

戦略研レポート

2017.1.31

2017年に注目すべき 4つの技術・イノベーション

CONTENTS

はじめに

I. プレシジョン・メディシン

II. デジタルツイン

III. フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス

IV. New Space (次世代宇宙ビジネス)

2017年に注目すべき 4つの技術・イノベーション

技術・イノベーション情報部

はじめに

本稿では、三井物産戦略研究所が2017年に注目すべき技術・イノベーションのキーワードと位置付ける、「プレジジョン・メディシン」、「デジタルツイン」、「フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス」、「New Space」の4つを取り上げた。いずれも、世界中の大きな潮流である「デジタル化」（デジタルイノベーション）の進展が背景にある。以下に、これら4つの技術を選んだ理由と背景について概説したい。

プレジジョン・メディシン

プレジジョン・メディシン（Precision Medicine）は、従来の「平均的な患者」のための治療法ではなく、個人の遺伝情報や診療情報等のデータを用いた、よりきめ細かな予防法や治療法のことを指し、検査技術の高度化とともに医療の世界に大きな変革をもたらすといわれている。

遺伝子解析技術の飛躍的な進化とともに、ヒトの全遺伝情報を読み取るコストが1,000ドルに迫ってきており、遺伝情報を用いた新たな治療法、医薬品開発、保険償還などが生まれようとしている。2014年に英国で「ゲノミクス・イングランド」、2015年に米国で「プレジジョン・メディシン・イニシアチブ」が始動し、遺伝情報を用いたプレジジョン・メディシンの社会実装が進んでいる。日本でも、2017年に公益財団法人がん研究会を拠点にゲノム医療の研究開発を行うプロジェクトが本格始動する予定である。

「プレジジョン・メディシン」の特集を組んだ科学誌Nature（2016年9月号）は、プレジジョン・メディシンの原動力は患者データであると言及している。日頃から患者データに接している病院、製薬会社、診断・医療機器会社、臨床検査会社、IT企業、保険者など、医療を取り巻くさまざまなステークホルダーが最も注目している分野の一つといえる。

デジタルツイン

デジタルツイン（Digital Twin）は、主に製造業におけるデジタルトランスフォーメーションの一つの形態であり、米IT調査大手のガートナーも、2017年の注目テクノロジーのトップ10の中に入れている。

リアルな（実物の）製品や工場と全く同じデジタルデータの製品や工場をコンピュータ上（サイバー空間）に仮想的に構築したのがデジタルツイン（デジタルの双子）である。工場や製品、部品などのリアルな物理世界における状態に関するデータをセンサーで収集し、実際の動きと同じ状態をデジタル技術でリアルタイムに再現する、革新的なシミュレーション技術といえる。

従来、製品の設計・開発・製造では、都度、物理的にプロトタイプを試作し、検証テストを繰り返すことで、高コストかつ時間を費やす要因となっていた。デジタルツインの登場により、設計・開発・製造だけでなく、出荷後のメンテナンスも飛躍的に効率向上することから、製造業に大変革をもたらすと期待される。業態変革のための強力な武器としてデジタルツインを導入する企業が、2017年からさまざまな産業で続出していくであろう。

フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス

近年、エレクトロニクス分野においては、MEMS（微細加工）技術、半導体の3次元実装技術、ナノインプリント技術などの研究開発が盛んに行われているなか、こうした研究開発の活発化と同時に、具体的な製品化が期待されるフレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス（FHE）技術を、2017年に注目すべき技術として取り上げた。

技術革新が進む印刷技術を活用したフレキシブルな基板の上に、従来のIC製造技術やMEMS技術を組み合わせたハイブリッド技術をFHEと総称し、VR/AR（仮想現実/拡張現実）技術を使ったウェアラブル機器、小型センサーシステム、フレキシブルなバッテリーやディスプレイ、ヘルスマonitoringシステム、次世代モビリティシステム等々、多様な製品・システムへの応用が期待されている。

半導体エレクトロニクス製造業界の世界最大の国際工業会であるSEMIは、「FHEはIoT社会をハードウェア面で強力に支えるキーテクノロジーである」と唱え、業界を挙げてFHEの商用普及を啓蒙している。2016年12月に東京で開催されたSEMICON JAPAN 2016の会場において、SEMIはFHE技術の大規模な展示を行い、注目を集めている。

また米シリコンバレーでは、産官学による FHE 技術の研究所が設立され、多くの産業分野の大企業が参画し、FHE の一大産業化を目指している。

New Space（次世代宇宙ビジネス）

米国を中心に「New Space」と呼ばれる、宇宙空間を利用した次世代の宇宙ビジネスが、新興企業を核に勃興している。

打ち上げサービスでは、2016 年にイーロン・マスク氏率いる米 SpaceX が成功した再使用型ロケットや、超小型衛星打ち上げに特化したロケットが実用化の段階に入ってきた。衛星サービスでは、超小型衛星の利用が拡大期

に入り、人工知能による画像ビッグデータ解析技術を活用した精緻な地球観測（リモートセンシング）システムや、地球を覆う衛星通信システム等のインフラ構築が進行している。さらに、宇宙空間の軌道上での微小重力環境下の遠隔実験や、衛星の寿命延長、宇宙ゴミ（デブリ）の除去といった、宇宙空間での多様な新サービス市場の創出も視野に入ってきた。

日本でも、2016 年 4 月に宇宙基本計画が策定され、同 11 月には民間の宇宙事業参入を後押しするための宇宙活動法が成立した。これまで国（政府）主導だった宇宙産業にとって、2017 年は民間企業による新たな宇宙ビジネスが世界で開花する年となる。

