017年11月27日、QNNをインターネットで体験できるクラウドサービス「QNNcloud」が一般向けに公開されました(<https://qnncloud.com/>)。このサービスでは、QNNを用いて大規模かつ難しい組合せ最適化問題のひとつ「Max-Cut問題」を解くことができます。

現状では様々な法律上の問題があり、QNNの100パーセントの機能を利用できるわけではありませんが、QNNの動作原理や性能を世界の人々に広くアピールすることができました。公開から1年以上が経過しましたが、実機は安定して稼働中で、日本とアメリカを中心にトータルのアクセス件数は520万を越えています。

「本格的に利用したい場合、QNNを管理しているNTTと共同研究契約を個別に結んでもらう必要があります。この場合、マシンの性能をフルに使うことができます」[山本PM]

将来的には100パーセントの機能をクラウド上で使える日が来るでしょう。



【図2】QNNにおける3ステップの計算原理

幅広い分野で量子マシンが活躍できる可能性を探る

近い将来に量子効果を用いたコンピュータ・アクセラレータが実用化された時、われわれの生活をどのように変えていくのでしょうか。

「量子効果を活用した計算機が、現代コンピュータを置き換える存在にはな

らないと思います。ほとんどの実用的問題は、今あるデジタルコンピュータで十分処理できます。しかし組合せ最適化や量子シミュレーションのようないくつかの領域で、量子マシンが一種のアクセラレータとして、現在のコンピュータをサポートする形が考えられます」[山本PM]

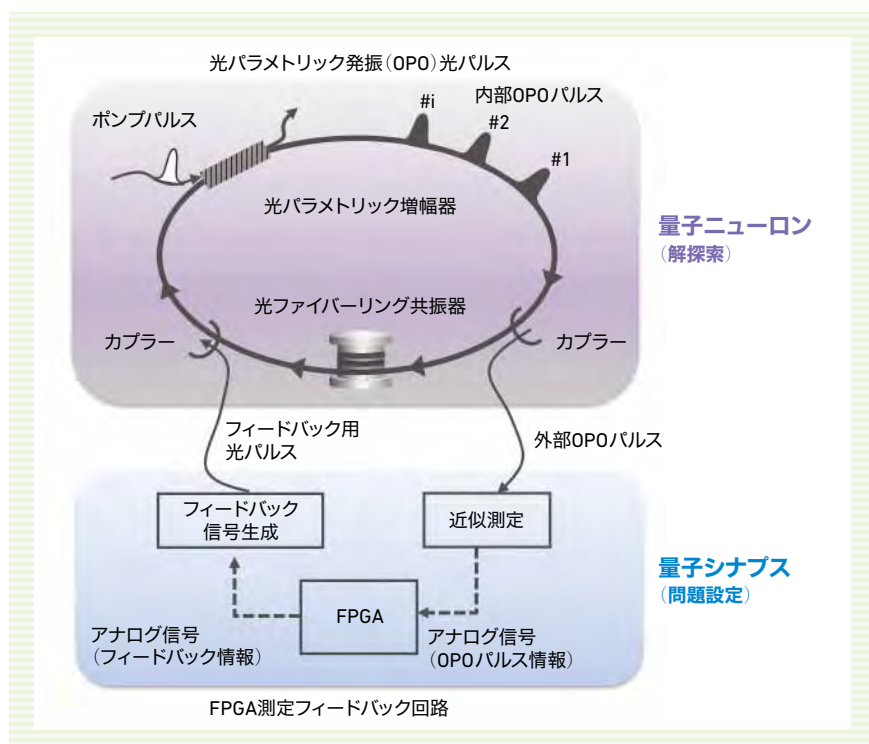
組合せ最適化問題が関わってくる領域として、創薬、生体触媒開発、無線通信、自動運転、金融工学、センシング、航空、物流などが考えられています。

「航空機のハードウェアやソフトウェアのどこに欠陥があるかを知るのは重要な問題ですが、今のコンピュータ技術では手に負えない難しい問題です。ハードウェア検証、ソフトウェア検証と言われる分野で、将来量子マシンが使われる可能性はあります」[山本PM]

これらの研究を日本だけで行うことはできないため、山本プログラムでは海外の研究者との連携も深めています。

「航空宇宙分野なら、NASA(アメリカ航空宇宙局)のエイムズ研究センターの数学者グループ、フィンテックや自動運転ではカナダのソフトウェア開発企業などと共同研究を進めています」[山本PM]

今は、様々な分野の専門家とのネットワークを深めながら、量子マシンの実用化に向けた出口を模索している段階です。



【図3】QNNの構成

ImPACTの終了までに、QNNは10万ビットが100億個の結線で全結合されたマシンが完成し、この分野では圧倒的な大型マシンとなる予定です。

「これなら他の方式では考えられないような実験ができるようになります」
[山本PM]

ハードウェア開発から 量子人工脳の理論化へ

その上で山本PMが目指しているのが、量子人工脳の量子性の解明です。

「ImPACTで取り組んできたことが最終段階を迎え、QNNがどう量子原理で動作しているのかを、世の中に対してきちんと説明してみせる必要があります。そのためには『場の量子論』や『測定の量子論』からスタートして、量子力学の基礎から作っていかないと、理論的な結論を導きだせません」[山本PM]

現代物理学は、実験が先行して、どうしても理解できない謎を後から理論が追いかけてくる形で発展してきました。

「なぜ量子効果を用いたコンピュータなら組合せ最適化問題を速く解くことができるのか、基本的な部分が解明されていません。そこを説明できる客観的な数学理論を論文として発表すれば、多くの人に理解されるようになります。そこに挑むこともImPACTの大切なミッションです」[山本PM]

量子世界から古典世界への クロスオーバーで 私たちの住む世界に役立つ技術を

量子力学は古典物理学との対比で、その奇妙な振る舞いが強調され、量子の世界が特殊であると考えられがちです。しかし山本PMはそうではないと言います。

「量子力学に関わる研究者たちの世界観は逆で、量子の世界が普遍的なもので、古典物理学が通用する私たちが住むこの世界の方が特殊なのです」[山本PM]

私たちは古典物理学の世界にいるために、その基盤にある量子の世界、いわば抽象的・数学的な情報だけが存在する世界に気付くことができません。しかし量子と

古典の境界線を越えて、私たちの世界に役立つ形で技術が開発された例は多々あります。

例えば、医療現場で広く活用されているMRI（磁気共鳴画像診断）も量子効果を活用しています。

「核磁気共鳴（NMR）、トランジスタ、レーザ、超伝導、ポーズアインシュタイン凝縮、量子ホール効果などは、私たちの生活に役立つ技術ですが、その根は量子の世界に伸びています。おそらく量子効果を用いたコンピュータも同じで、量子力学的な原理や過程が基盤にあるけれど、境界線をうまくクロスオーバーさせて、量子の原理を強じんな古典系に埋め込むことができれば、実用化も見えてくるはず」
[山本PM]

