

3. 宇宙に広がる生活圏

(1) 宇宙旅行に手が届く

2050 年に向け人類の生活圏は宇宙に広がる。国際月面探査プロジェクト「アルテミス計画」等が進む中、国家や企業は宇宙空間に活動拠点を設け、地球軌道上や月面に一定期間滞在する人の数が増えていく。一般消費者にとっては宇宙空間で景色や無重力を楽しむ宇宙旅行が身近な存在になるだろう。

◆5 万ドルで小旅行へ

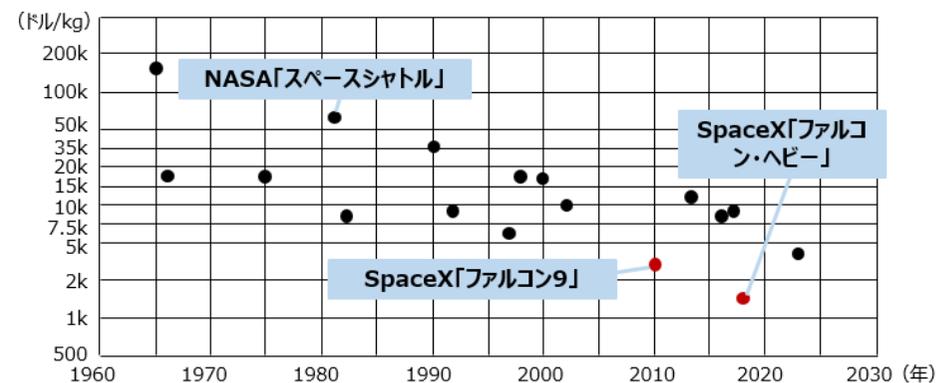
世界で初めて宇宙を旅した民間人は米国人実業家の Dennis Tito 氏で、2001 年に国際宇宙ステーション (ISS) に 1 週間滞在した。米 Space Adventures がロシアとの契約に基づき提供するプランに参加したもので、料金は 2,000 万ドルだった⁹²。現在も ISS に滞在するには 4,000~6,000 万ドルかかる。高度で数分間の無重力を体験する旅行であれば 45 万ドルで楽しむことができるが⁹³、それでもなお一般消費者の手が届く金額ではない。

2040 年にはこの小旅行が 5 万ドル以下で提供されるようになると予測されている⁹⁴。宇宙空間への滞在も数百万円で提供される可能性がある⁹⁵。数百万円の旅行費用とは、日本人にとっては戦後初めて海外旅行が解禁された際のハワイ旅行程度の水準にあたり⁹⁶、一般消費者でも奮発すれば不可能ではない金額だ。スカパーJSAT の調査によると、宇宙旅行 (1 週間) に行きたいと思える金額の上限は平均 229.6 万円で、「500 万円以上でも行きたい」と答えた人は約 17%いた⁹⁷。数百万円レベルの料金が実現すれば夏休みの思い出

作りに宇宙を旅する家族も現れるだろう。

料金が下がるのは、主にロケットの技術革新と量産効果によって宇宙空間に物資や人を運ぶコストが下がるためだ。米 SpaceX は従来使い捨てだった機体の再利用やエンジンの量産等によってコストの削減に成功し、同社のロケット「Falcon Heavy」は高度 200~1,000km の地球低軌道への輸送コストが 1500 ドル/kg と、「Space Shuttle」(1981 年時点) の約 40 分の 1 の水準にある<図表 7-2 1>。さらに現在開発中の大型ロケット「Starship」では同 40 ドル程度に下がる可能性がある⁹⁸。米 SpinLaunch は遠心力を使って上空へ物体を放り投げる技術を開発する⁹⁹など、ロケットを使わない新しい打ち上げ方法でコストを抑える試みもある。

図表 7-2 1 地球低軌道への輸送コスト



(出典) 内閣府「宇宙輸送を取り巻く環境認識と将来像」より当社作成

⁹² The New York Times, “\$20 Million Paid for a Ticket, But Tenacity Paved the Way”, Apr.27,2001.

⁹³ 米 Virgin Galactic が提供する。高度約 85km を飛行し、国際航空連盟 (FAI) が定義する宇宙 (高度 100km) に達しないが米空軍の定義 (同高度 80km) は超える。

⁹⁴ Citi GPS “SPACE The dawn of a New Age”, May.9, 2022.