I. プレシジョン・メディシン

1. プレシジョン・メディシンとは

プレシジョン・メディシン（Precision Medicine）とは、従来の平均的な患者を想定した「one-size-fits-all 型」治療ではなく、個人の生体分子（遺伝子、タンパク質など）情報や診療情報等のデータを用いることで、患者ごとによりきめ細かな予防法や治療法の提供を目指す取り組みである。現在、英国、米国、フランス、中国などでプレシジョン・メディシンの社会実装を目指した国家プロジェクトが始動しており、医療の世界に変革をもたらすといわれている。プレシジョン・メディシンが注目される背景には、「生体分子をターゲットとして開発された医薬品（分子標的薬）」と、「今まで見えなかった患者の生体分子情報を可視化する検査方法（リキッドバイオプシーなど）」の目覚ましい技術革新が挙げられる。

現在、がん分野におけるプレシジョン・メディシンが最も進んでおり、英オックスフォード大学ががんのプレシジョン・メディシン研究所、米ジョンズ・ホプキンス病院が 8 つのプレシジョン・メディシンセンター設立を発表、日本でも公益財団法人がん研究会が、がんプレシジョン医療研究センターを設立するなど、患者向けサービスの提供が広がっている。同時に、プレシジョン・メディシンに適した病院の在り方の検討や、複数の製薬会社が協力して遺伝子検査を実施する新たな医薬品開発、薬の効き目や使う量により薬価を変える個別化償還モデルの検討、AI（人工知能）を用いた遺伝情報解析なども進んでおり、

病院のみならず、製薬会社、診断・医療機器会社、臨床検査会社、IT 企業、保険者など、医療を取り巻くさまざまなステークホルダーが注目している取り組みといえる。2017 年、日本でも、がんのプレシジョン・メディシンの社会実装を目指した国家プロジェクトが発足する予定であり、その動向に注目したい。

2. プレシジョン・メディシンを推進する技術

(1) 医薬品分野

がんには、正常な細胞には見られない遺伝子の変異やタンパク質の発現が見られ、抗がん剤の効き目はそれらのタイプに大きく依存することが分かっている。近年、こうした生体分子をターゲットとする分子標的薬の開発が活発化しており、生体分子情報を起点とした治療の選択肢の拡大につながっている（次ページ図表 1）。

分子標的薬のうち近年売り上げを伸ばしているのが、抗体と呼ばれる、生体に備わる免疫反応を応用した医薬品である。2016 年に注目を集めた小野薬品工業のオプジーボに代表される免疫チェックポイント阻害剤も抗体の一種である。オプジーボは、がん細胞上のタンパク質と免疫細胞のタンパク質の結合を阻害することで、がんが免疫細胞の攻撃対象と認識させない仕組みを阻害する機能を有する。この免疫回避の仕組みは多数のがんに存在するため、皮膚がん、肺がん、腎がん、血液がん等のさまざまながん種¹において、主に再発性・進行

1. 治療対象となるがん種については医薬品添付文書の記載の確認が必要。

図表1 プレシジョン・メディシンで有望視される医薬品の概要

| | 従来の抗がん剤 (低分子) | 分子標的薬 | | |
|--------------|---------------|--|---|--|
| | | 免疫チェックポイント抗体 例：抗 PD-1 抗体 | ペプチド医薬品 | 免疫細胞療法 (遺伝子治療の一種) 例：CART 療法、TCR 療法 |
| 分子量 (分子の大きさ) | 500 以下 | 15 万程度 | 700 ~ 1,500 程度 | (生きた細胞を用いる) |
| がん細胞への特異性 | 低い | 高い | 高い | かなり高い |
| 副作用 | 多い | 比較的少ないが一部で深刻な例あり | (初期臨床試験段階) | 臨床試験段階 (一部深刻な例あり) |
| 標的 | 細胞内 | 細胞外 | 細胞内 | 細胞外 |
| 経口投与 | 可能 | 不可能 | 可能 | 不可能 |
| 製造方法 | 化学合成 | 生物学的な方法 | 化学合成 | 遺伝子組み換えと細胞培養 |
| 製造コスト | 低い | 高い | 低い | かなり高い |
| 主な参入企業 | 製薬企業全般 | 小野薬品工業、米 BMS、スイス Roche、英 AstraZeneca 等 | ペプチドリーム、スイス Novartis、英 GSK、仏 Sanofi、米 Genentech 等 | スイス Novartis、米 Cellectis、米 Juno Therapeutics 等 |
| 代表的な製品名 | タキソール (英 BMS) | オプジーボ (小野薬品工業)、キートルーダ (米 Merck) | 初期臨床試験段階のため上市製品なし | 臨床段階のため上市製品なし |

出所：AnswersNews 等の情報に基づき三井物産戦略研究所作成

性の患者を対象として、これまでの抗がん剤を上回る治療成績を有している。同様の免疫チェックポイント阻害剤が米 Merck から上市されているほか、現在、他の免疫療法剤や化学療法剤などとの併用による治療法も含めると、1,000 件以上の臨床試験が行われているとされる (Oncology Journal)。

分子標的薬の進化は今後も続くと考えられ、その中で新しいカテゴリーの抗がん剤としてペプチド医薬品に注目が集まっている。ペプチド医薬品は、抗体よりも小さな構造を有するため細胞内への侵入が可能であるという特長があり、抗体では標的とできなかった細胞内に存在するタンパク質を狙い撃ちし、より高い効果を期待できる。また、経口投与が可能であることや、化学合成が可能であるため、抗体医薬品よりも製造コストを下げることが期待されている。近年の技術革新により安定な化合物の合成が可能となったことで、医薬品としての実用化に期待が高まっている。

キメラ抗原受容体 T 細胞療法 (CART 療法) や T 細胞受容体遺伝子導入 T 細胞療法 (TCR 療法) などの免疫細胞療法と呼ばれる分子標的薬にも期待が高まっている。これらの免疫細胞療法は、患者の体から取り出した免疫細胞に、がん細胞上のタンパク質を認識して攻撃するための遺伝子を組み込むことで、がんへの攻撃能力を高め、その細胞を患者に戻すというもので、患者ごとにカスタマイズした究極のプレシジョン・メディシンといえる。遺伝子治療の一種とも見なされるこの治療法では、難治性の急性リンパ性白血病など、既存医療では治療選択肢のない極めて予後の悪いがんにおいて高い治療効果が確認されている。ただ、こうした患者自身の免疫細胞

