



2022年に注目すべき技術

2022/01

三井物産戦略研究所
技術フォーサイトセンター、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 技術フォーサイトセンターでは、例年、その年に特に注目すべき技術を抽出し、技術概要の解説および今後の展望を洞察しています。本年は、①6G、②分子機械、③自己成長するロボット、④ケミカルルーピング燃焼、⑤センサー化する植物を取り上げます。

①「6G」は、2020年に商用サービスが開始された5Gの後継となる無線通信インフラであり、昨今、国際標準化を獲得するため、各国団体およびグローバル企業各社で開発競争が進む技術です。

②「分子機械」は、2016年にノーベル化学賞を受賞した、ナノスケールの微細な機械のことを指します。その後ドラッグデリバリーシステム等の医療・ヘルスケアや、化学、ロボット産業など、幅広い分野での活用が期待される基礎技術です。

③「自己成長するロボット」は、人間によるプログラムや学習結果の提示を行わなくとも、自律的に判断し行動することが可能なロボットです。動植物を対象とした理科学実験や災害救助等の複雑な環境下で利用されるロボット技術となります。

④「ケミカルルーピング燃焼」は、燃焼反応に必要な酸素を空気中からでなく、鉄などの酸素キャリアを介して供給する技術です。排ガス中のCO₂濃度を高め、回収を容易にすることで、発電や水素製造時の脱炭素化が可能となります。

⑤「センサー化する植物」は、生物体である植物の特徴をセンサーとして活用するものです。農業分野のみならず、環境やエネルギー分野での開発が期待される技術です。

また、合わせて昨年同様、取り上げた5テーマについて、それぞれグローバルな特許出願動向の分析を行っています。

- ・6G - 主導権奪取に向けた動きが活発化 - 2
- ・分子機械 - ナノ世界の産業化へ向けて - 8
- ・自己成長するロボット - 人間や動植物と協調し、自ら考えて行動するロボット - 12
- ・ケミカルルーピング燃焼 - CO₂回収で注目の燃焼技術 - 18
- ・センサー化する植物 - デジタル技術により生まれた新たなデバイス - 24
- ・「2022年に注目すべき技術」に関する知財レポート 30
- ・『2021年に注目すべき技術』の総括（プライム編集、スーパークロック、EUVリソグラフィー、侵襲型BMI） 46

6G

—主導権奪取に向けた動きが活発化—

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 辻 理絵子

6Gとは

(1) 移動体通信の歩みと6G

移動体通信は、1980年代に導入された第一世代移動通信システム、通称1Gの時代からおよそ10年ごとに大幅なアップデートを重ねてきた。主に自動車電話やショルダーフォンで使われた1G、初のデータ通信が可能となった2G、世界で共通の仕様とするため標準化活動が活発になった3G、スマートフォンが普及し高速通信へのニーズが大幅に増えた4G、そして低遅延、多数接続といった特徴を備えIoTでの活用を見据えた5Gと、移動体通信はそれぞれの世代で新たなサービスを創出する基盤となり、社会のニーズを満たしてきた。規格が全世界で標準化されるようになった3G以降、移動体通信業者、機器メーカー等の関連会社にとって標準規格に自社の提案する技術が採用されるか否かがその後の事業を左右する重要事項となり、各社の技術開発競争、また標準化における活動は活発化している。本稿では、初めてミリ波を採用した5Gで見えた課題も踏まえ、6Gに向けた関係組織の動き、6Gの特徴と技術、また6Gが実現した際の世界観と実現に向けた課題について解説する。

(2) 6Gの検討状況

通常、移動体通信システムの標準化において、求められる性能や規格、また使用する周波数帯等は、国際連合の専門機関の一部門である国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）や、各国の標準化団体によるプロジェクトである3GPPによって決定されるが、5Gの導入が始まったばかりである現在、6Gについてこれら団体による基準はまだ存在しない。しかし、通信事業者、メーカー、大学等の一部では5G導入前から6Gへ向けた基本コンセプト等の検討をスタートさせており、4G導入後に議論をスタートさせたといわれる5Gに比べ3～4年ほど早い立ち上がりとみる向きもある。つまり、標準化のスピードがより速くなり、関連企業にとっての重要性が増してきていると考えられる。移動体通信に活用される技術は複雑さを増しており、1国、1社のみで世界をリードすることは難しくなっていることから、今後さらにアライアンスの組み方が重要になると思われる。

いち早く6Gの検討を始めたのはフィンランドで、2018年にOulu大学を中心として検討をスタートさせ、その後6G Flagshipプロジェクトへと発展した（図表1）。欧州では2020年12月からの2年半で1,200万ユーロを予算としたHexa-Xがスタート、この取り組みには中国からHuawei、米国からIntel等も参加している。米国では、2019年に当時のトランプ大統領が取り組み強化を明言、DARPA（国防高等研究計画局）やニューヨーク大学が中心となった研究拠点が立ち上がっている。米国の通信事業者を主体に立ち上がったNext G Alliance

には、諸外国からも企業が参加しているものの、Huawei等のエンティティリスト¹に含まれる組織には参加資格がない。米国は5Gの標準化でプレゼンスを發揮した中国に対し巻き返しを図っており、6Gにおいても中国排除の動きは継続の見通しだ。バイデン政権発足後は、同盟国と連携の動きも強めており、日本と共同で6G関連の研究開発に4,900億円投じる方針を打ち出した。一方、中国は2019年に国家プロジェクトとして研究開発をスタートさせた。5Gでは基地局などの通信機器を売り込む戦略だったが、6Gについてはシステムそのものの構築を狙うとの発言もある。韓国は世界初の6G商用化を狙っており、また米国の中国排除の恩恵を受けるのは韓国との見方もある。日本は5Gの開発で存在感を示すことができなかつたことへの反省もあり、2020年に産官学連携のプロジェクトとしてBeyond 5G推進コンソーシアムを立ち上げた。関係者による共同研究を促進し、テストベッドを活用した課題抽出なども想定されている。日本の関係組織とはもちろんのこと、前述のフィンランド6G Flagshipと協定を結んだほか、米国の組織とも連携に向けた協議を進めている。総務省は日本勢の6G関連の特許シェアを10%以上、設備やソフトも含めると30%以上を目標に掲げるが、現状を見るにさらなる施策が必要かもしれない（「6Gに関する特許出願動向」参照）。

図表1 各国の6G検討状況

国	概要
フィンランド	<ul style="list-style-type: none"> 6G Flagship: 2019~2026年で予算2億5,000万ユーロを予定。メンバーはOulu大学、Aalto大学、Nokia、VTT Technical Research Centre of Finland等。
欧州	<ul style="list-style-type: none"> Hexa-X: 2020年12月から2年半で予算1,200万ユーロ。メンバーは6G Flagshipメンバー等も含み、Ericsson、Siemens、欧州の主要研究機関、また中国からHuawei、ZTE、米国からIntel等が参加。
米国	<ul style="list-style-type: none"> DARPAによる、6G含む通信技術研究プロジェクトに5年間で予算2億ドルを予定。 Next G Alliance: 米国のキャリアを中心にEricssonやNokia、Samsungも参加するが、米商務省のエンティティリストに含まれる組織は参加資格なし。 日本と共同で4,900億円を研究開発に投資予定。
中国	<ul style="list-style-type: none"> 2019年にHuaweiが10年に以内に6Gの実用化の方針を表明。 2020年に中国聯通とZTEが6G共同戦略協定に署名。 同時期に政府は産官学合計37組織を含む部会を設置、研究開発を実施する旨を発表。 Huawei等の企業は欧州のプロジェクト等に積極的に参加し情報発信。
韓国	<ul style="list-style-type: none"> 2019年からSamsungやLG等が研究開発に取り組む。 2020年に政府が6Gパイロットプロジェクト(2021~2026年で予算2,000億ウォン)の立ち上げを目的とした戦略を発表。世界初(2028~2030年)の商用化を目指す。
日本	<ul style="list-style-type: none"> NICTやNTT、NTTドコモなどが2019年前後から検討を開始。 2020年に産官学連携のBeyond 5G推進コンソーシアムが発足。総務省によるBeyond 5G関連研究予算は500億円。

出所：各団体ウェブサイト等から三井物産戦略研究所作成

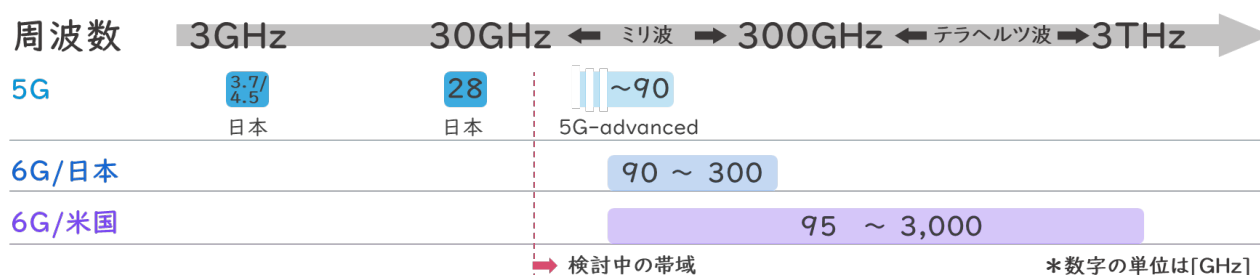
(3) 6Gの特徴

6Gの特徴については、各検討団体からホワイトペーパーもいくつか提案され、おぼろげながらその形が見えてきた。まず、使用周波数帯について見ていこう。どの帯域を使用するかにより電波の特性が変わるので帯域選びは重要である。基本的に通信速度は帯域幅の大きさに依存するので広帯域を確保する方針だ。

¹ 米商務省が、国家安全保障上の懸念がある企業を指定したリストで、掲載された企業に物品やソフトウェア、技術を輸出する場合は許可が必要。

低周波ほど電波が飛びやすく広範囲の通信をカバーできるが、既にテレビや公共無線など既存のシステムで使用されており、帯域幅を広く確保することは難しい。そこで注目を浴びているのが、ミリ波など、まだ既存のシステムに活用されていない高周波数帯域である。5Gでは、4Gよりも少し高めの周波数であるSub6（日本では3.7/4.5GHz帯）や、初めて導入されたミリ波（日本では28GHz帯）が使用されているが、今後導入される5G-advancedでは最大90GHzまでの利用が検討されている（図表2）。6Gに向けてはさらなる高周波数帯域の活用が検討されており、日本では90GHz～300GHzの波が主な検証対象になりそうだ。米国の連邦通信委員会はさらに高周波のテラヘルツ波（95GHz～3THz）の検討を呼びかけている。これらの帯域では5Gの10倍以上の帯域幅を確保できるとみられ、実現すれば5Gの10倍以上の通信速度が期待できる。しかしながら上述したように、カバー範囲が狭くなるなどのデメリットもあり、それを補う技術が求められる。

図表2 5Gと6Gの周波数



出所：三井物産戦略研究所作成

次に6Gの性能を見ていこう。各検討団体のホワイトペーパーをのぞくと、6Gの主だった機能として各団体共通で検討されているものが5つある（図表3）。そのうちの3つは5Gの機能の向上と位置付けられ、5Gがうたった高速通信、低遅延、多数接続という特徴を10～100倍に発展させた「超高速通信：100Gbps～1Tbps」「超低遅延：0.1～1ms」「超多数接続：1,000万～1億台/km²」である。これらに加え、さらなる高周波数帯域の使用、社会様式の変化、他分野の技術の発展などを考慮した機能が加わる流れだ。5つの機能うち残り2つは、「超低消費電力：2030年のIT関連電力消費量は2016年の36倍となるとの試算を背景に、こうした消費電力の増加に対応するための機能」「超高信頼通信：災害や障害の発生時でも安定的なサービスの提供、また瞬時に復旧する機能」となっている。

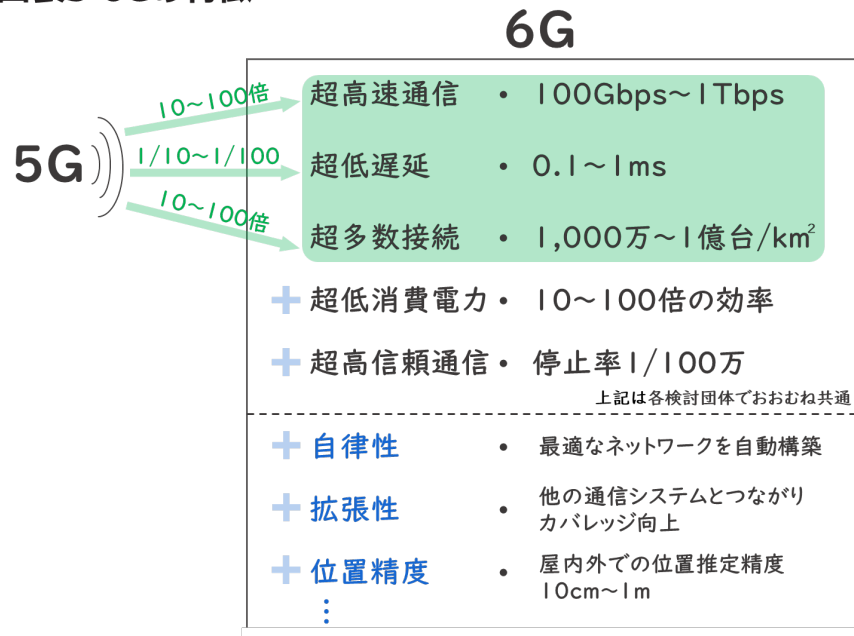
そのほか、検討団体によって詳細は異なるが、下記のようなものが検討されている。

自律性：AI技術等を活かして通信機器等が自律的に連携、ニーズに合わせて最適なネットワークを自律的に構築する機能。

拡張性：端末や基地局が他の通信システムとシームレスにつながり、陸・空（宇宙）・海のあらゆる場所で通信を利用可能とする機能。

位置精度：高精度な位置推定を実現する機能（10cm（屋内）、1m（屋外））。

図表3 6Gの特徴



出所：総務省、ドコモ、Hexa-X、6G Flagshipのホワイトペーパーから三井物産戦略研究所作成

(4) 複数技術の組み合わせにより実現する6G

上述の機能を持つ6G実現のためには、多岐にわたる技術が必要だ。3Gまではその世代を代表する象徴的な技術を1つ挙げるのが可能であったが、4G以降は複雑化し、複数の技術の組み合わせとなっている。6Gについて現時点で絞り込むことは難しいが、検討が予想される技術領域の例を紹介する。

セルフリー構成：5Gではミリ波を有効活用するため、100個を超える多数のアンテナ素子を利用するMassive MIMO技術を活用している。テラヘルツ波の利用も見込まれる6Gでは、例えば1万個を超えるアンテナ素子が活用されることも考えられ、その場合、1つのアンテナで1つのゾーンをカバーする従来のセルラー構成では干渉が増大してしまう。そこで6Gでは、多数のアンテナで1つのゾーンを構成するセルフリー構成が採用される可能性がある。

アンテナの新しい形：高周波数帯域は電波が回り込みにくく、逆にいえば反射・散乱しやすい。そこでマルチパス（電波の反射波等）の利用が重要になる。電波を任意の方向に反射させる技術や、電波を透過し、また透過した電波を1点に集めるガラス基板など、電波の放射方向をコントロールする材料が開発されている。そのほか、任意の場所をつまむだけでその周辺から電波を放出しアンテナの役割を果たす伝送ケーブルの開発も検討されており、これによりカバレッジが低下しやすいミリ波の課題を補い通信エリアを自在に構築することが可能になるとされる。

ほかにも、基地局の機器などの汎用化を見据えたネットワーク・アーキテクチャの見直しや、分散ネットワークの高度化、カバレッジ拡張のための衛星通信/HAPS（高高度基盤ステーション）の活用、通信システムの多機能化のためのAI技術の活用等、幅広い技術が検討されている。

有望な活用分野

予想される世界観

前章で触れたように、6Gの機能の中には5Gの機能をさらに向上させたものもあり、また5Gも5G-Advancedでさらに進化することを踏まえると、5Gから6Gへの変化は、例えば1G→2Gでデータ通信が可能となったような劇的なものではないかもしれない。しかしながら、ここでは各団体の予測と今後の社会様式の変化の影響踏まえ、筆者が考える6Gが実現する世界観を提示したい。

まず取り上げたいのが、遠隔地においても隣にいるかのような世界、テレプレゼンスが大きく進む点だ。人間の視覚の認識時間が20ms、聴覚は2msといわれるが、6Gでは、5Gの10～100倍の通信速度、遅延時間はエンドツーエンドで0.1～1msになると予想され、通信に起因するラグを体感することはほぼなくなると考えられる。特にコロナ禍でテレワーク等が進み、物理的に同じ場所にいることの必要性が薄れつつあること、旧Facebook社が社名をMetaに変更したようにメタバース²への機運が盛り上がりつつあること、またVR等に必要なハードウェアの進化といった環境変化も合わさり、仮想空間が身近になり活用が急速に広まると考えている。それだけでなく、遅延にシビアな遠隔医療の導入が進む、AIとの組み合わせでAIが遠隔操作するロボットが人間の労働を代替する、といった世界がより身近になる可能性がある。

