

月面市場調査： 市場動向と月面経済圏創出に 向けた課題

調査報告書
2021年9月



www.pwc.com/jp

目次

| | | |
|----------|------------------------|-----------|
| 1 | はじめに | 3 |
| 2 | 月輸送市場 | 4 |
| 2.1 | 現状 | 4 |
| 2.1.1 | 月輸送市場について | 4 |
| 2.1.2 | 需要と供給の特徴 | 5 |
| 2.1.3 | 地域別動向の概要 | 9 |
| 2.2 | 今後の展開と月輸送市場 | 10 |
| 2.2.1 | 市場の推進要因と課題 | 10 |
| 2.2.2 | 市場予測 | 11 |
| 2.2.3 | ロードマップのギャップ分析 | 15 |
| 3 | 月データ | 19 |
| 3.1 | 現状 | 19 |
| 3.1.1 | 月データ市場について | 19 |
| 3.1.2 | 月データの特徴 | 19 |
| 3.2 | 今後の展開と月データ市場 | 21 |
| 3.2.1 | 市場の推進要因と課題 | 21 |
| 3.2.2 | 市場予測 | 22 |
| 4 | 宇宙資源の活用 | 26 |
| 4.1 | 現状 | 26 |
| 4.1.1 | 宇宙資源活用（SRU）とそのバリューチェーン | 26 |
| 4.1.2 | 宇宙資源活用の需要と供給 | 27 |
| 4.1.3 | 世界の政策と規制に関する評価 | 28 |
| 4.2 | 今後の展開とSRU市場 | 29 |
| 4.2.1 | 市場の推進要因と課題 | 29 |
| 4.2.2 | 市場予測 | 30 |
| 5 | 結論 | 33 |
| | 略語一覧 | 34 |



1 はじめに

人類が初めて月面の地を踏んだとき、日本人はその姿をブラウン管越しに眺めていた。

あれから50年以上の時が経ち、今では日本は官民連携で月利用の主要国となることを目指している。政府は2021年末、米国人以外では初となる日本人による有人月面着陸の2020年代後半の実現を目指すことを決めた。民間企業各社においても、本年以降に月面に着陸機や探査車を送り込む計画があり、大小さまざまな企業が月を目指している。

官民連携としては、鳥取県の砂丘を月面と見立て、民間企業の月に関する実証実験の拠点として活用するといった動きも出てきている。

月の商業的価値は今後高まることが予想され、多くの日本企業にとって月はビジネスをする場としてより身近になるはずだ。これまで宇宙や月に関わりのなかった企業も含め、ビジネスの場として、是非一度月に目を向けてもらいたい。

月面市場調査の対象とした3つの主要な活動

宇宙へ向けた人類の挑戦が続く中、次に目指しているのは、月に降り立ちその地で活動を続けることである。この挑戦が成功すれば、月面経済の基礎を築くことができるだろう。月面経済とは、月面、月軌道、地球上での、月資源の生産・利用・交換に関連する全ての一般的な経済活動のことである。月面経済の定義に当てはまる活動は非常に幅広く、特に人間が月に滞在するための支援活動に関するものは多岐にわたるが、本稿では、①輸送、②月データ、③現地資源利用 (In-Situ Resource Utilization: ISRU) の3種類の活動に焦点を当てる。

まず、輸送は人間を月面あるいは月の周辺に滞在させるために、人間と資源を地球から月へ、あるいは月から地球へ運ぶ活動が中心であり、地球と月を結ぶ移動経路を含むシスルナ空間 (地球と月の間の宇宙空間) と月軌道の両方を含む。次に、月データの商業化においては、月の探査で収集されたさまざまな種類のデータを地球上で活用する。大半が技術的なデータであり、宇宙ミッションや宇宙資源調査の準備に関するものが多いが、わずかながら地球上のさまざまな娯楽に利用することができるデータも含まれる。最後の現地資源利

用には、資源の採掘や抽出、製品の製造、インフラの建設、さらには科学的目的のための商品や材料の輸出などが含まれる。この活動の目的は人間の滞在を支援することだが、中長期的には商業活動としても展開される。月資源の利用は自律的な月面経済を構築するための基盤であり、地上経済が地球の資源に支えられているのと本質的にほぼ同じである。

月探索のエコシステムは、公的な宇宙機関だけでなく、民間企業や非宇宙産業まで巻き込んだ動きに拡大している

宇宙の輸送インフラや技術を提供する企業、宇宙機器メーカーなどの宇宙関連企業は、宇宙関連のケイパビリティやサービスに対する需要が高まれば、利益を得ることになるだろう。こうした需要が増大するきっかけとなるのは、月面での経済活動の拡大だけにとどまらない。将来、月面経済の自律が実現した際、別の惑星に向かって宇宙探索を広げるなどの新たな市場機会が創出されることも要因になる。非宇宙産業にとっては、月面経済が機能し始めたときに得られる利益が宇宙産業ほど明確ではないものの、月面経済の成長から大きな利益を得るチャンスはある。宇宙技術とつながり始めたばかりの地上の産業 (鉱業、自動車、建設など) は、バリューチェーンの下流に参加することによって、宇宙技術のイノベーションが作り出す波及効果による利益を得て、月面経済を動かすエコシステムの一員になることができる。

これまで多くの民間企業が将来の月探索ミッションに輸送、データ、現場技術の側面から支援を提供できるよう取り組んできており、着実に足場を固めてきた。同時に、各国政府は宇宙政策にますます力を入れ、とりわけ月に関しては野心的な目標を設定し、明確なロードマップを策定するなど高い関心を示している。本格的な月面経済を構築・維持するには、ダイナミックな市場原理の中で、強力かつ継続的な官民の協力関係が重要となる。いずれ市場は、特に短期的には、破壊的イノベーションや政策の流動性といった外部の力に合わせて調整が必要になるだろう。こうした、リスクが大きく資本集約的な事業では、これまで月以外の宇宙分野で見られた既存の官民のコラボレーションが決定的に重要な役割を果たすと思われる。例

えば、共同出資や研究開発への支援を行う、最初に参入する民間プロバイダーの主要顧客になる、といった方法が考えられる。このような協力関係は、月面での活動の成功率と発展度合いを高め、最終的には月面経済の変革の可能性を切り拓くことができるだろう。

リスクの大きい月面経済では、将来の成長要因と課題を注視することが重要である

月面経済が社会のさまざまな面に幅広い影響を及ぼすことは疑いようがない。最初に影響が及ぶのは、経済、政治、学術分野である。第一に、技術イノベーション、新しい産業や市場の創出、大規模な公共投資が主な原動力となって、経済的変革がもたらされるだろう。この3つの原動力は、地上産業の成長にも好影響を与えようと思われる。第二に、月面経済の成長は、各国の政策や複雑に絡み合う国際関係と密接に相関する。月と、月がもたらすあらゆる機会が戦略的、国家主義的可能性を意味していることは否定できず、地上の大国がそれを強烈に求めていることは明らかである。最後に、学術面にも同様に重大な影響が及ぶ。今、月面経済の構築を実現可能なものにするための研究が地球で行われているが、将来の月での滞在から得られる宇宙の知識をこの研究に組み合わせれば、学術研究を進展させる貴重なものとなるだろう。

月面経済に関しては、現在、さまざまな活動や市場が検討されているが、それらはまだごく初期の段階であり、各国の宇宙当局が最近になって再注目したために力関係もこれまでとは異なっている。市場がどんなペースで成熟するか、技術実証が成功するかどうか、直近の10年間にどの程度のビジネスチャンスが期待できるかなど、不明な点も残っている。ここで重要なことは、市場の成長要因を的確に見極めて注視し、さまざまな宇宙機関や企業が発表している既存のロードマップにおいて、成功や課題の兆候を早期に発見することである。そこで本稿では、月の輸送、資源探索、データの商業化の各市場に関して、現在および将来のビジネスチャンスの特定を支援するため、それら活動の現状を分析し、その結果を報告する。



2 月輸送市場

2.1 現状

2.1.1 月輸送市場について

現在、さまざまな種類のプレイヤーが月を目指している。月面に到達することを目的とする場合（例えば研究、探索、長期滞在の準備などを行うため）もあれば、他の活動のために実験を行って新しいデータを得ることが目的の場合もある。宇宙関連の公的機関だけでなく、民間企業も最終顧客として参入し、得られたデータやサービスを自らのニーズに合わせて活用し、商業化しようとしている。プレイヤーはそれぞれのニ

ーズや目指す活動によって、さまざまな種類のビークル（軌道ペイロードを含む）、月面に降下するためのランダー（着陸船）、月面のあちこちを探索するローバー（探査車）の組み合わせを利用している。

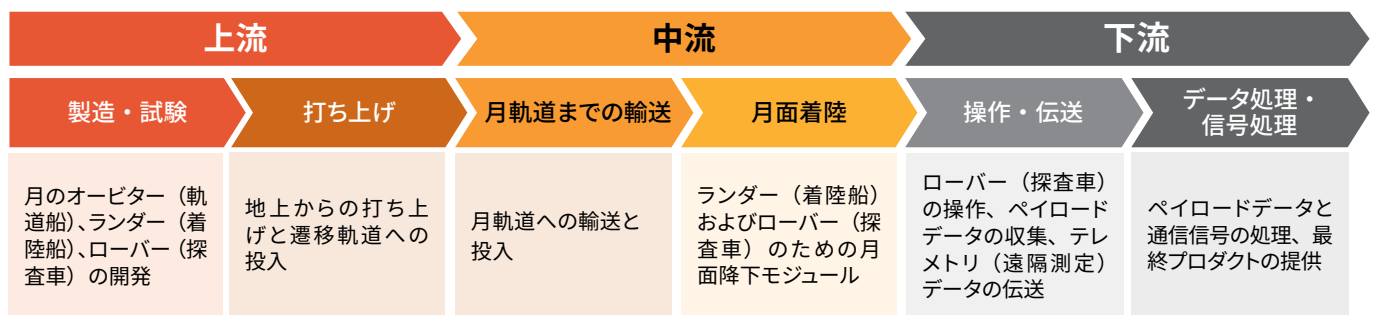


図1：月輸送市場のバリューチェーン

プレイヤーは皆、月へのアクセス（月軌道上あるいは月面まで）という共通の課題に直面している。月への到達の手段として自らビークルを開発するプレイヤーもあれば、自らはペイロード（積載物）だけに集中して、輸送手段は他社に任せるプレイヤーもある。また、月へのアクセスについては、ビークル、ペイロード、ともに管制通信や地上へのデータ送信が必要なため、地球との通信に依存している。

ニーズはプレイヤーごとに大きく異なり、ペイロードの重量も数キログラムから1トンを超えるものまでさまざまである。ビークルの主目的によってミッションの複雑さにも差があるため、キログラム当たりの価格もケースごとに大きな差が出る。

2.1.2 需要と供給の特徴

2.1.2.1 公共セクター

従来、宇宙探索分野では公共セクターだけを顧客とするのが一般的で、民間セクターの関与はごくわずかだった。というのも、これまでの宇宙探索は戦略的・科学的・学術的目的のために国が主導するもので

あって、商業的な機会には目が向けられていなかったからである。しかし現在、その常識は変わりつつある。各国の政府や宇宙当局は、自律的に継続できる民間の宇宙エコシステム開発を目指して、リソースの投入を増やし続けている。公共セクターが関心を持っている月探索の分野には、例えば次のようなものがある。

| | |
|---|---|
|  米国 <p>米国では、将来に向けて長期的に持続できる、月面商業経済の創出を目指した取り組みが行われている。その大きな成果の1つとして目指しているのが、2024年までに、男女の宇宙飛行士（女性宇宙飛行士としては史上初となる）の月面着陸を目指す「アルテミス計画」である。「アルテミス計画」の当初数年間、NASAはCLPS（月面商業輸送サービス）の主要顧客になると思われる。</p> |  欧州 <p>ESA（欧州宇宙機関）は「欧州探査包括計画（E3P、現在のTerrae Novae）」、「サイエンスプログラム」、「月と宇宙資源活用に関する戦略」の中で、月探査に関するビジョンを明確に示し、これら3つの取り組みを合わせて2030年までの中期目標を設定している。欧州委員会もESAの宇宙探査に協力する一方、「ホライズン2020」の枠組みを通して各種取り組み（月面探査車「LUVMI」など）を直接的に支援してきた。また、欧州委員会はEU各国を代表して国際宇宙探査フォーラム（ISEF）に参加しており、2021年には第3回会合を主催することになっている。</p> |
|  ロシア <p>ロシアは、「ルナ計画（ルナ25、ルナ27）」の中でESAと強力に連携しているが、それ以外の領域では各国の宇宙当局との協力は極めて少ない。現在はNASA（アルテミス合意のもとでの宇宙探索）やルクセンブルク（宇宙での採掘に関する多国間合意への参加について、ルクセンブルクの決定待ち）との協力に向けて取り組んでいる。</p> |  中国 <p>中国は2000年代初めに、「嫦娥計画」のミッション実現に向けて3フェーズから成るロードマップを公表した。第1フェーズでは、月軌道から月の表面を探査・研究するというミッションを達成する。第2フェーズでは、着陸船および探査車を使用して月面着陸能力を実証する。第3フェーズでは、研究のための月物質の回収ミッションを達成する、というロードマップである。公表後、第1、第2フェーズは達成され、第3フェーズが進行中だ。「嫦娥計画」のミッションは、中国の長期的な宇宙計画の目標実現にも貢献している。</p> |
|  日本 <p>日本は月探査活動について、2029年までに有人ミッションの実現を目指すなど、高い目標を設定している。2020年には、2050年までの目標について詳しく定めた新しい月探査ロードマップに着手した。2020年代は、環境制御生命維持システム（ECLSS）の技術実証、輸送、着陸船と月面探査などに取り組んでいる。2030年代は活動の中心を月資源利用技術に移し、続いて2040年代には長期的な探査、そして2050年代には民間セクター主導による月探査を目指している。</p> |  インド <p>ISRO（インド宇宙研究機関）はこれまで、着陸船や探査車を含む2回の月ミッションを開発してきた。しかし、チャンドラヤーン2号の失敗により、インドの月探査活動はわずかに後退した。一方で、ISROはすでにチャンドラヤーン3号の開発を計画しており、2022年に打ち上げを予定している。</p> |
|  韓国 <p>2段階の「KPLO（韓国バスファインダー月軌道衛星）計画」で構成される「韓国月探査計画（KLEP）」によって、軌道船、着陸船、探査車、地上制御インフラを開発している。</p> |  カナダ <p>カナダは、ESAやNASAを中心に、他国の宇宙当局との関係構築を進めている。また、米国との間で、月の資源採掘に関する合意が成立した。</p> |
|  アラブ首長国連邦（UAE） <p>UAEは、宇宙当局のMBRSC（ムハンマド・ビン・ラシード宇宙センター）を通じて、2117年までに火星に持続可能な社会を開発することを目指しており、2024年までに月に探査車を送る計画を発表した。</p> | |



2.1.2.2 民間セクター

2.1.2.2.1 探索活動に乗り出す宇宙セクター

民間セクターは、これまでより広範な分野の宇宙探索（月探索、宇宙資源の活用、地球低軌道の商業利用）への参入に向けて、大きく前進している。宇宙探索活動に対する需要（と関連支出）は依然として、主に公共セクターが牽引しているが、一方で、宇宙当局や政府の役割が根本的に変化し、開発機関からサービス（いわゆる「Moon as a service」）の調達機関へと変わったため、能力開発とリスク負担の役割が民間へと移動した（同様の動きは、打ち上げ分野でも起きていた。民間の打ち上げ装置開発は、公共セクターの調達契約が追い風になって加速した）。

そのため、宇宙探索能力を強化する民間企業が増え、各社は宇宙船の設計、ペイロード輸送能力、打ち上げ装置の能力、資源の発見と採掘、宇宙飛行士のシャトル輸送、その他さまざまな能力強化に取り組んでいる。民間企業の関与の裏には、多くの場合、開発の段階から政府が契約や投資の形式で支援しているという現状は相変わらずあるが、こうした能力の開発を民間に委託することで、政府や宇宙当局は、最良の最終製品を競争力のある価格で入手できると同時に、自国の民間宇宙セクターの成長と成功を後押ししている。

米国

米国では、民間宇宙セクターによる、将来の月探索に果たす役割が拡大し続けている。米国にはNASAを中心とする公共セクターによる取り組みや計画の事例が多数あり、これが民間企業（Space X、Boeing、Blue Originなど）の成長を促す要因になっている。例えばNASAの超重量物打ち上げロケット、スペース・ローンチ・システム（SLS）は、「アルテミス計画」に向けてBoeingが製造したもので、ペイロード輸送能力は4万5,000キロに達する。また、Lockheed MartinとAirbus Defense & Spaceが共同で設計した多目的宇宙船（MPCV）オリオンは、NASAの宇宙飛行士を最大6人収容し、大気圏外に運ぶ。一方、NASAはアルテミス有人着陸システムの枠組みに沿って、宇宙飛行士を月に着陸させる有人月着陸船を開発するため、3件の入札契約にSpace X、Blue Origin、Dyneticsの3社を参加させた（先日、Space Xの受注が決まった）。これと並行して、「VIPERミッション計画」では、Astrobotic Technology、Intuitive Space Systems、Masten Space Systemsと3件の契約を交わし、宇宙飛行士の着陸を見越して月面の調査やマッピングを行う特別な探査車を月に届けるための、月面着陸船の開発を行っている。さらに、Firefly Aerospaceの着陸船、ブルーゴーストを使って

2023年に科学技術ミッションのための10のペイロード一式を月面に送り届ける契約が成立したのも、民間の参加を示す例の1つだ。このようにNASAは、意欲的に成長を続ける企業との間で官民連携の取り組みを多数進めている。上記の例はそのごく一部である。

日本

日本もまた、月面探索に意欲的に取り組み、効率的な官民連携の枠組みを備えて、民間宇宙セクターの成長を支援している国の1つである。JAXAと三菱重工の間で交わされたH3ロケットとHTV-Xの製造契約もその一例である。この連携によって、2025年までにペイロードや貨物を競争力のある価格で直接月面に送り届けることを目指す。また、自動車メーカーのトヨタは、JAXAと協力し、将来の月面探査に向けて有人月面探査車ルナクルーザーを共同で設計、製造している。その他にも、宇宙関連のスタートアップ企業であるispaceは、政府系の重要企業からの出資も含めて約9,000万米ドルを調達し、月探査のための着陸船と探査車を開発している。2018年には、宇宙関連のスタートアップ支援を目的に、日本政府が9億4,000万米ドルのベンチャーキャピタルを創設した。このように、日本では公的機関と民間企業の間で多様なかたちの連携や契約が実現しており、民間宇宙セクターを新たな高みに押し上げている。

