



2020年に注目すべき技術

2020/1

三井物産戦略研究所
技術トレンド基礎調査センター、技術・イノベーション情報部

はじめに

三井物産戦略研究所技術トレンド基礎調査センターでは、毎年1月、その年に特に注目すべき技術を抽出・選択し、技術概要の解説および今後の展望を洞察している。本年は、①人間拡張、②インプラントブルデバイス、③「光」技術を取り上げる。①は、AI、IoT、ロボット等の発展するデジタル技術を、より人と一体化することで、その能力を強化するコンセプトである。②は、いわゆる人体埋め込み型のデバイス機器のことである。これまで心臓ペースメーカー等、重篤な疾患に対してのみに適用されてきたものが、電池や半導体等の小型化、無線通信技術、ナノテク技術の進化により活用用途が広がっている。③は、光、すなわち紫外線、可視光、赤外線に分類される電磁波について、その保有特性である波動性と粒子性の双方を生かしてさまざまな活用が検討されている基礎技術である。

・ 人間拡張	— 期待される産業利用への可能性 —	2
・ インプラントブルデバイス	— 予防医療分野に拡大の見込み —	8
・ 「光」技術 (Photon Technology)	— アナログな「光」が生み出す次世代テクノロジー —	13
・ 2019 年注目技術の総括 (BMI/プロテインエンジニアリング/ハプティクス)		18

人間拡張 ー期待される産業利用への可能性ー

技術・イノベーション情報部 コンシューマーイノベーション室 吉本 晃

人間拡張とは

人間拡張は、人間の持つ身体能力や認知能力を増強・拡張させる技術の総称であり、大きく分けて「補綴（ほてつ）工学」と呼ばれる、事故などによって失われた四肢等を補うことにより本来の機能の回復を目指す技術と、個人が本来保有している能力のさらなる拡大を目指す技術の2つがある（図表1）。

図表1 人間拡張とは



出所：一般社団法人 日本義肢装具士協会ウェブサイト
<https://www.japo.jp/top/gisisoug.html>
東京大学 先端科学技術研究センター身体情報学分野 稲見・檜山研究室ウェブサイト
<https://star.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

歴史は非常に古く、眼鏡や義肢・入れ歯はもちろん、指先以上に精緻な作業を行う工具や、体温を保持する服なども人間拡張の一種といえるが、AI、5G、IoT等のデジタル技術の進化と普及により、これまでとは一線を画す、「人機一体」と称される高度な人間拡張が可能となる素地が整いつつあることが、今、大きく注目を浴びている理由の1つに挙げられる。特に、センシング（知覚）とアクチュエーション（作用）の進化による貢献が大きい。2010年代にセンシング、アクチュエーションにAIも加えた進化が急速に進んだことによってロボットや車等の自律制御が可能となりつつあるが、人間拡張はこれらの技術を人の能力拡張に使うという観点で、技術的にも連続する流れである。日本では政府主導で1,000億円の予算を投じる「ムーンショット型研究開発制度」のビジョナリー会議にて、人間拡張技術が「誰もが夢を追求できる社会」および「100歳まで健康不安なく、人生を楽しめる社会」の実現につながるとして分科会を設立し、注目を集めている。

デジタル技術でアシストされた人間拡張により、これまで以上に違和感の少ない義肢や、病気や高齢による身体機能の低下を支える技術が開発されようとしている。これは人間の尊厳の回復に大きく寄与する。また、これまで習得が難しかった技術や、人体では成し得ない機能や能力を操れるようになったとき、体験や自己実現の可能性が大きく広がることが想定される。これらは承認欲求や自己超越欲求ともいわれる人間の欲求を満たすことに寄与し、モチベーションを大きく高めるため、新たな価値観や購買活動の転換

を生む可能性を秘めている。例としては、高齢者のスポーツや旅行等への需要、製造現場での生産性の向上、AR/VRによる趣味の幅の拡張等である。

有用な活用分野

既に実用化段階の技術について事例を用いて紹介する。

補綴工学としての人間拡張（義手・義足の発展）

補綴工学とは、先天的に失われた四肢等を補うことにより本来の機能の回復を目指す技術であり、人間の尊厳にも寄与する物が多い。例えばGoogle傘下のLiftLabs社（米国）はパーキンソン病などの患者の手の震えを軽減させる自動振動安定機能を備えたスプーン「Liftware」を開発し、これによって患者が再び自力で食事をとることが可能となった（図表2）。

図表2 本来の機能の回復を目指す技術の実用例（「Liftware」）



Liftlabs社が開発した、自動振動安定機能を備えたスプーン「Liftware」

出所：フランスベッド社（Liftware日本代理店）ウェブサイト
https://medical.francebed.co.jp/brand_site/liftware/

また、エンターテインメント性のある競技大会を通じて、この技術の発展に寄与する取り組みもある。スイス連邦工科大学チューリヒ校（ETH Zurich）主催による「サイバスロン」は、さまざまな障がいのある人達（パイロット）がエンジニアとチームを組み、補綴工学を駆使して日常生活の必要な動作をこなしていく大会である（図表3）。例として、電動車いすの部では「階段の上り下り」「ドアを開けて通り抜ける」などのタスクを、電動義足の部では「ソファに座り、立ち上がる動作」「スロープが近くにあるドアの通

図表3 アシスト機器を使った障がい者がパイロットとして出場する競技大会「サイバスロン」



サイバスロン車いすシリーズ日本
2019のコース



同、1位のパイロットとエンジニアのチームが表彰される様子

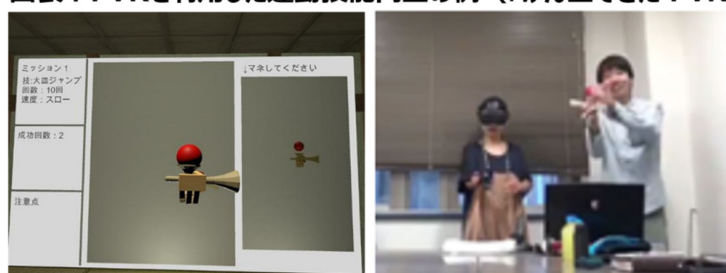
出所：慶應義塾大学理工学部・理工学研究科ウェブサイト
https://www.st.keio.ac.jp/news/cor/20190507_01.html
サイバスロン車いすシリーズ2019日本大会ウェブサイト <https://www.cybathlonseriesjp.com/>

過」などのタスクを安全にクリアした数を競う。パラリンピックとの違いとして挙げられるのは、対象がスポーツではなく、日常生活にスポットを当て、インフラ整備が不要な真のバリアフリーの実現を目的としていることである。この大会には大手義足メーカーのÖssur社（アイスランド）、Ottobock社（ドイツ）やスタートアップのXiborg社（日本）等のエンジニアリングチームも参加し、実用レベルでの技術向上に直接貢献している。

