

戦略研 Biz Tech

注目すべき技術 2026

三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部

はじめに

世の中の技術やイノベーションは日々刻々と変化しており、その動向からは一時も目を離せません。

私たち研究員は、グローバルな視点からそうした変化をモニタリングし、市場の趨勢を読み取りながら、三井物産グループとして次なる布石をどこに打つべきかを見極めるべく、調査・研究を進めています。

2026年、技術・イノベーション情報部として発信する「**戦略研 Biz Tech**」はその内容を一新しました。

まず、技術進展のスピードが一段と加速していることを踏まえ、早ければ半年後、長くても数年内には実装されると見込まれる技術に着目し、近い将来のマイルストーンとなりうるテーマを「**注目すべき技術 2026**」として5つ厳選しました。

さらに今回、新たな試みとして「**社会を変えるイノベーション 2026**」を立ち上げました。一人の研究員や一つの分野だけでは捉えきれない社会・産業横断的な技術が増えてきたことを踏まえ、複数の研究員が専門性を持ち寄り、一つのテーマを共同で分析・執筆をしています。それぞれ異なる視点から技術の本質と波及効果を複合的に捉え、皆様に新たな示唆をお届けすることを目指しています。

これらを総称して新生「**戦略研 Biz Tech**」と呼び、2026年の新たなスタートとしたいと思います。

まずは、本稿では先行して「**注目すべき技術 2026**」を掲載します。

私たちは今後も知の結集を通じて、三井物産グループ、そして社会への価値創出を目指して参ります。

技術・イノベーション情報部 川口 拓也

CONTENTS

- (1) キラーアプリを得て本格普及段階に入ったSiCパワー半導体
—人気ハイブリッド車の「心臓」から始まるモジュールの多様化と事業機会— / 小川 玲奈2
- (2) 製薬産業における「ラボラトリーオートメーション」
—機器・ソフトウェア・ロボット技術などで変わる創薬— / 加藤 貴子9
- (3) 二次電池の高性能と低コストを両立させるリチウムマンガニッチ正極
—EV用電池への適用に向けて異なる方向に進む中国と欧米韓— / 趙 健 14
- (4) データセンターでの導入が進むCPO
—光電融合がいよいよ普及期に入る— / 辻 理絵子 19
- (5) 産業化フェーズへ向かう微小重力利用技術
—「軌道上実験」が拓く次世代ものづくりの新潮流— / 金城 秀樹 24

MITSUI & CO. GLOBAL STRATEGIC STUDIES INSTITUTE

キラーアプリを得て本格普及段階に入ったSiCパワー半導体

—人気ハイブリッド車の「心臓」から始まるモジュールの多様化と事業機会—

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

なぜこの技術を取り上げるのか

2025年12月17日に国内販売が開始されたトヨタの新型「RAV4」で、トヨタのハイブリッドシステムとして初めてSiCパワー半導体が採用された。先代のRAV4は、2024年に新車販売台数で世界1位を獲得している乗用車である。環境負荷と経済性のバランスの取れた「電動車の現実解」であるハイブリッドカーかつ売れ筋の車種へのSiCパワー半導体搭載は、2026年はSiCパワー半導体の普及が一気に進む変曲点になると考えられる。

Summary

- パワー半導体は家電、自動車からインフラまで電気を使う全ての機器に搭載され、機器の心臓のような役割を担っている。中でもSiCパワー半導体は2035年に2兆9034億円、2025年比で6.4倍の成長が予想されている。
- 2024年の世界ベストセラー車であるトヨタRAV4の次期モデルのハイブリッドシステムにSiCパワー半導体が採用されたことで、車載での普及本格化が見えてきた。
- 小型軽量化と信頼性向上の要求は今後も続いていくため、SiCウエハー製造、前工程、後工程、実装でのモジュール化に関わる全ての企業に成長を享受する機会がある。

1. SiCパワー半導体とは

1-1. パワー半導体とは

パワー半導体とは、大きな電流や電圧を制御することのできる半導体を指し、自動車や家電から電車や送電設備などのインフラまで、電気を使用する全ての機器に搭載されている。ロジックやメモリーが情報の処理や記憶を担うことから人間の脳に例えられるのに対し、パワー半導体は機器を動作させるための電流を機器全体に適切な形で届ける役割を担うことから、血液を全身に行き渡らせる心臓に例えられる。半導体デバイスにおける位置付けは分類方法によって異なるが、ロジックやメモリーのように多数のトランジスタを一枚のウエハー上に集積する集積回路（IC）ではない。パワー半導体は、単独のトランジスタやその組み合わせ（モジュール）で動作させ、大きな電流や電圧を扱う各種半導体デバイスの総称であり、パワートランジスタ、ダイオードなどがある（図表1）。

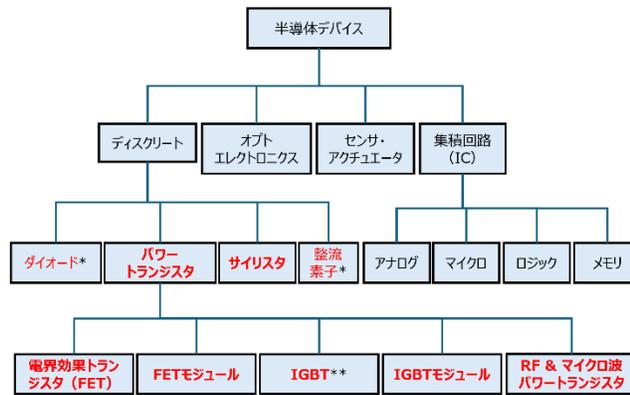
パワー半導体の世界市場は、2025年の3兆5285億円から2035年には7兆7710億円¹と、今後10年で約2.2倍の成長が見込まれている。その成長をけん引する用途は車載、再生可能エネルギー、通信・データセンター向けと考えられる。その増加分の過半を占めるのが次世代パワー半導体である。従来のパワー半導体ではシリコンが基板（ウエハー）として用いられてきたが、次世代パワー半導体では、パワートランジスタの中でもシリコンとは異なる化学組成のウエハーを用いて製造される。

¹ 富士経済「2025年版 次世代パワーデバイス関連市場の現状と将来展望」

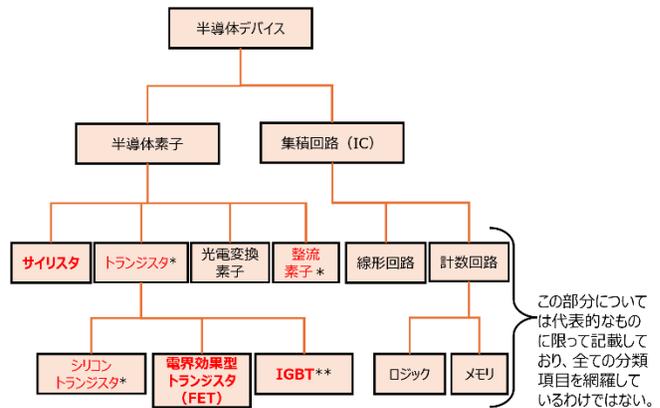
図表1：半導体デバイスの分類におけるパワー半導体の位置付け

赤字で書かれたデバイスのうち、定格電流が1A以上のものが一般に、パワー半導体と呼ばれる。

WSTS（World Semiconductor Trade Statistics）分類



経済産業省統計の分類



*ダイオード、整流素子、(シリコン) トランジスタの中には、定格電流が小さいものも存在する。左記のデバイスについては一般に、定格電流が 1A 以上のもののみが、パワー半導体に該当する。

**Insulated Gate Bipolar Transistor の略

出所：JEITA「Green Clean Semiconductor よくわかる半導体」https://semicon.jeita.or.jp/book/docs/green_clean_semicon_1.pdf (2025年11月5日最終閲覧) から三井物産戦略研究所作成

1-2. 次世代パワー半導体の最有力株SiCパワー半導体

次世代パワー半導体のうち、ウエハーに炭化ケイ素 (SiC) を用いるパワー半導体がSiCパワー半導体である。パワー半導体に対して年々さらなる省エネ高効率化が求められる中、近年では、従来のパワー半導体として用いられてきたシリコンでは、要求を満たすための耐熱性、耐電圧などの充足が物理的に困難となりつつある。そこで本格化してきたのが、より物理的な性能に優れた次世代パワー半導体の開発だ。SiCパワー半導体は現在、次世代パワー半導体の中で最も市場規模が大きい。2025年の世界市場は4558億円と見込まれており、2035年には2兆9034億円、2025年比で6.4倍に成長すると予想されている。他の次世代パワー半導体と比較した際のSiCパワー半導体の最大の利点は、ウエハーにシリコンを用いるパワー半導体の製造技術をそのまま転用できることにある。これにより、ウエハーを製造した後のデバイス製造プロセスにかかる開発コストが他の次世代半導体と比較して低く抑えられ、量産で先行した。

従来のシリコンでは、融解させたシリコンに種結晶を沈め、引き上げることでインゴット²を製造しているが、SiCは融解しないため、異なるプロセスで製造される。量産では主に昇華法や溶液法 (図表2) が用いられるが、SiCインゴットはシリコンインゴットよりも製造に時間がかかるため、シリコンと比較してインゴット価格も、インゴットから切り出して製造されるウエハーの価格も高くなる。従って、シリコンからSiCへの置き換えは、高いウエハー価格を許容してもSiCの小型・軽量化や省エネ化といったメリットが生きる用途である電車、産業機器、電動車 (バッテリーのみで駆動するバッテリー電気自動車「BEV」やハイブリッド車「HEV」) から進められている。図表3に用途別の定格電流・定格電圧の範囲と、シリコンから次世代半導体への代替が進む領域を示す。

² 純度の高い金属の塊のこと。半導体製造に用いられるウエハーは、円筒状のインゴットを薄く裁断、研磨することで製造される。

図表2：SiCインゴットの製造方法および概要

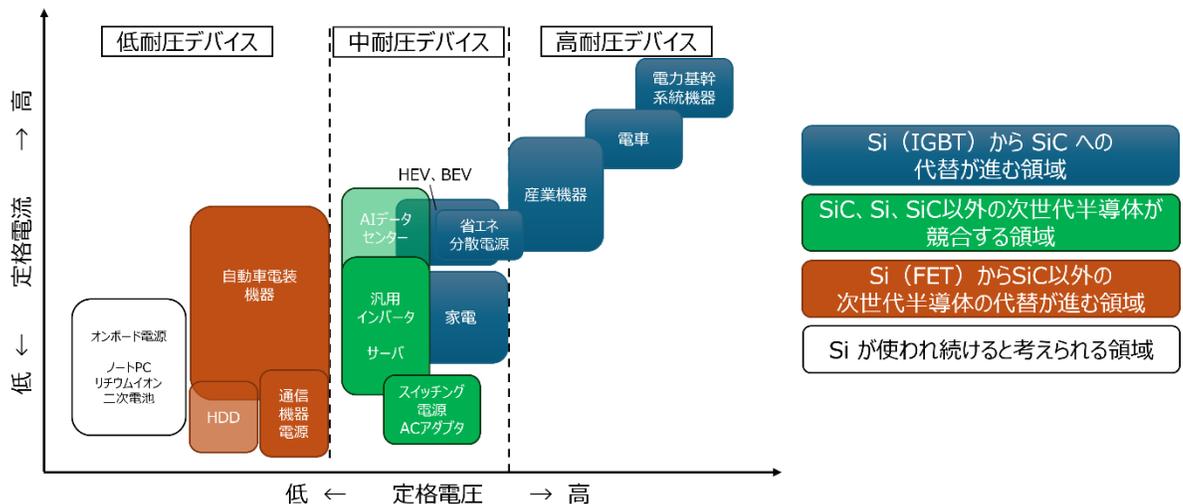
	昇華法(PVT法)	ガス法(HT CVD法)	溶液法
イメージ			
概要	<ul style="list-style-type: none"> ● 改良レーリー法ともいわれ、量産で最もよく用いられている。 ● 原料SiC粉末を2500℃程度の高温で昇華させ、種結晶上に再結晶させる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● CVD法あるいは化学輸送法と呼ばれ、Siを含むガスとCを含むガスを反応させ、単結晶基板上に1600℃程度でSiCを析出させる。 ● 低コストでの大型化が課題。 	<ul style="list-style-type: none"> ● SiCは単独では融解しないため、溶媒や融解したSi中にSiやCを溶解させてSiC結晶を析出させる。

出所：イメージの部分は経済産業省、「次世代デジタルインフラの構築」に関する国内外の動向（2025年10月発行）

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/034_03_00.pdf（2025年11月4日最終閲覧）

