

## 宇宙開発の潮流と月面建設への将来展望

### 1. はじめに

宇宙開発黎明期である20世紀半ばから70年弱経過した現在、全地球測位システム（GPS）や通信・気象衛星といった宇宙を利用したサービスは、我々の生活に欠かせなくなった。また、2023年11月時点においては、国際宇宙ステーションに1年以上滞在した宇宙飛行士も数名おり、人類の生活圏はもはや地球軌道上まで広がったと言えよう。こうした宇宙開発は、これまで国家が主導し、国の宇宙機関並びに極めて少数の航空宇宙産業企業が実施するものであった。しかし2000年以降、ニュースペース（New Space）と呼ばれるスタートアップや民間異業種による宇宙技術の開発や実証、運用が盛んに行われている<sup>※1</sup>。

この潮流をより加速するトリガーとなったのは、2019年に米国連邦政府が発表したアルテミス<sup>※2</sup>計画<sup>1)</sup>であろう。同計画は、アポロ計画以来、再び人類を月に送り込むとともに、月周回ステーションの建設や月面への物資輸送・拠点建設、さらには月での継続的な居住活動を含むものとなっている。アルテミス計画が発表される以前の2018年には、14の国の宇宙機関から構成された国際宇宙探査協働グループ<sup>※3</sup>が、Global Exploration Roadmap<sup>2)</sup>とよばれるロードマップを策定し、将来の宇宙有人探査について「月から火星へ」という展望を示している。また我が国においても、日本の国際宇宙探査シナリオ<sup>3)</sup>、月面産業ビジョン<sup>4)</sup>、日本航空宇宙学会宇宙ビジョン<sup>5)</sup>などが発表されている。

これらの将来構想を概観すると、2050年までには地球と月は1つの大きなエコシステムとなり、科学文化・社会活動を含めて循環型の経済圏となることが展望されている。また、その前段階にあたる2040年代には月面に1,000人規模が居住、宇宙ビジネス全体では1兆ドルとなることが予想

されている。これらの実現のためには、エネルギー生成手段から居住設備の構築、さらには廃棄物処理・リサイクルに加え、有人の月面活動を持続的なものにするためのインフラ構築と実現に資する技術開発が必要となる。

本巻頭言では、2024年以降も加速する宇宙開発、特に月面建設の時流と将来展望並びに課題について述べてみたい。

### 2. 月面開発におけるミッシングリンク

前述の将来構想やロードマップに描かれる有人月面基地のイメージ像として、太陽電池パネル、エネルギー生成プラント、通信基地や居住モジュールなどが立ち並んでおり、「いつかこんな未来がやってくる！」と非常に心躍るものである。その一方で、「いつ・誰が・どのように・どのような順番でそういった基地を月面に建設していくのか？」という問いも同時に生じるものである。地上の技術を月面にそのまま適用できるのか？地球から月面への高額な輸送コスト<sup>※4</sup>をどうするか？数十トンの大型建設機械を月面に輸送展開することは費用対効果が著しく低下するのではないかなど検討事項は多数ある。これに加えて、持続可能な地球・月圏のエコシステムが成立するかどうか、その不確実性を考慮せざるを得ないため、月面開発技術への投資リスクが発生し、地球技術とのデュアルユースを視野に入れた開発（すなわち機械の大型化）というジレンマが発生するだろう。また、月面に構築する構造物に関する建築設計基準が存在していないことも問題となる。月面という過酷な環境での構造物には一定程度の安全係数を維持する必要性はある。しかし過剰な安全係数はコストの超過を招くとともに、特定技術を有するプレイヤーのみが建設可能という非競争領域が発生してしまい、産業化が阻害されるかもしれない。あるいは基準が制定されない以上は参入



慶應義塾大学 理工学部 准教授 **いしがみ げんや**  
**石上 玄也**

リスクが高いと感じ、いずれにせよ競争が生まれなくなってしまう。

以上のような問いを議論するべく、2023年3月に開催された第1回月面建設技術シンポジウム<sup>※5</sup>において、筆者がファシリテータとなり産官学の有識者を交えてパネルディスカッションを行った。その結果、以降に示す4つのミッシングリンクを繋げる活動こそが、将来の宇宙開発における土木建設の役割となることを提唱した。

- ①技術のミッシングリンク：現状の地上技術を月面で使用する場合の技術ギャップや新規開発項目を分析及び詳細化すること。
- ②フェーズ間でのミッシングリンク：総花的なロードマップやシナリオではなく、月面開発のフェーズごとに必要となる技術や構築すべきインフラを順序付けすること。
- ③ルール of ミッシングリンク：地球上での建築設計基準に限らず、月面輸送着陸、通信など様々なケースでの法整備あるいは各国との調整あるいは条約制定が必須であること。
- ④組織間のミッシングリンク：異なる研究機関・プロジェクトなどにおける類似する研究開発については、組織間相互での情報発信と交流を積極的に行うこと。

これらのミッシングリンクを埋める活動を産官学のチームジャパン体制にて実施していくことこそが、将来の月面開発における日本の更なるプレゼンス向上に繋がるであろう。

### 3. おわりに

1820年に南極大陸が発見されて以降、今では南極の研究施設において1,000~5,000人が常駐している。天然資源採掘や領有権は南極条約に

よって制限されているため、南極では大きな経済や産業が開花することはなかった。しかし、南極の拠点構築においては、建設技術が主たる役割を担ったこと言うまでもない。今後の月面開発及びその利用においても、その経済規模によらず、建設施工技術はまさに地（月）に足の着いた主たる技術として月面活動を支えていくであろう。

#### <参考文献>

- 1) NASA, *NASA's Lunar Exploration Program Overview*, September 2020.
- 2) International Space Exploration Coordination Group, *The Global Exploration Roadmap*, January 2018.
- 3) JAXA国際宇宙探査センター、日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2019/2021。
- 4) 月面産業ビジョン協議会、月面産業ビジョン—Planet 6.0時代に向けて—、2021年7月。
- 5) 日本航空宇宙学会、JSASS宇宙ビジョン2050、2019年3月。

#### 【用語解説】

- ※1 最も顕著な事例はスペースX社が提供している宇宙輸送サービス（2022年には年間61回の打ち上げに成功）であろう。
- ※2 アルテミスはギリシア神話の月の女神である、アポロ計画の由来であるアポロンとは双子とされている。
- ※3 International Space Exploration Coordination Group (ISECG)。現在は27の宇宙機関から構成されている。
- ※4 米国の民間輸送サービスの場合で、月面までの輸送費用は1kgあたり120万ドル（2023年11月時点）となっている。
- ※5 土木学会建設用ロボット委員会主催。第2回は2024年3月22日にハイブリッド開催予定である。

#### 【著者紹介】石上 玄也（いしがみ げんや）

2008年東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修了 博士（工学）。MIT Postdoctoral Associate、JAXAプロジェクト研究員を経て、2013年より慶應義塾大学に着任。国土交通省宇宙建設革新会議議長など。専門分野はフィールドロボティクスやテラメカニクスなど。