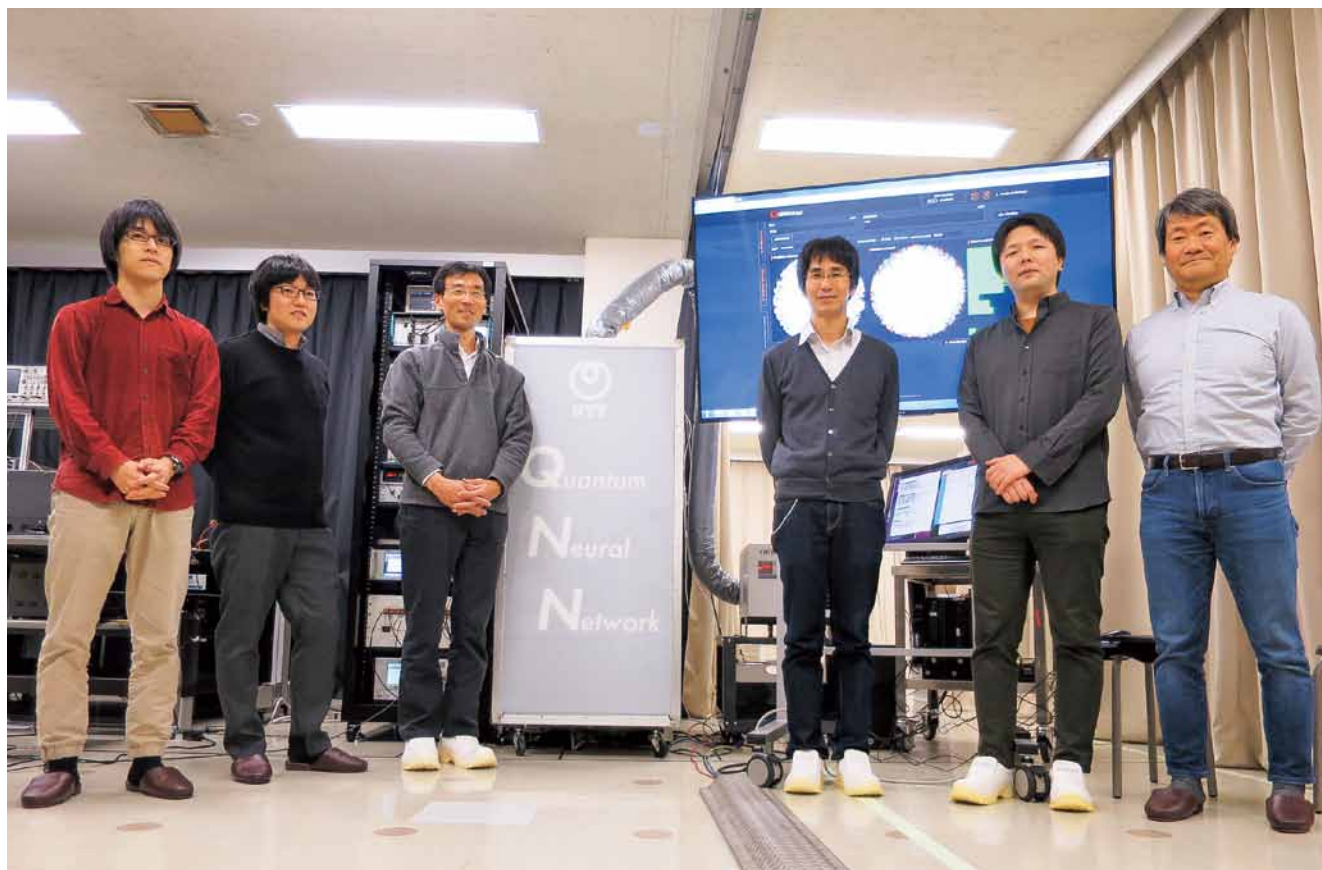


写真4. QNNのハードウェア開発を中心となって行ったNTTの研究チーム

高出力レーザーがいつでもどこでも誰もが使えるようになれば、研究開発や産業界に大きな恩恵をもたらす。佐野雄二プログラムでは、X線自由電子レーザー（XFEL）と高出力パルスレーザーの超小型化というハイインパクトな研究に取り組んだ。



高出力レーザーのユビキタス化で 新技術・新産業の創出を目指す

【写真1】ハンドヘルドレーザー



【写真2】プラットフォーム・レーザー

高出力レーザーの超小型化を実現し、 誰でもどこでも使えるように

総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が主導するImPACTプログラム「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」では、レーザー電子加速によりX線自由電子レーザー（XFEL）を超小型化する技術や大型の高出力パルスレーザーを手のひらサイズにまで超小型化する技術を開発して新しい応用に供することにより、新技術・新産業の創出を目指してきました。

XFELは原子レベルの構造やその変化をフェムト秒の時間分解能で観測することが可能で、創薬や触媒など多くの研究開発分野で有用な最先端の研究開発基盤です。しかし、本格的に稼働しているXFEL

は世界にまだ2つしかないため、利用できるユーザーは限られています。

高出力パルスレーザーは材料の加工・材質改善が可能で、構造物の寿命延長や3Dプリンタのような新たな加工・成形技術への展開、計測技術の革新、医療など幅広い応用が期待できます。しかし、装置のサイズが大きく、高コストでもあります。

佐野雄二プログラム・マネージャーは、ImPACTにおいて、レーザーを超小型化することで、XFELや高出力パルスレーザーをいつでもどこでも誰でも使えるようにするこ

とを目指しました。XFELは研究開発機関に配備できるサイズ・コストを実現することで、研究開発・商品開発のリードタイム短縮を図ります。超小型パワーレーザーは国産技術・調達による製品開発を実現し、新産業を創出することを狙います。

XFELの実験プラットフォームを 理研播磨事業所内に開設

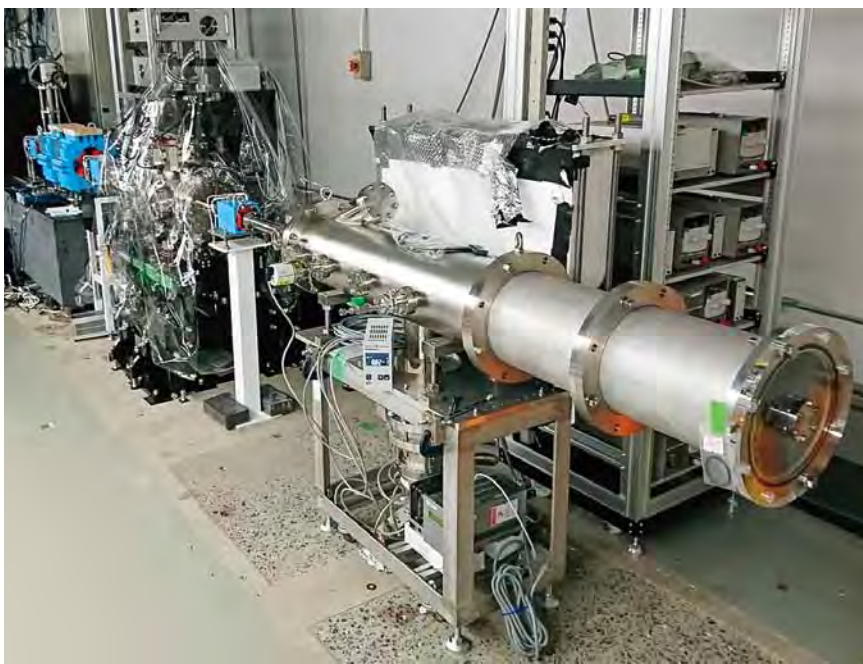
XFELの建設が各国で進んでいますが、いずれもキロメートル級のサイズで巨大な施設が必要です。ImPACTでは施設が大型化する要因である「加速器」と「アンジュレーター」を、それぞれ「レーザー加速器」と「極短周期の一体型アンジュレーター」にすることで、施設を現状の100分の1以下にする技術の確立に取り組みました。