欧州

欧州では、ESAが月探索の商業サービス利用を継続的に模索し、支援を続けている。欧州での官民連携の最も代表的なものが「ルナ・パスファインダー・プロジェクト」である。ルナ・パスファインダーは、月軌道を周回し、月面のさまざまな場所に通信サービスを提供する衛星である。このプロジェクトではESAの支援のもと、Surrey Satellite Technology、Goonhilly Earth Stationといった民間宇宙企業との共同開発を行っている。また、別の事例では、ESAが民間企業のArianeGroupとPTScientistsを将来の月探索ミッションのためのコラボレーションの相手に選出した。このうちArianeGroupは打ち上げと地上制御業務を担当、PTScientistsは月面着陸船を開発し、2025年の月面到着を目指している。さらに、ESAはNASAが主導する計画にも長期的に関与しており、欧州勢はそうした機会などを通じて域外の計画にも参加している。その中でAirbus Defence & Spaceは、多目的有人宇宙船オリオンを新たに3機製造する契約をESAと結び、Thales Alenia Spaceは、月周回有人拠点ゲートウェイ（月を周回し、人類

の月面滞在を支援するために設計された小規模な宇宙基地)の主要モジュール2機を開発することになった。宇宙資源活用分野でも、Maana Electric(月資源利用の専門企業)やOffWorld(月資源探索のためのAI搭載ロボットを開発中の企業)など、欧州の民間セクターは急速に活動を広げている。

中国

中国は、月の裏側への初着陸などによって、宇宙への積極的な関与と能力を証明した。さらに、再び月に到達したいという意欲を隠すことなく示している。しかし、これまでの中国のミッションは全て国が支援・運営したものである。ごく最近になって宇宙セクターを民間企業に開放したものの、民間企業が開発・製造できる範囲は厳しく制限されたままになっている。しかし、そうした厳しい制限にもかかわらず、宇宙探索企業のOriginSpaceなど150社近くの中国企業が、成長を続ける中国の宇宙セクターに参入すべく登録を済ませており、今後さらにその数が増えるのは確実である。今のところ、中国は米国などの国々とは異なるモデルで開発を進めているが、近い将来、宇宙活動の規模が拡大し、月へのアクセスがますます容易になるに従い、中国政府は必ず、民間企業のクリエイティビティやイノベーションを活用したいと望むようになるだろう(現に、超小型ロケットなど他の宇宙分野ではそうになっている)。

ロシア

ロシアは、国家が運営もしくは支援するプロジェクトが圧倒的に多い。国の宇宙機関であるRoscosmosは、NPOのLavochkin、RKK Energiyaなどの委託先や傘下企業の技術・能力を活用しているが、これらの企業は国の支援を受け、Roscosmosとの契約に大きく依存した運営を行っている。このようにロシアには強力な民間セクターが存在しないものの、ロシアがこれまでもこれからも、宇宙開発の主要なプレイヤーであることには変わりなく、2030年までに宇宙飛行士を月面に着陸させ、2035年までに永続的な月基地を設置することを目指している。こうしたことから、ロシアでは将来、民間セクターが成長し、既存企業の自律性が高まる可能性が極めて高い。

2.1.2.2.2 宇宙セクター以外の企業による探索活動

宇宙当局も公共セクターも、地上産業が宇宙探索に果たせる役割があることを認識しており、地上産業の参加を促す戦略を採用している。宇宙セクター以外の企業が宇宙関連機関(官民間問わず)と共同で打ち上げを行うような可能性は、短期的には低いが、公的宇宙機関や民間の宇宙企業との連携を通じて、宇宙技術開発のオブザーバーになったり支援したりしたいという関心を示す非宇宙企業は多い。そうした企業は、共同出資、ミッション支援、技術の共同開発などを通じた貢献を望んでいる。地上産業が宇宙探索活動を拡大するかどうかは、政府の活動と政策によるところが極めて大きい。宇宙市場が拡大すれば、非宇宙企業が宇宙輸送市場の直接顧客になる可能性もある。非宇宙産業の中で宇宙探索に興味を示してい

る主な業種のうち、自動車、石油・ガス採掘、建設、エネルギー産業が今後20年間(2020~2040年)に宇宙探索市場に及ぼす影響は、約40億~50億米ドルに上ると見られる。これらの業種による宇宙探索市場への関与の例には、次のようなものがある。



自動車業界



▶ 2015年にNASAとGMが共同で、高速で高機能な先進技術ロボットRobonaut 2の開発に取り組んだ。



▶ 2016年、PTSはAudiと提携し、月面探査車の3Dプリンターによる製造と打ち上げを支援した。



▶ 2019年、JAXAとトヨタは、国際宇宙探査における協業を発表した。

自動車メーカー各社は、宇宙企業と連携して精力的に活動している。米国のGM、日本のトヨタ、EUのAudiはその代表例である。自動車市場が提供する専門的知見は、月面探査車の開発の他、車両の自動化、電力供給の効率化、過酷な環境で働く車両の耐久性向上などに必要な技術の開発に役立つ。自動車セクターの投資によって、宇宙セクターと自動車セクターの間で想定されるスピニング(技術などをいったん社

外に出し、成熟させて社内に戻すこと)の活用が期待される。トヨタとJAXAが共同で月探査を目指し、2029年にはさっそく有人飛行の実現を視野に入れていることから分かるように、自動車業界は具体的ななかたちで月面経済に関与しようとしている。



鉱業



▶ Caterpillarは、地上や宇宙の危険な環境下での作業の危険性を最小化するため、遠隔操作システムに関するいくつかの調査研究を実施している。

Rio Tinto

▶ Rio Tintoは、宇宙資源の採掘における同社の採掘技術と削岩機の活用について、ASAと共同で評価を行っている。



▶ Woodside EnergyとASAは、宇宙セクターと石油・ガスセクターの間の技術移転に関する合意を締結した。対象となる主な技術分野は、ロボティクス、先進センサー、AIなど。

石油・ガスおよび鉱業セクターは、資源の採取・利用分野でのシナジーが見込めることから、月や火星などの天体をもたらず機会の実現に向けて大きな役割を果たすと期待されている。石油・ガス企業や採掘企業の関与は、地上の掘削や採掘の技術を宇宙で応用し、宇宙資源活用のバリューチェーンの一部を構成するというかたちになるだろう。その実例がCaterpillar、Rio Tinto、Woodsideなどの企業で、いずれも自社の技

術設計を宇宙資源活用セクターに合わせて改良し、投入している。宇宙資源の活用が具体化し始め、技術が成熟するに従い、宇宙で使う採掘機材の技術も進歩し、鉱業セクターの地上での活動にも好影響が及ぶと考えられる。例えば、既存のロボットでの対応が限られていた、これまでの過酷な環境における、これら技術の能力向上などが期待できるだろう。



建設業界

Foster + Partners

▶ Foster + Partnersは、ESAが立ち上げたコンソーシアムに参加し、月面にある資源と3Dプリンターを使って月面住宅の建設に取り組んでいる。同じく地上産業の企業であるMonoliteも、自社のD-Shapeプリンターを提供してこのコンソーシアムに協力している。

建設業界には、月面住居や宇宙構造物の建設を可能にする最新技法の開発を支えると同時に、3Dプリントの能力を進歩させて地上産業の発

展も促進させることが期待されている。ここでも、建設業界と宇宙産業は、足並みをそろえて成長すると考えられる。



エネルギー業界

SKYRE

▶ SkyreはMeta Vista USAと連携し、月の極地に存在する永久氷から推進剤を作るシステムの開発に取り組んでいる。その具体的なプロセスは、水素と酸素を分離し、それらを極低温状態で保存し、水素を冷媒を使って酸素を液化するというものである。



▶ OxEon Energyはコロラド鉱山大学と共同で、月面で氷を電気分解して水素と酸素に分離する技術の完成に向けて取り組んでいる。分離した水素と酸素の分子を冷却すれば、月・地球間輸送のための燃料の製造が可能になる。



ロボティクス業界

GITAI

▶ JAXAは2018年にANAホールディングスとともに「アバターエクスプログラム」を開始し、その当初からロボティクスのスタートアップ企業と連携している。スタートアップ各社は、宇宙飛行士の代わりに月面での建設やメンテナンス作業を担うことができる先進的な人型ロボットの開発に取り組んでいる。

エネルギー業界とロボティクス業界も、月探査活動の開発や投資に重要な役割を担うことになるだろう。エネルギー業界には、宇宙での活動に必要な、クリーンで効率の高いエネルギー技術の開発を推進することが期待され、ロボティクス業界には、自動化技術の開発や宇宙空間で作業が

できるロボットの開発に参加することが期待されている。両業界とも、牽引役となるのは米国だが、ロボティクス業界では日本も重要な役割を果たすと思われる。



2.1.3 地域別動向の概要



米国では、2017年に署名された宇宙政策大統領令第1号（Space Policy Directive-1：SPD-1）により、2024年までに米国人宇宙飛行士男女2名（女性宇宙飛行士では初）を月の南極に着陸させ、2028年までに月面および月周辺での長期滞在を実現することがNASAに命じられた。しかしNASAは、「アルテミス計画」の予算内訳、コスト構造、開発のアーキテクチャをまだ議会に提出していない。NASAのジム・ブライデンスタイン前長官は、アルテミス計画のコスト試算が2024年までで200億～300億米ドルになるとし、NASAが現在持っているアルテミス計画の予算に40億～60億米ドル上積みすることを求めた。加えて、予算超過も懸念点になりつつある。NASAが2011年から2019年の間にスペース・ローンチ・システム（SLS）の開発に投入した予算は約120億米ドルと試算されており、計画開発予算のベースラインを24.6%超過している。さらに、SLSは2017年までに運用を開始する予定だったが、実際には2021年まで遅れている。



日本は2007年に探査ロードマップを策定して2007年から2030年の間に達成すべき高い目標と予定を設定した。しかし、残念ながらミッション計画の多くが遅延もしくは中止され、最終的にロードマップは弱体化してしまった。加えて、JAXAの予算もここ数年はほぼ横ばいで、2020年の予算はコロナ禍前の2019年からわずかに2.2%増の17億3,000万米ドルである。だがその一方で、民間の宇宙セクターの発展には力を入れており、前述したように、日本政府は9億4,000万米ドルのベンチャーキャピタルファンドを立ち上げて、宇宙系スタートアップを支援している。それ以前にも、日本のスタートアップ企業であるispaceが、政府支援を受けた日本の大企業数社から9,000万米ドルの出資を受けたと発表し、同年にアストロスケールも2,500万米ドルの資金調達を発表している。



欧州では、ESAが2003～2006年のスマート1以降、長期にわたって月ミッションへの関心を示し続けている。しかし、その後の計画では、自前のミッションはヘラクレス、SSTLおよびGESとの連携によるルナ・パスファインダーなどわずかであり、ESAの月探査活動は、ルナ25、ルナ27、オリオンのヨーロッパ・サービス・モジュール（FM1、2、3は確定。FM4は要確認）、ゲートウェイ関連のモジュール（ESPRITモジュール、I-HAB）など、他機関の計画に参加するものが大半である。中にはまだ発表されていないミッションもあるが、「Science at the Moon」や「Strategy for SRU」といった報告書には記載されている。資金については、2019年の閣僚級理事会で2022年までの月探査ミッションの予算を確保した。また、「欧州探査包括計画（E3P）」（2016～2021年の予算は16億5,000万ユーロ／18億8,000万米ドル）とESAの2030年戦略でも、2030年までの予算を確保した。制度的予算以外に目を向けると、欧州では民間の資金が米国に比べて弱く（例えば、ベンチャーキャピタ

ルによる宇宙への投資は限定的である）、EU加盟国は民間資金の活性化推進に向けて取り組んでいる。一例として、ルクセンブルクは民間企業の資金調達の強化を目的に、2018年に宇宙特化型ファンド（1億1,000万米ドル）を設立することで欧州投資銀行と合意した。現在、プロジェクトを開発中の民間企業（PT Scientistsなど）は非常に少なく、将来の取り組みを成功させるには公共投資が必要だろう。



中国では前述した月探査計画に加え、さらに大型の貨物宇宙船や有人宇宙船の打ち上げを目指してさまざまな打ち上げ装置の開発が幅広く行われている。先日、中国が独自に進めている宇宙ステーション天宮に向けて、長征5号Bからモジュールが打ち上げられた。いずれ有人宇宙船も運ぶことになるだろう。また、50トンのペイロードを月軌道に運ぶ能力があるとされる超重量物運搬ロケット長征9号は、2030年までに試験が実施される計画である。資金面については、2018年の中国の宇宙予算は58億米ドルと推定され、5年間の年複利成長率は9.4%である。民間セクターも、運営側、投資側ともに、徐々に成長している。中国のベンチャーキャピタル（Tencent Holdingsなど）は、自国の月輸送市場だけでなく、Moon ExpressやPlanetary Resourcesなど、米国の商業宇宙探査企業にも投資している。



ロシアは当初、2030年までに宇宙飛行士を月に送ることを計画していたが、その実現に必要なロケットであるエニセイは、予算確保上の問題がある可能性が極めて高く、まだ設計段階である。エニセイの開発には、ロシアの過去10年分の宇宙予算総額に相当する金額以上の資金が必要である。技術開発面では、アンガラ5Pを開発中だが、ソユーズロケットの再度の打ち上げで先行きが不透明な状況である。資金面では、ロシアの不安定な経済状況が影響し、宇宙に関する全ての目標が達成できないままになっている。その結果として、「連邦宇宙計画」の予算縮小を招き、2014年以降3分の2が削減されて、2016～2025年の予算は210億米ドルにまで減少している。



2.2 今後の展開と月輸送市場

2.2.1 市場の推進要因と課題

2.2.1.1 市場の推進要因

月探査に対する地政学的関心の再燃

かつて月の探査は、わずかな科学的探究活動に限定されていた。そうした時期が約40年間続いたが、10年ほど前から、世界各地の宇宙当局が共通して月探査に新たな関心を示すようになった。関心の高さは、「アルテミス計画」、月周回有人拠点ゲートウェイと宇宙飛行士による月面着陸、月面都市構想などの野心的な目標にも顕著に表れている。これらは全て、各国の宇宙開発への熱意と多額の制度的予算拠出が密接に連携した例である。世界的に見て、短期的には米国の探査計画が主要な資金源となるが、中長期的には、米国以外の比重が徐々に増加することが期待される。

月軌道よりも増加傾向にある月面へのミッション

各国の月探査ロードマップは、月軌道にペイロードを送ることからスタートする。これは技術的には最も簡単なミッションだ。これに成功すると、着陸船や探査車を使った、より複雑なミッションに移行して技術力を実証し、月面での大規模な作業に乗り出す。こうした進展に沿って月探査ミッションの性格も進化し、将来はより重量の大きいペイロード輸送も行われるようになるだろう。

やがて月探査が最終的な成熟段階に入れば、月面活動やそのための機器の規模も大きくなり、それに伴って、重いペイロードを地球から定期的な運搬する物流の仕組みが必要になると考えられる。

非宇宙産業も含めた民間セクターの参加に対する支援

現状、探索活動に参加しているのは大部分が公共セクターだが、この偏りはいずれ是正され、宇宙企業かどうにかかわらず民間企業の関与が徐々に増えるだろう。宇宙当局や公共セクターには、民間企業の参入を促すような政策や施策、計画を策定することが期待される。すでに、NASAが月着陸船や有人ビークルを商業調達し、また、ESAは月資源利用の実証のためのミッションに必要なサービスを商業調達するなど、宇宙企業と宇宙機関の協力は進んでいる。これからの10年は、非宇宙企業もビジネスチャンスやシナジーの機会を見つけて参加するよう、奨励することが望ましい。それによって、官民連携プロジェクトのリスクを民間企業がこれまでより多く引き受けることが期待される。中でも、強靱な財務力を持ち、技術をスピノフして転用できる（そして、将来はスピノインして自社に再活用する）分野がすでに明確となっている非宇宙企業には、数多くのチャンスが存在する。特に期待される分野は、宇宙資源活用関連、基地や住居の開発、自動掘削や探査車などの先進技術である。

2.2.1.2 市場の課題

予算の不確実性による遅延と中止の可能性

宇宙探索活動に関わる主な課題の1つが、制度的予算を長期にわたって持続的に確保することである。宇宙事業の需要と資金は、依然としてその大部分を公共セクターが担っている。今般のコロナ危機による国家緊急時対応計画(NCP)の中で、宇宙関連予算が見直されるリスクが高まっている。直近の活動については、コストの大部分が支出済みであるため影響を受ける可能性は低い。長期計画については、新たに生じた予算の制限が影響する可能性が高い。その影響は計画によって異なり、今後予定されているジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)、木星氷衛星探査計画(JUICE)、スペースローンチ・システム(SLS)などのミッションは影響を受けそうだが、その他の計画(月周回有人拠点ゲートウェイ、Space Xの商業宇宙旅行、中国の着陸船など)は名目どおりに進んでいる。

技術実証が初期段階であることによる不確実性

現在、地上産業による短・中期的な関与はまだ限定的で、現地での大規模展開に関する実証など、事前段階に必要な宇宙技術の実証が終わっていない状況である。鉱業、自動車、ロボティクスといった産業は、月資源利用のシナジーや技術のスピノフの可能性が見込まれ、宇宙当局が追求する宇宙技術開発のロードマップに組み込まれることは確実だと考えられる。月資源利用については数年以内に何らかの実証結果が示されるだろうが、地上産業の関与は引き続き、機会があれば協力する、といった控えめなものになりそうだ。

2.2.2 市場予測

2.2.2.1 市場予測のアプローチ

月輸送市場の規模について、さまざまな月ミッションを特定し、2040年までの各地域の状況を予測した。すでに判明している今後3~5年以内のミッションと、まだ発表されていないが将来想定されるミッションを組み合わせて考慮した。これら将来のミッションについては、ペイロー

月軌道のペイロードの市場規模が、質量の重さに対してそれほど大きくないこと

月市場の成熟がどの段階にあっても、引き続き月軌道のペイロードは必要で、通信中継(月周回有人拠点の運用開始後は、中継作業の一部を移行)や月面監視(月面の実験や車両支援のため)などの活動におけるニーズは残る。同時に、月探索への新規参入は、実証のために用途の限られた小規模なペイロードを試し、月面や月軌道で国際宇宙ステーションのような実験を行い、少量のペイロードに対応することから始まるのが一般的になるだろう。その結果、そうした小規模なペイロードの循環的な需要が生まれると考えられる。しかし、月軌道のペイロードに対するキログラム当たりのコストは、着陸船や探査車に比べると1桁小さいため、最終的な市場規模に及ぼす影響はわずかである。

ド質量による分類やペイロード輸送の種類(軌道船、着陸船、探査車)など、具体的な顧客プロフィールと関連づけている。各ミッションの売上高はそれぞれの質量とキログラム当たりの価格から算出し、各ミッションの売上高を合計して全体的な市場規模を推計した。

