

特別企画② 今後の建築技術の展望

宇宙居住に向けた取り組みの 歴史・現状・展望

History, Current Status, and Prospects of Research and Development for Space Habitation

荒木 慶一*1、十亀 昭人*2、鶴巻 崇*3、山出 美弥*4

1. はじめに

近年、米中の宇宙機関を中心として人類の宇宙居住へ向けた研究開発が急速に展開している。米国においては、Space X社のイーロン・マスク氏や、Blue Origin社のジェフ・ベゾス氏を中心とした国家機関以外の参入も活発になり、かつてのアメリカ合衆国（以下、米国）やロシア連邦（旧ソビエト社会主義共和国連邦、以下、ロシア）の宇宙機関のみの開発競争の構図から大きな変化を遂げようとしている。これらの民間企業を筆頭として、様々な国々で人類の宇宙居住へ向けた本格的な動きが生まれている。

一方、日本における同分野の発展は、1990年前後の総合建設会社を中心とした宇宙建築の研究会の発足から始まり¹⁾、2000年前後の東京大学を中心とする宇宙建築に関する大学主導の研究会などを経て、2021年～2023年に活動を行った「日本建築学会宇宙居住特別研究委員会」、2024年から活動を始めた「日本建築学会宇宙居住小委員会」へと繋がっている。また、国内のいくつかの大学では、宇宙居住や有人宇宙探査に関する研究センターを設けて研究開発を推進している。

本稿では、日本建築学会宇宙居住特別研究委員会の報告書²⁾に基づき、世界の宇宙居住に向けた取り組みを概観した上で、我が国における宇宙居住に向けた取り組みの歴史・現状・展望を紹介したい。

2. 歴史

まず、世界における宇宙居住への取り組みの歴史を概

観した後、我が国における宇宙居住への取り組みの歴史について述べる。

2.1 世界における取り組み

宇宙居住に関わる世界の提案を時系列に並べると、ツィオルコフスキー氏の宇宙エレベーターの案（1885年）、また、同氏が著書「地球の外で」の中で述べたスペースコロニー（1916年）、ジョン・デズモンド・バナーン氏による球形の居住施設提案（1929年）、フォン・ブ라운氏のトラス状のスペースコロニー案（1952年）、ジェラルド・オニール氏（プリンストン大学）のスペースコロニー案（1969年）、などが、主要な提案として挙げられる。

このような宇宙建築に関わる提案を経て、米国において地球周回軌道上における居住空間の構築へ向けた構想が1970年代から進められ、1980年代の宇宙ステーション計画へと発展を遂げる。一方、結果として米国に先んじることとなったが、旧ソビエト連邦による宇宙ステーション「ミール」の構想もこれと同時に進んでいた。「ミール」は世界初の宇宙ステーションとして1986年に打ち上げられることとなった。

このような米ソの開発競争の時代を経た後、米国単独の計画であった宇宙ステーション計画は、ロシアを含む世界の国々の共同計画へと変わり International Space Station（以下、ISS）へと発展する。

2.2 日本における取り組み

日本における宇宙居住に関する研究の始まりは、建設会社から始まることとなった。まず、宇宙開発建設研究

*1 ARAKI Yoshikazu : 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 博士（工学）

*2 SOGAME Akito : 東海大学建築都市学部建築学科 教授 博士（工学）

*3 TSURUMAKI Takashi : Heatherwick Studio Associates Senior Designer

*4 YAMADE Miya : 立命館大学政策科学部 准教授 博士（工学）

会「CEGAS (Construction Engineers Group for Aerospace Study)」と名付けられた団体が発足する(1989年)。ここに関わっていたゼネコンは、全12社であり、大林組、清水建設、大成建設、鹿島建設、竹中工務店、東急建設、西松建設、フジタ、ハザマ、前田建設工業、鉄建建設、錢高組、(名称当時)となっている。CEGASの初代会長を務めた大林組の斎藤隆雄氏によれば、大林組と清水建設が奇しくも同年度に社内に宇宙チームを形成し始めたことがCEGAS発足の契機になったと指摘されている。CEGASの活動は、バブル崩壊後しばらくは続いたものの1990年代半ばには立ち消えになった。このような1990年前後の活発な活動期を経て、日本の宇宙建築研究は、バブル後の長い衰退期を迎える。