概要の部分は各所資料から三井物産戦略研究所作成

図表3：パワー半導体の用途別の性能およびシリコンから次世代半導体への置き換えの見通し



出所：各所資料から三井物産戦略研究所作成

2. 注目すべき動向

2-1. トヨタの6代目「RAV4」での採用から始まるSiCパワー半導体の本格普及

SiCパワー半導体が最も多く使われる用途は、電動車の電池から供給される直流電流を、モーターを駆動させるための交流電流に変換するインバーターである。2025年12月17日に国内での販売が始まったトヨタの6代目RAV4のプラグインハイブリッドモデルでは、同社のハイブリッドシステムとして初めてSiCパワー半導体を採用した。モジュールが小型化したことから、ハイブリッドシステムの高さが15%、重さが18%それぞれ低減され、電池容量が30%向上した結果、電気自動車としての走行距離

離が、先代の95kmから150kmにまで延びた。150kmという走行距離は、プラグインハイブリッド車でありながら、日常生活での走行が、電池からの電気を使った走行で賄えるようになることを意味する。先代である5代目RAV4は、2023年に世界で最も販売された（米）テスラのモデルY³を抜いて2024年の世界ベストセラー車となっており、その後継である6代目RAV4も世界中で販売されることが想定されている。世界でのBEV販売が当初期待されていたほど伸びていない中、BEV転換における製造から廃棄まで踏まえた製品ライフサイクル全体での環境性能⁴と経済性とをバランスさせる車種として、HEVの価値が見直される流れがある。その流れに乗って、SiCパワー半導体の普及が進むと考えられる。

2-2. 長期目線で開発・量産のための投資を進めるパワー半導体関連企業

前章で述べた通り、長期的にはSiCパワー半導体の市場拡大が見込まれるが、短期的には、主な成長ドライバーと見なされていたBEVの想定以上の販売不振や中国勢の急速な台頭があり、その成長軌道は平坦ではない。（米）Onsemiや三菱電機のように、需給のバランスに鑑みて当初計画した投資を停止あるいは先送りする例や、投資判断の見誤りから経営危機に追い込まれた（米）Wolfspeed、その影響で損失を計上したルネサスなど、踊り場にある企業が存在する一方で、（スイス）STMicroelectronicsや（独）Infineonなどの欧州勢は車載、データセンター、再生可能エネルギーなど幅広い分野に向けた開発・製造への投資を着実に進めている。いずれの企業にも共通するのは、長期目線での事業継続・成長を見据えた投資判断を行っていることである。図表4にパワー半導体関連企業のSiCパワー半導体開発・製造に関する動向を示す。

³ テスラは電動車でもBEVに注力して開発・製造・販売を行っており、2017年にモデル3のインバータにSTMicroelectronics製のSiCパワー半導体を採用している。モデルYでも同様のSiCパワー半導体を採用している。

⁴ 電池の製造工程や廃棄条件、車両の使用・充電を行う地域の電源構成、燃料のバイオ化などによって、BEVよりもHEVの環境負荷が小さいケースが存在する。https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaeronbun/56/4/56_20254372/_pdf

図表4：代表的なパワー半導体メーカーのSiCパワー半導体に関する動向

企業名	市場シェア (2025年 推定*)	概要
(ス) STMicroelectronics	32.5	イタリアに研究開発拠点を有し、SiCウエハをモロッコと中国で、デバイスをイタリアとシンガポールの150nmSiCウエハ製造施設で量産している。(中) 三安光電社との合併事業で中国にも工場を建設中。イタリアにモジュールとパッケージングを含めた完全垂直統合型の工場を建設中。複数年で50億ユーロの投資となる。
(米) onsemi (Semiconductor Components Industries, LLC)	23.6	1999年に(米) Motorolaの半導体コンポーネント部門の分社化により設立された。2022年にチェコでの製造能力を300万枚/年に拡張。2023年に韓国の200mmSiCウエハ製造施設を拡張し、年間100万枚の製造能力を保有。2024年には最大20億ドルの投資により、チェコに垂直統合型の生産施設を建設すると発表。米国OEMのプラグインHEVに採用されたことも公表も、BEV販売不振の影響で2025年には韓国工場への追加投資を停止した。2025年1月には(米) Qorvo の SiC JFET**事業を買収。AIデータセンター向け電源装置での採用も狙う。
(独) Infineon Technologies	16.5	世界最大のパワー半導体メーカー。2024年にマレーシアに世界最大のSiCパワー半導体工場を開設。第1フェーズとして20億ユーロを同工場に投資。第2フェーズでは最大50億ユーロの投資を予定している。既に自動車分野のOEM6社、再生可能エネルギーおよび産業分野の顧客を獲得済みで、2030年までにSiCによる収益で年間70億ユーロ、世界シェアは30%を目指している。AIデータセンター向けにCoolSiC JFETを開発。2026年量産開始予定。
(米) Wolfspeed	11.8	SiCウエハ製造ではシェアトップ。ウエハ製造を祖業とし、デバイス製造も手掛けるようになったが、EVの販売不振と中国勢の台頭により、2025年6月に米連邦破産法11条を申請。9月に再建完了を発表した。
(日) ローム	8.1	2024年は売り上げを大幅に落としたが、SiC パワー半導体モジュールがトヨタの中国向けEVに採用された。デンソーとの間で同分野での提携を発表。デンソーはローム株の一部を取得している。また、グループ会社(日) SiCrystalはSTMicroelectronics に SiCウエハを2024年から複数年供給する契約を締結している。
(日) 三菱電機	2.0	熊本県菊池市で200mm SiC ウエハを使ったパワー半導体の新工場棟が2025年10月に完成。2027年の本格量産移行を目指す。ただし拡張投資は2031年度以降に延期。2027年量産移行を目指す。出資先であるSiC基板大手の(米) Coherentと協力し、低コスト化にもめどをつけた。まずは性能や信頼性の高さが問われる鉄道や電力系向けに注力も、電動車のインバータ向けのJ3シリーズを2026年量産開始見込み。
(日) デンソー、富士電機	1.8	2024年に2000億円規模の共同投資を発表。愛知県、三重県のデンソーの拠点および長野県の富士電機の拠点をそれぞれ拡充する。トヨタのBEV向けのパワー半導体を開発・製造する富士電機は、SiC シフトを強めるために青森県津軽工場を拡張している。
(中) YJ (揚州扬杰电子科技 股份有限公司)	0.8	2027年をめどに次世代トランジスタ構造のSiC パワー半導体の量産を決定した。前世代と比較して41%ものセルサイズ縮小に成功したことによる。SiCパワー半導体の生産能力を現行の150mm ウエハ 5000枚/月から2027年には2万枚/月に引き上げ、並行してウエハサイズの200mm化も進める。
(日) ルネサス エレクトロニクス	-	2023年にWolfspeed に20億ドル(約2900億円)を預託し、SiC基板の供給を10年間受ける契約を結んでいたが、同社の破綻により損失を計上し、再建を支援。中国勢の台頭などの環境変化を受けてSiCパワー半導体の製品開発と工場への投資を中断。SiCデバイスを量産予定だった甲府工場(山梨県甲斐市)はシリコンMOSFETとGaN(窒化ガリウム) デバイスの生産で活用していく。

* 2025年の売上高、2023年市場シェア(Trend Force)、各社IR資料および各所発表の予測値から推定。

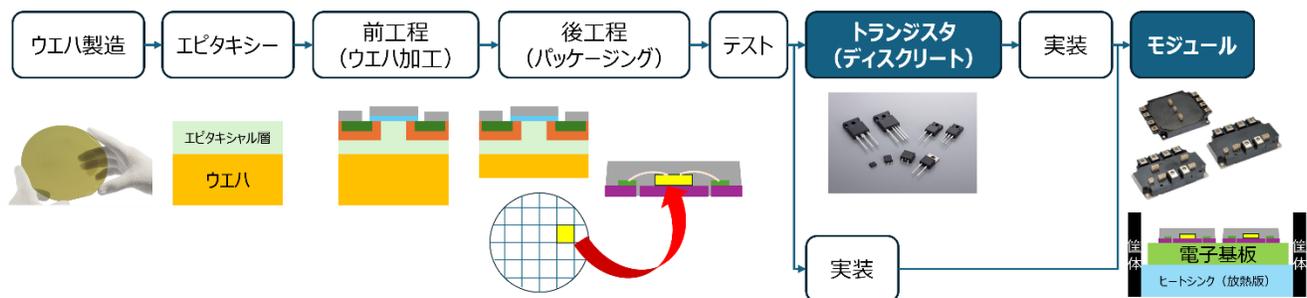
**接合型電界効果トランジスタ(Junction Field Effect Transistor)の略。SiC JFETは低いオン抵抗、高い耐電圧、高速スイッチングが可能のため、AI(人工知能)データセンターの電源装置の高効率高性能化が可能と期待されている。

出所：各所資料から三井物産戦略研究所作成

2-3. 信頼性担保のために重要度が増すモジュール設計と放熱・冷却技術

パワー半導体の製造フローの概要を図表5に示す。モジュールは、チップあるいはトランジスタを回路基板上に配置・接続（実装）することで製造される。SiCパワー半導体ではウエハー価格がデバイス価格に占める割合が大きいこと、パッケージングや実装技術が性能に与える影響が大きいことなどから、ウエハー製造からモジュール製造まで垂直統合で行える体制を持ちつつ、SiCウエハーやエピタキシャル膜の付いたSiCエピタキシャルウエハーは内製とウエハーメーカーからの購買を組み合わせる製造する企業が多い。

図表5：パワー半導体（トランジスタおよびモジュール）の製造フロー



注：イラストはイメージであり、実製品の寸法や設計を反映したものではありません。

出所：各所資料から三井物産戦略研究所作成

ロームウェブサイト https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2022-04-14_news_sicrystal25&defaultGroupId=false (SiC ウエハー)

富士電機ウェブサイト https://www.fujielectric.co.jp/products/semiconductor/power_discrete/index.html (SiC ディスクリート)

三菱電機ウェブサイト <https://www.mitsubishielectric.co.jp/semiconductors/powerdevices/products/power-module/sic-module> (SiC パワーモジュール)

従来のシリコン基板の設計では製造フローの順を追って開発が進められてきた。しかし自動車OEMなどのパワー半導体ユーザーから、小型化と大電流対応のより高度な両立を強く求められる中で、開発における手戻りをなくすために、チップやトランジスタの開発段階からモジュールの状態での冷却方法までを考慮し、チップとモジュールの設計をすり合わせながら開発していくことが不可欠となりつつある。特にSiCパワー半導体の耐熱性はシリコンパワー半導体よりも50°C以上高く、大電流を扱うことができる分、使用時の発熱も大きくなる。しかし、周辺で用いられる材料はSiCほどの耐熱性を持たないため、周辺材料の熱劣化を防ぐための放熱・冷却技術の重要性が高まっている。

3. 今後の展望

SiCパワー半導体を開発・製造している企業は、HEVを中心とした車載、データセンター、再生可能エネルギーのインフラなどの各市場からもたらされる需要や要求性能に応じる形で開発・量産への投資を継続していくと予想される。

キラアプリとなるHEVやBEV向けで重要性が増すモジュール開発では、さらなる小型・軽量化と信頼性の担保すなわち熱対策との両立のために、従来電動車のモーター駆動等に用いられてきた、電流・電圧制御に必要なデバイスをモジュールにまとめた汎用6in1パワーモジュールに代わるモジュールが提案されている、以下に注目すべき4つのトレンドを示す。

- ① 基板内蔵型モジュール：SiCパワー半導体のチップを回路基板に埋め込むことで省スペース化を狙う。欧州で先行しており、Infineonは2023年に（独）Schweizer Electronicとの共同開発を公表している。
- ② 「2 in 1」モールド型モジュール：従来は回路基板上にそれぞれ実装されていた2つのトランジスタを1つのパッケージにまとめることで小型・高性能化を実現している。ロームが量産しているが、採用には放熱のために、ひれ状の構造（フィン）のあるヒートシンク（放熱板）の高難度の接合技術が必要とされる。
- ③ 「6 in 1」多機能型モジュール：汎用モジュールでは外付けが必要だった各種回路やデバイスを内蔵化した上で、パッケージの肉厚を最小としたモジュールで、三菱電機やロームが開発を進めている。
- ④ 多機能型両面冷却モジュール：駆動電圧等によってSiCパワー半導体とシリコンパワー半導体を1つのパッケージにまとめることでコストと性能のバランスを取った上で、両面にヒートシンクを接合して高い放熱性を担保する。2025年5月に開催されたパワー半導体の世界最大級の展示会PCIMで、ローム、（中）基本半導体、（中）士蘭微電子が開発品を展示した。

