



2023/01

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る。本年は、①菌糸体、②アップサイクル技術、③メタマテリアル、④量子通信を取り上げる。

①「菌糸体」は、キノコの根に当たる部分を指し、安価に自然界から獲得できる有機物素材として、さまざまな用途での利用が期待されている。中でも菌類の発酵により得られる菌糸体であるマイコプロテインは、食肉代替原料として既に欧州等で商品化が進む。そのほか、皮革代替や包装材料、建材等の分野でも開発が進んでいる。

②「アップサイクル技術」は、廃棄物や未利用資源から、リサイクルを超えてより付加価値の高い再生品、素材を作り出すさまざまな技術のことを指す。廃棄プラスチックをグラフェン素材に、廃棄メタンをタンパク質に、廃棄木材から航空燃料を製造するなど、サーキュラーエコノミーや脱炭素を効果的に推進するものとして、各所で研究・開発が進められている。

③「メタマテリアル」は、材料の表面に微細構造を形成することで、自然界には存在しない新たな物性を持たせた人工物のことをいう。2016年版の「注目技術」でも一度取り上げているが、電磁波や音波に関するシミュレーション技術の進展により、以前にも増して大きくなる脱炭素等の社会的課題の解決策として、用途開発が進んでいる。

④「量子通信」は、複雑な計算解を短時間で導き出す量子コンピュータと同様、量子の特性を活用して通信を行う技術である。「量子もつれ」と呼ばれるこの不思議な量子の特性については、理論を実証した研究者3名が2022年のノーベル物理学賞を受賞した。目下は高い安全性に注目が集まるが、量子コンピュータを量子通信でつなぐことで計算高速化の可能性も期待されるなど、各国で開発競争が加速している。

また、合わせて、取り上げた4テーマについて、それぞれ知財の国際動向の分析を行っている。

・ (1) 菌糸体 —多岐にわたるアプリケーション—	2
・ (2) アップサイクル技術 —廃棄物に付加価値を付け循環型社会の実現を目指す—	7
・ (3) メタマテリアル —快適で持続可能な社会に貢献するマテリアル設計技術—	13
・ (4) 量子通信 —量子インターネット実現を目指して—	18
・ 「2023年に注目すべき技術」に関する知財レポート	26

2023年に注目すべき技術

(1) 菌糸体—多岐にわたるアプリケーション—

三井物産戦略研究所 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

菌糸体とは

キノコから放出された胞子は適当な条件下で発芽し菌糸となる。菌糸は、周囲にある有機物などを栄養分として取り込み生長し、それが束になったものを菌糸体という（図表1）。

近年では、菌糸体を工業的に大量に培養し、食品、アパレル、包装材料など幅広いさまざまなアプリケーションに用いることが検討されている。スタートアップが資金を調達するなど、菌糸体を利用した市場において企業の動きは活発化してきている。菌糸体の世界市場は24.8億ドル（2020年）から38.4億ドル（2026年）となり年平均成長率7.7%で成長すると予測されている¹。

注目されている理由としては、菌糸体が生分解性であり、その培養には発酵技術が活用されていることが挙げられる。生分解性であれば、プラスチック代替材料として使うことで近年注目されているサーキュラーエコノミーに貢献できる。発酵とは物質が微生物（カビ、酵母や細菌）の働きにより人間にとって有益に変化することであり、ワインや日本酒といった食品の製造に使われてきた。工業的に確立されている発酵技術に関しては技術的知見が蓄積しており、本稿で取り上げる新しい事例においてもスケールアップは比較的容易と考えられる点も魅力だ。

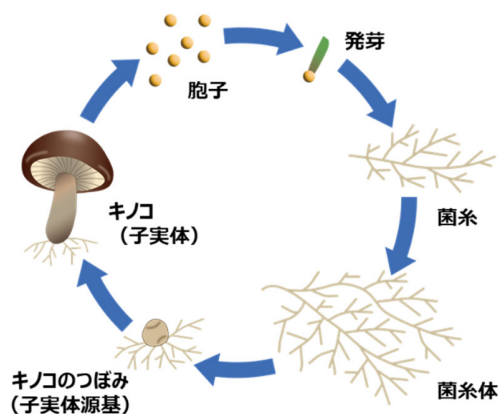
有望な活用分野

(1) マイコプロテイン

マイコプロテインとは、菌類を利用し発酵により得られる食用の菌糸体である。近年、植物性タンパク食品が環境負荷やアニマルウェルフェアといったエシカル消費の観点から注目を集めているが、その一方で、風味をより本物の肉へ近づけるためには多くの添加物が必要とされる。添加物をなるべく減らして自然な食品を食べたいというニーズに応え得る商品の開発のためにマイコプロテインに注目が集まっている。

菌糸体は繊維が絡み合っているために大豆などの一般的な植物性タンパクの素材よりは歯応えがあり、食感を肉に近づけることができる。さらに、キノコ類が持つうま味成分が植物性タンパク食品の風味改善

図表1 キノコの生活環



出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

¹ Mycelium Market - A Global and Regional Analysis (<https://bisresearch.com/industry-report/mycelium-market.html>)

に貢献すると期待されている。

マイコプロテインを利用した食品としてよく知られているのは（英）Quorn Foodsの製品で、同社は1985年から販売を開始し、現在では年間約4万トンの生産能力を持つ。図表2に挙げた同社製品は魚肉ソーセージのような食感でありうま味を感じることができるという。同社は製品のカーボンフットプリントを発表しており、牛肉が32kg CO₂e/kg²、豚肉が11kg CO₂e/kgに対し、同社のマイコプロテインは0.79kg CO₂e/kgであり³環境にもやさしいタンパク質であるといえよう。

先行していた同社の基本特許は2010年に切れたため後発企業の参入が見られる。有望なスタートアップとしては、（米）MyForest Foodsがある。同社はマイコプロテインにより作られたベーコン（図表3）を開発しており、添加物が少ない点をアピールしている。例えば、原材料としては菌糸体、塩、ココナツオイル、砂糖、天然香料、ビート濃縮液の6種類が記載されており、健康志向の消費者を意識していると考えられる。また、2021年には（スウェーデン）Mycorenaが菌類を利用して動物性の脂肪と類似する脂肪の開発に成功するなど⁴、タンパク質以外の素材に展開できる可能性も高い。2022年11月には、上述のQuorn Foods、Mycorenaなどのスタートアップや、代替タンパクを推進するNP0であるProVeg InternationalやGood Food Instituteを中心に菌類タンパク質協会（Fungi Protein Association）が発足し、マイコプロテインについて消費者調査等を行っている。このように海外では企業の活動も活発化しており、今後の動向に注目が集まる。国内では、筑波大学の萩原大祐准教授が、日本の国菌である麹菌を使ったマイコプロテインの研究開発を行っている⁵。麹菌は、日本では味噌や醤油などの醸造に使われており、伝統的な麹菌を使った新たな食品が日本から生まれることを期待したい。

（2）皮革代替

皮革生産における課題として、家畜の飼育による温室効果ガスの発生や、なめし、仕上げの工程における環境へ悪影響を与え得る化学物質の使用、労働者の安全性などがある。このような課題を解決する手段の一つとして、菌糸体を活用した皮革代替品の利用がある。

図表2 Quorn Foods社製品Meatless Roast（左：外観 右：中身）



出所：三井物産戦略研究所撮影

図表3 MyForest Foods社製品MyBacon（左：外観 右：中身）



出所：三井物産戦略研究所撮影

² Kg CO₂e/kgは最終製品1kgを製造するために排出される温室効果ガスの量を示す単位である。温室効果ガスにはいくつかの種類があるため二酸化炭素を基準とした数値にしている。

³ Quorn Footprint Comparison Report 2022 (<https://www.quorn.co.uk/assets/files/content/Carbon-Trust-Comparison-Report-2022.pdf>)

⁴ <https://mycorena.com/mycotalks/mycorena-cracking-the-code-of-the-worlds-first-fungi-based-fat-ingredient>

⁵ https://www.life.tsukuba.ac.jp/laboratory/lab_hagiwara_20220215/

菌糸体は、温度や、生長に必要な栄養分といった環境を制御された状態で生育された後、マット状に圧縮され、その後実際の皮革のように加工される。

(米) Bolt Threadsは、菌糸体からMyloという皮革代替素材を開発した。Myloに使われる菌糸体は再生可能エネルギーで稼働する垂直農業型の設備で生産され、2週間という短期間で収穫される⁶。生産規模の拡大に関しては(蘭) Mycelium Materials Europeと提携した。最終製品としては、Adidas、Lululemon、土屋鞆製造所(図表4)などの企業に採用されている。

また、菌糸体は、生育条件を変えることでさまざまな質感の素材とすることができる。(米) MycoWorksは、菌糸体の培養に農業廃棄物のトウモロコシの皮などを使いReishiと呼ばれる素材を開発している。同社が素材開発に用いているFine Mycelium技術は、生育条件により菌糸の生長方向を制御することが可能であり、牛革と同程度の強度や耐久性を実現している⁷。同社は2021年には高級ブランドであるHermèsとの、2022年10月にはGM Venturesとの提携を発表している。今後バッグから自動車の内装品などまで、幅広く同社の素材が検討される見込みだ。

(3) その他(包装/建築材料)

菌糸体は、繊維が絡み合って構成されており、その繊維の絡み具合を制御することで多孔質の構造体を作ることができる。空気を多く含むため、軽量であるうえ衝撃性のほか吸音性や断熱性に優れており、包装材料や建築材料としての役割が期待されている。

(米) Ecovative Designは、発泡ポリスチレンなどの代替素材として菌糸体からなるパッケージ素材を提供している(図表5左)。同社は固体発酵と呼ばれる発酵方法を採用し、トレイの中で菌糸体を培養(図表5右)、垂直方向に積み重ね生産するAirMyceliumという技術を開発した。生産能力は年間4万トンになるとみられている。

図表4 代替皮革Myloを採用した土屋鞆製造所の製品



出所：土屋鞆製造所 (<https://tsuchiya-kaban.jp/products/mylo-l-zip-purse>) (2022年12月19日閲覧)

図表5 Ecovative Design社が開発した菌糸体を利用したパッケージ(左)とAirMycelium技術により培養された菌糸体(右)



出所：Ecovative Design (<https://www.ecovative.com/pages/packaging>, <https://www.ecovative.com/pages/airmycelium>) (2022年12月20日閲覧)

⁶ <https://www.mylo-unleather.com/>

⁷ <https://www.madewithreishi.com/stories/performance-results-q120>

同社は企業へのライセンス供与を通じて、菌糸体のパッケージ素材を広めている。さらに、同社の技術は応用の幅が広い点も興味深い。同様の技術により Forager という皮革代替の素材開発も行っているほか、マイコプロテインの開発にも応用されている。先述した MyForest Foods は同社のスピンアウトである。

(伊) Mogu は、他に用途がなくなった農業廃棄物を利用して培養した菌糸体からなる、吸音性を持つ音響パネルとして販売している(図表6)。人の声の音域と重なる中音域(250Hz~1,000Hz)において優れた吸音性を発揮するため、レストランや大人数が入るオフィスなどの場所での使用を想定している。菌糸体は燃焼が広がる速度が遅いため難燃性がある⁸点もこのようなアプリケーションにとっては優位となるだろう。

図表6 Mogu社が販売する吸音性を持つ音響パネル



出所：Mogu (<https://mogu.bio/acoustic-collection/acoustic-palette/>) (2022年12月19日閲覧)