その後、2000年前後の東京大学、慶応義塾大学、東海大学などの大学研究者らによる宇宙建築の研究会「SARC」、2010年前後の大学横断型の宇宙建築サークル「TNL」、及びそこから派生した山崎直子宇宙飛行士などが関わる「宇宙建築賞」の活動、そして、2020年から始まった日本建築学会の宇宙居住特別研究委員会やその後の宇宙居住小委員会など、およそ10年ごとの盛衰の流れも明らかとなった。また、近年は京都大学、東京理科大学、立命館大学などにも宇宙建築に関する教育研究組織が生まれてきている。

3. 現状

3.1 国家研究機関における取り組みの例

米国のNASA(アメリカ航空宇宙局)、欧州のESA(欧州宇宙機関)、我が国のJAXA(宇宙航空研究開発機構)など、宇宙居住に向けた研究開発が多くの国家研究機関で精力的に展開されている。ここではNASAの最新の月開発計画であるアルテミスプロジェクトの大概略をつかみながら、そのプログラム内にある月を周回する新しい宇宙ステーションの建設の概要を見ていきたい。

現在、地球低軌道における宇宙開発が民間に解放されつつある。そうした中で、政府レベルが主導する宇宙開発は地球低軌道から月そして火星へとその焦点を移そうとしている。これは人類が地球に留まらず惑星間種族になろうという重大な決断の現れとして起きていることである。

こうして、アポロ計画から50年、長らく停滞していた月面有人探査へ向けた活動が米国の主導で再開された。2017年の第一次トランプ政権下で正式に設立されたアルテミスプログラムである。ギリシャ神話のアポロンの双子の姉妹である女神アルテミスが、このプログラムの

命名の由来である。

アルテミスプログラムは下記のような段階を経て、火星有人探査定住に向けた布石を作ることが大きな目的として設定されている。NASAが開発したSpace Launch System ロケット(以下SLSと記す)とオリオン宇宙船を用いた打ち上げミッションについてはアルテミスに通し番号を付加した計画名が付けられている。

1. アルテミスI：月周回軌道へ無人機による到達と帰還(2022年12月完了)
 - ・今後の有人探査に向けたデータ収集
2. アルテミスII：月周回軌道へ有人機による到達と帰還(2026年4月予定)
 - ・4人のクルーが月へのフリーリターン軌道を宇宙船で航行し帰還
3. アルテミスIII：月面への有人機による着陸(2027年中ばを予定)
 - ・民間開発の着陸船の運用と約6日半の月面有人探査
 - ・月面基地建設に必要な技術やデータと経験の蓄積
4. 計画番号なし(民間機打ち上げ)：月周回軌道の宇宙ステーションのモジュール投入
 - ・PPE(電気・推進エレメント)とHALO(居住・ロジスティクス拠点)を連結したユニットを無人で配備(4章参照のこと)
5. アルテミスIV：月面への有人機による着陸と月周回軌道の宇宙ステーションのモジュール追加

アルテミスIV以降の時期など詳細は流動的ではあるが一年に一度の有人ミッションにより、以下の事項が計画されている。

- ・月周回軌道の宇宙ステーション(通称ゲートウェイ)へのモジュール追加と機能拡張
- ・1から2ヶ月程度の調査活動のための滞在が恒久的な月基地の建設(アルテミスカンプ)
- ・月面に持続的に滞在できるインフラ環境を確立
- ・キャンプから長期間離れて探索が行える与圧された居住可能なローバーの投入