を用いる細胞医療は大量生産によるコスト低減が困難であることや、極めて複雑な人体の免疫系に大きな影響を与えるため、一部の例で深刻な副作用が現れるなどの問題が出ており、今後こうした課題の克服が求められるだろう。

(2) 検査分野

がん医療で使われる検査技術には、PET (陽電子放射断層撮影) などの「画像診断」、採血による「血液検査」、患部の一部をメスや針などで取り出してがん細胞の状態を精査する「生体検査 (生検)」などがある。がん治療におけるプレシジョン・メディシンでは、抗がん剤の効く人、効かない人を判別するため、生検による遺伝子検査が行われるが、患部から検体を得るには手術を必要とするため患者負担が大きい。そこで、より簡便で患者負担の少ない検査方法「リキッドバイオプシー」に注目が集まっている。リキッドバイオプシーとは、わずかな量の血液を注射針で採血し、がん患部から遊離して血液中を循環しているごく微量の遺伝子 (cfDNA : cell free DNA など) や、がん細胞そのものである血中循環腫瘍細胞 (CTCs : Circulating Tumor Cells) をとらえて検出する技術である。cfDNA は、血液 1ml 当たりおよそ数 ng から数十 ng、CTCs は、赤血球などの血液細胞 50 億個に対し 10 個程度しか存在しておらず、どれも非常に微量のため高感度な検出が求められる。

現在、欧米を中心にリキッドバイオプシー受託サービス事業者が増加しており、遺伝子解析機器最大手の米 Illumina は、ビル・ゲイツ、ジェフ・ベゾス、Google Ventures が出資する新会社 Grail の設立を発表している。

また、がん関連医薬品世界最大手のスイス Roche は、子会社の Roche Molecular Diagnostics を通じてリキッドバイオプシー事業を開始している。米国内トップシェアの Guardant Health によると、現在提供しているサービスは、進行がんの患者を対象とし、病院より送付された 20ml の血液から、がん由来の遺伝子を抽出し、どのようなタイプの遺伝子なのかを検査した後、患者の体質に合った抗がん剤の情報を約 2 週間で医師にフィードバックしている。リキッドバイオプシーは、患者負担が少なく、高頻度に行うことができるため、患者の状態をリアルタイムに、正確に知る事が可能となる。今後、さらなる技術進化とともに、がんの早期診断、治療効果のモニタリング、再発の兆候などを得ることができ、より個人の状況に則した、有効な治療が行われるようになることが期待されている。リキッドバイオプシーなど、今まで見えなかった患者の生体情報を可視化する検査方法が今後増加すると考えられ、新たな検査方法と分子標的薬が両輪となり、プレジジョン・メディシンが目指すべき方向性の一つ、即ち、患者にとって治療の選択肢が増え、治療の質の向上に寄与することが期待される。

3. 今後の展望

2016 年 9 月にプレジジョン・メディシン特集を組んだ科学誌 Nature では、プレジジョン・メディシンの原動力は「患者データ」と述べている。プレジジョン・メディシンを推進するに当たり、さまざまなステークホルダー

を通じて得られた生体分子情報や診療情報をはじめとする患者データのデータシェアリングが求められている。米国の病院ネットワーク「eMERGE」では電子カルテと遺伝情報の統合、英国「ゲノミクス・イングランド」では 13 病院に設置されたゲノミック・メディシンセンターを通じて得られた情報を中央データセンターにて管理・運用するなど、プラットフォーム整備のための国家プロジェクトが進む。一方、運用拡大に伴う維持費用の問題に加え、個人情報保護や匿名化、暗号化などのセキュリティに関する議論や、検査手法の国際標準化や遺伝カウンセリングの普及など、検査体制の構築についての議論も活発化している。これらの蓄積されたビッグデータは、近年目覚ましい発展を遂げている人工知能を用いた解析技術や予測技術、スーパーコンピュータによるシミュレーション技術などのデータサイエンスにより、医療現場における診断や治療、検査や医薬品に関する技術開発の効率化に活かすことがますます重要になると考えられる。また、将来的には現在の対症療法的な治療に代えて、個人の日常生活等のモニタリングデータも活用して疾患発症前に予防的な介入を行い、健康寿命の延伸に貢献することも望まれる。

プレジジョン・メディシンは、患者データを起点とした患者中心の医療であるともいえる。治療の質の向上に加えて、持続的・発展的なサービスの提供を受けるため、各個人が自身のデータをどう活かすべきかを考える機会が今後増えるであろう。

II. デジタルツイン

1. デジタルツインとは

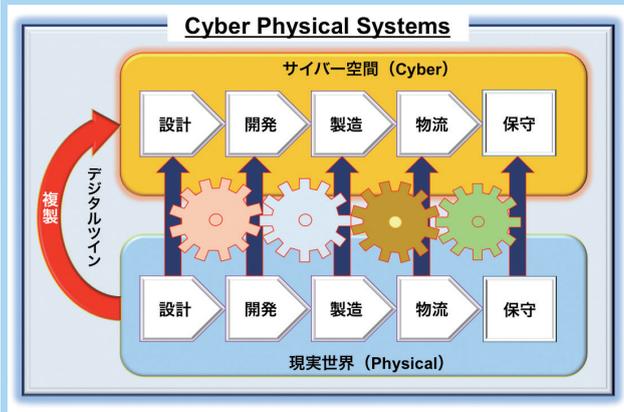
デジタルツイン (Digital Twin) は、主に製造業におけるデジタルトランスフォーメーションの一つの形態であり、デジタルデータをもとに物理的な製品をサイバー空間上で仮想的に複製する技術概念である。デジタルツインという単語は、米国防総省の DARPA (国防高等研究計画局) による造語といわれている。