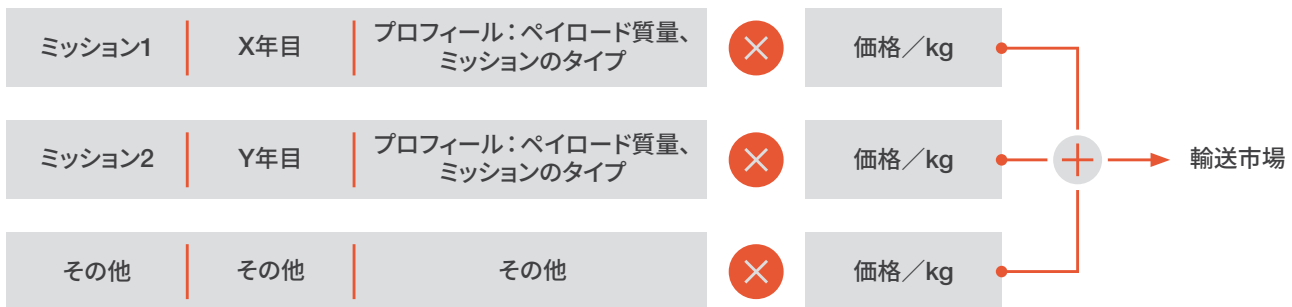


図2：月輸送市場数値化のアプローチ

この方法で、2020年から2040年までに想定されるミッションの数をもとに、市場規模を予測した。予測に際しては、すでに論じた現状および市場の推進要因と課題に加え、4項目(計画・活動、技術、経済・資金、政治・協力)を軸とした分析を、地域ごとに検討した。この4項目は、取り組みの加速、減速、さらには中止を決定づける主要な項目である。これらの変数の5~20年後の状況を取り巻く不確実性に対応するた

め、シナリオベースのアプローチ(保守的、基本、楽観)を採用し、基本シナリオを中心とする市場の現実的な姿を包括的に示した。



2.2.2.2 月輸送市場の予測結果

基本シナリオでは、2020～2040年の世界の月輸送市場のペイロード質量(累計)は、187トンに達すると見られる(保守的シナリオでは128トン、楽観シナリオでは230トン)。ここから算出された輸送市場全体の規模は790億米ドル(保守的シナリオでは550億米ドル、楽観シナリオでは1,020

億米ドル)、年複利成長率は10%(基本シナリオ)だった。市場規模は推計対象期間を通じておおむね一定のペースで拡大し、2020～2025年は90億米ドル、2026～2030年は190億米ドル、2031～2035年は320億米ドル、2036～2040年は420億米ドルとなった(楽観シナリオ)。

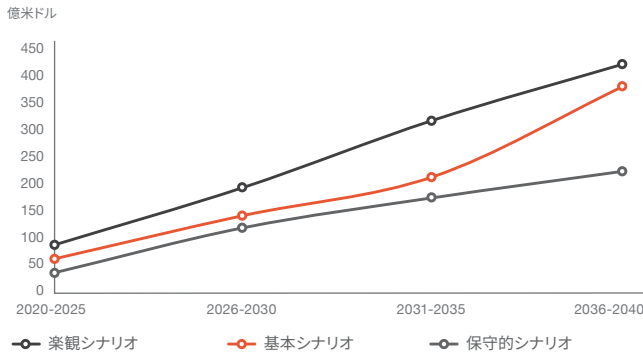


図3: 世界全体の月輸送市場規模 (シナリオ別)

市場価値の累計

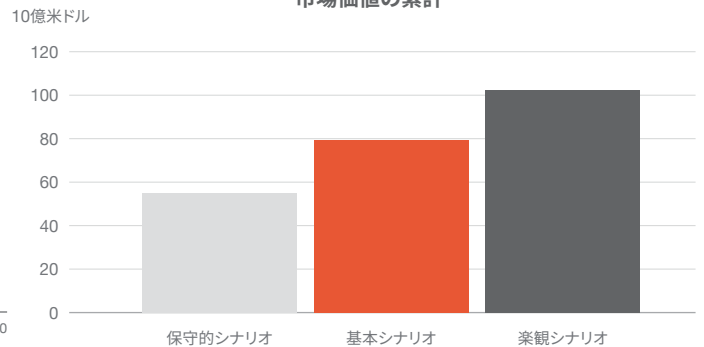


図4: 2020～2040年の月輸送市場価値の累計

地域別に見ると、月輸送市場の将来の発展を牽引するのは主に米国と見られる。米国は、市場全体の半分から3分の2を占めている。その大きな原動力となっているのが「アルテミス計画」で、米国は月での長期滞在実現に向けた取り組みをリードしている。次いで、中国と日本がそれぞれ需要全体の約12%、EUが約5%を占める。注目点として、中国は近年、宇宙計画の中で高い目標を掲げているにもかかわらず、関連市場が米国よりも大幅に小さく、むしろ日本に非常に近いものになっていることは興味深い。これらの数値を解釈するにあたっては、いくつかの点に留意する必要がある。第一に、今回の評価は現時点で明らかになっているミッションやロードマップに基づいており、今後予測されるミッションを追加する前の数値だという点である。10年後、20年後のミッションに関する情報を中国の宇宙計画から読み取ることは難しく、そのため保守的なアプローチを採用し、入手可能な情報のみをもとに推計を行った。第二に、中国は世界の中で比較的独立して月探索を進めているという点である(アルテミス計画にも参加していない)。地球低軌道宇宙ステーション天宮の建設も自国で進めており、その結果、月

輸送市場全体における中国の関与と比重が相対的に小さくなっている。これとは対照的に、日本は野心的な月探査の枠組みを設定し、着陸船や探査車に関わるさまざまな企業が宇宙当局に協力し、さらには非宇宙企業なども参加して、大きな市場シェアの獲得を可能にしている。ミッションの種類別に見ると、基本シナリオでは着陸船市場が全期間を通して圧倒的に優勢で、市場規模は合計で470億米ドルと予測された。それに次ぐのが探査車市場で、売上高の合計は300億米ドル規模である。一方、月軌道ペイロード市場の規模は小さく、合計で20億米ドル不足だった。

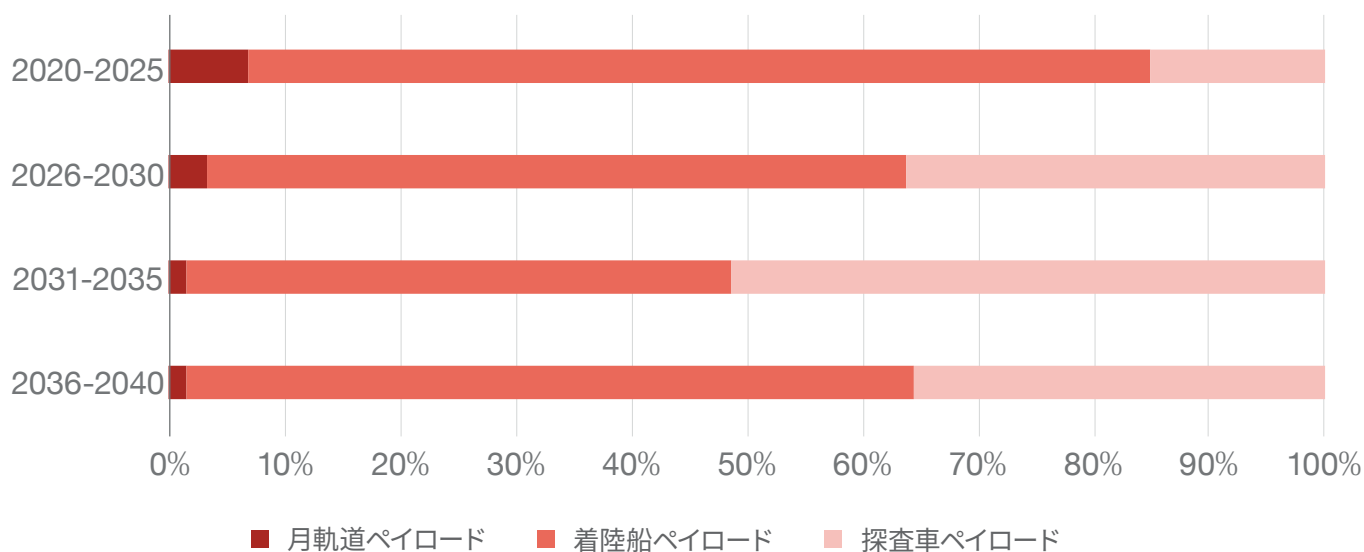


図5：ペイロードの種類別に見た輸送市場価値の分布

月軌道ペイロードの予測は、市場シェアは低いものの、質量の総計は探査車のペイロード質量をわずかながら上回る点に注目すべきである。実際に、探査車のペイロードは大きさ、質量ともに小さくなる傾向がある。探査車の輸送能力が限られているため、最近のピークルでは探査車自体の質量も含めて制限されている。しかし市場価値という点では、探査車ペイロードの打ち上げコストは、月軌道ペイロードの打ち上げよりもはるかに高額であるため、ミッションごとの最終的な売上高は桁違いに大きくなる。

短期的には、月探索活動の中心的役割を担うのは月軌道ペイロード(最も低価格で、技術的にも容易なペイロード)になりそうだが、いずれ宇宙当局も民間企業も、技術実証や月面での運用拡大に向けて、着陸船や探査車を使用した複雑なミッションへの依存度を高めていくと考えられる。

前述した市場の推進要因を踏まえて民間セクターの役割拡大を考えると、民間が市場に占めるシェアは時間とともに拡大していくことが期待される。今後10年間は、月ミッションの大半は人類の長期滞在に向けた科学的活動や実験となるため、市場の大部分をリードするのは依然として公的機関になりそうだ。しかし、宇宙企業は月面での長期ミッションへの貢献度を高めている(有人ミッションへの支援サービス、自動システムの実証、月資源利用サービスの提供など)ため、顧客としての民間企業の役割は年々拡大すると思われる。加えて、民間セクターの成長は、非宇宙企業の関与によってさらに加速するだろう。非宇宙企業は宇宙への関心を高め、自社技術を宇宙に転用したり宇宙技術を自社で活用したりする機会が増大していることに注目すると考えられ、実際の宇宙ミッションへの投資に乗り出すようになるだろう。

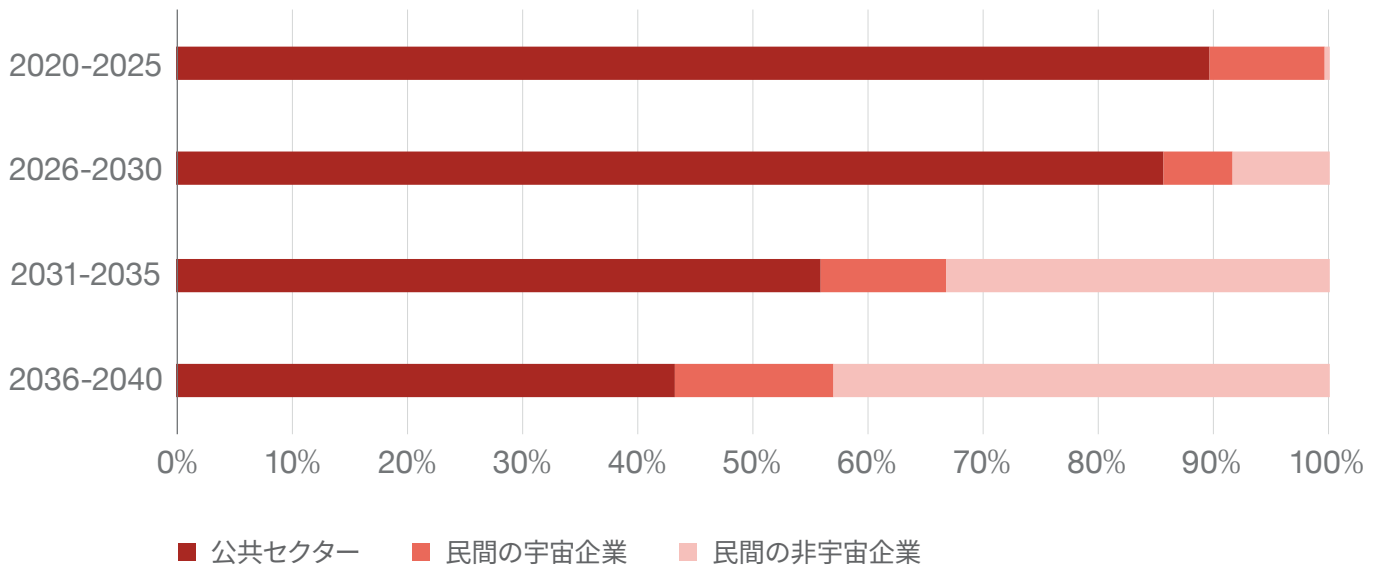


図6：顧客のプロフィール別に見た輸送市場価値の分布

その結果、月輸送市場への民間セクターの貢献は、最初の10年間（2020～2030年）の10%強から、続く2031～2040年には50%以上にまで拡大する。民間セクターの中でも、非宇宙産業系企業が2030年以降の情勢を激変させることになりそうだ。非宇宙産業系企業は民間需要全体の約4分の3を占めるまでに急成長し、純粋な宇宙企業と立場が逆転すると思われる。こうした需要の急成長を牽引する業界は、鉱業（厳しい環境下での採掘・処理能力のシナジー活用）、自動車（探査車の開発、エネルギー自律も含めた自動運転車の開発でのシナジー活用）、エネルギー（月面での持続可能な動力源ニーズの高まりに対応）、建設などになりそうだ。各社はそれぞれの専門能力を活用して、月面で長期的に利用できるインフラや施設の開発を支えることになる。

補足事項および分析上の注意点

今回の月輸送市場規模の推計は、前述したように、いくつかの仮定に基づいている（図2参照）。分析対象とした20年間に輸送環境が実際にどのように進展するかについては、当然ながら不確実な点が存在する。特に、本モデルの予測は、以下の変動要素に強く影響を受けることが予想される。

■ 2030年以降に想定されるミッションの数：米国と中国は世界の月探査活動の情勢を急速に変える可能性があり、これが打ち上げの数にも大きく影響すると考えられる。日本でも、民間企業が強い動きを見せているが、月探査市場は発生間もない市場であるため、今後20年間の動向は、これからの短期的な成果次第で、現時点での予測と大きく異なる可能性がある。

■ ミッションごとの平均質量：今回の手法では、ペイロードを1キログラムから1トン超まで、4段階の重量に分類した。重量の大きいペイロードは、数としては軽量のペイロードよりかなり少ないと予測されるものの、合計質量の大部分を占めているため、市場価値全体に大きな影響を及ぼす。

■ キログラム当たりの価格：価格曲線の動向には、地上からの打ち上げの平均コストに始まり、さまざまな変数が影響する。現在、重量物打ち上げ装置のコストが低下しており、近い将来は超重量物打ち上げ装置のコストも下がると思われるが、そうしたことも影響を及ぼすだろう。技術や市場の成熟度も将来のミッションの価格を左右するため、本稿で示した市場規模の大きさにも影響が出る可能性がある。

そのため、本稿の市場予測は、入手可能な情報および各国の宇宙当局や民間企業が現在示している月探査ロードマップに基づいたものである点を考慮することが大切である。人類の月面到達という現在の目標への取り組みがまだ初期段階であることを考慮すれば、数年後には今後の道筋が明らかになり、関連市場が調整されると思われる。

2.2.3 ロードマップのギャップ分析

2.2.3.1 ロードマップのギャップ分析の原則

国際宇宙探査協働グループ (ISECG) が公表した国際探査ロードマップなど、宇宙当局が現在示しているロードマップと並行して、民間企業からも、すでに中期的な月滞在の民間版ビジョンが公表されている。これまでの数年間にいくつかの民間企業が構想を発表し、2040年から2045年の間に毎年1,000人が宇宙に居住、または月を訪問するようになる、と

予測している。民間の構想には、宇宙当局が公表しているロードマップとは桁が異なるほどの差があるが、そのギャップの特徴を明らかにするために、ギャップの大きさを理論的に試算した。それによって、本稿の市場予測と、2040年には1,000人の宇宙飛行士が月に行くという民間の楽観シナリオのギャップを分析し、何を要因としてこうしたシナリオが検討され、その結果となる輸送市場の規模が示されたのかを明らかにした。

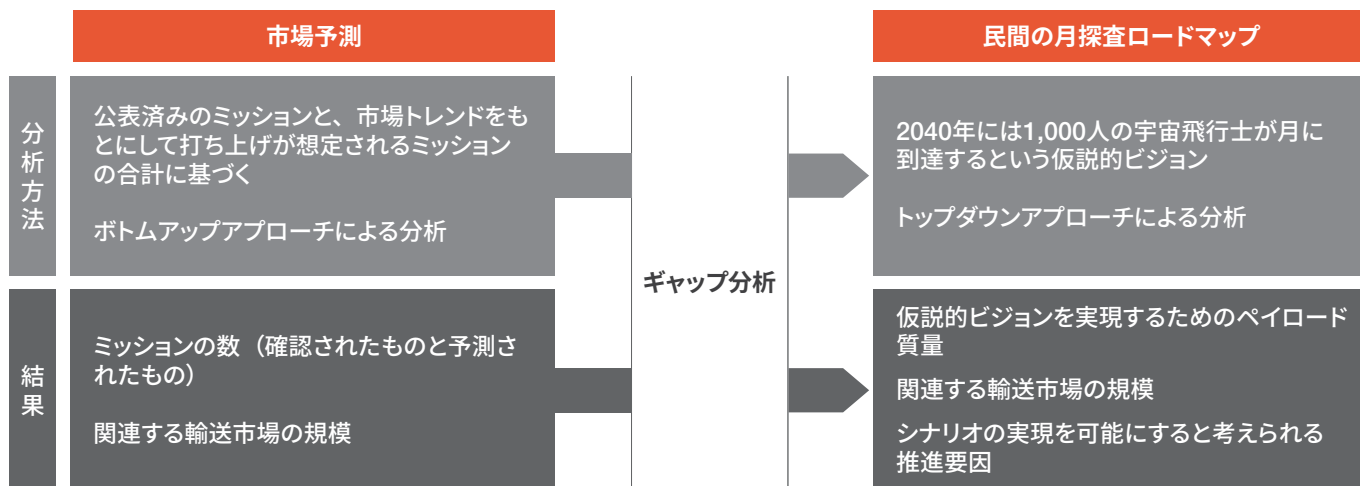


図7：市場予測と仮説的な月探査ロードマップのギャップ分析

ギャップの大きさを詳細に検討する前に、前述の市場予測を上回る野心的なシナリオの検討につながったと思われる推進要因を、いくつか特定した。

月面到達1,000人という民間版ロードマップの拡大を後押ししたと思われる推進要因

- ロボットを用いた初期（2020～2024年）のミッションが成功すれば、月の資源を探索し、活用したいという政治的・社会的機運が世界中で高まるだろう。その結果、月輸送サービスの需要が拡大する。
- 米国、中国、ロシアなど宇宙大国の関与の割合が高ければ、そのことが需要（ロボットや人間の滞在）の創出に重要な役割を果たし、仮説的ビジョンの実現を推進するだろう。
- UAE、オーストラリアなどの宇宙新興国もまた、従来から宇宙開発を行ってきた国と協力して月基地の需要を加速させると見られる。その結果、宇宙資源の活用と月輸送の両分野で、サービスの需要が高まるだろう。
- オーストラリア、欧州、南米の鉱業各社は、月での採掘に関する調査を開始している。また、日本の自動車業界は、月面探査車の開発にすでに参加している。これら地上産業の非宇宙セクターが、宇宙資源の活用と月輸送の両分野で需要を創出するだろう。