このように、月表面と火星への有人探査に向けた拠点としての月面基地アルテミスカンプの拡充拡大が計画されている。

月は地球に比べれば小さな天体であるが、限られた時間の中で探索しなければならない範囲は大きい上に、地形は複雑である。将来の火星探査についても同じ課題が見込まれる。こうした観点から、ベースキャンプから離れた環境で居住可能な与圧された移動式プラットフォームの開発は特に重要なミッションとしてアルテミスプロ

グラムの中では挙げられている。

NASA内部には、短期間で目標をクリアしていく短周期のリズムの重要性を強調する一方、設定されている時間軸は予算的にも技術開発的にも現実的ではないという意見も存在している。

アルテミスプロジェクトはNASAの他に3つの宇宙開発機構が、その主要な役割を果たす。これには日本のJAXA、カナダのCSA、それに欧州諸国で構成されるESAが重要参画組織として名を連ねている。

米ソ冷戦がアポロ計画を推進したように、地政学的な緊張と人類の宇宙進出の速度は無縁でない。アルテミスプログラムに参加を表明し、加入し得た欧州や日本を含む53カ国(2025年1月21日現在)に対して、ロシアと中国は独立した宇宙開発を行う予定である。米中の競争を強く意識し、アルテミスプログラムでの最初の月面有人探査の目標はNASAによって2028年から2024年に早められたが、宇宙服等の技術開発に必要な時間、資金調達、コロナ禍によって発生したプロジェクトの遅延などから、NASAの監査報告などでも言及される通り、早くとも2026年になると見込まれている。対する中国独自の月面有人探査は技術的環境が確実に整うことが前提だという慎重さを強調し、その時期は2030年ごろになるだろうと公言されている。両者は目標時間軸の設定に関してアプローチの違いを見せている。

多少の遅れが発生する可能性はあるものの、NASAと計画参加国は、アルテミスIIIで有人着陸が達成されれば、アルテミスプログラムの次の段階へと移行する。

このプログラムの目的は月に人類が回帰して終わるものではない。アルテミスIIIのミッション以降、つまり、2020年代の終盤から2030年代にかけて、月面有人探査をより強固なものにするために、月面に持続的に滞在できるインフラ、システムの構築を行い、ロボット・ミッションを強化していく。インフラの中には電力、放射線遮蔽、廃棄物処理、貯蔵施設、着陸船の発着場や道路、インターネットのような通信施設や航行を支援する座標システムなども含まれている。

同時に、モジュールの増設などでゲートウェイの機能を拡張し、ゲートウェイから発着する商業月着陸船の性能に対する信頼を確立した上で、月の南極にアルテミスベースキャンプを設立する。こうして人類が月に継続的に行き来し、人類初の火星有人ミッションを、月面を拠点にして行うところまで開発を進めていこうとしているのである。

3.2 我が国の民間企業における取り組みの例

3.2.1 大林組の取り組み

大林組は、1987年に「宇宙開発プロジェクト部」を設立し、宇宙開発に取り組んでいた。米国主導で、国際宇宙ステーションの計画が進められていた時代である。その後、1987年には「月面都市2050」構想、1990年には「マース・ハビテーション1」構想、1996年「スペース・ナッツII」建設構想を相次いで発表した。人類が地球以外の星として月に居住空間を求め、火星の資源を利用しながら快適に暮らす構想であった。ラグランジュポイントに宇宙構造物の建設を構想したものを提案した。その後、究極のタワーということで、東京スカイツリーの完成年2012年に、より高層の構造物である「宇宙エレベーター建設構想」を発表した。

2019年には、「未来技術創造部」が発足し、将来の布石を担う技術を担当し、5つのテーマのうちのひとつが宇宙である。大林組が宇宙へ挑む目的を下記に示す。

- (1) 大林組の事業を、宇宙というかつてない可能性を秘めた領域へ拡大する
- (2) 宇宙開発を通じて得られた技術を、地上でのものづくりに活かす
- (3) 宇宙と地上、両方の視点をもって、新たな挑戦を拓いていく