一般的な加速器では、内部に高い電場を印加する加速管が使用されます。高い電場をかければかけるほど電子は速く加速されますが、放電が生じて装置が破壊されてしまうリスクが生じるため、あまり強い電場をか

けられません。そこで電子を少しずつ加速させていくため、数百メートル〜数キロメートルの長さが必要になります。一方、強力なレーザーを用いてプラズマを発生させると、極短時間ですが非常に高い電場を作ることが可能になります。そのため、電子を光速近くまで加速するのに必要な距離は1ミリにも満たず、約1000分の1の距離で電子を加速させることが可能になります。

アンジュレーターは、幅数十ミリの短冊状の磁石を数千〜数万個並べて作られています。磁石を一つずつ並べて固定するため、磁石の幅を数ミリ以下に小さくすることはできません。そこで、長い板状の磁石内にハードディスクのように磁極を着磁させることで、現状では不可能な短い磁石周期を実現することができ、アンジュレーターを10分の1以下の長さ小型化することが可能になります。

ImPACTでは、理化学研究所 放射光科学研究センター（兵庫県）内にレーザー電子加速のための実験プラットフォーム「LAPLACIAN」を開設し、2018年12月には本格的な実験を開始しました。そこでは電子ビームの加速部分をモジュール化して多段化することにより、電子の高エネルギー化を容易に達成することができる世界初



【写真4】プラットフォーム・実験エリア

の安定な多段加速に取り組んでいます。また、電子ビームを極短周期の超小型アンジュレーターに入射させることで、放射光の発生を確認しています。

レーザー試用プラットフォームを 浜松工業技術支援センターに設置

パワーレーザーには連続的にレーザーを発振させる連続光と、短時間の間だけ発振するパルス光の2種類があります。連続光のレーザーは溶接や加工など様々な分野で適用されていますがパルス光のレーザーは装置が大型であり、またレーザー光の伝送が難しいなどの問題から普及が進んでいません。

ImPACTでは、マイクロチップレーザーやセラミックレーザー技術、半導体レーザー（LD）技術等により超小型で、いつでもどこでも使えるレーザーの開発に取り組みました。その成果として、ハンドヘルドレーザーとテーブルトップレーザーの開発に成功しました。これらの新技術を

メーカー3社に移転し製品化を推進した結果、製品をこの3月から順次皆様のお手元にお届けする準備が整いました。

また、ImPACT終了後も皆様にレーザーを気軽にお使いいただき新しい技術開発に資するため、公的機関である浜松工業技術支援センター（静岡県）に「レーザー試用プラットフォーム」を2018年7月に開設し、無償でレーザーを提供しています。

さらなる研究開発の継続で世界を 凌駕するレーザー技術の確立へ

2月18日、佐野プログラムの5年間の開発成果を集大成した「最終シンポジウム 成果報告会」を東京・大崎ブライトコアホールで開催しました。佐野PMをはじめ、プロジェクト・リーダーが講演を行った他、超小型パワーレーザーの展示やデモを行いました。

レーザー電子加速やレーザーの超小型化とその応用は今後ますます発展していく分野です。ImPACTでの開発成果の発展を図り、海外を凌駕するレーザー技術と応用展開につなげていきます。高出力レーザーが、製造現場、社会インフラ、医療、セキュリティなど、より広い分野で使われ、安全・安心で快適な生活の実現に寄与することを期待しています。



【写真3】ハンドヘルドレーザーによる欠陥検査

原田(博)プログラムでは、ビッグデータ収集のための通信ネットワーク基盤と、ビッグデータを高速に処理できるデータベースエンジンを組み合わせた「超ビッグデータプラットフォーム」の開発に取り組んできた。さらにこのプラットフォームを工場と医療分野で活用するための研究も進め、数々の成果を生み出している。

超ビッグデータを真に有効活用し、産業と医療分野のリスク低減を目指す

【写真1】Wi-SUN医療データ収集デモンストレーション

Wi-SUN/Wi-RANを用いた通信システムで超ビッグデータを効率的に収集

ImPACTで原田博司プログラム・マネージャーが取り組んでいる「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」では、数百億レベルのビッグデータを高速取得・高速解析する「超ビッグデータプラットフォーム」を開発し、激増する社会リスクの低減を目指しています。

IoT(モノのインターネット)という言葉が注目されていますが、原田(博)プログラムの「超ビッグデータ創出ドライバ(BDD)プロジェクト」では、身の回りのセンサデバイスから安定してデータを収集する仕組み作りに取り組みました。その

基礎となるのが、Wi-SUNという無線通信規格です。通信距離は1キロ程度ですが、Wi-SUNに対応した端末同士が互いにつながりマルチホップ機能でデータ転送を行うことで、数キロのエリアをカバーできます。

さらに広いエリアを結ぶことができるWi-RANシステムの研究も行い、無線中継することで数十キロ離れた場所からでも安定してデータを送信できることを確認しました。

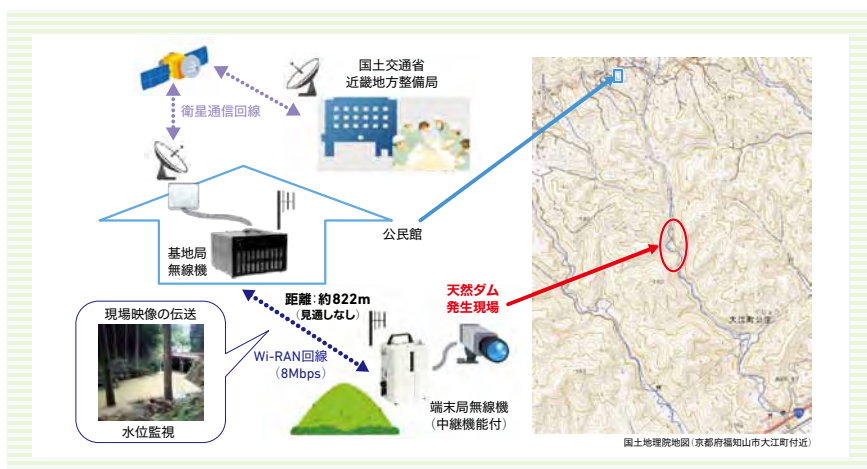
Wi-SUNとWi-RANを組み合わせた超広域多層多段無線通信システムを使えば、様々な情報を全国どこからでもクラウド上に送信でき、超ビッグデータとして収集できます。