⁹⁵ 将来宇宙輸送システムは 2040 年の出発を想定した宇宙旅行の「先行予約」(アンケート) を開始した。料金は 7 泊 8 日で 300 万円~ (将来宇宙輸送システム「宇宙旅行の先行予約を開始。三井住友海上と宇宙旅行保険の検討も推進」(2023 年 12 月 20 日))。

⁹⁶ 1964 年の「ハワイ 7 泊 9 日」の費用は 36 万 4000 円で大卒国家公務員初任給の約 19 倍だった (日本経済新聞電子版『「地球の歩き方」と歩く海外旅行自由化 50 年」,2014 年 4 月 3 日)。

⁹⁷ スカパーJSAT「宇宙に関する意識調査 2024」(2024 年 3 月)

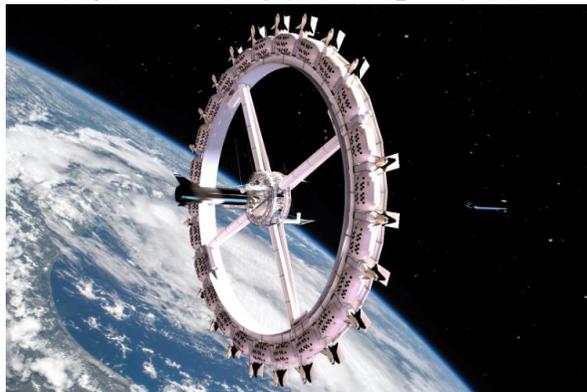
⁹⁸ 内閣府「宇宙輸送を取り巻く環境認識と将来像」(2023 年 6 月 27 日、宇宙政策委員会宇宙輸送小委員会配布資料)

⁹⁹ ロケットに比べ燃料コストを 70%以上削減できるという (住友商事「宇宙への革新的な打ち上げを目指すパートナーシップ締結」(2023 年 9 月 8 日))。

◆宇宙ホテルに逗留

多少お金に余裕がある人であれば、地球軌道上や月面に滞在することも可能になるだろう。現在軌道上で人が滞在できる施設は国家が保有する宇宙ステーションのみだが、民間人が宿泊や研究活動に利用できる「宇宙ホテル」が2020年代後半にも開業する。米 Above Space Development は主に企業の研究開発用途向けに最大28人を収容できる施設を2025年にも稼働させる方針で、さらに観光客向けに400人を収容できる施設の計画もある¹⁰⁰〈図表7-22〉。滞在中は青く輝く地球を眺めながら食事したり、大気の影響を受けない環境で遥かかなたの天体を観測したりして過ごす。無重力の中でスポーツをすれば超人的なプレーを楽しめるだろう。地上から食料を運ぶと費用がかさむため、提供する食事は宇宙空間で生産した培養肉を使うことを想定している。同社のホテル滞在費用は3日間で500万ドル程度になるとみられている¹⁰¹。

図表 7-22 「宇宙ホテル」の予想図



(出典) Above Space Development ホームページ

アルテミス計画などにより2040年頃には月面にも一定数の人が常駐している可能性が高い。人間が生活できる環境を確立できれば、月面は国家機関や企業が活動する場所としてだけでなく、旅行の候補にもなるだろう。月面では「地球見」や天体観測のほか、軌道上の宇宙ホテルより広い空間を確保

できる利点を生かして楽しむスポーツが主な楽しみになる。アポロ計画で実際に行われたゴルフのほか、バレーボールやカーレースなど多様な月面スポーツが考案されている。月面テーマパークの開業を目指す企業もある¹⁰²。

◆地球上の高速移動にも活用

低軌道で数分間の無重力を体験する小旅行に使う技術は「サブオービタル（準軌道）飛行」と呼ばれ、地球上の都市間などを長距離移動する「高速二地点間輸送」にも利用されるようになる。例えばSpaceXはニューヨークー上海間を39分と飛行機の20分の1程度の時間で結ぶ構想を持っている¹⁰³ほか、日本のスタートアップである将来宇宙輸送システムは地球上のどの都市間も90分以内に移動できるサービスを目指している。

飛行1回あたりの料金は2040年に10万～20万ドル程度と予想され、一般旅行者の利用には適さないが、プライベートジェット機による移動と大きな差はない水準であり、富裕層を中心に一定の利用が見込まれる。2040年の市場規模は高速二地点間輸送が70億ドル、宇宙旅行が10億ドル規模になるとの予想がある¹⁰⁴。

(2) 月面基地勤務ヲ命ズ

米国が主導する月面探査プロジェクト「アルテミス計画」等を推進力として、月や火星といった「深宇宙」¹⁰⁵の開拓時代が2020年代後半に幕を開ける。アルテミス計画には日本やカナダ、英国、オーストラリア等約30か国が参加する。2026年にも月に有人着陸した後、月面での持続的な人類活動を目指す。中国も別の開発計画「月面研究基地（ILRS）計画」を進めており、ロ

¹⁰⁰ Orbital Assembly Corporation, “Introducing Pioneer Station”, May,10, 2022.