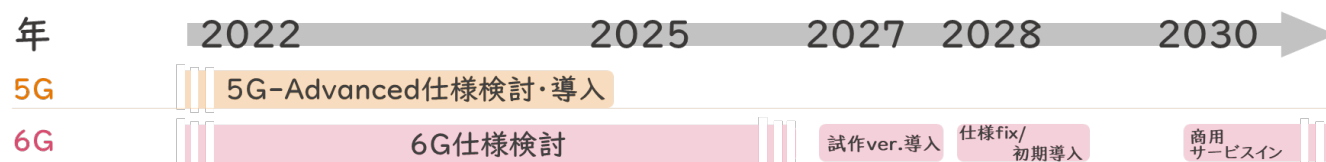
ほかには、5Gの10倍のデバイスをつなげることが可能となるので、デバイス側のコストの問題等もクリアできれば、実世界のセンシング、デジタルツインの世界が進むものと考えられる。また、今まで移動体通信システムとしてカバーできなかった空・海・宇宙での通信が可能となるため、例えばドローン宅配のように物流を変えるようなケースや1次産業の無人化等が考えられる。

今後の展望

(1) 予測タイムライン

今後、まずは2025年ごろまでに5G-advancedの商用ネットワーク導入が進む。同時に6Gの要求条件、規格の策定が行われ、2027年ごろに6Gの試作バージョンが導入される予定だ。その後2028年にいくつかの国で初期導入が開始し、2030年に実用導入される見込みだ（図表4）。

図表4 6G検討のタイムライン



出所：三井物産戦略研究所作成

² メタバースとは、人々が常にログインし続けログオフすることがない仮想的な3次元空間の総称で、その空間内では、不動産、ゲーム、eコマース、SNS等のイベントや経済活動が常にライブで同期される。

(2) 課題とまとめ

6Gではさらなる高周波数帯の利用が想定されるため、カバレッジの拡大や通信の安定化が求められる。設備的な面でいえば、使用帯域が高周波になればなるほどアンテナの小型化、高密度化が必要となるため、発熱問題が深刻化するだろう。これを解決するためには、化合物半導体等のマテリアルの改善等も必要になる。また、高周波数帯域の使用によりアンテナ数、基地局数は増える見込みであり、分散ネットワークを高度化するためにはアンテナ配置の適正化も必要になる。衛星通信やHAPSなどとの連携のためにネットワーク構成が変われば基地局の設備構成等にも変更が生じるかもしれない、コストの問題も気にする必要がある。現在いくつかの企業が取り組んでいるネットワーク・基地局の仮想化技術が進めばハードの置き換えが前世代より少なくなる可能性もあり、仮想化技術がどのように発展するのか要注目だ。ほかにも消費電力の問題、6Gが生み出す大量のデータの保護など、ハードもソフトも課題は山積だ。

ここまで、各国の6G検討状況、想定される特徴、それを支えるであろう技術、6Gが実現した際の世界観、また課題について見てきた。10年ごとといわれていた通信世代の更新間隔が少しずつ短くなっているようにも見え、通信“インフラ”の世界でも変化のスピードが速くなっていることを感じる。これまでも世代ごとに新しいサービスが生み出されてきたが、6Gでは他の先端技術（AIや仮想空間技術など）との組み合わせでサービス展開の可能性が飛躍的に拡がると考えている。一方、6Gの仕様や規格そのものを握ることは国家の重要な戦略項目になっており、仕様策定にあたっては技術だけでなく連携先選定や組み方など政治面も必要になってくる。米国と連携する方針を打ち出した日本は、今後、他国や関連団体も含め、どのように良好なパートナーシップを構築していけるかが課題だ。また基幹技術だけでなく、6Gを見越したサービス開発においても各組織が知恵を絞っていくべきだろう。



6Gに関する特許出願動向

分子機械とは

分子機械とは、回転や伸縮といった制御された動きをする分子の集合体である。分子機械の大きさはナノメートル（10億分の1メートル）とウイルス並みに極微小であり、長年にわたって蓄積されてきた化学的知識などを駆使して、分子に機械的動作を行わせるナノテクノロジー技術³の一つである。20世紀初頭に量子論が登場し、それから派生した量子化学により分子の形状や特性解明が進んだ。さらに、物質の分子構造を精密に分析できる解析技術の高度化により、さまざまな分子の構造と化学的な挙動の解明が飛躍的に進展してきた。これに並行して分子を操る研究も進められ、1979年には分子機械の先駆的研究となる、光に応答する分子構造体⁴が九州大学の新海征治教授（現・名誉教授）によって公表された。この研究に触発され、分子を部品として組み合わせることで機械のような動きをさせる研究が先進諸国で行われるようになった。その後、幾多の研究成果が生まれ、2016年には「分子機械の設計と合成」に関する研究に貢献したとして3人の科学者にノーベル化学賞が授与⁵された。本稿では、ノーベル賞受賞者の事績をトレースする形で分子機械の概要を紹介し、期待される活用分野、そして今後の展望と課題について述べる。

(1) 分子部品（カテナンとロタキサン）

分子は、いくつかの原子が結合した物質である。例えば、メタン（天然ガスの主成分）は、1個の炭素原子に4個の水素原子が結合した分子であり、メタン分子は、あまたある分子の中でも水素分子、ヘリウム分子に次いで小さく軽い分子である。このような分子を使って機械のような動作を行わせるためには、ある一定の大きさと安定した形状が必要となる。メタンの場合、多数のメタン分子と水分子（水素原子2個と酸素原子1個）が結合し、巨大分子化したメタンハイドレートが存在するように、多種多様な分子は、さまざまに結合しあって分子の集合体となることが可能である。分子機械は、このような分子の集合体を特定の形状に安定させ、それらを巧みに組み合わせて、特定の機能を発揮する分子部品として構成し利用する技術といえる。

代表的な分子部品には、カテナン（catenane）とロタキサン（rotaxane）がある（図表1）。カテナンは、2つのリング状の分子が緩い結合で鎖状に結合した分子部品で、2016年のノーベル賞受賞者の一人であるジ

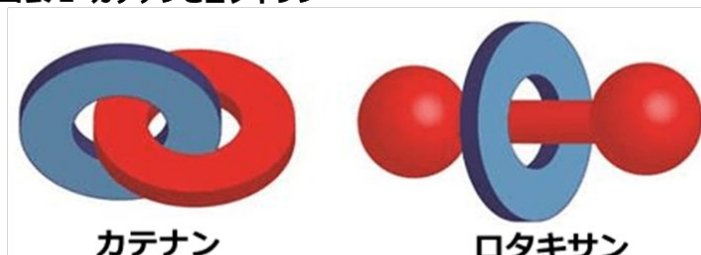
3 一般に流布しているナノマシンは、計算回路など、必ずしも機械的動作を伴わない、ナノレベルの機械を意味する。本稿では、2016年のノーベル化学賞の授賞対象である分子機械を中心に述べる。

4 新海教授が開発した分子（光応答性クラウンエーテル）は、光を当てる前の通常状態ではトランス型と呼ばれる分子構造をしており、ナトリウムを捕獲する機能を有するが、紫外線を照射すると分子の構造がシス型という構造に変化し、カリウムを捕獲する分子構造となる。光の照射により分子構造を変化させる。

5 スウェーデン王立科学アカデミー Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2016 for the design and synthesis of molecular machines <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2016/press-release/>

ジャン＝ピエール・ソヴァージュ (Jean-Pierre Sauvage) が、1983年にこの形成に初めて成功した。分子を構成する原子は、余裕があれば互いの電子を共有する傾向があるため、分子同士が強固に結合する（化学結合の中で一番結合力の強いのが共有結合）場合がある。カテナンが画期的なのは、この分子の結合特性をうまく利用して、2つのリング状分子の、相互に動けるくらいの緩い結合を実現したことである。

図表1 カテナンとロタキサン



出所：富士フィルム
(https://sp-jp.fujifilm.com/finechemical_news/news/cs1610_nobel2016/index.html)

カテナンは通常は堅く、変形することのない結晶構造だが、直近の研究⁶ではカテナン分子を3次元的に配列することで、外部からの力により変形する、柔軟な構造の結晶の開発に成功している。この、ゴムのような性質を持つカテナン結晶は、二酸化炭素やメタンなどのような温室効果ガスを吸収したり放出したりする材料として脱炭素化に貢献する新素材として期待されている。

ロタキサンは、1991年にフレイザー・ストッダート (J. Fraser Stoddart) が開発した分子部品である。ロタキサンは、分子リングの真ん中に分子のワイヤーを貫通させた形状で、リングは車軸に見立てたワイヤーに沿って動かすことができる。ロタキサンのリングは、意図的に左右に動かすことができることから、現在は、ON/OFFを行う分子スイッチとして利用されている。またロタキサンの分子リング（図表1右の青い部分）を数珠のように複数つなげた分子部品を「ポリロタキサン」というが、日産自動車は、これを活用し、傷を自己修復するスクラッチシールド塗料を開発、実用化している。

(2) 分子機械の機能拡張

ノーベル化学賞受賞3人目の科学者は、ベルナルド・フェリンハ (Bernard L. Feringa) で、1999年に分子モーターを開発し、分子部品の機能を拡張させ、機械のように動かすことを可能にした。モーターなので分子の回転（右回り／左回り）と停止ができなければならない。しかし、ナノの世界では、ちょっとしたエネルギー変化で揺らぎが発生し、分子の回転を大きく阻害する。このため、分子の回転制御は極めて難しい課題であるが、この揺らぎに耐える分子モーターを実現させたフェリンハ博士の功績は大きい。その後も研究が進められ、分子モーターそのものよりも約1万倍大きい、0.028ミリメートルのガラスシリンダーを回転させる分子モーターを開発している。また別の研究チームは、分子モーターに、ねじることの

⁶ 『分子の鎖を並べて柔らかい結晶を作る－気体を効率良く吸脱着できる多孔性材料への可能性－』 2021年10月14日（理化学研究所、東京大学、科学技術振興機構）https://www.riken.jp/press/2021/20211014_1/

できる長いロープ状の分子を結合し、このロープに紫外線を当てることでねじれを解放する仕組みを考え、実装している。これはゴム巻きプロペラの紙飛行機のように微細空間を移動する機能を分子モーターに付与することとなった。このねじることのできるロープ状の分子部品は、ねじれのエネルギーを蓄積する、一種の電池のような役割を果たすこともできる技術に仕上がっている。このほか、前述のカテナンも単なる分子部品から、酸化還元反応を加えることで伸びたり縮んだりを制御できる機能が追加され、ロタキサンにも、機能拡張を施して分子エレベーターともいえる、上下運動する分子機械を実現（2004年）するなど、分子機械の機能拡張が行われている。

このような分子機械の機能拡張の研究開発により、光で制御できる分子スイッチや分子プロペラ、分子ロケットなどユニークな分子機械が生み出されている。中でも注目されるのはコンピュータに実装されている計算回路を、カテナン結晶体などで保護した大量の分子スイッチで構成する技術である。シリコントランジスタを凌駕する微細な計算素子となる可能性があり、現在、莫大な電力を消費しているデジタル・コンピュータが分子機械ベースのコンピュータに置き換わることも想像される。まさに分子機械は、ナノ世界からデジタル世界に拡張進出し得る大きなポテンシャルを感じさせる技術である。

有望な活用分野

分子機械の活躍が最も期待される分野は医療である。前述のポリロタキサンは、既存の医薬品等で利用されている、形状が固定化した分子とは異なり、分子リングが軸の上を移動可能なことから、従来の医薬向け分子には成し得ない機能を発揮する材料として注目されている。例えば日産自動車が開発した塗料と同じように生体内で自己修復する生体材料や、細胞内に取り込まれにくい薬剤を細胞内に導入するドラッグ・デリバリー・システム（DDS）としての活用研究も行われている。新型コロナウイルス対策で用いられているRNA医薬品と同じように核酸（RNAやDNA）も細胞内への導入が可能との研究もあり、今後、感染症対策医薬品として活用の場が広がる可能性がある。

また、分子機械が体内を自律的に移動し、異常を発見すると診断を下し、必要ならば治療を行う「体内病院」も注目される。体内病院は、公益財団法人川崎市産業振興財団のナノ医療イノベーションセンター⁷が、2045年までの実現を目指して推進している構想である。体内病院に用いられる分子機械は、50ナノメートル程度で、人体の大きさを地球とした場合、分子機械はピンポン玉くらいの大きさで、ウイルスと同程度である。この分子機械は、体内を巡る運動能力と異常を検知するセンシング機能を持ち、仮に怪しい部位を見つけると治療の要否をその場で判断する。もし治療が必要であれば、薬を放出するなど自力で対処するか、もしくは必要な治療が行える分子機械を呼び寄せる。体内にある分子機械で足りなければ、応援の分子機械を体内に投入するよう人間に通知するなどが想定されている。このように、自律して運動・


⁷ 公益財団法人川崎市産業振興財団／ナノ医療イノベーションセンター <https://iconm.kawasaki-net.ne.jp/>

認知・行動を行える分子機械を分子ロボットと呼ぶ。分子ロボットを中心とするさまざまな技術が統合され体内病院構想が実現すると、病気が発現する前に予防対処することが可能となり、病気とは無縁な未病社会が到来するかもしれない。

今後の展望

分子機械は、知能化し分子ロボットに進化を遂げると予測される一方、分子機械が、数万、数億、数兆と集団化して、人間の眼にも見える巨視的機械となってモノを動かしたり、工学機械のようにリアルな部品や化学製品を生み出したりするようになると予測する科学者が存在する。また、分子機械自身にDNAやRNA、タンパク質といった生体物質を材料として生体超分子や生体分子ロボットを組み立てさせる研究も検討されている。

分子機械は、技術的観点からは、まだまだ揺籃の段階にあるとはいえ、各国で研究開発が行われており、民生利用とともに、軍事利用を目的とした研究開発も実施されている。ウイルスと同様に目に見えないナノサイズの兵器となるため、人類社会や地球環境に与える影響が懸念される。近い将来、生物化学兵器に匹敵する致死能力をもつ分子機械／分子ロボットの登場も想像され、完全自律型兵器も含めてそれらが破滅的な影響を人類に及ぼす前に、世界的な開発抑止に関する合意形成と監視・警戒措置が必要である⁸。分子機械が、体内病院のように健康と福祉の向上など人類社会の平和と安寧に貢献する技術として社会実装されることに期待したい。

 分子機械に関する特許出願動向

⁸ 昨今の技術革新により、安全保障の空間認識に変容が生じ、伝統的な陸・海・空に加え、宇宙（大気圏内、宇宙空間）、サイバー空間（電磁スペクトラム領域含む）と、これに本稿で説明したナノの空間が新たな領域として登場している。特に、躍進著しい合成生物学とナノ技術が融合した人工生命技術は、戦争の概念を大きく変貌させる可能性もあるだろう。

自己成長するロボット

—人間や動植物と協調し、自ら考えて行動するロボット—

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

自己成長するロボットとは

(1) 自己成長するロボットへの期待

自己成長するロボットとは、自ら解決策を模索して対応できるロボットである。従来、ロボットとは人間が指示を準備し、それに沿った定型作業をこなす物であり、労働力の代替として省人化・効率化において産業に大きく貢献してきた。しかし、予めプログラムされた動作以外の対応はできず、例えばネジを掴むにしても、箱の中に乱雑に積み込まれたネジを掴むことは難しく、別の装置でネジを1本ずつロボットに対して持ちやすい向き・位置に準備することが必要だった。つまり、個体差や環境変化の影響が無いように人間が事前にお膳立てをする必要があった。これがAIの進展により、バラ積みの中にあってもネジの把持すべきポイントを算出し、人の手を借りずとも状況に応じて正確に掴むことができるようになってきた。一方で、AIにそうした機能を学習させるには人間による長時間の試行錯誤や検討が必要であり、多品種少量生産のように部品が次から次へと変わってしまうと、人間のように即時対応することが困難であった。このような課題を自己解決できる高度な判断力と対応力を獲得するため、人間からの指示やデータに頼ることなく、ゴールの理解・作業のコツの探索やアプローチの策定を自ら行い、必要に応じてツールの作成や自らの形状も変えることが柔軟にできるロボットの開発に期待が寄せられている。本書では、このようなロボットを「自己成長するロボット」と定義する。

自己成長するロボットについて注目すべき理由は、以下の3点である。

- ・コロナ禍により、あらゆる業種でのデジタル化やテレワーク化は進んだが、一方で現場の点検など代替できない作業による業務効率化のボトルネックが顕在化し、業務改革の課題として浮き彫りとなったこと
- ・AIとロボット技術の融合により、自己成長するロボット実現の兆しとなる技術が開発されつつあること
- ・ロボット・製造業を強みとする日本にとって、自己成長するロボットは新たな産業の柱としうる大きなチャンスであり、一例として、内閣府が主導するムーンショット型研究開発事業目標の1つとして「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」（図表1）を目指す研究が支援されていること

図表1 ムーンショット型研究開発事業目標3

「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」

ムーンショット目標3 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現

ターゲット

- 2050年までに、人が違和感を持たない、人と同等以上の身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長するAIロボットを開発する。
- 2030年までに、一定のルールの下で一緒に行動して90%以上の人が違和感を持たないAIロボットを開発する。
- 2050年までに、自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットシステムを開発する。
- 2030年までに、特定の課題に対して自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットを開発する。
- 2050年までに、人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長するAIロボットを開発する。
- 2030年までに、特定の状況において人の監督の下で自律的に動作するAIロボットを開発する。