「コツ」の習得を効率化する人間拡張（製造現場でのノウハウ、スポーツ教室）

センシングやAIによって人の動きを関節単位で取得しデジタルデータ化するモーションキャプチャー技術をVR技術と組み合わせることによって、VRで表現される仮想空間の中に人の行動を取り込むことが可能となる。これにより、例えば運動技能の向上に向けて、重力や時間、空間等の物理的な制約を受けない中で練習が可能となる。運動技能は一般的に、①ルールや手法の認知②感覚と運動の連合③無意識にこなせる自動化の3段階を経て向上するといわれているが、自動化にたどり着くまでは作業をこなすことに意識がいき、結果の出来に注意が払えない状態が続くため、我慢強い反復練習が必要となる。これを仮想空間内で引き伸ばした時間内で訓練することで、連合の段階から余裕をもって作業をこなせ、どうすれば結果を伴う作業が可能かという「コツ」に着目した練習が可能となり、技能上達の効率の向上に貢献する。これは同じく効果があるとされているイメージトレーニングを、よりリアルに再現したともいえる。この技術は、製造現場での職人技の効率的な伝承や、スポーツや趣味のコーチング（図表4）および練習場所の省スペース化、仮想化されたプロスポーツチームに参加することによる高度な練習環境の提供、およびエンターテインメント、大型機械や危険を伴う装置の操作習得等への活用が期待されている。

図表4：VRを利用した運動技能向上の例（「けん玉できた！VR」）



VRアプリ「けん玉できた！VR」の画面

初心者でも短期間でけん玉4段と同じ技を習得

出所：「けん玉できた！VR」<http://vrjug.tech/>

アシスト技術としての人間拡張（重量物の運搬・超人スポーツ）

人間が持つ筋力をアシストするウェアラブル機器によって、これまで運ぶことが困難だった重量物の運搬や、新たなスポーツなどの提案が可能となる。

前者としては、サイバーダイン社（日本）のHALやレイセオン社（米国）のXOS-2（図表5）などが有名であるが、2019年にはイノフィス社（日本）より圧縮空気を利用することで低コスト・バッテリーレスを実現した「マッスルスーツEvery」が10万円台でリリースされている。適用事例としては、運送業などの重量

物運搬のみならず、介護・除雪・農作業・災害時のサポートのように、完全に自動化ができず、かつ多くの人手が必要な作業の従事者を増やす目的でも期待されており、いずれは高齢者の社会参加や体力を使うレジャーにも適用されるだろう。

図表5 重量物運搬をアシストするウェアラブル機器（スーツ）の例



サイバーダイン社「HAL」



レイセオン社「XOS-2」

出所：サイバーダイン社ウェブサイト https://www.cyberdyne.jp/products/LowerLimb_medical_jp.html
レイセオン社ウェブサイト <http://raytheon.mediaroom.com/index.php?s=43&item=1652>

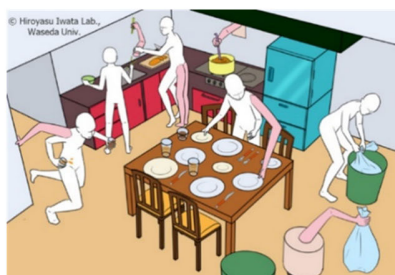
新たなスポーツの提案については、日本における人間拡張の第一人者であり、米『TIME』誌「Coolest Invention of the Year」受賞者でもある東京大学先端科学技術研究センター教授の稲見昌彦氏が共同代表を務める超人スポーツ協会がその活動をリードしている。デジタル技術を使った新たなスポーツの開発や、プレイヤーの能力差を補うことでスポーツに参加しやすい状況を作り出し、人々のQoLを高める活動を行っている。

次に、5-10年後の実用化に向けて実験段階にある開発事例を紹介する。

人体を物理的に機能拡張する人間拡張

前出の東京大学先端科学技術研究センターの稲見教授、マサチューセッツ工科大学（MIT）のハリー・アサダ教授、早稲田大学の岩田浩康教授らは、それぞれ、機械でできた追加の腕を装着し、自在に動かすなどの技術の研究を行っている。この技術により、今までは複数人必要だった作業が1人で済むケースも生まれることから、労働人口減少の対策として期待されている。例えば、岩田教授は「第三の腕」を人が装着することによって変化する日常生活のアイデアをパナソニックと共有しながら、その実現の方向性を模索している（図表6）。この技術には、機械の腕や指、足等を物理的にスムーズに動かす技術に加え、筋電

図表6 人体の物理的な機能拡張の例（「第三の腕」）



早稲田大学岩田研究室による「第三の腕」による生活の変化予測



岩田研究室がパナソニック社と共同で行う、声と視線で制御するアームによる作業効率化

出所：早稲田大学 岩田浩康研究室資料およびウェブサイト <https://www.waseda.jp/top/news/65113>

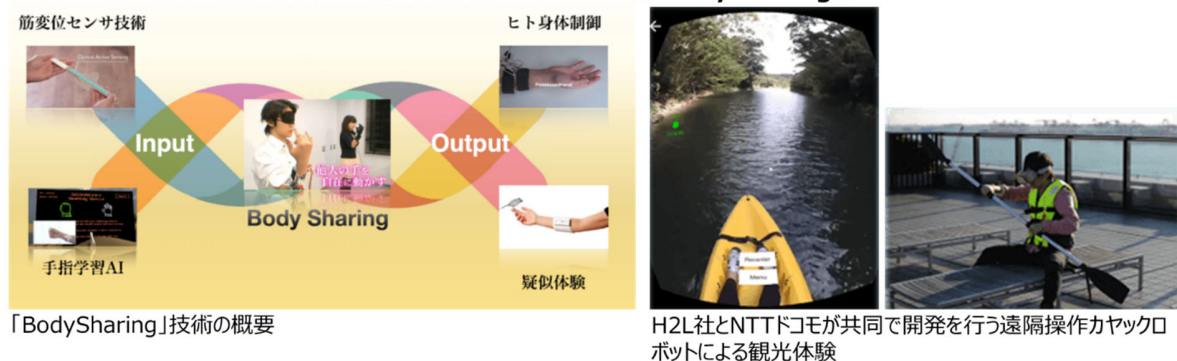
や脳波から扱う人の意思を機械に伝達し制御する技術と、機械から触覚や関節角度等の情報を人にフィードバックする技術が必要となり、後者2つの技術の進歩が今後の発展のカギとなるとされている。

人間の意識を物理的制約から解放する人間拡張（テレグジスタンス）

人体は微弱な電氣的な信号を用いて感覚伝達を行っているが、その信号を筋電や脳波として観測してデジタルデータ化することで人の意識をデジタル化することが可能になりつつある。この技術を用いて機械の腕等を人の意思に合わせて動かす研究がなされていることは既に述べたが、同様に外部から電気信号を与えることによって人の腕を動かしたり、脳に情報を渡したりすることも可能となる。