2.2.3.2 民間版2040年ビジョン実現を可能にするための前提

2040年までに宇宙飛行士1,000人を月面に送るという目標設定は、以下の仮定が前提となっている。

- 人類の月面滞在は、2030年の40人を皮切りに、2035年までに200人、2040年までに1,000人と、指数関数的に増加する。
- 宇宙飛行士を月面に送る能力があり、極めてコスト効率の高いロケットの運用が、2030年までに実現する。

- 月面に滞在する人の数が急激に増加するため、当初数年間は、生活を維持するための資源、設備、必需品の大部分を地球から送ると予想される。

- 月の現地資源の活用が、月面滞在の発展を左右すると考えられるため、地球から送る資源や設備の質量の割合は次第に低下する。

下図は、2020～2040年に月に滞在する宇宙飛行士の数を予測したものである。

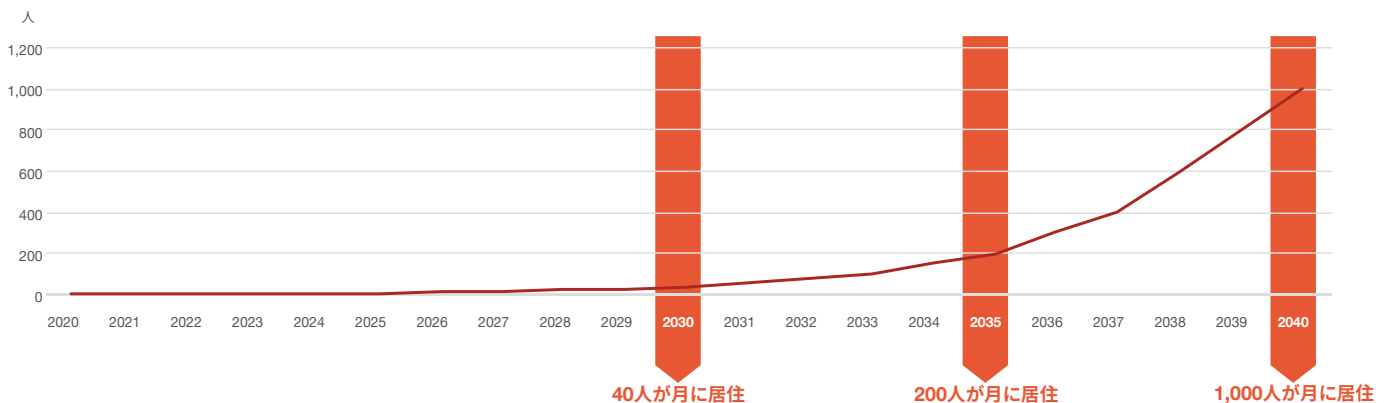


図8：2020～2040年に想定される宇宙飛行士の数

このような大規模な滞在を維持するためには、次のようなセクターで、数々の支援活動とミッションの開発が必要になるだろう。



図9：人類の長期滞在を維持するために、月で実施される活動

- **建設**：農業、エネルギー生産、実験、（月面での）輸送、医療などを支えるインフラや施設の建設ニーズ全体に対応するとともに、他のセグメントを支援する。
- **鉱業**：上述の全セグメントを支える主要な資源の採取全般を行う。中でも、水資源の採取は最も重要である。
- **農業**：月面での農業は、食糧を生産し、生命を維持する鍵になる。月面では地球の生態系を再現するシリンダーと温室を使った作物の栽培が可能である。
- **生命維持**：人間が月面で生存するために必要な全ての要素を含む。生活のための住居、飲料水、呼吸のための窒素と酸素、食糧など。
- **輸送**：月面上を車両で移動可能にする活動全般。
- **医療**：宇宙飛行士の健康を確保する月面での医療は、医療サービス（薬剤の処方、診療所、健康診断など）とトレーニングセンター（トレッドミルなど）の2点から考えることができる。
- **実験**：月面に滞在する人々は、自身の時間の3分の1を実験に費やすと見られている。そのため実験室が必要で、初期には地球から輸送する必要があるが、いずれは月面で実験室を建設することが期待される。
- **エネルギー**：エネルギー生産を支える施設や設備を製造する。
- **ロボティクス**：人々が日々行う採掘、建設、実験、その他の活動を支援する。
- **通信**：月面および月軌道上の通信システムを使って通信を行い、月面上の全ての人とモノをつなぐ。

人間の長期滞在を可能にするために上記の用途に必要な物資は、大まかに見積もると、1年間に一人当たり約45トンである。また、建設、採掘、農業などの用途向けは、年一人当たり物資の68～70%を占めると見られる。

2.2.3.3 民間版ロードマップ評価の結果

民間版の月輸送ロードマップを評価した結果、市場規模は2020～2025年の330億米ドルから急激に増加して2026～2030年は1,350億米ドル、2031～2035年は3,820億米ドル、2036～2040年は7,510億米ドルとなり、総額は1兆2,500億米ドルとなった。

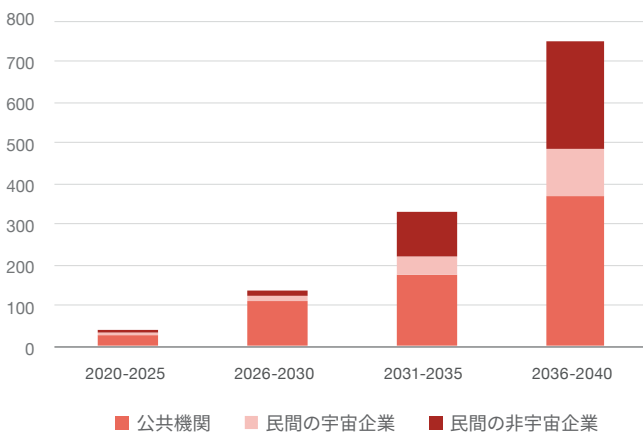
カテゴリA（ペイロード0～100キログラム）とカテゴリB（100～500キログラム）の需要が生み出す打ち上げ契約額は、2020～2030年の年間80億米ドルから2031～2040年には年間370億米ドルに増加する。すなわち、提示された仮説的ビジョンに必要な輸送サービスの2020年から2040年の累計額は4,410億米ドルとなる。加えて、カテゴリC（500～1,000キログラム）とカテゴリD（1,000キログラム超）では、2020～2030年に年間90億米ドルと見込まれる打ち上げ契約額が、2031～2040年には720億米ドルに増加し、2020～2040年の累計で8,110億米ドルとなる。

仮説的ビジョンの実現を前提とした場合、民間企業による打ち上げサービスの購入額は、2020～2040年の累計で5,690億米ドルになると

見込まれる。そのうち民間地上産業（非宇宙企業）の購入額が3,890億米ドル、民間宇宙企業の購入額が1,800億米ドルである。加えて、民間の非宇宙企業が打ち上げサービス購入額全体に占める割合は、2020～2025年の2%から2035～2040年には31%まで拡大すると見られる。とは言え、この仮説的シナリオを実現するには、公的機関が依然として大きな役割を果たさなければならない。今回の評価でも、宇宙飛行士1,000人という目標を達成するには、2020～2040年の打ち上げサービスの購入額のうち、平均68%が公共機関によるものになると予測されている。具体的な購入額の予測は、2020～2025年が290億米ドル、2026～2030年が1,090億米ドル、2031～2035年が1,760億米ドル、2036～2040年が3,680億米ドルである。

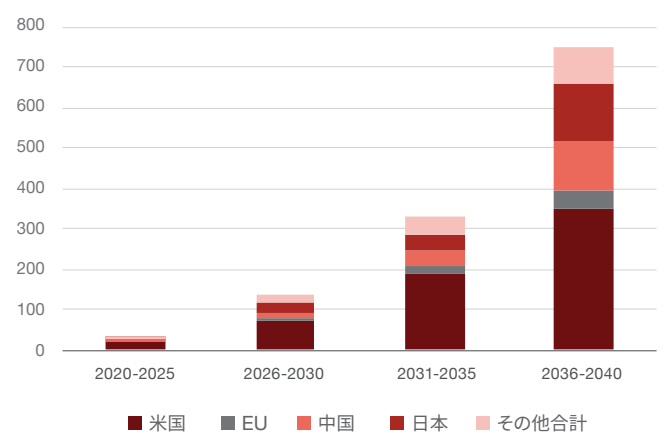
月輸送のロードマップ：組織の種類別

単位：10億米ドル



月輸送のロードマップ：地域別

単位：10億米ドル



月輸送のロードマップ：ペイロード質量別

単位：10億米ドル

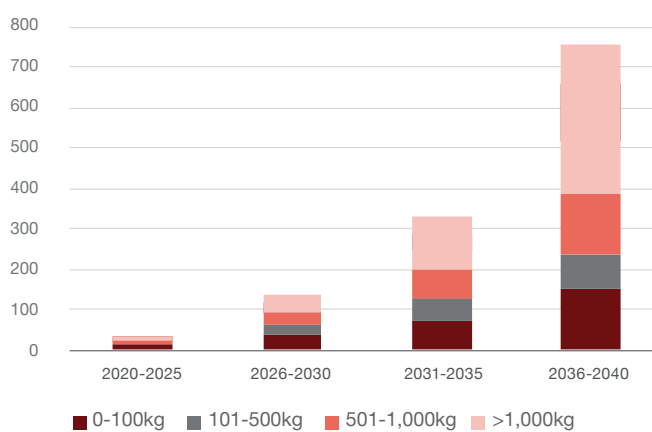


図10：ロードマップ維持に必要な理論上の輸送市場規模

地域別では、仮説的ビジョンの実現を牽引するのは米国になると見られ、2020～2040年に米国が購入する打ち上げ契約の総額は6,340億米ドルとなり、世界全体の51%になると予測される。次いで、アジア地域の中国と日本の購入額が世界の31%を占め、両国の合計で3,870億米ドルと予想される。EUおよびその他の地域（UAE、カナダ、ロシア、インドなど）は合計の購入額が2,310億米ドルとなり、世界全体に占める割合は18%である。これらの予測についても、前述した市場予測と同様の理由から、中国とその他の国（米国など）のシェアの比較や、日本のシェアの大きさについて、地域分布に同様の傾向が生じている点に注意が必

要である。ペイロード質量別では、重量物（1トン超）が全体の半分弱を占め、0～100キログラムの軽量物を含む1トン未満の割合が大きくなっている。これには、地上の輸送市場と同様に、小規模なペイロードの方がキログラム当たりの輸送価格が高額であることが関係している。



3 月データ

3.1 現状

3.1.1 月データ市場について

月へのアクセスによって、月環境に関する貴重なデータの収集が可能になる。月面温度、放射線レベル、地形や地質、月面ダストの水準、水分の有無、揮発性物質の濃度、レゴリスの地質学的構成など、データのかたちはさまざまだ。過去のミッションでもすでに、月の性質に関

するデータの一部は入手できているが、これまで以上に探査地域を広げ、空間分解能を精緻化し、分析を深め、測定の時間当たり頻度を高めることなどによって、入手できる情報の幅を広げることには、恒常的な価値がある。

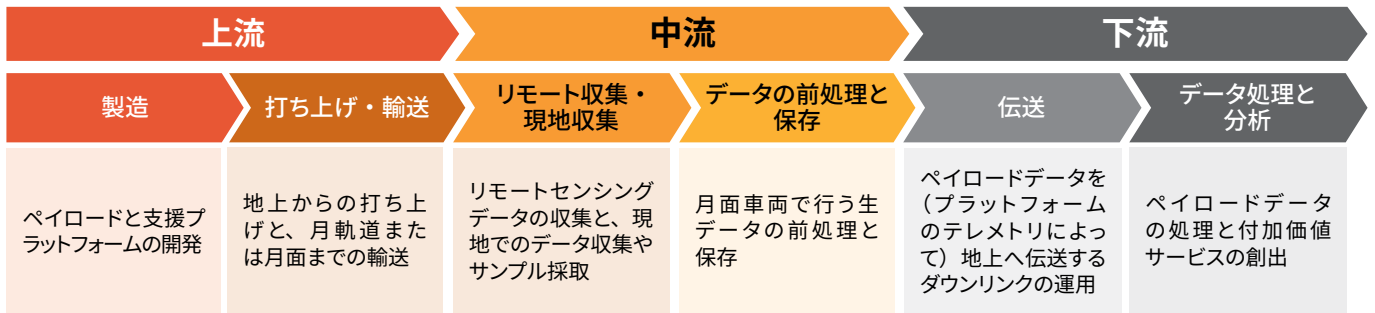


図11：月データのバリューチェーン

次セクション以降では、現在の月データの種類と、それらに関連する応用分野やそこでの購買傾向について詳しく解説する。今後20年間の月データ市場の動向を評価する前に、市場への理解を深めていただくのに役立つと思われる。

3.1.2 月データの特徴

月データの市場は、環境データ、テレメトリデータ、エンタテインメントデータの3カテゴリーに分類できる。各カテゴリーは応用分野も顧客基盤も異なっている。

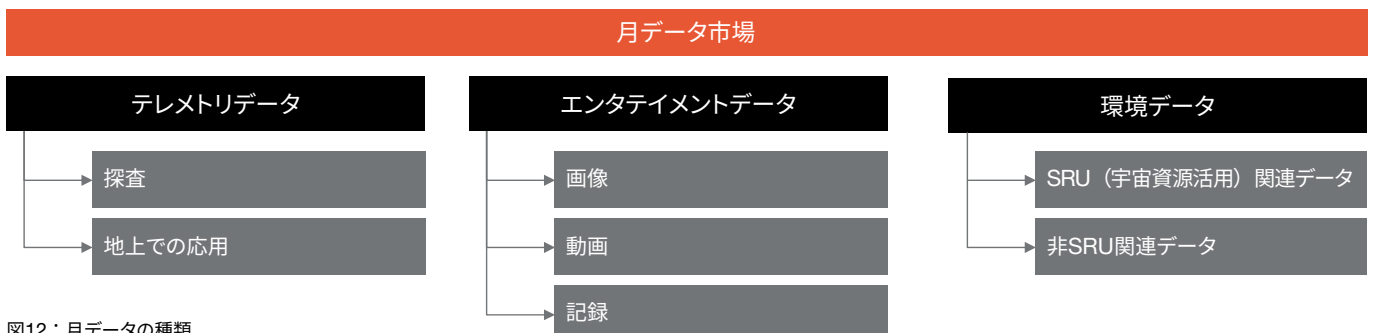


図12：月データの種類

3.1.2.1 月テレメトリデータの種類と使用事例

テレメトリデータは、月で使用する機器や車両から得られるデータで、機器やペイロードの性能、健全性などに関する情報である。探査データと地上で応用するデータ（スピノフデータとも呼ばれる）の2つのかたちがある。探査目的に使用できるデータの例としては、推進剤の圧力、スラスターの温度、着陸パッドの圧力／ひずみといった変数などをモニターしたデータがある。これと似たものに、探査目的の製品付加価値データがある。探査車のバッテリーの温度測定値、探査車の車輪の応力測定値の他、月の夜間の温度低下が着陸船に搭載された高感度部品や高感度システム、ペイロードにどのような影響を及ぼすかを示すデータなどがその例である。一方、月で使用するシステムから得られるデータで、地球上のシステム強化に活用できるものもあり、それらは地上データに分類される。例えば、自動化技術や月面の試掘から得られた教訓を地上での試掘に応用すれば、試掘の成果向上や効率改善が期待できる。

テレメトリデータの応用先としては、まず、公的機関（宇宙当局、政府機関、政府系研究機関など）で月探査技術の開発に使用することが考えられる。民間セクターでは、同じく月探査技術の開発に使用したり、非宇宙産業が地上での技術開発に活かしたりすることも考えられる。

3.1.2.2 月エンタテインメントデータと使用事例

エンタテインメント市場向けのデータは、大半が公共セクターのミッションで生成・発信され、非宇宙企業によってエンタテインメント目的に広く活用されているのが現状である。将来は、官民双方のミッションがこのデータを供給するようになり、動画、画像、それ以外の記録形式の3つのかたちで供給されるだろう。エンタテインメントデータの例としては、宇宙飛行士や機材（探査車、着陸船）の動画素材、画像、録音、月そのものを写した動画素材や画像などがある。

民間セクターでのエンタテインメントデータの使用事例は、映画、テレビ番組、ドキュメンタリー、ドキュメンタリー映画、テレビゲームなど、エンタテインメント業界が求める用途に対応したものになるだろう。

3.1.2.3 月環境データ

月環境データとは月面やその環境に関する画像や情報などのことで、現在は学術目的のペイロードによって収集されている。しかし、月市場が商業化されるに従い、官民双方のミッションから提供されるようになると予想される。月環境データはSRU（宇宙資源活用）関連データと非SRU関連データの2つに分類される。非SRU関連データには、（月面および月軌道の）温度・圧力・放射線、月面の地形や地勢、地質や地中構造、土質力学、月面ダストの性質、日光などを測定したものが含まれる。月面の小さなかけらを検出できるような解像度の高いリモートセンシングデータ（例えば100～200m/pixelより小さいものなど）のニーズの高まりを反映して、非SRU関連データのニーズが高まっている。加えて、地形（起伏）、形態・地質（地中、地表、斜面、高地）、温度、圧力、放射線（月面、軌道）、地質の組成などさまざまな測定値に関する地上検証のニーズも生まれている。また、資源（氷、酸素、揮発性物質、レゴリス）の発見や特性（大きさ、かたち、分布）の解明につながるデータ、危険の検知につながるデータへのニーズもある。

使用事例としては、公共機関と民間セクターの双方が、月探査ミッションの計画や地上検証の実施に活用することが考えられる。

上記で述べた3種類のデータ市場の中では、環境データが大きく成長すると見込まれ、需要の大きさはテレメトリデータ、エンタテインメントデータを抑えて環境データの割合が最も大きい。現時点では、科学技術やプログラムをさらに発展させていくために必要なデータと、入手可能なデータ間にミスマッチがあり、そのため重大な知識ギャップが生じている。

