

戦略研レポート

2016.2.15

2016年に注目すべき 4つの技術

CONTENTS

はじめに

I. ゲノム編集

II. マイクロバイオーーム

III. スマートマテリアルとメタマテリアル

IV. ブロックチェーン

2016年に注目すべき 4つの技術

はじめに

本稿では、三井物産戦略研究所が2016年に注目すべき技術と位置付ける、「ゲノム編集」、「マイクロバイオーーム」、「スマートマテリアルとメタマテリアル」、「ブロックチェーン」の4つを採り上げた。

いずれの技術も、近年のデータサイエンスやデータベース技術の進化が大きく関与している。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。

ゲノム編集

「ゲノム編集」は、遺伝子を自在に切り貼りすることのできる技術である。特殊な酵素を用いることで、交配や遺伝子組み換え技術などの従来型手法と比べ、より安価、高効率かつ短時間でターゲットの遺伝子を改変することが可能となった。農業分野では、新たな特性を持つ農作物を短期間で育種することができるため、特に2015年になって、大手種子会社は新興ベンチャー企業が開発したゲノム編集技術を活用し始めている。医療分野では、患者ごとに最適な治療を行う「個別化医療」実現に向けた動きが活発化しており、特にがん治療では、ゲノム編集技術を活用して、より効果の高いがん免疫療法の開発に期待が寄せられている。2015年12月、米科学雑誌サイエンスは、米Feng Zhang教授らが開発したゲノム編集技術(CRISPR/Cas9)を“Breakthrough of the Year 2015”として選んだ。

マイクロバイオーーム

人間の健康や美容に大きな効果をもたらすとして、2015年あたりから、「腸内フローラ」という言葉が、しばしばメディアなどで登場している。腸内フローラの学術名は、腸内細菌叢(ちょうないさいきんそう)といい、腸の中に棲む善玉菌や悪玉菌などの細菌(合計数百兆個ともいわれている)の生態系のことを指す。細菌は、腸内だけでなく、皮膚、鼻、口、食道、胃など、人間の身体のあるゆるところに棲みついており、それらを総称して、マイクロバイオーームと呼ぶ。マイクロバイオーームの学術研究はかなり以前から行われているが、近年急速に進展した遺伝子解析技術

(次世代シーケンサー)により、マイクロバイオーームの遺伝子解析が短時間かつ安価に可能となった。2016年は、マイクロバイオーームを活用した医薬品や機能性食品、サプリメントなどの商品開発が大きく進展する兆しがある。

スマートマテリアルとメタマテリアル

今、マテリアル分野で注目されている先端材料・技術として、「スマートマテリアル」と「メタマテリアル」がある。次世代社会の構築を支えるIoT、ロボット、自動運転などの各種先進技術を具現化するためには高機能・多機能の材料が必要であり、それらの多様な新材料の総称がスマートマテリアルである。具体的には、圧電や光電材料、自己修復材料などがある。一方、自然界の物質にはない機能を付与させた人工の物質をメタマテリアルという。最も有名な応用の一例として、軍用の「透明化(ステルス化)技術」がある。いずれのマテリアルも、現在、目覚ましく進化している人工知能やビッグデータ・シミュレーション解析技術などのマテリアルズ・インフォマティクスの活用が、実用化を大きく加速することが期待される。

ブロックチェーン

2015年から、金融とIT(情報技術)を融合したフィンテックが注目を集めている。そのなかで、仮想通貨の取引・管理に使う技術として開発された「ブロックチェーン」と呼ばれるデータベース技術が、「クラウド」に続く革新的な情報通信技術として、最近急速にクローズアップされている。ブロックチェーンの活用により、金融取引の記録・管理などのコストを劇的に下げられるほか、金融以外の不動産取引や行政サービスなどの分野での活用展開が期待され、異業種企業のコンソーシアムによるさまざまな実証実験も始まっている。直近では、2015年12月30日、米ナスダックがブロックチェーンを使ったデータベースを未公開株市場の取引決済に導入した。2016年は、大手金融機関から異業種企業、ITベンチャーなど、世界中の多くのプレイヤーが多様な新規サービスビジネスを創出することが予想される。

I. ゲノム編集

ゲノム（DNA の遺伝情報）に関わる技術の進歩は著しく、生き物の遺伝情報を解析することはもちろんのこと、得られた遺伝情報をもとに遺伝子を自由に編集できるようになりつつある。ゲノム編集技術は、農業・医療分野のゲームチェンジャーとして大きな期待が寄せられているなかで、実用化が迫りつつあるため、2016 年注目の技術といえる。2015 年 12 月 17 日、米科学雑誌サイエンスが発表した“Breakthrough of the Year 2015”に選ばれ、わずか 3 年前に開発されたゲノム編集技術の一つ「CRISPR/Cas9」は、安価・簡便・高効率に遺伝子を改変することができる。「CRISPR/Cas9」は、トムソン・ロイターがノーベル賞候補として予想するなど、多数のメディアからも注目を浴びており、世界各国で応用研究や規制に関する議論が急速に進んでいる。

1. ゲノム編集とは

従来の遺伝子組み換え技術は、標的とする遺伝子を改変するのに効率が悪く、開発に多くの時間・費用を要してきた。ゲノム編集技術では、標的とする特定の遺伝子を高精度で切断ことができ、効率的・効果的な遺伝子改変が可能となった。図表 1 に示すように、ゲノム編集の仕組みは、特定の遺伝子を切断するハサミの機能を持つ「人工制限酵素」を用いて遺伝子を切断する。切断された遺伝子は、欠損や改変が起きる。これにより、標的の遺伝子に目的の特性を付与するの