新たなSiCパワー半導体のデバイス、モジュール開発では、開発フローの変化を加速するためのサービスやソリューションの他、製造設備や部素材に対しても新たな性能や価値の提案が求められるため、サプライチェーンに関わる全ての企業に、市場の成長を享受する機会が与えられているといえよう。

小川 玲奈 Reina Ogawa / 室長

専門分野：半導体産業、持続可能な水利用、セラミックス

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社およ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、当社およ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。

MITSUI & CO. GLOBAL STRATEGIC STUDIES INSTITUTE

製薬産業における「ラボラトリーオートメーション」

—機器・ソフトウェア・ロボット技術などで変わる創薬—

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 加藤 貴子

なぜこの技術を取り上げるのか

創薬研究の高度化や研究機器の多様化に伴い、従来は研究者の経験や技能に依存していた実験プロセスを、機器、ソフトウェア、ロボット技術などを組み合わせ、研究室や実験室における作業を機械化から自動化、さらには自律化へと段階的に高度化させていく取り組み「ラボラトリーオートメーション」の実装が進む。実験の自動化により、実験の効率化や再現性の向上が見込まれると同時に、研究者は仮説立案やデータ解析といった高度な業務に専念できる。さらに、AI技術の進展により、実験の条件探索・設計・実行・解析までを自律的に行う取り組みも進んでおり、創薬の在り方そのものが変容しつつある。

Summary

- 製薬企業ではラボラトリーオートメーションの導入が急速に拡大しており、生成AI・人工知能の進展を背景に、単なる自動化にとどまらず自律化へと領域が広がりにつつある。
- 欧米ではクラウドラボが存在感を高めており、遠隔操作型の自動化実験や24時間稼働の実験基盤を提供し、AI創薬企業との連携によって創薬プロセスの高速化が進んでいる。
- 国内でもロボット技術やスマートラボの導入が加速している。規格・標準化や運用課題に取り組みながら、研究者の役割は高付加価値なデータドリブン領域へとシフトしつつある。

1. ラボラトリーオートメーションとは

ラボラトリーオートメーションは、目的や対象によって定義の幅があるものの、一般的には機器、ソフトウェア、ロボット技術などを組み合わせ、研究室や実験室における作業を機械化から自動化、さらには自律化へと段階的に高度化させていく取り組みを指す。例えば、製薬企業の基礎研究段階におけるスクリーニング工程では、多数の化合物の中から有望な候補を選定する必要があるが、複数の分析機器を連携させたり、ロボットアームによって実験操作を自動化したりすることで、従来は研究者の経験や技能に依存していた実験プロセスを効率的かつ高い再現性をもって実行することが可能となる。

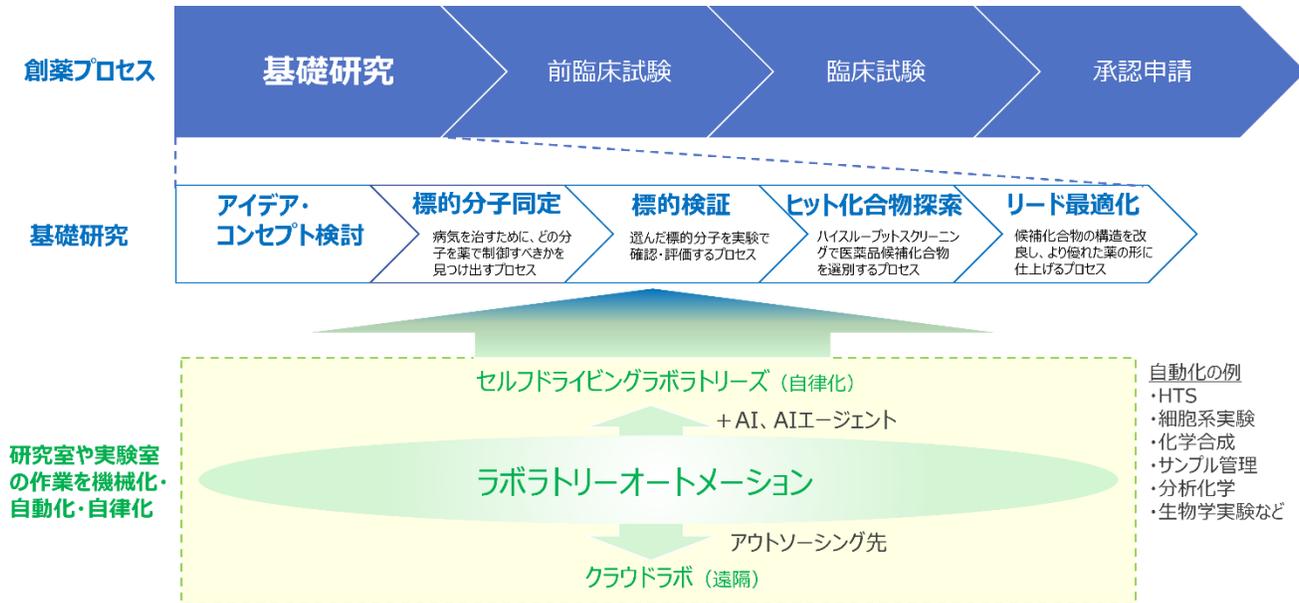
さらに、この領域には、クラウドラボ（Cloud Lab：研究者が遠隔から実験を指示・実行する仕組み）や、セルフドライビングラボラトリーズ（Self-Driving Laboratories：AIが実験条件の探索・設計・実行・解析までを自律的に行う次世代型実験室）といった概念も含まれる（図表1）。

現在の主流は、ハイスループットスクリーニング（HTS）¹、細胞系実験、化学合成、サンプル管理、分析化学、生物学実験など、これまで人に依存してきた操作を「自動化」する取り組みである。自動化の対象は、個々の実験工程にとどまらず、複数工程の連結やプロセス全体の統合へと拡張しつつあり、そのアプローチは多様化している。

¹ ハイスループットスクリーニングとは、「高度にシステム化された方法で短期間に多数の化合物を生化学的に評価して、新規な医薬品の候補となる化合物（ヒット化合物）を迅速に発見すること」。日経バイオテクウェブサイト、2023年1月26日記事「総論：ようこそスクリーニング学へ」、<https://bio.nikkeibp.co.jp/atcl/column/16/052700070/011800014/>（2025年12月10日最終閲覧）

本稿では、こうした潮流を踏まえ、製薬企業の研究所内における取り組みに加え、クラウドラボなどの外部リソース活用も含めたラボラトリーオートメーションの最新動向と将来展望を概観する。

図表1：創薬プロセスにおけるラボラトリーオートメーション



出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

2. 注目すべき動向

2-1. 海外先進事例

欧米の製薬企業では、創薬研究の高度化に伴い、同時並列で多数の実験を処理するハイスループット能力の強化や、データ品質の均一化・向上が求められている。そのため、研究所内における実験自動化に加え、クラウドラボなど外部リソースを活用する動きが加速している。とりわけCOVID-19禍では、研究者が遠隔で実験を進められる研究体制の必要性が一気に高まった。

こうした中、(米) Eli Lillyはラボラトリーオートメーションの先駆企業(米) Strateosと協業し、遠隔から実験を指示・実行可能な自動化実験室を構築した。この取り組みは、実験プロセスのフロー化を志向する先進的な試みとして、製薬業界内外から大きな注目を集めた²。その後、2024年9月、Eli Lillyは前述の自動化実験室を(英) Arctorisへ売却している(図表2)。この売却は、自動化実験の可能性や適用範囲について一定の検証を行った上での戦略的な判断と考えられる。

Arctorisは、パートナーシップ型研究機関(PRO: Partnership Research Organisation)として、ロボットが創薬実験を自動で行い、高品質なデータを一通貫で生成する独自の自動化創薬プラットフォーム「Ulysses」を提供している。本買収により、同社の研究施設は拡張され、同時並行で多数の実験を処理できる能力が強化された。同社は製薬企業に加え、(米) Insilico Medicineや(米) 310.aiといったAI創薬企業とも連携しており、これら企業がスーパーコンピュータ上で設計した医薬品

² Arctorisのプレスリリース(2024年9月12日)によると、「Strateosが運営する11,500平方フィートのLilly Life Sciences Studioは、Eli Lillyが米サンディエゴにおける研究拠点の拡大を目指して9,000万ドルを投資し、Eli Lillyが構想・設計したもの」。
<https://www.arctoris.com/arctoris-acquires-eli-lilly-life-science-studio-laboratory/> (2026年1月20日最終閲覧)

候補に対し、Arctorisが候補物質の製造・精製・評価といった実験工程を自動化して担う体制を構築している。例えば、Insilico MedicineはCOVID-19向け治療薬としてJAK阻害剤³の開発を進める過程でArctorisと提携し⁴、候補分子の解析データを24時間以内を取得している。

図表2 : Arctorisの自動化実験室



出所 : Arctoris ウェブサイト、2024 年 9 月 12 日プレスリリース、<https://www.arctoris.com/arctoris-acquires-eli-lilly-life-science-studio-laboratory/> (2025 年 12 月 19 日最終閲覧)

(米) Emerald Cloud Lab (ECL) は、米国を代表するクラウドラボ企業であり、(米) Biogen、(米) Bristol Myers Squibb、(米) Amgen、(英) GSKといった大手製薬企業が研究アウトソーシング先として活用している。ECLの実験施設は、24時間365日稼働しており、研究者は「ECL Command Center」を通じて、世界中のどこからでもワンクリックで実験指示をできる(図表3)。こうした仕組みにより、研究機能の外部化を図る製薬企業は、地理的に分散した研究者をオンライン上で容易

図表3 : Emerald Cloud Labのクラウドラボ



出所 : Emerald Cloud Lab ウェブサイト、<https://www.emeraldcloudlab.com/> (2025 年 12 月 22 日最終閲覧)

³ 免疫反応や炎症を引き起こすシグナル伝達に関わる「JAK (Janus kinase)」という酵素の働きを抑える医薬品。

⁴ Arctorisウェブサイト、<https://www.arctoris.com/arctoris-automated-platform-accelerates-drug-discovery/> (2026年1月26日最終閲覧)

に連携させ、共通の実験基盤を通じて効率的に研究を進めることが可能となる。ECLには200以上の研究機器⁵が導入されており、特にバイオテクノロジーおよび製薬分野に注力し、分析化学・生物学・材料科学など幅広い領域の実験ニーズに対応している。

2-2. 国内先進事例

日本でArctorisやECLのように製薬企業向けクラウドラボを本格的に事業化している企業は、現時点で確認されていない。一方、ロボット工学や自動化技術といった日本の強みを生かした実験自動化の開発は、官民双方で進んでいる。政府は「AI for Science」の取り組みの中で、自動・自律・遠隔化による研究データ創出・活用の高効率化するプロジェクトを計画しており、予算規模は約26億円とされている⁶。

商業化の動きとして注目されるのが、2025年9月に（日）アステラス製薬と（日）安川電機が設立した合弁会社、（日）セラファ・バイオサイエンスである⁷。同社は汎用ヒト型ロボット「まほろ⁸」を活用し、iPS細胞をはじめとする再生医療等製品の製造プラットフォームの開発・提供を目的としている（図表4）。生きた細胞を扱う実験では、精密な操作に加え、長時間にわたる安定した作業が求められることから、国内外においても実用化事例は限定的である。特に、細胞培養は環境変化の影響を受けやすく、再現性をいかに確保するかが自動化の大きな課題とされている。「まほろ」は細胞培養に最適な条件を探索し、高い効率で目的の細胞を得られる点が特長である。

図表4：安川電機とアステラス製薬の「まほろ」



出所：セラファ・バイオサイエンス、2025年10月1日プレスリリース、
<https://cellafa.com/news/20251001>（2025年12月22日最終閲覧）

⁵ HPLC、FPLC、GC、質量分析計、NMR、PCR、qPCR、ddPCR、ELISA、SPR/BLI、ウェスタンブロット、フローサイトメーター/FACSなど。
<https://www.emeraldcloudlab.com/>（2025年12月2日最終閲覧）

⁶ 文部科学省「令和8年概算要求のポイント」、https://www.mext.go.jp/content/20250826-ope_dev02-000044427_12.pdf（2025年12月2日最終閲覧）

⁷ 安川電機プレスリリース、<https://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/news/1424695>（2025年12月2日最終閲覧）