一方、現実世界にある多様なデータをセンサーネットワークで収集し、サイバー空間に取り込んだ上でデータ処理・分析を行い、その結果を再度、現実世界にフィードバックし、機器の最適制御や状況変化に伴う意思決定支援などを可能とする仕組みを CPS (Cyber Physical Systems) という。CPS は、ドイツの Industrie4.0 で多用

されるテクニカルタームであり、次世代の製造業や産業システムのあり姿を表象する基礎概念として用いられている。これまでの製造業のトレンドは、改善に基づくリーン生産方式、コンピュータ制御によるフレキシブル生産、IoT とデータ解析による少量多品種・予測生産に焦点が集まっていたが、近年、製造業へ CPS を適用する動きが出ている。それがデジタルツインである (次ページ図表 2)。

デジタルツインが登場した背景には、現実世界をコンピュータが扱いやすくモデル化することを容易にする情報処理技術の進展と、現実では実験できない条件も含めて多面的な条件から最適解を導き出すことのできるハイパフォーマンス・コンピューティングの劇的な性能向上がある。デジタルツインは、複雑化を増す製品、例えば自動

図表 2 デジタルツイン概念図



出所：三井物産戦略研究所作成

運転機能を実装した自動車の構造や仕組みをコンピュータ上でモデル化してデジタルデータとして管理する革新的な手法といえる。

さらに最近、このデジタルツインに、製造プロセスや保守データなどをデジタルデータとして加え、設計・開発から製造、サプライチェーンまで一貫したデータを継承することで、サイバー空間上のモデルをリアルタイムにアップデートする仕組みの構築まで可能となってきた。これにより、設計・開発・製造の変更を容易にし、リコールなどが発生する前に、問題を事前検知することも可能となり、品質改善や製造工程の見直しなどを軽減するのに役立つと期待されている。

先駆的な取り組みとして、米ロッキード・マーチンは、航空機分野にデジタルツインを適用して高い成果を挙げている。航空機の飛行状態を決定するパラメータの数は1,000億を超えるといわれるほど複雑であるが、試作機をサイバー空間上に仮想的な航空機モデルとして精緻に再現し、コンピュータ上でさまざまな故障モードを想定して仮想飛行させることで、初飛行前に不具合を事前に抽出し、再設計や実際の試作機への修理等を施している。これにより「手戻り」が最小化され、開発期間の短縮と事故率低減を実現している。

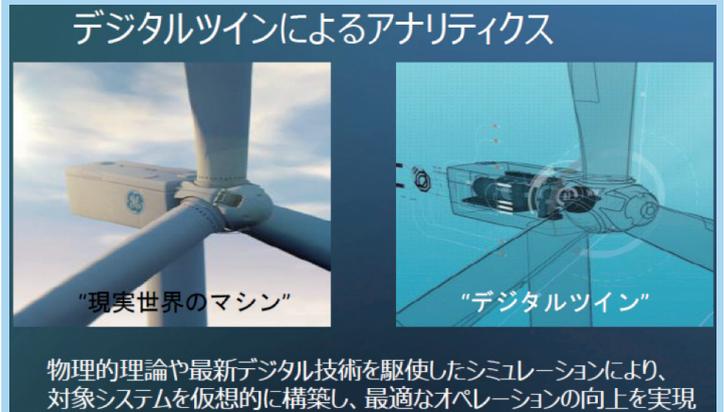
2. デジタルツインが活用される有望分野

現状、デジタルツインが活用されている分野は、航空機など大企業での事例が大半であるが、今後はさまざまな産業分野に広がる可能性がある。ここでは適用分野3つの事例を挙げる。

(1) 機械・装置 (GE：風力発電)

GEのデジタルツインは、自社のソフトウェア・プラットフォームであるPredix上に3次元データを用いてモデルが構築される。3次元化されているため、プラント建設プロセスを時系列で確認可能で、工期短縮などの検討にも利用できる。また、保守作業員によるオペレーションのシ

図表 3 GE製の風力発電機におけるデジタルツイン



出所：GE デジタル「ITを駆使した新たな製造業を目指して」

ミュレーションや人材育成などの教育にも活用できる環境となっている。2016年11月4日に開催されたGEの事業戦略説明会「GE Powering the Future」では、風力発電所におけるデジタルツインの事例が紹介された。Predix上に作られた風力発電所のデジタルツインで、風力発電機の効率を最大化するようシミュレーションを実施し、個体差のあるタービンを個別にカスタマイズしている。気象条件により、風車の羽根の制御パラメータを変更し出力を制御するなど、きめ細かなサービスを提供している。さらに、風車同士の相互作用をシミュレーションして、あえて最前面の風車の出力を落とし、後方の風車の出力を上げる運用改善で、風力発電所全体の出力を増やすなどの対応も行っている(図表3)。このようにGEは、デジタルツインを最大限に利用し顧客に付加価値を提供する先進企業といえる。

(2) 製造工場 (シーメンス：スマートファクトリー)

シーメンスは、Industrie4.0の目標の一つである、スマートファクトリーの実現に向けて研究開発を進めており、その一環でデジタルツインに注力している。スマートファクトリーにおけるデジタルツインとは、物理的な工場の製造設備・制御機器も含めた全ての情報をデジタル化し、サイバー空間上で製造設備の配置、産業ロボットや製造技術者の動きなどを事前にシミュレーションする仕組みである。実際の製造機器に取り付けられたセンサーから得られたデジタルデータにより、生産現場の状況変化をリアルタイムでサイバー空間のモデル化されたスマートファクトリーに反映できることから、高度で多様な検証が可能となる。このため、シーメンスは自社にない技術を持つIT企業等の買収を積極的に行っており、さらに3Dプリンターによる設計製造のシームレス化を目指している。3Dプリンターは、3次元データから樹脂や金属を積層して物理的な造形物を製造する装置であるが、シーメンスは自社の設計システムから得られる3次元データを3Dプリンターに入力して最終製品を直接製造するDDM (Direct Digital

Manufacturing) を実現させる計画である。シーメンスは、DDM の実現に向けた戦略の一環として、既に 3D プリンターで電気自動車を製造している米ローカルモーターズとパートナーシップを締結し、自動車製造の革新をもくろんでいる。