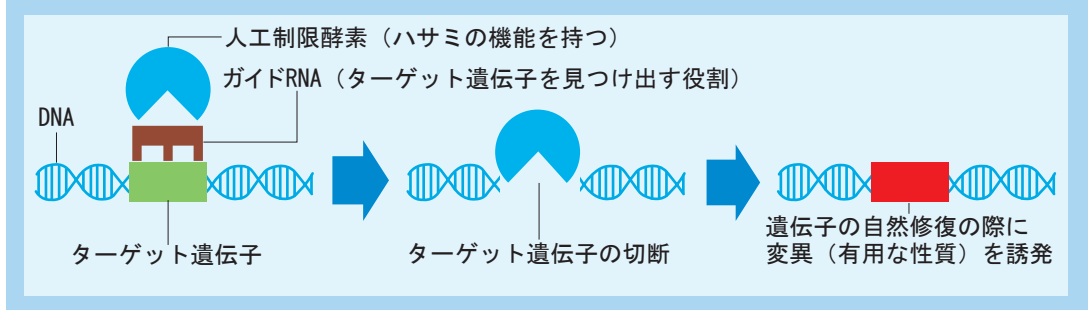
である。ゲノム編集の研究は、1990 年代から始まっており、1996 年に ZFN、2010 年に TALEN と呼ばれる技術が登場している。ZFN や TALEN は、人工制限酵素のガイド役をタンパク質が担っているため、狙い通りのタンパク質を作成するのに時間がかかりコストが高くなる。一方、2013 年に登場した CRISPR/Cas9 は、ガイド役である RNA を安価・簡便に作成できるため、本技術の普及が急速に進んでいる（図表 2）。現在、世界各国でさらに高効率な改良型 CRISPR/Cas9 の開発も進んでおり、ゲノム編集は進化を続けている。

2. ゲノム編集が活用される有望分野

(1) 農業分野

作物には、単収増加、農薬耐性、乾燥耐性などの特性が求められており、育種が不可欠となっている。交配や遺伝子組み換えなどの従来の育種では、目的の作物ができるまでに長期間を要し、開発コストが高くなる。英アグリバイオ分野調査会社の Phillips McDougall によると、従来の遺伝子組み換えの場合、平均で開発期間 13.1 年と開発コスト 1.36 億ドルが必要とされるという。ゲノム編集により、標的の遺伝子を効率的に改変でき、また、こ

図表 1 ゲノム編集技術「CRISPR/Cas9」の仕組み（イメージ図）



図表 2 ゲノム編集の種類と特徴

	ZFN (Zinc Finger Nuclease)	TALEN (Transcription Activator-Like Effector Nuclease)	CRISPR/Cas9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat/CRISPR Associated Protein 9)
開発年	1996 年～	2010 年～	2013 年～
技術的特徴	DNA 結合タンパク質 (Zinc Fingerモチーフ) と人工制限酵素の融合	DNA 結合タンパク質 (TAL Effector) と人工制限酵素の融合	DNA を認識する RNA 分子と人工制限酵素の融合
主な開発機関	・ Zinc Finger Consortium (米)	・ ミネソタ大学 ・ Thermo Fisher Scientific 社	・ Broad Institute of MIT and Harvard ・ カリフォルニア大学バークレー校
コスト	高	中	低
時間	ベクター構築に多大な時間	ベクター構築に多大な時間	短
調整難易度	高	高	低

出所：国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター「調査報告書 ゲノム編集技術」（2015 年 3 月）を参考に作成

れまで困難であった複数の特性を効率的に付加できるため、開発期間と費用を大きく削減できることが期待されている。

Monsanto、Dow AgroSciencesなどの種苗大手は、新興企業の Calyxt、Precision BioSciences、Sangamo BioSciences（いずれも米国）といった人工制限酵素の開発企業の技術ツールとして、自ら有する作物の遺伝情報を活かした育種を行っている。ゲノム編集で成功するには、人工制限酵素などの要素技術に加えて、「どの遺伝子をどのように改変すれば、目的の特性が得られるか」といった作物の遺伝情報をどれだけ有しているかが鍵となる。DuPont Pioneer は人工制限酵素の開発を自身で行うとともに 2015 年に米国 Caribou Biosciences 等人工制限酵素の開発を行う企業や大学と提携するなど活発な動きを見せている。一部専門家は、これらの開発のいくつかは商業栽培に向け順調に進んでいると言っており、2016 年にもゲノム編集によって作られた作物の商業化の動きが予想される。

(2) 医療分野

医療分野では、創薬向け細胞・動物モデルの作成、革新的治療法の開発、の 2 分野においてゲノム編集技術の利活用に注目が集まっている。創薬向け細胞・動物モデルの作成では、創薬ターゲットとなる病気の症状を持つマウス（遺伝子改変マウス）や、iPS 細胞を用いて病気のヒト遺伝子を再現する細胞（疾患特異的ヒト iPS 細胞）を作成することが容易となった。遺伝子改変マウスを例にとると、従来法では約 1～2 年、300 万～500 万円を要していたのに対し、CRISPR/Cas9 技術の導入によりわずか 1～2 カ月、30 万～50 万円と短期間・安価に作成することが可能となり、創薬開発の迅速化が期待される。一方、革新的治療法の開発に関しては、希少疾患、がん、遺伝性疾患、再生医療を対象とした研究が進んでいる。米国 Sangamo BioSciences は、ゲノム編集を施した遺伝子治療による HIV/AIDS の臨床研究を、米国 Editas Medicine（CRISPR/Cas9 の開発者の一人である Feng Zhang 教授が共同創設者）や米国 Intellia Therapeutics は、がん免疫療法の開発を進めている。また、製薬大手のスイス Novartis、英 AstraZeneca、英 GlaxoSmith Kline、独 Bayer は、ゲノム編集技術関連の研究所やベンチャー企業との共同研究を次々と開始しており、ゲノム編集の臨床応用が加速することが期待される。日本では、東京大学の濡木理教授が Feng Zhang 教授と共同研究

を行い、大型放射光施設（SPring-8）を用いた CRISPR/Cas9 の立体構造の解析を通じて、次世代型のゲノム編集技術の開発や遺伝子治療への応用を目指している（濡木教授はベンチャー設立を検討中）。