⁸ 安川電機子会社のロボティック・バイオロジー・インスティテュート（RBI）が開発した、ライフサイエンス研究に特化した実験用ヒューマノイドロボット。2025年12月、「まほろ」による細胞培養自動化システムが、米FDAの生物製剤評価研究センター（Center for Biologics Evaluation and Research：CBER）から先進製造技術（Advanced Manufacturing Technologies：AMT）指定を取得している。

(日) 中外製薬は、中外ライフサイエンスパーク横浜を拠点に、ロボットとAIを活用した創薬研究のラボオートメーションを推進している⁹。研究施設内では自動搬送台車が自由に移動するほか、ロボットによる実験作業の自動化など、研究プロセス全体の効率化に向けた取り組みが進められている。一方、(日) 第一三共は2025年1月に米国でスマートリサーチラボを設立し、ロボットや自動化装置、クラウド基盤を統合した24時間稼働の自動化創薬インフラの整備を進めている¹⁰。

3. 今後の展望

自動化が進展する一方で、現時点では機器の故障対応や試薬の補充などでは、人の介在は依然として不可欠である。加えて、初期投資の負担や業務プロセスの変更、複数の機器やソフトウェアを円滑に連携させるための規格整備や標準化も、今後の重要な課題として挙げられる。他方、ラボラトリーオートメーションの普及が進むことで、創薬研究の効率化にとどまらず、自動化によって網羅的かつ膨大なデータが集積され、これまで限界があり踏み込めなかった新たな研究領域への展開も期待される。さらに、クラウドラボの普及が進めば、高額な機器や設備を自社で保有しなくても多様な実験が可能となり、大手製薬企業に加えてバイオベンチャーで利用の拡大が見込まれる。

将来的には、AIやAIエージェントの活用により、「自動化」の次の段階として、「自律化（実験設計からデータ解析までをロボットが自律的に行う研究スタイル）」へ移行する可能性を秘めている。その結果、研究者に求められる役割も、データドリブンな仮説立案や実験設計の構築、さらには臨床開発とのつながりを意識した研究など、部門を超えた高付加価値領域へと広がっていくと考えられる。一方、データ管理や機密性の確保は今後さらに重要性を増すだろう。部門を超えたデータ活用が実現すれば、研究・開発・製造・臨床といった各プロセスがデータで有機的につながり、意思決定の高度化や開発スピードの向上を通じて、製薬企業全体のDXを前進させるだろう。

加藤 貴子 Takako Kato / 主席研究員

専門分野：データ駆動型ヘルスケア、先端医療テック、消費者視点ウェルネス

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一的な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、当社およ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。

⁹ 中外製薬ウェブサイト、<https://note.chugai-pharm.co.jp/n/n080d564fbc32>（2025年12月2日最終閲覧）

¹⁰ 第一三共プレスリリース、https://www.daiichisankyo.co.jp/files/news/pressrelease/pdf/202501/20250121_J.pdf（2025年12月2日最終閲覧）

MITSUI & CO. GLOBAL STRATEGIC STUDIES INSTITUTE

二次電池の高性能と低コストを両立させるリチウムマンガンリッチ正極

—EV用電池への適用に向けて異なる方向に進む中国と欧米韓—

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 趙 健

なぜこの技術を取り上げるのか

リチウムイオン電池（LIB）の正極は化学反応を起こし、電気エネルギーを生み出す重要部材である。その低コスト品の主流はリン酸鉄リチウム正極（LFP）だが、これと同等のコストで、エネルギー密度を高められるリチウムマンガンリッチ正極（LMR）¹は、LFPの代替や全固体LIB²への適用に向けて、世界中でその開発と実装が行われている。今後の進展次第で、既存LIBサプライチェーンや全固体LIBの開発競争を変貌させる可能性がある。

Summary

- リチウムマンガンリッチ正極（LMR）はコバルトの使用が微量または不要でありながら高い容量を実現できるため、高性能と低コストを両立する次世代電池材料として、数年以内の実用化のめどがついた。
- 全固体リチウムイオン電池（全固体LIB）の開発が加速する中国では全固体LIB向け正極の有望な候補としてLMRへの期待が高く、主要企業が開発に取り組んでいる。欧米や韓国は電池の安定供給を念頭に、中国が大きなシェアを占めるLFPの代替品として、LMRの開発と実用化を国際連携の下で推進している。
- 2035年のEV乗用車用電池におけるLMRの予想シェアは約3%と低いものの、その将来性を重視する中国が輸出規制対象とした。電池の安定供給と全固体LIBの実用化を図る日本も動向に留意すべきである。

1. リチウムマンガンリッチ正極とは

1-1. リチウムマンガンリッチ正極の概要

リチウムマンガンリッチ正極（LMR）とは、リチウムを豊富に含む金属酸化物正極材料である。多くのリチウムを取り込むことができるため、容量は250mAh/g以上と、現行主流の高性能正極である三元系正極（NMC³）を上回る。LMR正極を使用したLIBはエネルギー密度が500Wh/kgを超える可能性があるため、航続距離の長いEVなど高性能分野への使用が想定される。LMRの材料構成の3～4割を資源の豊富なマンガンが占めており、材料コストは現行の低価格・低性能正極として主流になっているリン酸鉄リチウム正極（LFP）と同等に抑えることが可能である。資源の偏在性や採掘における環境破壊、児童労働などが問題視されるコバルトの使用が微量または不要であるため、電池製造企業の責任ある調達にもつながる。NMCとLFPのそれぞれの長所を兼ね備えたLMRは、高性能と低コストの両立ができる有望な次世代正極材料と見なされている（図表1）。

一方、その実用化には課題がある。充放電の繰り返しに伴い、LMRの一部の金属酸化物が層状構造からスピネル構造⁴に変化するため、電池として使用し続けると駆動電圧が下がってしまい、結果として既に実用化されている各種LIBと比較してサイクル寿命が短くなる。その解決に向けて、世界中の開発企業は金属酸化物による材料粒子表面のコーティング処理、

¹ Lithium Manganese Rich。

² 正極、負極、電解質など全ての部材が固体の材料でできているリチウムイオン電池。

³ ニッケル・マンガン・コバルトを主成分とする正極材料。

⁴ スピネル構造は一般式AB₂O₄で表され、正四面体（Aサイト）と正八面体（Bサイト）の金属イオンが酸素イオンと結合した結晶構造である。尖晶石（せんしょうせき）構造ともいう。

金属ドーピングや製法の改良などの研究を行ってきた。特に2025年以降、複数の企業から技術のブレークスルーの達成と量産計画の発表があり、LMR正極の実用化のめどが近づいてきた。

図表1：LMRと代表的な現行正極材料との性能比較

正極材料	ハイニッケル系三元系 NMC811 (注)	リン酸鉄リチウム LFP	リチウムマンガンリッチ LMR
主成分	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$	LiFePO_4	$x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMO}_2$ (M=Ni, Co, Mn, $0 < x < 1$)
容量 (mAh/g)	~200	~170	250以上
性能比較	<p>軸の外側ほど該当する性能が高い</p>		
メリット	エネルギー密度が高く、コンパクトで大容量用途に向く	・熱安定性が高く、安全性に優れる ・コバルトなど高価金属不使用のため、コストが低い	・容量が高く、作動電圧範囲も広い ・コバルトを微量使用または不使用のため、コストが低い
デメリット	・熱安定性と安全性はLFPに劣る ・コバルトなど高価かつ資源が偏在するレアメタルを使用のため、コストが高く、安定供給の懸念もある	エネルギー密度が低く、同容量では三元系より多くのスペースや重量が必要	充放電の繰り返しに伴う電圧の継続的な低下とサイクル寿命の短縮
主な用途	中～高価格EV乗用車、ドローンなどの電池	低～中価格EV乗用車、電動バス、定置型蓄電などの電池	低～高価格EV乗用車、ドローンなどの電池

注：ハイニッケル系 NMC の一種であり、ニッケル・マンガン・コバルトの比率が 8:1:1

出所：各種公開資料から三井物産戦略研究所作成

1-2. 研究開発の方向と想定用途

低コスト高性能という特長に加え、作動電圧範囲が2～4.8Vと広いLMRは多様な使い道を想定した開発が行われている。

現状の液系LIB向けでは、現行品のLFPと同等の低コストを維持しながら、より高性能の正極材として開発が進められている。既存の正極材の性能を補完する目的での複合使用も想定される。例えばNMC正極材との複合により、サイクル寿命の延長とkWh当たりコストの削減が可能とされる。

高電圧領域では、LMRを高性能の電池への適用に向けた研究開発が行われている。2027～2028年ごろの実用化が見込まれる全固体LIBの初代製品では、作動電圧が3.7VのハイニッケルNMC正極を採用するものが多い。しかし、固体電解質は本来5Vの高電圧性能を持つため、NMC正極ではその性能が生かし切れていない。これを最高作動電圧4.8Vまで対応可能なLMRで代替することで、固体電解質が備える最高5Vの高電圧性能をより生かせる上、コストもNMCより低い。

このため、LMRは次世代全固体LIB向け正極材料の有力候補とされている。

LIB産業で大きなシェアを占める中国企業と電池サプライチェーンの構築途上にある欧米企業は、それぞれが電池産業に置かれている現状、自社の戦略または国の政策から、異なるLMR研究開発と実用化の方向性を見定めている。その詳細を次章で述べる。

2. 注目すべき動向

2-1. 全固体LIBへの使用を目指す中国

世界の液系LIBの大半を生産する中国では、全固体LIBの開発にも力を入れており、その正極材料候補としてLMRの研究開発を行っている。図表2に示す通り、中国ではLMRの開発を進めている電池材料、電池およびEV企業が多数あり、うち半数以上は全固体LIBへの使用を念頭に、高電圧・大容量型のLMRの開発に注力している。一部の企業は、正極にLMR、負極に次世代負極材料であるリチウム金属負極を採用した高性能全固体LIB試作品の開発を行っている。

図表2：中国企業によるLMRの開発と生産動向

業種	企業名	発表時期	LMRの開発と生産動向
電池材料	寧夏漢堯	2023年4月	テスト生産を開始。低・中・高の電圧別に複数製品を開発しており、4.45V高電圧品の容量は220～230mAh/gを達成している。
	容百科技	2024年12月	サンプル品の小規模生産を行っており、電池企業など顧客にテスト目的の出荷を開始している。
	BTR	2025年5月	4.8Vの高電圧で、容量300mAh/gのLMRを使用した硫化物系全固体電池の試作品を発表した。
	寧波富理	2025年7月	容量300mAh/g以上のLMRの開発に成功。エネルギー密度450Wh/kg以上の全固体電池向けLMR正極の開発を行っている。
	創能惠通	2025年9月	低電圧の長寿命品や高電圧の大容量品（4.8V・300mAh/g）の最新製品を複数発表した。
	当昇材料科技	2025年10月	全固体電池におけるテストで280～305mAh/gの容量に達しており、十数トン規模のサンプル出荷を開始している。
電池	太藍新能源	2024年4月	LMR正極を使用した、セルエネルギー密度720Wh/kgの全固体電池試作品を発表。負極はLi金属負極を採用している。
	中汽新能電池科技	2025年7月	366Wh/kg・サイクル寿命2000回のLMR正極電池を発表し、2026年内発売の航続距離1000km超EVへの搭載を予定している。
	Farasis	2025年9月	2026年にLMR採用の第2世代硫化物系全固体電池を発表する予定。エネルギー密度は500Wh/kgを見込んでいる。
EV	広州汽車	2025年2月	長期的にEV用全固体電池にLMR正極の採用を検討すると発表した。
	Chery	2025年9月	LMR正極を使用した、セルエネルギー密度600Wh/kgの全固体電池を発表。2027年に試作車搭載、2030年の量産を目指す。

出所：各社公開発表から三井物産戦略研究所作成

先行する正極材大手の当昇材料科技は、国内および欧州、米国、韓国などの顧客向けにサンプル品のLMRで十数トン規模の出荷実績を積み上げた。また、LMRに適合するハロゲン化物固体電解質の開発も行っている。電池最大手の（中）CATLは試作品の発表こそないものの、LMR正極材関連特許の取得数は世界一とされており、技術の開発を進めている。2023年から、CATLや寧夏漢堯、寧波富理などのスタートアップ企業らが、工業・情報化部（日本の経産省に相当）主導のもとで低コストLMR量産技術の開発事業を官民連携で実施している。