図表7に上述の内容を含め菌糸体が活用されている分野とその概要、参入企業例を整理した。

図表7 菌糸体が活用される分野の概要と参入企業例

分野	概要	企業例
マイコプロテイン	● 菌糸体由来の食用タンパク質。 ● 高タンパクかつ菌糸体の繊維の絡み合いにより食感を本物の肉に近づけることができる。	(米) MyForest Foods、(英) Quorn Foods、(米) MycoTechnology、(独) Mushlabs、(英) ENOUGH、(米) Nature's Fynd、(米) The Better Meat Co.、(米) Meati Foods、(蘭) The Protein Brewery、(スウェーデン) Mycorena、(米) Prime Roots、(イスラエル) Kinoko-Tech、(スペイン) Innomy、(米) Sincarne、(メキシコ) Eternal
皮革代替	● 生長した菌糸体を押し固め、マット状に加工して得られる。 ● 生育条件を制御することで質感の調整が可能。	(米) Bolt Threads、(米) MycoWorks、(伊) Mogu、(米) Ecovative Design
その他(包装/建築材料)	● プラスチック代替を目的に生分解性の包装材として使用される。 ● 繊維が絡み合っており、空気を多く含むため、吸音材や断熱材として使用される。	(米) Ecovative Design、(英) Biohm、(伊) Mogu、(仏) Embelium、(英) Magical Mushroom company、(スイス) Mycrobez

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

今後の展望

今後の展望としては以下が挙げられる。マイコプロテインは、その素材自体が持つうま味や食感を活かし植物性タンパク食品の風味を改善するために展開されるだろう。また近年になって遺伝子編集などの技術が急速に進んでいることから、そのような技術を使った菌類自体の開発も進むと考えられる。課題とし

⁸ <https://mogu.bio/acoustic-catalogue-2022/>

ては、原材料として使われる農業廃棄物を安定的かつ安価に収集できるサプライチェーン確立がある。

(1) 植物性タンパク食品の風味改善

食品分野では、植物性タンパク食品市場の広がりに伴いマイコプロテインの市場も大きく成長すると考えられる。植物性タンパク食品は、風味や食感などの改善が今後さらに求められると考えられている。そのために添加物等が使われる一方で、健康を意識した消費者からは添加物などは減らしたいというニーズがある。そのような課題を改善する手段として菌糸体の利用は有望だろう。

(2) 新たな菌類の開発

現在のところは実績のある菌糸体の利用が中心だが、今後は遺伝子編集などの新たな技術を駆使して、必要とされる機能を持つ菌類の開発が進むだろう。それにより、菌糸体の生育期間の短縮化や栄養成分や風味の大幅な改善が期待され、本稿で紹介したようなアプリケーションへの導入がより積極的に進むと考えられる。現状では高級品から導入されている菌糸体由来の皮革がより一般的に展開され、また、安価でかつ風味等の観点からもより消費者が受け入れやすいマイコプロテインの開発も進むであろう。

(3) 課題としてのサプライチェーン確立

菌糸体に関して、農業廃棄物などのバイオマスを利用することができる点や生分解性の材料である点はサーキュラーエコノミーの観点からも魅力だ。しかし、社会実装が進み生産規模が拡大していけば、安定的かつ低コストに農業廃棄物を収集する必要がある。このようなサプライチェーンの確立が将来的な課題となると考えられる。

 [知財レポートはこちら](#)

2023年に注目すべき技術

(2) アップサイクル技術—廃棄物に付加価値を付け循環型社会の実現を目指す—

三井物産戦略研究所 技術フォーサイトセンター 阿部 裕

アップサイクル技術とは

アップサイクル (Upcycle) 技術とは、廃棄物または未利用資源から付加価値の高い再生品・素材を作り出す技術である。従来、循環型社会を目指す取り組みとしては、①リサイクル (Recycle)、②リユース (Reuse)、③リデュース (Reduce) が行われてきた。①リサイクルは、廃棄物から使える部分を取り出して再利用すること、②リユースは、使用済みの製品をごみとして廃棄せずに繰り返し使うこと、③リデュースは、そもそも廃棄物を出さないようにすることである。これらは「3R」と呼ばれ、企業や地域社会などでさまざまな取り組みが展開されるとともに関連技術も開発され、現在に至っている。アップサイクルは、廃棄物を再利用対象物として捉え、新たに別の分野に取り込み、物質循環させることを目指す技術でもある。本稿では、複雑な再処理プロセスを必要としない、シンプルなアップサイクル技術を紹介する。

有望な活用分野

(1) 魚の鱗 (コラーゲン) をナノ・カーボン・マテリアルにアップサイクル

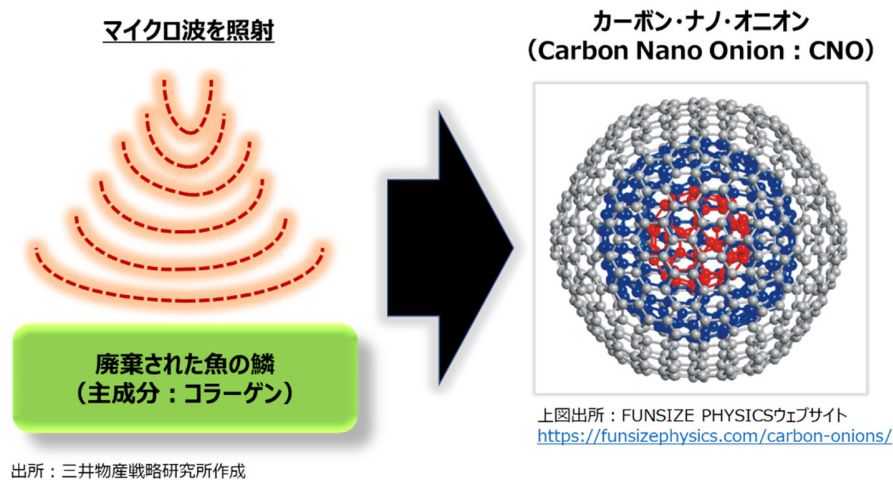
一つ目は、廃棄された魚の鱗から、カーボン・ナノ・マテリアル (Carbon Nano Material : CNM) の一つであるカーボン・ナノ・オニオン (Carbon Nano-Onion : CNO) にアップサイクルする事例である。CNMは、炭素原子により構成される極微細な素材である。鱗をCNOに転換するには、主成分であるコラーゲンにマイクロ波を照射することで生じる急激な温度上昇と熱分解反応 (マイクロ波熱分解) を利用する。現時点で詳しい原理は解明されていないものの、電子レンジでの調理と同じようにマイクロ波を照射するだけで転換することが可能だという⁹ (図表1)。既存の製造方法では、高温・真空環境での長時間反応に加え、後処理には化学溶媒を用いることが必要となるなど、環境負荷が高い点が課題となっており、マイクロ波照射だけでCNOに転換できることで、今後、産業での利用促進が期待できる。

CNMは形状により4つに分類される。シート状のものはグラフェン、円筒形のものカーボン・ナノ・チューブ、球状のものはフラーレン、またフラーレンが複数の層に入れ子になっているものがCNOである (図表2)。CNOは、LEDの青色発光薄膜や次世代固体光源¹⁰として、またその形状特性から潤滑剤 (エンジンオイル、機械加工油など)、グリースや樹脂材料への添加剤としての利用が期待できる。

⁹ 名古屋工業大学のカーボン・ナノ・オニオンの合成および生成メカニズムの解明に関する研究論文 <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d1gc04785j>は、英国王立化学会 Green Chemistry誌 (Impact Factor: 10.182) の Back Coverおよび Cover Profileに選ばれている。

¹⁰ 発光材料の評価で重要とされる絶対PL量子収率 (吸収した (光) エネルギーをどの程度の効率で発光させられるかを表す指標) は40%と、従来の製造法によるCNOの10倍という世界最高性能の数値が得られている。

図表1 魚の鱗をナノ・カーボン・マテリアルにアップサイクル



図表2 カーボン・ナノ・マテリアルの種類

種類	特徴
グラフェン (Graphene)	六角形の炭素原子がシート状に結合された形状
カーボン・ナノ・チューブ (Carbon Nanotube)	円筒形状。円筒は単層、もしくは複数構造になっている
フラーレン (Fullerene)	六角形の炭素原子が球形 (サッカーボール状) に合わさっている
カーボン・ナノ・オニオン (Carbon Nano-Onion)	フラーレンが複数の層の入れ子状になっている

出所 : 各種情報から三井物産戦略研究所作成

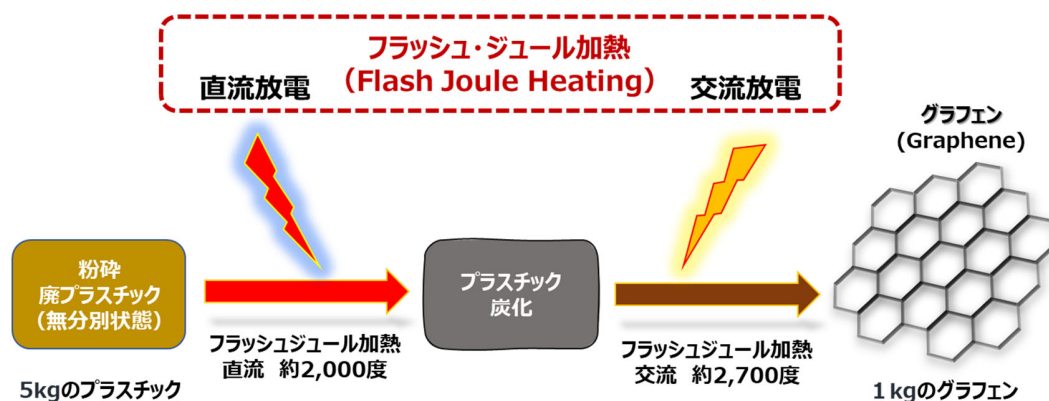
(2) 廃棄プラスチックをグラフェンにアップサイクル

二つ目は、廃棄プラスチックを直接放電によりグラフェンにアップサイクルする事例である¹¹。廃棄プラスチックをグラフェンに転換するには、フラッシュ・ジュール加熱 (Flash Joule Heating : FJH) と呼ばれる方法を利用する。図表3の通り、廃棄プラスチックの塊を放電 (直流放電と交流放電) により加熱、炭化させることで、純度の高いグラフェンに転換することが可能となる。実際にピックアップトラックのバンパー、カーペット、マットなどのプラスチック材 (塩化ビニル、ポリウレタンなど) を、特に分別することなく混合状態で洗浄・粉砕し、そのままFJHでグラフェンに転換する実験を行い、良好な結果を得ている。

FJHにより生成されたグラフェンは純度が高く、この方法では環境負荷の高い精製プロセスが不要なため (必要なプロセスはFJHによる放電工程のみ) 、ライフサイクルコストは既存の生成方法と比較して約10分の1程度に抑えられる。5kgの廃棄プラスチックから1kgのグラフェンが得られ、用途としては、電池材料、抗菌材料、ろ過材などがある。

¹¹ Kevin M. Wyss et al., "Upcycling end-of-life vehicle waste plastic into flash graphene", communications engineering, Nature, May 26, 2022 <https://www.nature.com/articles/s44172-022-00006-7>

図表3 廃棄プラスチックをグラフェンにアップサイクル



出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

(3) 廃棄メタンをタンパク質に転換

三つ目は、廃水処理施設やゴミ埋立地、石油ガス施設などから発生する廃棄メタンを、微生物の力を借りてタンパク質にアップサイクルする事例である。既に米Calysta社、印String Bio社、日揮が事業化に向けて取り組んでいる。この廃棄メタンからタンパク質を作り出す際の微生物には「メタン資化菌」が利用される。メタン資化菌により生成されたタンパク質には、解毒作用や抗腫瘍作用があるメチオニンなどの必須アミノ酸が含まれるため、畜産飼料、特に飼料用魚粉の確保に課題を抱える水産養殖用の飼料¹²への利用が期待されている。