3. 規制の動向

このように急速に実用化に向けた技術開発が進む一方で、規制に関する議論も活発になってきており、その動向が注視されている。

(1) 農業分野

農林水産省の「新たな育種技術研究会」報告書（2015 年）において、ゲノム編集を含む新たな育種技術によって作られたものは、“慣行の交雑育種法及び突然変異育種法によっても同等のものが作出され得る”とある。このように、日本ではゲノム編集によって得られた農作物に対して遺伝子組み換え規制を適用すべきかについて疑問が生じており、規制上の取り扱いについて、科学的な見解に基づき、今後幅広い関係者と議論を深めていくとしている。

欧州では、2007 年から既に同様の議論が開始されているものの、ガイドラインの発行に至っておらず、2016 年には発行されるといわれているが、その方向性は未だ不透明である。一方米国では、規制当局（USDA、EPA、FDA）が、ゲノム編集については案件ごとに判断を行う方針であり、現段階では従来の遺伝子組み換えの規制と大きな差異はない。しかし、2015 年 7 月に大統領府よりバイオテクノロジー規制の見直しに向けた方針表明である“Modernizing the Regulatory System for Biotechnology Products”が発行され、今後当局がゲノム編集の規制に対して新たにどのような見解を示すかに注目が集まる。欧米での動向は、日本の方針にも影響を与える可能性があるため、日本、欧州、米国の規制動向は包括的に注視する必要がある。

(2) 医療分野

2015 年 4 月、中国の研究チームがヒトの受精卵で遺伝子の改変を行ったと報告したことをきっかけに、ヒトの生殖細胞にゲノム編集技術を応用することに対する社会的・倫理的な問題が指摘された。2015 年 12 月 1-3 日、米国ワシントン D.C. で急遽開催された“International Summit on Human Gene Editing”は、米科学アカデミー、英王立協会、中国科学院が共同開催し、ゲノム編集の

技術・医療応用・規制・倫理などを議論し、最終日に声明を発表した。声明文では、生殖細胞（受精卵、卵子、精子など）に対する基礎研究は可能だが、それを受胎に用いてはならないことを明記している。また、ゲノム編集を活用した遺伝子治療など、後代に影響を及ぼさない場合は、既存もしくは新たな規制の下で研究を推進できるとしている。ゲノム編集技術の有効活用により、希少疾患、がん、遺伝性疾患など、今まで治る見込みのなかった病気に対して新たな治療法が提供されることが期待されるため、2016年11月を目途に上記サミットのワーキンググループが策定する予定の国際ガイドラインの行方に注目が集まっている。

4. 今後の展望

CRISPR/Cas9をはじめとしたゲノム編集技術の登場により、遺伝情報を持つあらゆる生き物の「ゲノムを編集する」ことが夢ではなくなっている。今後、農業分野においては商品化へ向けた具体的な動きが活発化し、医療分野では新たな治療法開発のための臨床試験が増加すると考

えられる。2016年は、実用化に備えたベンチャー設立や企業買収等が活発になると予想される一方で、農業分野では欧州が先行してガイドライン制定を予定、また、医療分野では国際ガイドライン制定が予定されており、規制動向の行方を見守りたい。

最後に、ゲノム編集と補完関係にあることから考えなければならないものに、バイオインフォマティクスがある。これは、生物に関する膨大なデータを情報科学の手法で解析する技術である。生物に関するデータとして、遺伝情報以外に、代謝経路に関する情報、タンパク質の構造と機能に関する情報、環境などの外部因子が表現型（生物に実際に現れる特性）に及ぼす影響についての情報など多岐に及ぶ。「ゲノムを解析する技術」の進歩により、これらの情報が蓄積され、生物内で起こっている事象が徐々に明らかになってきている。これらの事象を理解した上で、ゲノム編集を活用することにより、農業・医療分野のほかにも、水産業、畜産業、林業、バイオケミカル、バイオ由来エネルギーなどの分野にもイノベーションが起きる可能性がある。

II. マイクロバイオーム

ヒトに棲む細菌、マイクروバイオーム、が果たす役割についての科学的解明が始まった。病気への関与など、次々と明らかになるその機能は、医療、健康から美容に至るまで、新たな産業を創出すると期待され、米国をはじめ世界中で研究、投資が加速している。

2016年は、マイクروバイオームの解明が、アカデミズムからビジネスへと移行する兆しの鮮明になる年と考えられる。

1. マイクロバイオームとは

(1) ヒトと細菌は相利共生

ヒトは母親の胎内にいるとき無菌の状態にある¹が、出産時に産道を通る時から細菌との接触が始まり、瞬く間にさまざまな細菌が定着していく。皮膚、鼻、口、食道、胃、腸内、生殖器など、細菌はヒトの身体のあらゆるところに棲みついでおり、それらを総称してマイクروバイオーム (microbiome: 別名マイクrobiオーム、細菌叢) と呼ぶ。

総数にして600兆～1000兆個いると推定されるが、中でも最も数が多く、研究が進んでいるのが腸内細菌であることから、腸内細菌を示す「腸内フローラ」という言葉がマイクrobiオームの同義語として使われることも多い。腸内細菌は大きく善玉菌、悪玉菌、日和見菌に分けられ、既になじみのある言葉となっているが、こうした多種多様な細菌はヒトをすみかとする一方で、ヒトにはできない食物消化やビタミン合成のほか免疫作用などさまざまな機能を提供してくれる、不可欠なパートナーであることが分かり始めている。

(2) 腸の中はフロンティア

細菌の研究は17世紀に始まり、19世紀後半のコッホやパスツールらの細菌学を経て発展してきたが、腸に棲む細菌については、そのほとんどが嫌気性で、大気中で長く生きられないため培養して実験することができず、研究が進まなかった。1950年代に日本の光岡博士²の研