2025年9月、中堅自動車メーカー・奇瑞汽車（Chery）がLMR使用の全固体LIBの試作品を発表した。1,300kmの航続距離を備えた上、内部短絡時電池の発熱や発火への耐性を評価するくぎ刺し実験にも合格し高い安全性が実証された同電池は、2030年に発売するEVに搭載する予定だ。今後、その他中国EV企業が追随するきっかけになるか注目したい。

2-2. 低コストと安定調達につなげたい欧米韓

電池サプライチェーンの中国依存を懸念する欧米では、材料が低コストかつ調達しやすいLMRを活用すれば、中国への依存度低減につながる点に着目している。特に中国企業が世界生産の9割を占めるLFPの代替を目指して、LMRの開発と実用化を加速している（図表3）。

図表3：欧米韓企業によるLMRの開発と生産動向

業種	企業名	発表時期	LMRの開発と生産動向
電池材料	（ベルギー）Umicore	2023年2月	2026年からEV向けを量産する計画。韓国、ポーランドの既設正極材料工場や計画中のカナダ工場を生産地候補とする。
	（韓）POSCO FUTURE M	2025年5月	2024年にEVメーカーと共に開発と試作を完成させ、量産に向けた実証を開始した。EV分野におけるLFPの代替を狙う。
	（豪）FIREBIRD METALS	2025年7月	LMRの独自開発開始を発表、18カ月以内に完成の予定。高純度硫酸マンガン（HPMSM）のノウハウを活用する。
	（米）Stratus Materials	2025年8月	第2世代製品のサンプル出荷を開始。10月、（仏）ルノーグループのAmpereとの次世代EV向け正極材の共同開発を発表した。
EV	（米）Ford	2025年4月	研究開発にブレークスルーがあり、2030年までに実車搭載を見込む。
	（米）GM	2025年5月	韓国のLG Energy Solutionsとの共同開発に成功し、2028年から両社の合併会社が北米での量産開始を予定している。

出所：各社公開発表から三井物産戦略研究所作成

2025年5月、GMはLG Energy Solutions（LGES）と共に、電動トラックや大型SUV（多目的スポーツ車）といったEV向けにLMR角型電池セルの共同開発と生産計画を発表した。LMR技術について多くの特許を保有する両社は、北米の合併電池会社であるUltium Cellsで、2027年後半までに試作、2028年までに量産を順次始める予定だ。2025年10月デトロイトで開催された第15回The Battery Show North Americaで、GMとLGESのLMRがBattery Innovation of the Yearに選ばれ、北米の電池業界からも高い期待が寄せられている。

欧米は中国のように国内のサプライチェーン構築が完成していないため、当該地域の企業にとっては原料調達、研究開発や生産において、国境をまたぐ連携が重要になる。特に電池製造産業の基盤を有する韓国は、中国以外の研究開発や生産の拠点として注目される。

3. 今後の展望

調査会社（米）BloombergNEF⁵によると、LMRは2027年以降EV乗用車用電池を中心に導入が始まり、2035年までにEV乗用車搭載電池用正極の約3%を占めると予想される。現時点の予想シェアは決して高いもの、今後技術開発の進展によりシェアがさらに伸び、重要な技術になる可能性がある。

中国では2025年11月8日から高性能LFP正極、NMC正極、LMR正極を対象にした材料・技術の輸出規制⁶を実施した。まだ研究開発や小規模テスト生産の段階で輸出規制をかけた対応は異例と言える。既存の電池サプライチェーンを変貌させる可能性のある次世代電池技術として、海外流出を未然に防ごうとする中国政府の意図がうかがえる。

また、LMRの開発の進展は、世界中で繰り広げられる全固体LIBの実用化競争にも影響を与えるかもしれない。全固体LIB普及のネックの一つとされる高いコストの解消と高い性能の両立は、競争力のある製品開発と普及拡大に直結する。日本では中国や米国ほどLMRの研究開発や実用化が盛んになっていないものの、経済安全保障推進法に基づく蓄電池の安定供給の確保と全固体LIBの実用化を進めている現状から、競争環境に変化をもたらすかもしれない世界のLMR開発動向には留意すべきである。

趙 健 Jian Zhao / シニアプロジェクトマネージャー

専門分野：次世代電池、次世代太陽光発電、分散型エネルギー

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社およ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、当社およ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。

⁵ 出所：BloombergNEF「Lithium-Ion Batteries State of the Industry 2025」

⁶ 出所：商務部、税関総署公告2025年第58号

データセンターでの導入が進むCPO

—光電融合がいよいよ普及期に入る—

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

なぜこの技術を取り上げるのか

2026年は、光電融合の一種であるCo-packaged Optics (CPO) が本格的な量産・実用化フェーズへ移行する年となる。AIデータセンターの急拡大に伴う消費電力の増大が深刻化する中、電力効率を劇的に改善し、消費電力を低減するCPOへの期待は大きい。先行する（米）Broadcomや（米）Nvidia等多くの企業が製品化ラッシュを迎え、国内では（日）NTTが、IOWN構想¹に基づく商用サンプル提供を開始する。主要企業が一斉に市場投入へ動く2026年は、次世代AIインフラの覇権争いが始まる重要な分岐点となりそうだ。

Summary

- CPOは、従来プロセッサから離れていた「電気・光変換機能」をプロセッサに近接配置する技術である。これにより電気の伝送距離を短縮し、消費電力の大幅な低減、データ伝送容量の増大、および低遅延化を実現する。
- CPOの実現には高度なパッケージング技術が不可欠である。このため、（台）TSMCなどのファウンドリやOSATの重要性が増しており、これら企業を含むエコシステム形成が進んでいる。
- 熱管理や保守の複雑性という課題は残っており、日本企業は課題解決の鍵となる光実装技術や部材分野に強みを持つため、国内外の主要メーカー等と積極的に連携し、次世代AIインフラにおいて中核的役割を担うことが期待される。

1. CPOとは

生成AIの普及に伴い、データセンターの計算能力向上が急務となっている。計算能力の向上には、半導体の微細化などと同様に、通信の高速化が重要である。しかし、サーバーの回路基板（ボード）²上の大半を電気信号で伝送する従来方式では、高速化に伴い信号減衰やノイズが激化し、それを補うために莫大な電力を消費してしまう。光は電気と比べ伝送中のエネルギー損失が圧倒的に少ないため、電気信号での伝送を光信号での伝送に置き換え、電力消費の課題を解決すると期待される技術の総称が光電融合である。近年は、光電融合の技術の一種である、CPOが特に注目を浴びている。

1-1. 技術

光電融合には、電気信号を光信号に置き換える場所によって段階がある。最終的には、極短距離なダイ³間の接続を光化することが期待されており、CPOはその手前の段階として、ボード間を接続する通信デバイスにおいて、プロセッサ（CPU、GPU、ASIC等）のきわめて近くに電気と光の変換機能を配置する技術である。近年では、特に消費電力の多いネットワーク機器のスイッチASIC⁴での適用が進んでおり、2025年頃から一部データセンターでの導入が進み始めた。

¹ IOWN（アイオン）構想とは、Innovative Optical and Wireless Networkの略で、NTTが提唱する、光技術を核にネットワークからコンピューティングまで情報インフラ全体を革新し、超大容量・超低遅延・超低消費電力を実現する次世代の通信基盤構想のこと。

² 回路基板とは、表面や内部に配線が施され、また表面にチップやコンデンサ、コネクタなどの多くの電子部品をはんだ付けした基板のこと。

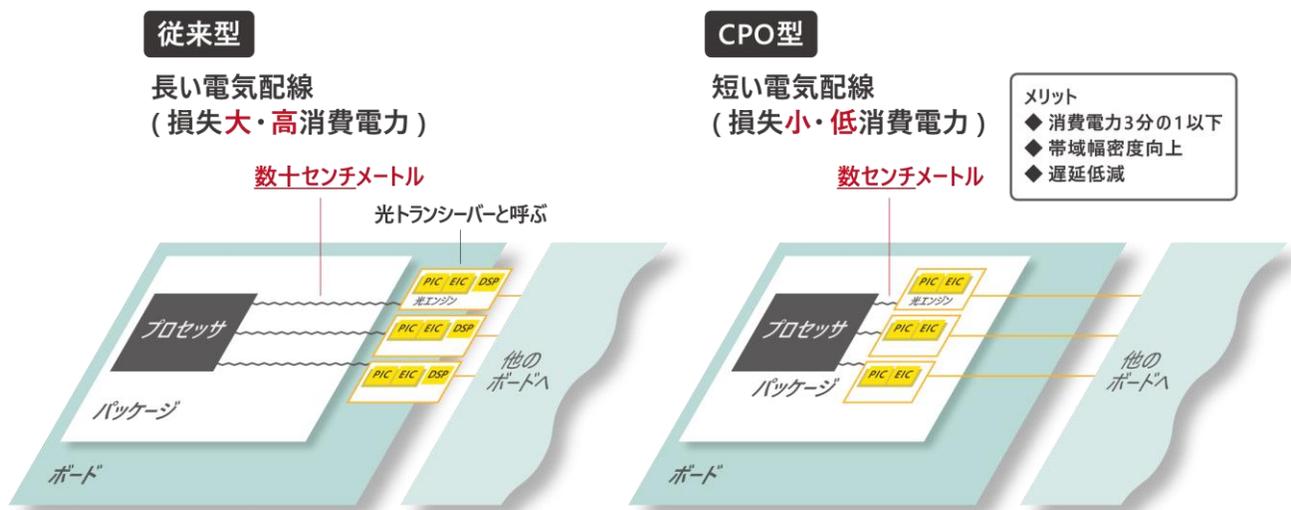
³ ダイとは、シリコンなどの基板上に微細な電子回路（トランジスタなど）を集積した、数ミリメートル程度の小さな部品のこと。

⁴ ASICとは、Application Specific Integrated Circuitの略で、特定の目的や特定のアプリケーションの処理に特化して設計・製造される集積回路（IC）のことを指す。スイッチとは、ネットワーク内の通信機器を接続し、データの転送・振り分けを管理する機器を指す。スイッチASICは、スイッチ用のASICのこと。

従来は、電気と光の変換を行う光トランシーバー（ボードから着脱可能なモジュール）を、プロセッサから離れたボードの端に配置していた。CPOでは、光トランシーバーの中核機能である光エンジン⁵を、プロセッサと同一パッケージ⁶上に集積し、パッケージ上で電気信号と光信号の変換を行う。これにより、電気信号の伝送距離を、数十センチメートルから数センチメートル程度まで短縮し、電気配線等で生じていた損失を抑え、消費電力を3分の1以下程度にまで低減する（図表1）。

CPO技術の研究は2010年代後半から徐々に議論や研究が進んでいた。しかしながら、当時は通信速度への要求も低く、また、光を集積する技術や実装技術が成熟しておらず、ボード上の伝送⁷には、従来型の銅線による電気信号を用いる方がコストと信頼性の面で有利であった。近年、データセンターの高速化に伴い、電気信号による伝送損失等が無視できない限界に達していたが、シリコンフォトニクス⁸、さらにパッケージング⁹の技術進化によって電気回路と光回路の集積度を高めることが可能になったことで、実用化が見え始めてきたのである。

図表1：従来のボードとCPOを統合したボードの違い



出所：各所資料から三井物産戦略研究所作成

1-2. メリットと課題

CPOの導入によるメリットは以下の通り。

1. 消費電力の大幅な低減：ボード上の長い電気配線を光配線に置き換えることで、従来の光トランシーバーでの消費電力と比べ、およそ3分の1以下に抑制可能である。

⁵ 光エンジンとは、光トランシーバーの中核部品である、光信号の生成や操作を行うPIC（Photonic Integrated Circuit）と電子制御を行うEIC（Electric Integrated Circuit）を含む。劣化した電気信号を補正するDSP（Digital Signal Processor）は、従来型の光トランシーバーには搭載されているが、一般的にCPOでは含まない。

⁶ パッケージとは、半導体素子（チップも含まれる）を外部から保護し、電氣的に接続するための外部端子を持つ部品のこと。黒く四角い物体から4方向に足（リード）が出たような概観をしている。