出所：内閣府ウェブサイト (<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub3.html>)

(2) 自己成長するロボット開発に向けた現状と技術開発

自己成長には2つの観点があり、脳に当たるAIが人間のように状況判断を柔軟に行うソフトウェア面での進化と、ロボットがツールを作成したり、適した形に自らの形状を変えたりするハードウェア面での進化が必要である。これらが組み合わされば、これまでの技術では対処できなかった課題を応用力で解決できる可能性を秘めており、現場の省人化・無人化がより一層進むだろう。また、人間が火を照明・暖房・調理など多用途に応用したように、出来る事の可能性を広げるだけでなく、将棋AIがこれまでの定跡を打

ち破るがごとく、これまで人間が思いつかなかったような一見非常識だが合理的な手法やツールを用いた解法が生まれるかもしれない。

・AIの進化（強いAI）

第3次AIブームと呼ばれる飛躍的なAIの進化により、それまではルールベースと呼ばれる、人間が判断すべき特徴の抽出を行う必要がなくなり、AIが過去に得たデータから学習して特徴を抽出する事ができるようになった。この進化によって個体差や環境の変化があっても判断することが可能となり、対象が自然物などでも対応できるようになった。

しかし、現状のAIでは過去のデータが無いと対応することができない。例えば、弁当の中身を詰めるAIとロボットは決められたおかず・具材は対応できても、別のおかず・具材に変わると途端に対応できなくなり、その対応に必要な学習には多くの時間を要する。また、自動配送ロボットは、地震が起きて家屋が倒壊したりすれば保持している地図データと異なり対応できなくなるが、「地震が起きたら」といったレアケースを全て想定しようとする、ロボットには実装不可能な程、AIの論理規模が大きくなってしまう。つまり、特定の環境・領域・状況でしか活用できないことになる。そのため、ロボットに合わせた環境の整備に必要なコストと、ロボットの使用で得られる便益との経済合理性が実現できない現場においては、自動化・省人化が大きくは進まなかった。

そこで期待されているのが、自ら状況を判断し、優先度をつけて柔軟に行動するAIであり、それは「強いAI」と呼ばれている。この概念は1980年にジョン・サール氏によって提唱された概念であり、人間と同様に自意識があるAIと定義されている。カリフォルニア大学バークレー校とミュンヘン工科大学のチームでは、未知の形状や材質の物体がどう動くかを予測し、その仮説に沿った実行計画を立てるという行動条件付きの環境予測モデルの学習研究を行っている（図表2）。これは、初めて積み木を見た子供がその積み方を学習する過程にも似ており、過去に触れたことがある物の手触りや重さ、形状などの記憶から、それと似たものなら同じように扱えるだろうという仮説を用いることで、AIの試行錯誤の方向性を導き出したり、積み木という既成概念にとらわれることなくイノベーティブな解法を含む解決策の探索に役立てられたりすると言われている。

図表2 カリフォルニア大学バークレー校・ミュンヘン工科大学によるAI自己学習の研究



Figure 1: The robot learns to move new objects from self-supervised experience.

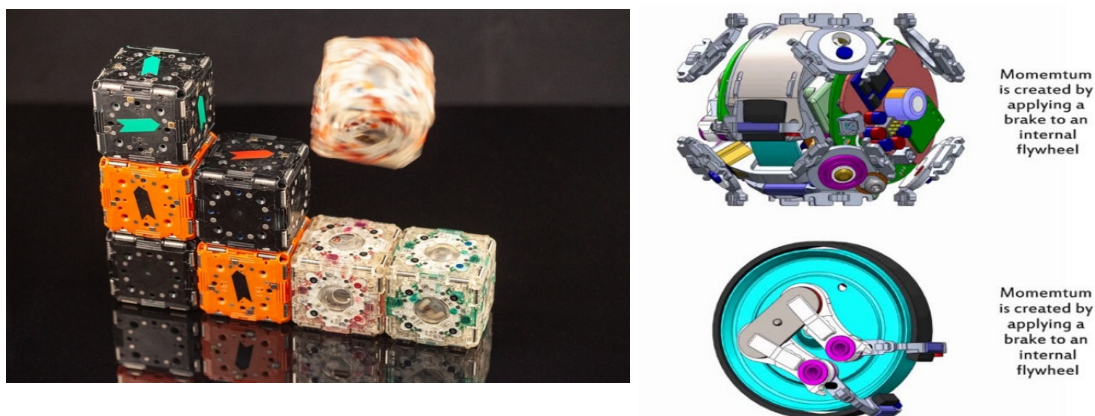
出所：カリフォルニア大学バークレー校・ミュンヘン工科大学
「Self-Supervised Visual Planning with Temporal Skip Connections」
(<https://arxiv.org/pdf/1710.05268.pdf>)

・ツール開発・自己変形するロボット

強いAIが柔軟性を高めても、試せる探索手法の幅が限られているため、高い成果は出しづらい。そこで、ロボット自身がツールを開発したり、形状を変化したりすることで選択肢を増やすアプローチによって応用の幅を広げる技術が注目されている。これは、子供が積み木を自分の身長以上に積み上げて行くときに台を使用したり背伸びしたりする行動と同じアプローチである。

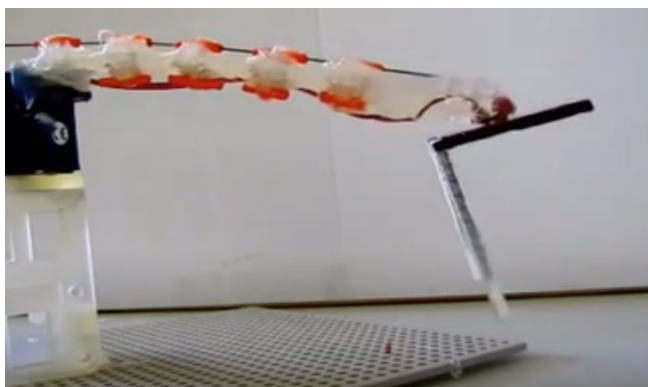
MITで開発されている「M-Block」(図表3)は、内部のフライホイールを利用して自ら動き、電子磁石で他のブロックと結合することが可能である。これにより、レゴブロックのように複数のブロックを組み合わせて、任意の複雑な形状を構築できる。また、ケンブリッジ大学の飯田教授のチームでは、サーモプラスチックと呼ばれる高温で接着、低温で固着する性質を有する物質とヒーターをロボットのアームの先に取り付け、他のツールを固着してアームの一部にしたり、再度加熱して取り外し、別のツールに持ち替えたりするアイデアを発表している(図表4)。加えて、ロボットが3Dプリンタを操作してツールを作るアイデアなども研究している。これらの技術と前述の強いAIによる試行錯誤を組み合わせれば、これまで困難だった課題を解決できる可能性がある。

図表3 MIT「M-Block」



出所：MIT News (<https://news.mit.edu/2019/self-transforming-robot-blocks-jump-spin-flip-identify-each-other-1030>)

図表4 サーモプラスチックを使った自己形状変化



出所：ケンブリッジ大学 飯田教授チーム「自ら成長するロボットのプロトタイプ」
(<https://www.youtube.com/watch?v=D7YhRVL8D90>)

有望な活用分野

(1) 動植物を対象とした理化学実験

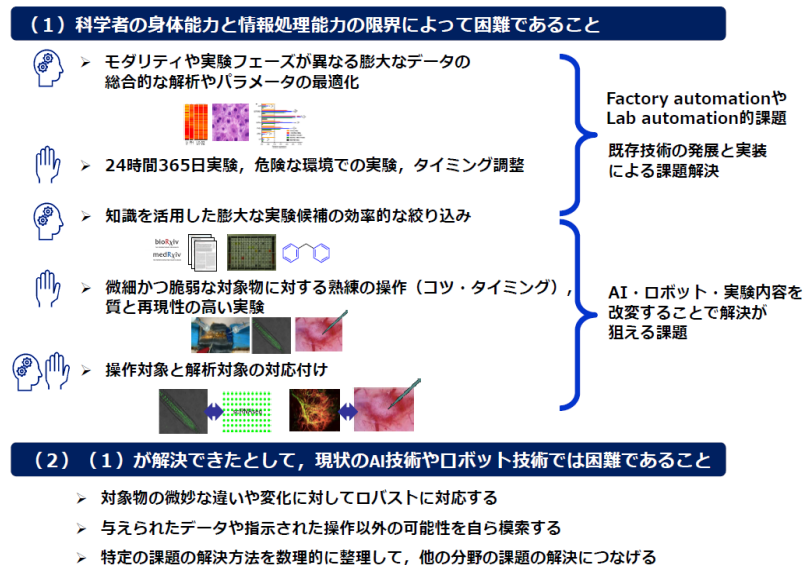
近年、SDGsへの関心の高まりもあり、個別化医療や作物の生産性向上などの研究が進んでいるが、人体や動植物には個体差があるため、現状のロボットで人間と同じレベルの対応をすることは難しく、研究者は、時には危険な環境下での実験や長時間の実験を強いられることがある。

例えば、植物に対する非生物的ストレスへの耐性を向上することで、収穫増や作物の品質向上、気候などの環境耐性向上を見込むバイオスティミュラント研究においては、1mm程度の微小な細胞にバイオスティミュラント候補となる化合物を投与して、その反応を計測する実験が行われる。人間がこのような微小かつ柔軟な対象物に対する実験を再現性高く実施するためには、熟練したスキルの習得が必要であるが、従来のロボットでは、対象の動植物が持つ個体差を吸収することが難しい。自己成長するロボットであれば、対象の個体差やスキルの差を極力吸収して条件を揃えた検証を数多くこなすことで、新たな物質の発見等に寄与できると期待されている（図表5）。

さらに、過去のデータから解析する従来のアプローチと強いAIによる新しいアプローチを組み合わせれば、まさに人間の科学者のように、解決すべき課題とそのアプローチの模索、実験を想定通りに行うコツの習得による再現性の高い実験の実現、および膨大な実験データを基にした洞察が可能となる。これにより、属人化していた理化学実験の形式化へと繋がり、慣例や既成概念にとらわれることなく、より良い解法を発見できる可能性も生まれ、人間とロボットの相補的な協調が一層進むだろう。

図表5 ムーンショット型研究開発事業目標3が目指す理化学実験へのロボット応用

実験における共通の課題



出所：日本ロボット第39回学術講演会（RSJ2021）資料
(<https://www.youtube.com/watch?v=Ajo4CW2blQo>)

(2) 災害時救助ロボット

災害により家屋の倒壊などが起きた場合は、事前に倒壊後の状況をデータとして入手できないため、ロボットが自律的に踏破することは難易度が高い。しかし、自己成長するロボットであれば、人間のように、瓦礫を除去したり、道をふさぐ倒れた柱を落としている棒などをテコにして持ち上げたりといった周囲環境の見極めと対処すべきことの優先度を自ら設定し、不測の事態にも臨機応変に対応する救助ロボットにすることができる。また、ゆくゆくは月面のような未知の領域、かつ劣悪な通信状況から遠隔操作が困難な場所での作業での活用にも期待されている。

今後の展望

(1) 寄り添うロボット

スマートフォンは、生活における様々なシーンや人間の成長過程に合わせたアプリケーションを選択でき、個々にフィットしたデバイスにすることができるが、あくまでディスプレイに投影した情報にすぎず、ソフトウェア面での適応にとどまる。そこで、状況に応じて形状を変えられる、ハードウェア面でもカスタマイズが可能なデバイスが開発されれば、時には楽器に、時にはキャッチボールの相手に、時には弱った足腰をサポートする車いすといった、人生に寄り添うパートナーのようなロボットが実現されるだろう。

(2) 自己増殖型・自己形成型ロボットへの展開

自己成長ができれば、その先には細胞分裂のように自分のコピーを自ら生み出して増殖し、さらに増殖してできたブロック群を複合的に組み合わせて生物のように自己形成していくロボットを作り出すことも可能となる。例えば、材料・エネルギーと設計図があれば、場所を問わずロボットを含むハードウェアを生産でき、ロジスティクスが不要な地産地消型経済にも寄与するだろう。

(3) 倫理的課題

人間と違って疲れないロボットが人間と同等の知識・創造力を持てば、人間の仕事が奪われるのではないか？といった懸念が生じる。全てをロボットがやってしまえば人間の高次の欲求である承認欲求・自己実現欲求を満たす機会が奪われる可能性もある。人間とロボットの作業バランスを保ちながら共存するルールが必要になるだろう。また、自己成長するロボットの活用先として真っ先に思いつくのは軍事分野だが、そうなった場合、ロボット軍隊や諜報活動での利用が考えられるため、核兵器と同等かそれ以上に慎重な議論を世界的に行う必要がでてくるだろう。これらは、技術が実現されてからでは遅く、開発と同時に到達点の変化を常に予測しながらアセスメントを行っていく、国家の枠を超えた体制づくりと検討が必要となるだろう。

➡ 自己成長するロボットに関する特許出願動向

ケミカルルーピング燃焼 —CO₂回収で注目の燃焼技術—

技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室 稲田雄二

ケミカルルーピング燃焼とは

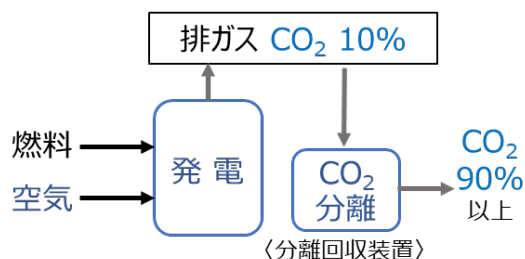
(1) CO₂分離回収技術として優れるケミカルルーピング燃焼

ケミカルルーピング燃焼（CLC：Chemical Looping Combustion）とは、燃料を燃焼させるのに空気を使う（空気燃焼）のではなく、金属粒子に吸着させた酸素との反応を利用する技術である。近年、脱炭素の観点から、発電所や化学プラントの排ガスから二酸化炭素（CO₂）を分離回収して貯留するCO₂回収・貯留（CCS）の実現に期待が高まっている。ケミカルルーピング燃焼は高効率にCO₂を分離回収する技術として注目されている。

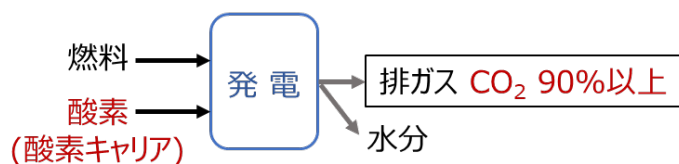
空気燃焼による石油や天然ガス火力発電での排ガスに占めるCO₂濃度は8～15%である。CO₂を貯留もしくは化学品製造などに利用するためには濃度を高める必要があり、そのためには排ガスからCO₂を分離回収する装置が必要になる（図表1-a）。一方、ケミカルルーピング燃焼による発電では、排ガスの90%以上をCO₂が占め、残りは水分なので、水分を凝縮させて取り除くだけで高濃度のCO₂を得ることができる。空気燃焼のようにCO₂分離回収装置を別途設置する必要がない（図表1-b）。設備費を低減できるほか、CO₂分離回収に必要なエネルギーも小さいため、発電効率を大幅に落とすこともない。発電所の経済性を維持しながらCO₂を分離回収する技術として期待される。

図表1 燃焼方法によるCO₂回収方法の違い

1-a 空気燃焼ではCO₂分離回収装置が必要



1-b ケミカルルーピング燃焼ではCO₂分離装置は不要



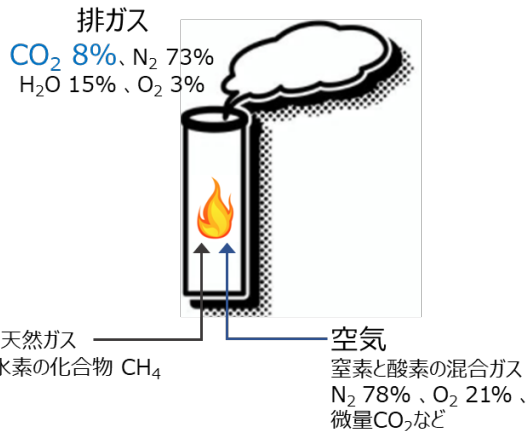
出所：三井物産戦略研究所作成

(2) ケミカルルーピング燃焼の仕組み

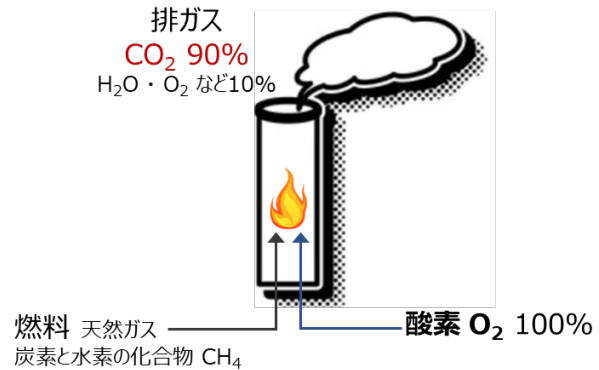
空気は窒素（N₂）78%、酸素（O₂）21%とその他CO₂などの混合ガスであり、例えば天然ガスの空気による燃焼では排ガス中のN₂濃度が70%を超え、CO₂は約10%程度になる（図表2-a）。一方、O₂だけで燃料を燃焼させると排ガスにはN₂が含まれず、CO₂が90%と大部分を占め、水や未燃焼分のO₂が10%程度残る（図表2-b）。また、燃焼に必要なO₂だけを供給するため、排ガス量そのものが空気燃焼に比べて少なくなる。