2011年に『TIME』誌の「The 50 Best Inventions」に選ばれた玉城絵美氏（現・早稲田大学准教授／JST さきがけ研究員）が共同で創業したH2L社（日本）では、筋変位センサーや電極パッドなどを利用し、「BodySharing」技術の開発・提供を行っている（図表7）。「BodySharing」とは、例えばロボットの身体や人の身体と、ユーザのさまざまな感覚（身体的位置覚、重量覚や抵抗覚など）を相互共有することであり、その特徴は、一方向だけの操作ではなく双方向の情報共有にある。同社が既に発表している「PossessedHand」では、腕に巻いた電極パッドを取り付けたベルトから腕に電気刺激を与えることで、本人の意思とは無関係にそれぞれの指や手首を動かすことが可能となり、琴の演奏のサポートができるレベルの精度が実現できている。将来的にはこれらの技術を利用し、遠隔地で他人が感じた感覚をセンシングし、その情報を通信することで、テレグジスタンス体験も可能になるという。

図表7 身体制御や疑似体験を可能にする技術の例（H2L社「BodySharing」）



出所：H2L社資料およびウェブサイト http://h2l.jp/2019/01/09/pressrelease20190109_h2l_docomo/

今後の展望 ーモラルとルール制定の重要性ー

人間拡張は非常に有用かつ人間の高次の欲求を満たす技術として期待されているが、一方でその影響力の強さから使用方法を正しく規定することが重要となる。特に近年では技術の革新速度が著しく向上しており、技術が確立してからのルール制定では遅いとされている。事例としては、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を児童が使用した場合、6歳くらいまで発達する立体視細胞の発達を阻害したり、斜視になったりする危険性があることが判明した。このため、2018年、13歳未満の子供のHMD使用に関するガイドライ

ンが一般社団法人ロケーションベースVR協会により発表されたが、これは2016年に年間1,000万台以上のHMDが出荷された後であった。

また、実体のある場所とは異なる遠隔地で起こるさまざまな感覚を感じるテレプレゼンスを利用している時には、実体のある場所の環境変化の察知能力が著しく鈍くなる。実体が火事や盗難の危険にさらされていても気づかないことから起こる事故や犯罪の増加が懸念されており、技術の完成を待たずに並行してルール制定の議論を行う必要性が強く問われている。

さらに、補綴工学の発展から人間拡張の技術が進化した欧州や日本とは異なり、米国では軍事技術として開発が開始されたこともあり、技術の軍事転用を危ぶむ声も挙がっている。例えば、米軍ではMITと共同で、負傷時には患部を固定するギプスにもなるパワーアシストスーツの開発を行っており、既に軍事用途での検討が始まっている。また、爆薬を詰めたドローンやロボットを人が遠隔で、さもその場にいるように自在に操ることができれば、非常に高い精度で狙いが定められる爆弾兵器が生まれることも予想される。このような用途に本技術が用いられないように国際社会全体で監視を行うことも重要となるだろう。



インプラントブルデバイス ー予防医療分野に拡大の見込みー

技術・イノベーション情報部 コンシューマーイノベーション室 木下美香

インプラントブルデバイスとは

ICT機器の小型化と無線通信の技術開発が進み、ICT機器は、据え置き型のパソコンから携帯可能なスマートフォンに、そして、さらに身に着けるタイプのウェアラブルデバイスへと進化してきた。その延長線上に登場したのが「インプラントブルデバイス」であり、狭義には体内に埋め込むタイプのチップや機器を指し、広義には飲み込むタイプのものも含まれる。

従来、インプラントブルデバイスは、医療分野では、体の深部へ埋め込み、心疾患患者の突然の心停止を防いだり、薬が効かなくなったパーキンソン病患者のふるえを抑制したりなど、それ無しでは解決できない症状の治療にのみ適応されてきた。しかし、近年、日常シーンでの活用事例が見られつつある。

2017年8月、米ウィスコンシン州の自動販売機メーカー、Three Square Marketは、スウェーデンの生体認証センサー専門企業Biohax internationalと提携のもと、米国企業として初めて希望者に個人情報登録したマイクロチップの皮下への埋め込みを実施した。

上述のBiohax internationalは、Jowan Osterlund氏によって2013年に設立、体内埋め込み型のマイクロチップを発売して以来、4,000を超えるインプラントを実施している（2018年10月時点）。このマイクロチップは、近距離無線通信を利用した認識技術（RFID）が使用されており、充電が不要。ICカードなどを持ち歩くことなく、家や車のカギの開閉、オフィスでのドアやプリンター操作、鉄道の乗車などを可能にする（スウェーデンの国鉄システムでは、体内埋め込み型のマイクロチップが乗車券の代わりに利用できるようになっている）。

また、飲み込むタイプのものとして、デジタルメディシンが開発されている。デジタルメディシンとは、服薬管理を目的としたセンサー付きの錠剤である。精神疾患分野における薬のポテンシャルを最大限發揮するため、大塚製薬が米国のベンチャー企業のProteus Digital Healthと共同でデジタルメディシン「エビリファイ マイサイト（Abilify MyCite）」を開発した。既に、2017年に米国食品医薬品局（FDA）の承認を受けており、2020年をめどに米国で本格的に販売予定とのことである。

抗精神薬であるエビリファイは高い治療効果が認められているが、当然ながら医師の指示どおりに服薬されることが前提となっている。また、精神疾患は適切な服薬がなされないと再発し、再発するたびに症状が悪化する。しかし、精神疾患の患者は、病気の症状により服薬の記憶・管理が難しく、この現状を解決するものとして、このデジタルメディシンが期待されている。

「エビリファイ マイサイト」は、1mm四方の砂粒ほどのチップが埋め込まれた錠剤、センサー付きパッチ、スマートフォンアプリのセットで構成される。錠剤に埋め込まれたチップが胃液に反応すると微弱なシグ

ナルを發し、患者腹部に貼ったセンサー付きパッチがこのシグナルを捉え、スマホアプリに服薬したことが記録される仕組みとなっている。

有望な活用分野 –予防医療–

インプラントブルデバイスの有望分野として、予防医療分野が挙げられる。医療分野におけるインプラントブルは上述のとおり、重篤な疾患での適応が主であったが、2019年、血液を全身に押し出す心臓のポンプ機能が不十分になる心不全の予防医療に活用拡大される新たな動きが見られた。この背景には、心不全の治療薬は豊富にあり、ガイドラインが確立されているにもかかわらず、入院率が高く、予後が不良となっていることに加え、今後、高齢化に伴い心疾患患者の増加が予測されていることなどがあると思われる。

米Endotronix社が、心不全のリスクが高い健常者向けの予防医療機器として、心臓の血液を押し出す圧力を在宅でモニタリングするインプラントブルデバイス「Cordella」を開発した。心不全になる前段階として、肺血管の収縮、血管内壁の肥厚、血栓形成などが原因で心臓の血液を押し出す圧力が高まることが分かっており、Cordellaを用いて、この心臓内の血圧をモニタリングすることで、心不全に陥らないよう予防的治療を行うことが可能となる。開発段階のデータでは、Cordellaによる包括的な疾患管理によって入院する可能性が48%低下¹、心臓内血圧モニタリングによる治療によって、入院が37%減少²、死亡率が57%減少する³ことが示されている。米FDAの承認を受け、2019年8月1日にCordellaの治験開始を発表、同年11月、フィラデルフィアで開催された米国心臓協会の学術集会では、90日間の治験において、インプラントブルデバイスの高い安全性と血圧の測定精度、98%の患者が心臓内血圧の遠隔でのモニタリングにより、指示どおりに服薬したことが発表されている。

今後の展望 –普及を推進する技術と課題–

普及を推進する技術

インプラントブルデバイスの普及を推進する技術としては、電源の長寿命化を実現する全固体電池、電源を必要としない生体発電、生体物質であるアデノシン三リン酸（ATP）などに反応する分子ロボットが挙げられる。

¹ Anderson WL et al. Minnesota Managed Care Longitudinal Data Analysis. U.S. Dept of Health and Human Services Contract #HHSP23320100021WI. March 31, 2016.