科学ジャーナルNature Sustainabilityによれば、米国内には産業起源のメタン排出源（電力プラント、廃水処理プラント、埋立地、石油・ガス施設など）が約9,700カ所あり、1日の廃棄メタン量は約67,400トンだという¹³。この廃棄メタンから排出源毎にタンパク質生産コストを試算しており、①電力プラント：1,783ドル/トン、②廃水処理プラント：1,645ドル/トン、③埋立地：1,546ドル/トン、④石油・ガス施設：1,531ドル/トンとなっている。石油・ガス施設起源の廃棄メタンで生成されたタンパク質は魚粉の価格より安いとの分析結果を得ており、養殖飼料原料の大部分を占める魚粉などの動物性タンパク質の代替品となる可能性がある。

日本は、水溶性のメタンを産出する南関東ガス田¹⁴を有しているため（図表4）、国内資源の活用を視野に入れた取り組みにも期待したい。

¹² 水産資源の減少などにより、養殖用飼料への魚粉の配合率は過去20年間で低下している。飼料に含まれる魚粉の平均的な割合は、1995年で、鯉10%、鮭45%、海産魚50%。2017年には、鯉1%、鮭12%、海産魚14%にまで減少。そのため、魚粉に替わる養殖飼料が必要。<https://www.nature.com/articles/s41893-021-00796-2>

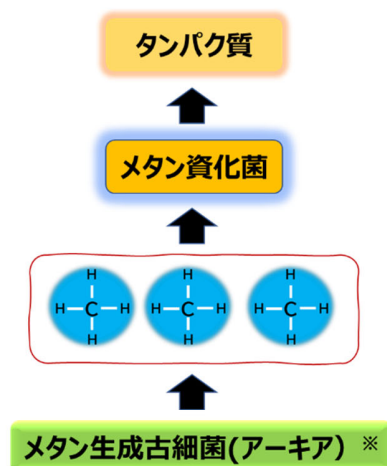
¹³ 二酸化炭素の25倍超の温室効果を持つメタンガスの削減を目指す国際枠組み「グローバル・メタン・プレッジ（Global Methane Pledge）」がCOP26で発足、2030年の世界のメタン排出量を2020年比で30%削減することを目標としている。

¹⁴ 南関東ガス田は可採埋蔵量が3,685億 m^3 のわが国最大の水溶性天然ガス田で、世界有数のヨード鉱床でもある。産出される天然ガスは99%以上がメタンであるというメタン濃度の高さも特徴。このガス田を開発している関東天然瓦斯開発社の鉱区における天然ガス可採埋蔵量は約1,000億 m^3 。これは、現在の年間生産量で計算すると約600年分に相当する。

図表4 南関東ガス田のメタン資源



地図出所：合同資源
<https://www.godoshigen.co.jp/learn/gas/kanto/>



※新種細菌 *Atribacter laminatus* RT761株
 (DNA細胞内膜がある原核細菌)

出所：合同資源、産業技術総合研究所資料に基づき
 三井物産戦略研究所作成

(4) アップサイクル・リサイクルへの挑戦

アップサイクル・リサイクルとは、アップサイクルする際の処理過程で排出される残渣などの廃棄物を再度利用し、可能な限り循環させる取り組みである。この節では、アップサイクル・リサイクルの可能性を示す事例として、①廃棄木材に含まれるリグニンを、触媒（炭化モリブデン触媒）反応を利用して航空燃料の原料に転換する、②廃棄木材に化学溶液処理と圧縮処理を施すことで超硬木材を作製する¹⁵2つの取り組みを紹介する。

木材は、主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンの3要素からなる。世界では毎年、莫大な量の廃棄木材が発生しており、これを有効活用することが循環社会を目指す上で必要となる。

① リグニンは、植物の構造体を支える鉄筋としての役割を果たしており、生体物質としては極めて硬く、化学反応で分解させることが最も難しい物質である。しかし、米国立再生可能エネルギー研究所によれば、リグニンを高価な触媒を使用せずに航空燃料の原料に転換することが可能だという¹⁶。航空機業界は、ジェット燃料を年間1,060億ガロン（2019年）消費していることから、環境に配慮したSAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）に注目している。また日本の航空会社は、2030年までに既存の航空燃料のうち10%をSAFに切り替える目標を掲げている。国内の間伐材などの活用にも新たな道が拓かれる可能性があり、

¹⁵ Jianwei Song et al. “Processing bulk natural wood into a high-performance structural material”, Nature, volume 554, pp.224-228, February 8, 2018 <https://www.nature.com/articles/nature25476>

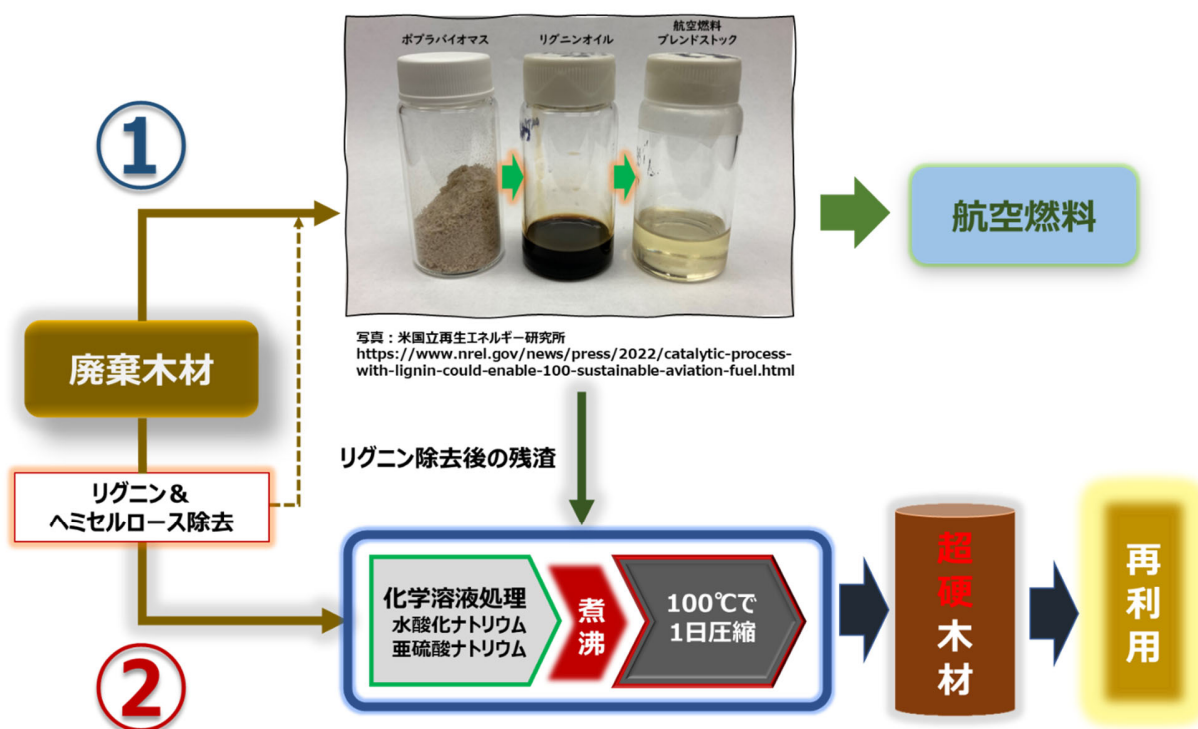
¹⁶ NREL, “Catalytic Process with Lignin Could Enable 100% Sustainable Aviation Fuel” Sept. 22, 2022 <https://www.nrel.gov/news/press/2022/catalytic-process-with-lignin-could-enable-100-sustainable-aviation-fuel.html>

このアップサイクル・リサイクルの社会的意義は大きいと考えられる¹⁷。

② リグニンとヘミセルロースを除去した木材を化学溶液（水酸化ナトリウム（NaOH）と亜硫酸ナトリウム（Na₂SO₃））に浸した後に7時間煮沸し、さらに24時間加熱（100℃）圧縮すると元の大きさの5分の1になり、強度が11.5倍に向上する。また木材を煮沸後、単純にプレス圧縮するだけでも強度は3倍になることが確認されている。このように廃棄木材を超硬木材にアップサイクル・リサイクルすれば、木造建築物の高層化や戸建て住宅の耐震性向上が可能となり、建築分野での活用が期待できる。

図表5に示すように、リグニンの航空燃料へのアップサイクル過程で出る残渣を超硬木材へのアップサイクルの補助材料として再利用出来れば、廃棄物の排出を最小限に抑えることができる。また超硬木材に関しては、建築資材として利用された後は、地球環境に悪影響を与えない形で自然に還元される。今後はさまざまな産業分野で、3R活動とともにアップサイクル・リサイクルに挑戦し、経済活動と地球環境保全の両立を目指すようになるのではないだろうか。

図表5 廃棄木材のアップサイクル・リサイクル例



出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

¹⁷ リグニンに関しては、酵素変換によりフェニルプロパノン化合物を基点とするバイオプラスチックへの転換を可能とする研究^{※1}があり、また、リグニンとグリオキシル酸を反応させてジエステルプラスチックの前駆体に直接変換する^{※2}など、アップサイクル研究が進行している。

※1：<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20161220-2/index.html>

※2：<https://actu.epfl.ch/news/new-pet-like-plastic-made-directly-from-waste-biom/>

今後の展望

本稿では、注目すべき技術として、主にシンプルな方法で廃棄物をアップサイクルする技術を紹介した。今後も、大量の廃棄物が生じる国際商品（廃棄タイヤ、コーヒー、パーム油脂、電池、太陽光パネルなど）を中心としたアップサイクル技術が開発され、有効性と経済性を検証する社会実験が行われるだろう。日本においては、大量生産・大量消費・大量廃棄型の線形経済から循環経済への移行を打ち出した「循環経済ビジョン2020」¹⁸が公表され、循環型社会への取り組みが本格化しつつある。しかし現状では、有価性の高い金属類を除き、リサイクル品の収益確保が難しい事業環境となっているため、廃棄物に付加価値を付与するアップサイクル技術の研究開発と、迅速な社会実装が今後の課題となる。

この他、特記すべきポイントとしては、都市廃棄物（自治体が回収する家庭ゴミ、食品廃棄物、段ボール、粗大ゴミなど）問題がある。OECDによると、日本では一般廃棄物の国民1人当たりの年間排出量が336kg（2019年）¹⁹で、これはほとんどリサイクルされることなく、回収後、直ちに焼却処理されている。この都市廃棄物問題は世界共通であり、米国ではゴミ分別を各家庭に要求せずに、回収した混合プラスチックをダイレクトにアップサイクルするBOTTLEプロジェクト²⁰など、解決に向けた取り組みを始動している。また、前述のSAF製造に関しても、都市廃棄物などを原料にする取り組みが行われている（図表6）。

今後、ESGの観点から、産業廃棄物のみならず都市廃棄物も含めたアップサイクルが重要であるという認識が広がれば、同技術の研究開発に対する投資が積極的に行われ、循環型社会の実現に向けた一步を踏み出すことになるだろう。