ネットワーク化された「つながる工場」をサイバー攻撃から守るために

ドイツの「インダストリー4.0」、アメリカの「インダストリアルインターネット」など生産現場がネットワークでつながり、より効率的な製造を実現しようという動きが活発化しています。しかしながら、そのネットワーク上にどのようなデータが流れるか、その速度やデータ量、リアルタイム性などのデータ通信要件の検討が必要です。さらにネットワークでつながるということは、つながった複数拠点がネットワークを介したサイバー攻撃の脅威にさらされることも意味し、セキュリティの検討も必要となります。原田(博)プログラムの「ファクトセキュリティ(FS)プロジェクト」では、ものづくり現場の健全性維持と生産性向上をめざして、工場での異常検知・リスク回避のためのセキュリティシステムの開発に取り組みました。

未来の工場では、マスカスタム生産が主流になると考えられています。ユーザーの好みを細かく反映した多種多様なものづくりが行われるマスカスタム生産の現場にサイバー攻撃が行われた際、注文とは異なる製品がユーザーの手に渡ってしまう可能性があります。

FSプロジェクトでは、シミュレータで生成した本来あるべき生産スケジュール



【図1】西日本豪雨災害支援の一環として、国土交通省近畿地方整備局から要請を受け、京都府福知山市の災害現場(土砂崩れ)において、二次災害の防止を目的とした監視のため、本研究成果である通信システムを活用した支援活動を開始(2018年7月12日～)

と実際の現場でのスケジュールを比較することで、外部からの攻撃があったかどうかを判定するデジタルツイン型の攻撃検知方式を開発しました。もし攻撃があった場合、感染工場を隔離しつつ、非感染工場で代行生産を行うシステムも作り上げ、IoTネットワーク時代の「つながる工場」の形についても研究を進めました。

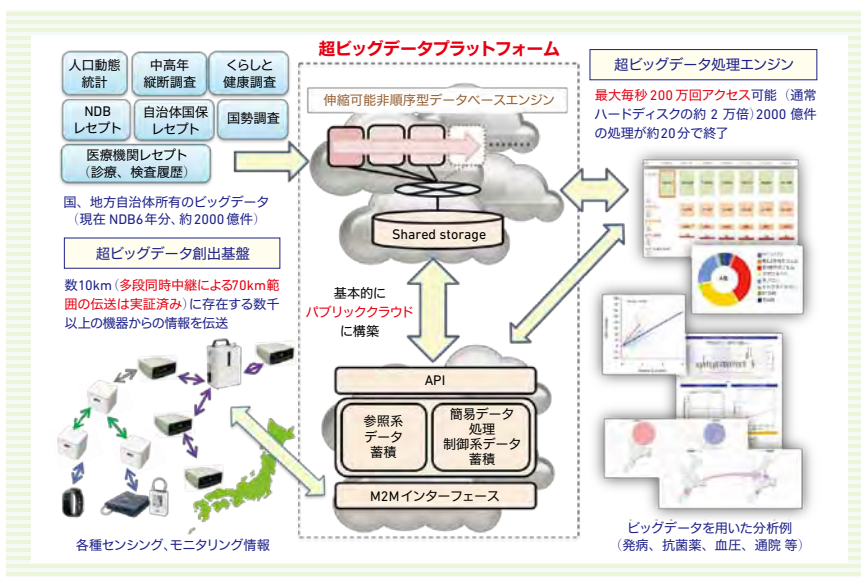
公的医療データの解析から 日本の未来の医療体制を予測する

膨大な公的医療データを解析することで、国民の健康寿命延伸と医療費抑制を目指すのが「ヘルスセキュリティ (HS) プロジェクト」です。

例えば、高血圧と診断された患者の一日の血圧・心拍の変化を、Wi-SUNを使った通信システムで医療機関に送ることで、よりきめ細かい診断が可能となります。血圧の数値とともにその時の室温や家のどこにいたかの位置情報も合わせて記録できれば、患者の生活リズムと血圧の関係を明らかにできます。また、同じ症状を持つ患者のデータを多数集めてイベント発症のパターンを解析することで、高血圧に起因するイベント発症を事前に予測し、リスクを軽減することも可能です。

さらにHSプロジェクトでは、国や地方自治体が管理する医療情報(レセプト)に注目しました。レセプトは患者が受けた治療内容、処方された薬名などが記録された医療のビッグデータです。このような医療情報を解析すれば、住民がどこの病院を利用しているのか、今後どのような病気にかかる患者がどれくらい増えるのかなど、現状だけでなく未来も予測できます。これは地域の医療施策を決める上で重要な情報になるでしょう。

さらに、HSプロジェクトでは5つの病院の協力を得て「心臓病統合ビッグデータ」の構築に取り組みました。地域の基幹病院や大学病院では特殊な症例の患者の頻度も高まるが、複数の病院間でこのような症例の医療データベースを共有すれば、さらに効果的・効率的な症例分析・治療につながります。



【図2】超ビッグデータプラットフォーム

数百億の超ビッグデータを高速処理 次世代のデータベースシステムを構築

原田(博)プログラムのBDDプロジェクトの収集システムでは、数百億レコードのデータベースを取り扱うことになると考えています。しかし既存のデータベースシステムでは、これだけの量のデータを処理するには、膨大な時間がかかってしまいます。これではせっかくの超ビッグデータを有効に活用できません。

原田(博)プログラムの「超ビッグデータ処理エンジン(BDE)プロジェクト」では、FIRSTプログラムの成果である非順序型実行原理に基づく処理エンジンを超ビッグデータに適用するための研究開発に取り組みました。非順序型実行は、プログラム上でのデータの処理順序とは無関係に非同期的にデータアクセスすることで、ハードウェアの処理性能を最大限に引き出すことを可能にします。東京大学生産技術研究所と日立製作所の共同研究により、オンプレミス(自己運用設備)上で構築された非順序型実行原理をパブリッククラウド上でも構築できるようにし、また効率の利用を可能とするためその計算機資源を伸縮自在とするデータベースエンジンの開発に成功しています。

また超ビッグデータで扱う大規模データにはレセプトの患者情報など個人情報が含まれることがあり、プライバシー保

護の観点から匿名加工処理をした上で取り扱うことが求められています。従来はこの匿名加工処理に膨大な時間がかかっていましたが、超ビッグデータ処理エンジンを適用することで、従来の約100倍の処理速度を実現しました。

超ビッグデータ解析がもたらす未来 最終成果報告会を開催

2018年11月21日、原田(博)プログラムの成果について報告するシンポジウムが、東京・ベルサール九段で開催されました。

原田(博)PMがプログラム全体の説明を行った後、BDDプロジェクト、FSプロジェクト、HSプロジェクト、BDEプロジェクトの研究成果について、各プロジェクト・リーダーから報告がありました。

最後に、原田(博)PM、各プロジェクト・リーダーによるパネル討論が行われ、本プログラムをふり返るとともに、超ビッグデータプラットフォームが作る未来像について語り合いました。



【写真2】シンポジウムでのパネル討論

安全・安心かつ持続可能な高度知的エコIT社会の構築に向けての —無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現—