² Abraham WT et al. Wireless pulmonary artery hemodynamic monitoring in chronic heart failure: a randomized controlled trial. Lancet. 2011 Feb 19;377(9766):658–66.

³ Abraham, WT et al. Pulmonary artery pressure management in heart failure patients with reduced ejection fraction significantly reduces heart failure hospitalizations and mortality above and beyond background guideline-directed medical therapy. Abstract 902-04, ACC 2015.

①全固体電池

全固体電池は、リチウムイオン電池の電極間でリチウムイオンの移動を促す電解質（従来は液体であった）を固体にした電池である。その特性から、構造の薄型化、層を重ねることによる大容量化、耐久性の向上、高速充放電が可能となる。これまで医療用のインプラントブルデバイスは数年単位で手術による交換が行われていたが、患者負担を軽減させるべく交換頻度が少なくて済むよう電源の長寿命化やワイヤレス充電の技術開発が進化、改善が進みつつある。英ベンチャーIlika Technologies社の全固体電池は1日1回の充放電で最大10年間の寿命を実現している。

②生体発電

電源を必要としない生体発電は、エネルギーの自然放電が抑えられた電池技術をベースに、心臓の拍動や呼吸による肺の動きなどから発電、駆動エネルギーを確保する技術である。英Ilika社は既にエネルギーの自然放電が抑えられた全固体電池を開発しており、この電池を生体発電可能な電池へ発展させていく方針だ。

また、研究段階ではあるが、米ニューメキシコ州立大学は、心臓の拍動から駆動エネルギーを確保する低周波圧電エネルギーハーベスターを、米マサチューセッツ工科大学は、人体の奥深くに埋め込んだバッテリーフリーの極小デバイスにワイヤレスで電力を供給、通信できる新しいテクノロジー「In-Vivo Networking (IVN)」をそれぞれ開発している。ブタを用いた動物実験では、IVNシステムで体表から10cmの深さに位置するデバイスに1m離れた距離から電力を供給できることが確認されている。将来的に人での臨床試験が成功した場合、医療分野で狙った組織にだけ薬を届けるドラッグデリバリー、モニタリング、治療など、さまざまな用途にて2024年の商用化が予想されている。

生体発電技術の社会実装に関して米調査会社フロスト&サリバンは、2020年に生体発電の活用範囲が拡大、2021年以降に医療用のインプラントブルデバイスなどを含む低電力電子機器で幅広い採用が進むと予測している⁴。

③分子ロボット

分子ロボットは、DNAやたんぱく質などの生体分子や人工高分子などを材料とする、マイクロメートルからナノメートルの大きさの超小型ロボットである。動力源である「駆動系」、指令を出す「知能・制御系」、実行のオン・オフを切り替える「センサー」からなり、生体分子に反応して細胞のように自律的に動作できるため、電源を必要としない。

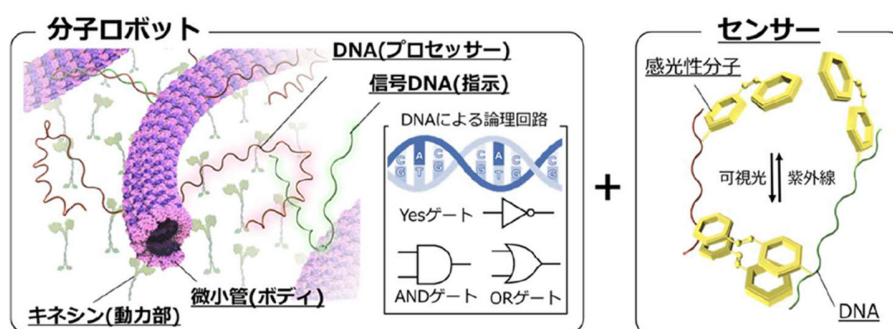
また、分子ロボットは、構成する分子そのものの性質を活用して設計され、雪の結晶の成長、心臓の拍

⁴ TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Analysis / D7FA / 00, Technology Impact Assessment of Micro Energy Harvesting. 2018-05-31

動、生物体表模様のパターン形成などと類似の作用である、分子の自己組織化によって構築される。自然界に存在する分子レベルの精度を達成すれば、生体内での計算、診断、治療、人口細胞膜構築などへの応用が可能になると考えられている。近年、ガン細胞だけに薬剤を運ぶ、小さくたたまれたDNAナノロボットの開発が報告⁵されことから注目が集まっている。

北海道大学大学院理学研究院の角五彰准教授は、生体内での任務を行うことを目指して世界最小の分子ロボットを作ること成功している^{6, 7}。この分子ロボットの「駆動系」は、体内で物質を運ぶ働きを持つモーターたんぱく質である「キネシン」とキネシンの足場となる「微小管」というたんぱく質で構成され、「知能・制御系」にはDNAを、「センサー」には、光を当てると構造が変わる分子を組み込んだDNAを用いている（図表1）。

図表1 北海道大学大学院、関西大学などの研究グループが開発した分子ロボット



出所：北海道大学、関西大学のプレスリリース
https://www.hokudai.ac.jp/news/180201_pr.pdf

このモーターたんぱく質は生体内に豊富にあるATPをエネルギー源とするためエネルギー供給が不要となる。DNAは、アデニン、グアニン、シトシン、チミンという4種類の塩基から構成され、それぞれの塩基について結合する相手の塩基が決まっている。そのため、本来の形である2本1セットの構造がほどけ1本ずつばらばらになったとき、1本鎖DNAは自分とペアとなる分子（塩基）を認識することができ、その認識力を利用してモーターたんぱく質の制御が可能となった。なお、文部科学省科学技術・学術政策研究所による科学技術予測調査/デルファイ調査において、「マイクロ・ナノマシンや生体分子等の配置や運動を自在に制御・計測する光技術」の技術的・社会的実現時期は2030～2033年と推測されている。

今後の課題 –個人情報保護・サイバーセキュリティと人体への安全性–

インプラントブルデバイスによって、個人認証、支払いなど日常のさまざまなシーンにおけるスムーズなやり取りや、新しい治療が可能になる一方で、課題として、プライバシーや個人情報のセキュリティ、