⁷ 現在でも、ボード上ではなく、GPU間のような短距離の通信においては、依然として銅線の方がコストと信頼性が高いとの意見がある。

⁸ シリコンフォトニクスとは、シリコン半導体の製造技術を用いてシリコンウエハー上に光導波路や光変調器などの大規模な光の回路を構築する技術のこと。

⁹ パッケージングとは、通常、半導体の後工程を指す。CPOにおいては、光学部品と半導体チップを同じパッケージ内に組み込むことやその技術のこと。

2. 帯域幅¹⁰密度の向上：従来は、ボード端のフロントパネルに着脱型の大型光トランシーバーを配置していたため、物理的なスペース制約により接続できる光ファイバーの数に限界があった。CPOでは、パッケージから直接光ファイバーを取り出すことで、実装密度を高め、データ伝送容量を飛躍的に増大させることが可能になる。
3. 遅延低減の可能性：プロセッサと光エンジンの距離が極短化されることで、複雑なDSP処理等を簡素化あるいは削除できる。これにより、従来に比べ、伝送遅延を数十～百ナノ秒¹¹規模で短縮できる可能性がある。

一方で、CPOは高度な実装技術が必要であり、以下の課題も抱えている。

1. 熱管理：発熱源であるASICの至近距離に、熱に弱い光学素子（レーザー等）を配置するため、高度な熱対策が必要となる。対策として、故障しやすいレーザー光源を外部に配置する「External Laser Source (ELS)」方式が主流となりつつある。
2. 製造と保守の複雑性：光学素子と半導体を一体化するため、一度パッケージングすると個別の素子交換が困難となる。従来のような着脱ができないため、内部の光学素子等が故障した場合、高価なプロセッサごと廃棄になるリスクがあり、極めて高い信頼性が求められる。

2. 注目すべき動向

CPO並びに光電融合の開発は、①データセンターのラック間のネットワーク接続を担うスイッチへの適用（ボード間）と、②パッケージ間やパッケージ内のチップやダイの間の接続に光を活用する光I/O技術の実現を目指す2つの方向性で進んでいる。図表2に、主要企業のアプローチ等をまとめた。

2-1. 主要企業等の動向

CPOで先行するのはBroadcomとNvidiaである。

- ・Broadcom: CPOスイッチ市場を牽引している。TSMCの先端プロセスとパッケージ技術を活用したCPOスイッチをAIデータセンター向けに提供しており、2026年以降の大規模導入を見据えている。

- ・Nvidia: AIインフラの覇者として独自の戦略をとる。スイッチ向けCPO搭載製品を発表し、CPO技術を、AIファクトリーを支える中核技術と位置付け、TSMC、(米) Fabrinet、(日) センコーアドバンス、(日) 住友電工などから成る「シリコンフォトニクス・エコシステム」を構築する。しかしながら、GPU間接続（NVLink）においては「可能な限り銅線を使う」という姿勢を現時点では崩していない。これはコストと信頼性の観点から、短距離接続では依然として銅線が優位であるとの判断による。

- ・スタートアップ: (米) Ayar Labs、(米) Celestial AI、(米) Lightmatterといったスタートアップは、光I/O技術として、CPO技術を活用したチップレットと光源を開発し、プロセッサとメモリ間、あるいはプロセッサ同士の通信ボトルネック解消を狙う。これは、生成AIで従来課題となっていたもので、AIモデルが大型になるにつれチップとメモリ間のデータ移動に時間とエネルギーを消費する課題を解消するものである。

- ・TSMC: 光電融合製品の製造受託先であるTSMCは、エコシステムの中心として存在感を高めている。独自の光電融

¹⁰ 帯域幅とは、通信で取り扱う周波数の幅のことを指す。これはつまり、一定時間内に送受信できるデータ量を意味する。

¹¹ ナノ秒とは、時間の単位のこと、1秒の10億分の1のこと。つまり、100ナノ秒は、1秒の100万分の1の時間となる。nsと表記することもある。

合パッケージ技術を開発し、NvidiaやBroadcom等の主要プレイヤーに対し、3D積層技術を提供している。また、国際的な業界団体であるSEMIが提唱する「Silicon Photonics Industry Alliance (SiPhIA)」を、OSAT¹²⁾の(台)ASEと共に主導し、CPOを含むシリコンフォトニクス技術に関わるサプライチェーン強化を進めている。

図表2：CPO関連企業の動向

企業名	製品出荷・提供状況 (2026/01時点)	どこを光化するか			アプローチ
		ボード間	パッケージ間/ チップ間	ダイ間	
Broadcom	イーサネット向けCPOスイッチを 出荷済み	◎	○	-	・長距離であるラック・ボード間をCPO化する方針が主軸。 ・短距離（プロセッサ、HBM等）接続を光化する構想も公表。 ・TSMCの光電融合パッケージ技術のCOUPEを採用。
Nvidia	インフィニバンド向けCPOスイッチを2026年初頭、イーサネット向けCPOスイッチを2026年後半に市場投入予定	◎	-	-	・長距離であるラック・ボード間をCPO化する方針が主軸。 ・短距離（チップ間/GPU間）接続には、コストと信頼性の観点から可能な限り銅線（NVLink）を使う方針を維持。 ・TSMCの光電融合パッケージ技術のCOUPEを採用。
Marvell Technology	製品出荷については未公表（光電融合製品の収益への貢献は、2028年度後半に始まると予想）	-	○	○	・チップレット集積パッケージ同士の接続を電気から光に置き換える。 * 2025年12月に光電融合スタートアップのCelestial AIを32.5億ドルで買収しており、光電融合関連技術は、Celestial AIのものを記述。
Ayar Labs	光I/O評価キットを顧客向けに提供中	-	◎	○	・汎用的な「光I/Oチップレット」を提供し、パッケージ間の電気配線を光に置き換えることを目指す。 ・Nvidiaと協業中。 ・製造はGlobal Foundriesに委託。
Lightmatter	2025年夏に提供と発表あり	-	○	○	・統合度が高いアプローチで、ダイの直下から光でデータを入出力させることで、パッケージ内部やダイ間の通信ボルトネックを根本から解消しようとしている。
NTT (IOWN)	CPOサンプルの市場投入は2026年を予定	○	○	○	・IOWN向け「光電融合デバイス」開発において、半導体ベンダーや素材企業と共同で設計・実装を目指す。

出所：各所資料から三井物産戦略研究所作成

2-2. 日本の動向

日本ではNTTがIOWN構想のもとで光電融合に関する研究を進めており、CPOデバイスの研究成果を公表している。政府も、経済産業省・NEDOを中心に、長年光電融合技術の推進に力を入れており、NEDOによるチップ間通信の光化に関するプロジェクトでは、2014年から2022年までの総額で228億円を投じている。近年では、経産省による「半導体・デジタル産業戦略の現状と今後」と題した資料にて、重点技術として光電融合が取り上げられており、IOWN構想との連携が国家レベルのビジョンとして記述されている。また、2025年4月には産総研にて光電融合研究センターが設立された。

CPOの実装においては、PICと光ファイバーを1マイクロメートル（ミクロン）¹³⁾未満という極めて高い精度で接続するアライメント技術や、レーザー光源の外部化（ELS）に伴う特殊なコネクタ接続が不可欠となっており、日本の部材メーカー（住友電工、センコーアドバンス、(日)フジクラなど）がその重要部材の供給において世界的に高いシェアと技術力を持っている。

3. 今後の展望

調査会社IDTechExの予測では、CPO市場全体は2036年までに200億ドル（約3兆円）規模を超えると見込まれている。普及タイムラインとしては、2026年は、ハイパースケーラー向けのスイッチにおいてCPOの導入が広がりつつ、従来型の光ト

¹²⁾ OSATとは、Outsourced Semiconductor Assembly and Testの略で、パッケージングや最終テストといった半導体の後工程を専門で受託する企業のこと。前述のように、CPOでもパッケージング技術が必要である。

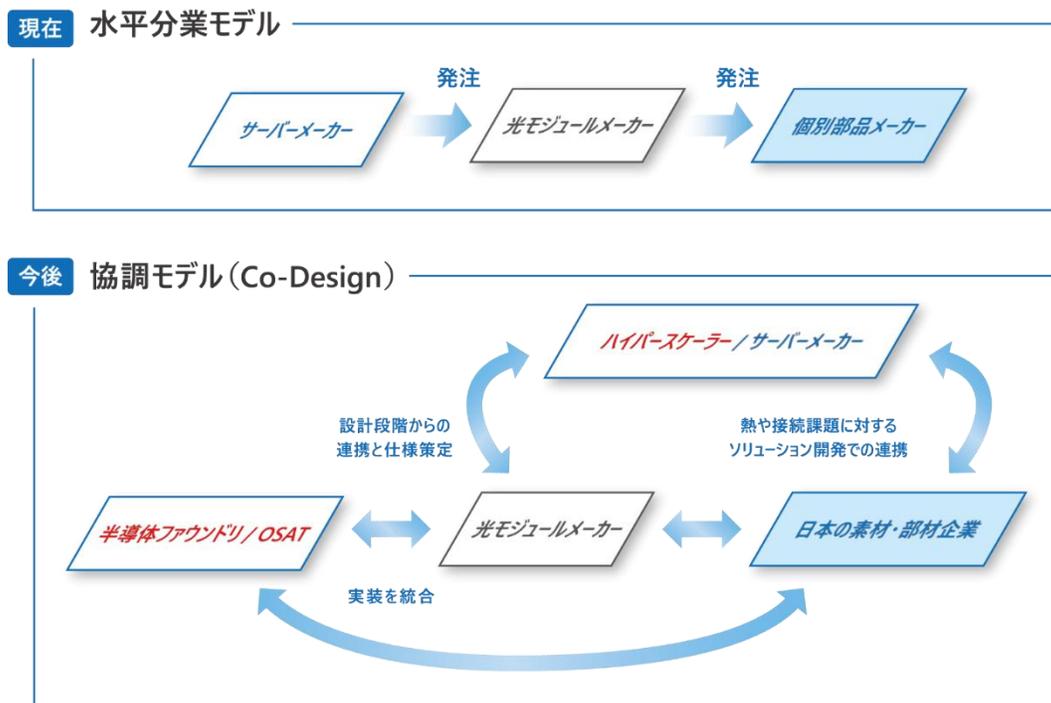
¹³⁾ マイクロメートル（ミクロン）とは、長さの単位で1ミリメートルの1000分の1のこと。μと表記することもある。

ランシーバも存在する過渡期となり、2027年以降に、製造技術の成熟に伴い大規模導入が進むと見られる。それと同時期に、光I/O技術の搭載が本格化し、CAGR 20%以上の勢いで市場が急拡大すると予測されている。

CPOにより、「光モジュールを個別に挿す」から、「半導体パッケージに光機能を組み込む」へと技術が変化したことで、半導体ファウンドリ（TSMC等）やOSAT（ASE等）がサプライチェーン上で重要な役割を持つことになった。従来、光トランシーバ-の設計・開発を行ってきた光モジュールメーカー（Broadcom等）や部品メーカー（住友電工等）は、ファウンドリやOSATとより密接に連携することになる。

日本企業にとっては、CPOのボトルネックとなる「光ファイバーの実装（アライメント）技術」「高耐熱材料」「ガラス基板」などの部材・装置分野で高い勝算がある。光モジュールメーカー等が構築するエコシステムへ、単なるサプライヤーとしてではなく、技術課題を解決する共同開発パートナーとして深く入り込めるかが、次世代データセンター市場での成功の鍵となるだろう（図表3）。

図表3：ビジネスモデルの変化



出所：各所資料から三井物産戦略研究所作成

辻 理絵子 Rieko Tsuji / シニアマネージャー

専門分野：AI・ロボティクス、通信・データセンター、AI 半導体・光電融合

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、当社およ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、当社およ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。

MITSUI & CO. GLOBAL STRATEGIC STUDIES INSTITUTE

産業化フェーズへ向かう微小重力利用技術

— 「軌道上実験」が拓く次世代ものづくりの新潮流—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部
金城 秀樹

なぜこの技術を取り上げるのか

宇宙空間は、これまで限られた研究者や国家プロジェクトの場と捉えられてきたが、近年では新しい研究・産業基盤として注目され始めている。ロケット打ち上げコストの低下や民間企業の参入拡大を背景に、宇宙産業全体でイノベーションが加速している。注目されるのが、宇宙特有の微小重力環境を活用した「軌道上実験」と、その成果の産業利用である。地上とは異なるこの環境は、新たな製品や製造プロセスの創出につながり、将来的には新しい市場やサプライチェーンの形成にも影響を与える可能性がある。本稿では、こうした動向と今後の展望を整理する。

Summary

- 微小重力環境では、自然対流や沈降・浮上の影響が小さく、結晶化などのプロセスを精緻に観察・制御できる。その特性を活かし、医薬・バイオや材料分野を中心に応用が拡大している。
- 国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）では、各運営国が独自の利用モデルを構築し、医薬品成分の結晶化研究をはじめとする多様な実験が実施されてきた。現在では、商業利用拠点としても成熟している。
- 小型衛星に実験装置を搭載した「フリーフライヤー」による軌道上実験技術が実用化され、さらに、ISS退役後を見据えた民間宇宙ステーション計画も進展しており、軌道上実験の新たなエコシステムが形成される見通しである。