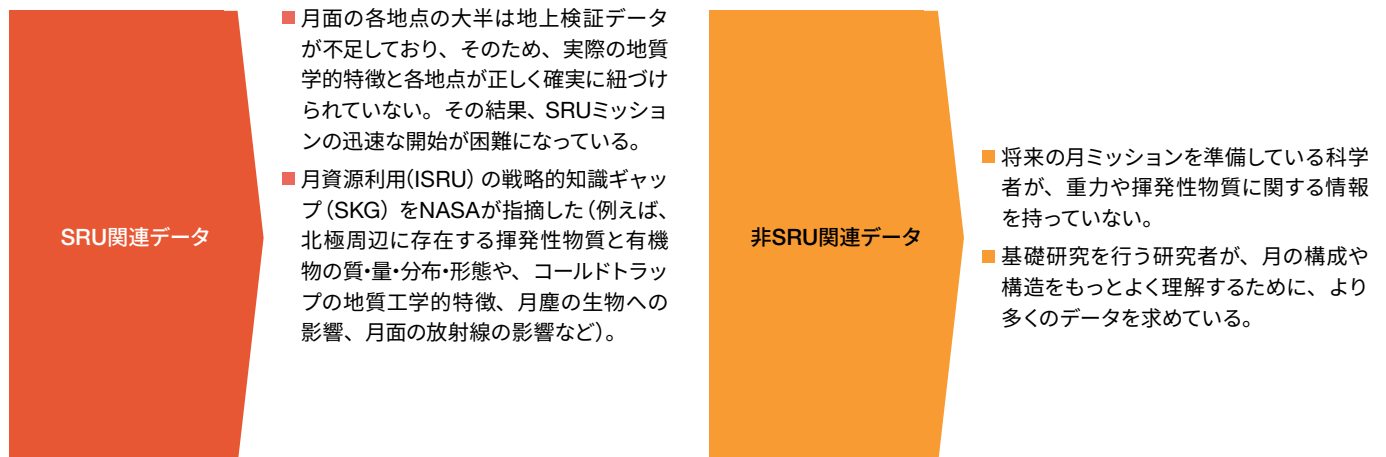
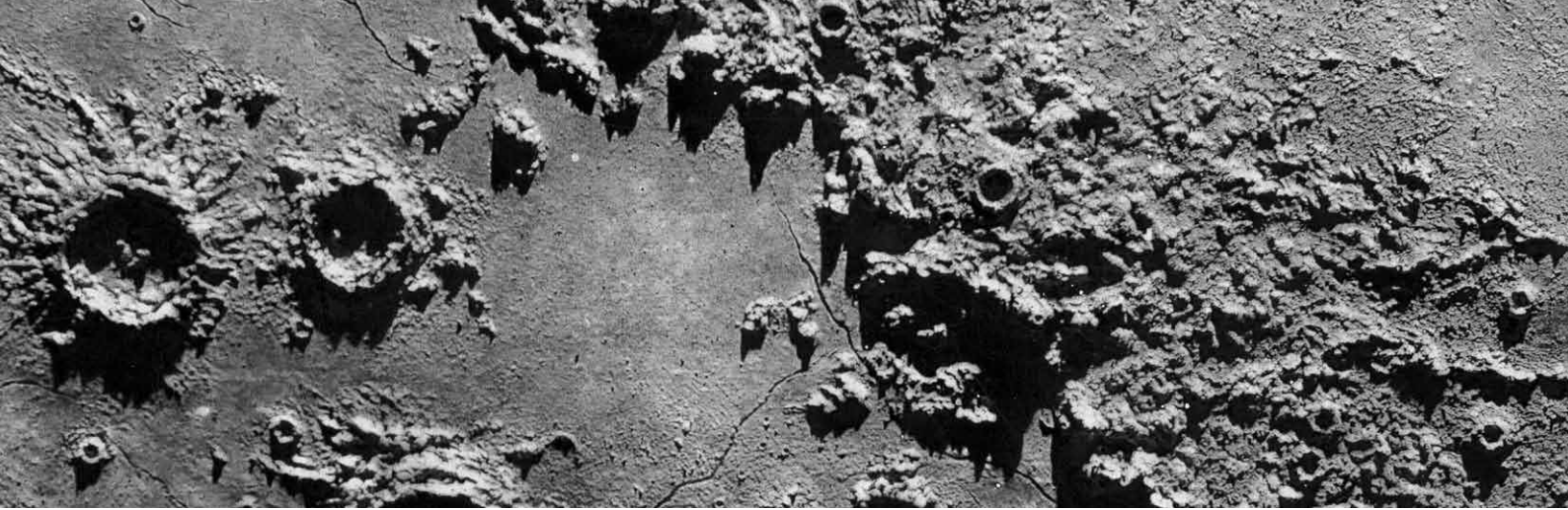


図13：月環境データに対するニーズとデータのギャップ



3.2 今後の展開と月データ市場

3.2.1 市場の推進要因と課題

3.2.1.1 テレメトリデータ市場

テレメトリデータ市場の主な推進要因

- 宇宙当局や民間の大企業が月での長期滞在に向けた開発に着手しているため、探査車をはじめ必要な資材の需要は大きく増加しており、テレメトリデータ市場の推進要因になっている。
- 自動車業界は、月面探査車の改善や新規開発に役立てるため、高付加価値テレメトリ製品（VATP）の需要を増加させると考えられる。

テレメトリデータ市場の主な課題

- バスシステムやサブシステムからのテレメトリデータは、競合他社による宇宙船（探査車、着陸船、軌道船）のリバースエンジニアリングを避けるため、通常は公開も販売もされていない。そのため、テレメトリデータ市場は知的財産権の保護という課題に直面すると思われる。
- 第三者サプライヤーの部品、コンポーネント、システム、サブシステムに関するテレメトリデータは、サプライヤーが公開を望まない限り他者と共有できない。そのため、これらのデータ供給を継続し、第三者サプライヤーのこれらデータの供給意思をより高めることが、今後の課題となる可能性がある。

3.2.1.2 エンタテインメントデータ市場

エンタテインメントデータ市場の主な推進要因

- VR（仮想現実）技術の登場で、ゲーミング産業がますます活況を呈している。VRによって高度なシミュレーションやグラフィックのゲームが可能になったことで、画像や動画など関連コンテンツの需要が喚起され、月データの需要増大につながっている。
- Amazon PrimeやNetflixといったOTT（オーバー・ザ・トップ）コンテンツの提供者も勢いを増している。多くの先進国では視聴者のテレビ人気を追い越して、OTTコンテンツが消費者エンタテインメントの主流になっている。エンタテインメントデータ市場では、OTT事業者の成長が著しく支出能力も高いこと、また、映画、テレビ番組、ドキュメンタリーでリアルなオリジナルコンテンツを提供するトレンドが続くことが、主な推進要因となるだろう。

エンタテインメントデータ市場の主な課題

- 使用事例について、ドキュメンタリーの場合は通常、探査ミッションのデータや素材に関する支払いは発生しない（オープンアクセスとして無料で提供される）点に注意が必要である。しかし今後、有人ミッションが増加すれば、素材を無料提供せずに販売するようになると予想される。

- 素材の価格は（同じジャンルであっても）用途によって大きく異なる。映画での使用は価格が高く、ドキュメンタリーやテレビゲームでの使用は価格が低くなるようである。
- 宇宙関連の映画では、一般に実際の映像は使われない。しかし、映像の品質が上がり、入手しやすくなれば、使われ始めると予想される。
- 実際の映像素材をテレビゲームのグラフィックに落とし込む技術はまだ新しく、素材の使用状況に関するデータがないため、映画とほぼ同様であると仮定した上で試算した。

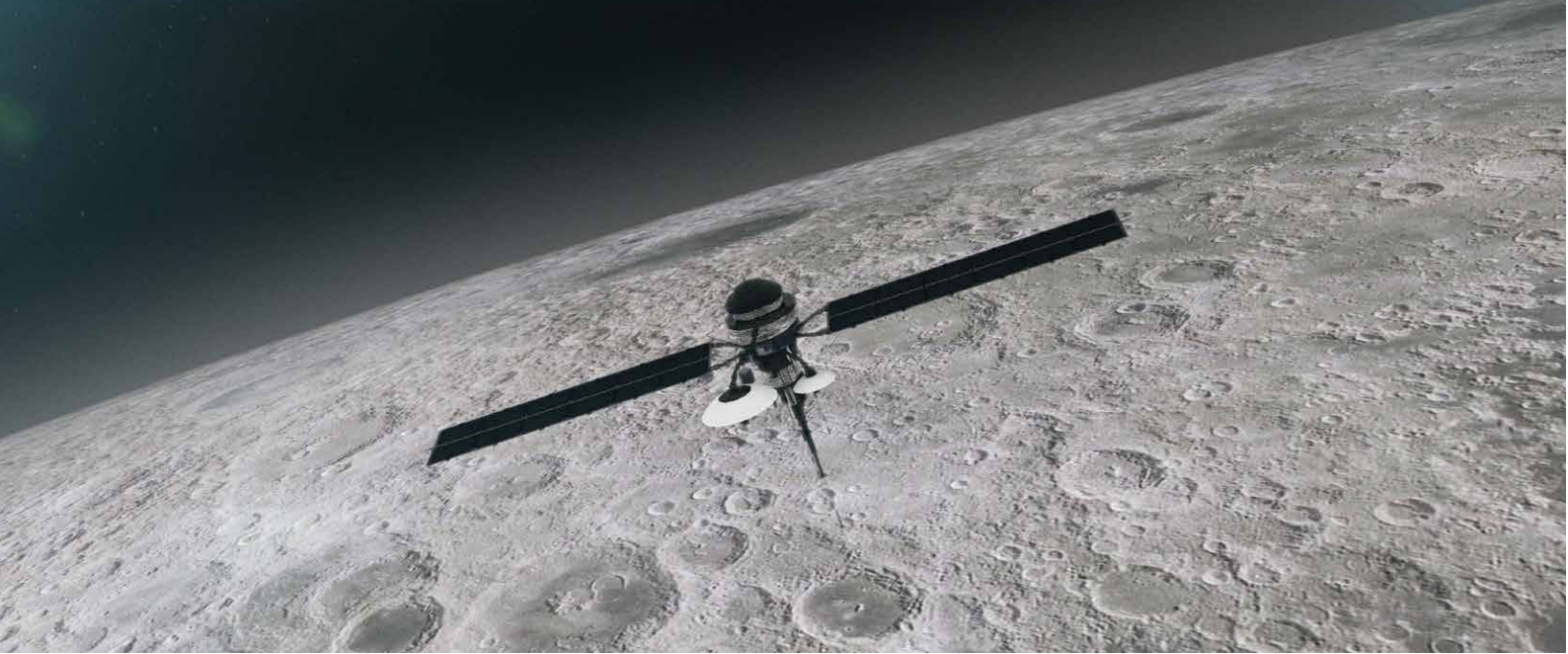
3.2.1.3 環境データ市場

環境データ市場の主な推進要因

- 環境データやそこから生成される高付加価値製品については、それらが企業に有益な情報を提供し、主要なデータギャップを埋めるのであれば、企業は（宇宙企業、非宇宙企業ともに）有料で購入する意思を持つと思われる。
- 現在、宇宙資源を活用することによって、月面での長期滞在を実現しようとする動きが世界中で強くなっている。そのため、SRU（宇宙資源活用）バリューチェーンの一部を構成したり活性化したりするときに役立つデータの需要が増大すると思われる。
- 地上検証データが不足しているため、地下の地質の特徴に関する詳細や資源の利用可能性に関する詳細が把握できておらず、空間分解能の低いリモートセンシングデータとごく表面的なデータを使った分析しかできていないエリアも多い。そのため、将来のミッションやその他の顧客は、より解像度が高く、特徴を深く掘り下げた月環境データに高い付加価値を見出すだろう。

環境データ市場の主な課題

- 現在のところ、月環境データはオープンアクセスとして関係する全てのユーザーに無料で提供されている。これについては、学術界から無料のオープンアクセスを維持するよう求められると思われる。
- 環境データについては、データ同士が分断されたままになると考えられ、1種類のデータ（例えば、レゴリスの特徴など）しかないエリアが多く、同じエリアの他の種類のデータが十分でない場合が多くなるだろう。そのため、特に宇宙資源利用の目的では、実効性のあるデータ活用が難しい。特定のエリアに関して種類の異なるデータを相互に関連づけられるような、データプールを構築することが重要な課題である。



3.2.2 市場予測

3.2.2.1 月データ市場全体について

月データ市場は、全体としては輸送市場よりも1桁小さいが、ビジネス上価値の高い副次効果を生み出し、長期的な月面経済の開発を計画する企業に、新たな収益源をもたらす可能性がある。前セクションで述

べた推進要因と制約を踏まえて売上高を試算すると、全セグメントを合わせた2020～2040年の累計額は基本シナリオで約85億米ドル、楽観シナリオで約119億米ドルとなる。

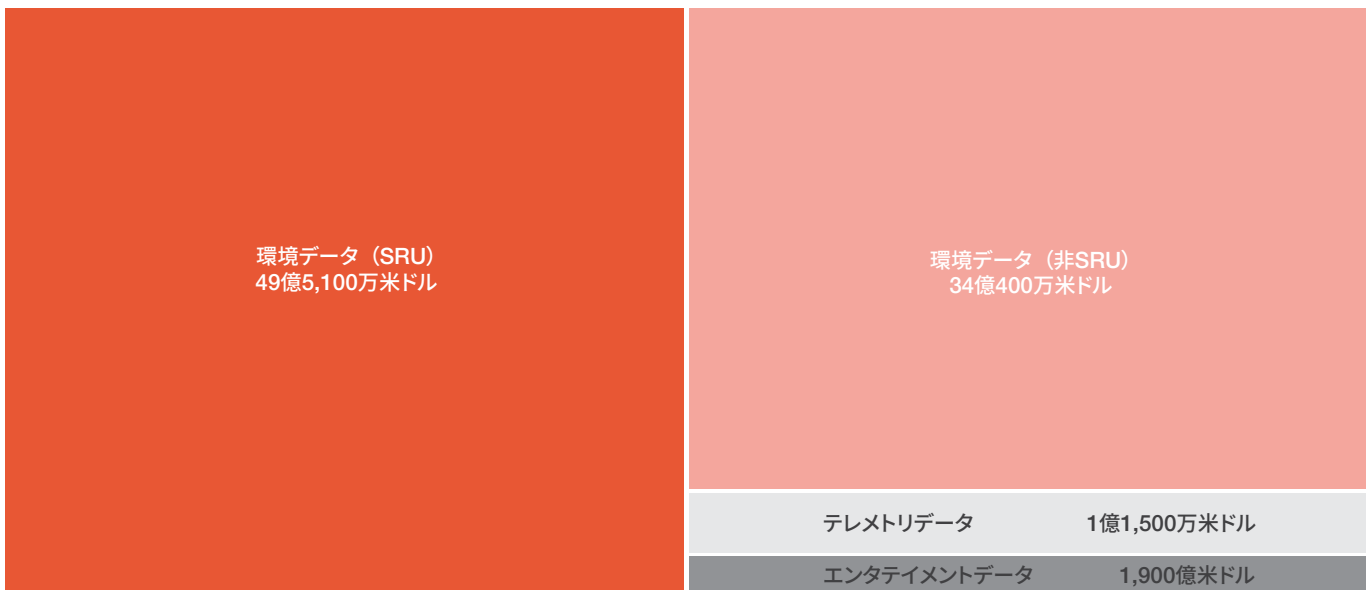


図14：2020～2040年のデータ市場の累計予測額（基本シナリオ）

3.2.2.2 月環境データ市場予測

月環境データ市場は、宇宙ミッションの計画や実施のためのデータ販売が大部分を占めると考えられる。また、地上検証を通して月の各エリアの資源を確認したい、という関心を持つ宇宙企業や非宇宙企業にもデータを販売できる。予測では、2020～2040年の環境データ市場の規模は83億米ドルで、そのうち59%はSRUデータから、残りの41%は非SRUデータから創出されると見込まれている。

環境データの市場規模は、基本シナリオの場合、2021～2030年の18億米ドル（45%がSRUデータ、55%が非SRUデータ）が2031～2040年には65億米ドル（63%がSRUデータ、37%が非SRUデータ）と3.7倍に成長すると予測される。楽観シナリオの場合は、2020～2040年の累計で120億米ドルとなる。成長の要因としては、宇宙セクターの需要がやや高いこともあるが、大部分は、鉱業各社による地上検証など、非宇宙セクターの需要増大によるものである。

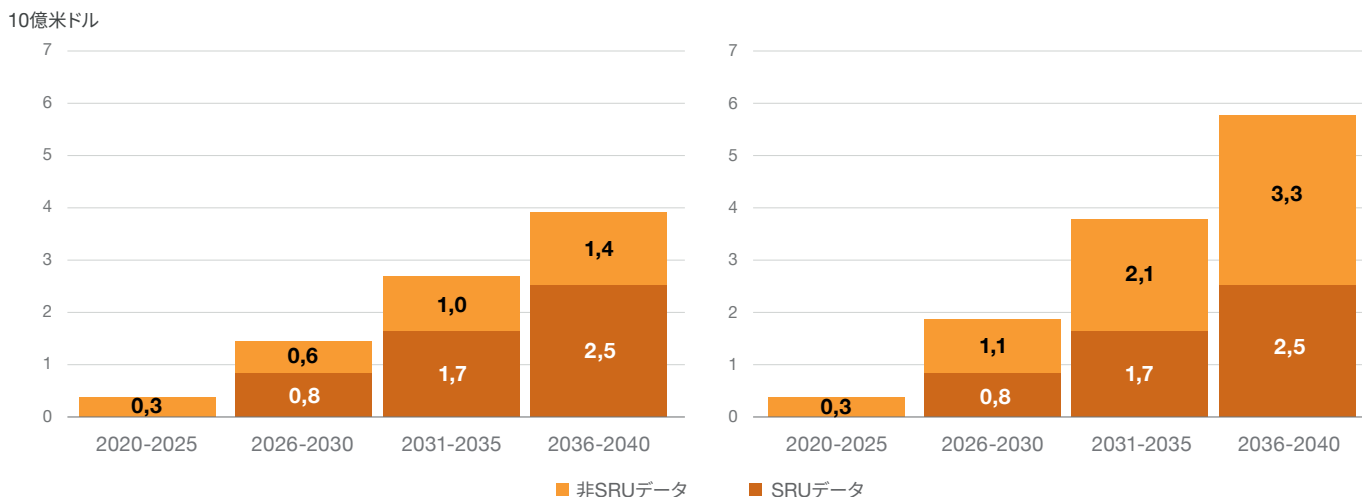


図15：2020～2040年の月環境データ市場の累計売上高（左が基本シナリオ、右が楽観シナリオ）

市場の活性化につながる主要な要素と注目点

- 月での長期滞在を目指す動きが強まる中、一部の民間企業（宇宙、鉱業、建設などの業界）が購買習慣を変える可能性がある。これまで民間企業は、データが公的に認められたものになる（通常、6カ月～1年後）のを待つのが一般的だったが、代金を支払ってでもすぐにデータを入手し、競争優位を獲得したいという意欲が高まっている。
- 月へのミッションが増加するに従い、入手できるデータの解像度、データ収集の時間枠、記録する場所のバリエーションも向上していくと思われる。その結果、官民双方の顧客ニーズに対応できる選択肢の幅が広がるだろう。
- 月輸送市場で見られた傾向と同じく、鉱業や自動車などの非宇宙企業も宇宙での滞在に向けた開発に乗り出しており、こうした企業がデータ購買市場をリードする役割を果たすようになる可能性がある。各社は、まず、技術開発に向けて月の環境を理解することを目指し、続いて、宇宙での安全な事業運営に関する国際法に沿って、月での事業（採掘、探査車など）を安全に展開することを目指すだろう。
- 将来の月事業に向けて、現在は月の環境を十分に把握することに力が注がれているため、必要な調査活動が増加する。学術界、公的宇宙機関、民間宇宙企業などは、月塵や重力が宇宙飛行士や機器にどう影響するかを理解するため、データ利用への関心を大幅に高めると予測される。さらに、月面での長期滞在に月の金属がどのように役立つか（例えば、レゴリスを遮蔽材に使うなど）の理解にも、データを活用すると思われる。そうしたことも市場の推進要因になるだろう。
- 「アルテミス計画」やCLPS（月面商業輸送サービス）ミッションは、環境データ市場に存在するデータギャップの解消に役立つだろう。とは言え、あくまでも知識の精緻化のために追加の調査や探査への道が拓かれるにとどまり、市場を刺激して大きく成長させるのは2031～2040年になるだろう。