上記の目的に沿って、宇宙の事業領域を「宇宙へ行く」「宇宙に住む」「宇宙を使う」と分類した。「宇宙へ行く」取り組みでは、冒頭に紹介した「宇宙エレベーター建設構想」の他、洋上からのロケット発射、空中ロケット発射の取り組みも行っている。「宇宙に住む」取り組みでは、展開構造物による居住空間の検討、インフレーションによる恒久的な居住空間の検討、建設材料に利用する建材の開発、発電等のエネルギー対策技術、食の開発技術など多岐にわたる。「宇宙を使う」取り組みでは、衛星測位(GNSS)データを用いた建機の自動運転・遠隔操縦技術の実用化、ダム現場のコンクリート自動運搬システム、工事現場での測量や地盤変形モニタリングなどへの適用事例がある。

3.2.2 鹿島建設の取り組み

鹿島建設では、労務人口の減少や災害復旧時の二次災害を防ぐ為、施工の自動化や遠隔操作について研究を続けて来た。その技術の延長上で2016年よりJAXAと「遠隔操作と自動制御の協調による遠隔施工システム」の実現を目指した共同研究を行ってきた。この技術は月面での無人による有人拠点建設の実現につながると考えられる。また、2021年よりJAXA宇宙探査イノベーション

ハブの第7回研究提案募集で「無菌化およびバイオシグニチャー物質の除去を目途とした探査機の高度洗浄技術」の研究課題採択が決定し、関西大学と共同でプロジェクトがスタートしている。これは「惑星保護」といわれ、宇宙探査や開発を進める際に探査機が地球から他の天体へ生命・生体物質を持ち出し、現地環境を汚染してしまうこと、また他の天体から地球へ持ち帰った生命・生体物質を含む可能性のある物質によって地球環境が汚染されることを防ぐことを目的とする。

さらに2021年より、遠心力を利用する人工重力施設をテーマとした京都大学SIC有人宇宙学研究センターとの共同研究がスタートしている。遠心力を利用した施設を「宇宙建築」として具体的な生活空間の提案を行い、実現可能性を探る試みである。人類の長期滞在、あるいは世代交代には地球並の重力は必須であるとの考えの下、無重量状態、天体上、天体間移動状態等における人工重力施設を検討している。京都大学SIC有人宇宙学研究センターは「宇宙社会の実現」を目指しており、人工重力施設を生命維持システムに必要な技術体系「コアテクノロジー」の一翼とするとともに、地球生態系の代表を「コアバイオーム」、これらを備えた循環型の社会を「コアサエティ」と名付け、宇宙進出に最小限必須なものは何かを抽出することを目指した統合的な学問体系の構築を意図している。

3.2.3 清水建設の取り組み

清水建設は1987年に大手ゼネコンで初めて宇宙開発に向けた取り組みを始めてから現在まで30年以上に渡り、人類が宇宙に進出する際の安全安心の提供を目指した宇宙建設技術の研究開発を続けてきた。過去には宇宙開発事業団NASDA（現JAXA）の技術試験衛星VII型（Engineering Test Satellite VII、ETS-VII）での軌道上遠隔トラス組立などに関わった実績がある。また採用には至らなかったが米国カーネギーメロン大学と共同で国際宇宙ステーションのロボットアームの開発を実施した経験もある。

清水建設は将来ビジョンを「シミズドリーム」という名称で提案している。古くは1988年の「コンクリート製月面基地」構想として、地上建設で広く使われるコンクリートを用いた月面基地構想を発表した。これは人類が地球以外の他天体で営みを育む時代が到来する時代に建設会社としてどのように貢献できるかの一例を示したものであり、ユニット化されたモジュールを高度に自動化された生産システムにより現地資源を利用して大量生産し、それぞれのユニットを連結して内部に大空間を作