図表2 空気燃焼と酸素燃焼の違い（天然ガス燃料の場合）

2-a 空気燃焼



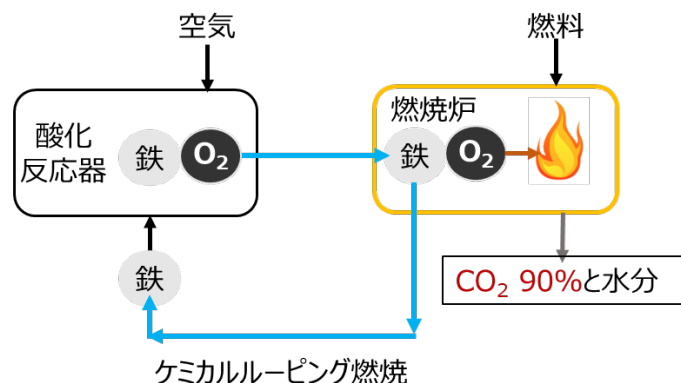
2-b 酸素燃焼



出所：公益財団法人地球環境産業技術研究機構「二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書（平成18年3月）」等から三井物産戦略研究所作成

ここで課題となるのはO₂をいかに効率的に作るかである。これまでも酸素燃焼による石炭火力発電所の実証的な設備はあったが、多くは深冷分離法が採用されてきた。深冷分離法は、空気をマイナス200℃近くまで冷却しO₂を分離するため、エネルギーを大量に消費してしまう。これに対しケミカルルーピング燃焼は、「酸素キャリア」となる金属（鉄や銅など）を含む鉱物の細かな粒子を酸化し、その粒子を燃料に接触させて燃焼させる方法である（図表3）。酸素キャリアはまず酸化反応器で空気に接触して酸化される。次に燃焼炉で燃料と接触して酸素キャリアが運び込んだ酸素が燃焼する。O₂を失った酸素キャリアは、再び酸化反応器で酸化され、燃焼炉へ投入、燃焼サイクルを繰り返す。酸素キャリアを用いた酸化還元の化学反応（Chemical Reaction）を利用すること、繰り返し循環（Looping）して燃焼させることからケミカルルーピング燃焼（CLC）と呼ばれている。

図表3 ケミカルルーピング燃焼の仕組み



出所：三井物産戦略研究所作成

CLCでは酸化反応器中で酸素キャリアに酸素を取り込むことが容易なため、深冷分離法のように多大なエネルギーを消費することなくO₂を燃焼炉に供給できる。また、前述のとおりO₂のみを燃焼に供給するので理論的には排ガス中の成分はCO₂が90%、残りは水となる。

有望な活用分野

(1) 火力発電へのケミカルルーピング燃焼の適用

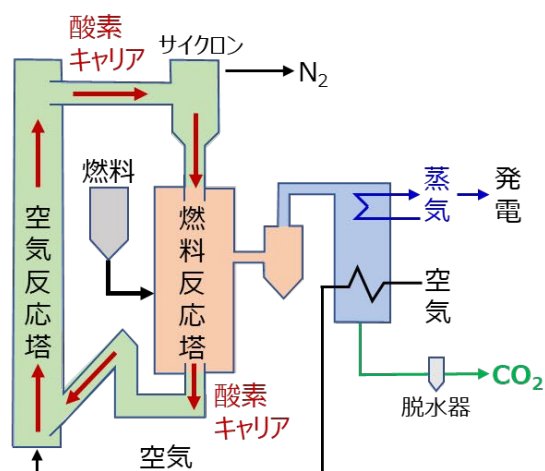
酸素キャリアを使って燃料を燃焼させる仕組みは米国で発明されたが、ケミカルルーピング燃焼という名称を論文のタイトルで初めて採用したのは東京工業大学の石田愈名誉教授であった。1994年の論文発表当時は酸素燃焼により窒素酸化物（NO_x）の発生を抑制することが研究の目的で、主に大学を中心に基礎研究が続けられていた。

今日では、ネットゼロエミッション達成においてCCSの重要性が高まり、CLCはここまで説明してきたとおりCO₂を高効率に回収する燃焼技術の一つとして欧米を中心に開発が進められている。

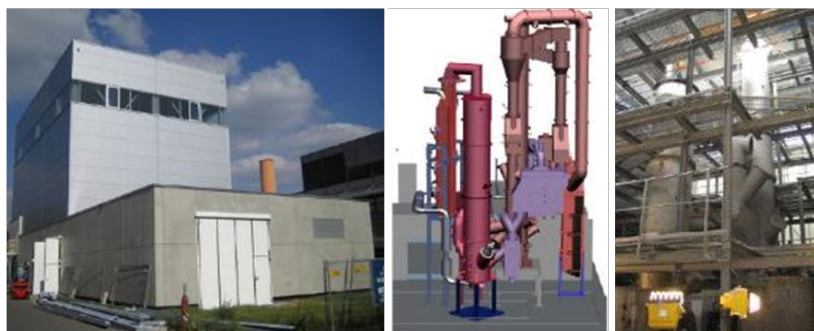
実際のCLCによる発電装置は空気反応塔と燃料反応塔で構成され、それら反応塔を酸素キャリアが循環する（図表4）。酸素キャリアは空気反応塔で酸化し、気体と固体を分離するサイクロン装置でN₂と分離され、酸素キャリアだけが燃料反応塔に送り込まれ、燃料と接触し燃焼する。この燃焼熱で蒸気をつくり、蒸気タービンで発電するのがCLC発電プラントである。

図表4 ケミカルルーピング燃焼の装置イメージ

4-a 発電プラントのイメージ



4-b 実際の装置例



出所：a：三井物産戦略研究所作成

b：Alstom (https://ieaghg.org/docs/General_Docs/OCC2/Abstracts/Abstract/occ2Final00050.pdf)

CLCの核となる要素技術はいかに効率良く酸素を燃料反応塔に供給するかであり、酸素キャリアの選択が重要となる。金属酸化物が有望視されており、酸素の運搬量とコストの両面から最適な物質の追求が進められている（図表5-a）。研究されている物質として、鉄系（Fe₂O₃/Fe₃O₄（酸化後/酸化前の物質名））、銅系（CuO/Cu）、マンガン系（Mn₃O₄/MnO）など単一金属のほか、銅-マンガン系（CuMnO₃）のような複数の金属を組み合わせる複合酸化物がある（図表5-b）。いずれも担体（土台）としてアルミナや酸化チタンなどを用い、その表面にキャリアとなる金属を付着させた粒子状の物質となる。

図表5 酸素キャリアの性能と代表例

5-a 酸素キャリアに求められる性能

- 酸素および燃料と高い反応性を有する
- 燃料を完全にCO₂と水とに転換する能力を有する
- 高温に耐える
- 粒子が凝集し難く、粉砕や摩耗に対して強い
- 生産コストが低く、環境への影響が小さい

5-b 酸素キャリアの代表例

- 合成粒子
- Fe₂O₃/Fe₃O₄、Mn₃O₄/MnO、CuO/Cu、複合酸化物（CuMnO₃など）
：担体にアルミナや酸化チタンを使用
- 天然鉱石
- 鉄鉱石、マンガン鉱、イルメナイト

出所：一般財団法人エネルギー総合工学研究所「季報エネルギー総合工学 第33巻第1号（2010）」から三井物産戦略研究所作成

酸素キャリアに鉄系を採用することは、製鉄所で鉄鉱石を還元する際の反応と原理的に同じである。しかし、製鉄所は得られた高温熱を連続して還元反応に再利用しており、発電を行わない。CLCではいかにキャリアを使って継続的に酸素を供給するかが課題となる。鉄とマンガンは低コストだが酸素との反応性が低く、そのため酸素運搬性能が低い。一方、銅はコストは高いが反応性が高いため酸素運搬性能も高いといった特徴がある。

人工的な合成粒子のほかには、鉄鉱石やマンガン鉱、イルメナイトなどの天然鉱石そのものを粉末化して酸素キャリアに使うことも研究されている。有望視されているのがイルメナイト（鉄とチタンが混合した鉱石）で、鉄成分が酸素キャリアとして機能する。イルメナイトはチタンの原料で資源量も多く低コストで調達できることから、CLCの商業プラントでの使用が考えられている。

現在、欧米を中心に120kWth⁹から3MWthの規模でCLCの実証試験が行われており（図表6）、中でも欧州と中国の共同開発であるプロジェクト「CHEERS」は2022年運転開始を目標に3MWthの試験機設置を計画。米国ではBabcock & Wilcox社とOhio State Universityが共同開発で、種々の燃料からCLCを用いて水素や合成ガスを製造する独自プロセス「Bright Loop」の商業化を目指している。

図表6 ケミカルループ燃焼の技術開発例

研究機関、企業	開発概要
(欧州) SINTEF、(仏) Energies Nouvelles (中国) Dongfang Boiler、(中国) 精華大学 等	プロジェクト名「CHEERS」。150kWth 試験装置で酸素キャリアとして酸化銅を用い、メタン燃焼を試験。中国に3MWthのCLC試験機設置を計画、2022年運転開始予定。
(独) The Technical University of Darmstadt	1MWthの試験機で石炭のCLCを開発中。空気反応塔は内径0.6m 高さ8.7m、燃料反応塔は内径0.4m 高さ11.4m。運転立ち上げにプロパンガスを使用。
(オーストリア) Vienna University of Technology	120kWthの試験機で天然ガス、合成ガス等を燃料とし、イルメナイトやニッケル系の酸素キャリアを用いCLC検証を実施。
(米国) GE/Alstom	米国DOEプロジェクトでCa 酸素キャリアによる3MWth 試験を2017 年まで実施。10MWt へのスケールアップを検討中。
(米国) Babcock & Wilcox, Ohio State University	バイオマス、天然ガス、石炭からCLCで水素や合成ガスを製造するプロセス「Bright Loop」の開発で提携。
(日本) NEDO事業：大阪ガス、石炭フロンティア機構	2024年度末までに、石炭、バイオマスを燃料に300kWth規模で電力と水素を製造するCLCプロセス実証を行う。2025年以降にプラント商用化を目指す。

出所：各社ウェブサイト等を基に三井物産戦略研究所作成

⁹ kWthはkW-thermalの略で、1kW相当の熱供給を示す。電気供給と識別するために用いられる。

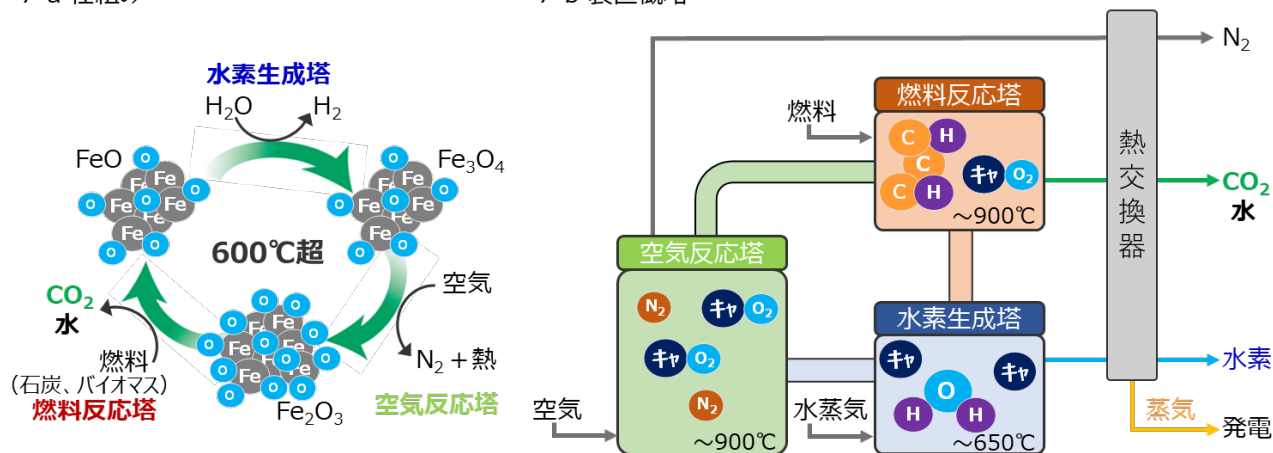
(2) 水素製造のケミカルルーピング燃焼への組み込み

大阪ガスと石炭フロンティア機構は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）事業で水素生成を組み込んだCLCの技術開発に取り組んでいる。酸化鉄の酸化反応で水から水素（ H_2 ）を生成する水素生成塔を組み込んだもので、高温熱による発電と水素製造、高濃度 CO_2 の回収を実現するプロセスである（図表7）。燃料反応塔で燃料を燃焼させ酸素を失った酸化鉄（ FeO ）は、水素生成塔で高温の水蒸気に触れると水蒸気から O_2 を奪い、 H_2 を生成する。その後、なお酸素不足の状態にある酸化鉄（ Fe_3O_4 ）は、空気反応塔で空気に触れて O_2 を得て、燃料との反応前の状態に戻り（ Fe_2O_3 ）再び燃料反応塔から始まるループを繰り返すことができる。

図表7 水素生成を含むケミカルルーピング燃焼の仕組み

7-a 仕組み

7-b 装置概略



出所：大阪ガス資料から三井物産戦略研究所作成

装置としては、空気および燃料反応塔に水素生成塔が加わり、各塔からの排熱で蒸気を作り発電、燃料反応塔から高濃度の CO_2 が排出、水素生成塔から H_2 が生成される。NEDO事業では石炭やバイオマスを燃料に使い、投入エネルギー量が約300kWとなる試験装置を製作予定で、 H_2 の製造能力は毎時約35 m^3 、2025年以降の商用化を目標に開発が進められている。2021年12月には反応塔間の酸化鉄循環を検証する高さ10mの亚克力樹脂製プラント（コールドモデル）を導入、2022年度末までに燃料や金属化合物の選定、反応条件といった要素技術の開発や300kW試験装置の設計にめどを付ける計画とのことである。

今後の展望

(1) 実用化に向けた課題

CLCには、酸素キャリア粒子の性能や劣化、粒子が設備に与えるダメージ、スケールアップなどの課題がある。酸素キャリアの性能向上に向けさまざまな材料が試験され、酸素供給量が多く、長寿命で低コストな素材の探求が続けられている。設備面でも摩耗を防ぐ配管設計や、損傷部を適切なタイミングで交換するなどの運用での対応が模索されている。実証試験が各国研究機関や民間企業等で実施されており、早期

に技術課題が解決されることが期待される。

(2) 商用化に向けた展望

CLCは、CO₂回収で有利なことに加え、発電しながら水素を製造する技術も開発されつつある。技術開発の進展によってはCO₂回収設備が必要な従来型の発電システムに代わる可能性がある。しかし、現状はパイロットプラントで数百kW規模での実証試験であり、今後5～10年程度でスケールアップが可能なのは数MW規模と推定される。したがって、CO₂回収設備が不要というコスト面での有利さが明らかになった上で、商用化が最も近いと見込まれるのは数MW規模のバイオマス発電や、化石燃料を使用する分散型の小型火力発電への適用ではないかと考えられる。

 ケミカルルーピングに関する特許出願動向

センサー化する植物 ーデジタル技術により生まれた新たなデバイスー

技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室 野崎駿介

センサー化する植物とは

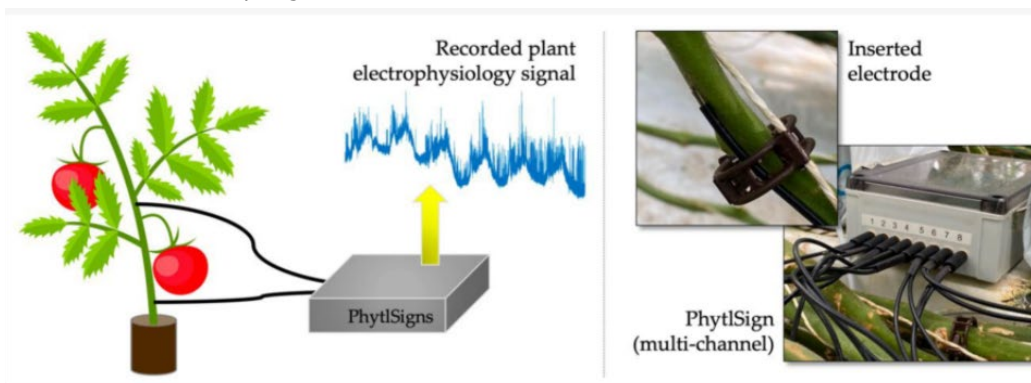
センサー化する植物とは、センサーとしての機能を付加した植物のことである。近年の植物生理学の進歩に加え、遺伝子工学やナノテクノロジー、AIといった技術を組み合わせることにより、外部環境の変化に対する植物の応答を感知し、情報として検出することが可能になりつつある。様々な方法で植物に改変を加え、その機能の幅を押し広げていくことで、農業以外の産業へも波及していくと考えられる。