図表6 米国における廃棄物原料による持続可能な航空燃料（SAF）製造の取り組みおよび調査事例

区分	利用廃棄物	概要
原料調達 （調査）	森林残渣、藻類利用	サウスカロライナ州が、木質バイオマスベース、および藻類からのバイオエネルギー製造に関する調査を米国農務省からの資金提供（Rural Business Enterprise Grant）を受け実施
原料調達 （民間移行調査）	都市廃棄物、農業廃棄物	ハワイ州が、食物残渣などセルロース系の都市廃棄物、農業残渣、木質系廃棄物などを利用した燃料原料調達、燃料生産の評価を実施。軍主導から民間移行の可否調査を実施
原料調達 （モデル構築）	国産廃食用油	日揮、レボインターナショナル、コスモ石油が、廃食用油を原料とするバイオジェット燃料製造サプライチェーンモデルを構築
SAF製造	廃棄デンプン	Archer Daniels Midland社が、豆類の廃棄デンプンからイソブタノールを生成しバイオジェット燃料へ転換
SAF製造	建設廃棄物、森林草木類	AVAPOCOが、建設廃棄物、森林残渣などからバイオジェット燃料を製造
SAF製造	食物廃棄物	米国立再生可能エネルギー研究所およびquasar energy groupが、食物廃棄物から揮発性油脂を抽出し、バイオジェット燃料を製造

出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

知財レポートはこちら

¹⁸ 経済産業省「循環経済ビジョン2020」 <https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004-2.pdf>

¹⁹ OECD, Municipal waste <https://data.oecd.org/chart/6b1w>

²⁰ 米国立再生可能エネルギー研究所（NREL）” BOTTLE Project Outlines New Strategy for Valorization of Mixed Plastic Waste” Oct 13, 2022 <https://www.nrel.gov/news/press/2022/bottle-project-outlines-new-strategy-for-valorization-of-mixed-plastic-waste.html>

2023年に注目すべき技術

(3) メタマテリアルー快適で持続可能な社会に貢献するマテリアル設計技術ー

三井物産戦略研究所 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 小川 玲奈

メタマテリアルとは

「電源不要で物体を冷却できるシート」や「加湿や換気的能力を損ねることなく送風音を低減した空調機」など、メタマテリアルが使われた民生品が市場に出始めている。メタマテリアルの技術は、省エネ・高効率化といった課題に解を与え、持続可能な社会に貢献し得る技術としても開発が進む。ここではまず、メタマテリアルの定義と原理について説明する。

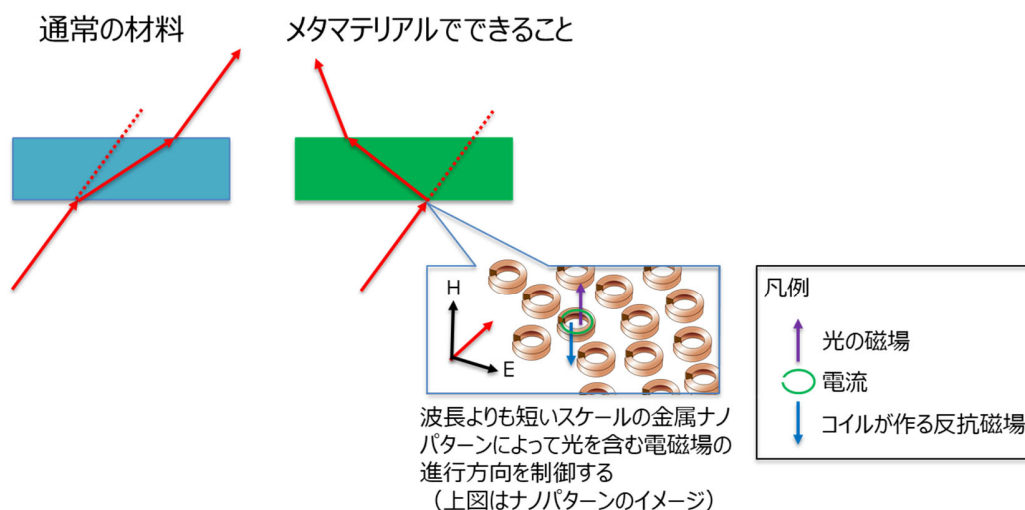
(1) メタマテリアルの定義

メタマテリアルは「波長以下の構造体によって、材料が固有に持つ物性とは異なる物性を示す人工物」と定義されている。マテリアルの微細構造を最適に設計し、作りこむことで、熱や光、音などの、波としての振る舞いを、自然界に存在しないような状態に変えることが可能になりつつある。

(2) メタマテリアルの原理

メタマテリアルが光の進行方向を変える例を用いて、その原理を説明する（図表1）。

図表1 メタマテリアルの原理（イメージ）



出所：理化学研究所ウェブサイト
(https://www.riken.jp/medialibrary/riken/pr/press/2006/20060113_1/20060113_1.pdf)
を参考に三井物産戦略研究所作成

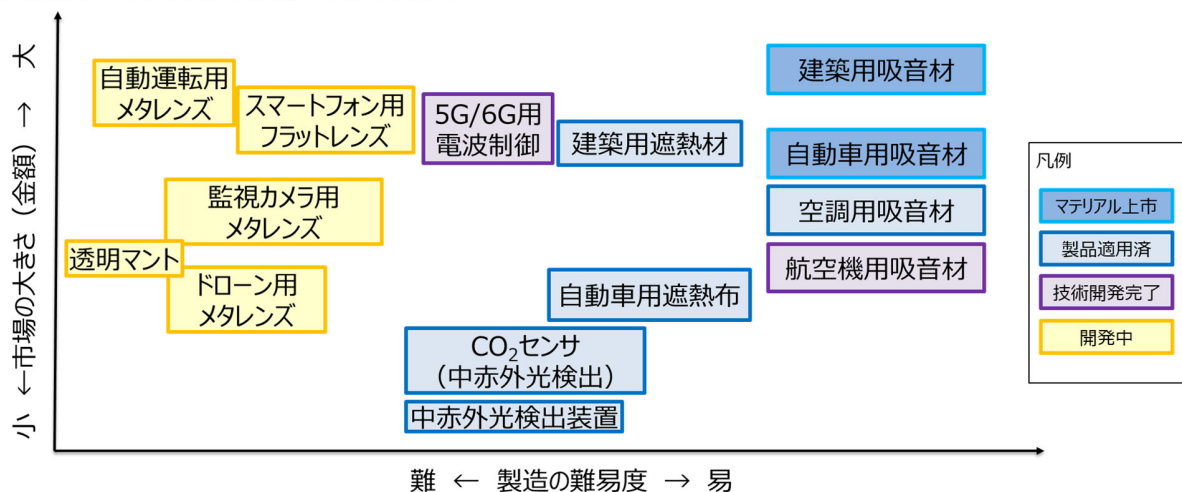
天然に存在する透明な物体の屈折率は必ず正の値であり、物質の外から入った光の曲がる方向は屈折率の値によって決まる。これに対してメタマテリアルでは、物体の表面に、光が通過しようとする際にその光と相互作用して電流が流れ、磁場が発生するような微細構造を形成することによって、天然の物体では実現不可能な、負の屈折率を持っていないと実現できないはずの方向に光を曲げることができる。

可視光や赤外線を含む電磁波の振る舞いはマクスウェル方程式から導かれる波動方程式によって、また、音の振る舞いは音の波動方程式によって表すことができる。メタマテリアルの設計では、これらの方程式を解くことによって、微細構造に求められる形状や物性を決めていく。

有望な活用分野

図表2にメタマテリアルの技術マッピングを示す。横軸の製造の難易度は、制御する波の波長によって決まる微細構造の大きさと、微細構造の配置に求められる精度の兼ね合いから推定した。右にある用途ほど量産しやすいことを示している。縦軸は現時点で想定される市場の大きさであり、上にある用途ほど適用された際の市場が大きいことを示す。ここでは既に量産化が進みつつある2つの用途について紹介する。

図表2 メタマテリアルの技術・市場マッピング



出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

(1) 放射冷却メタマテリアル（遮熱布/遮熱材）

直射日光による温度上昇が問題となる輸送用トラックの車体やデータセンターの建物全体を、放射冷却メタマテリアルを利用した遮熱布や遮熱材で覆うことにより、暑熱環境の改善や冷房にかかるエネルギー消費の削減が期待できる。放射冷却メタマテリアルは、シート表面の材料組成と微細構造を調整することによって、物体から出る赤外線の波長を、空気による吸収なく宇宙に抜けていく波長（大気の窓）である8～13 μ mに変換するというものである。これによって、シートで覆われた物体は炎天下でも冬の夜間のように放射冷却が進むことから、「日中放射冷却」と呼ばれる。この現象はスタンフォード大学の研究チームによって発見された²¹。

放射冷却メタマテリアルでは赤外線の波長を変換することが主眼となり、赤外線の進行方向を揃える必

²¹ <https://patents.google.com/patent/US20140131023A1/en>

要がない。そのため、構造はナノサイズとなるものの、配列性が求められないので大面積の塗布プロセスによる製造が比較的容易である。日産自動車はラディクールジャパンと共同開発を行い、2021年11月に自動車内部の温度上昇を抑えるサンシェードやハーフボディカバー等を純正アクセサリとして上市した²²（図表3）。

図表3 放射冷却メタマテリアルを利用したサンシェード（左）とハーフボディカバー（右）



出所：日産自動車株式会社提供



出所：日産自動車ニュースルーム
(<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/211102-02-j>)
(2022年12月13日閲覧)

また、大阪ガスからのスピンアウト企業であるSPACECOOLは、ENEOSホールディングスとの共同プロジェクトで2022年7月から9月までの3カ月間、放射冷却メタマテリアルに関する実証試験を実施した。具体的には、ENEOS堺製油所の屋外に設置された高圧受変電盤設備（内部に空調機能を保有）の屋根と東西南北の外壁に放射冷却メタマテリアルフィルムを施工し、空調電力削減効果があることを立証した。

（2）音響メタマテリアル（吸音材）

音響メタマテリアルとは、防音材の表面を微細構造にすることで、広帯域の吸音を可能にする材料である。ダイキン工業は同社の一部空調機に取り付け可能な加湿・換気静音キットの通風防音材として、富士フィルムが開発した音響メタマテリアルを採用している²³（図表4）。従来の静音化は、高性能な換気ファンを開発することによって実現されてきたが、換気に必要な通風量を増やすとファンから発生する音が増えるというトレードオフは残ってしまうという問題があ

図表4 音響メタマテリアル防音材の空調機への取り付け例



加湿・換気静音キット

「うるさらX」への
取り付けイメージ

出所：ダイキン工業株式会社プレスリリース
(<https://www.daikin.co.jp/press/2022/20220118>)
(2022年12月8日閲覧)

²² 日産自動車株式会社ニュースルーム

<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/211102-02-j>

²³ ダイキン工業株式会社プレスリリース

<https://www.daikin.co.jp/press/2022/20220118>

った。そこで設計の着眼点をファンから通風路にまで広げ、音響メタマテリアルを防音材に用いることで、広帯域の吸音と通風量を両立することを可能にした。

このほか、音響メタマテリアルは、道路とタイヤの摩擦によって生じるロードノイズの吸音材としての利用が検討されている。車内騒音の主要因はエンジン音であったが、EV化に伴いロードノイズが指摘されるようになった。ロードノイズは機械音のような単一の波長ではなく、路面の状態によってさまざまな波長の音波からなるため、微細構造の設計は空調向けの吸音材と比較すると難しいと考えられる。しかし、理論的には従来の吸音材よりも軽量で高い吸音性能が実現可能であり、車内の静粛性と車体の軽量化を両立させる技術として期待される。

今後の展望

ここでは近年になって急速に研究が進み、近い将来に社会実装が期待される2つの技術を紹介し、さらに素材開発分野で進むAI活用がメタマテリアルの設計に波及する可能性について論じる。