る構想となっている。

また、より大きな構想として2009年には「LUNA RING（ルナリング）」構想を発表した。ルナリング構想は月面の赤道上を一周する幅400kmの太陽電池ベルトにより発電した電気を地球にマイクロ波/レーザーで送電し、地球上のあらゆる場所に電気エネルギーを供給するクリーンエネルギーソリューションとして提案している。ルナリングは来る水素社会を前提としており、受電後は直接電力として使うほか、水の電気分解にルナリングのエネルギーを使うことで水素を製造することができ、水素の安定供給にも寄与することが可能である。

3.2.4 大成建設の取り組み

宇宙でより多くの人が暮らす月面社会を実現するには宇宙技術の蓄積に加え、自給自足・地産地消の新しい技術と物質循環の仕組みが必要となる。地球も閉じた空間であり、資源は有限である。宇宙における地産地消は、現在の地球でこそ実現に向けて取り組むべき要素を含んでおり、これらの技術は地球におけるレジリエントな社会づくりへのヒントになると考えられる。

2009年に日本の月周回衛星「かぐや」が撮影した画像により月面に直径50m以上の縦孔が発見された。この縦孔に付随すると考えられている地下の溶岩チューブの内部は、月面のような宇宙放射線や飛来物、大きな温度差などのリスクが少なく、基地建設には非常に有利な空間であると考えられている。

大成建設では月の縦孔を中心とした地下空間に豊かな生活空間を実現することを検討してきた。この地下空間に必要とされるのは、月面上での短期ミッションでの滞在を補完する役割として、長期滞在のために、安心感・開放感を提供できる空間であるとし、従来の月面活動での「閉鎖・集中型」の基地に対して、月地下空洞では「開放・交流型」の環境を作り、相互補完的な関係をつくるコンセプトとした。また、「①物理的な生存環境」（有人宇宙技術の視点）と「②心理的な居住環境」（建築的視点）の両立が必要である。月地下の空間は月面活動に不足するものを補い、自然の変化やリズムが感じられる多様な場所をつくり、「②心理的な居住環境」として、快適な環境で開放感のある、6分の1の重力に合わせてデザインされた場所となる。

3.2.5 竹中工務店の取り組み

竹中工務店は、1980年代後半よりニューフロンティア領域の一つとして宇宙建築分野への取り組みを開始した。1990年から「火星基地構想」の検討を始め、1992年にその構想を発表した。同時期には、微小重力状態で

の閉鎖系物質循環の研究として宇宙シャワーを想定した水滴の挙動実験などの研究活動も実施していた。

2010年代後半からは、産学連携やJAXAとの協業を通じて宇宙滞在に必要な技術開発を本格化させた。2018年には東京理科大学の「スペース・コロニー研究センター」に参画し、2030年以降の宇宙滞在に必要な技術の研究開発に着手した。2019年からは宇宙空間での長期滞在に不可欠な「食」の要素技術に関する基礎研究を開始し、2021年には国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟において、JAXA、キリンホールディングス、千葉大学、東京理科大学との協業で、世界初となる袋型培養槽技術によるレタスの栽培実験を実施した。

2021年からは、科学技術振興機構「ムーンショット型研究開発事業」にて、中央大学を中心とした研究開発チームの一員として、“低機能ロボット群”と“進化型ネットワーク知能システム”による、月面の溶岩洞窟における探査・輸送・活動拠点構築の実現に向けた研究開発を推進している。2023年からは、内閣府スターダストプログラムの一環である国土交通省「宇宙無人革新建設技術開発」に参画し、東京大学、九州大学、JAXAとともに、月面での「ベースキャンプ」構築を目指した技術開発を実施している。竹中工務店はその中で、宇宙飛行士が居住するための「滞在モジュール」の内部建築計画・設備計画、高密度緑化計画の検討を進めている。