1. 微小重力利用技術とは

1-1. なぜ微小重力は「きれいな結晶」を作れるのか

微小重力利用技術とは、国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）¹などを活用し、地上では重力の影響と切り離して評価することが難しいプロセスを、精緻に観察・制御する取り組みの総称である。重力による自然対流や沈降・浮上などの影響が抑制されることで、現象そのものをより純粋な形で取り出し、基礎理解の深化やプロセス最適化に結びつける点が特徴である。

地上においては、液体内部では重力によって自然対流（濃度対流や熱対流）が生じる。濃度差や温度差により密度の異なる部分が生じ、軽い（密度が低い）流体は上昇し、重い（密度が高い）流体は下降する。例えば結晶化では、この対流が結晶成長中の溶液の濃度や温度の分布を乱し、成長面の不均一性や欠陥の原因になる。また、結晶核や不純物の粒子は、沈降や浮上によって位置が偏り、結晶内部に微細な歪みなどを生じさせる。

一方、ISSは、地球の重力に引き付けられながら高速で周回している。このときISS内部の視点では、物体には重力と見かけ上つり合う遠心力が働き、微小重力状態となっている。このような環境において、物体は床や壁から支えられる力をほとんど受けず、上下に押される感覚が極めて弱くなるため、沈んだり浮いたりする動きが起きにくくなる。その結果、自然対流が抑えられ、液体内部は、拡散によってのみ、ゆっくりと均一化していく。この条件下では、結晶核が均質に形成され、結晶は

¹ 国際宇宙ステーション（ISS）は、地上約400kmの軌道上を周回しながら、米国・日本・欧州・ロシア・カナダの5つの宇宙機関が共同で運用している国際的な宇宙実験施設である。1998年に建設が始まり、2011年に完成した。現在は、微小重力環境を利用した実験、宇宙曝露環境を活用した船外実験、宇宙環境下における生命科学研究などが行われている。

乱されずにゆっくりと均一に成長しやすくなる。この技術的効果の応用例を図表1に示す。

図表1：微小重力利用技術の応用例

分野	応用例	効果
医薬・バイオ	タンパク質の結晶化	・微小重力で対流・沈降が抑えられ、地上より均質で不純物の少ない結晶が得られやすい。 ・医薬の構造解析や製剤設計に有用とされる。
	再生医療用組織の形成	細胞が沈まず自然に立体的に集まり、血管網や複雑な組織構造が作られやすい。
	プロバイオティクス開発	・微生物の代謝や性質が変化し、新しい機能性の発現が期待される。 ・ストレス応答や遺伝子発現の変化が報告されている。
材料	均質な結晶成長（ウエハ製造）	・温度差が安定し、結晶の欠陥が少なくなる可能性がある。 ・高性能材料の実現につながると期待される。
	高強度ポリマー・ナノ複合材	粒子が沈まず均一に分散しやすく、材料強度や特性の向上が期待される。

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

1-2. 多様化する微小重力プラットフォーム

微小重力環境を利用できるプラットフォームは、急速に多様化している（図表2）。

図表2：微小重力プラットフォームの比較一覧

区分	プラットフォーム [主な運営者]	微小重力時間	特徴・用途
地上系	落下塔 [（独）ZARM Institute]	最大約9秒	・約146mの塔から真空チューブ内を落下。 ・短時間の微小重力実験としては、最も低コストで高精度。 ・材料・流体などが対象。
	航空機 [（仏）Novespaceなど]	約20秒×複数回	・高度約9～10kmで放物線飛行（パラボリックフライト）を実施。 ・繰り返し実験が可能で、生命科学・医薬品開発・教育用途にも広く利用。
準軌道系	サブオービタルロケット [（米）Blue Originなど]	約3分半～4分半	・宇宙の入り口付近の高度約100kmまで上昇し自由落下。 ・宇宙実験や機器実証の短時間試験に活用。
	サウンディングロケット [NASA ^注 など宇宙機関]	約6～10分	・高度約100～300kmの宇宙空間を飛行。 ・数分間の宇宙環境を提供し、技術実証や材料実験に利用。
軌道系	国際宇宙ステーション（ISS） [NASAなど宇宙機関]	数カ月～1年以上	・高度約400kmの軌道を周回。 ・最も安定した微小重力環境で、医薬・バイオ、材料など幅広く活用。
	フリーフライヤー（小型衛星） [（米）Varda Space Industriesなど]	数日～数週間	・高度約450～550kmの軌道を周回。 ・小型衛星上で実験を実施。 ・その後、回収カプセルが大気圏へ再突入し、成果物は地上で回収。
	民間宇宙ステーション [（米）Axiom Spaceなど]	数カ月～1年以上	・高度約400～500kmの軌道を周回。 ・2028年以降に順次稼働開始予定。

注：米国航空宇宙局

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

従来の落下塔や放物飛行を行う航空機に加え、宇宙空間の入り口（高度約100km前後）に到達するサブオービタルロケット、高度約400kmの軌道を周回するISS、軌道上で自立的に実験を行うフリーフライヤー（小型衛星）、さらには将来を見据えた民間宇宙ステーションなど、多様な実験プラットフォームの取り組みが進展している。研究目的・コスト・期間に応じて、最適な実験手段を選択できる環境が整いつつある。なお、フリーフライヤーおよび民間宇宙ステーションについては、「2.注目すべき動向」で述べる。

1-3. 国ごとに異なるISS利用モデル

ISSでは、米国・日本・欧州がそれぞれの利用モデルを構築しており、研究者・企業は国籍を問わず利用可能である（図表3）。米国は民間実験サービス事業者が独自の装置を常設し、多数の企業による研究を継続的に運用する高度な商業モデルを展開している。日本実験棟「きぼう」は、安全基準の下、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の設備を活用できる方式となっており、利用しやすいことが特徴である。欧州実験棟「Columbus」では、民間実験サービス事業者が、顧客が持ち込む小型実験ユニットを受け付ける柔軟な仕組みを提供している。こうした多様な枠組みにより、多岐にわたる試験ニーズに応じた実験機会が確保されている。なお、利用料は規模によるが、数千万円～数億円²とされる。

図表3：ISS実験棟の利用モデル

項目	米国実験棟	日本実験棟（きぼう）	欧州実験棟（Columbus）
技術的強み	細胞・バイオ研究、製造分野、材料系	静電浮遊炉、結晶化研究、高温材料	流体科学、プラズマ結晶、生命科学
利用受付窓口	（米）Center for the Advancement of Science in Space (CASIS) ^{注1}	・三井物産エアロスペース ・日本低軌道社中 ^{注2} ・Space BD ・兼松/DigitalBlast/有人宇宙システム	（ベルギー）Space Applications Services (SAS)
利用者（顧客）	世界中の企業・研究機関、国籍制限なし	日本企業が中心だが、海外企業の利用も可能	欧州企業が中心だが、国籍制限なし
実験の実施主体	NASA認定の民間実験サービス事業者	・宇宙飛行士が実験操作を実施 ・一部は民間事業者やJAXAが地上から遠隔操作	・SASが主要運用を担当 ・宇宙飛行士が実験操作を実施 ・地上管制チームが担当する場合もある
実験設備の所有者	民間実験サービス事業者	JAXA	欧州宇宙機関（ESA）
利用者が用意するもの	・試料、材料 ・必要に応じて民間実験サービス事業者のISS実験ラックに差し込む実験ユニット	・試料、材料 ・基本はJAXA装置利用	・試料、材料 ・ISS実験ラックに差し込む実験ユニット

注1：ISSの米国運用セグメント（USOS）における「U.S. National Laboratory（利用枠）」の運用管理をNASAから委託されている非営利団体

注2：日本低軌道社中は、当初三井物産の子会社として設立され、その後、三菱重工業および三菱電機が出資者として参画している。

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

² NASA「Commercial and Marketing Pricing Policy」、JAXA「有償利用制度（非定型サービス）の利用料金と減免制度」

2. 注目すべき動向

2-1. ISSは民間企業による軌道上実験（R&D・製造実証）拠点へ

ISSは、国家主導の基礎研究の場から、民間企業が活用する商業利用の拠点へと変化している。2010年代半ば以降、米国棟において実施された実験は、2024年度³に100件超へ拡大し、そのうち約8割が民間企業の案件となった⁴。

ISSでの民間実験は「①地上応用型（知見還元）」と「②宇宙製造実証型」に大別される。①では、製薬企業による結晶化研究などが進み、成果を地上の製品開発に生かす動きが広がっている。②では、NASAが宇宙空間を製造拠点として活用する取り組み「In-Space Production Applications（InSPA）⁵」を推進しており、人工網膜や医療材料などの製造実証が始まっている。①および②の事例を図表4に示す。その他、2020年代の事例を中心に、民間企業の実験テーマを図表5に整理した。食品、日用品・生活インフラなど、より身近な領域にも活用が広がっている。

図表4：微小重力環境を活用した民間企業実験の事例

分類	実験主導企業	実験概要と主な結果	実施時期
地上 応用 型	(米) Merck & Co.	・抗がん免疫薬キイトルーダ成分の結晶懸濁液 ^{注1} の生成実験が行われた。 ・微小重力下で粒径の均一性が高い結晶懸濁液が得られた。 ・抗体医薬の製剤設計や投与方法の改善に寄与する可能性が示された。	2017年
	(米) MicroQuin	・乳がん・前立腺がん細胞の3D培養を実施。 ・細胞の生存維持に関わる仕組みに変化が生じる可能性が示された。	2022年
	(米) Colgate-Palmolive	・微小重力が皮膚の老化・保湿・コラーゲン生成に及ぼす影響を解析。 ・実験の詳細データは現時点では公開されていない。	2022年
宇宙 製 造 実 証 型	(米) Flawless Photonics	・ZBLAN（重金属フッ化物ガラス）光ファイバーを製造。 ・11km超の長尺ファイバーの生成を確認。 ・地上製造と比べ、層の均質性向上や結晶欠陥低減の可能性が示された。	2024年
	(米) LambdaVision	・人工網膜用タンパク質薄膜の製造プロセスを繰り返し検証。 ・微小重力条件下で、膜の均一性向上や欠陥低減が得られる可能性が示された。	2018年 ～継続中
	(米) United Semiconductors	・半導体・半金属複合バルク結晶 ^{注2} の成長実験を実施。 ・結晶サイズや欠陥低減の効果については、現在解析・評価が進められている。	2024年打ち上げ /2025年分析

注1：薬剤成分の微細な結晶粒子が液体中に均一に分散した状態の液剤。製剤安定化や投与形態の選択肢拡大につながる特性を持つ。

注2：電流制御が可能な半導体特性と、電流が高速で流れる半金属特性を単一結晶内に併せ持つ新しい高機能材料。

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

³ 2023年10月1日～2024年9月30日

⁴ “2024 ISS National Lab Annual Report Highlights Momentum in Space-Based R&D”, ISS National Lab, January 2025.