(1) メタレンズ／フラットレンズ

メタレンズとは、メタマテリアルでできたレンズのことである。スマートフォンや自動車、ドローンなどには凹凸形状の光学レンズが4～5枚搭載されているが、その役割をメタレンズ1枚に置き換えることへの期待が高まっている。レンズをメタレンズにすることで、スマートフォンのカメラ部分のデザインを平坦にできることから、メタレンズはフラットレンズとも呼ばれる。

音波や電波と比較すると波長が短い可視光は、制御するための微細構造の形成や量産化への難易度が高い。これに加えて可視光の波長はおよそ360nm（紫）から830nm（赤）まで幅があるため、波長全域での制御が求められるカメラに使えるフラットレンズの設計も、単一の波長を扱う場合と比べてさらに難しい。しかし、ハーバード大学発のスタートアップMetalenz²⁴が、単一の波長の光によって特定の物体までの距離を測定するライダーをスマートフォンなどにも搭載可能なメタマテリアルとして設計することに成功したことから、世界中のスマートフォンメーカーから同技術への注目が高まっており、数年以内での実装が期待される。自動車やドローンでは重量が燃費に直結するため、測距用センサに使われるレンズをメタレンズに変えることでの軽量化への期待も高い。

(2) 通信分野（5G/6G用電波制御）

通信の分野では、5G以降、高周波数帯域の利用が拡大していくが、高周波の電波は伝播する距離が短く、遮蔽物によって吸収されやすいために、1つの基地局でカバーできる範囲が狭く、また、建物内での利用範囲に限られるといった問題がある。これを解決する手段としてもメタマテリアルが有望視されている。電波の波長は可視光よりもずっと長い、数十マイクロメートルオーダーであることから、メタマテリアルに

²⁴ <https://capasso.seas.harvard.edu/>

求められる微細構造のサイズは電子回路の銅配線と同程度である。そのため、5G通信用のメタマテリアルを製造するための基礎技術は既に確立されているといえよう。AGCはNTTドコモと共同で、屋外から屋内に効率的に電波を通す窓ガラスを開発した²⁵。また、大日本印刷は5G電波の到達エリアを広げる効果のある電波反射板を開発した²⁶。反射板に関しては、設置場所によって、どの方向・角度に反射させるかが異なることから、配置するメタマテリアルの微細構造も変わるため、その量産性を確保するためには、オンデマンド製造システムの構築など、製造側での工夫が必要になると考えられる。5Gも現時点では普及途上であることから、6Gの実用化が想定どおり2030年に始まるかどうかは不透明だが、6Gでは5Gよりもさらに高周波数帯域の活用が検討されており、伝播距離が短くなるとされているため、電波の到達エリアを広げるための技術としてメタマテリアルの重要度は増していくだろう。

(3) AIによる設計支援

メタマテリアルの設計では波動方程式を解くことが必要となるが、波動方程式は一般に手計算で解くことができない。そのため、計算プログラムを自作したり、解析ソフトを利用したりといった形で計算機を利用した設計、開発が行われてきた。メタマテリアルの実装には、波をどのように利用するかアイデア創出を含む製品設計と、製品に求められる性能に対するメタマテリアルの組成や構造との擦り合わせによる最適化が重要である。最適化はAIが得意とするところであることから、今後さらに研究開発事例が増え、データとして蓄積されていくことで、AIによる設計支援の幅も徐々に広がっていくと予想される。

従来、日本の製造業は、開発・設計で最適化された条件を製造に落とし込んだ上で、さらに洗練させていくことを得意としてきた。日本の製造業がAIによる設計支援を取り入れることで、メタマテリアルの有望分野への適用が加速・洗練されていくことも、期待したい。

 **知財レポートはこちら**

²⁵ AGC株式会社プレスリリース
https://www.agc.com/news/detail/1201960_2148.html

²⁶ 大日本印刷株式会社プレスリリース
https://www.dnp.co.jp/news/detail/10161328_1587.html

2023年に注目すべき技術

(4) 量子通信—量子インターネット実現を目指して—

三井物産戦略研究所 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

2022年のノーベル物理学賞が「量子もつれ」という不思議な現象の存在を示した研究者3名に与えられた。量子通信とはこの量子もつれを利用して行う通信のことであり、その安全性の高さから、高レベルのセキュリティが求められる領域での活用が期待されている。加えて、量子関連技術をつなぐ量子インターネットを支える基盤としての役割も想定されている。日本では、メルカリ等の企業での研究も進み、今後20～30年程度での実用化を目指しており、今、注目すべき技術といえる。

量子通信とは

(1) 量子通信と古典通信の違い～量子ビットとデジタル～

我々が現在使用しているネットワークは古典通信と呼ばれ、0か1の値のビットを送受信するデジタル通信網である。スマートフォン等でのモバイル通信、衛星を利用した通信、光ファイバーを利用した有線通信等はすべてこの古典通信に分類される。対して量子通信は、0か1のビットではなく量子ビット²⁷を送受信し、ネットワーク上はEnd-to-Endで量子的な通信を行える。そのため、今までとは全く異なる通信システムとして機能することが期待されている。次節で説明する量子もつれが利用されており、現在、この量子通信の各要素技術の検証が進んでいる。

(2) 量子の特性～量子の重ね合わせと量子もつれ～

量子とは、極々小さな物質やエネルギーのことをいう。具体的には、原子、電子、光の最小単位である光子、物質を構成する最小の要素である素粒子の一つであるニュートリノ等のことだ。量子は、物質としての性質（粒子性）と波としての性質（波動性）を併せ持つなど、我々の目に見える世界の物理法則とは全く異なる振る舞いをする。その特殊な振る舞いとして量子の重ね合わせと量子もつれがある。

量子の重ね合わせとは、2つまたはそれ以上の状態を同時に取りうる性質のことである。従って、従来のコンピュータが0か1のどちらかの状態をとるのに対し、重ね合わせを利用する量子コンピュータは0と1のどちらも取りうる。また量子の状態は、観測することで決定する。

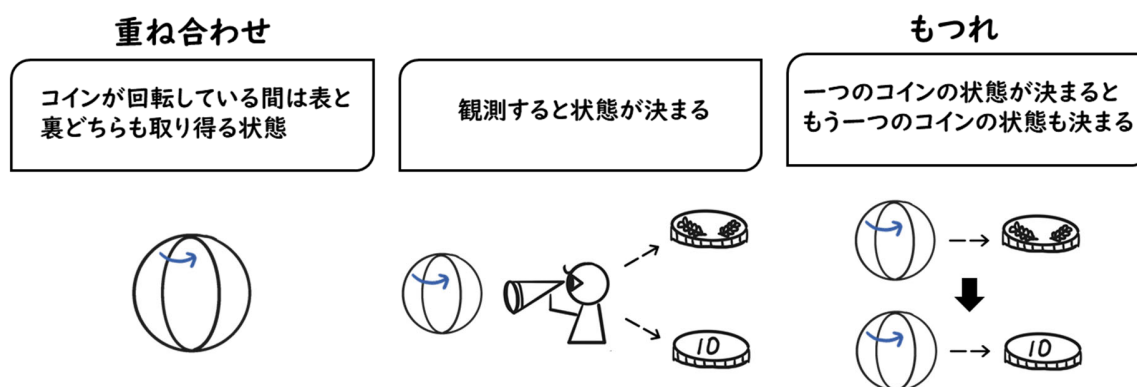
量子もつれとは、複数の量子同士が強い相互関係にある状態のことで、ある量子の状態が変化するとともにつれ関係にある量子の状態も瞬時に変化する。そしてその関係はどれだけ距離が離れていても（例えば銀河の端から端であっても）保たれる。

例えば、コインを回転させると、回転中は表と裏どちらの状態になるかはわからない。言い換えれば、

²⁷ 量子コンピュータによる計算の基本となる単位。量子の特性で0と1の両方の状態を同時にもつ。

どちらの可能性もとっている状態ということである。これが重ね合わせだ。次に、2枚のコインを回転させるとする。この時、片方のコインが倒れて裏表が決まった瞬間、もう片方のコインも同時に裏表が決まる。これがもつれだ（図表1）。

図表1：量子の特性

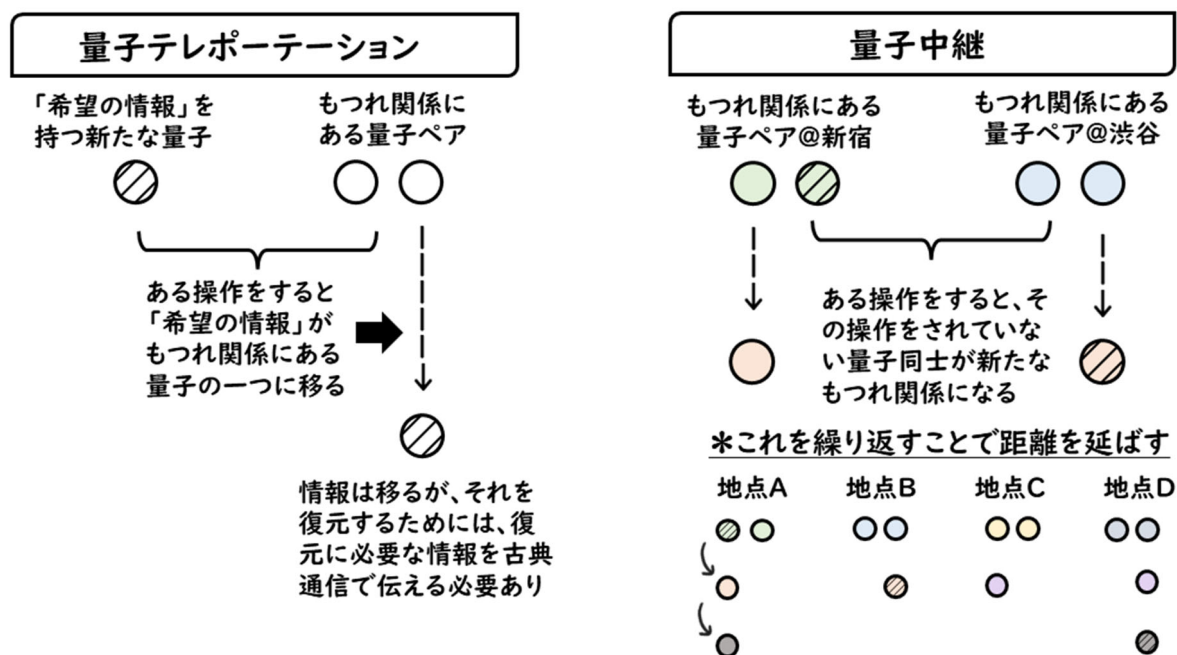


出所：三井物産戦略研究所作成

(3) 量子もつれを利用する量子通信～その仕組みと技術、課題～

量子もつれでは、自分の手元にあるコインの情報は遠く離れた場所にあるコインにも一瞬にして伝わるが、もつれだけでは希望の情報は送信できない。自分の手元にあるコインを観測したときの状態は、自分が観測したことで決定したのか、あるいは他者がもう一つのコインを観測したことで決定したのかわからないからだ。そこで登場するのが量子テレポーテーションと言われる手法で、これにより、もつれ関係にある量子のペアと希望の情報をもつ量子にある操作を行い、情報を移転させる。ただし、もつれ関係は非常に壊れやすく、遠隔地間で安定した関係性を保つことが困難であるため、少し工夫が必要となる。現在、遠隔地間で量子もつれを作る方法として、量子テレポーテーションを応用した量子中継が有望視されている。これは、もつれ状態にある2組の量子ペアにある操作を行うことで新たなもつれを作り出し、それを繰り返して距離を延ばしていくというものである（図表2）。