(1) Speaking Plant Approach

植物は、害虫や干ばつなどでストレスを受けると生体電位が変化することが知られている。この反応を、人間でいう心電図のようにリアルタイムに測定できれば、植物の活動状態を把握できる。この概念「Speaking Plant Approach (SPA)」を農業分野へ適用することは、数十年前から提唱されている。SPAとは、様々なセンサーを用いて作物の生育状態を把握・診断し、栽培環境を適切に制御することであり、昨今、センサーやロボットの技術、AIなどの発展により現実化してきている。栽培環境がきちんと制御できることが前提となるため、環境制御型農業で活用され始めている。

日本では、光合成の活性度合いを測定し、栽培環境へフィードバックするシステムをPLANT DATAが提供している。またスイスのViventは、「植物のFitbit」と称して、Phyt1Signsというセンシングのシステムを提供している（図表1）。スマート農業で使われる技術は、土壌中の水分や施肥量などのデータから作物の状態を間接的に測定するものが多く、見た目が悪化してから栽培条件へフィードバックすることになるが、同システムにより、農家は作物がストレスを受けた時点で直接把握できるため、すぐに手が打てる。

図表1 スイスVivent社 Phyt1Signsの概要



出所：Applied Sciences Volume 11 Issue 4, Classification of Plant Electrophysiology Signals for Detection of Spider Mites Infestation in Tomatoes (<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1414/htm>)

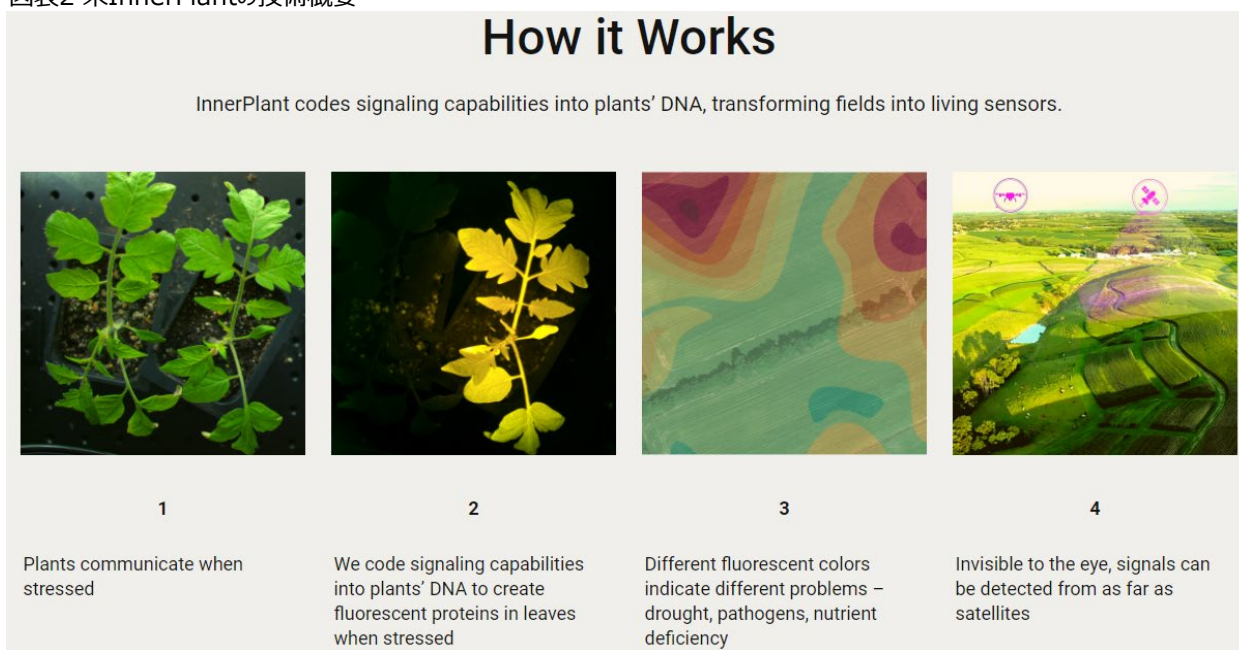
(2) 生物学的改変によるセンサー化

ストレスを受けると蛍光タンパク質が発現する遺伝子を植物に組み込むといった生物学的改変を行い、センサーとして活用することが検討されている。これにより、害虫などによるストレスで植物が通常とは違う状態になった場合、それを可視化できる。ただし、植物に蛍光タンパク質遺伝子を組み込む技術は目新しいものではなく、デジタル技術との掛け合わせが重要となる。最近ではスマートフォンなどのデバイスやドローンが普及し始め、撮影にかかるコストは以前よりも低くなっており、この点が社会実装を促進する要因となっている。代表的な事例として、米InnerPlantによる取り組みが挙げられる。同社は、トマトや大豆などの作物に上記の遺伝子技術を活用し、農業におけるセンサー化技術の展開をねらう（図表2）。これは、TIME誌によるTHE BEST OF INVENTIONS OF 2021にも取り上げられ注目されている。

一方で、同社の開発品種は遺伝子組み換え作物に当たると考えられるため、商業化には規制当局の認可が必要となるだろう。また、ビデオやスマートフォン、衛星などで観察するリモートセンシング技術を用いて検知するのに十分な量のタンパク質が作物に蓄積されていなければならない。

こうした課題はあるものの、ストレス検知が可能な作物を畑に配置できるようになれば、ストレスを精密にマッピングし、農薬の散布量や散布時期などの最適化が図れるだろう。

図表2 米InnerPlantの技術概要



出所：InnerPlantウェブサイト (<https://innerplant.com/products/>)

(3) 機械的改変によるセンサー化

機械的改変とは、導電性高分子やカーボンナノチューブといった高機能材料などを植物に組み込み、植物をデバイス化するものである。これにより、従来は植物になかった機能を発現させることができる。しかし、機械的改変によるセンサー化に関してはまだ研究段階にあるものが多い。社会実装には、植物自体

に大きな損傷を与えないナノテクノロジーとの組み合わせが重要になる。ナノテクノロジーとは、ナノメートル（10億分の1メートル）のオーダーという、肉眼では見えない非常に微細なレベルで物質の構造を制御する技術である。

スウェーデンのリンショーピン大学は論文「Electronic Plant」で、植物の葉や茎に導電性高分子を組み込み、植物全体に電気を流すことに成功、植物の内部に電子回路を作製できる可能性があることを示した。この研究結果を契機に、植物の機械的改変によるセンサー化の検討が加速した。米MITのStrano教授のグループは、ナノテクノロジーを組み合わせることで植物に新たな機能を付加する研究分野をPlant Nanobionicsと名付け、活発に研究を進めている。

2021年には、Singapore-MIT Alliance for Research and Technology (SMART) が同技術を用いて土壌中のヒ素を検出する研究成果を発表した。SMARTは、ヒ素に反応するように改質したカーボンナノチューブをセンサーとして植物に組み込んだ。土壌中のヒ素は作物自体に大きな悪影響を与えるうえ、それに汚染された作物を食べる人にも健康被害を及ぼす。SMARTの研究成果を活用すれば、センサー化した植物が土壌からヒ素を吸収した際に信号を発するため、それをスマートフォンのカメラでとらえることで、リアルタイムに検出することができる（図表3）。

図表3 センサー化した植物によるヒ素検出イメージ

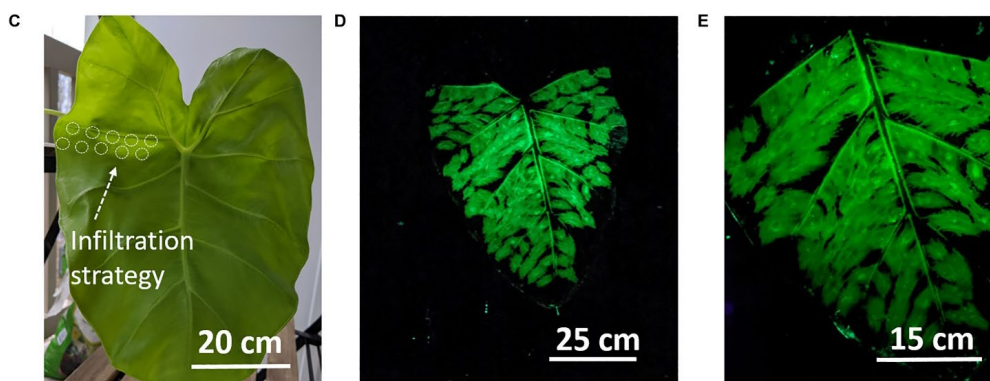


出所：MIT News

(<https://news.mit.edu/2020/plant-nanobionic-sensor-monitor-arsenic-levels-soil-1213>)

また、MITは植物にアルミン酸ストロンチウムという蓄光性の無機化合物のナノ粒子を組み込み、発光させる技術も実現している（図表4）。葉の気孔からナノ粒子を注入して内部に蓄積させ、コンデンサ（電気を蓄えたり放出したりすることができる電子部品）として機能させる。改変した植物にLED照明を10秒間当てることで、その後1時間発光し、少なくとも2週間はそれを繰り返し行えることが実証されている。本研究が進めば、日中、太陽光に照らされた植物を、夜間に照明として利用できるようになる可能性がある。

図表4 蛍光ナノ粒子により光る植物



出所：Science Advances Vol.7, No.37 Augmenting the living plant mesophyll into a photonic capacitor
 (https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abe9733#)

図表5 センサー化する植物の事例まとめ

分類	手段	概要	企業/研究機関	活用例
①Speaking Plant Approach	機械学習、AI	蛍光クロロフィルの測定による光合成のリアルタイム測定	(日) PLANTDATA	環境制御型農業
		<ul style="list-style-type: none"> 植物のFitbit: PhytSigns 植物の生体電位の測定よりストレスを検知 2021年にBayerとの提携や180万ユーロの調達を発表 	(スイス) Vivent	農業
②生物学的改変によるセンサー化	遺伝子工学	<ul style="list-style-type: none"> ストレスにより蛍光シグナルを出すように遺伝的に改変 2021年に570万ドルを調達したと発表 	(米) InnerPlant	農業 (トマト、大豆)
③機能的改変によるセンサー化	導電性高分子	植物の葉や茎に導電性高分子を組み込み、植物全体に電気を流すことで変色などの制御	(スウェーデン) リンショーピン大学	エレクトロニクス
	カーボンナノチューブ	カーボンナノチューブを植物へ組み込み、土壌中のヒ素を検出可能	Singapore-MIT Alliance for Research and Technology	土壌センサー
	ナノ粒子	植物の葉に蛍光ナノ粒子を埋め込み、LEDを10秒間当てて1時間の発光に成功	MIT	照明

出所：各社ウェブサイトおよび論文を基に三井物産戦略研究所作成

有望な活用分野

(1) 農業分野

センサー化した植物の有望な活用分野として、スマート農業が挙げられる。この分野では、IoTなどのセンサー類や、ドローンや衛星画像から得られる情報とそれらのデータを分析する機械学習技術を組み合わせている。スマート農業との組み合わせは、InnerPlantの事例を代表に、注目を集めている。栽培条件に対する作物の反応を直接測定でき、リアルタイムで栽培に反映可能な点が、SPAや生物学的改変によるセンサー化の特徴である。そのため、まずはこの特徴を活かすことができる分野を中心に技術開発が進むだろう。例えば、栽培環境や条件を積極的に制御することが可能な環境制御型農業を中心に、さらなる生産の効率化を目指すことが考えられる。屋外農業では作物の栽培環境を制御することは難しいものの、従来の技術よりも早い段階で作物の状態が悪化する予兆を捉えることができるため、収量の減少や過剰な農薬散布の防止などが期待できる。

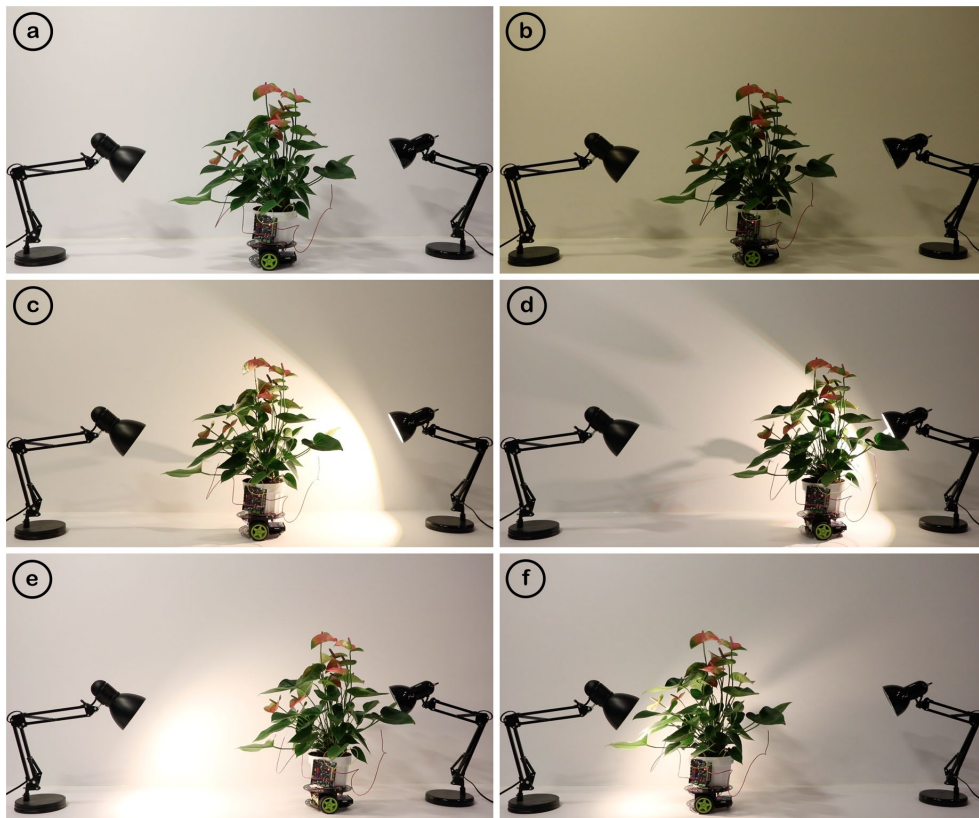
その他にも、作物のストレスを直接検知できることからストレスに強い作物の品種開発や、農薬の効果を定量的に示すことができれば新しい農業資材の開発に貢献することも考えられる。

(2) 環境エネルギー分野

植物とナノテクノロジーやエレクトロニクスを組み合わせた機械的改変によるセンサー化により、環境センサーや照明として使用できることが研究レベルで明らかになりつつある。植物は光合成によりエネルギーを蓄え、再生する。このような特徴を合わせて活用することができれば、環境負荷の低いセンシング技術を展開できる。

ロボットとの組み合わせも検討されており、MITでは光に向かって自律的に移動する植物を実験的に作り出した(図表6)。光が当たると植物の茎や葉から発生する電気信号をロボットが読み取り、光の方向を判断し、移動するというものだ。外部からの刺激で植物を動かせることを証明している。

図表6 光に向かって動く植物「Elowan」



出所：MIT Media Labウェブサイト

(<https://www.media.mit.edu/projects/elowan-a-plant-robot-hybrid/overview/>)

今後の展望

植物をセンサーとして機能させることに関しては研究が進み、有望な結果も出始めており、現在、社会実装を検討する段階にある。まずは環境制御型農業やスマート農業に適用し、植物から直接得たデータを基にしたビジネスが期待できる。


中長期的には、機械的改変により環境センサーや照明としての活用の検討が進み、環境・エネルギー面でも貢献していくものと考えられる。

ただし、実用化に向けては以下の課題が残る。

①SPAは、主に植物工場などの環境制御型農業において検討されているが、導入コストに見合う成果が得られるか。

②生物学的改変によるセンサー化では、当該技術を支援する種子会社との提携や、遺伝子組み換え作物に該当することで当局の承認を得る必要が生じる。技術的には、ドローンや衛星による画像で判別するのに十分なセンサー出力が見込めるか。

③機械的改変によるセンサー化では、植物と組み合わせる電子機器の耐久性や、植物自体が枯死した場合に環境汚染源となり得ること。

 植物センサーに関する特許出願動向

「2022年に注目すべき技術」に関する知財レポート

技術・イノベーション情報部 知的財産室 松浦由依

本稿では、「2022年に注目すべき技術」に取り上げられた5つのテーマについて特許の国際動向を調査・分析しレポートする。すべての調査・分析はPatSnap社が提供するグローバル特許検索・分析ツールであるPatSnap Analyticsを利用して実施した。

特許出願は、原則として出願日から1年6月経過後に公開される。そのため2022年1月現在、2020年以降の特許出願の一部は公開されていない。しかし、「2022年に注目すべき技術」レポートの性質上、最新の特許出願状況を参照することが好ましいと考え、2020年以降の特許出願件数については予測値または参考値として掲載している。