これらの多様な取り組みを統合し戦略的に展開するため、2023年に宇宙建築タスクフォース (Takenaka Space Exploration, 通称TSX) を組織し、宇宙生活におけるQOL向上を目指した技術開発を推進している。

3. 2. 6 安井建築設計事務所の取り組み

安井建築設計事務所は、1924年に安井武雄によって創業され、2024年の100周年を機に新たな挑戦として宇宙ビジネス室「YES,」(YASUI EARTH and SPACE) を立ち上げ、宇宙ビジネスへの取り組みを開始している。「YES,」が注力する宇宙ビジネスは大きく3つの領域に分類される。まず、①地球上では、宇宙港を起点としたまちづくりや、ロケット発射技術を支える仕組みの構築支援を行う。次に、②宇宙空間では、極限環境下での居住快適性の向上を目指し、そして、③他惑星内では、過酷な環境下でのランドスケープデザインに挑戦する。これら、技術的ハードルの高い宇宙に関する取組みを通して、地球上の日常生活や建築に応用可能なソリューションの創出を直近の目標としている。

また、同社社長を引き継いだ安井武雄娘婿の佐野正一は、一連の「日本国有鉄道新幹線停車場」で1964年に

日本建築学会賞を受賞するなど、駅舎建築を重要なビルディングタイプとして確立してきた。近年では「大阪国際空港」や「東京国際クルーズターミナル」、「長崎駅」など、陸・海・空のターミナル建築の実績を積み重ねている。

こうした実績を背景に、同社は宇宙機の離発着拠点となる宇宙港の開発に着目している。宇宙空間を経由して大陸間を高速で移動する「P2P」輸送が実現すれば、宇宙はより身近で民間にも開かれたものとなる。さらに、宇宙機搭乗による身体的負荷を考慮すると、搭乗前・中・後における身体のケアが極めて重要である。安井建築設計事務所は、地球はもとより他惑星においても、宇宙居住の始まりとなる宇宙港が周辺地域と連携し、人々のウェルビーイングとQOL向上の拠点となる未来を目指している。

4. 展望

本稿で報告した内容は、著者らが委員を務めた日本建築学会宇宙居住特別研究委員会の活動の下で行われたものである。今後、これらの取り組みを通して浮かび上がった課題の整理と、課題解決に向けた研究開発を継続して行う必要がある。

宇宙居住特別研究委員会の活動を通して、JAXAなどの宇宙居住施設の仕様を決める側と、設計者や建設会社などの仕様に沿って設計や建設を行う側で、スムーズな情報交換を行うための環境整備が重要な課題であることが明らかになった。2024年度から活動を開始した日本建築学会宇宙居住小委員会では、このような環境整備を進めるべく活動を進めており、大学や国家研究機関の研究者や本稿で紹介した以外の民間企業の技術者を新たにメンバーとして加えて、宇宙居住に向けた設計指針の作成や月面基地の日本案の提案などに向けた活動を行っている。これらの成果は、学会でのシンポジウムやパネルディスカッションなどの形で公開していく予定である。

【参考文献】

- 1) 山出美弥、佐々島暁、十亀昭人：宇宙建築学の萌芽期に於ける日本建築界の動向－宇宙開発建設研究会CEGASを事例として－，日本建築学会技術報告集，29巻，73号，pp. 1624-1629，2023.
- 2) 日本建築学会宇宙居住特別研究委員会報告書，2023

【謝辞】

本稿の3.2章の執筆において瀧田安浩氏（大林組），大野琢也氏（鹿島建設），鶴山尚大氏（清水建設），庄司研氏（大成建設），大畑勝人氏（竹中工務店），篠原佳則氏（安井建築設計事務所）の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

【執筆者】



*1 荒木 慶一
(ARAKI Yoshikazu)



*2 十亀 昭人
(SOGAME Akito)



*3 鶴巻 崇
(TSURUMAKI Takashi)



*4 山出 美弥
(YAMADE Miya)