(3) 国土計画・都市計画（バーチャル・シンガポール）

バーチャル・シンガポール（Virtual Singapore）は、国全体を 3D モデル化する取り組みで、国土の地形情報に建物や交通などの社会インフラ施設や樹木なども含め、精密に再現するプロジェクトである。建物の内部や地下鉄など地下インフラの情報まで取り込む計画で、現在、世界で最も大規模なデジタルツインの事例である。今後シンガポール政府は、このバーチャル・シンガポールというデジタルツインに、駐車場の空き状況や各地の雨量、河川の水位などのセンサー情報、監視カメラの動画など、多様なリアルタイムのデータを取り込んでいく考えである。道路や公共交通の混雑解消などに関するシミュレーションを行って最適経路に誘導するなど、都市行政や社会インフラ管理の効率化を目指している。

3. 今後の展望

ICT の進展により製造業全体のデジタル化は確実に進行しており、今後、デジタルツインの普及により設計から

製造に至るプロセスは大きく変貌すると考えられる。特に 3D プリンターに切削などの複合加工機能を付加した複合マシンとデジタルツインが融合した次世代製造ソリューションの登場は、本格的な DDM 時代を到来させ、大企業だけでなく中小企業の開発・製造能力、コスト競争力を大幅に強化する可能性があり、新しいビジネス領域として注目される。デジタルツインは、製造業を GE のようなサービス企業へと変貌させ、シーメンスのように新たな市場に挑戦する企業を増やすトリガーともなるだろう。

またデジタルツインの普及により、消費者は自分の要望を反映させたデータを購入し、一番安い DDM 企業に製造を発注できるようになり、マス・カスタマイゼーションの有力なソリューションにもなり得るだろう。加えて、デジタルツインと VR/AR（仮想現実 / 拡張現実）技術を融合させた新しい体験価値を提供する技術が現れる可能性もある。

ただ一方で、デジタルツインにも課題はある。デジタルデータの不正取得による偽デジタルツインとそれに伴う企業秘密漏洩、データ改ざんやデータ破壊など、サイバーセキュリティを中心とした脅威も存在する。今後、リスク回避の手法や技術も並行して開発実装されることにより、デジタルツインは製造業のみならず、さまざまな産業分野に波及していくと考えられる。

Ⅲ. フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス

1. フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクスとは

フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス（Flexible Hybrid Electronics : 以下、FHE）とは、技術革新が進む電子回路の印刷・インプリント（ハンコ）技術とシリコンをはじめとする既存の IC（集積回路）技術や実装技術を組み合わせることで（ハイブリッド化）、高機能を維持しつつ、ある程度の押し曲げにも耐えられるフレキシブルな製品や部品を経済的に実現する技術である。

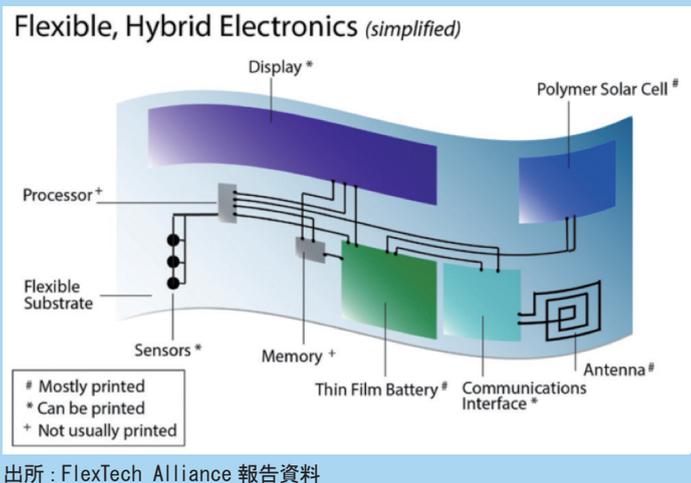
これまでもフレキシブル・エレクトロニクスという概念は存在していた。従来「フレキシブル」では、電子回路やその中枢を司る頭脳である IC に対して、柔軟性のないシリコンから柔軟性を持つ有機材料への置き換えを目指していた。しかしながら、シリコン上での電子移動度が $600 \sim 750 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達するのに対し、有機材料では $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

が限界に近く、柔軟な材料への置き換えは技術上の壁に当たっていた。

こうした背景により、米国を中心に提唱され始めた技術概念が FHE である。FHE では、可能な範囲にて容易に量産可能かつ柔軟な材料・部品へ切り替えることで、製品全体としての低コストと高機能に加えて、軽量、薄型、強靭さ（柔軟性を活かし衝撃を逃がす）などの優れた物理特性を提供し、これまでにない用途での利用を見込む。すなわち、FHE は既に確立した技術に基づき、用途に応じた材料・部品の組み合わせ最適化による実用化を強く意識したコンセプトといえる。

FHE を具現化する上では、IC、電源、回路およびこれらを搭載する柔軟な基板が主な技術要素であり、そのほかにも用途に応じて基板上に搭載されるディスプレイ、アンテナ、通信デバイスなどが挙げられる（次ページ図表 4）。

図表 4 印刷可能な素子と印刷できない素子を組み合わせて構成される FHE の概念図



このうち、回路と基板に関しては、既に柔軟性を満たす材料や加工・実装技術が存在する。そのけん引役となっているのは、欧米および中国で市場が拡大し世界全体でも7,000億円（2015年）に達している無線ICタグ技術（RFID）である。既に、紙から樹脂に至るまでフレキシブルな基材に対して、銀や銅を原料とするペースト・インクで印刷や型押し技法を用いて回路を安価に量産する技術が確立されている。

電源では、パナソニックのオートモーティブ & インダストリアルシステムズ社が、2016年にカード型デバイスやウェアラブル端末などに適した厚さ0.55mmのフレキシブルリチウムイオン電池を製品化するなど、フレキシブル化の開発も進展している。