ImPACT佐橋プログラムでは、「電圧で磁気メモリに情報を記録する究極の低消費電力不揮発性メモリの開発」と「革新的スピントロニクスとロジックインメモリ設計を駆使した超省電力スピントロニクス論理集積回路の実現」を目指すことに、早い段階から特化する施策を打ち、特に消費電力の問題が深刻であるエッジ側において社会的課題を解決する基盤技術の構築に、二つの大きな研究開発ターゲットの目安(目標)を設定して挑みました(図1参照)。

これらの技術革新は、AI/ディープラーニングや全自動運転へと波及し、各種機器や現場が分散型で知能を持つ超低消費電力エッジデバイスやAIエッジコンピューティングの実現へと展開(SIP第2期)するなど、産業や社会を大きく変革し、安全・安心かつ利便性・生産性の高い「高度知的エコIT社会を構築」することが期待されます。

[大野社会実装分科会/スピントロニクス集積回路プロジェクト]

(リーダー:大野英男東北大学教授=>遠藤哲郎東北大学教授)

本プロジェクトの目標を達成する50万素子規模の革新的超低消費電力マイコンの基盤技術を構築しました。具体的には、各機能ブロック回路およびその動作モードに応じた電力制御技術、ならびにその不揮発性マイコン内データ転送部に関する検討など、不揮発性マイコンチップの構成要素に関する基盤技術の開発を行い、独自開発した設計環境および要素回路技術に加え、開発した設計ツールを用いて、スピントロニクス集積回路プロジェクトで実証する不揮発性マイコンSOT-MRAMにより可能となる

また、革新的スピントロニクス技術の創生として、新たな情報書き込み(磁化反転)

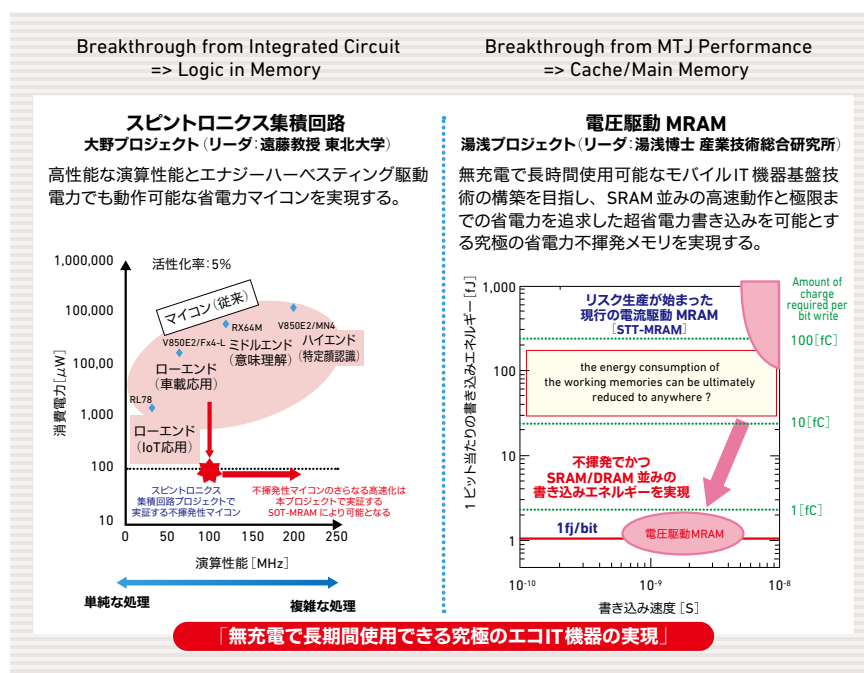
の物理原理(スピン軌道トルク)の実験検証を行ない、世界に先駆けて、無磁場下でのサブナノ秒(500ピコ秒=>200ピコ秒)の高速磁化反転を確認しました(Nature Nanotechnology他)。

[湯浅先端技術開発分科会/電圧駆動MRAM開発タスクフォースプロジェクト]

(リーダー:湯浅新治 産総研研究センター長)

本プロジェクトでは、複数のアプローチで「誰も成し遂げていない電圧駆動MRAMの開発に挑みました」。その中の一つを紹介します。より実用的な電圧駆動MRAMの開発を目指し、MRAMのアーキテクチャおよび「スピンホール効果と電圧効果を併用する新規な書き込み方式を盛り込んだ新概念メモリVoCSM(Voltage Control Spintronics Memory)」の考案を基に、大容量型と高速型の2種類のコンセプトを実験検証することに成功しました。こ

のVoCSMの開発の成功により、1ビット当たりの書き込みエネルギーが、究極の省電力化目標である1フェムトジュール以下であることが世界で初めて示されました。また同時に、高速型ではパルス幅5ナノ秒以下(直近では2ナノ秒)の高速書き込み領域での高い書換え耐性(Endurance>10¹³回)と10⁻⁸以下の書き込みエラーレート(WER)の実証に世界で初めて成功しました。加えて、これらの成果をもとに大容量型ではDRAMに代わるロギングメモリへの応用展開と電圧効果(VCMA値)の向上と消費電力などのスケールアップを、高速型では、AI/Deep Learning用アクセラレータに向けた高速混載VoCSMの回路設計を行ない、シミュレーション上での性能検証を行ないました。また、インメモリ・コンピューティングなど、革新性に富んだ出口展開も併せて示すことが出来たものと考えています。



[図1] スピントロニクス集積回路プロジェクトと電圧駆動MRAM開発タスクフォースプロジェクトそれぞれの研究開発ターゲット

細胞検索エンジンが拓く新世界 —生命科学・医療・バイオ産業への展開—

合田プログラム「セレンディピティの計画的創出」では、ライフサイエンスでの「砂浜からの一粒の砂金」のような幸運な発見(セレンディピティ)を、計画的に創出できる革新的な細胞検索エンジンを実現することを目標に研究開発を進めてきました。

平成28年度までのフェーズ1では、複数の分野において複数チームが協働しつつも競争する形で要素技術開発を進め、100ギガビットネットワークを高効率利用するTCP通信技術(<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20151211-2/>)、微生物の個性を測る高速分子イメージング法(Wakisaka et al, *Nature Microbiology*, 2016)、世界最高速の細胞分取マイクロ流体チップ(Sakuma et al, *Lab on a Chip*, 2017)、世界最高速の共焦点蛍光顕微鏡(Mikami et al, *Optica*, 2018)、1細胞RNA分画解析法(Abdelmoez et al, *Genome Biology*, 2018)などの様々な世界トップレベルの成果を発表してきました。その結