1. 羊水や胎盤にも細菌が存在し、早産などに関与する可能性があるとの報告もある。
2. 光岡知足。微生物学者。善玉菌、悪玉菌という言葉の生みの親。

究により進展があったものの、それでも解析できない細菌が圧倒的に多く限界があったが、1980年代に入って“培養せずとも解析できる”道が拓けた。全ての細菌が持ち、かつ種ごとに異なる「16S rRNA 遺伝子」を利用する「16S 解析」や、腸内細菌の遺伝子を群れのまま解析する「メタゲノム解析」の導入により、菌種の特異性や遺伝子解析ができるようになったのだ。そして、それを加速したのが2005年頃に登場した次世代シーケンサー³で、遺伝子解析が短時間にかつ安価に行えるようになったことで、マイクロバイオーームが引き起こす未知の現象が明らかになるとして俄然注目が集まった。

まず、アカデミックな見地から、国レベルで、健康な人の腸内細菌解析が、次いで、疾病患者の解析が行われ、健康な人と差異があることが判明した。そして今、研究機関、製薬企業、食品企業、バイオベンチャー等によって、疾患と細菌の関係が詳細に研究され、産業応用に向かって動きが加速している。

(3) 明らかになるマイクロバイオーームの特徴

～大事なものは多様性とバランス

マイクロバイオーームには、構成する菌の種類やその比率に「個人差」があって人それぞれのパターンを示すこと、人それぞれであるにもかかわらず、マイクロバイオーーム全体で見た遺伝子組成はほぼ同じで、結果として誰でも同じような機能を提供してもらっていること、細菌は時にプレイヤーがかわりながら全体の機能を保持していること、そして、ヒトの健康にはマイクロバイオーームの多様性と良好なバランスが大切で、それが崩れて「失調 (dysbiosis)」すると病気を引き起こしやすくなること、などの特徴がある。最新の研究は、炎症性の腸疾患、リウマチ、アレルギー、喘息、肥満、糖尿病等のほか、うつや自閉症、人格などへの関係も示唆しており、新たな知見は医学、バイオテクノロジーを大きく変える可能性があると考えられている。

2. マイクロバイオーームが活用される有望分野

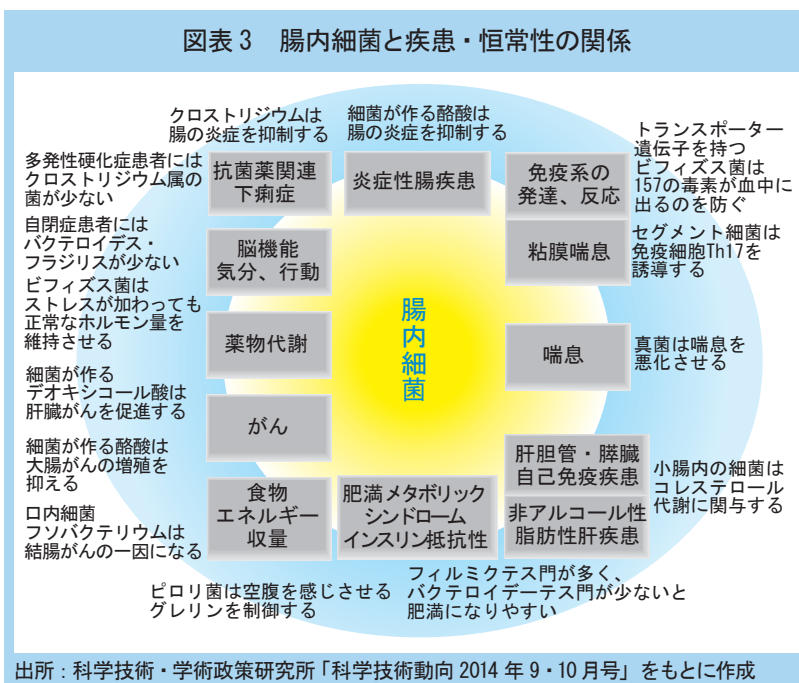
(1) 医療・医薬品分野

疾患との関係を示唆する報告(図表3)が増えるにつれ、マイクロバイオーームを利用した診断方法や治療薬の開発に期待が高まっている。外から与えられた菌は定着しづらく、現時点で臨床研究されているのは、潰瘍性大腸炎等の腸疾患の患者に健康人のふん便を「移植」する方法で、その効果の高さから日本でも慶応病院や順天堂病院で実施されているが、今後の方向性は、菌や菌の代謝物を利用した医薬品開発にある。

また脳との関係も分かりつつある。神経系やホルモンなどを介して腸と脳は双方向のやり取りを行っている(脳腸相関: brain-gut axis)と考えられ、腸内細菌の改善がうつや自閉症の症状を緩和する、ビフィズス菌によりストレスに強くなる、などの報告がなされている。

こうした最新の知見を踏まえ、腸内細菌の解析や治療薬開発を行うベンチャーが、特に米国を中心に多数立ち上がっており(図表4)、Pfizer、Novartis、Johnson & Johnsonなどの製薬会社も、VedantaやSecond Genome等のベンチャーとの提携も含め、開発を強化している。開発対象は、腸疾患のほか、腸から離れた部位の疾患へも広がりがつあり、例えばアトピー性皮膚炎では、ステロイド剤に頼る現在の治療法を変えるのではないかと期待

図表3 腸内細菌と疾患・恒常性の関係



3. 高速で遺伝子配列を読み取る機器。

図表 4 マイクロバイオームを利用した医薬品・サービスの取組事例

開発企業	取組事例
Seres Health (米)	・腸疾患を治療する生菌経口製剤 ・Mayo Clinicと提携
Rebiotix (米)	・腸疾患を治療する生菌 (5種の混合) 製剤
Vedanta (米)	・腸疾患を治療する生菌 (17種の混合) 製剤 → Johnson & Johnson に2.4億ドルで譲渡
Second Genome (米)	・ヒト/細菌間相互作用に働く低分子物質 ・Pfizerと肥満、メタボ領域で提携 ・Johnson & Johnsonと腸疾患で提携
uBiome (米)	・細菌叢の解析サービス
OptiBiotix Health (英)	・細菌に働いてコレステロールを調節する化合物
Enterome (仏)	・細菌叢のメタゲノム解析サービス ・Gustave Roussyがんセンターと提携
MicroBiome Therapeutics (米)	・糖尿病薬の副作用を軽減する組み合わせ薬 ・糖尿病および肥満の治療薬 ・腸内細菌の多様性を向上させる低分子薬
メタジェン (日)	・16S rRNA 遺伝子解析の受託 ・腸内細菌の改善につき森下仁丹と共同研究
サイキンソー (日)	・細菌叢の解析サービス