ICはシリコンを使用せざるを得ず、フレキシブル化が困難ではあるが、電子ペーパー向けに産業技術総合研究所と凸版印刷によりシリコン印刷でトランジスタを製造する成果報告がなされており、適用範囲の拡大と低コスト化の進展が期待される。

これらの要素技術によって実現されるFHEの用途は多岐にわたり、その提唱国でもある米国が用途開発に積極的に取り組んでいる。2015年にFHEの官民共同プロジェクトを推進する団体（FlexTech Alliance）が米国で発足し、その下でFHE技術の研究所「Flexible Hybrid Electronics Manufacturing Innovation Institute: FHE-MII」がシリコンバレーに設立された。

FHE-MIIの運営資金として米国防総省より7,500万ドル、参画企業より9,000万ドルが拠出され、2015年から

5年間の研究開発資金に充てられる。参画機関は、アップル、ボーイング、GM、クアルコムなどの大企業を中心とする96機関に加え、アルゴンヌ国立研究所、スタンフォード大学、マサチューセッツ工科大学、ハーバード大学などの研究機関を合わせて162団体に及ぶ。

FHE-MII設立の目的は、狭義の意味ではFHEの実用化にあるものの、広義には、米国への製造業回帰も背景にあると解される。そのためかFHEの実用化に必要な設計から製造、アプリケーション開発までの企業と技術が集約するシリコンバレーが拠点として選定され、世界でもこれだけの機能が集積されている拠点は類を見ない。

2. フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス有望分野

FHE技術は製品レベルから部品レベルまでIoTを支える基盤技術として多くの分野での利用が見込まれている。具体的には、以下に概説する分野での利用が期待されている。

(1) VR/ARを利用するウェアラブル機器

昨今、ゲーム機などのエンターテインメント機器として、VR/AR（仮想現実 / 拡張現実）を利用する製品が発表されている。これらの機器の中心的なものは、ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）であり、その需要は今後世界で拡大する見通し（2025年に750億ドル；三菱総合研究所試算）となっている。グーグルはHololensの製品名、ソニーはSmartEyeglass Developer Edition SED-E1の製品名で販売を開始している。

HMDは市場拡大が期待されつつも、現在製品化されている機器は、利用者個々のサイズに細かく対応していないため、FHEのさらなる技術進展によるフィット感向上などが課題として挙げられている。

(2) 物流・小売り向けセンサー

物流・小売り向けでは、ID情報を持ち、近距離での無線通信が可能なICタグ（RFID）の利用が進展している。このRFID技術とFHEを利用して、商品のより詳細な状態変化の検知を実現する開発が進められている。産業技術総合研究所は、印刷された大面積回路の上に圧力センサーを並べたシートを製造し、店舗棚にこのシートを設置することで商品の動線をモニタリングするシステムを開発した。このシートは、商品ごとの重量差を感知し、重

さと商品をひも付けて管理する。その商品が実際に手に取られているかなども情報として取得可能であり、販促拡大にも利用できる。ネット通販の拡大によって爆発的に物量が増加する物流倉庫向けにも利用できる技術として期待される。

(3) メディカル・ヘルスケア向けセンサー

メディカル・ヘルスケア向けセンサーでは、現在、腕時計タイプのウェアラブル機器を用いて体の表面情報（体温、脈拍、心拍など）をモニタリングする技術が主流となっている。一方、FHE の有望用途として今後最も期待されるのは、埋込型の体内モニタリング機器である。既に埋込型の機器では、米 CardioMEMS が、ラジオ波と MEMS（微小センサー）技術を利用し、肺動脈圧や心拍のモニタリングを可能にする体内埋込型センサーに関して米 FDA（食品医薬局）承認を得ており、同社を買収した St. Jude Medical より製品化されている。

体内埋込型のセンサーでは、臓器や筋肉に追従して変形する柔軟性が求められるほか、生体親和性のある材料選定が必要になるなど、技術的ハードルは高いものの、FHE の特性を十分に発揮できる有望用途として利用拡大が期待される。

(4) 次世代モビリティシステム

次世代モビリティシステムとしては、車体構造一体型の導線印刷が挙げられる。自動車を筆頭とするモビリティは、近年ますます電装化が進んでいる。現在は、電源供給、情報通信の伝送路としてハーネスが用いられているが、

銅線を用いるハーネスの重量が軽量化の問題となっているほか、スペースが限られる車体構造内にハーネスを配設する設計は困難を極めつつある。山形大学の有機エレクトロニクス研究センターではセンター長の時任教授を中心に、複雑な形状をもつ構造体に対して導線を印刷する FHE 技術を開発しており、今後印刷する回路に大電流を流せる研究を進めるという。既存のフレキシブル回路では微弱電流を流せるのみであるため車載向けでは利用できないが、同技術が実現すれば、自動車の電装化、軽量化への貢献に加え、自動車製造をより簡易にするプロセス改善も見込めることから、有望な用途と考えられる。

3. 今後の展望

上述したとおり、FHE は実用化を強く意識した技術概念であり、2017 年には多くの製品群が市場に投入されるものと考えられる。FHE 普及へのカギは、既存技術との組み合わせにより市場に受け入れられる製品・システムやサービスをいかにして構築・提供できるかにある。

一方、FHE は、多岐にわたる用途に応じた規制・法制度（電波法、個人情報保護法、医薬品医療機器等法）に則した製品開発が必要になる。欧米での RFID 普及では、乳牛管理に RFID 利用を義務化したことが奏功したように、FHE でも規制・法制度の改革・緩和が一つの後押しになると考えられる。

FHE の将来市場展望では、規制緩和などの国や行政の政策を横目に、取組企業による多種多様な製品・サービスの開発に注視したい。

IV. New Space（次世代宇宙ビジネス）

1. New Space とは

New Space とは、新たな宇宙空間利用技術を用いた次世代の宇宙ビジネスである。新興企業や技術、その活動を支えるエコシステム等の新産業を表す包括的な概念でもある。一方、既存大手宇宙企業による従来の宇宙産業は、「Old Space」と呼ばれる。