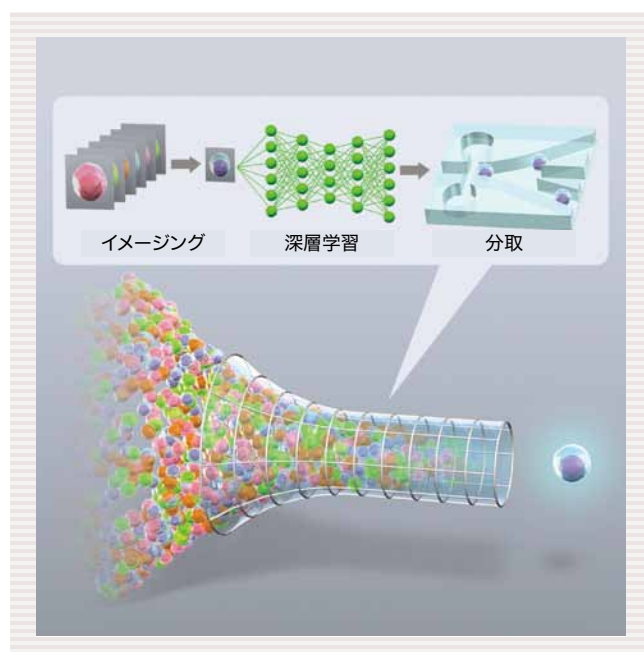
果、必要な要素技術がすべて揃い、ステージートを経て統合へ進みました。

平成29年度から開始したフェーズ2では、開発された要素技術を組み合わせた統合システムの開発により、高速イメージングと深層学習を用いた画像解析で細胞を高速に識別し、その解析結果に応じて所望の細胞を分取する基盤技術「インテリジェント画像活性細胞選抜法(Intelligent Image-Activated Cell Sorter)」の開発に世界で初めて成功しました(Nitta et al, *Cell*, 2018)。本技術を用いて、微生物や血液細胞をその形状や内部構造を指標として分取し、原理を実証しました。この快挙は、物理学、化学、情報科学、機械工学、電子工学などの多岐に渡る分野の最先端技術を結集した成果の集大成であり、世界中の研究業界から破壊的イノベーションとして大きな注目を浴びました。

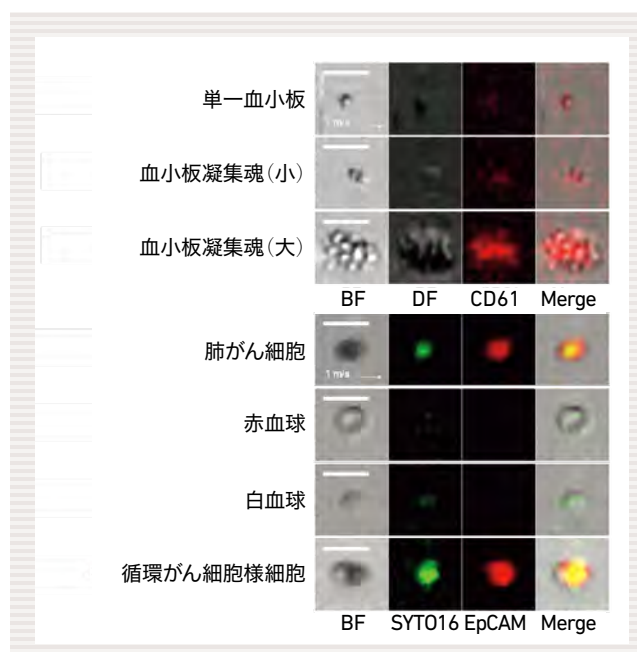
本プログラムの成果は分子生物学、微生物学、医学、薬学など基礎研究の発展に寄

与し、さらに医療やバイオ産業などへ応用が期待されます。これらの社会実装の加速を目指して、国内外の研究者に広く活用していただくためにオープン利用展開を進めています(<http://www.goda.chem.s.u-tokyo.ac.jp/intelligentIACS>)。また、関連技術の事業化を進めるために株式会社CYBO(<http://cybo.jp>)をImpACT発ベンチャーとして設立しました。

これらの成果により、これまで膨大な時間や手間がかかり偶然の幸運な発見「セレンディピティ」が必要とされていた事象を計画的に発見するための基盤技術が実現されました。今後、従来の細胞計測技術では検出・分取できなかった細胞を分取して解析する事で、生命科学分野における様々な発見やバイオ産業や医療分野での開発が大きく発展すると期待されます。



[図1] 本研究で開発したIntelligent Image-Activated Cell Sorterの模式図



[図2] 本技術の汎用性実証のための撮像例

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

プログラム概要

少子超高齢社会が直面する要介護者の重介護は、家族や社会に多大な負担を強いる深刻な社会的課題となっています。高齢者人口の増加は重介護予備群や患者の増加を招くため、その予防的措置も重要です。本プログラムでは、『重介護ゼロ社会』（山海PMが本概念を創造）を実現するため、身体の機能改善・機能再生を促進し、要介護者の自立度を高め、さらに介護者の負担を激減させる人・ロボット・情報系の融合複合支援技術の研究開発や国際規格等の策定・取得、研究開発成果の社会実装等の社会的取り組みを同時展開し、これを新産業（サイバニクス産業）として創出することで、好循環のイノベーションを推進し続けるという社会変革・産業変革の実現を目指します。

研究開発成果と社会的取り組みについて

図1に研究成果の代表事例を示し、以下に解説を加えます。

●ALS患者等の難易度の高い生体電位計測に挑戦し、非侵襲次世代型計測・制御用サイバニックインタフェースの研究開発に成功し、意思疎通が困難な難病患者とのコミュニケーションや外部機器との接続を図ることが可能な装置を開発しました。介護施設や患者会等での評価を経て、2018年9月より社会実装を開始しました。

●心疾患、脳卒中等の予防を家庭で手軽に行うため、手のひらサイズで動脈硬化度を計測できるバイタルセンサーを研究開発し、2018年12月に厚労省から医療機器として承認されました。

●現代医学では機能改善が不可能とされてきた難病の脊髄性筋萎縮症、脳性麻痺

など小児に発症し、介護期間が長期にわたる疾病に対し、新たに小型軽量HALの研究開発に成功しました。

これを小児患者へ使用した結果、脚・体幹の機能改善を確認できました。

●手術後にベッドで安静を指示され、しばらくして立ち上がりができなくなった高齢者に、開発した自立支援用HAL腰タイプを適用し機能改善の取り組みを実施した結果、立ち上がりを含む身体機能が劇的に向上し、寝たきり防止用デバイスとしての可能性を見出すことができました。

これらにより、要介護者用機能改善技術および介護者用負担軽減技術の社会実装をそれぞれのフェーズで進めることができました。

上記に加え、運動訓練システムのメディカル・ケアビット、腰部負荷低減用HAL腰タイプ等も含め、病院での有用性評価を実施し、ユーザビリティのさらなる改善や病院での適用を行い、社会実装を進めていく予定です。また、これらのインタフェース・デバイス・システムの通信機能を活用し、人の生理・運動系に関するビッグデータ収集・管理・解析システムを構築し

ています。今後、疾患発症の予測、重介護状態を回避する条件の特定等を行ない、それを元に『重介護ゼロ社会』の実現に貢献する新たな研究開発を次から次へと実施していきます。