⁵ Li S et al. A DNA nanorobot functions as a cancer therapeutic in response to a molecular trigger in vivo. Nature Biotechnology 36, 258–264 (2018)

⁶ Keya JJ et al. DNA-assisted swarm control in a biomolecular motor system. Nat Commun. 31:9(1):453 (2018)

⁷ 科学技術振興機構「サイエンスポータル」https://scienceportal.jst.go.jp/clip/20191007_01.html

サイバーセキュリティ上の脆弱性、身体における長期的な安全性、機器のアップデートや故障の際に外科処置が必要になることが挙げられる。

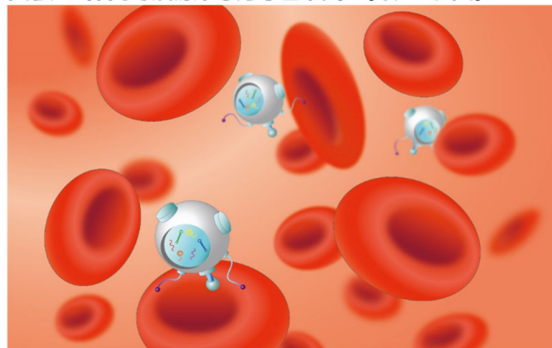
インプラントブルデバイスのサイバーセキュリティ上の脆弱性に関して、米FDAは2017年以降、審査を実施し、また、欧州では今後重要な規制変更が行われる見通しで、2020年にEUで医療機器に関する規則が施行される予定となっている。これらの審査や規制が強化されれば、製品メーカーは、機器へのサイバーセキュリティ対策として不正アクセスを防ぐためのソフトウェア、ファームウェアの更新版を開発する必要に迫られることとなり、インプラントブルデバイスの普及への影響は要注目となる。安全性に関して、米FDAは2005年、埋め込み型マイクロチップの主流となっているRFIDチップについては「皮下に入れても安全である」と公式に発表している。マイクロチップを初めて埋め込んだトランスヒューマニストのZoltan Istvan氏⁸は、皮膚の下にチューブを埋め込めば、マイクロチップの簡単な入れ替えが可能としている。

さまざまな課題はありながらも、ナノテクノロジーやバイオ技術の進化によって安全なインプラントブルデバイスが開発されれば、社会実装がさらに進み、インプラントブルデバイスの日常シーンでの活用が拡大することが見込まれる。例えば、インプラントブルデバイスは、スマートウォッチなどのウェアラブルからは得ることができない、疾患予測のための特異的かつ精度の高いバイタルデータを取得することができるため、予測医療への貢献も期待される。

また、分子ロボットの開発が進めば、病気の検査や治療が大きく変わる可能性がある。体内に分子ロボットを住まわせ、分子ロボットが体内パトロールを実施し、異変が見つかり次第、薬を携えて患部に急行して治療を施すなど、大事に至る前に分子ロボットが治療を済ませてくれるようになるかもしれない（図表2）。

今後、人体に埋め込むという抵抗感と利便性、必要性とのバランスがどのように変わっていくのか、人々の価値観の変化にも要注目となる。

図表2 体内で治療する分子ロボット（イメージ図）



出所：三井物産戦略研究所作成

⁸ トランスヒューマニズムの提唱者。トランスヒューマニズムは「科学技術を積極的に活用することで生物学的限界を超越しようとする思想および運動、そして哲学（トランスヒューマニスト協会）」とされている。

「光」技術（Photon Technology） ーアナログな「光」が生み出す次世代テクノロジーー

技術トレンド基礎調査センター 阿部 裕

光技術とは

光技術とは、光、すなわち紫外線、可視光、赤外線に分類される電磁波について、その保有特性である波動性と粒子性の双方を生かしてさまざまな活用が検討されている基礎技術である。人類は進化の過程で「火」という光を得て文明化への一步を踏み出し、その後、近世以降の科学者達が「光とは何か」との探求を行ってきた。光の研究が進むなかで、光は空間を伝わっていく「波」であるという主張と、小さな「粒子」であるという主張の、相反する主張が並立してきた。1905年、アインシュタインは、光（Light）の最小単位は光子（Photon）であるという「光量子仮説」⁹を発表し、一時期、粒子説が注目された。しかし、その後の研究と実験を踏まえ、光は波動性と粒子性の両方を持つ（光の二重性）とされ、この見解が現在まで支持されている¹⁰。

この光の本質を探究する思索や実験から、現代物理学の礎となっている量子論と相対性理論が生み出された。まさに光の研究が、ニュートン以来の古典物理から現代物理への革命的転換を導いたといえる。そして1960年に光技術のブレイクスルーとなるレーザーが発明され、それ以降、光技術が最先端の科学を牽引し、光ファイバー、太陽電池、LED照明、DVD、液晶テレビ、光触媒、手術用レーザーメスなどは、成熟した技術として生活に入り込んでいる。

図表1 主な光技術の概要と期待される適用分野・技術

光技術	概要	期待される適用分野・技術
①「操る」光技術 光ピンセット	レーザー光を極限まで集光し、タンパク質や微細粒子などを操る。	プラズモン光ピンセット、合成細胞作製 細胞表面への糖鎖&タンパク質付加
②「治す」光技術 光免疫療法	光力学（近赤外線照射）療法と免疫療法を組み合わせた治療法。	がん治療（頭頸部がんなど表層がん） 将来的には、より深層部位のがん治療
③「測る」光技術 光格子時計	現在の原子時計よりも約1,000倍高精度な次世代の時計。	次世代高精度時計 光格子時計搭載型の準天頂衛星
メタマテリアル	素材に工夫を凝らし、光を不自然な方向に反射・屈折・吸収。	光学迷彩、非対称透過シールド
レーザー冷却	原子にレーザーを照射し動きを止めると温度が極端に下がる。	超流動（ボース＝アインシュタイン凝縮） 光格子量子コンピュータ
光積層造形 フェムト秒レーザー加工	レーザーでチタンや鉄などの金属を溶解し積層する3Dプリンタ。 1,000兆分の1秒の超短時間のレーザー照射による加工。	金属3Dプリンタ、複合加工マシン フェムト加工マシン
量子もつれ光イメージング	量子の不可思議な性質（量子もつれ）を利用し超精密計測。	量子慣性センサー、量子生物センサー
量子レーダー	量子もつれをレーダー技術に適用しステルス機を探知。	軍用量子レーダー、早期警戒レーダー
テラヘルツ光	光と電波両方の性質を持ち透過性に優れる。光のフロンティア。	第6世代通信技術（6G） 非破壊検査、病理検査など
光遺伝子	光で活性化するタンパク質に光を当てて神経細胞を制御。	脳神経研究、脳疾患治療

注：①②③は本レポートで取り上げる技術
出所：三井物産戦略研究所作成

⁹ アインシュタインの「光量子仮説」は、光が粒子として振る舞うとき、その最小単位を光量子（光子）とする説であり、マックス・プランクの「量子仮説」を光に拡張した理論。光量子仮説（光電効果の解釈）によりノーベル物理学賞を受賞。