⁵ InSPAは、ISSの実験環境を活用して宇宙での製造実証を促進し、その成果を地上向けの製品開発に還元することを目的とした、NASAのプログラムである。米国の宇宙製造分野における主導的地位の確保と、持続可能な低地球軌道経済の育成を政策目標としている。

図表5：民間企業の実験テーマ

分野	実験主導企業	実験テーマ
医薬・バイオ	(米) Eli Lilly	微小重力環境で筋萎縮（筋量低下）を標的とする新薬候補の評価実験
	(日) ペプチドリーム	創薬ターゲットの結晶生成・立体構造解析支援
	(日) ヤクルト	プロバイオティクス（乳酸菌）の微小重力環境での安定性や機能性評価
材料	(独) adidas	発泡体素材の構造・反発特性の変化を解析し、クッション性能や耐久性の向上に活かす研究
食品	(日) キリンホールディングス	袋状の培養槽を用いたレタス栽培実験
	(ベルギー) Anheuser-Busch InBev	大麦の発芽・成長特性を評価し、穀物品質の改善や将来の宇宙食品研究への展開を検討する研究
日用品・生活インフラ	(米) Procter & Gamble	洗剤成分の分解性・洗浄性能を評価し、省水・省エネ型の洗濯プロセス設計に活かす取り組み
	(米) Delta Faucet	水滴・気泡挙動のメカニズムを解析し、少ない水量でも快適性を保つ節水シャワー設計に応用する研究
	(日) 花王	水がほとんど使えない微小重力環境での洗髪・洗濯ソリューションを実証

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

これらの実験活動を支える（米）Redwireや（米）Space Tangoに代表される民間実験サービス事業者の動向も注目される。Redwireは、自社開発の結晶化装置「PIL-BOX⁶」を用い、複数の製薬企業⁷と共同研究を継続し、高品質結晶の生成において実績を積み上げている。同社は2025年には、ISSで得た種結晶⁸を製薬企業にライセンス供与する新たなビジネスモデルを開始している。Space Tangoは150件以上の実験実績を有し、再生医療向け材料の宇宙製造実証にも挑戦している。

2-2. フリーフライヤー：軌道上での迅速・柔軟な実験プラットフォームの台頭

ISSに替わる軌道上での実験手法の一つとして、「フリーフライヤー」が挙げられる。フリーフライヤーは、小型衛星に実験装置を搭載し、軌道上で数日～数週間にわたって自律的に実験を行い、成果物は大気圏再突入カプセル⁹を用いて地上で回収する（図表6）。また、実験データのみを取得し、回収を行わないミッションもある。

最大の特徴は、ISSの制約や宇宙飛行士の作業枠に依存せず、①打ち上げから回収までを数カ月単位で完結できる、②短期間に複数ミッションを継続実行できる、といった迅速性・柔軟性にある。これにより、企業は実験のPDCAを高速に回すことが可能となり、試験開始から結果取得までのリードタイムを大幅に圧縮できる。

こうした分野で先行するのが、（米）Varda Space Industriesである。同社は自社開発の小型衛星を用い、軌道上での医薬品製造実証に取り組んでいる。2023年の初号機では、HIV治療薬「リトナビル（Ritonavir）」の結晶生成に成功し、2024年に地上で回収された¹⁰。日本企業では、ElevationSpaceが2026年後半に初号機の打ち上げを予定しており、

⁶ PIL-BOXは、これまでに28基がISSで運用され、17種類の化合物の結晶化に成功している。

⁷ （米）Bristol Myers Squibbや（米）Eli Lillyなどとの共同研究実績を有する。

⁸ 種結晶とは、結晶成長の起点となる小結晶であり、再現性の高い結晶化を可能にする。生成条件が極めて繊細なため、高品質の種を得ること自体が難しく、研究上きわめて貴重なリソースとなる。

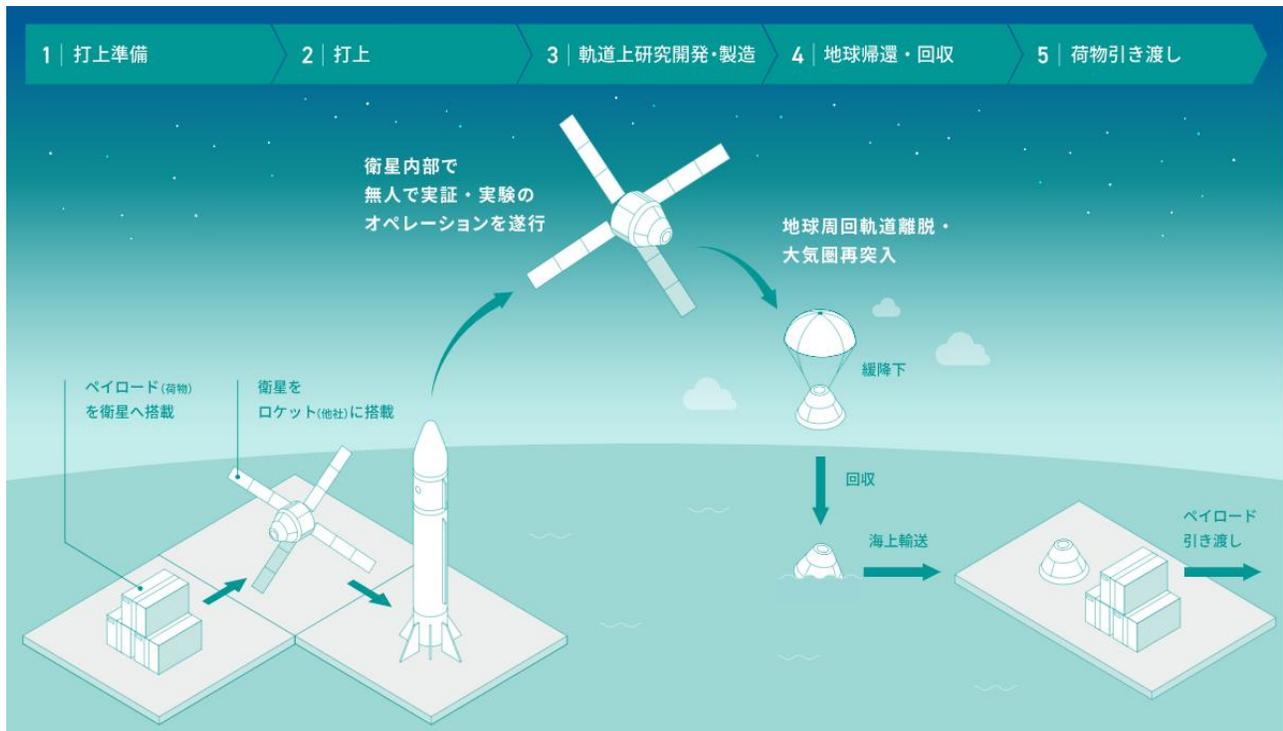
⁹ これは、軌道上で得られた試料や製造物を地球へ回収するための耐熱カプセルであり、再突入時の数千℃の加熱から内部を保護する耐熱材を備え、減速・着地までの機能を自律的に実行する。

¹⁰ 2025年1月には2号機を打ち上げ、同年2月に豪州で回収した。3号機も同年3月に打ち上げられ、同年5月に回収に成功した。

国内初のフリーフライヤー事業となる見通しであり、注目されている。

フリーフライヤーの競争力の要となるのは、軌道上での実験技術に加えて、成果物を安全かつ確実に地球へ戻すための大気圏再突入用カプセルである。とりわけ、医薬品や高付加価値材料を対象とする場合、回収プロセスの信頼性は事業化の成否を左右する要素となる。図表7に各社の取り組みを整理した。

図表6：フリーフライヤーのオペレーション



出所：ElevationSpace ウェブサイト <https://elevation-space.com/els-r> 2025年11月23日最終閲覧

図表7：フリーフライヤー事業者および再突入回収カプセル関連企業の動向

企業名	事業モデル	開発状況・実績
(米) Varda Space Industries	・実験～回収の統合サービス提供 ・宇宙製造による自社プロダクト創出	・2023～2024年にHIV治療薬リトナビル結晶の軌道製造・地上回収に成功。 ・2025年以降、連続ミッションを実施し、商業運用段階へ移行。 ・米国防総省との契約拡大により、実験・製造の両面でビジネス基盤を強化中。
(英) Space Forge	宇宙製造による自社プロダクト創出	・パワーエレクトロニクス向け半導体に用いられる窒化ガリウム（GaN）などの高機能材料を、自社製品として製造することを目標としている。 ・2025年に、軌道上において製造プロセスに必要なプラズマ生成に成功し、製造実証の基盤を構築。 ・英国政府および欧州宇宙機関（ESA）が支援している。
(日) ElevationSpace	実験～回収の統合サービス提供	・2026年に初号機の打ち上げを計画。 ・2025年9月、(ルクセンブルク) Exobiosphere ^{注1} と提携。 ・(米) Axiom Spaceとの協業により、将来の民間宇宙ステーションとの連携運用モデルを検討中。
(独) ATMOS Space Cargo	回収カプセルの設計・製造が主軸	・回収カプセル「Phoenix-1」の軌道実証を2025年に実施。2026年に「Phoenix-2」の打ち上げを計画。 ・欧州で数少ない回収技術プレイヤーとして、複数の実験事業者 ^{注2} と連携。 ・月1回レベルの頻度のカプセル運用を計画している。

注1：Exobiosphereは、微小重力環境を活用した創薬・バイオ実験を対象とする受託研究機関（Contract Research Organization：CRO）である。

軌道上実験をCROサービス化することで、製薬・バイオ企業にとって軌道上実験の利用ハードルが大きく低下する。

注2：2025年11月、宇宙機搭載用実験装置を開発する(ルクセンブルク) Space Cargo Unlimitedと提携を発表。

出所：各社ウェブサイトなどから三井物産戦略研究所作成

2-3. 民間宇宙ステーション：軌道上産業を支える基幹インフラの形成

ISS退役（2030年頃）を見据え、民間宇宙ステーション構築に向けた取り組みが進展している。これらは、軌道上の商業利用を中長期的に維持・拡大する上で不可欠な基幹インフラとして位置付けられる。現在、NASAの支援を受けた4つの民間宇宙ステーション計画が、代表的な事例として挙げられる。

- ① (米) Axiom Space（ステーション名：Axiom Station）は、ISSに接続する商業モジュールの建設を進めており、将来的にはこれを分離して独立ステーションとして運用する計画である。研究・製造、有人滞在、軌道上データセンターまで多目的に活用可能な商業プラットフォームを目指している。
- ② (米) Starlab Space（Starlab）は、米欧共同開発の一体型小型ステーションで、欧州宇宙機関（ESA）とも連携し、欧州を含む国際顧客に開かれた研究・産業拠点を目指す。
- ③ (米) Blue Origin / (米) Sierra Space（Orbital Reef）は、「宇宙版産業団地」をコンセプトに掲げ、企業・大学・政府機関が利用できる多目的プラットフォームを構築する。
- ④ (米) Vast（Haven-1）は、4名程度が短期滞在できる小型ステーションから始め、将来は回転構造によって人工重力を発生させ、長期滞在に適したステーションへ発展させる構想を持つ。

こうした動きは日本にも波及しており、日本低軌道社中がISSの「きぼう」の後継機「日本モジュール」の開発を進めている。日本企業の参入は、今後の軌道利用エコシステムの広がりをもさらに加速させるだろう。

3. 今後の展望

微小重力の商業利用は、医薬・バイオや材料分野を中心に応用が拡大している。製薬企業による新薬開発への応用、人工網膜など再生医療デバイスの製造実証、宇宙で得られた種結晶のライセンス供与など、地上産業に成果が還元される事例が現れ始めている。フリーフライヤー領域では、Varda Space Industriesが、軌道上実験と成果物回収を統合した新しいサービスモデルを提示し、事業化の具体像を示した。今後は、民間宇宙ステーションも加わることで、R&D・製造実証・回収を包含する軌道上実験の新たなエコシステムが形成される見通しである。これらは、地上のバリューチェーンとより密接に結びつき、成果の社会実装が進むだろう。

では、これらの技術は私たちの生活にどのような恩恵をもたらすのだろうか。医薬・バイオ分野では、より効果が高く、副作用の少ない医薬品の開発が進み、患者の身体的・経済的負担の軽減が期待される。また、人工網膜などの先端医療デバイスの高度化は、人の失われた機能の回復を支援し、生活の質の向上に寄与する可能性が高い。材料分野では、より軽量・高強度・高効率な素材が実用化され、製品の省エネ化・小型化・長寿命化が進展する。さらに、食品分野では、高付加価値な機能性食品の開発が進み、生活者の健康維持・増進に寄与していくと考えられる。

一方で、産業化に向けた課題としては、第一に、打ち上げ・回収費用の低減が引き続き重要であり、事業の持続性を左右する要因となる。第二に、宇宙環境下で長期にわたり稼働できる信頼性の高い自律運用技術¹¹が不可欠となる。第三に、製薬・素材・食品など地上企業との共創型R&Dの枠組み構築が求められる。第四に、軌道上で得られた成果を製品化・上市するための品質基準や認証プロセスの整備を進める必要がある。

微小重力利用の市場は、既に確かな広がりを見せている。実験の受託、軌道上での製造支援、素材提供、回収物流、データや知財の活用、宇宙由来素材の応用など、企業が参入し得る領域は多岐にわたる。軌道上で得られた成果は、地上企業の課題解決と結びつきながら、新たな市場を創り出しつつある。宇宙と地上が結びつく新たなものづくりの潮流が、いま現実の産業として立ち上がりつつある。

金城 秀樹 Hideki Kinjo / 部長補佐

専門分野：衛星リモートセンシング、宇宙輸送、月面商業利用

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社およ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、当社およ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。

¹¹ ここでいう自律運用技術とは、人の常時介入なしに、システムが自ら状況を判断し、計画・実行・異常対応を行うための技術を指す。