New Space 勃興の背景には、① IT 事業等で成功した企業家等の宇宙ビジネスへの参加、②米国の宇宙産業振興施策、③安価な超小型衛星の登場、がある。このほか、ベンチャーキャピタル（VC）の資金や、民間が宇宙活動を行う上でのルールを定めた法制の存在が

ある。もちろん、Old Space が培ってきた技術、打ち上げ設備等のインフラや人材等が、勃興の土台になっている。①には、米 SpaceX のイーロン・マスク氏のほか、米 Amazon 創業者のジェフ・ベゾス氏（打ち上げサービス米 Blue Origin を創業）、英 Virgin グループのリチャード・ブランソン氏（打ち上げサービス米 Virgin Galactic を創業）らがいる。個人資産の投入といった、事業への積極果敢なリスクテイクに特徴がある。②の施策は、打ち上げサービスでの民間技術開発を大きくけん引した。例の一つに、国際宇宙ステーション（ISS）への貨物・人員輸送機の開発や、実際の輸送での民間活用がある。米 SpaceX は、

米航空宇宙局（NASA）から、貨物輸送機の開発契約を約4億ドルで、貨物輸送の実施契約（12回打ち上げ）を約16億ドルでそれぞれ受注し、市場において、強い存在感を獲得するに至った。このほか、NASAは、さまざまな打ち上げサービスを民間から調達している。一方、③は、衛星を使ったサービスへの新規参入を促した。超小型衛星（本稿では概ね重さ150kg以下の衛星を指す）では、性能が向上した民生部品の活用や、衛星寿命を数年とすることで、過剰仕様を避けた低廉なモノづくりや、技術開発と実証（または市場投入）を短期間で繰り返す早い開発等、がポイントとなる。重さ数トンの大型衛星が、数百億円の費用で長い開発期間を要するのに対し、超小型衛星では、数千万～数億円で短期間での開発が可能となった。以下、New Spaceの有望分野の動向を、(1)打ち上げサービス、(2)衛星サービス、(3)宇宙空間上（微小重力環境下）でのサービス、の視点で解説する。

2. New Spaceの有望分野

(1) 打ち上げサービス

打ち上げサービスの有望分野は、①再使用型ロケットを用いた低コストな大型衛星打ち上げサービス、②小型ロケットを用いた超小型衛星特化型打ち上げサービス、③宇宙旅行とも呼ばれる概ね100kmの高度（サブオー

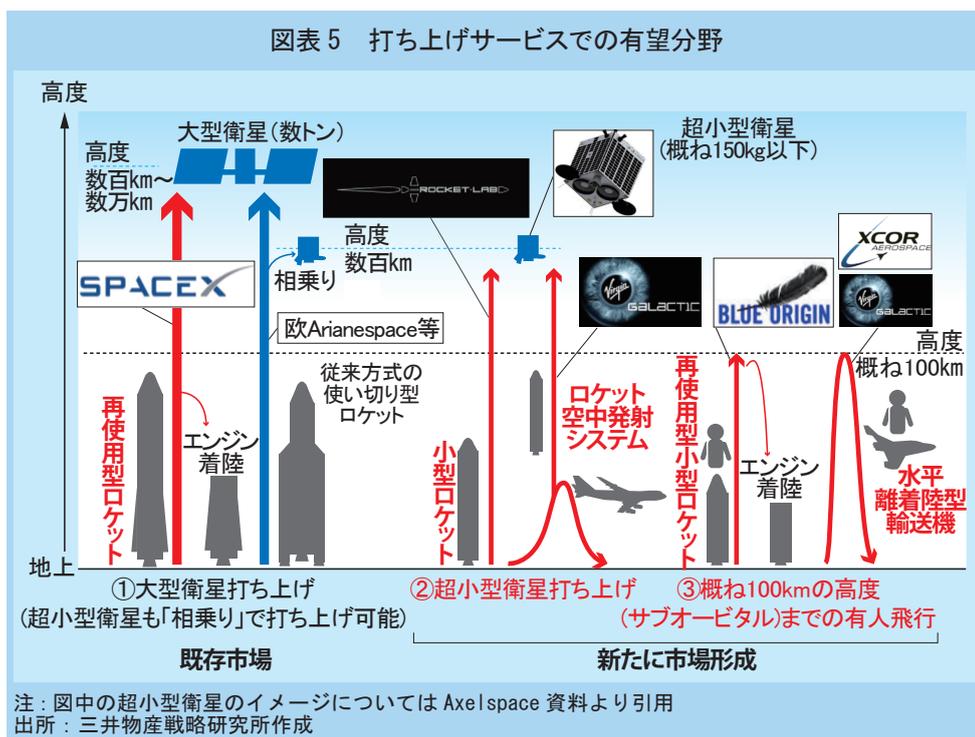
ビタル）までの有人飛行サービス、である（図表5）。①で先行するのが、SpaceXである。2段のエンジンを持つ同社の「Falcon 9」ロケットの1段目を垂直着陸させ、再使用する技術を開発中である。2016年4月には、飛行経路下の洋上に浮かぶ無人船への着陸を成功させている。今後、機体再使用の信頼性が実証されれば、同社の打ち上げサービス費用は約30%削減の見込みで、従来方式の「使い切り」型ロケットを使用する他社に比べ、さらに低価格でのサービス提供が可能になる。②のニーズの背景には、超小型衛星を使ったサービスへの新規参入が増加する一方で、その打ち上げは、他の衛星と相乗りとなり、時期が限定されるなどの課題がある。米Rocket Labは、超小型衛星特化型の「Electron」小型ロケットを開発中である。機体は炭素繊維複合材料製で、エンジン主要部品は3Dプリンターで製造するなど、革新的な作りとなっている。商業化に近い段階にあり、2017年に試験打ち上げ開始予定である。一方、本分野には、航空機からロケットを空中で発射する方式もある。気象が安定している高度にロケットを運ぶことで、悪天候でも打ち上げが可能になる利点がある。Virgin Galacticの「LauncherOne」ロケット空中発射システムは、Boeing747-400型機を改造した輸送機と小型ロケットから構成され、2017年に試験打ち上げ開始予定である。③は、