¹⁰ アインシュタインは、1905年に光量子仮説のほか、ブラウン運動の研究論文と特殊相対性理論の3論文を発表。1927年、ニールス・ボーアが、コペンハーゲン解釈と呼ばれる量子論の概念を公表。アインシュタインは、ボーアの示した概念に懐疑的で、亡くなるまでボーアと論争を続けた。結局、ボーアの主張が正しいことが証明されている。

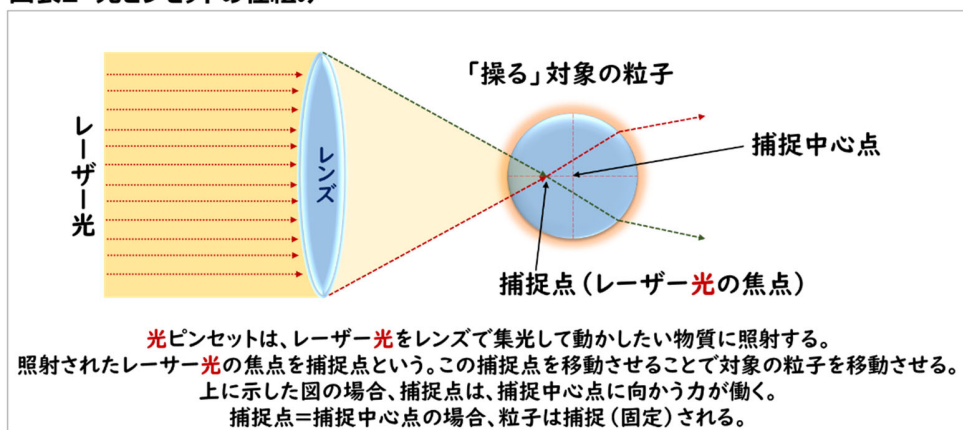
これら、我々の生活で幅広く利活用されている光技術は、リソグラフィー技術など微細加工を駆使する半導体製造技術に依拠して高精度化や小型化が進められてきた。しかし、ムーアの法則に示されるとおりその技術的発展は限界に達しつつある。これを打ち破り、光技術の革新を図るため、新しい概念によるレーザー技術や光検出器等のデバイス開発が行われている（図表1）。本稿では、特に①「操る」、②「治す」、③「測る」技術に焦点を当てて概説し、最後に光技術の精髓ともいえる量子インターネットの最新事情を紹介する。

有望な活用分野

①「操る」光技術－光ピンセット

2018年のノーベル物理学賞は、光ピンセットと呼ばれる技術を開発した物理学者3名に授与された。授賞は、光ピンセット技術を確立したことが評価された。光ピンセットの原理は、光が当たると微弱ながら物質に圧力が加わる性質を利用している。光の圧力は、10億分の1～100億分の1ニュートン¹¹であり、人間が光の圧力を感じることはない。しかし、タンパク質など微細な物質は、光の圧力の影響を受ける。この光の圧力で微細な物質を操る技術が、光ピンセットである。図表2のようにレーザー光をレンズで集光して動かしたい物質に照射する。この集光された光の圧力を利用して物質に直接接触することなく、回転させたり、押ししたり引いたり、また一定の位置に固定するのである。今や光ピンセットは、DNA、RNA、タンパク質、ミトコンドリアなど細胞を構成する生体物質の研究にはなくてはならない技術となっている。

図表2 光ピンセットの仕組み



出所：ノーベル財団ウェブサイト「The Nobel Prize in Physics 2018」

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/> を参考に三井物産戦略研究所作成

光ピンセットがノーベル賞を受賞した理由にはもう一つの重要な技術がある。極めて短い時間だけレーザーを発生させるパルス技術である。現在のパルス技術は、フェムト秒というレベルに達している。1フェムト秒は、1,000兆分の1秒である。例えば、光は1秒間に約30万km（地球7周半の距離）を進むが、1フェムト秒の間に光が進む距離は約0.3μm程度である。さらに光技術の研究者は、フェムト秒よりさらに短い時

¹¹ ニュートンは力の単位。1kgの質量をもつ物質に1m/s²の加速度を生じさせる力を1ニュートンと定義。

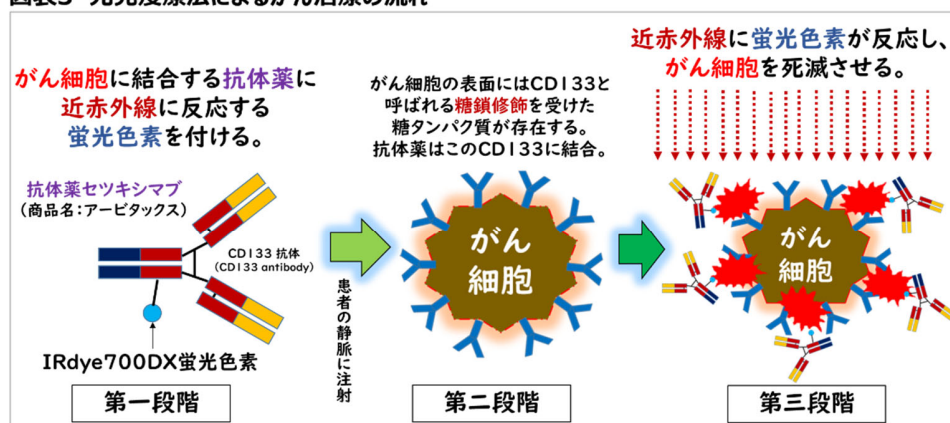
間のパルス技術、アト秒（10京分の1秒）という驚異的な技術の開発に着手している。アト秒レベルとなると電子の動きを捉えることができるとされる。電子は、酸化・還元などの化学反応や電氣的な現象を担う素粒子である。この電子の個々の動きを観察できるようになれば、生体物質や電子素材内部での事象を可視化することができ、生命現象の解明やさまざまな物理現象の原理が明らかになるなど、新たな科学技術上の地平が切り開かれる可能性がある」と期待されている。

②「治す」光技術－光免疫療法（がん治療）

光免疫療法は、がん治療において、これまでのがんの病巣部の外科手術による切除や、正常な細胞にも影響を与えるX線や陽子線を照射する放射線療法とは異なり、がんの病巣部に無害な「光」を当ててがん細胞だけを死滅させる治療法である。光免疫療法で使われる光は、体内まで浸透する近赤外線という光である。この光免疫療法は、米国立がん研究所（National Cancer Institute）によって開発された。