図表2：量子テレポーテーションと量子中継



出所：三井物産戦略研究所作成

量子通信では、既存の光ファイバー設備のルーター等を除いたファイバーを流用できる。また、通信媒体には、電子等と比べてもつれが壊れにくく長距離を飛ばしやすいことから光子を活用することが想定されているが、実用化するには依然として距離が不足している。光子による中継については、量子メモリ間の操作で中継する方式と、光子間の操作で中継する方式の2通りある。前者であれば、100%の確率で中継が可能であるが、後者は100%の確率では中継できない。それぞれ利点・欠点があり研究が進む。後者では中継1回約33kmの距離を飛ばすことに成功したとの報告もあるが、まだまだ十分な距離には至っていない。

量子中継に必要な要素技術のうち、代表的なものを2つ紹介する。1つは、光子をもつれ状態にするための量子もつれ光源、もう1つが量子の状態を保存する量子メモリである。特に量子メモリについては、量子状態の長時間保存、エラー確率の低下、光子の放出・吸収の成功確率向上など、光子のもつれを遠くまで中継するためにはさらなる改善が必要だ。より優れたメモリ開発に向けて、ダイヤモンドや希土類元素を添加物とする物質等、材質の研究や、量子メモリを必要としない全光中継方式の研究も進んでいる。

中国の研究チームが、量子中継ではなく量子もつれの配送ではあるが、人工衛星とレーザー光によって地上・衛星間において1000km以上の配送を、またドローンを用いて100m程度の配送に成功したとの報告もある。

(4) 量子通信の特徴～安全性と計算処理速度の向上～

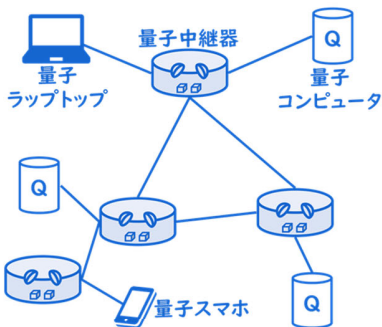
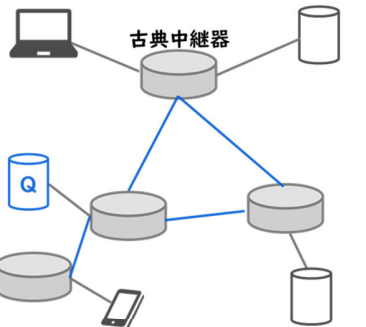
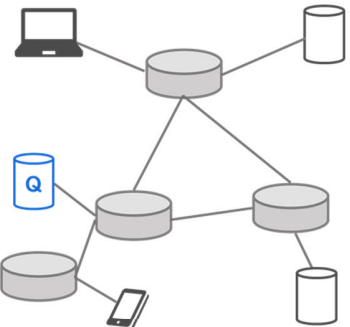
量子通信の特徴の一つに高い安全性がある。End-to-Endで量子もつれを実現できるので、通信の端と端

だけで暗号の鍵を生成すればよく、また、鍵は観測した時点で壊れてしまうため、盗聴があれば必ずその痕跡が残り、理論的にはハッキングが不可能となる。

量子通信と似た通信方式に量子暗号通信がある。この通信方式では、送信する情報自体は古典通信での情報と変わらないが、情報の暗号化には量子の仕組みを利用する。量子暗号通信は量子通信と同様、セキュリティ的には安全であるとされているが、通信の中継地点には古典通信と同様の仕組みが採用されているため、ファイバーの中を通る通信以外、安全性は古典通信と変わらないことに注意すべきだ。

もう一つの特徴は、計算処理の速さだ。遠隔地にある複数の量子コンピュータ²⁸をつなぐことで、量子ビット数に対して指数関数的に大きな計算能力を生み出せるので、将来的に、膨大なリソースを必要とする計算をより短時間で処理できるようになることが考えられる。これまで述べてきた量子通信とその他の通信の違いを図表3に示す。

図表3：量子通信とその他の通信の違い

通信種別	量子通信	量子暗号通信	古典通信
概要	量子ビットの送受信が可能で、量子もつれを利用	情報自体は既存のビット（0か1）で送受信し、暗号化部分にのみ量子の仕組みを利用	既存のビット（0か1）を送受信
活用原理	量子もつれ	量子もつれではない	—
ネットワークイメージ	 ・ネットワーク上すべてで量子ビットを取り扱う ・ネットワークにつながるデバイスは量子情報入出力できる	 ・中継器をつなぐネットワークに量子の仕組みを利用 ・中継器そのもの、また中継器からデバイスまでは古典通信	 ・ネットワーク上すべてでデジタル情報を取り扱う
備考	量子通信基盤上で量子暗号通信を行うことも可能	—	光ファイバー、衛星、モバイル通信等がある

出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

有望な活用分野

（1）高い安全性が必要とされる分野～国家機密、金融、医療・ゲノム分野等～

現在の暗号化技術の安全性は、解読に必要な計算が現実的な時間内に終わられないようにすることで担保している（計算量的安全性）。しかし、量子コンピュータの実用化が進めば、計算量的安全性はたやす

²⁸ 量子コンピュータは、0でも1でもある情報、量子ビットを取り扱えるコンピュータのこと。現在のコンピュータとは全く異なる計算の仕組みを持ち、例えば、今のスーパーコンピュータが1万年かかる計算を量子コンピュータは4分で解くことができる。

く破られ、盗聴が横行することが考えられる。そのため国家レベルの情報通信においては、量子通信技術を持つことが安全保障における超重要項目となると言われている。

まずは、特にセキュリティが重視される外交機密などの国家情報をはじめ、金融情報、個人のゲノム・生体・医療情報等の分野で活用され、その後、個人レベルのネットワークへと広まっていくことが見込まれる。ちなみに、中国ではすでに量子暗号通信を実現しており、政府が活用していると言われている。

(2) さらなる未来での可能性～巨大な量子コンピュータの実現～

量子通信によって地域・国を超えて量子コンピュータがつながり、量子ビットで情報のやり取りができれば、多数の量子コンピュータがリアルタイムで協調して膨大な計算を行うことが可能となる。つまり、巨大な量子コンピューティング能力がどこからでも利用できるのだ。

これにより、次のような未来が考えられる。例えば、量子コンピュータは配送ルート等を最適化するための計算を得意とするが、より高度になれば、渋滞が一切ない都市交通が実現するかもしれない。創薬においては、さまざまなシミュレーションが一瞬にして行え、新種のウィルス感染症などが発生しても、すぐに治療薬を開発できるかもしれない。高精度な気象予報により天災を予測できれば、事前対策を講じて被害を最小限に食い止めることができる。さらに先の未来に、自動運転との組み合わせで事故確率が低下すれば、車のボディには人命を守るための硬い素材を使う必要はなくなり、柔らかい素材を用いたより自由な発想のデザインの車が登場するかもしれない。また、個人所有のデバイスでも量子通信を行えるようになれば、さらに多くの可能性が広がる。現行のインターネットが、初期の構想段階では現在展開されているような世界を予想できなかったように、量子通信がネットワーク基盤として確立すれば、そこから生み出されるアプリケーションは無限の可能性をもつだろう。

今後の展望

(1) 各国の動向

米国では2020年に、量子通信により実現する量子インターネット²⁹関連の支援を手厚くする法案が提出されるなど、近年、量子通信の活用に積極的な動きを見せている。同国エネルギー省は全国規模の量子インターネット構築を推進しており、この政策には6100万ドルの予算がついた。このプロジェクトには、シカゴ大学等の研究機関が中心となって研究にあたる。また同年、米国立科学財団（NSF）も同研究開発プロジェクトを発表し、2025年までの5年間で2600万ドルの予算が分配されている。どちらの研究プロジェクトも基礎研究からテストベッドまでサポートされる。

欧州では、動きだしがより早く、各地の大学や企業などによる量子関連技術のアライアンス、Quantum

²⁹ 量子通信によりさまざまなデバイスがつながることでネットワークになり、さらにネットワーク同士が繋がるとインターネットになる。

Internet Alliance (QIA) を組み、2018年から量子インターネットのテストベッドの構築を開始している。さらに、2022年から7年間で大都市間を結ぶ量子ネットワークを構築するプロジェクトがスタートしている。同プロジェクトには始めの3年半で2400万ユーロという過去のプロジェクトとよりも多額の予算が割り当てられるなど、その力の入れようがうかがえる。また、スペイン、ドイツなど各国の研究機関でも独自の研究が進む。

中国では、量子インターネットに関する大型プロジェクトは見当たらないものの、量子技術全般に多額の資金を投じて研究開発を行っている。例えば、量子もつれ配送や衛星量子暗号通信を世界で初めて実証するなど、量子暗号通信における先進的な研究結果を多く公表している。2022年のノーベル物理学賞を受賞したツァイリッガー氏の弟子である潘建偉氏が同国の量子研究をけん引しており、上述の世界初の量子暗号通信の実証についても、ツァイリッガー氏の協力のもと、潘氏が実行したとみられる。

日本では、特に量子暗号通信の研究が盛んであるが、量子通信の研究プロジェクトもスタートしている。国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）が先進的な研究の助成を目的に立ち上げたムーンショット型開発事業においては、量子インターネットも見据えた量子通信の要素技術やアーキテクチャの検討、テストベッド構築がなされている。これらの研究活動は、大学などの研究機関が中心となり行っているが、メルカリが設立した研究開発組織、R4Dに所属する研究者も参加するなど、民間でも開始されている。

量子技術の研究開発において国際的に連携する目立った動きはないものの、各国でAI等に並ぶ超重要技術に位置付けられていることもあり、日米欧では個人レベルでの研究者の交流は進んでいる。

