

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してきた。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]	数ヶ月～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]	数ヶ月～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、軌道上で自律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}	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> （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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・試料、材料 ・基本はJAXA装置利用 	<ul style="list-style-type: none"> ・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单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ヶ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。

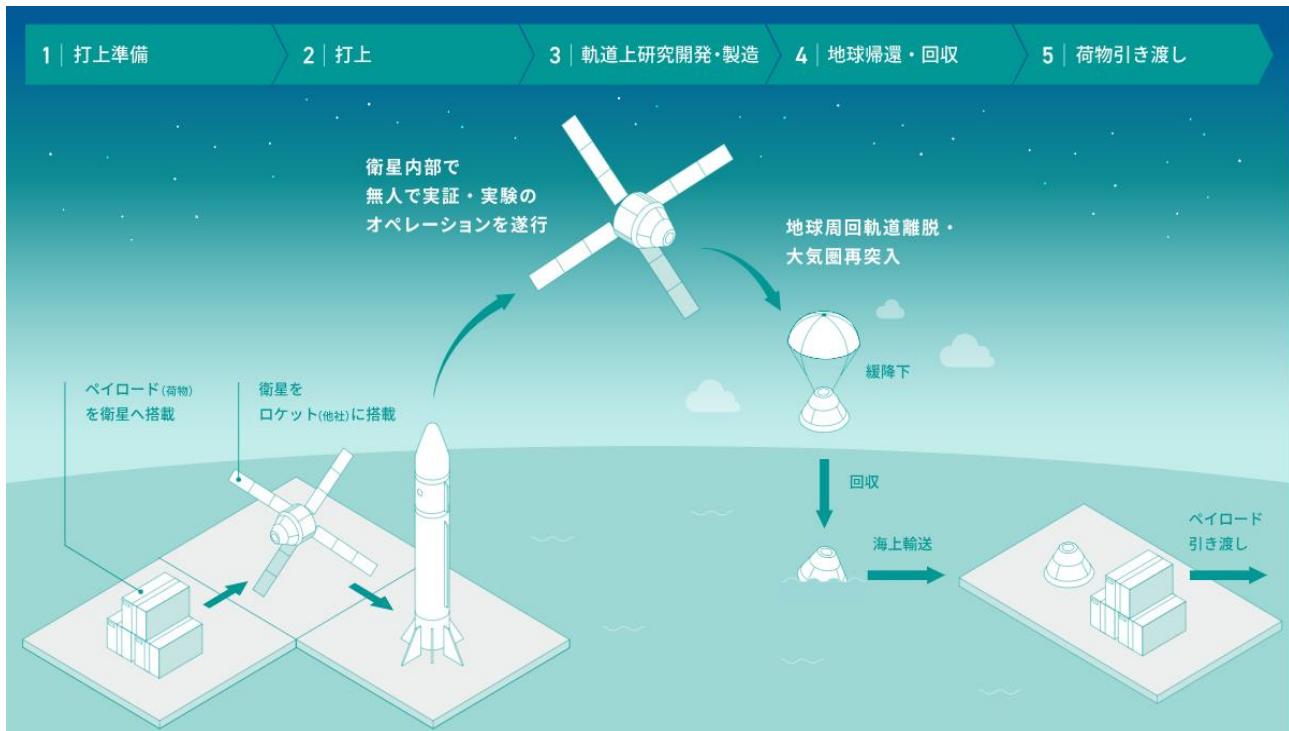
⁹ これは、軌道上で得られた試料や製造物を地球へ回収するための耐熱カプセルであり、再突入時の数千°Cの加熱から内部を保護する耐熱材を備え、減速・着地までの機能を自律的に実行する。

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。

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。