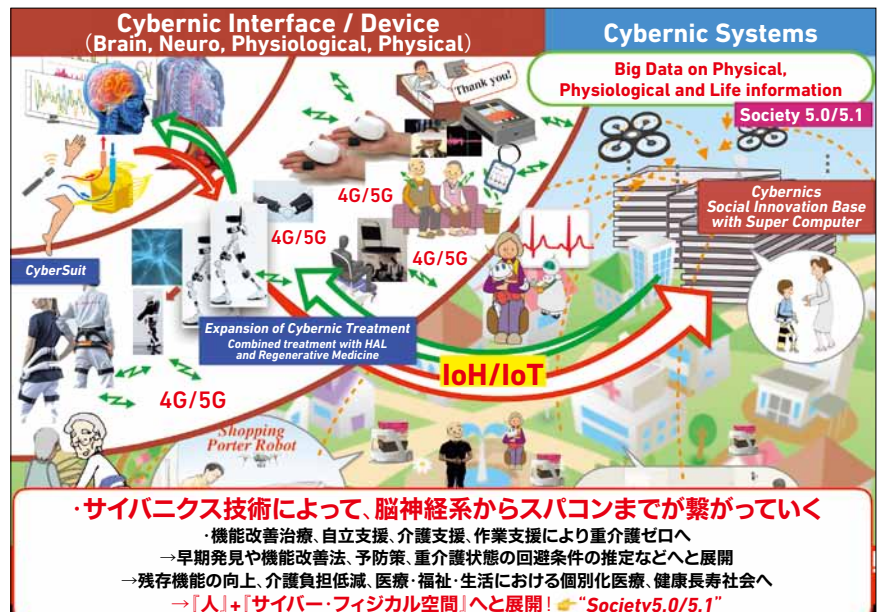
研究開発成果の社会実装をスムーズに行うため、当プログラムでは以下の社会的取り組みを実施しています。

① 山海PMは当該分野で世界のリーダーシップを取るため、国際標準化機構ISOのエキスパートメンバーであり、世界初のPersonal Care Robotの国際規格の策定を推進するとともに、腰補助用装着型身体アシストロボットについては安全性・性能基準を定めたJIS規格「JIS B 8456-1」の制定を主導しました。

② 2017年12月にPMおよびサイバーダイン社は、当初計画に基づいて、医療・ヘルスケアやロボティクス・AI・ビッグデータ・IoT/IoTなどを包括する『サイバニクス産業』の創出のために「CEJファンド」を創設し、好循環のイノベーション推進に取り組んでいます。

③ PMは、損保ジャパン、日本興亜、AIGなどの保険会社と次世代型介護福祉サービスの提供を行う新しい保険の仕組み作りに取り組み、研究開発成果の社会普及促進を図っています。

【図1】研究概念図および代表的研究成果



非侵襲・無被ばくで高精細画像診断を実現する「光超音波3Dイメージング」

本プログラムでは、人の身体に光を照射し、赤血球での光吸収・熱膨張によって発生する超音波を検知することで、血管構造などの3D画像を得る新しい画像診断装置の開発を行いました。測定対象のサイズや部位に応じて、異なる2つのシステムを完成させました。

ワイドフィールド可視化システムの開発と臨床応用

ワイドフィールド可視化システムでは最大180mm×270mmの範囲の画像を取得できます。光超音波信号の受信に最適化された半球型超音波センサをジャノンプローブ(株)が開発し、システム全体をキヤノン(株)と(株)日立製作所が担当しました。

完成した2台の装置は京都大学附属病院と慶應義塾大学病院に設置され、臨床研究が進められました。放射線科、乳腺外科、形成外科、皮膚科、血管外科、整形外科など各科が協働して臨床研究を実施し、複数の疾患で臨床現場での有効性を実証することができました。

とりわけ形成外科領域での臨床研究の成果は国内外の臨床医から高く評価され、いままぐにでも臨床現場で使いたいとの期待の声が寄せられました。

京都大学附属病院の形成外科で進め

た遊離皮弁移植術への応用では、2018年10月、全米最大の形成外科学会であるPSTM2018にてOutstanding Paper Presentationを受賞しました。

本システムのために開発された「半球型超音波センサ」と「小型高出力レーザ」については、製造販売の準備を整えました。

マイクロ可視化システムの開発と美容領域への応用

もう一つのシステムであるマイクロ可視化システムは、狭い範囲で微細な血管構造を光超音波で検出すると同時に、皮下組織の形態情報を超音波エコーで画像化できる装置です。測定範囲は最大9mm角と小さいものの、30μmの解像度で皮下数ミリメートルまで可視化できます。

(株)資生堂の皮膚評価に対するニーズと東北大学の基盤研究に基づき、(株)アドバンテストがシステムを完成させました。東北大学にマイクロ可視化システムを設置し、美容領域への応用を目指した探索的な臨床研究を行いました。2019年4月には(株)アドバンテストより理化学機器として本システムの販売を行う予定です。将来の皮膚科領域の画像診断や美容医療への応用をターゲットとし、引き続き医療機関と共同して研究開発を継続する予定です。

非破壊検査への応用の可能性

マイクロ可視化システムの設計思想を踏襲した専用システムを愛媛大学で立ち上げ、物質の非破壊検査への応用の可能性も探索しました。従来は検査が困難だった炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の繊維構造のきずなどの異常を明瞭に画像化できました。これにより、生体以外の計測応用に向けた可能性の扉をひらきました。

プロジェクト成果のアウトリーチ

2019年2月、世界の光学系技術者が集う最大の学会であるSPIE(国際光工学会)において、ブース展示を行いました。ブースでは、光超音波原理やシステムの説明、臨床画像などの研究成果を紹介する動画を放映しつつ、半球型超音波センサ、小型高出力レーザ、マイクロ可視化システムのモックアップ展示を行いました。学会に参加する様々な国の方がブースに立ち寄り、微細な血管画像に驚嘆の声を上げていました。日本発のImPACTの成果を存分にアピールすることができました。

続いて同月、東京にて本プログラムの最終成果報告会を開催し、盛況のうちに幕を閉じました。報告会の後には意見交換会が行われ、光超音波イメージングの将来の展開に向けた、活発な議論が繰り広げられました。



【写真1】京都大学附属病院に設置したワイドフィールド可視化システム



【写真2】東北大学に設置したマイクロ可視化システムを用いた臨床研究の様子

人工細胞リアクタを開発し バイオ産業に革新をもたらす

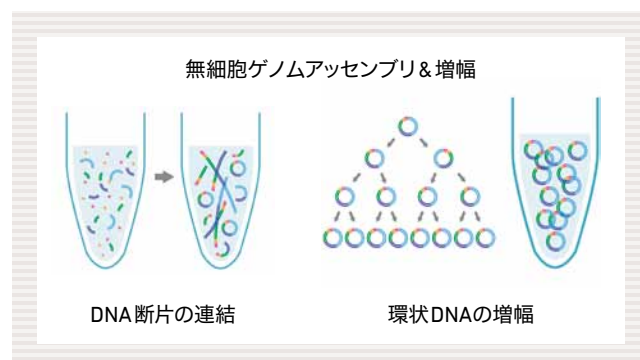
本プログラムでは、バイオ産業の抱える問題の解決に向けて従来のバイオ技術では解決できなかった技術的課題に根本的な技術革新をもたらすため、膨大な数の微小チャンパーで構成されるデバイス「人工細胞リアクタ」を基盤とした技術開発を手がけています。具体的には、パンデミック防止や予防医学のための超高感度バイオ分析技術、バイオ生産に用いられる酵素のハイスループット酵素開発、天然細胞システムに依拠しないバイオものづくりに必要な人工細胞創出のための基盤技術開発を行っています。