光免疫療法は、3つのステップを経て治療を行う。第一段階は、光が当たると反応する化学物質と、がん細胞の表面にあるタンパク質に結合する抗体を結合させた薬剤を作製し、これを患者の静脈に注射する。第二段階としては、抗体が体中をめぐる、がん細胞表面に存在する特有なタンパク質を探しだし、その細胞に結合する。第三段階は、がんの病巣に増集（いしゅう：集まること）した薬剤に対し近赤外光を照射する¹²。すると抗体に結合している化学物質が光と化学反応を引き起こし、そのエネルギーを受けてがん細胞の細胞膜が破壊され死滅する（図表3）。なお、光免疫療法で照射される近赤外線は、正常細胞には影響を与えない。ただし、治療の効果が得られるのは、現時点では表層のがんに限定される。

図表3 光免疫療法によるがん治療の流れ



出所：米国立がん研究所・小林久隆ほか「Cancer Cell-Selective In Vivo Near Infrared Photoimmunotherapy Targeting Specific Membrane Molecules」（PMID:22057348）を参考に三井物産戦略研究所作成

2018年4月から、国立がん研究センター東病院（千葉県柏市）で、頭頸部がんの患者に対して治療が開始された。また、2019年7月1日、光免疫療法の実用化を目指す楽天メディカルは、米国での治療の結果を公表し、従来の抗がん剤治療などでは効果のなかった30人の患者（頭頸部がん）を対象にして光免疫療法を

¹² 光ファイバーが入っている注射針をがん細胞周辺に数本刺した上で数分間照射する。

行った結果、4人のがんは消え、9人は病変が縮小したとしている。「光免疫療法」は、前述のとおり従来の治療法とは異なり、患者の負担が大きく軽減されることから注目を集めており、国立がん研究センターの治験者募集には多くの希望者があったと報道されている。

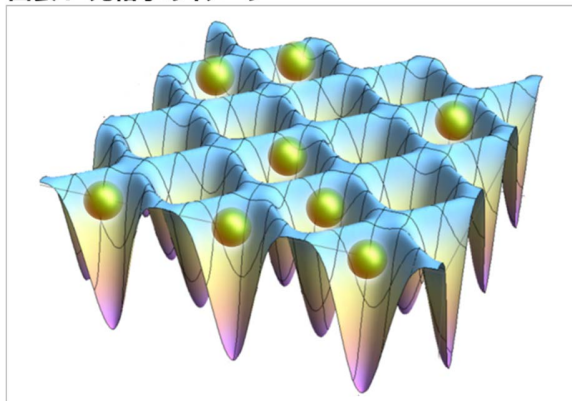
③「測る」光技術－光格子時計

古来、時間は、地球の公転や自転などの天文的な周期を参考にして決められた。現在、世界の標準時の基準となっているのはセシウム原子時計である。1967年の国際度量衡総会で、セシウム原子が発する周波数に基づいて1秒を定義し今日に至っている。セシウム原子時計は、3,000万年に1秒の誤差という高い精度を有するが、現在、セシウム原子時計の精度を超える時計の開発が、欧米や日本で行われている。

アインシュタインの相対性理論に基づけば、時間は物理的な条件によりその進み方が変化する。例えば現在の位置より1cm高いところに移動すると時間は極めて微小ながら早くなる¹³。これは1cm高くなる分だけ重力が弱くなるためである。このような極めて微妙な時間の変化を測ることができるのが光格子時計である。現時点で最高精度を誇るセシウム原子時計は、1個のセシウム原子の周波数を測定し、誤差を最小化するため測定結果を100万回計算して高い精度の周期を得ている¹⁴。

光格子時計は、発想を変え、レーザー光を利用し一度に100万個の原子を、特定の領域（「光格子」）に閉じ込め（図表4）、その場で原子が発する周波数を測定することで、精確無比な周期を得る仕組みである¹⁵。

図表4 光格子のイメージ



出所：東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 香取秀俊教授

光格子時計の精度は、セシウム原子時計の100倍～1,000倍とされている。誤差は、300億年に1秒という高精度である。これは、宇宙の年齢が約140億年とする宇宙論が正しいとすれば、誤差が生じない時計であるといえる。今でも原子時計など精密な時計は、金融の高頻度取引や、電子商取引におけるタイムスタンプ、GPS（Global Positioning System）を使ったカーナビゲーション、携帯基地局の送受信同期の制御など、

¹³ 相対性理論によれば、現在地から1cm高い位置に移動すると0.000000000000000001秒早くなるとされる。

¹⁴ セシウム原子の振動を91億9263万1770回カウントしたときを1秒と定義。

¹⁵ セシウム原子時計の場合、100万回の測定と計算が必要で10日間ほどの時間が必要である。光格子時計は100万個の原子を一度に測定・計算することから、はるかに短い時間で済むメリットがある。

目立たないが社会を支える重要な技術である。原子時計に代わり光格子時計が社会実装されると、地殻の変動を感知したり、地下にある鉱物資源などの探査に利用できたりするといわれている¹⁶。

今後の展望

光技術は、今後も革新的な光デバイス、光計測・分析装置、光情報処理システムなどが開発され、社会・産業上の課題解決に向けた突破口を切り開く技術の一つとして期待されている。中でも注目されているのが、量子インターネットである。

量子インターネットは、光を使い高速計算する光コンピュータと、情報記録や伝達を行う光デバイスで構成される「光ネットワーク」の発展型である。現在のインターネットを支えているのは、光ファイバーや金属の通信線と、長距離通信を可能とする中継装置、通信制御用サーバーなどである。このような通信デバイスの全てを光デバイスだけで構成する光ネットワーク構想が検討されている。全世界のICTが消費する電力は、世界の発電総力の10%を超えており、2030年には20%に達すると予測されている¹⁷。今後は消費電力の少ない、大容量でしかも遅延がない通信技術が必要とされており、最も有望視されているのが、光ネットワークといわれている。この光ネットワークの中継装置を量子通信が可能な量子中継器¹⁸に置き換えることで「量子インターネット」が実現する。

これまでは、量子中継にはさまざまな技術的課題があり、実現には長い時間がかかると考えられていた。だが、2019年1月25日、NTT、大阪大学、富山大学が、光デバイスによる量子中継の原理検証実験に成功した。これにより量子インターネットの実現に向け大きな一歩を踏み出した。この量子中継装置が、一番技術的ハードルが高いと考えられていたが、世界に先駆け日本が一步先んじた。

この実験を主導したNTTはIOWN¹⁹構想を提唱し、「エレクトロニクスからフォトニクスへ」という技術ビジョンを掲げ技術戦略を大きく転換している。さらにNTTは11月、米航空宇宙局（NASA）、米スタンフォード大学などと共同で、光を利用した量子コンピュータの開発に乗り出すと発表している。これらの動きが示唆するとおり、今後の技術トレンドは、アナログである光の性質を最大限利用し、量子コンピュータと量子インターネットを統合した情報ネットワークの社会実装を目指すことになる。この新たな情報ネットワークは、現在のインターネットに代わる、安全・安心で超高速、省エネルギーなネットワークであり、人類社会が抱えるさまざまな課題を解決に導く、真にスマートな社会を実現する社会基盤となるだろう。2020年以降の光技術をめぐる技術開発動向に要注目である。