Blue Originが先行している。同社の「New Shepard」小型ロケットは6人が搭乗可能で、エンジンは再使用型であり、2016年10月には、5回目となる着陸に成功している。2017年に有人飛行の実証試験を行い、2018年にはサービス開始予定である。本分野では、Virgin Galacticや米XCOR Aerospaceが、地上から水平離着陸できる輸送機を開発中である。

(2) 衛星サービス

衛星サービスの有望分野は、超小型衛星を用いた、①高い観測頻度の地球観測サービスと②高速通信サービス、である。衛星は、高度が低いほど、高精度

図表5 打ち上げサービスでの有望分野



な画像が撮影でき、かつ、通信電波の遅れが緩和されるなどの利点がある一方、衛星1基のカバー範囲が狭くなる欠点がある。過剰な仕様を避けた安価な超小型衛星は、多数配備できるため、低高度の利点を活かしつつ、広範囲なサービス提供を可能とした。①では、米 Planet や米 Google 傘下の Terra Bella、日 Axelspace 等が独自の超小型観測衛星を用いてサービスを行っている。地球観測は、地表情報を広域かつ同時に取得でき、安全保障や農業等の分野で利用されている。既存大手企業の大型観測衛星は、高コスト故に配備数が少なく、同じ場所の観測は1日～数日間隔となっている。新興企業は多数の衛星を使い、高い観測頻度で差別化を図る。Axelspace は、2017年に3基を打ち上げ、2022年までに50基配備し、地球上の全陸地半分を1日1回は観測できるシステムを構築する計画である。本分野では、飛躍的な進歩を遂げた人工知能の深層学習機能を活用した高精度な画像認識により、膨大な地球観測データから、人工建造物の識別等、意味のある情報を抽出し、経済分析等を行うサービスも広がりを見せている。②では、米 OneWeb が超小型通信衛星を開発中である。衛星通信は、有線通信回線の整備が不十分なエリアに対し、広範に通信環境を提供できる。同社は、約1,200kmの高度に648基を配備し、地球全体を対象に通信サービスを行う計画である。短い通信遅延時間と速い通信速度で既存大手企業との差別化を図る。2016年12月には、SoftBank 等が同社に12億ドルを出資している。衛星製造については、大手の欧 Airbus Defence and Space と協業し、打ち上げについては、大手の欧 Arianespace や Virgin Galactic が行う。最初の10基を2018年に打ち上げ、2019年にサービス開始予定である。本分野では、SpaceX が約1,100kmの高度に約4,000基の衛星配備を計画しており、2016年11月には、米連邦通信委員会に計画承認を求める申請を行っている。

(3) 宇宙空間上でのサービス

宇宙空間上でのサービスとして、①利用空間の提供、②宇宙ゴミの撤去といったモノの移動、③宇宙空間での部品製造、の実現が視野に入ってきた。①では、スイス SpacePharma は、創薬分野等の基礎実験で使用される、微小重力環境下の実験空間を提供する。超小型衛星に搭載された同社の小型実験装置内で、顧客の試料に対し、遠隔操作で一定の実験を行う。2017年にサービス開

始予定である。米 Bigelow Aerospace は、人間が居住可能な空間を提供する。風船状の膨張式設備は ISS で実証実験が行われており、2020年にサービス開始を計画している。②では、シンガポール Astroscale が、宇宙ゴミ(デブリ)の撤去サービスを行う。デブリは、廃棄衛星やそれらの破片等で、4インチ(約10cm)以上のものだけで約22,000個あり、秒速約7kmで高速移動している。小さなものでも衝突すれば、衛星を壊滅的に損傷させるため、持続的な宇宙利用における脅威となっている。同社の方式は、独自衛星でデブリに取り付き、大気圏で焼却する。想定顧客は、大量の超小型衛星を連携運用する衛星事業者や、NASA といった宇宙機関で、2018年に撤去の実証が予定されている。大手の米 Orbital ATK は、推進力を失った老朽化衛星に独自衛星で取り付き、位置を修正することで、衛星運用の寿命延長を行う。2019年のサービス開始を計画している。③の米 Made In Space は、ISS 内での3Dプリンターによる部品製造で実績を持ち、将来的には、宇宙空間での大型構造物の製造を行う予定である。

3. 今後の展望

New Space の出現により、宇宙産業は変化しつつある。宇宙空間利用の上流である打ち上げサービスでは、競争による低価格化が進み、超小型衛星特化型ロケット等は、新市場を形成するだろう。下流である衛星サービスでは、今後5年間で2,000基近くの超小型衛星が配備されるとの予測もある。2006年から10年間で配備された地球観測衛星が約170基であること考えれば、そのインパクトは大きい。超小型衛星が生み出す通信利用市場は、2027年には約300億ドルに達するといわれる(Frost & Sullivan, 2016)。宇宙空間でのサービスは、新たな商業宇宙利用の始まりであり、次世代の宇宙開発のインフラ技術ともなる。今後、米国を中心に、起業家、VC、公的宇宙機関等が、新たなエコシステムを形成し、新ビジネスが創出される見込みである。従来の宇宙ビジネスの概念に捉われず、宇宙産業を見据える必要がある。

戦略研レポート

2017年1月31日号

(株) 三井物産戦略研究所

〒100-8631 東京都千代田区丸の内一丁目1番3号

URL: <http://mitsui.mgssi.com>

連絡先 TEL: 03-3285-6290 FAX: 03-3285-7658

- 本誌記事の無断転載を禁じます。
- 本誌掲載のレポートは作成者個人の見解であり、三井物産(株)及び(株)三井物産戦略研究所の見解を示すものではありません。
- 本誌に関するお問い合わせは左記連絡先へお願いします。