バイオ分析技術では、従来法の対象物の検出を分子集団（濃度）と並列計測（1計測あたり～100試料）による検出から、人工細胞リアクタを用いて1分子計測に立脚した計測（微小チャンパー内の分子の有無による信号の二値化）と超並列化計測（1計測あたり～1,000,000試料）による検出へと革新し、高感度で迅速に病気や感染体の検査を行える分析技術「デジタルバイオ分析技術」を開発しました（図1）。これにより病原体マーカーのタンパク質や核酸、インフルエンザウイルスなどをこれまでよりも桁違いに高

感度で検出することができるようになり、現在検体を用いて検証中です。また各デジタル計測の装置開発も行っており、そのうちの一つである全自動デジタルELISA装置のプロ

トタイプ機を開発しました（写真1）。

酵素スクリーニング技術開発では高性能酵素をハイスループットで取得するため人工細胞リアクタを用いたスクリーニング技術を開発しました。人工細胞リアクタを用いた計測技術の特徴である高感度計測と超並列性を活用し、変異体酵素遺伝子を微小チャンパー内で合成させ、その酵素の活性を指標に高性能酵素を選別・取得する技術です。従来のスクリーニング法に比べ、検出している酵素活性と対応遺伝子との関係が直接的で、スクリーニングサイズも従来法と比べて10,000倍大きいことが特徴です。実際に本技術により臨床検査に用いられている酵素について野生



【図2】人工ゲノムDNA合成法

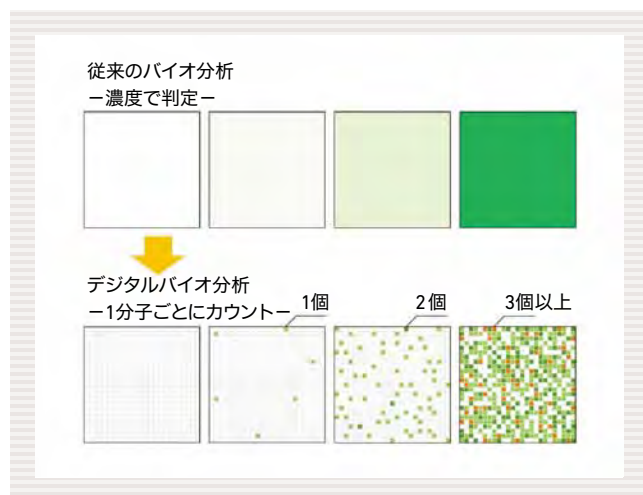
再構成させ、無細胞でDNA断片を連結、増幅できる技術の開発に成功しました。この方法は従来の細胞を用いたクローニング技術に比べ格段に早くゲノムサイズDNAを調製することができます（図2）。また細胞を用いないため細胞毒性などがある遺伝子クローニングにも適応可能です。本プログラムでは上記のDNA断片連結・増幅技術のキット化（写真2）にも成功しました。現在、キットを配布し本技術の事業化戦略の妥当性を検証しています。



【写真1】デジタルELISA自動計測プロトタイプ機



【写真2】試作した長鎖DNA連結・増幅キット



【図1】デジタルバイオ分析技術の模式図。分子をカウントして定量分析

型の10倍以上高活性変異体を得ることができました。現在、取得した酵素を臨床検査に適用可能か検証中です。

人工細胞創出に向けた人工ゲノム合成技術では、大腸菌のDNA相同組換え修復システムとDNA複製システムを試験管内で



【図1】原田(香)プログラムが目指すビジョン

センサ付超精巧人体モデルを活用して医工連携を加速

社会的な課題

医工連携による医療機器の開発は、「この臓器は豆腐のように柔らかい」、「ちゃんと縫えるデバイスが欲しい」など、感覚的な表現が多用されるため、試行錯誤的で非効率的です。本プログラムでは、センサ付超精巧人体モデル「バイオニックヒューマノイド」を活用して医師の感覚を数値として定量的に理解することで、効率的なプロセスを実現することを提案しています。また、このバイオニックヒューマノイドを活用することで、短期間に革新的技術を導入できることを示すため、スキル搭載手術ロボット「スマートアーム」も開発しました。さらには、同様のコンセプトが医療以外にも応用できることを示すため、痛みがわかるセンサ付の精巧な人体モデル



【図2】頭部3DCGモデル

「ペインセンシング・ダミー」をサービスロボット評価用に開発しています。

本プログラムでは、工学系研究者、医師、大企業、中小企業、海外大学が参加しており、共同研究を必須とした多施設連携・産学連携・医工連携により、提案するビジョン(図1)を具現化するための研究開発を推進しています。

バイオニックヒューマノイド

リスクが高い微細手術(脳外科手術・眼科手術)の支援を対象とし、医師の感覚、操作、ニーズや医学的制約を工学的に定量化する手段としてバイオニックヒューマノイドを開発しています。生体組織の微細構造や物性を計測し、それを人工物で正確に模擬する手法を開発しており、脳外科経鼻手術用モデル、眼科手術用モデル、脳血管内治療用モデルを開発しています。バイオニックヒューマノイドの設計図として開発した世界で最も精巧な頭部3DCGモデル(図2)は、非商用の研究・教育用途に限って無償でダウンロードできるように

しており(<https://brain-3dgc.org/>)、医療や教育、研究開発など広い分野へ研究成果を還元しています。

スマートアーム

日本の強みである産業用ロボット技術に応用した双腕の手術支援ロボットを開発しています。このロボットは、主に脳外科分野における経鼻内視鏡手術を対象としています。ツールを交換することで眼科手術などにも適用可能な画期的な手術ロボットです。

経鼻内視鏡手術では、鼻から細長い術具を挿入して、鼻腔内で針を正確に動かす必要があります。患者の入院期間を大幅に短縮する低侵襲脳外科手術ですが、術具の操作が大変難しいため、ロボット手術の導入が期待されてきました。しかし、鼻腔内の作業スペースや縫合する硬膜の物性がわからないため、研究に着手することすら難しい状況でした。本プログラムでは、この手術を対象としたバイオニックヒューマノイドを活用して医師のニーズや医学的制約を定量的に理解する、というアプローチにより、短期間でスマートアーム(写真1)を開発することに成功しました。また、熟練医のスキルを抽出して手術ロボットに搭載する研究も進めています。



【写真1】スマートアーム

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目指しています。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・マネージャー〔PM〕	プログラム
伊藤耕三 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 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 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 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 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 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 Satoshi Tadokoro	タフ・ロボティクス・チャレンジ
藤田玲子 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 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 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 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 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 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 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 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 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
TEL 03-6380-9012
E-mail impact@jst.go.jp
URL https://www.jst.go.jp/impact/