図表4：量子通信に関する各国の動き

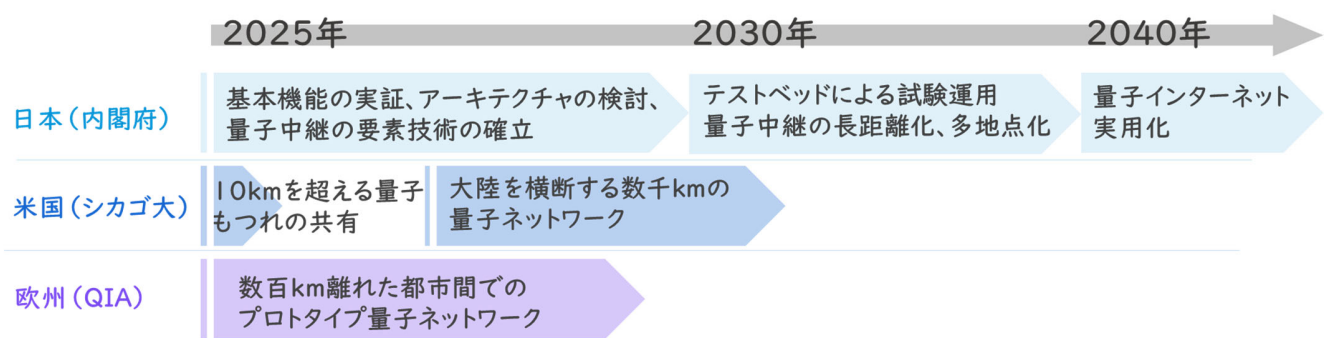
国	日本	米国	欧州	中国
代表的な支援機関	JST:科学技術振興機構	DOE:米国エネルギー省	QIA:Quantum Internet Alliance	—
支援概要	ムーンショット目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性汎用コンピュータを実現」における複数のプロジェクトの中に関連研究あり。 量子中継の要素技術研究、量子通信ネットワークのテストベッド構築やアーキテクチャの実証など。	同省が管轄する17の国立研究所すべてを量子インターネットの基幹ネットワークとして接続することを目指し、複数の研究開発プロジェクトを支援。	大都市間を結ぶ量子ネットワークの構築を目指す7年間のプロジェクト。	量子インターネット構築を掲げる大型プロジェクトは見当たらないものの、量子暗号通信の研究においては先行する。量子中継など、量子通信の基盤技術に関する実験を実施。
支援予算	(参考) 目標6以外の目標も含むムーンショット型研究全体で、令和3年度の補正予算は680億円。量子通信関連の研究はその中の一部。	61Mドル(およそ83億円)	24Mユーロ(およそ35億円) *2022年10月から3年半の予算額 *QIAによる2022年までの過去3年間の予算は10Mユーロ(およそ14億円)だったため、額は倍以上に増えた。	(参考) 2016年から5年間で量子技術関連に約70億元(およそ1400億円)の研究を計画、別途量子研究拠点を整備している。 量子暗号通信関連予算はその中の一部。
関連組織	慶応義塾大学、大阪大学、早稲田大学など	- 研究機関：University of Chicago, Caltech, Cornell University等 - 企業：Boeing, IBM, Intel, Google等	- Qutech(オランダの量子技術研究機関) - ICFO(スペインのフォトニクス等の研究機関) - University of Innsbruck(オーストリア) - Paris Centre for Quantum Computing(フランスの量子技術研究機関) を中心とした40の研究機関、企業、スタートアップなど	中国科学技術大学、中国科学院大学など
その他の取り組み	- 量子インターネットの実現が見込まれる20~30年後も現役世代の研究者を中心に量子インターネットタスクフォースを組成。2021年にホワイトペーパーを公表。メルカリ、大阪大学、横浜国立大学、東京大学などの研究者が参画。 2020年には大学発ベンチャーとしてLQUOMが設立されるなど、スタートアップでの動きもある。	- NSF(アメリカ国立科学財団)による、アリゾナ州でのテストベッド構築等に5年で26Mドル(およそ35億)の予算 - AWSが量子ネットワークと量子インターネットを研究するAWS Center for Quantum Networkingを発表	- ICFOが在カタルーニャの研究機関とともに、ソフト・ハードの両面において量子通信関連技術の研究予算に15Mユーロ(およそ22億円)を予定。 - Q.Link.X(ドイツの量子技術の発展を目指す研究機関と企業の共同プロジェクト)に連邦教育科学研究技術省が2018年から3年間でおよそ15Mユーロ(およそ22億円)の資金提供。	- 中国科学技術大学の潘建偉氏率いる研究チームが人工衛星による量子もつれ配送に成功 2025年までに量子暗号通信の全国規模のネットワークを構築予定

出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

(2) 量子インターネット実現に向けたロードマップ

内閣府によれば、量子インターネットは2040年頃に実用化される見込みである(図表5)。それまでに、要素技術の確立、テストベッドによる試験運用や量子中継の長距離化実現などが予定されている。米エネルギー省のプロジェクトに参画するシカゴ大学が掲げるロードマップでは、今後10年のうちに大陸間を横断する数千キロの量子ネットワークの構築を目標としている。欧州では上述のとおり、QIAが2022年から7年間で数百キロ離れた都市間での量子ネットワーク構築を目指す。中国については、量子暗号通信についての研究は進むものの、量子インターネットについてのロードマップは見当たらない。

図表5：各国の量子インターネット実現に向けたロードマップ



出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

(3) まとめ

現在はまだ、要素技術の検討や小規模な範囲での実証実験にとどまっているが、量子通信、量子コンピュータ、量子暗号等の量子関連技術が有機的につながり、安全で高速、高度な計算処理能力をもつ情報インフラとして量子インターネットが実現すれば、経済界に与えるインパクトは大きい。欧米では今後さらに研究が進み、日本でも若手研究者を中心に連携の動きがみられ、本分野への注目が徐々に高まっているが、人、モノ、金、全てにおける支援がまだ不十分だ。想定より早く到来するかもしれない量子インターネット時代に備え、ビジネスパーソンとしても、技術とアプリケーションの両面の動向に注目していくべきである。

 [知財レポートはこちら](#)

「2023 年に注目すべき技術」に関する知財レポート

三井物産戦略研究所 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、「2023年に注目すべき技術」に取り上げられた4つのテーマ（菌糸体、アップサイクル技術、メタマテリアル、量子通信）について知財の国際動向を調査・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および各種技術情報検索ツールであるPatSnap Discoveryを利用して実施した。各種データの取得日は2022年12月5日である。

各図表の見方

【図表1】関連特許の出願動向

縦軸は特許ファミリー件数、横軸は出願年であり、2006年から2022年の年ごとの出願件数推移を示している。特許ファミリーとは、同一の特許出願に由来して各国へ出願された一群の出願グループを指す。たとえば、米国にした特許出願を中国にも出願した場合、これらは2件の特許出願としてカウントせず、1件の特許ファミリーとしてカウントしている。

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2023年1月現在、2021年以降の特許出願の一部は公開されていない。しかし、本レポートの性質上、最新の特許出願状況を参照することが好ましいと考え、2021年以降の特許出願件数については予測値として掲載している。

【図表2】出願人の国 上位ランキング

2003年から2022年までの特許出願につき、どの国の出願人が何件出願しているか、すなわち発明の出所（国）のランキングを示している。バブルの大きさは出願件数に比例する。

【図表3】特許権者 上位ランキング

2003年から2022年までの特許出願につき、現在有効な特許を所有する上位特許権者のランキングを示している。

菌糸体

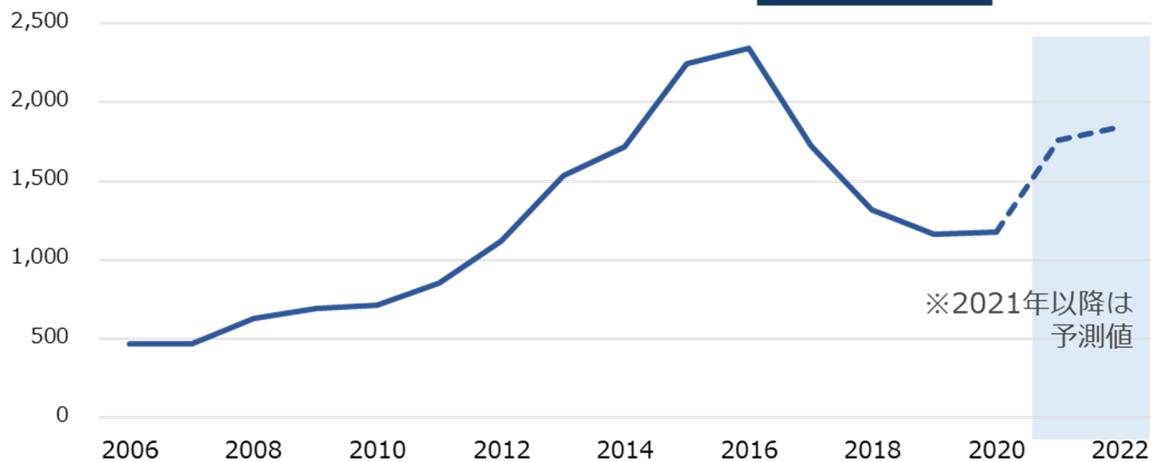
2023/01

【図表1】 菌糸体関連特許の出願動向

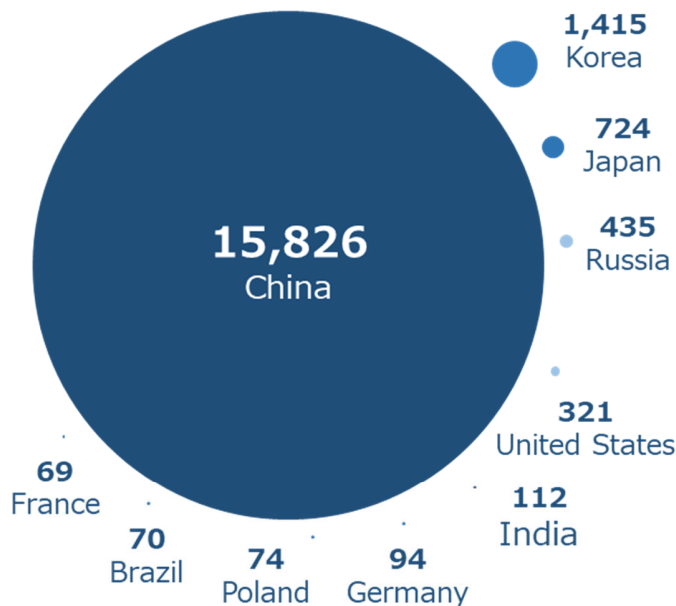
全出願件数（2003-2022）

20,985

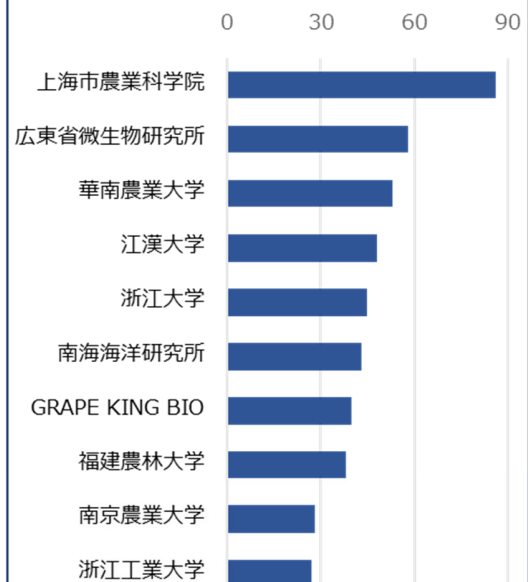
特許ファミリ



【図表2】 出願人の国 Top 10



【図表3】 特許権者 Top 10



学術論文件数
(2017-2022)

7,816

資金調達額
(2017-2022)

524M (USD)

アップサイクル技術

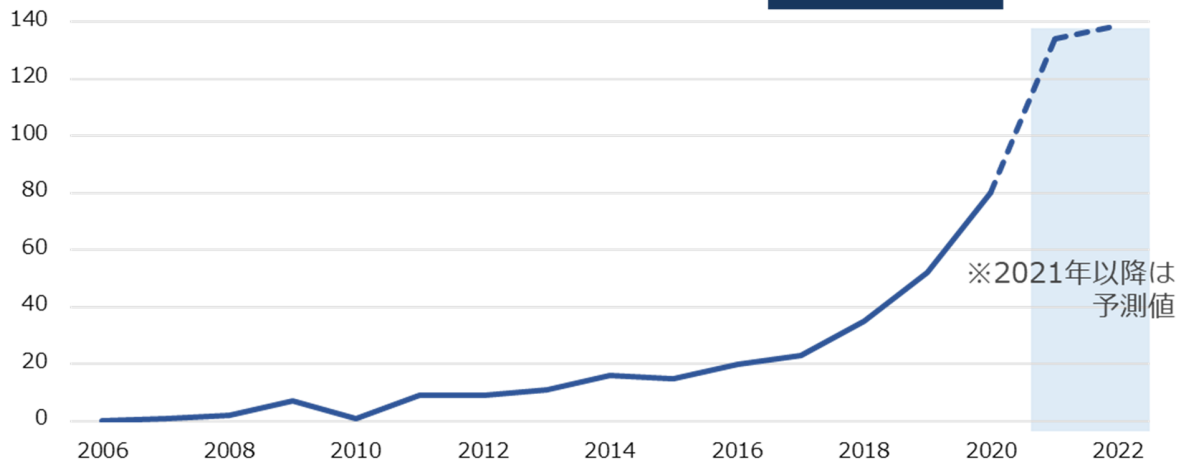
2023/01

【図表1】 アップサイクル技術関連特許の出願動向

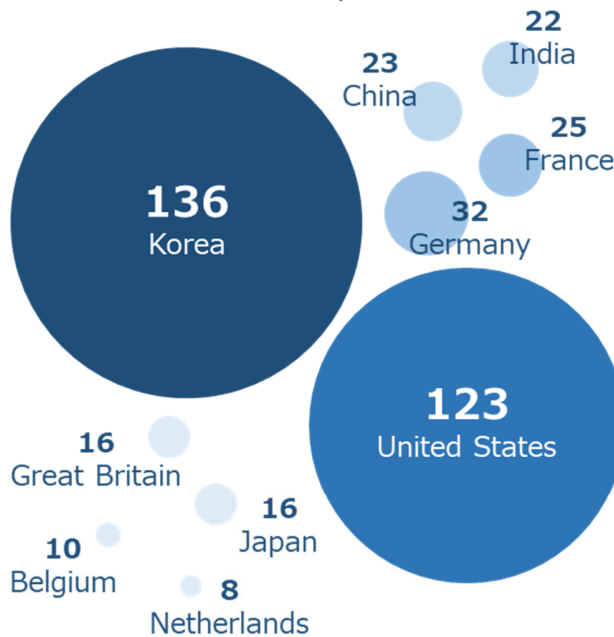
全出願件数 (2003-2022)