されている。

そうしたなかにあって日本の立ち上がりは遅い。マイクロバイオーム利用の医薬品開発はほとんど行われておらず、日本の研究者によって発見された腸疾患に有効な細菌も、米国ベンチャーで開発され、その後、米国製薬企業へライセンスされる経緯をたどっている。2016年1月には武田薬品工業が仏 Enterome Bioscience 社との共同研究開発契約締結を発表したが、日本の本分野での出遅れは、依然、懸念されている。

(2) 食品分野～プロバイオティクス・プレバイオティクス

ヒトに有益な細菌を含む食品はプロバイオティクスと呼ばれる。昔からヨーグルトや納豆などは健康に良いとされてきたが、それらの効果やメカニズムが科学的に証明されるようになったわけで、例えば納豆菌は善玉菌である腸内乳酸菌を増やす働きがあることが分かっている。プロバイオティクス摂取にあたっては、細菌の中にもさまざまなタイプがあり、効果を示す「菌株」を選択すること、多くの細菌は胃酸などにさらされると生き延びられず、腸まで進むことができないこと、腸に到達しても定着しにくいこと、また菌によっては死菌でも効果を持つものがあること等を理解し、継続的に摂取する必要がある。

健康意識の高まりで、世界のプロバイオティクス市場は現在の330億ドルから2020年に460億ドルに拡大すると予測される⁴。食品メーカーもマイクロバイオーム機能の解明に積極的で、例えば、乳酸菌には便秘予防、インフルエンザや大腸がんの予防、コレステロール低下作用などがあるとして研究が進められている。

このほか、ペットや家畜など動物向けのプロバイオティクス開発や、マイクロバイオーム知見を利用したスキンケア商品の開発、また、有益な細菌のエサとなってその増殖を促進する、食物繊維やオリゴ糖などのプレバイオティクスの研究など、マイクロバイオームに関わる商品開発は多岐にわたり、ますます拡がりを見せている。

3. 今後の展望

加速しているとはいえ、研究はまだ始まったばかりで、解明されたのはほんの一部にすぎず、腸内細菌もいまだその半分しか研究されていない。疾患との関係も単純なものでなく、複数の細菌が関与する複雑なメカニズムである場合も想定され、細菌とヒトとの関係の全容が明らかになるにはまだ相当の時間がかかるだろう。今後、産業として普及するには、遺伝子解析コストが今よりもさらに安くなることや、治療や医薬品における細菌利用のルールが定められることなど、さまざまな条件も必要だ。しかし、診断や治療への細菌利用となれば、これまでワクチン程度しかなかった医療分野に新しい手法が加わることになり、従来にない治療法となるのは確実だ。医薬品として製品化されたものはまだないが、遠いこととは思われず、研究の進展による新たな治療ターゲットの発見も期待される。予防観点でのマイクロバイオーム利用の食事療法やサプリメントによるセルフメディケーションと合わせて、医療・健康維持に貢献する新たな産業領域となるだろう。特に2016年は、米国ベンチャーが開発中の腸疾患向け医薬品等の phase 2⁵の結果が出る予定で、研究レベルからビジネスレベルへの移行の兆しが鮮明になる年と思われる。

また、グローバルな研究や報告は、抗生物質が与えるマイクロバイオームへの影響という、より大きな問題を提起している。歴史的に、衛生の向上は感染症を減らす効果を上げてきたが、一方でアレルギーや肥満などが増えており、マイクロバイオーム研究は、菌を排除することを是とする現代社会の在り方に一石を投じるものとなるかもしれない。

ヒトが持つ遺伝子は2万3千個程度だが、マイクロバイオームの遺伝子は数十万～百万個に上ると推定され、ヒトはその恩恵を受けて生きている。“ヒトは独りではなく、ヒトと微生物の「超有機体」”と認識される時代になっている。

4. SupplySide West 2015, Probiotics Workshop 講演より。

5. 医薬品開発において少数の患者に薬を投与し有効性を検討する段階。

Ⅲ. スマートマテリアルとメタマテリアル

IoT、ビッグデータ解析、ロボット、自動運転など、次世代を担う技術を実現するためには、これらを支える機器・部材に対してもさらなる高速化、高効率化、高容量化、小型化等多くの課題が要求されており、その解決には、機器・部材を構成する材料レベルでの技術革新が求められている。

今後のこれらの次世代技術の実現を支えるための新しい材料として、機器・部材を高機能・多機能化する「スマートマテリアル」と、自然界には存在していない構造や組成を人為的に作り出すことで新たな機能を持たせた材料である「メタマテリアル」が注目を集めており、近年研究開発が活性化している。

いずれも、昨今急激に進展している人工知能やマテリアルズ・インフォマティクスのような大規模シミュレーションなどのソフトウェアツールの活用が大きな鍵であり、2016年には次世代材料としての実用化の大きな進展が期待されている。

1. スマートマテリアルとは

スマートマテリアルとは、「外界からの温度、光、力、電場、磁場等の入力に反応し、特定の反応を返す材料」と定義される。具体的な材料とその応用例としては、圧力を電圧に変換する、あるいは電圧を動きに変換する圧電材料（チタン酸ジルコン酸鉛）を利用した駆動部品やセンサー、光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電材料（シリコン）を利用した太陽電池や、損傷箇所を紫外線のエネルギーを利用して修復してしまう自己修復材料（ポリウレタン塗料）を利用した自動車向け外板塗料等が挙げられる。既に多くの分野において利活用されているスマートマテリアルの世界市場規模（2014年）は4.5兆円（矢野経済研究所資料）に及んでいる。ところが、近年になりデータ科学を利用した材料開発の新しい手法であるマテリアルズ・インフォマティクスが進展し、材料開発技術が大きく変化したことで、これまでのスマートマテリアルでは成し得なかった物性や、機能の付与が可能になってきたため、2016年もこのような新しいスマートマテリアル、ならびにそれらを利用した製品の登場が予想される。