3.2.2.3 月テレメトリデータ市場予測

予測されるテレメトリデータ市場の規模は、月環境データ市場よりも1桁小さい。その主な理由は、テレメトリデータの供給に関する課題の存在である。例えば、月で使用される機器（軌道船、着陸船、探査車など）、システム、サブシステム、部品などを製造するメーカーは、自社製品に関するテレメトリデータの販売に消極的である。潜在的な競合相手が製品を複製することを恐れるからだ。しかし、こうしたテレメトリデータの需要は次第に大きくなっていくと考えられる。そこで、データ供給者としては、データの販売に際して組織間で合意を締結して、需要を推進するという方法が取られるかもしれない。2020～2040年のテレメトリデータ市場は、累計で1億1,500万米ドルを売り上げると予想される。

テレメトリデータ市場の規模は、2020～2030年は4,300万米ドルで、そのうち公共セクターの探索活動に関連する売上は3,500万米ドル（80.3%）、次いで民間宇宙企業の探索活動に関連する売上が約400万米ドル（9%）、民間の非宇宙企業の探索活動に関連する売上が350万米ドル強（8.7%）、民間の非宇宙企業の地上での活動に関する売上が100万米ドル弱である。この期間に関しては、「アルテミス計画」とCLPS（月面商業輸送サービス）ミッションが大きな推進要因になっている。

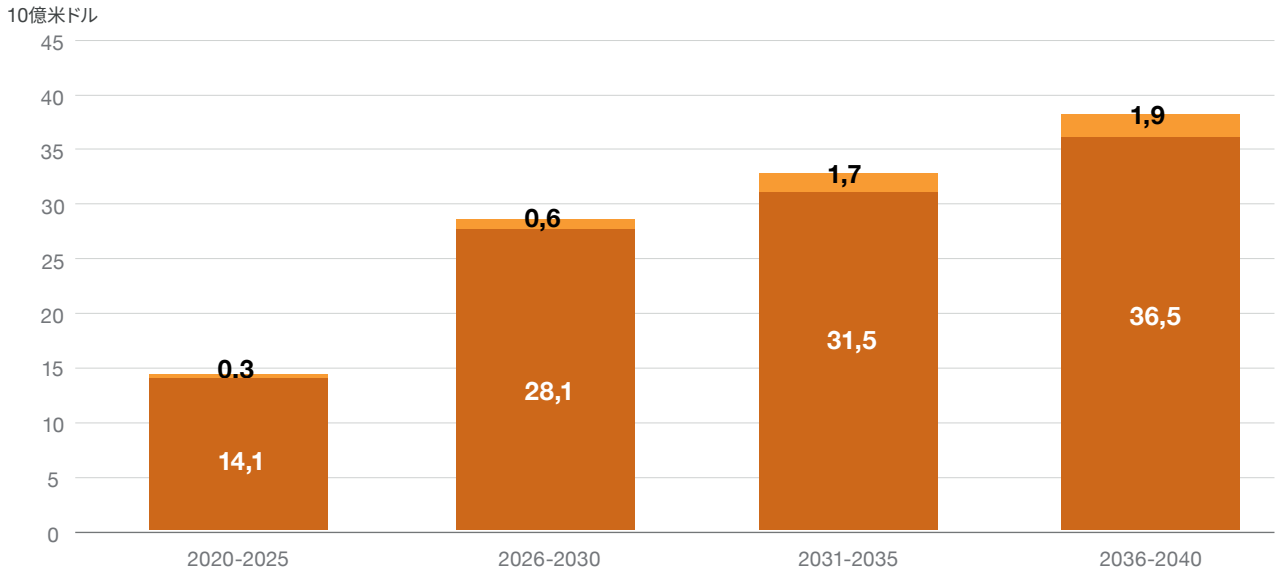


図16：2020～2040年の月テレメトリデータ市場の累計売上高（基本シナリオ）

しかし、2031～2040年には情勢が大きく変化すると見られ、民間セクターの売上高が4,000万米ドル近くになる（民間宇宙企業の探索活動が約1,800万米ドル、民間の非宇宙企業の探索活動が約1,600万米ドル、民間の非宇宙企業の地上活動が約400万米ドル）。テレメトリデータ市場全体の売上が増加する一方で、公共セクターの探索データの売上は

やや減少して3,400万米ドルとなり、2031～2040年の市場シェアは半分をわずかに下ると予測される。

市場の実現につながる主要な要素と注目点

- 民間の宇宙企業による取り組みが、テレメトリデータの主要な需要源の1つになると考えられる。こうした取り組みの第一の目的は自社システムの能力強化であり、第二の目的は競争優位の獲得である。
- 米国はテレメトリデータ市場で主導的ポジションを占め、2020～2040年の市場シェアは約40%（5,700万米ドル）と予測される。米国のニーズの大半は、「アルテミス計画」と月面の長期滞在という目標から生まれている。
- 民間セクターからは、自動車業界が大きく関与し、地上での用途や技術を月に転用するようになるだろう。このトレンドが強く現れてくるのがアジアで、トヨタや三菱をはじめとする多くの企業が月面探査計画に積極的に貢献している。こうした企業にとって、現行のミッションや短期的ミッション（特に探査車を使うもの）によるさまざまなテレメトリデータは、エネルギー供給や燃料電池の性能に関するデータを中心に、大きな価値を持つだろう。
- 採掘機器を供給する企業も、地上の自社技術を強化する目的で、テレメトリデータの購入に特別な関心を持つと見られる。こうした企業は、自動運転車や月環境で遠隔操作されるロボットの挙動を理解することに関心がある。それらは将来、月面で採掘機器を運用する場合に不可欠なポイントとなるからだ。このセグメントは、米国企業が主導すると見られる。

3.2.2.4 月エンタテインメントデータ市場予測

エンタテインメントデータの市場は、データ市場全体の0.2%になると予測されている。エンタテインメント市場に月データがあまり浸透していないのは、グリーンスクリーンとソフトウェアの拡張動画・拡張画像プラットフォーム（Adobe After Effects、Autodesk Maya、Nuke、Mochaなど）のような代替手段が使える中で、コストの高いオリジナル画像への支出が望まれていないことが主な要因である。しかし、月ミッションが増加するに従い、使用できるデータの量も質も向上するため、制作会社はいずれ、映画、ドキュメンタリー、テレビ番組、テレビゲームなどエンタテインメント業界のさまざまな用途に、リアルな映像素材、音声記録、画像をより多く使うようになると考えられる。

エンタテインメント産業の月データ市場は、ドキュメンタリー制作が大半を占め、次いで映画制作が多い。この2分野の売上高は、2020～2030年の合計350万米ドルから2031～2040年の1,400万米ドルへ、4倍に成長すると予測されている。一方、テレビゲーム産業での月データ使用は最も少なく、2020～2040年の累計で60万米ドルであり、その4分の3以上は2031～2040年に発生すると見込まれている。

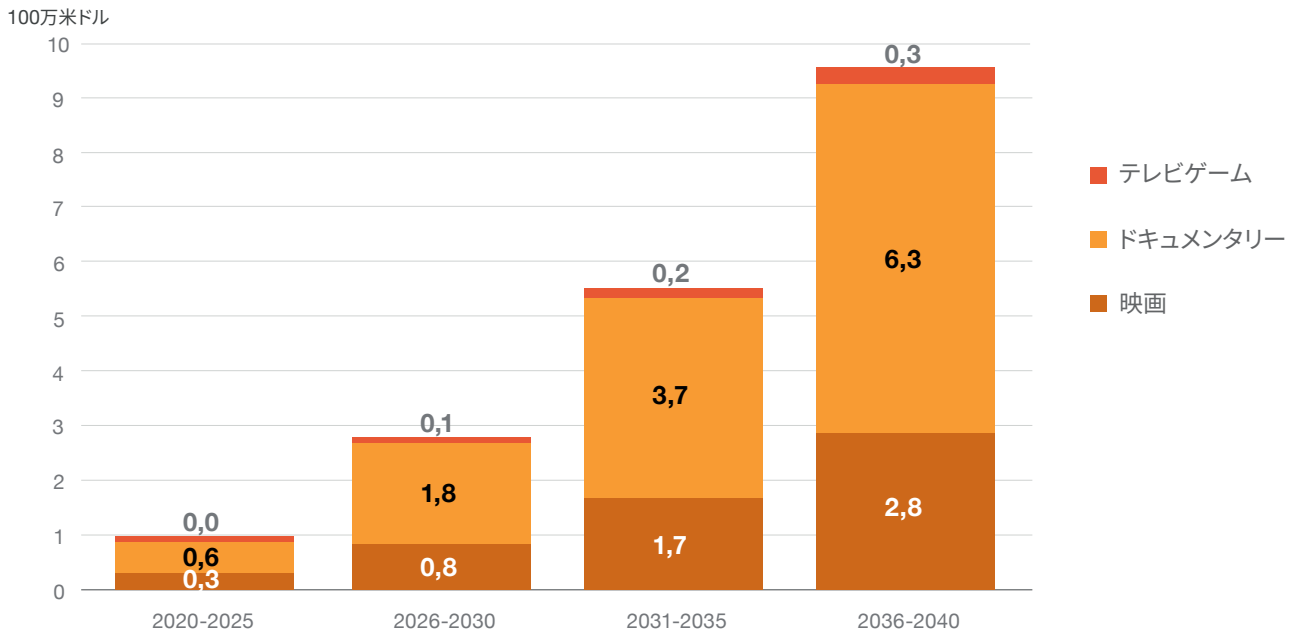
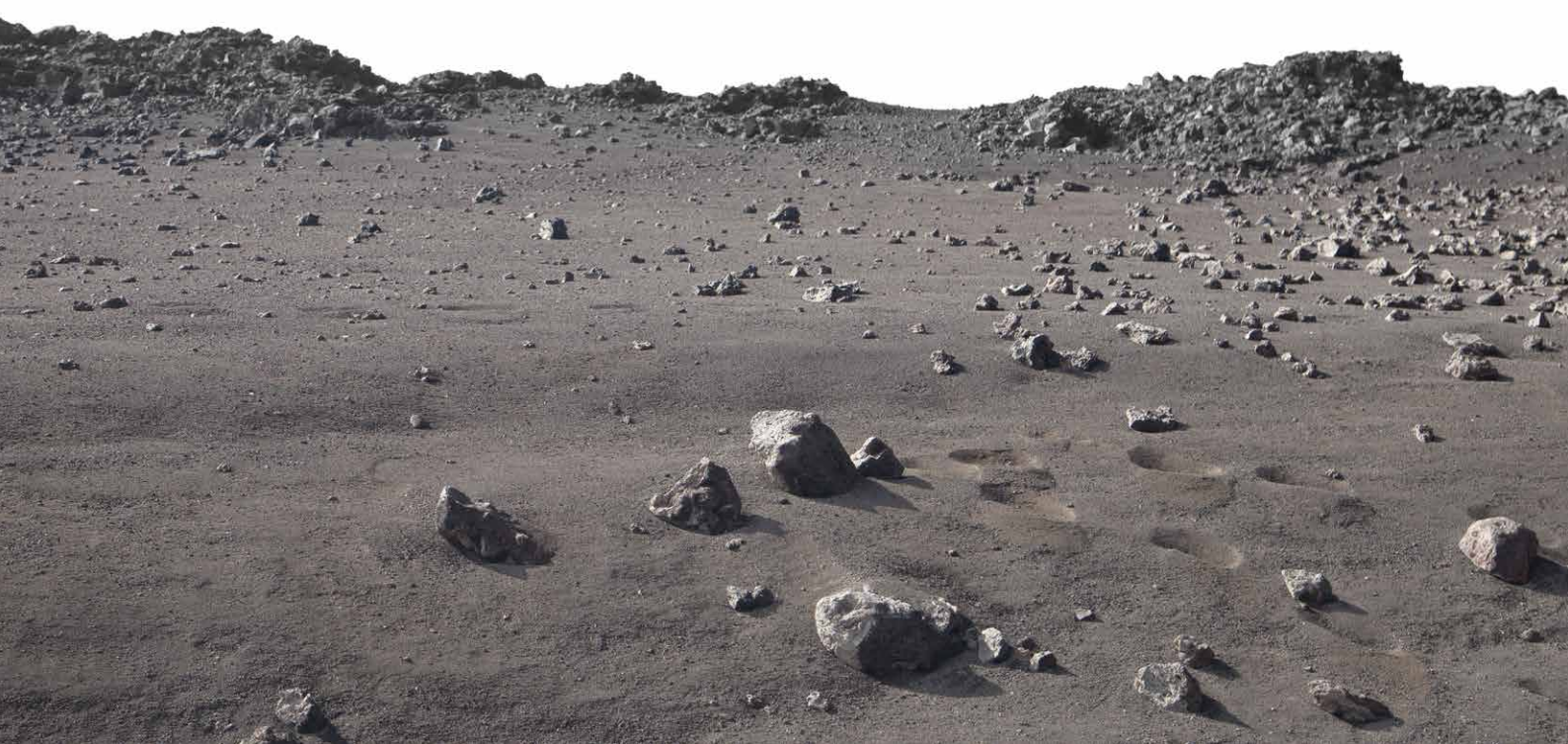


図17：2020～2040年の月エンタテインメントデータ市場の累計売上高（基本シナリオ）

市場の実現につながる主要な要素と注目点

- エンタテインメントデータ市場は、オリジナルコンテンツを直接必要とし、リアルタイムの素材を多く使用するドキュメンタリー分野が牽引している。
- 映画（およびそのメイキング）分野も、使用できる素材を購入する際の価格水準が高いため、市場規模に大きく貢献している。米国の映画制作産業は世界最大であるため、エンタテインメント産業向けデータ市場も米国が最大となるだろう。
- テレビゲーム分野は、月データを使用する際の価格が低いため、市場は最も小さい見込みである。テレビゲームコンテンツへの月データ需要は、アジア太平洋地域が最も多い。
- コスト障壁が緩和されて月輸送市場の民主化が進めば、月データの使用コストも低下してエンタテインメント業界による購入も促進されると思われる。



4 宇宙資源の活用

4.1 現状

4.1.1 宇宙資源活用（SRU）とそのバリューチェーン

月輸送市場、月データ収集市場に続いて、人間やロボットが月に長期滞在するようになると、月資源の採掘・活用という市場への道が拓かれる。それはやがて、将来の宇宙ミッションの可能性を広げることにもつながるだろう。月に存在する揮発性物質、鉱物、エネルギーなどの資源を単独あるいは共同で活用するために、多くのプレイヤーが技術やコンセプトの開発に乗り出している。とりわけ月資源利用（ISRU）は、将来

の宇宙ミッションを実現するために不可欠だと考えられている。ISRU市場の将来性とスケジュール感が今後どのように展開していくか、その特徴を全て明らかにすることはまだ難しいが、膨大な経済的ポテンシャルがあることは、現段階の予測でも示されている。

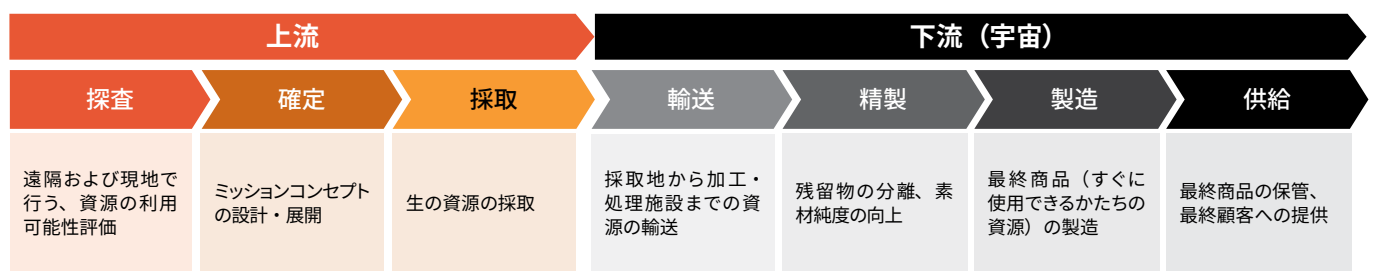


図18：宇宙資源活用のバリューチェーン

4.1.2 宇宙資源活用の需要と供給

4.1.2.1 宇宙資源活用の需要

宇宙資源は宇宙でも地上でも、さまざまな種類の用途に役立つと考えられる。宇宙資源活用 (SRU) では、揮発性物質 (酸素、窒素、水素、水など) や鉱物 (月のレゴリスや小惑星の土に存在するもの) など、多様な物質を利用する。そうした資源を採取して加工すれば、宇宙での生活を支えるガスや水の製造、ロケット推進剤の製造の他、宇宙探索や人間の滞在を支える設備機器のインフラの製造などに使える。

宇宙資源活用分野では、官民双方の需要が混在することになるだろう。生活物資とロケット推進剤の両方を必要とする有人ミッションは、主に宇宙当局の計画によって進行している。これまでのところ、月や火星への上陸を果たしたのは公的機関のみだ。一方で、商業宇宙ステーションに民間の宇宙飛行士を送ることを目指すAxiom Spaceや、惑星間ミッションを高頻度で実施するという野心的な取り組みを行うSpaceXなどのように、意欲的な目標を掲げる民間企業もある。軌道上の機器や月面のインフラを宇宙で製造するようになれば、探索活動を主導する宇宙当局と、それと並行して発展する民間エコシステムの双方に役立つだろう。