¹⁰¹ Business Insider, “Book an out-of-this-world vacation. The first-ever 'space hotel' is set to open in 2027.”, Mar.7, 2021.

¹⁰² Spacetainment 社は月面テーマパーク構想を持つ（ABEMA TIMES 「『月面に遊園地を作る』“宇宙エンタメ”企業が掲げる目標と課題」（2022年1月25日）

¹⁰³ SpaceX YouTube channel, “Starship | Earth to Earth”, Sep.29,2017.

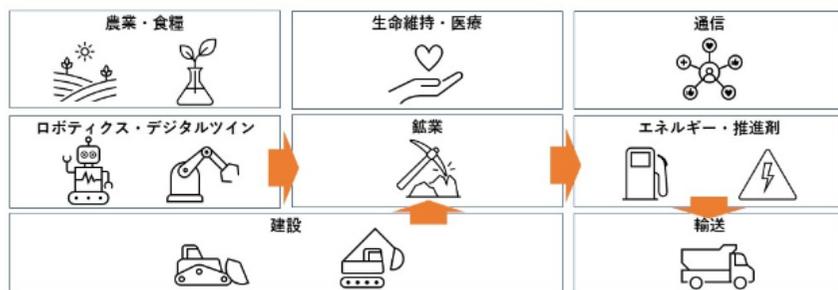
¹⁰⁴ 前掲注94

¹⁰⁵ 「深宇宙」は国際電気通信連合（ITU）が世界無線規則として「200万km以遠」と定義する一方、国際宇宙探査においてはNASAや文部科学省などが「地球低軌道以遠」とするなど、学際的に共通した定義は定まっていない。

シアやパキスタン、エジプト等約 10 か国が参加して 2030 年代の月面基地建设を検討している。

こういった開発計画を背景に月面の利用は 2030 年代前半から本格化し、輸送や資源採掘、エネルギー、食料生産といった多様な産業で構成される「月面経済圏」が立ち上がる<図表 7-23>。2040 年頃には、月の周回軌道に設置される連絡拠点「ゲートウェイ」や月面に 1000 人程度が居住できる施設が整備され、月面経済に参画する企業の従業員らが数カ月間にわたって滞在する¹⁰⁶。2040 年には火星にも継続的に滞在する人がいる可能性がある¹⁰⁷。

図表 7-23 月面で多様な産業が立ち上がる



(出典) PwC コンサルティング「月面市場調査 市場動向と月面経済圏創出に向けた課題」

◆沸き起こる「ムーンラッシュ」

月面における産業の主役は資源採掘になるだろう。中でも生命維持やエネルギー源として重要な水資源の開発が先行して進む。月面開発は火星や小惑星といったさらに遠方に向かうための拠点整備の意味合いが強い。水は生命維持や農業などだけでなく、電気分解した水素と酸素使ったロケット燃料の原料としても活用される。大気がほとんど存在しない月では水は太陽光に当

たると蒸発して飛散してしまうが、極域のクレーターなど太陽光があたらない場所で氷として存在していると考えられている。

このほか「ヘリウム 3」というヘリウムの同位体元素や、チタン鉄鉱（イルメナイト）等の活用が模索されている。ヘリウム 3 は次世代エネルギーとして開発が進む核融合発電の燃料になるが、地球では希少なため月の豊富な埋蔵量に期待がかかっている。チタン鉄鉱はチタンや鉄、酸素等を含む鉱物で金属の原材料として利用できると考えられている。こういった資源は当面は月面での利用が中心になる。地球に持ち帰るには、特に金属が重量の問題で輸送コストが高くつくためだ。月面の資源採掘市場は 2040 年までに年間 120 億ドル規模になると予想されている¹⁰⁸。

◆月面を「テラフォーミング」

ロケットによる輸送ビジネスも盛んになる。月面に多様な設備を構築するには地球から大量の資材を運ぶ必要がある。2040 年に月に 1,000 人が居住すると仮定した試算によると、2020 年代から 2040 年までの累計で輸送ビジネスの市場規模は 1,500 億ドルに達する¹⁰⁹。

ただ地球から物資をすべて持ち込むと莫大なコストがかかってしまう。人が継続的に活動するには月で採掘した資源を使ったり循環させたりする必要がある。すなわち月面を生存可能な環境に作り替える「テラフォーミング」に関連する産業が盛り上がる。

エネルギーは太陽光発電が主要な電源になる。月では天候の影響がなく 24 時間日照を得られるため効率的に発電できる。太陽光電池の材料となるセラミックスやガラス等も月の素材で生産する。ただ昼と夜が 2 週間ごとに訪れる月では発電できない期間が 2 週間続くことから、昼と夜のエリアをつなぐ

¹⁰⁶ 月面産業ビジョン協議会「月面産業ビジョン Planet6.0 時代に向けて」（2021 年 7 月）

¹⁰⁷ SpaceX のイーロン・マスク CEO は火星都市の建設を目指している。

¹⁰⁸ Citi GPS “SPACE The dawn of a New Age”, May.9, 2022.