2. メタマテリアルとは

メタマテリアルの「メタ」とは「超、超越」という意味で、メタマテリアルとは自然界の物質にはない機能を付与させた物質と定義されている。物質がもともと持っている特性を拡張もしくは改善することで開発されてきたスマートマテリアルに対し、メタマテリアルは自然界では存在しない機能を理論的に構築して実現させるという点で、互いは明確に区別されている。今日開発されているもののほとんどは、金属を特殊な構造にすることで、電波、光を含むさまざまな電磁波を望む方向に屈折させる、あるいは、その大きさや速さを制御する機能を実現させるものである。特に、光をこれまでにない方向に屈折させること、また光のスピードを可変させられる材料は自然界に存在する物質ではなし得なかった機能である。

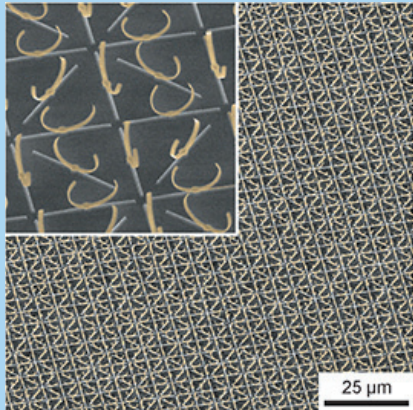
このような機能を実現するために、主に金、銀、銅などの金属をナノ・マイクロスケールに微細化した単位素子を規則的に配置させることで、電波や光等の電磁波が持つ固有の波長が通れない構造を作り上げる（図表5）。その結果、自然界の金属構造では、一定の方向にしか流れないはずの電磁波の流れを邪魔することで、結果的に本来ではあり得ない方向へと電磁波を曲げることが実現する。

3. スマートマテリアルの有望分野

スマートマテリアルの原理は以前から知られており製品としても実用化されているが、次世代技術を実現する上で必要不可欠な素材として近年ますます注目を集めている。特に、大容量高速メモリ（次世代不揮発性メモリ）、ロボット（センサー、アクチュエータ）、生体システム（感覚センサー）、センサーネットワーク（エネルギーハーベスティング）といった分野では新しいスマートマテリアルに対するニーズが高まっており、利用拡大が見込まれる。

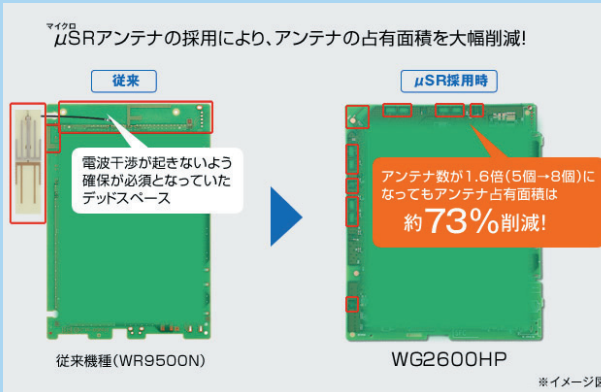
大容量高速メモリ分野では、現在主流のフラッシュメモリの短所（高速書き込みと電源オフ時の記録保持が両立しない）を補い、高速書き込みや大容量記憶を実現できる技術が求められている。韓 Samsung 社、米 Micron Technology 社が開発する相変化メモリは、このような次世代の不揮発性メモリ（電源 OFF 時でも記憶情報を保持）として注目されている。相変化メモリとは、温度によって相が変化する材料を利用して、結晶相を「1」、アモルファス相を「0」として情報を記録させるものである。材料とし

図表 5 電磁波が持つ波長を遮蔽する特殊な微細構造を作り上げた三次元メタマテリアル



出所：理化学研究所ホームページ

図表 6 NECが開発したメタマテリアルアンテナを利用したモジュール



出所：AtermStation (NECのWi-fiルータ・モバイルルータ製品情報サイト) ホームページ

図表 7 HyperStealth Biotechnology社が開発した透明化技術



出所：HyperStealth Biotechnology社ホームページ

ては、主にカルコゲナイド系合金のゲルマニウム・アンチモン・テルル (GeSbTe) が利用される。

ロボットや生体システム分野では、東大発ベンチャーのタッチエンス社が開発した触覚センサーが、重要な要素技術として注目されている。この触覚センサーは、スマートマテリアルの一つである圧電素子を利用して3軸方向での圧力計測を実現し、従来の一方向圧力のみを計測可能なセンサーと比較して、より高感度かつ小型化を実現している。今後、ヒトと協働するような産業ロボットやサービスロボットの手足への実装を見込み、現在製品化がなされている。

IoTを支えるセンサーネットワークの分野では、大量に使用されるセンサーモジュールの駆動電源として現在主流の電池に代わり、微細振動を電気に変換することで半永久的な電源供給を可能にするエネルギーハーベスティング技術（振動発電技術）が、重要な要素技術の一つとして注目されている。この技術ではオムロン社が出力エネルギー数百μワットを達成するなど技術的には突出している。鉄・ディスプレイウム・テルビウム合金を用いた磁歪材料と前述のチタン酸ジルコン酸鉛を用いた圧電材料等の新世代のスマートマテリアルを組み合わせることで開発された振動発電技術は、橋梁や高速道路等の振動が恒常的に発生する環境下で長期的にセンサーが使用されるようなインフラモニタリングを実現するために必要不可欠な技術の一つとして注目を集めている。