485

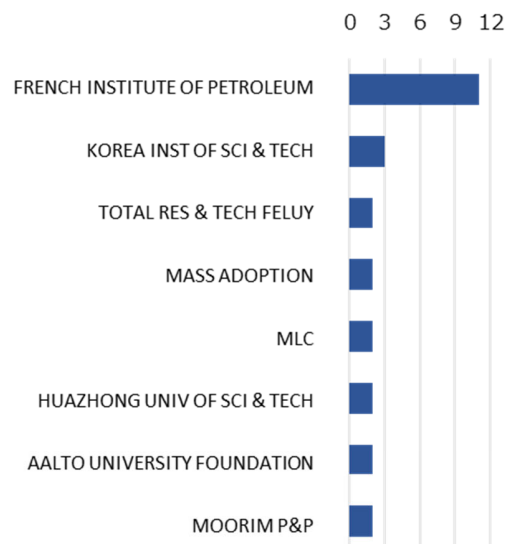
特許ファミリー



【図表2】 出願人の国 Top 10



【図表3】 特許権者 Top 8



学術論文件数
(2017-2022)

1,369

資金調達額
(2017-2022)

634M (USD)

メタマテリアル

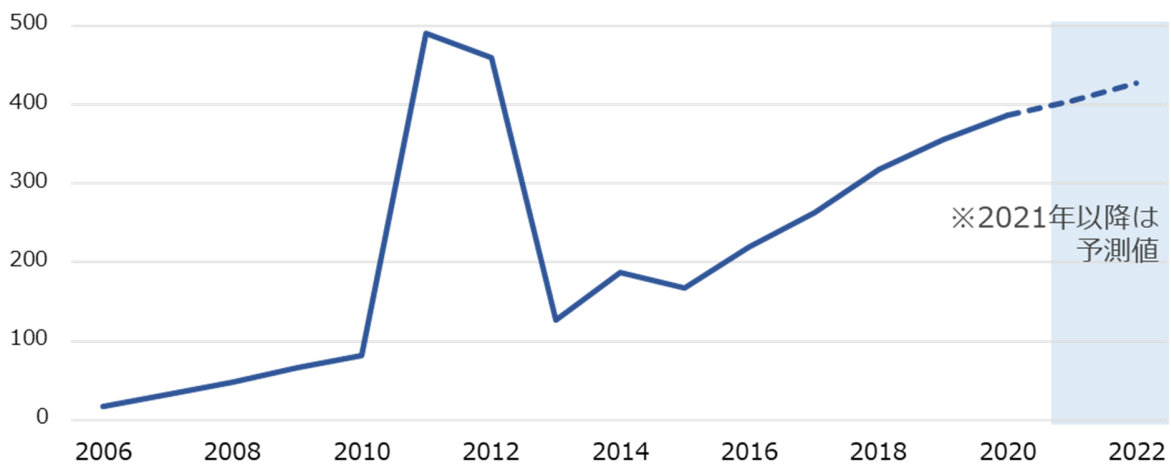
2023/01

全出願件数 (2003-2022)

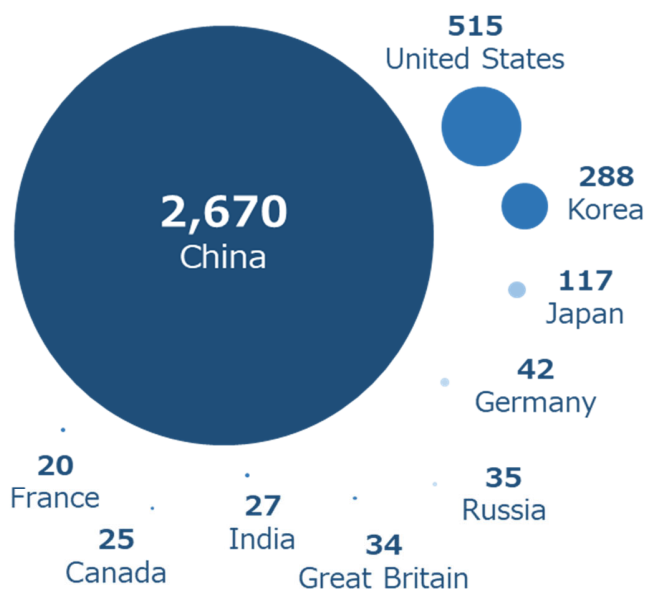
【図表1】メタマテリアル関連特許の出願動向

3,875

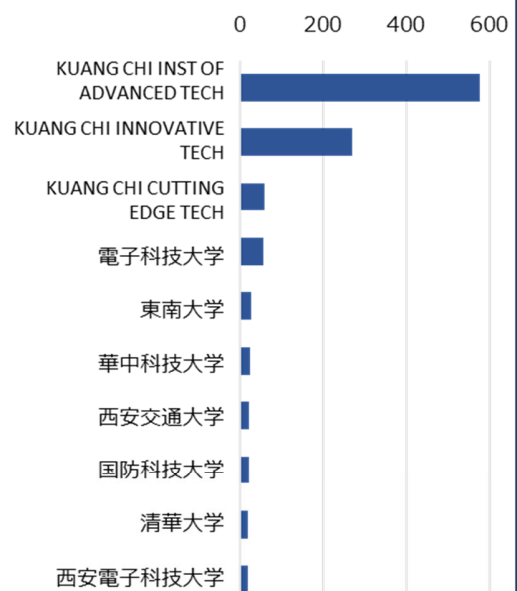
特許ファミリ



【図表2】出願人の国 Top 10



【図表3】特許権者 Top 10



学術論文件数
(2017-2022)

19,811

資金調達額
(2017-2022)

1,221M (USD)

量子通信

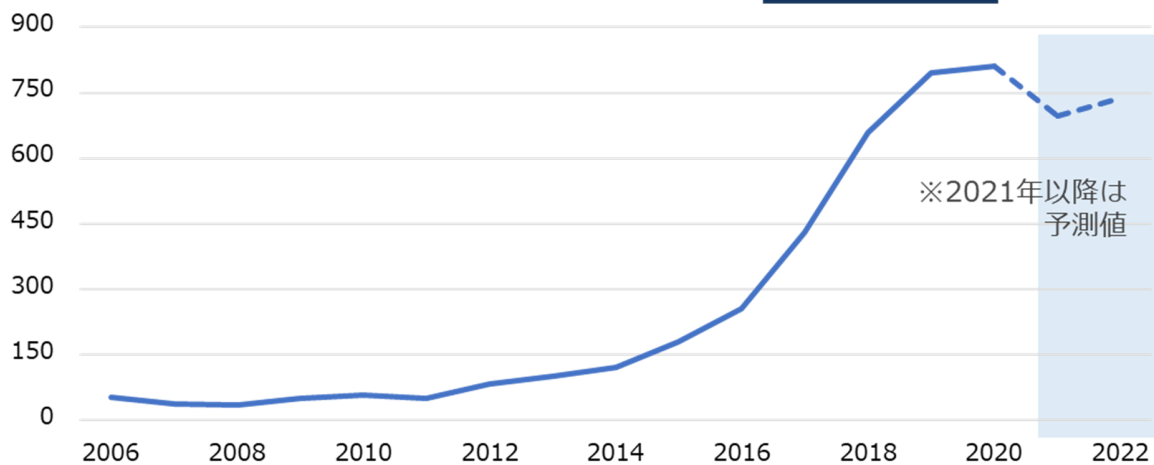
2023/01

【図表1】 量子通信関連特許の出願動向

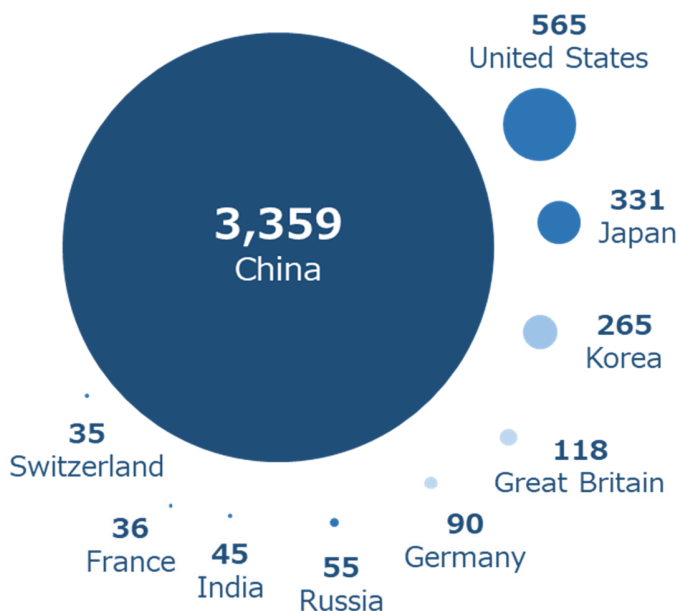
全出願件数 (2003-2022)

5,172

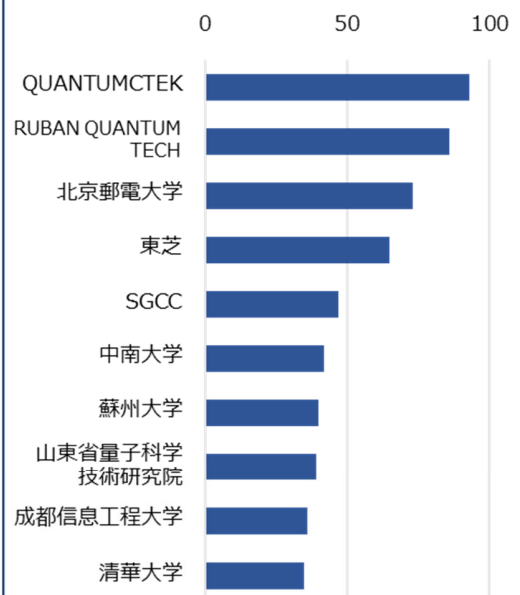
特許ファミリ



【図表2】 出願人の国 Top 10



【図表3】 特許権者 Top 10



学術論文件数
(2017-2022)

7,753

資金調達額
(2017-2022)

950M (USD)