¹⁰⁹ PwC コンサルティング「月面市場調査 月面経済圏創出に向けた課題」（2021 年 9 月）

送電網や大型の蓄電池を設置する¹¹⁰。ほかの電源として水素と酸素から発電する燃料電池¹¹¹や、原子力発電も導入されるだろう¹¹²。

食料については野菜等を栽培する「月面農場」が整備される。放射線などの影響を避ける閉鎖空間で酸素や二酸化炭素を循環させ、太陽や LED の光を使って植物を育てる。土は月面を覆う「レゴリス」と呼ばれる細かい砂を土壌に改良して使用する。肥料は月面で化学肥料を生産したり、人間が排出した糞尿や食品残渣といった有機性廃棄物を利用したりする。

施設の整備に必要な建設技術は、放射線や温度の影響を避けるため無人・遠隔が基本となる。現場の環境をデジタル空間に再現する「デジタルツイン」を活用して地球から建機を操作したりロボットが自律的に建設したりする¹¹³。限られた材料を効率的に

使うため 3D プリンターによる建設も導入されるだろう¹¹⁴。移動手段としては宇宙服が不要な「与圧ローバー」< 図表 7-24 > が普及するほか、磁力で浮きながら移動する「月面列車」が 2030 年代にも敷設される¹¹⁵。さらに観光などのサービス業を含む多様な産業が月面で成長していくだろう。

図表 7-24 トヨタ自動車が開発する
与圧ローバーの完成予想模型



(出典)「2024 国際航空宇宙展」にて当社撮影

《BOX》宇宙にも求められるグローバルガバナンス

宇宙における資源開発は国家間の法的ルールが確立されていない一方、複数の国で私人に開発を認める国内法を制定する動きが出ている。このまま月面開発が活発化すると参加者間の争いも起こりかねず、宇宙空間におけるグローバルガバナンスの構築を急ぐ必要がある。

宇宙活動に関する国家間の基本的な取り組みは「宇宙条約」で定められている。同条約は国連の宇宙空間平和利用委員会 (COPUOS) の下で 1967 年に発効し、2024 年 1 月時点で 114 か国が批准する。国家による天体の領有は禁止されており、私人の所有権も否定されると解釈される。ただ資源の所有には明確な規定がなく、議論が分かれている。月については COPUOS で 1979 年に定められた「月協定」で「月・資源は誰も所有できない」とされているが、これには米中をはじめ主要国が参加していない。

他方、宇宙産業の育成を進める国では国内法で企業に資源開発を認める例が相次ぐ。米国は 2015 年に「商用宇宙打ち上げ競争力法」で米国企業に月や小惑星の資源開発・販売を認め、ルクセンブルクやアラブ首長国連邦も資源開発の枠組みを法律で定めた。日本も 2021 年に施行した「宇宙資源法」で事業者による所有権取得を認めた。

米国主導の「アルテミス合意」(2020 年) で資源開発が宇宙条約に反しないことを確認するなど、一部の友好国間だけで合意を探る動きも強まっている。ただ月面開発を安定的に進めていくには、参加する全てのプレイヤーが順守するルールが必要だと考えられる。中露をはじめ多くの当事国を巻き込んだ合意形成を急ぐべきだろう。

¹¹⁰ 過酷な環境に堪える蓄電池として日本特殊陶業は月面用全固体電池を開発している。

¹¹¹ ホンダは燃料電池を用いた循環型再生エネルギーシステムを開発している。

¹¹² ロシアと中国は 2033~35 年頃に月面に原子力発電所を設置する検討を進めている

(Reuters “Russia says it is considering putting a nuclear power plant on the moon with China”, Mar.5,2024.)。米国も研究開発を進めている (NASA “NASA’s Fission Surface Power Project Energizes Lunar Exploration”, Jan.31,2024.)。

¹¹³ コマツはデジタルツイン技術を活用した月面建設機械の研究を進めているほか、大成建設や清水建設など多くの企業が無人・遠隔による建設技術を開発している。

¹¹⁴ 米 ICON Technology などは 3D プリンターによる月面建設技術を開発している。

¹¹⁵ NASA “Flexible Levitation on a Track (FLOAT)”, May.1,2024.