4. メタマテリアルの有望分野

金属を用いて特定の電磁波を制御できるメタマテリアルとして実用化されている製品はまだ数多くはないが、例としてモバイル機器向けのアンテナが挙げられる。モバイル機器上には、通信品質向上のために複数のアンテナを用いるMIMO技術 (multiple-input and multiple-output) が標準化しているなどの背景もあり、複数の特定周波数に対応したアンテナを配置するが、近接する個々のアンテナの電波同士が干渉し、アンテナ動作に対し影響することがある。これまでは、電波の干渉を防ぐためにア

ンテナ間隔を空けるなどの工夫が必要だった。新しくメタマテリアルを利用することで個々のアンテナは隣接していても特定の電波だけを感知増幅させることが可能になり、通信の高速化と機器の小型化、さらにはEV化に伴う通信機器の集積化が加速する自動車でも利用の拡大が見込まれている。実用化されているアンテナには、米RAYSPAN社による韓LG社のスマートフォン向けがあるほか、NECもμSRとの名称で商品化している (図表6)。なお、材料構成等の詳細情報は開示されていない。

上述した光を任意の方向に曲げる、光の速度を変換する機能を活用した最たるアプリケーションとしては、「メタマテリアル」という単語を一躍有名にした「透明化技術」が挙げられる。同技術は米DARPAや各国軍事機関等において主に軍服や航空機のステルス化を目的とする軍事産業向けとして研究が進んでいる。しかしながらその全容や進捗状況等は軍事機密となっているために公開されている情報が少ない。そのようななか、材料・構造等の詳細情報は非公開ではあるが、カナダHyperStealth Biotechnology社が開発する透明マントはモックアップ品ながら一定の成果を挙げている (図表7)。同社では米軍やカナダ軍への技術供与に向けた情報提供を実施し、その実現に向けて着実な進展を遂げているという。

また、メタマテリアルは現状では電磁波制御が中心ではあるが、MITでは音波を対象としたメタマテリアルの研究にも注力中である。電磁波からあらゆる波 (音、衝撃波) の制御に研究開発が進捗しつつあり、将来的には超音波診断機器、軽量防音材量、車両向け衝撃吸収材料などへの応用につながるものと考えられる。

5. 今後の展望

次世代技術を実現していく上で、材料にはまだ克服しなくてはならない課題と開発余地が多分にあり、スマートマテリアルやメタマテリアルにはその可能性と貢献が期待されている。

具体的な研究課題としては、スマートマテリアルでは外

界刺激に対する反応効率の向上を促す新規物質の模索が、メタマテリアルでは一定の方向からの電磁波への応答のみならず、さまざまな方向からの電磁波に対応できる単位素子の構造開発、および新規物質の模索が挙げられている。

これらの課題に対して、スマートマテリアルとしては豊田中央研究所がビッグデータシミュレーション解析技術を活用したマテリアルズ・インフォマティクスの手法によって17万種類以上の物質データから、これまでの太陽電池向け材料にて主流のシリコンを超える変換効率を備えた実用材料を2015年に見いだしている。また、メタマテリアルでは、理化学研究所、および国立台湾大学の国際共同研究グループが、ビッグデータシミュレーション解析技術を活用して、さまざまな方向からの電磁波に対応できる3次元メタマテリアルの開発に成功している（2014年）。そ

の他、米パデュー大学が、金、銀といった高価な材料ではなく、安価なAZO（アルミニウム添加酸化亜鉛）を利用できることを見いだすなど、実用化という観点での利用材料開発も進展させている。

スマートマテリアル、およびメタマテリアルが抱える課題を解決する基礎技術の進展と、マテリアルズ・インフォマティクスを活用した材料開発の進展により、2016年は研究から実用化に向けた移行がさらに加速するものと予想される。

また、実用されることで得られる課題等のさまざまな情報をマテリアルズ・インフォマティクスツールにフィードバックすることでさらなる材料開発の進展が促されるという好循環のマテリアル開発モデルが構築され、次世代材料を実現する技術手法として、その裾野を拓げていくことも期待されている。

IV. ブロックチェーン

2015年から、金融業界では決済を含む金融ビジネスのあり姿を変革する「フィンテック」に関する話題が急激に増えている。ブロックチェーンは、フィンテックの中核技術として、金融分野への活用にとどまらず、他産業分野への応用も可能な技術であり、2016年はさまざまな新規サービスビジネスが台頭してくることが予想される。

1. ブロックチェーンとは

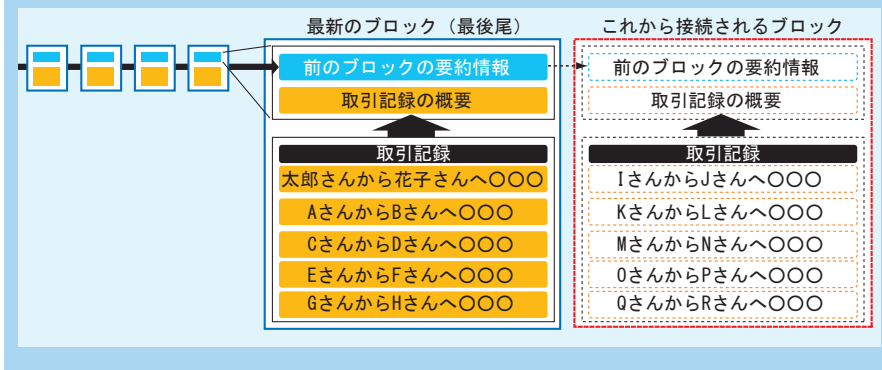
ブロックチェーンは、仮想通貨のビットコインで実用化された技術であり、開発者は特定されていない。仮想通貨とは、「国家の裏付けなしにネットワーク、一般的にはインターネットを通じて流通する決済手段」と定義される。ここでいう「流通する決済手段」とは、不特定者との決済が可能で、かつ受取人はこれを第三者に譲渡できることを意味している。紙幣やコインといったリアルマネーと違い、インターネットなどを介して取引が行われる仮想通貨はデジタルデータであるため、コピーが容易で、二重使用される可能性がある。このため、ネットワーク参加者の不法行為を本質的に排除する仕組みが必要であるが、これを実現しているのがブロックチェーンである。