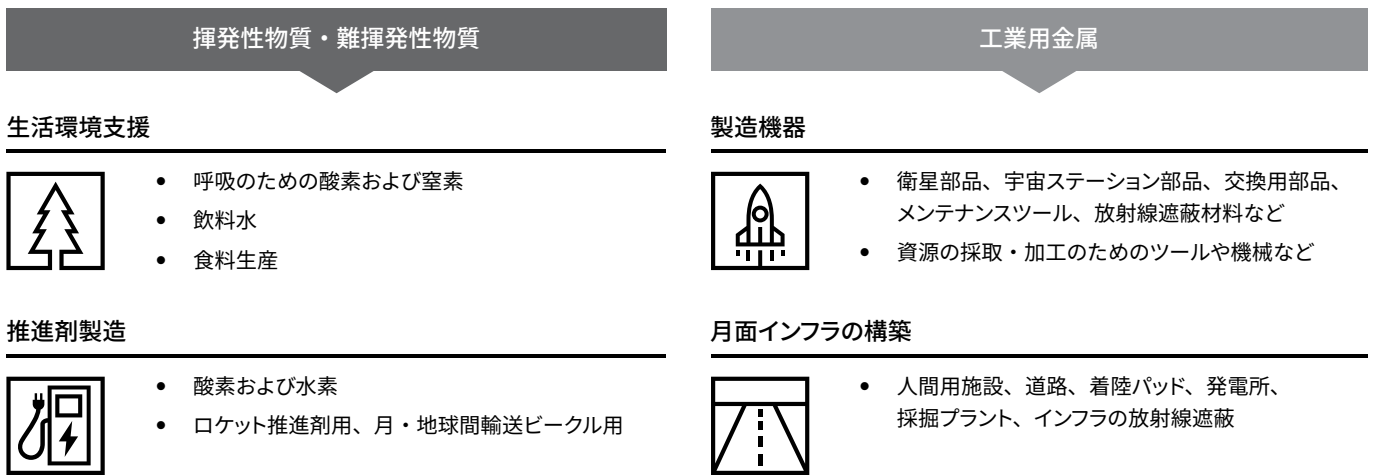


図19：宇宙資源活用分野 (SRU) で検討される資源と用途

4.1.2.2 供給

宇宙資源活用 (SRU) 市場は新しい市場であるため、製品やサービスの供給はまだ初期段階で、技術の成熟や技術実証ミッションが中心である。この分野のプレイヤーは、バリューチェーンの中の資源探査に取り組んでいる段階である。資源探査は、豊富な資源量を確保するために不可欠な活動だが、この活動が拡大するかどうかは、今後の技術の発展と、投資効果の実現性に大きく依存する。ここ何十年か間にリモートセンシングの実用性が上がってきているが、十分な正確性を確保し、月面の地下の組成を分析するためには、現地での測定と特性評価が不可欠である。また、資源探査以外のバリューチェーンについても、官民それぞれが開発やミッションなどの活動を増やしている。代表的な取り組みとしては、ESAの「PROSPECT」ミッションの観測機器や、企業各社が開発したさまざまな着陸機 (Astroboticsのペレグリンやグリフィン、Blue Originのブルームーン、Lockheed Martinのマッキヤンドレス)、探査車 (ispaceのHakuto-R、NASAのヴァイパー、CSAの嫦娥4号、ISROのチャンドラヤー

ン3号)、Roscosmosのルナ27やNASAのパーサヴィアランスなどのミッション、MetalysisによるFFCメソッドの開発など、多数ある。

現在、世界ではいくつもの企業が宇宙資源活用技術の開発に乗り出しており、この分野の活況ぶりが分かる。この分野でも、他の宇宙分野に共通して見られるものと同じ官民の力学バランスが働いており、公共セクターと民間が相互に補完し合っている。すなわち、公共セクターの計画が市場を刺激し、また、アンカーカスタマーとなることによって、民間企業の新規参入と技術の成熟を促している。



図20：SRUサプライチェーンを構成する企業の例

宇宙資源活用市場のエコシステム全体の進化のペースを決定づけるのは、需要と供給それぞれの成熟度である。この市場は、短期的には水と揮発性物質が中心となり、続いて中期的（10年以上）にはレゴリスの開発と金属採掘が焦点になる。一方、白金族金属（PGM）は、採掘と

地球への輸送が厳しいという課題に直面していることから、成熟にはかなり長い時間を要すると思われる。

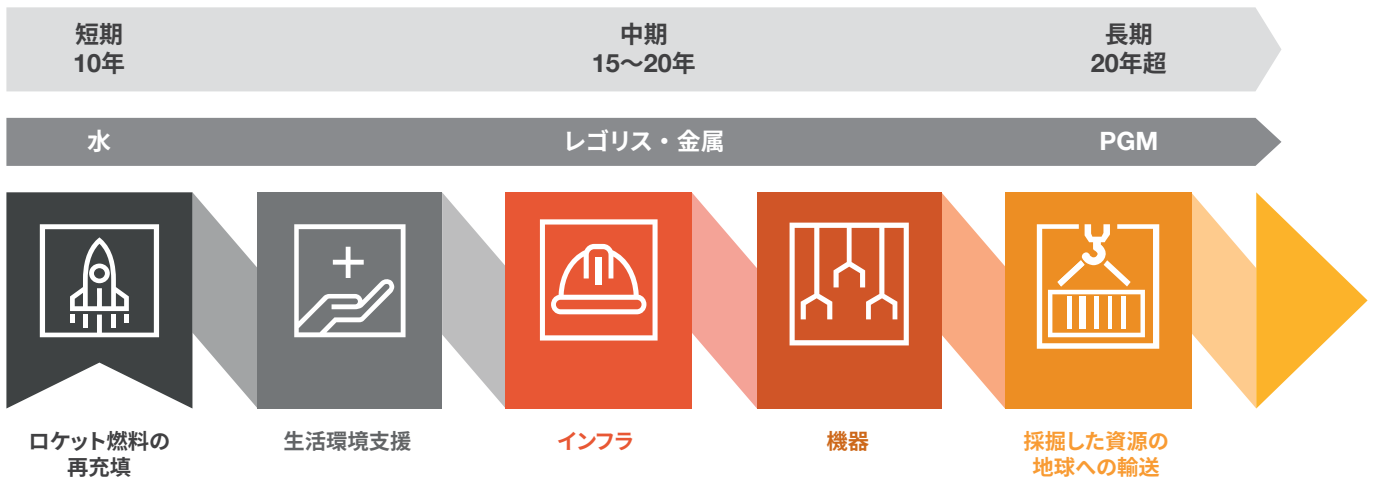


図21：今後数十年間のSRU成熟度を示すハイレベルロードマップ

4.1.3 世界の政策と規制に関する評価

4.1.3.1 宇宙資源活用をめぐる各国の取り組み

宇宙資源活用（SRU）はまだ新しい分野で不確実な要素も多いため、活動がどこまで拡大するかは政府機関から得られる支援の水準と密接に連動している。支援にはさまざまなカタチがあるが、安全な事業運営環境を提供できる業界の実現に向けて、政策・規制上の条件を整えることが第一だろう。そのため、多くの政府や公的機関が、宇宙資源の探索に関する規制の枠組みや政策の制定に向けて動き出している。

米国の前政権と現政権がそろって月への到達と長期滞在を目指すことを表明していることから分かるように、世界各国の宇宙探索政策の中でSRUの重要性が高まっている。2020年、米国政府は宇宙資源の活用に向けて世界的な支援を促すための大統領令を発出し、政策障壁によるSRUの制限を最小化したいという要望を再確認するとともに、より多くの国がそれに賛同することを求めた。欧州では、ルクセンブルクがSRU企業や外国企業にとって魅力的な環境を創出するために、専門知識を集積させ、企業同士の協力や連携の創出を最大化した。ルクセンブルクはさらに、SRU事業の財務、技術、業務運営に関する課題に対しても積極的取り組み、ソリューションを開発している。

他の組織や政府もSRUへの長期的な関与を示した独自のロードマップを策定し、それに続いて枠組みの開発にも着手している。欧州宇宙機関は欧州探査包括計画（E3P）に沿った宇宙資源戦略を策定した。そこには「PROSPECT」ミッションや、その他技術実証（まずは水を対象とする）を行う単発のミッションも含まれ、公共セクターとともに民間セクターも参加する。米国では、SRU技術の成長を支援する上で、NASAの「ティッピング・ポイント・アワード」が欠かせない役割を果たしている。複数のSRU企業がこの制度を利用し、官民連携を通じた技術開発を行っている。オーストラリアの国家資源局もSRUを反映したロードマップを策定しており、そこには、住居と生活環境支援、天体資源活用、自律型ロボット、電力および推進力などが盛り込まれている。これによって、オーストラリアが伝統的に強みを持つ採掘技術の活用が可能になっている。また、UAEは中東で初めて宇宙活動に関する包括的な法的枠組みを整備し、その中でSRUを含めた国家宇宙戦略を策定した。さらに、UAEの宇宙当局とルクセンブルクの間で国際的な協力協定が締結された他、2117年を目標としたUAEの火星都市構想も、ホープ探査機が火星に向かうなど、国際協力を通じて具体化が進んでいる。

4.1.3.2 宇宙資源活用活動に関する国際的枠組みの開発

国や地域ごとのさまざまな取り組みに加え、国際的なレベルでもSRU活動に関する共通の法的枠組みを定めるための話し合いが続いている。国連宇宙空間平和利用委員会の法律小委員会での議論や、国際的組織であるハグ宇宙資源ガバナンスワーキンググループの取り組みなどがその例である。このワーキンググループは2019年に幅広い議論を行い、宇宙資源開発活動に関する国際的な枠組みを構築するための20項目を示した。この20項目は規制の土台として定められたもので、各国がこれを導入すれば、事前の合意がスムーズに進む。項目の策定は国際的なプロセスで進められ、さらに産業界とも連携したため、商業的視点も最大限に盛り込まれている。そのため、企業は他国に損害を与えるリスクを負わずに事業を開発し、投資し、実施することができるという利点がある。

4.2 今後の展開とSRU市場

4.2.1 市場の推進要因と課題

SRU市場は、現在と将来の月および火星ミッションが原動力となって進化する。こうしたミッションはロケット推進剤の需要を喚起し、月環境全般での人間の長期滞在とも関連が深い。

4.2.1.1 市場の推進要因

SRU市場は、その前提となる条件が不確実であるため、市場の実現もまた不確実である。

各国宇宙当局による月への再注目

近年、世界の多くの国の宇宙当局が、国際宇宙ステーションへの有人飛行に加え、その先の月探査を宇宙戦略の中心に置くようになった。ここでは月環境の性質調査から資源探索、月面機器の開発、月周回有人拠点ゲートウェイ向けの軌道上のインフラまで、さまざまなタイプのミッションが想定されている。こうした姿勢を反映したのが、米国の「アルテミス計画」である。計画では、2024年には宇宙飛行士をもう一度月に送るという目標が公表されている。他の地域でも、欧州、日本、ロシアなどがそれと同じ方向性で自国のロードマップを策定し、協力協定を締結している。こうして各国の宇宙当局は、さまざまなミッション（JAXAの資源探査、ルナミッション、北極のサンプルリターン、ISRU実証機）を通じてSRU技術の成熟に貢献し、民間セクターの参入を増加させている。また、中国も、他国との連携の度合いは低いものの、野心的な月探査ロードマップを策定し、「嫦娥計画」の成功によって月面到達とサンプルリターンの能力を実証している。その他カナダ、インド、オーストラリア、韓国、UAEなども探索および資源活用に乗り出しており、今後数年のうちに新しいダイナミックなエコシステムが展開される予兆が見えている。

宇宙当局による探索計画やSRU計画の進展は、民間企業にも機会をもたらしている。民間企業はNASAに商業月面輸送サービスを提供したり、月周回有人拠点ゲートウェイのモジュール開発を請け負ったりするなど、宇宙当局の計画にも参加している。こうしたプログラムへの参加に加え、民間企業は将来の月エコシステムの中で、輸送サービス（着陸船や探査車）や通信サービスを提供し、SRUバリューチェーンの各所に貢献するといった役割を果たすことも期待されている。その一例が、NASAが2020年に行ったレゴリス採掘チャレンジである。これは、人間の月面滞りにつながる幅広い取り組みだが、その中でNASAは、民間企業各社に対して採掘ロボット（RASSOR）の主要部品の設計を提出することを求めた。

月資源の活用拡大がもたらす、火星探索の未来

月のSRU市場を推進するのは月探査プログラムだけではない。火星への定期的なミッションもまた推進要因となる。シスルナ空間の軌道上で燃料の補給ができれば、火星ミッションにとっても非常に大きなメリットになる。シングルレグミッションの場合、地球の大気圏を脱出して火星の遷移軌道に到達するだけで大半の燃料が燃焼してしまうが、燃料補給が実現すればペイロードの容量が大きく向上する。

将来の火星ミッションがどのようなスケジュールで進むかについては不確実な部分もあるが、UAE、中国、米国の宇宙当局が2021年にそれぞれミッションを成功させていることから、期待が持てる。民間セクターでは、SpaceXが10年以内にスターシップの定期運航開始を目指しており、そうなると、復路で使用する推進剤の製造や乗員の生命維持のため、天体資源活用のニーズが喚起される可能性がある。

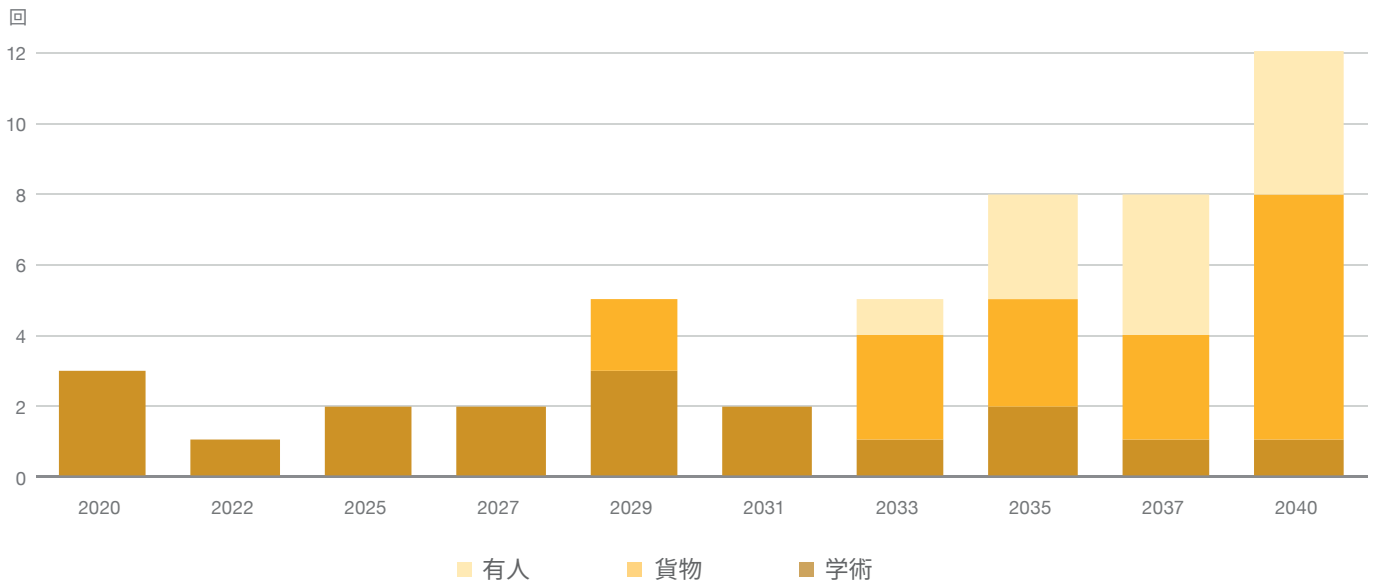


図22：2040年までに想定される火星ミッション

火星へのミッションの回数は、今後20年間に大きく増加すると予測される。初期のミッションは学術目的によって増加するが、時間を経て宇宙へのアクセスが容易になると、貨物輸送関連のミッションが必要になり、回数が大きく増えると考えられる。数多くのイノベーションの実現

や、深宇宙の探索が可能なピークル（SpaceXのスターシップ、NASAとBoeingのSLS、中国の長征9号など）の開発が、ミッションの回数増加を推進するだろう。

4.2.1.2 市場の課題

資源活用を考える以前に資源の特徴把握が必要であるものの、そこに知識ギャップが存在していること

ギャップ解消の第一歩は、資源の特徴と利用可能性の実証である（探査フェーズ）。月資源を利用するために必要な採掘技術や処理技術を開発し、民間企業が求める経済的実効性を確保するには、地表の物質を特定するだけでなく、月面の広範囲にわたってレゴリスや地下土壌の地質学的分析を行う必要がある。

技術実証に関する不明瞭点が存在すること

SRU開発のもう1つの課題は、需要の具体化である。具体化できるかどうかは、必要な技術の開発とプログラムの成熟度に強く連動している。技術の成熟と実証は、現時点で存在している主な課題の中でも特に重要な不明瞭点である。水の採取からエネルギー製造、レゴリスの加工まで、研究対象となっているコンセプトは多いが、いまだ実証されていない。

開発が必要な技術の例としては、軌道上で打ち上げ装置に燃料を補給するための技術とインターフェースや、さらに難しい問題である極低温推進剤を軌道上で長期保管する技術などがある。

資源活用に関して、合意された規制の枠組みがないこと

もう1つ障壁となりそうなのが、宇宙資源の商業化に関する権利と合意をめぐる国際的な規制の状況である。米国やルクセンブルクでは国家的取り組みによって規制が整いつつあるが、国際的にはほとんど認識されておらず、中にはロシアのようにリスボン条約や宇宙条約の解釈をめぐって異議を唱える国もある。宇宙当局や民間企業が宇宙資源を活用し、商業化できるようにするために、世界の宇宙セクターで広く共有される規制が求められている。ただし、近い将来、商業企業にとって好ましい政策環境に成り得る数々の施策が増えていることは、注目に値する。

4.2.2 市場予測

使用した変数と前提条件

上述した市場の推進要因と障壁を踏まえ、SRU市場規模を予測した。ただし、この予測は、宇宙資源の販売から生じる売上高のみをもとにしており、したがって、上流の機器製造や打ち上げサービスといった潜在的市場は含まれていない点を明示しておきたい。以下に、基本シナリオの考え方と使用する仮定の概要、続いて、試算結果の数値を解釈する際の注意事項を示す。