6Gに関する特許出願動向

6G関連特許の国際動向を調査・分析するため、グローバルな特許情報を対象に母集団を作成する。今回は下記の検索式を使用した。

検索式：

IPC (国際特許分類) = H04W (無線通信ネットワーク) AND 出願年 = 2018 年以降

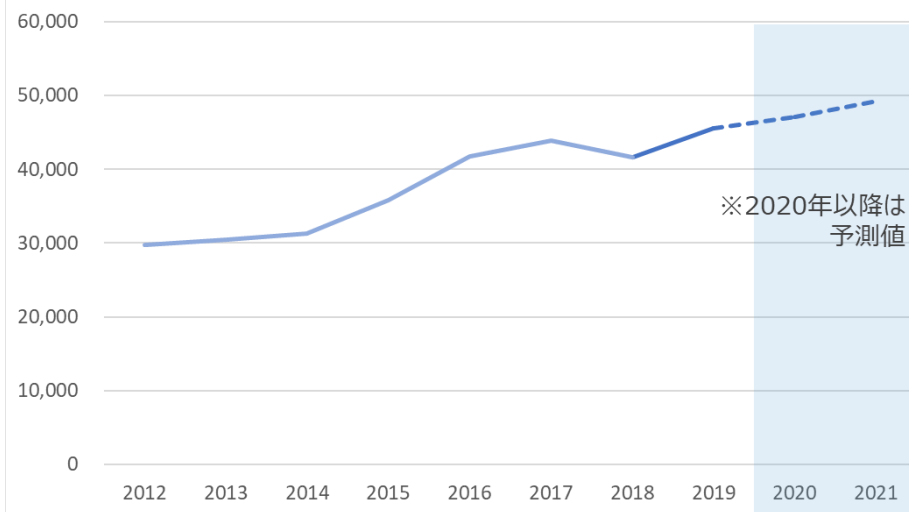
実施日：2021年12月28日

この検索式により、147,594特許ファミリー（合計345,577件）からなる母集団が作成された。

IPC (International Patent Classification、国際特許分類) は、すべての特許出願に対して特許庁により付与される記号である。今回はIPC: H04W (無線通信ネットワーク) が付与された特許出願のうち、Beyond 5Gの検討に移行した時期を考慮し2018年以降のものを調査対象とした。なお、2018年以降のIPC: H04Wが付与された特許出願すべてが6Gに関するものとは言えないが、6G関連特許を明確に分けることが困難なためこの検索式を採用した。

まず、6G関連特許のグローバルな出願動向を図表1に示す。

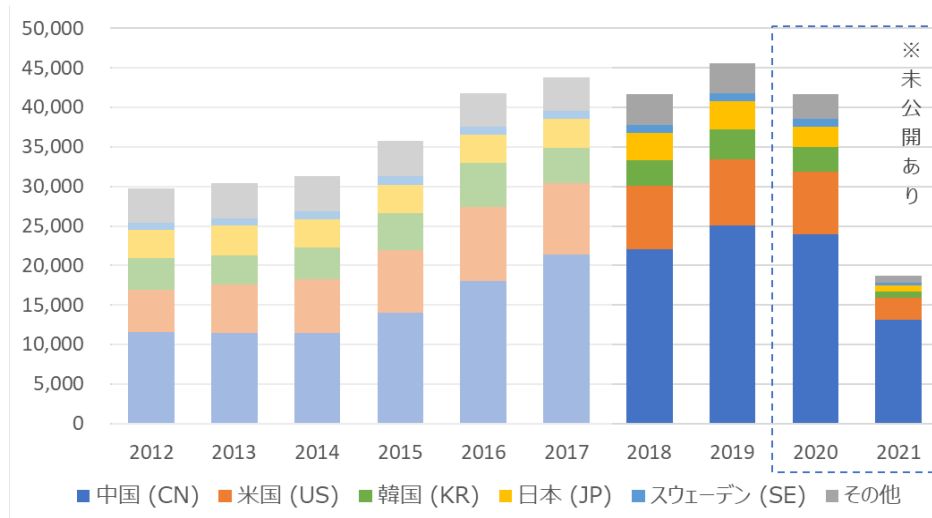
図表1 6G関連特許の出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表1に示すように、IPC：H04W（無線通信ネットワーク）が付与された特許出願は5Gの検討時期も含め増加傾向にある。6G関連特許も増加傾向にあり、2020年以降も出願件数は増え続けると予測される。

続いて、6G関連特許の国・地域別出願動向を図表2に示す。図表2における国名は、現出願人（権利者）の住所を指す。たとえば、日本（JP）であれば、日本国内に住所のある出願人、すなわち日本企業等による出願を意味する。2020年以降はまだ特許公開されていない出願が存在するが、参考値として記載する。

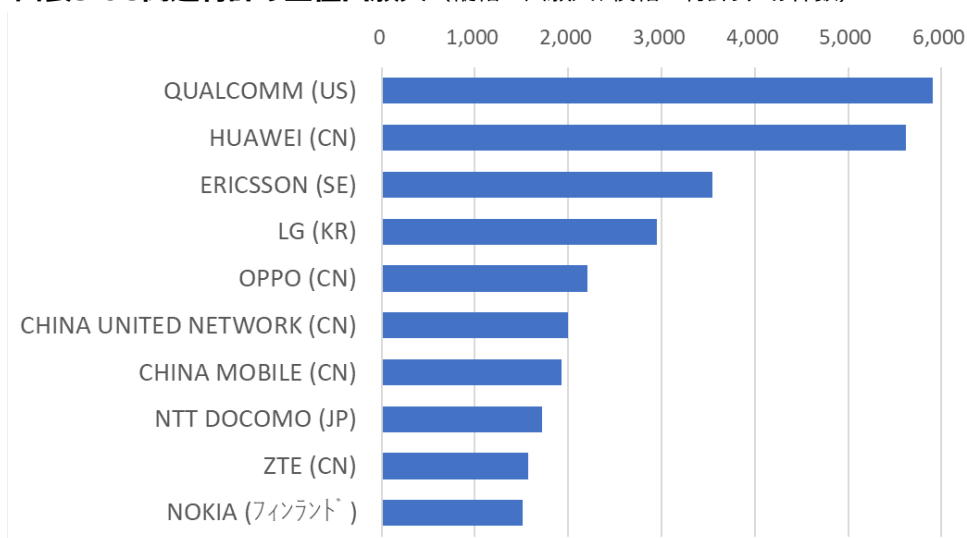
図表2 6G関連特許の国・地域別出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表2に示すように、6G関連特許は中国からの出願が最も多く、次いで米国、日本、韓国、スウェーデンという順になる。出願比率は、中国からの出願が約57%、米国からの出願が約18%、韓国からの出願が約8%、日本からの出願が約7%、スウェーデンからの出願が約2%、その他が約8%である。

続いて、6G関連特許の出願件数が多い上位出願人を図表3に示す。

図表3 6G関連特許の上位出願人（縦軸：出願人、横軸：特許ファミリ件数）



図表3によれば、Qualcomm (US) とHuawei (CN) が2強で、残りの企業がそれを追う形になっている。上位10社のうち5社を中国企業が占め、中国 vs. 他国の6G覇権争いの様子がうかがえる。

続いて、6G関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国/日本）別出願先国・地域を図表4に示す。たとえば、中国出願人が1つの発明を中国に出願した場合、その出願を基礎として外国に出願することができる。このように1つの発明を複数の国へ出願した「特許出願のまとめり」を特許ファミリと呼ぶ。

図表4 6G関連特許の国別出願先国・地域

現出願人（権利者）の住所	出願先国・地域	ファミリ件数
中国	中国	79,092
	WIPO	20,127
	米国	9,139
米国	米国	24,579
	WIPO	14,954
	中国	7,240
韓国	韓国	7,788
	WIPO	5,978
	米国	4,661
日本	日本	6,641
	WIPO	6,186
	米国	4,837

図表4におけるWIPOとは、世界知的所有権機関（WIPO）が所管する特許協力条約（PCT）に基づく国際特許出願を指す。PCT国際特許出願をしていることは、出願人が自身の発明について国際的に特許保護を求めていることを示している。

図表4における「米国」を例に説明すると、米国内に住所のある出願人が、6G関連特許24,579件を自国に出願している。これを「国内出願」と呼ぶ。そして、これらの国内出願を基礎としてPCT国際特許出願を14,954件、中国への出願を7,240件している。これらを「外国出願」と呼ぶ。なお、1件の国内出願を基礎

として複数の外国出願をすることが可能である。自国への出願数と出願先第2位への出願数より、米国の外国出願率を約61%と計算する。

同様に、中国の外国出願率は約25%、韓国の外国出願率は約77%、日本の外国出願率は約93%である。中国は最も出願件数が多いが他国に比べて外国出願率は低い。6G技術の世界展開するには外国出願は必須となる。

続いて、6G関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国/日本）別上位出願人を図表5に示す。

図表5 6G関連特許の国別上位出願人

現出願人（権利者）の住所	上位出願人	ファミリー件数
中国	HUAWEI	7,919
	OPPO	4,334
	ZTE	2,272
米国	QUALCOMM	6,898
	APPLE	1,363
	INTEL	1,035
韓国	LG	3,349
	SAMSUNG	2,877
	韓国電子通信研究院	514
日本	NTT DOCOMO	1,962
	SONY	966
	SHARP	902

図表5に示す中国上位出願人3社のみで計算すると外国出願率は約97%であり、やはり世界で6G覇権を取るための特許戦略を展開していることがわかる。

分子機械に関する特許出願動向

分子機械関連特許の国際動向を調査・分析するため、グローバルな特許情報を対象に母集団を作成する。今回は下記の検索式を使用した。

検索式：

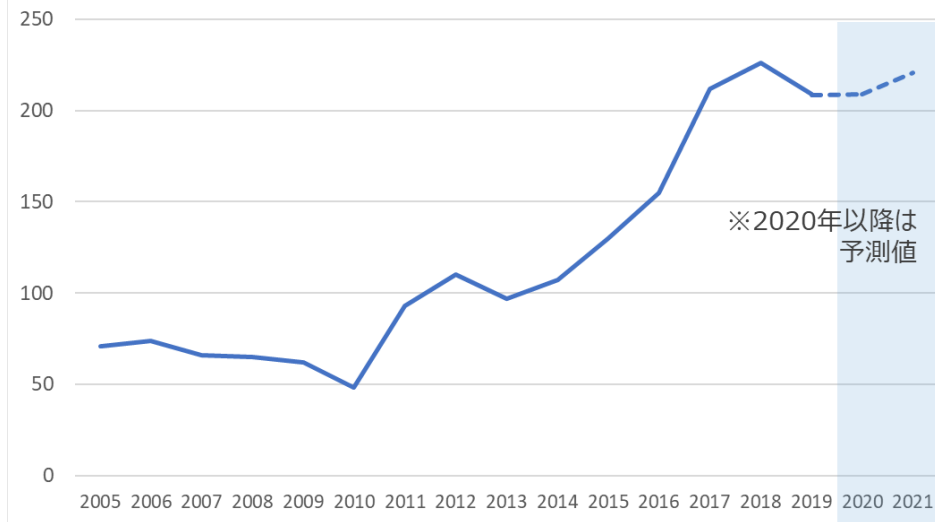
テキスト（発明の名称/要約/請求項） = “Molecular Machine/ Motor/ Propeller/ Switch/ Shuttle/ Balance/ Tweezers/ Sensor/ Logic gate/ Assembler/ Hinge” OR “Nanocar”

実施日：2021年12月28日

この検索式により、2,511特許ファミリー（合計5,861件）からなる母集団が作成された。

まず、分子機械関連特許のグローバルな出願動向を図表6に示す。

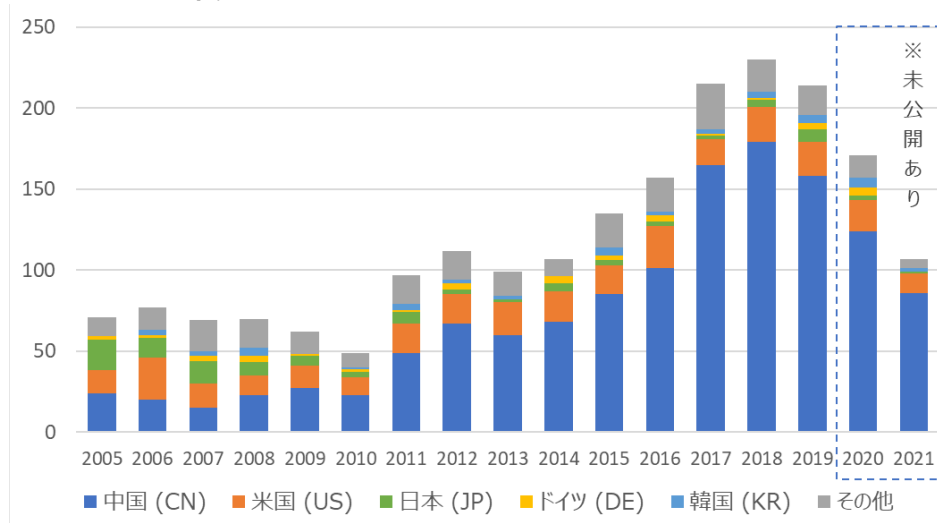
図表6 分子機械関連特許の出願動向（縦軸：特許ファミリ件数、横軸：出願年）



図表6に示すように、分子機械関連特許は2010年以降増加傾向にあり、2020年以降も大きく件数が落ち込むことはない予測される。

続いて、分子機械関連特許の国・地域別出願動向を図表7に示す。図表7における国名は、現出願人（権利者）の住所を指す。たとえば、日本（JP）であれば、日本国内に住所のある出願人、すなわち日本企業等による出願を意味する。2020年以降はまだ特許公開されていない出願が存在するが、参考値として記載する。

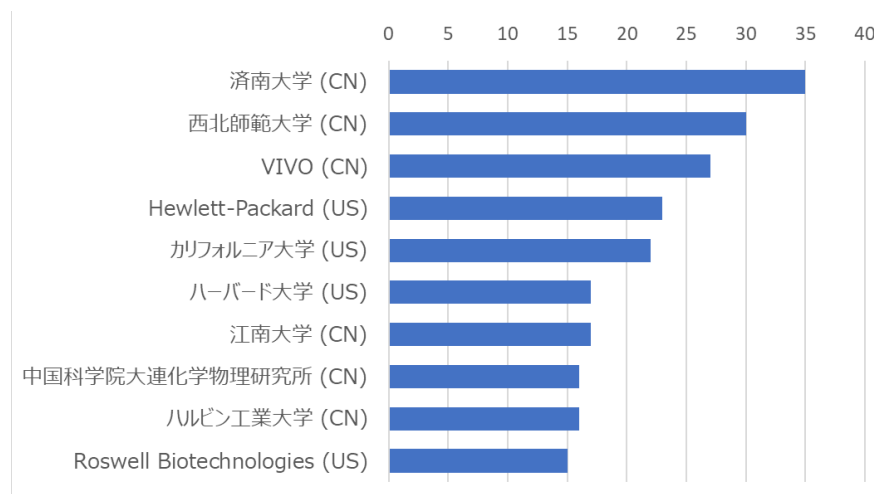
図表7 分子機械関連特許の国・地域別出願動向（縦軸：特許ファミリ件数、横軸：出願年）



図表7に示すように、分子機械関連特許は中国からの出願が最も多く、次いで米国、日本、ドイツ、韓国という順になる。出願比率は、中国からの出願が約59%、米国からの出願が約17%、日本からの出願が約6%、ドイツからの出願が約2%、韓国からの出願が約2%、その他が約15%である。

続いて、分子機械関連特許の出願件数が多い上位出願人を図表8に示す。

図表8 分子機械関連特許の上位出願人（縦軸：出願人、横軸：特許ファミリー件数）



図表8において4位にランクインしているHPは2004年には9件の分子機械関連特許を出願していたが、2010年の1件を最後に以降の出願はなされていない。そこで、最近の研究・開発の状況を見るため、ここからは2015年以降の特許出願に限定して動向を確認する。

2015年以降の特許出願について、分子機械関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国）別出願先国・地域を図表9に示す。たとえば、中国出願人が1つの発明を中国に出願した場合、その出願を基礎として外国に出願することができる。このように1つの発明を複数の国へ出願した「特許出願のまとめり」を特許ファミリーと呼ぶ。

図表9 分子機械関連特許の国別出願先国・地域

現出願人（権利者）の住所	出願先国・地域	ファミリー件数
中国	中国	888
	WIPO	21
	米国	20
米国	米国	132
	WIPO	114
	ヨーロッパ	68
韓国	韓国	25
	米国	9
	WIPO	9

図表9におけるWIPOとは、世界知的所有権機関（WIPO）が所管する特許協力条約（PCT）に基づく国際特許出願を指す。PCT国際特許出願をしていることは、出願人が自身の発明について国際的に特許保護を求めていることを示している。

図表9における「米国」を例に説明すると、米国内に住所のある出願人が、分子機械関連特許132件を自国に出願している。これを「国内出願」と呼ぶ。そして、これらの国内出願を基礎としてPCT国際特許出願を114件、ヨーロッパへの出願を68件している。これらを「外国出願」と呼ぶ。なお、1件の国内出願を基礎として複数の外国出願をすることが可能である。自国への出願数と出願先第2位への出願数より、米国の

外国出願率を約86%と計算する。

同様に、中国の外国出願率は約2%、韓国の外国出願率は約36%である。中国は最も出願件数が多いが外国出願率は低く、特許発明を外国で実施することや権利行使することは検討していないとも読み取れる。

続いて、2015年以降の特許出願について分子機械関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国）別上位出願人を図表10に示す。

図表10 分子機械関連特許の国別上位出願人

現出願人（権利者）の住所	上位出願人	ファミリー件数
中国	VIVO	28
	済南大学	27
	西北師範大学	24
米国	Roswell Biotechnologies	16
	MIT	8
	ハーバード大学	7
韓国	個人	4
	INTOCELL	3
	韓国科学技術院	2