¹⁶ 相対性理論によると、大きな質量が存在するとその周りの空間がゆがむことから、このゆがみの分、光の進行が遅くなるため質量の大きな物質の存在や変化を捉えることが可能とされる。具体的には、数十から数百の光格子時計を光ネットワーク化し、それぞれの光格子時計の光子の到着時間の変異を計算して、地下にある大きな質量物の有無を判定する。

¹⁷ Nature（2018年9月13日）Vol. 561「The Information Factories」

¹⁸ 量子通信の場合、量子力学的な「量子もつれ」という極めて微妙な物理状態を利用する。「量子もつれ」を長距離維持することは非常に難しい。この微妙な「量子もつれ」を長距離維持することができるデバイスが「量子中継器」。

¹⁹ IOWN（アイオン）は、Innovative Optical and Wireless Networkの略。NTTの技術ビジョン。

2019年注目技術の総括（BMI／プロテインエンジニアリング／ハプティクス）

以下では、2019年1月に発刊した「2019年に注目すべき技術」で取り上げた、BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）、プロテインエンジニアリング、ハプティクス（触覚）について、その後の動向を簡単に総括する。

BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）

BMIは脳と機械を直接、または間接につないで、脳の内部を調べたり、脳の機能を強化したり、脳の疾患を治療したりする技術の総称である。2019年1月のレポートでは、軍事技術を中心に開発が進むBMIの適用が民生分野にも拡大し、新たな製品やサービスが生まれるであろうことを言及した。

2019年は、予想どおり非侵襲型BMI、侵襲型BMIともに注目される年となった。

4月、イスラエルのBrainsWay社がナスダックに上場した。同社は、Deep Transcranial Magnetic Stimulation（Deep TMS）技術を使用した非侵襲型のBMI製品の開発と販売を行う医療機器メーカーである。BrainsWay社のDeep TMSは、米国食品医薬品局（FDA）から、うつ病（2013年）と強迫性障害（2018年）の治療向け機器の販売承認を受け治療実績を積んできた。同社は、禁煙や心的外傷後ストレス障害（PTSD）、オピオイド中毒、脳卒中後のリハビリテーションなどの臨床計画を明らかにしており、今後、脳疾患・神経疾患治療でのBMI利用が促進されるだろう。

侵襲型BMIについては、2019年7月、米Neuralink社CEOのイーロン・マスク氏が、同社開発の「N1インプラント」と呼ばれるデバイスの臨床試験を2020年に行うと発表し注目を集めた。「N1インプラント」は、糸状の電極を多数、大脳皮質に埋め込む方式のデバイスで、脳からの信号情報を処理する4つの「N1チップ」とウェアラブルコンピューターなどで構成されるシステムとなっている。併せてN1インプラントを脳皮質に挿入する脳神経外科用ロボットも開発しており、専門家からも高く評価されている。

以上のようにBMIの開発成果が具体的に現れ、2020年以降、医療分野はもとより、エンターテインメント、教育、マーケティングなど他分野でのBMIの利活用拡大が期待されている。（技術トレンド基礎調査センター 阿部裕）

プロテインエンジニアリング

プロテインエンジニアリングとは、天然の抗体や酵素などのタンパク質を改変し、機能を向上したり、新たに付与させたりする技術である。改変に加えて全く新しいタンパク質を一から設計し生産できる時代に入った。これまでの医薬分野での活用から、最近では、農業、食品、マテリアル分野への転用が進んでおり、その現状について言及した。

プロテインエンジニアリングは、2019年、研究・開発段階から普及・拡大の段階へと入った。

タンパク質の設計を行う米Arzeda社は、三菱レイヨン（現：三菱ケミカル）や独Evonik Industries社といった大規模商業生産に強みのある大企業との協業を開始している。同じくタンパク質の設計・開発を行う米Codexis社は、2018年に開発した甘味料の「TASTEVA M」の生産の大規模化を目指すべく、2019年4月に英Tate & Lyle社とタンパク質の一種の酵素を供給する複数年契約を締結した。米Modern Meadow社は、2019年9月に独Evonik Venture Capital社から投資を受けるなどEvonikとのパートナーシップを強化している。2019年のレポートでは植物卵を取り上げたが、大きく注目されたのは植物肉であった。米Beyond Meat社は、5月に上場で2億4,000万ドルを調達し、米Kentucky Fried Chickenや米McDonald'sが同社の植物肉を採用した。ほかに、米Impossible Foods社の製品が米Burger Kingで採用され、小売店での販売も開始されるなど大きく普及・拡大した。日本企業では、大塚食品、マルコメ、不二製油、森永製菓などが植物肉を開発してマスコミで取り上げられた。また、日Spiber社はゴールドウィンと協業し、微生物を用いて発酵生産したタンパク質繊維を素材としたTシャツを8月に、アウトドア用のパーカーを12月に発売した。さらに同社は3月、三井住友建設とタンパク質を用いた建設分野の新素材、新技術の開発に向けた共同研究契約を締結している。

普及・拡大の段階に入ったプロテインエンジニアリングは、さらに新たな分野へと広がりつつあるといえる。プロテインエンジニアリングは、今後も産業界にインパクトを与える新たな可能性を秘めており、引き続き注目していくべきだろう。（コンシューマーイノベーション室）

ハプティクス（触覚）

ハプティクスは、振動や力を与えることで触覚を伝達する技術であり、例えば高い衛生管理が求められる現場で装置制御ハンズフリー化を行うためにジェスチャー認識のフィードバックに用いられ、医療・製造現場で遠隔操作やVRに適用されたりなど、さらなるユーザーエクスペリエンス向上につながる重要な技術となると言及した。

2019年10月、ソニー・インタラクティブエンタテインメント（SIE）より、2020年末に発売されるプレイステーション5のコントローラーにハプティクス機能が搭載されることが発表された。SIEのコメントによると、これにより一層高い没入感が得られるという。具体的には、「レース中に車が壁にぶつかる感覚と、フットボールで相手にタックルする時の感覚では全く異なったものになる」「草原を駆け抜け、泥の中をはう感覚さえも味わうことができる」「弓をギリギリと引き絞る感覚や、ゴツゴツとした岩場の地形でオフロードの車を一気に加速させる時の感覚が、より鮮明に再現できる」などとしている。

また、豊田合成は2019年7月、電圧のオン・オフで伸縮するゴム、e-Rubberを発表した。“ぷるぷる”“もちもち”といった「柔らかさ」を再現するには低周波領域（200Hz以下）において複雑な波形の振動を発生させる必要があるが、e-Rubberはこれを実現しており、遠隔医療での脈拍のリアルな再現等に活用できると言及している。

ほかにも帝人と慶應義塾大学が触覚を疑似体験できるスーツの開発を発表したり、SoftBank World 2019では、遠隔操作ロボットにハプティクス技術を搭載し、遠隔医療や農業への展開を感じさせるデモが行われたりなど、数年後の実用化に向けて期待の高まりを感じる1年となった。（コンシューマーイノベーション室 吉本 晃）

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