ブロックチェーンを一言でいうと「仮想通貨の取引記録を保存するデータベース技術」である。取引記録とは、例えば「太郎さんから花子さんへ、幾らの仮想通貨が支払われた」という内容の記録である。これら取引記録は「ブロッ

ク」と呼ばれる複数の取引記録の集合にまとめて記録される。このブロックを時系列に鎖状（チェーン）につなげて記録することからブロックチェーンと呼ばれる（図表8）。ブロックには、一定時間ごとに、新たなブロックが追加され、ブロックチェーンの最新（最後尾）のブロックに接続される。新しいブロックには、取引記録とともに、今まで最新だったブロックの中味を要約したデータが含まれる。このようにブロックをチェーン状にしてつなげるメリットは、ブロックの中味を改ざんすると、直前のブロックの要約したデータとの整合性がとれなくなるため、次々とブロックをたどって改ざんし続ける必要がある。しかしブロックチェーンには、ブロックを改ざんし整合性を確保するには天文学的な計算が必要となる仕組みが暗号技術を駆使して組み込まれており、実質的に改ざんは不可能といわれている。

ブロックチェーン最大の特徴は、Peer to Peer（P2P）と呼ばれるネットワークで機能する点にある。P2Pとは、参加者全員で同じデータ（取引記録）をそれぞれ持ち合うネットワークである。日常使っているネットワークには、データを管理するコンピュータが存在するが、P2Pにはそのようなコンピュータは存在しない。全員でデータを持ち合うメリットは、ネットワーク参加者全員のデータが破壊、もしくは利用不可能とならない限り、取引記録は存在し続ける点にある。データを一括管理するネットワークの場合、管理するコンピュータが故障、ハッキング等で機能不全と

図表 8 ブロックチェーン概念図



なると、そのデータは消失する可能性が高く、そのネットワークは機能を停止する。P2Pは、全員でデータを持ち合うため、通常のネットワークと比較して高い耐障害性を有する。また管理するコンピュータが存在しないため、維持管理コストを低減させることが可能である。

2. ブロックチェーンが活用される有望分野

このようなユニークな特徴を持つブロックチェーンを活用した新サービス創出など、さまざまな取り組みが世界中で行われている。

2015年、イングランド銀行、欧州銀行協会、ドイツ銀行などが相次いでブロックチェーンに関する報告書を公表した。中でもドイツ銀行は、ブロックチェーンを使って有価証券の発行・決済・移管・清算・配当などの業務プロセスの自動化が実現可能だとし「スマート社債」の実現を目指した開発プロジェクトを立ち上げている。

最近注目されている「モノのインターネット (IoT)」も、ブロックチェーンの活用分野として期待されている。IoTとは、コンピュータなどの情報・通信機器だけでなく、世の中に存在するさまざまなモノにセンサーや通信機器を組み込み、インターネットを経由し通信させることで、遠隔計測、自動認識や自動制御などを可能にするというコンセプトである。このIoTにブロックチェーンと「スマートコントラクト」を組み合わせる新しいサービスを作り出そうとする取り組みが行われている。スマートコントラクトとは、契約条項をプログラム化して、履行条件を満たすと自動的に所定の手続きを実行するソフトウェアである。2015年IBMは、ブロックチェーンを用いたスマートコントラクトの実証実験を行った。同実験では、故障を事前に予測／検知する能力がある洗濯機を想定し、自身が故障しそうになるとブロックチェーンを検索して、保守契約締結の有無と保守料の支払い履歴を確認し、履行条件を満たすと自動的に保守会社に修理依頼を行うというような内容である。

IoT以外では、医療、行政関連でもブロックチェーンの利用が拡大している。データベースを短い期間で導入できるブロックチェーンの特徴を活かして、医療機関の診療情報や政府情報（例：米コネチカット州が収集・分析

した統計データ）を記録する事例が増えてきている。直近では難民問題で揺れる欧州において、ブロックチェーン・エマージェンシー ID プロジェクトが展開されている。これは、シリアから着の身

着のまま母国を脱出し、パスポートなどで自分の身元を証明できない難民に対し臨時 ID を発行し、ヨーロッパ諸国全体で難民の管理を行えるようにする取り組みである。このプロジェクトにおいて重要なことは、本格的な冬が到来する前に膨大な難民を識別し、適切な支援を迅速に行えるようにすることである。そのためには、財政的に厳しい国が多い欧州において各国の負担を最小限に一つ、簡易にデータベースを導入でき、さらに運用維持管理も不要であることが理想的な要件となる。この要件を満たす技術として選択されたのが、ブロックチェーンである。欧州各国の入国管理組織や治安機関は、ブロックチェーンのネットワークに参加するだけで、難民の身元を照会・確認することができる。また、難民が国境通過する際には、「〇〇△という臨時 ID をもった難民が A 国から出国し、B 国に入国した」というデータがブロックチェーンに記録されるので、難民の移動も追跡できる。このようにブロックチェーンは、全員が参照できるオープンなデータベース技術であることから、広い汎用性があり、今後も適用事例が増えるであろう。

3. 今後の展望

ブロックチェーンは、短期間で導入でき運用管理も不要であることから、発展途上国でも利用が始まっている。ホンジュラス政府は、ブロックチェーンを利用して土地登記システムを安価に構築することを目指している。これまでは、土地登記のデータはデータベースや紙で管理されており、官僚や管理者自身の不正により容易に改ざんされ、土地の所有権争いが絶えない状況であったが、今後は市民に正しい登記情報を改ざんできない状態で開示することが可能となると期待されている。

このようにブロックチェーンは、仮想通貨から生まれ、金融分野における活用が期待されている技術ではあるが、オープンなデータベース技術という特徴を活かし、今やIoTや行政システムなどにも適用され始め、さらにその応用範囲を広げべく世界中でさまざまな用途開発が進められている。今後もブロックチェーンの動向には注目し続ける必要がある。