SRUによる推進剤市場の規模は、下記の仮定に基づいて算出した。

- 今後の月ミッションと火星ミッションの回数の合計
- 上記ミッションのうちSRUによる推進剤を使用する割合、時間の経過による変動、各ビークルが使用する推進剤の種類（LOX/LH2とLOX/CH4）
- 採掘現場から軌道上の供給地点までの輸送機に必要な推進剤の量。例えば低地球軌道で燃料補給をする場合などを考えると、輸送機もかなりの量を使う可能性がある。支援業務で使用する追加の推進剤の予測については、NASAの研究で提案された「ミツパチ」と「働きパチ」をもとにしたアーキテクチャを使用した。
- SRUと地球のそれぞれから調達される推進剤のシェアの段階的な増加
- 売上は全て、需要が発生した年のものとして算入した。実際の支払いはミッションの開始前に始まり、終了後にも続くことがあるため、実際の毎年の売上高は、予測よりも平準化されると考えられる。

これらをもとに試算した結果、2040年のSRU市場の予想規模は630億米ドル弱となった。このうち生活支援市場と建設市場が占める割合はごくわずか（全体の約1%）であり、残りの99%を占める推進剤がSRU市場の成長を牽引することになる。

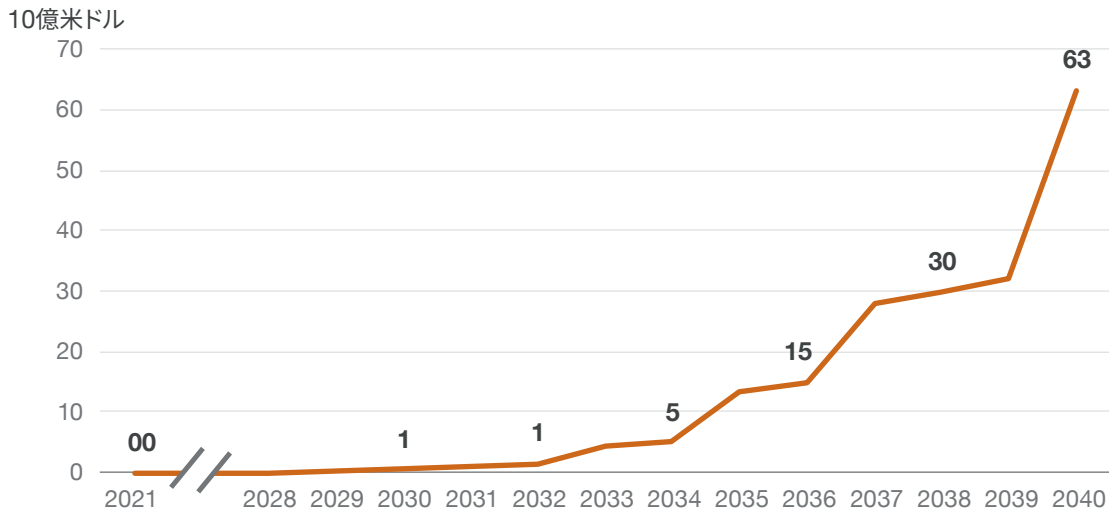


図23：SRU市場全体の規模の進化

2020～2030年におけるSRU市場全体の成長は微々たるものだが、2030年以降、状況は激変する。激変の主な理由は、推進剤の予測需要の増加である。需要が増加する背景には、2つの要因がある。第一に、ミッションのペイロード質量が増えることである。その結果、推進剤の必要量も増える。第二に、2030年以降、月と火星の両方でミッションの頻度が指数関数的に増えることである。これもまた、推進剤の使用が増える要因になる。ミッションの頻度が増える理由の1つが、ミッションの担い手が公共機関から民間企業に移ることである。その結果、宇宙での商業

活動が増え、市場に参入するプレイヤーも増える。火星への惑星間ミッションに伴うペイロードや推進剤の量を考慮すると、需要増大に大きな役割を果たすのは火星ミッションであると考えられ、したがってSRU市場全体にも大きな影響を及ぼす。

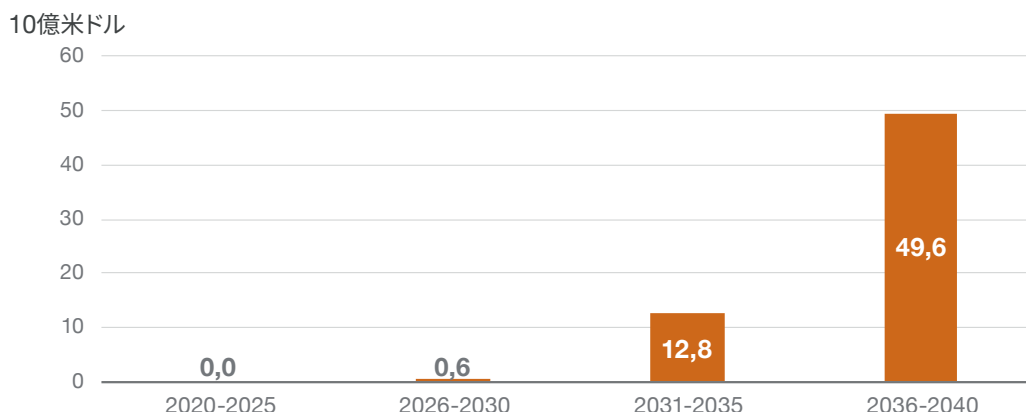


図24：打ち上げ機推進剤市場向けSRU売上高予測

SRU市場のマネタイズは、推進剤のキログラム当たり価格と密接に連動している。現時点では仮の価格を想定するしかないが、地球低軌道までの推進剤の輸送価格 (United Launch Allianceのシスルナビジョンをもとにキログラム当たり3,000米ドルと仮定) および月面での直接価格 (「Commercial Lunar Propellant Architecture」に記載の「REACH」

をもとに500米ドルと仮定) から、大まかな予想価格を設定した。その結果、打ち上げ機推進剤市場全体の規模は、2040年には約630億米ドルになると推定される。

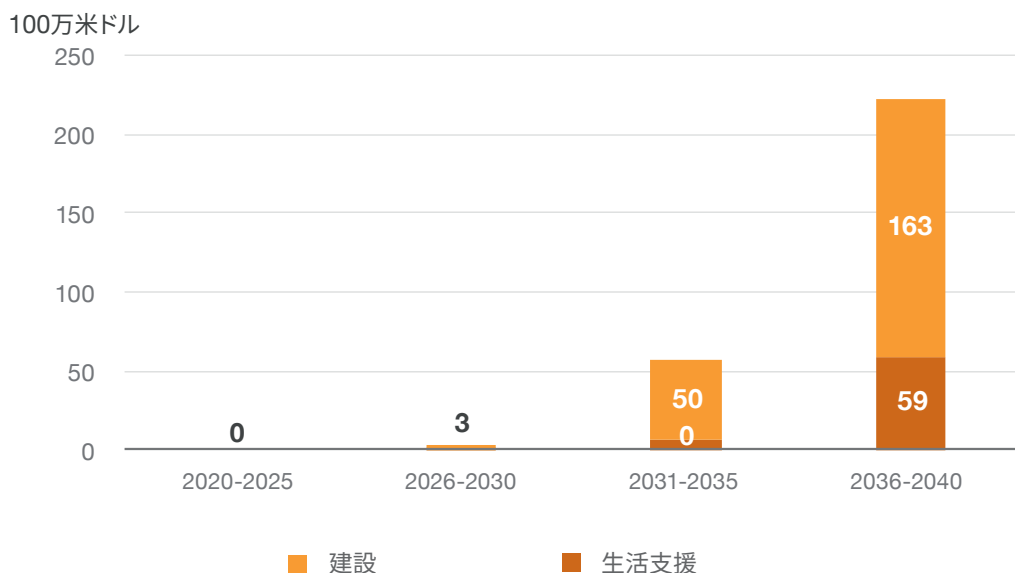


図25：生活支援市場・建設市場向けSRU売上高予測

一方、生活支援物資の需要は、月や火星に向かう宇宙飛行士の数、月面 (または軌道ステーション) や火星での滞在期間、地球から運ぶ資材とSRUを通じて調達する資材の割合など、SRU資源の消費量に影響するさまざまな項目についての仮定をもとに試算した。ここで

も推進剤市場と同様に、市場の主な推進要因はミッションの頻度と2035年以降の月・火星での滞在の増加である。2040年の生活支援市場全体の市場規模は約6,600万米ドルと推計されている。



建設用資源の需要についても、月ミッションと火星ミッションに必要な支援の量に基づき、月面に長期滞在する宇宙飛行士の数とそれに比例する支援施設の必要量、SRUからレゴリスや金属の加工製品を提供して維持する軌道や月面のインフラなどを考慮して推計した。SRU資源の建設への応用は、2040年までに月面での金属加工技術がどこまで成熟するかによって、制限を受ける。推進剤市場、生活支援市場と同じく、建設市場も人間の宇宙滞在によって需要が増加するだろう。滞在する人が増えれば、インフラや製造能力の増大が必要になるからだ。2040年の建設市場全体の市場規模は、約2億1,600万米ドルと推計されている。

補足事項および分析上の注意点

SRU市場の需要と供給には、多くの外部要因が影響を及ぼす。現時点での分析結果から読み取れるトレンドは確かなものだと考えられるが、対象期間が20年にわたることもあり、実際の数値とは差が生じる可能性がある。本稿のSRUセクションで示した市場予測は、SRU市場に属する各セグメント（推進剤、生活支援、建設）の成長を入手可能な限られたデータと経験に基づいて予測したものである。今後20年間のミッションの頻度については、本稿のための調査も参考にしながら暫定的な数値を定め、それをもとに市場規模を試算した。試算する際は、それぞれの要素の重要度によって異なる重み付けをした数式を使用した。

例えば、推進剤の需要を算出する際は、あらかじめ予測したミッション数に基づいており、予測された市場規模は、これらのミッションの成功に大きく依存している。今後20年間にミッション数が増減（中止もしくは追加）された場合、推進剤の需要に直接的な影響が生じ、結果としてSRU市場全体にも影響が及ぶ。

他方、例えば1回のミッションに乗務する宇宙飛行士の数など一部の要素は、SRU市場の予測に大きな影響を及ぼさないと考えられる。ミッション1回当たりの宇宙飛行士の数が1名増えたとしても影響は小さく、必要な生活支援の量にわずかな変更はあるだろうが、ペイロード全体を月に運ぶために必要な推進剤の総量に影響はないと思われる。したがって、SRUの市場規模の予測はほぼ変わらない。

その他に、本稿の調査結果にゆがみを生じさせる可能性のある要素として、資源や材料の価格がある。これらの価格は供給する場所によって（例えば月面と地球低軌道など）異なるが、現状では商業的価値はもちろん、価格データも存在しない。価格は、資源の消費量や市場規模の比率には影響しないが、本稿で示した市場価値の金額に直接影響する可能性がある。

最後に、本稿で実施した予測項目に関しては、技術の破壊的イノベーションが起きたり、政策の優先度が増えたりすることも考えられる。そのため、本稿で示した数値は、時間とともに変更・進化する可能性があることを明記しておきたい。



5 結論

月面経済の規模は累計で1,700億米ドルと有望だが、調査対象期間後は、さらに急激に成長する

宇宙へのアクセスが急速に向上し、宇宙での活動が増えるに従い、明確になってきた目標が2つある。月面に長期滞在すること、自律的な月面経済を構築することである。これを踏まれば、これからの20年が月面活動の鍵となる。月面でのモノやサービスの需要が増し、それに応えるために急拡大する市場は、2040年までに1,700億米ドルにまで成長すると期待される。

この期間の売上の主な原動力となるのは月輸送市場で、2040年までの累計市場規模は約1,000億米ドルと見込まれる。SRU（宇宙資源活用）市場は、推進剤需要に牽引されて2040年には630億米ドルとなる。いずれの市場も有望な予測が出ているが、その根拠になっているのが、月ミッションの回数および頻度の増加と、人間の長期滞在に向けてペイロードの大型化を目指すことによるミッション規模の増大である。注目すべき点として、今後、月面経済の実現を可能にする技術実証が実施されれば、SRU市場の急激な成長が始まるという予測がある。すなわち、SRU活動は2040年以降に非常に大きな役割を果たすことになりそうだ。その主な推進要因となるのは、火星探査と、人間の月滞在を支援する活動である。ただしSRU関連の予測値は、打ち上げ装置の互換性、関連技術の成熟にかかる時間など、外部要因にも連動している。

月輸送市場やSRU市場よりも規模は1桁小さいものの、月データ市場も同様の動きで成長しそうだ。推進要因は宇宙ミッションの開発と、それに関連して地上で行われる調査研究活動である。宇宙データについては、早急な地上検証のニーズとその価値の大きさが刺激となって、需要と活用が増え続けるだろう。SRUの技術とコンセプトは、月環境を深く理解し、性質を把握することに大きく依存しているが、そうした情報は従来のリモートセンシングデータからは得られない。

市場は宇宙当局や宇宙企業を超えて広がり、非宇宙企業も巻き込む

月面経済エコシステムには、宇宙当局や宇宙企業との連携を通じて、非宇宙企業の参入も増える予想される。自動車、鉱業、建設といった業種の非宇宙企業は、遠く離れた厳しい環境下の作業である月探査において、自社の専門的なコアコンピタンスが課題解決につながるという密接なシナジーを見出している。これらの企業は、技術のスピノフとスピニンの両方を目指しており、多くの企業がすでに研究活動に乗り出し、あるいは宇宙当局や宇宙企業の月探査に協力するなど、具体的な活動を始めている。こうしたことから、非宇宙企業は特に2030年以降に重大な役割を担うようになり、ペイロードの規模や回数が増大して、月輸送市場に大きなシェアを占めるようになると考えられる。

開発のペースは、技術や政治的要素に左右される

今後数年間に、達成すべき節目がいくつかある。それによって、現在のロードマップの道筋が、ミッションや国際協力を通じて実現に向かっているかを確認することができる。これからの月ミッションが成功すれば、官民双方のプレイヤーにとって、大きなエコシステムを開花させる足掛かりとなる。

1つめの成功要因になるのは技術の成熟である。短期の月ミッションによって資源探査が行われ、超重量物の打ち上げ、新型の月着陸船や探査車、資源の採取、加工、現地での製造など、さまざまな技術が実証されるだろう。そうした成功の1つ1つが、前進への一歩となり、市場を刺激して売上の実現につながる。

2つめの成功要因になるのは国際協力、すなわち、目標達成に向けて共通の取り組みを推進する条約や、宇宙当局間の協力などである。月探査は非常に資本集約的であるため、幅広い国際協力の対象となる。アルテミス協定や二国間合意のもとで始まった宇宙当局間の協力によって、各国の科学力や財政手段を持ち寄ることができる。同時に、宇宙資源の所

有権や商業的資産をめぐる緊張は、宇宙問題に関わる政治的リスクの大きさを思い起こさせる。そうした課題が月探査活動の発展ペースを遅らせかねないため、政治的な摩擦を適切に管理することが、月面経済実現のスケジュールに決定的な役割を果たすだろう。

略語一覽

| | |
|------------------|--|
| ASA | Australian Space Agency |
| CAGR | Compound annual growth rate |
| CLPS | Commercial lunar payload services |
| E3P | European Exploration Envelope Programme |
| EC | European Commission |
| EIB | European Investment Bank |
| ESA | European Space Agency |
| EU | European Union |
| GES | Goonhilly Earth Station |
| H2020 | Horizon 2020 |
| ISECG | International Space Exploration Coordination Group |
| ISEF* | International Space Exploration Forum |
| ISRO | Indian Space Research Organization |
| ISRU | In-situ resource utilisation |
| ISS | International Space Station |
| ISS ECLSS | International Space Station Environmental Control and Life Support System |
| JAXA | Japanese Aerospace Exploration Agency |
| JUICE | Jupiter Icy Moons Explorer |
| JWST | James Webb Space Telescope |
| LEO | Low-Earth orbit |
| MBRSC | Mohammed bin Rashid Space Center |
| MPCV | Multi-Purpose Crew Vehicle |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| O&G | Oil & gas |
| OTT | Over-the-top |
| PGM | Platinum group metals |
| PPP | Public-private partnership |
| PROSPECT | Package for Resource Observation and in-Situ Prospecting for Exploration, Commercial exploitation and Transportation |
| RASSOR | Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot |
| SKG | Strategic knowledge gap |
| SLS | Space Launch Systems |
| SME | Small and medium-sized enterprises |
| SRU | Space resources utilisation |
| UAE | United Arab Emirates |
| ULA | United Launch Alliance |
| UN COPUOS | United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space |
| US/USA | United States of America |
| VATP | Value Added Telemetry Products |
| VC | Venture capital |
| MPCV | Multi-Purpose Crew Vehicle |

筆者

PwC France

www.pwc.fr/space

Luigi Scatteia

Partner

Yann Perrot

Manager

日本のお問い合わせ先

PwC Japanグループ

www.pwc.com/jp/ja/contact.html



PwCコンサルティング合同会社

中林 優介

ディレクター

榎本 陽介

マネージャー

www.pwc.com/jp

PwC Japanグループは、日本におけるPwCグローバルネットワークのメンバーファームおよびそれらの関連会社（PwCあらた有限責任監査法人、PwC京都監査法人、PwCコンサルティング合同会社、PwCアドバイザリー合同会社、PwC税理士法人、PwC弁護士法人を含む）の総称です。各法人は独立した別法人として事業を行っています。複雑化・多様化する企業の経営課題に対し、PwC Japanグループでは、監査およびアシュアランス、コンサルティング、ディールアドバイザリー、税務、そして法務における卓越した専門性を結集し、それらを有機的に協働させる体制を整えています。また、公認会計士、税理士、弁護士、その他専門スタッフ約9,400人を擁するプロフェッショナル・サービス・ネットワークとして、クライアントニーズにより的確に対応したサービスの提供に努めています。PwCは、社会における信頼を構築し、重要な課題を解決することをPurpose（存在意義）としています。私たちは、世界156カ国に及ぶグローバルネットワークに295,000人以上のスタッフを擁し、高品質な監査、税務、アドバイザリーサービスを提供しています。詳細は www.pwc.com をご覧ください。

本報告書は、PwCメンバーファームが2021年9月に発行した『Lunar market assessment: market trends and challenges in the development of a lunar economy』を翻訳したものです。翻訳には正確を期しておりますが、英語版と解釈の相違がある場合は、英語版に依拠してください。電子版はこちらからダウンロードできます。 www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership.html オリジナル（英語版）はこちらからダウンロードできます。 www.pwc.fr/en/industrie/secteur-spatial/pwc-space-team-public-reports-and-articles/lunar-market-assessment.html 日本語版発刊年月：2022年5月 管理番号：I202112-07

©2022 PwC. All rights reserved.

PwC refers to the PwC network and/or one or more of its member firms, each of which is a separate legal entity. Please see www.pwc.com/structure for further details. This content is for general information purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.