図表10に示すように、韓国では出願件数4件の個人がトップとなっている。しかし、この出願人は外国出願をしていない。2位のINTOCELLは3件すべてを外国出願しており、中国/ヨーロッパ/インド/オーストラリア/ブラジル/カナダ/米国と出願国も多い。国や企業の特許出願動向を評価する際は、件数だけでなく特許のカバレッジ（出願先）なども考慮することが重要となる。

自己成長するロボットに関する特許出願動向

自己成長するロボット関連特許の国際動向を調査・分析するため、グローバルな特許情報を対象に母集団を作成する。

今回は下記の検索式を使用した。

検索式：

テキスト（発明の名称/要約/請求項） = “Learning” AND “self OR meta” AND メイン IPC（国際特許分類）
= B25J9/16（プログラム制御） AND 出願年 = 2015 年以降

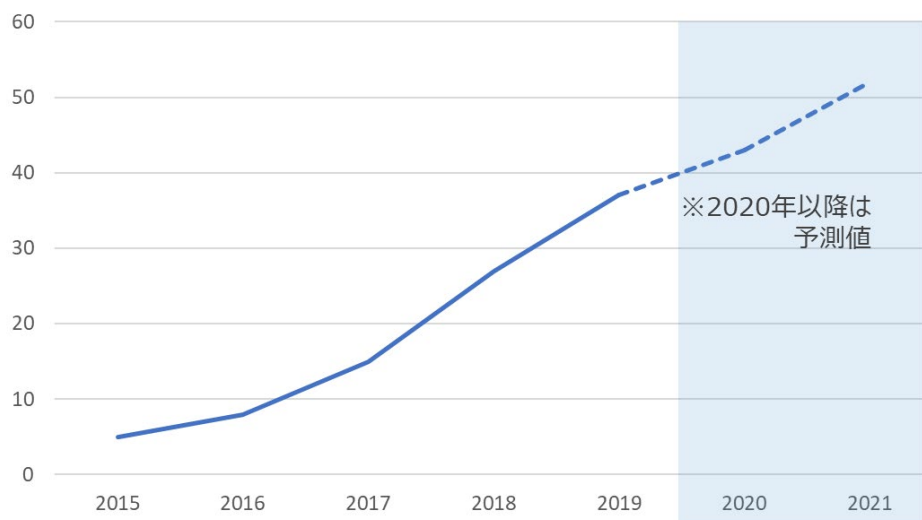
実施日：2021年12月28日

この検索式により、155特許ファミリー（合計211件）からなる母集団が作成された。

IPC（International Patent Classification、国際特許分類）はすべての特許出願に対して特許庁により付与される記号である。

まず、自己成長するロボット関連特許のグローバルな出願動向を図表11に示す。

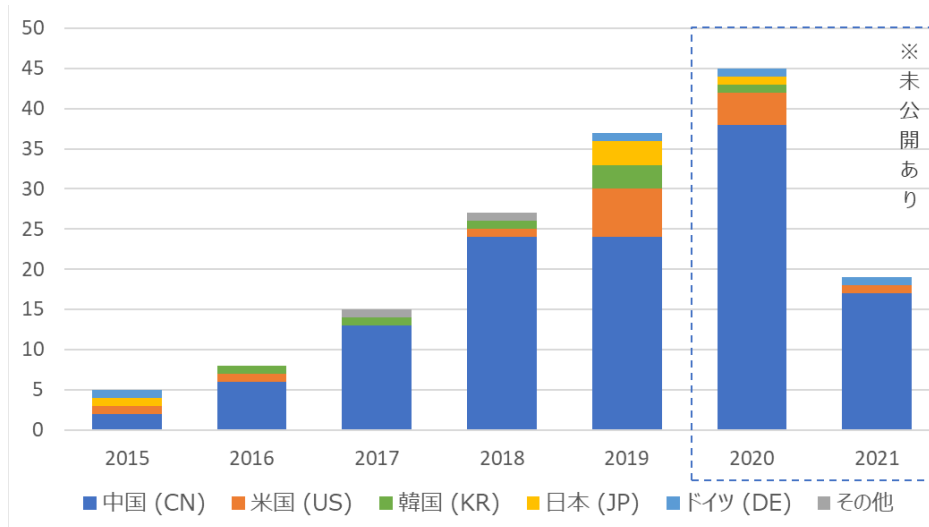
図表11 自己成長するロボット関連特許の出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表11に示すように、自己成長するロボット関連特許出願は増加傾向にあり、2020年以降も出願件数は増え続けると予測される。

続いて、自己成長するロボット関連特許の国・地域別出願動向を図表12に示す。図表12における国名は、現出願人（権利者）の住所を指す。たとえば、日本（JP）であれば、日本国内に住所のある出願人、すなわち日本企業等による出願を意味する。2020年以降はまだ特許公開されていない出願が存在するが、参考値として記載する。

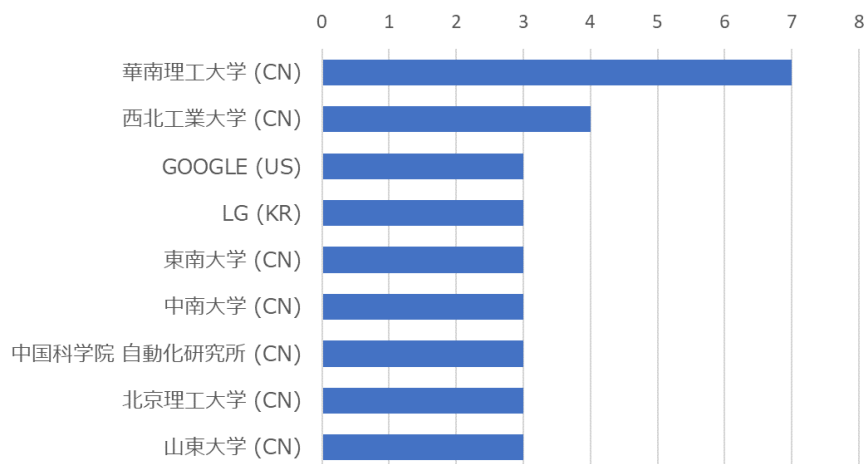
図表12 自己成長するロボット関連特許の国・地域別出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表12に示すように、自己成長するロボット関連特許は中国からの出願が最も多く、次いで米国、韓国、日本、ドイツという順になる。出願比率は、中国からの出願が約80%、米国からの出願が約9%、韓国からの出願が約5%、日本からの出願が約3%、ドイツからの出願が約3%、その他が約1%である。

続いて、自己成長するロボット関連特許の出願件数が多い上位出願人を図表13に示す。

図表13 自己成長するロボット関連特許の上位出願人（縦軸：出願人、横軸：特許ファミリ件数）



図表13に示すように、中国のアカデミア発の出願が上位を占める。

続いて、自己成長するロボット関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国）別出願先国・地域を図表14に示す。たとえば、中国出願人が1つの発明を中国に出願した場合、その出願を基礎として外国に出願することができる。このように1つの発明を複数の国へ出願した「特許出願のまとまり」を特許ファミリと呼ぶ。

図表14 自己成長するロボット関連特許の国別出願先国・地域

現出願人（権利者）の住所	出願先国・地域	ファミリ件数
中国	中国	124
	WIPO	4
	米国	3
米国	米国	13
	WIPO	10
	中国	6
韓国	韓国	7
	WIPO	6
	米国	4

図表14におけるWIPOとは、世界知的所有権機関（WIPO）が所管する特許協力条約（PCT）に基づく国際特許出願を指す。PCT国際特許出願をしていることは、出願人が自身の発明について国際的に特許保護を求めていることを示している。

図表14における「米国」を例に説明すると、米国内に住所のある出願人が、自己成長するロボット関連特許13件を自国に出願している。これを「国内出願」と呼ぶ。そして、これらの国内出願を基礎としてPCT国際特許出願を10件、中国への出願を6件している。これらを「外国出願」と呼ぶ。なお、1件の国内出願を基礎として複数の外国出願をすることが可能である。自国への出願数と出願先第2位への出願数より、米国の外国出願率を約77%と計算する。

同様に、中国の外国出願率は約4%、韓国の外国出願率は約86%である。中国は最も出願件数が多いが外

国出願率は低く、特許発明を外国で実施することや権利行使することは検討していないとも読み取れる。

続いて、自己成長するロボット関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国）別上位出願人を図表15に示す。

図表15 自己成長するロボット関連特許の国別上位出願人

現出願人（権利者）の住所	上位出願人	ファミリー数
中国	華南理工大学	7
	西北工業大学	4
	中国科学院 自動化研究所	3
米国	GOOGLE	3
	NVIDIA	2
	-	1
韓国	LG	4
	-	1

図表15において、米国はNVIDIA以下出願数1で同率3位が続く。韓国はLG以下出願数1で同率2位が続く。

ケミカルルーピングに関する特許出願動向

ケミカルルーピング関連特許の国際動向を調査・分析するため、グローバルな特許情報を対象に母集団を作成する。

今回は下記の検索式を使用した。

検索式：

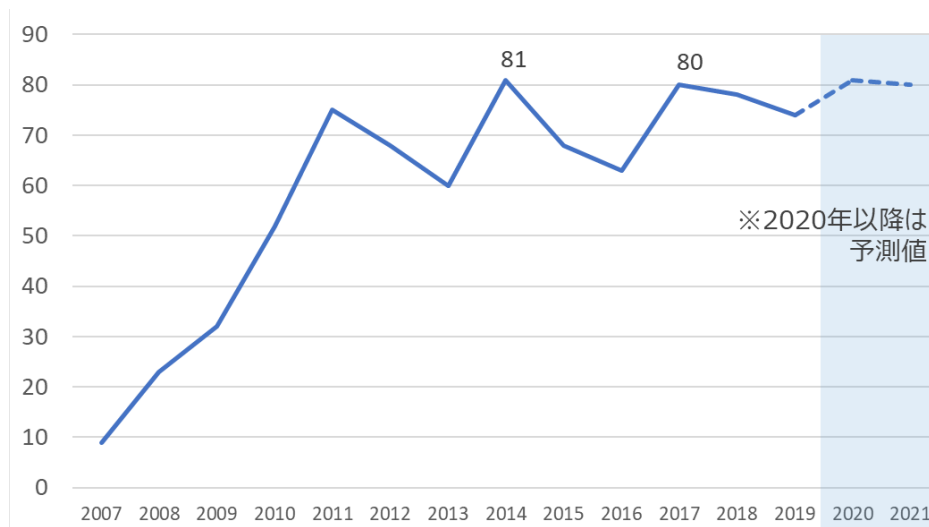
テキスト（発明の名称/要約/請求項/明細書） = “Chemical Looping”

実施日：2021年12月28日

この検索式により、940特許ファミリー（合計3,433件）からなる母集団が作成された。

まず、ケミカルルーピング関連特許のグローバルな出願動向を図表16に示す。

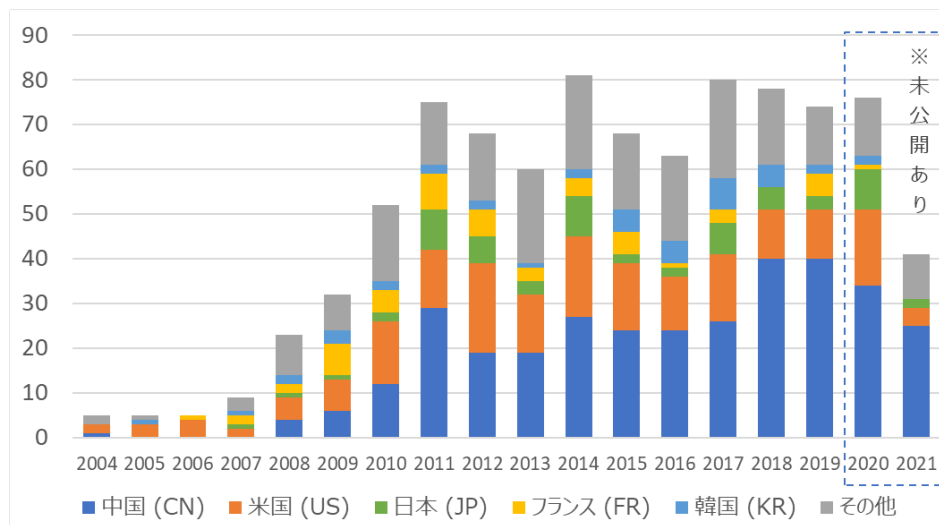
図表16 ケミカルルーピング関連特許の出願動向（縦軸：特許ファミリー数、横軸：出願年）



図表16に示すように、ケミカルルーピング関連特許は2007年以降出願件数が増加し、80件/年あたりをピークとして増減しつつ推移している。2020年以降も大きく件数が落ち込むことはない予測だ。爆発的なブームにはなっていないが、継続して研究開発が行われている状態と言える。

続いて、ケミカルルーピング関連特許の国・地域別出願動向を図表17に示す。図表17における国名は、現出願人（権利者）の住所を指す。たとえば、日本（JP）であれば、日本国内に住所のある出願人、すなわち日本企業等による出願を意味する。2020年以降はまだ特許公開されていない出願が存在するが、参考値として記載する。

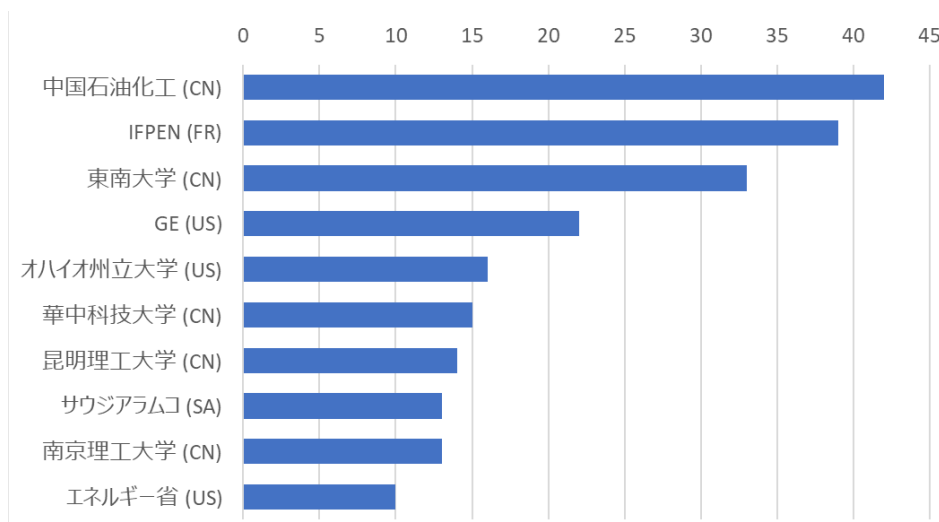
図表17 ケミカルルーピング関連特許の国・地域別出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表17に示すように、ケミカルルーピング関連特許は中国からの出願が最も多く、次いで米国、日本、フランス、韓国という順になる。出願比率は、中国からの出願が約37%、米国からの出願が約21%、日本からの出願が約7%、フランスからの出願が約6%、韓国からの出願が約5%、その他が約25%である。

続いて、ケミカルルーピング関連特許の出願件数が多い上位出願人を図表18に示す。

図表18 ケミカルルーピング関連特許の上位出願人（縦軸：出願人、横軸：特許ファミリー件数）



図表18における、IFPEN (FR) はフランスのFrench Institute of Petroleumを示す。GE (US) の出願には、Alstom (FR) が出願し、のちにGEに移転されたものが含まれる。

続いて、ケミカルルーピング関連特許の出願上位国（中国/米国/日本）別出願先国・地域を図表19に示す。たとえば、中国出願人が1つの発明を中国に出願した場合、その出願を基礎として外国に出願することができる。このように1つの発明を複数の国へ出願した「特許出願のまとめり」を特許ファミリと呼ぶ。

図表19 ケミカルルーピング関連特許の国別出願先国・地域

現出願人（権利者）の住所	出願先国・地域	ファミリ件数
中国	中国	300
	台湾	24
	米国	17
米国	米国	185
	WIPO	131
	ヨーロッパ	70
日本	日本	66
	WIPO	19
	中国	15

図表19におけるWIPOとは、世界知的所有権機関（WIPO）が所管する特許協力条約（PCT）に基づく国際特許出願を指す。PCT国際特許出願をしていることは、出願人が自身の発明について国際的に特許保護を求めていることを示している。

図表19における「米国」を例に説明すると、米国内に住所のある出願人が、ケミカルルーピング関連特許185件を自国に出願している。これを「国内出願」と呼ぶ。そして、これらの国内出願を基礎としてPCT国際特許出願を131件、ヨーロッパへの出願を70件している。これらを「外国出願」と呼ぶ。なお、1件の国内出願を基礎として複数の外国出願をすることが可能である。自国への出願数と出願先第2位への出願数より、米国の外国出願率を約71%と計算する。

同様に、中国の外国出願率は約7%、日本の外国出願率は約29%である。中国は最も出願件数が多いが外国出願率は低く、特許発明を外国で実施することや権利行使することは検討していないとも読み取れる。外国出願に積極的な企業はフランスのFrench Institute of Petroleumであり、フランスに出願した28件の特許出願のうち約79%を外国出願している。その出願先も、米国/カナダ/中国/スペイン/ポーランド/ドイツ/オーストラリア/南アフリカと多岐にわたる。

続いて、ケミカルルーピング関連特許の出願上位国（中国/米国/日本）別上位出願人を図表20に示す。

図表20 ケミカルルーピング関連特許の国別上位出願人

現出願人（権利者）の住所	上位出願人	ファミリー件数
中国	中国石油化工	42
	東南大学	33
	華中科技大学	15
米国	GE	22
	オハイオ州立大学	16
	エネルギー省	12
日本	東京瓦斯	9
	三菱重工業	9
	積水化学	9

図表20に示すように、中国ではアカデミアが上位出願人にランクインし、米国でもアカデミアや行政機関が上位出願人にランクインしている。

植物センサーに関する特許出願動向

植物センサー関連特許の国際動向を調査・分析するため、グローバルな特許情報を対象に母集団を作成する。

今回は下記の検索式を使用した。

検索式：

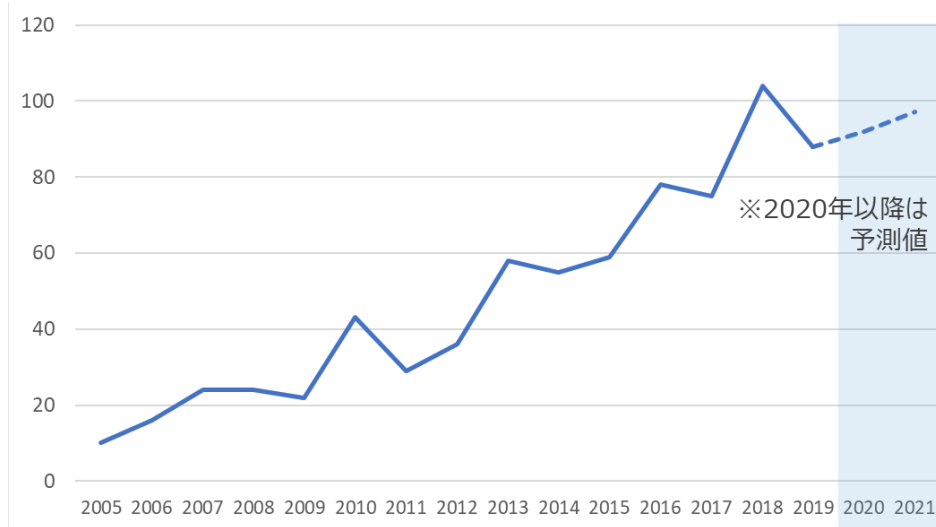
テキスト（発明の名称/要約/請求項） = “Sensor Plants” OR “Plant nanobionics” OR “Phytosensors” OR “Vascular Bundle” AND (Sensor OR Measurement) OR (Photosynthesis AND Rate) AND (Sensor OR Measurement) OR (Stress* AND (Plant OR Crop)) AND (Sensor OR Measurement) AND “Agriculture”

実施日：2021年12月28日

この検索式により、980特許ファミリー（合計1,825件）からなる母集団が作成された。

まず、植物センサー関連特許のグローバルな出願動向を図表21に示す。

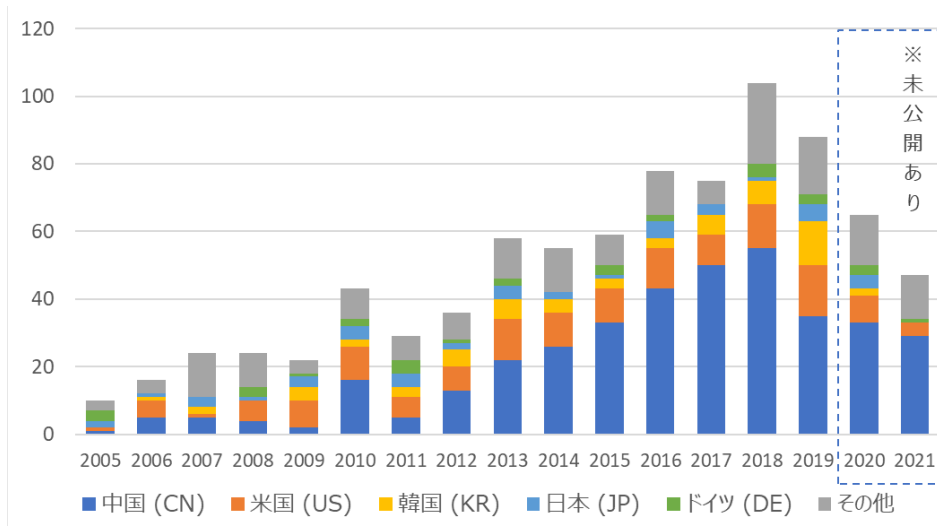
図表21 植物センサー関連特許の出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表21に示すように、植物センサー関連特許は、2005年以降増減はあるものの、全体としては増加傾向にある。2020年以降も大きく件数が落ち込むことはない予測だ。継続して研究開発が行われており、特に近年は活発に行われている状態と言える。

続いて、植物センサー関連特許の国・地域別出願動向を図表22に示す。図表22における国名は、現出願人（権利者）の住所を指す。たとえば、日本（JP）であれば、日本国内に住所のある出願人、すなわち日本企業等による出願を意味する。2020年以降はまだ特許公開されていない出願が存在するが、参考値として記載する。

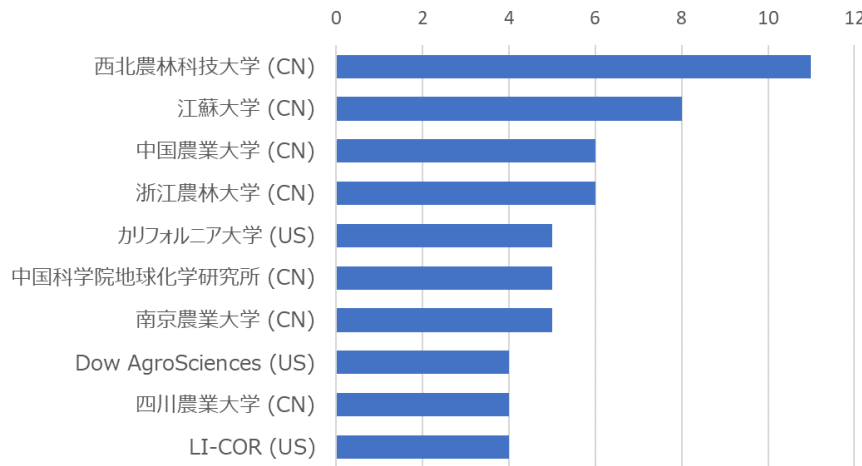
図表22 植物センサー関連特許の国・地域別出願動向（縦軸：特許ファミリー件数、横軸：出願年）



図表22に示すように、植物センサー関連特許は中国からの出願が最も多く、次いで米国、韓国、日本、ドイツという順になる。出願比率は、中国からの出願が約45%、米国からの出願が約16%、韓国からの出願が約7%、日本からの出願が約5%、ドイツからの出願が約4%、その他が約22%である。

続いて、植物センサー関連特許の出願件数が多い上位出願人を図表23に示す。

図表23 植物センサー関連特許の上位出願人（縦軸：出願人、横軸：特許ファミリ件数）



図表23に示すように、大学・研究機関における特許出願が上位を占める。

続いて、植物センサー関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国）別出願先国・地域を図表24に示す。たとえば、中国出願人が1つの発明を中国に出願した場合、その出願を基礎として外国に出願することができる。このように1つの発明を複数の国へ出願した「特許出願のまとめり」を特許ファミリと呼ぶ。

図表24 植物センサー関連特許の国別出願先国・地域

現出願人（権利者）の住所	出願先国・地域	ファミリ件数
中国	中国	373
	WIPO	13
	米国	9
米国	米国	132
	WIPO	98
	ヨーロッパ	67
韓国	韓国	59
	WIPO	14
	米国	5

図表24におけるWIPOとは、世界知的所有権機関（WIPO）が所管する特許協力条約（PCT）に基づく国際特許出願を指す。PCT国際特許出願をしていることは、出願人が自身の発明について国際的に特許保護を求めていることを示している。

図表24における「米国」を例に説明すると、米国内に住所のある出願人が、植物センサー関連特許132件を自国に出願している。これを「国内出願」と呼ぶ。そして、これらの国内出願を基礎としてPCT国際特許出願を98件、ヨーロッパへの出願を67件している。これらを「外国出願」と呼ぶ。なお、1件の国内出願を基礎として複数の外国出願をすることが可能である。自国への出願数と出願先第2位への出願数より、米国の外国出願率を約74%と計算する。

同様に、中国の外国出願率は約3%、韓国の外国出願率は約24%である。中国は最も出願件数が多いが外国出願率は低く、特許発明を外国で実施することや権利行使することは検討していないとも読み取れる。

続いて、植物センサー関連特許の出願上位国（中国/米国/韓国）別上位出願人を図表25に示す。

図表25 植物センサー関連特許の国別上位出願人

現出願人（権利者）の住所	上位出願人	ファミリー件数
中国	西北農林科技大学	11
	江蘇大学	11
	中国農業大学	6
米国	カリフォルニア大学	6
	LI-COR	5
	Dow AgroSciences	4
韓国	農村振興庁	4
	Kunok	4
	ソウル大学校	3

図表25に示すように、いずれの国においてもアカデミアが上位出願人にランクインしている。基礎研究段階から実用段階に移行すると企業による出願が増加するものと予想される。

『2021年に注目すべき技術』の総括 (プライム編集、スーパークロック、EUVリソグラフィ、侵襲型BMI)

以下では、2021年1月に発刊した『2021年に注目すべき技術』で取り上げた、プライム編集、スーパークロック、EUVリソグラフィ、侵襲型BMIについて、その後の動向を簡単に総括する。

プライム編集

プライム編集技術は、ゲノム編集技術の一つであり、オフターゲットリスクを軽減させて、遺伝子疾患克服に向けた取り組みが前進すると言及した。

2021年におけるプライム編集技術の注目すべき動向としては、意図しない場所を誤って編集してしまうオフターゲット (off-target) リスクを払拭する技術開発が進捗したことにある。CRISPRによるゲノム編集の場合、DNAの二重鎖に切れ目を入れた後は、確実に狙った場所だけを編集し、他の場所は編集していないとの確証は困難だが、プライム編集では、ゲノムを編集した後、変更後の遺伝子配列を持つRNAを逆転写酵素で、あらためて編集したい領域に転写を実行し、正確に遺伝子を編集することが可能である。2021年10月には、オフターゲットを最小化し編集効率を3倍以上高める改良プライム編集¹⁰が登場している。

プライム編集の欠点として、CRISPRによるゲノム編集より効率が悪いとの評価があるが、改良プライム編集技術の登場により、2022年以降、農業・畜産業・水産業といった産業で利用されるようになると考えられている。世界のゲノム編集市場は、2021年から2030年にかけて年平均24.3%の成長が予測されており¹¹、中でもプライム編集は、今後医療分野で広く試行検証が行われ、技術的な成熟度を高め、難病治療に応用されていくと期待されている。(技術フォーサイトセンター 阿部裕)

スーパークロック

スーパークロックは、長期間時刻補正が必要のない精密な時計であり、フォトニクス技術の社会への浸透に伴い、光速で処理される未来社会のシステムを統御する核心技術となると言及した。

2021年、NASAが打ち上げた実験衛星に搭載された深宇宙原子時計 (Deep Space Atomic Clock : DSAC) の精度検証が完了し、現在の最高精度を持つ原子時計よりも約10倍以上の精度を有することが確認された¹²。

¹⁰ nature biotechnology (2021年10月4日) Engineered pegRNAs improve prime editing efficiency
<https://www.nature.com/articles/s41587-021-01039-7>

¹¹ Allied Market Research 「Prime Editing and CRISPR Market by Service, Application, and End User : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021--2030」
<https://www.alliedmarketresearch.com/prime-editing-and-crispr-market-A11781>

¹² Nature (2021年6月30日) 「Demonstration of a trapped-ion atomic clock in space」
<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03571-7>

DSACが、宇宙における放射線、磁場、温度などが変動する極限環境で安定稼働し所定の性能を維持したことは、今後本格化する火星有人探査など、深宇宙進出における宇宙ナビゲーションの核心技術が確立したことを意味する。このDSACは、今後、GPS衛星に搭載され、センチメートルオーダーでの超精密な位置測位が地上で実現するとされ、特に自動運転車のナビゲーション高度化と安全性を飛躍的に高めると期待されている。

また、スーパークロックの小型化も着実に進捗しており、現在の水晶発振器に替わって、チップ化した原子時計がスマートフォンや時計に搭載可能となっている。DSACの大きさはトースター程度、光格子時計に関しても人間が持ち運べる大きさまで小型化されている。将来的には、センサーや制御装置などあらゆるデバイスに原子時計などスーパークロックが実装されるようになり、さまざまな社会事象をリアルタイムで記録・分析・制御する、デジタル社会を支える核心技術として着実に普及することになるだろう。

(技術フォーサイトセンター 阿部裕)

次世代EUVリソグラフィー

EUVリソグラフィーは、半導体微細化のための核心技術である。DXの進展と歩調を合わせるかたちで、ウエハ面積当たりの密度を高めるための技術開発が進むと言及した。

2021年11月、世界で唯一のEUV（極端紫外線）露光装置メーカーである（蘭）ASMLは、2023年前半にはNA（レンズの開口数）が0.55を上回る新型EUV装置を顧客に提供する目途が立ったと発表した¹³。新型装置と既存装置の組み合わせによって、今後10年の間に2nmをはるかに超えるプロセスが実現する確度が高まった。

半導体市場のビッグ3は明暗が分かれた。EUVリソグラフィーを適用したプロセッサの量産化を最初に成功させ首位独走中の（台）TSMCはロードマップどおりに事業を進めており、2022年初頭には2nmプロセスによる製造工場の建設に着手、2024年後半には量産可能になると発表した¹⁴。一方（韓）Samsungは4nmプロセスで歩留まりが改善されず、（米）Qualcommから委託された製造の一部にTSMCの参入を許す事態に陥っている¹⁵。加えて2021年7月には、2020年の時点では2022年中を予定していた3nmプロセスの立ち上げを1年後ろ倒しの2023年とすると発表しており¹⁶、開発の難航が続く。（米）Intelは約200億ドルを投資してアリゾナ州に2棟の新工場を建設すると発表。EUVリソグラフィーを導入できるラインを整備し、2024年までに世

¹³ ASMLの新型EUV装置、ムーアの法則を今後10年延長可能に

<https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2111/01/news153.html>

¹⁴ TSMC、2nmプロセスでの半導体製造工場を2022年に建設～2024年に量産開始

<https://iphone-mania.jp/news-385645/>

¹⁵ 「Snapdragon 8 Gen 1」製造にTSMC参入で性能差に懸念、Samsungの製造能力に問題か

<https://buzzap.jp/news/20211208-snapdragon-8-gen-1-tsmc-samsung/>

¹⁶ Samsungファウンドリの3nm GAAプロセスは2023年量産に後退の可能性

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20210713-1921142/>

界最先端のチップを製造すると宣言し、TSMCとの対抗の様相を深めている¹⁷。

既存のサーバやスマートフォン向けの需要に加え、センシング技術や通信技術の進展によって先端半導体技術への要求はとどまることを知らない。激しい開発競争は続く。（インダストリーイノベーション室 小川玲奈）

侵襲型BMI

侵襲型BMIとは、人間の脳と物理的に直接情報のやりとりを行うインタフェース技術であり、デジタル技術と脳の親和性と融合について言及した。

2021年7月、イーロンマスク氏が率いるBMIベンチャー企業Neuralink社が合計約2億ドルの出資をGoogle VenturesやFounders Fundなどから受けていたことを発表¹⁸、BMIが、今後ますます期待される領域であることが示された。同社は脳に自社製のチップを埋め込んだマカクザルが、脳波への指示だけで「MindPong」というテニスのようなコンピューターゲームの操作を行う動画を公開した¹⁹。霊長類での実験の成功により、人間での実用化、例えば障がい者に対する補綴工学への適用などに技術的に一歩近づいたといえよう。

そのほか、Synchron社はステンロードと呼ばれる、静脈を通じて脳にアクセスするBMIを開発し、これを用いてALS患者がPCを操作する臨床試験を米国FDAが許可した²⁰。特定用途ながら許認可が行われたことは、法整備やルール化の面でも進歩があったといえる。

一方で、チリではニューロライツと呼ばれる、脳活動の操作で起こり得る人権問題についていち早く憲法に盛り込む議論が始まる²¹など、倫理的課題についても議論の活発化が進んだ1年となった。（コンシューマーイノベーション室 吉本晃）

¹⁷ Intelがファウンドリー事業を発表、工場にも大規模投資

<https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2103/24/news060.html>

¹⁸ <https://www.cnn.com/2021/07/30/elon-musk-neuralink-backed-by-google-ventures-peter-thiel-sam-altman.html>

¹⁹ <https://neuralink.com/blog/monkey-mindpong/>

²⁰ <https://jp.techcrunch.com/2021/07/30/fda-clears-synchrons-brain-computer-interface-device-for-human-trials/>

²¹ https://www.scientificamerican.com/article/the-rise-of-neurotechnology-calls-for-a-parallel-focus-on-neurorights/?fbclid=IwAR2IX_z112KweDiknic4DnEjbzInRtc9TvHaDLb3T4-CDM_BxLyxqneccx48

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さ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。