

月の居住施設建設に関する技術開発と地上への展開

庄司 研^{*1}・山田 誠一^{*1}・佐藤 大樹^{*1}・林 俊光^{*1}・村瀬 宏典^{*2}・大石 悠平^{*2}

Keywords : lunar surface, underground space, living space, construction, closed space, material circulation

月面, 地下空間, 居住空間, 建設, 閉鎖空間, 物質循環

1. はじめに

フロンティアを目指す技術領域として宇宙開発がある。月の極限環境での長期間の生活を継続可能とする技術の探求は、人が安心して健康的に生活するために必要なものを見直すきっかけとなり、レジリエントな社会づくりへのヒントも得られる。

人の生活を支える最も基本的な部分に、地球上の物質の「循環の仕組み」がある。月に長期滞在する場合にはその仕組みを生存環境の土台として人工的に再現することが必要となり、地球ではどのような仕組みで循環が成り立っているかを振り返って考える。つまり宇宙居住を考えることは、遠い未来の夢を考えるものではなく、今の地球上の居住を成立させている環境を見直すことでもある。

月の居住施設建設に関する技術への取り組みでは、宇宙の極限環境の制約下でも機能する信頼性が求められ、地上技術の延長線上では発想できない革新的な技術を得るようなイノベーションにもつながっていく。本報では、月の居住空間を実現させる技術と地上への展開に関して述べる。

2. 月地下の居住空間構築コンセプトと必要な技術

2.1 月地下居住のコンセプト

月の有人拠点には2通りの役割が考えられる。月表面での短期・集中的な探査活動を支える「少人数・訪問型」の基地と、月地下空洞内の安全で癒しのある「多人数・滞在型」の居住空間である(図-1)。これらは相互補完的な関係にあり、月面の緊張感のあるミッションから解放されることで、人の生活に変化とバランスをもたらすことができると期待される。月の地下

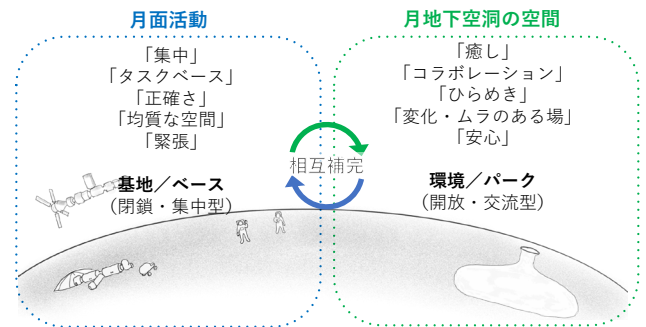


図-1 月地下空間のコンセプト

Fig.1 Concept of the moon underground space

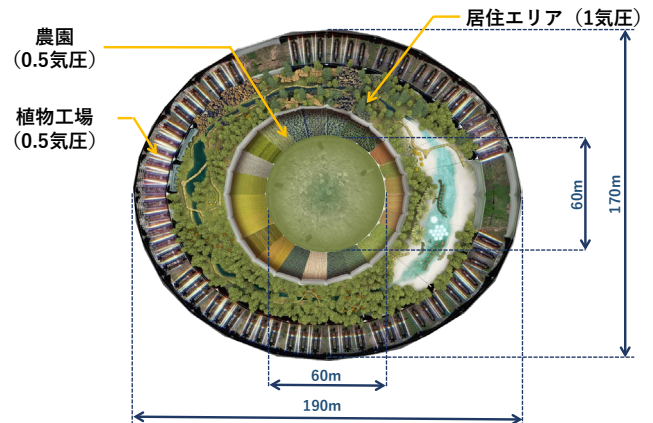


図-2 居住空間のゾーニング例

Fig.2 Living space zoning

居住の計画では、「物質的な生存環境」への「月というコンテキストを読み込み、活かす」というエンジニアリング的アプローチと、「心理的な居住環境」への「人が望む場所や活動を考える」というヒューマンオリエンテッドなアプローチの両方が必要である。

2.2 月地下居住の空間構成

月地下の空洞(溶岩チューブ)内部は、宇宙放射線や飛来物の危険がなく、軽量な材料で大規模な居住空間の構築が可能であると考えられる¹⁾。ここに縦孔を

*1 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室

*2 設計本部 建築設計第一部

中心とした同心円状に3種の空間を計画した例(図-2)を示す。月の縦孔は地下と地上とをつなぐ動線であり、太陽光の導入経路でもある。太陽光はミラーで反射させて採光利用するとともに、太陽光による熱活用や発電もできる可能性がある。

「開放・交流型」の長期滞在の場とするため、多様な空間を内在した大空間をつくりその中に居住モジュールを構築することで、宇宙服なしでも部屋から出られる「外」ができる。これに加え昼と夜、季節の変化も再現した地球に近い環境を作ることによって安心感のある空間が実現できるものと思われる。(図-3)

2.3 月地下居住の環境調整に関わる技術

2.3.1 閉鎖系における物質循環システム

宇宙活動において居住環境を維持するためには、呼吸のための空気、人が消費する水、食料などの物資を供給(Input)し、廃棄物(Output)を処理することによりそれらのInputとOutputの流れの収支がとれることが最低限必要な条件である。地上約400kmに位置する国際宇宙ステーション(ISS)においても空気や水は90%を超える高いリサイクル率であるものの、食料供給や廃棄物の処理などは地球からの補給・回収に依存しており、地球から離れた場所で持続させるにはまだ多くの課題が残っている²⁾。これに対し、月は地球から約38万kmの距離に位置しており、地球からの頻繁な物資輸送は困難である。そのため月では必要な物資を完全に循環利用することが重要な課題となる。

これは地球においても近年サーキュラーエコノミーとして議論されている概念に近い。宇宙の閉鎖環境における物質循環システムが完成すれば、地球においても要素技術を活用できると考えられる。

2.3.2 居住環境維持に関する技術の概要

図-4に月の居住施設の構成要素を示す。農園、居住、植物工場のエリアに対して、第1に空気の組成、圧力、温湿度等を適正に調整することが、生存環境を維持する上で最も重要である(基本環境インフラ)。第2に飲料水をはじめ衛生的な生活に必要な不可欠な水の再生利用に関する持続可能な仕組みがある。そこに食料、廃棄物の流れを維持するインフラが必要となる(生活インフラ)。この居住空間の環境維持に必要なエネルギーとして、電力と温熱、冷熱の供給があり、エネルギーも含めた全体がシステムとしてバランスを維持するように制御・運用する。

2.3.3 パッシブな技術の活用

表-1に居住空間内部の環境要素と調整技術の例⁵⁾を示す。パッシブ技術は電力が不要であり、周囲の環境と

の関係性から作用・効果を引き出すことができる。しかし効果は緩やかで小さく不安定な場合もあり、環境調整の即応性はあまり期待できない。これに対してアクティブ技術は機械装置を用いるための電力が必要であるが、安定した環境を維持する上で不可欠である。

月での環境調整にパッシブ技術を活用してエネルギー消費を減らすことは、エネルギーインフラの小規模化にもなり大きな価値を持つと考えられる。



図-3 居住空間のイメージ(昼)
Fig.3 Image of living space (daytime)

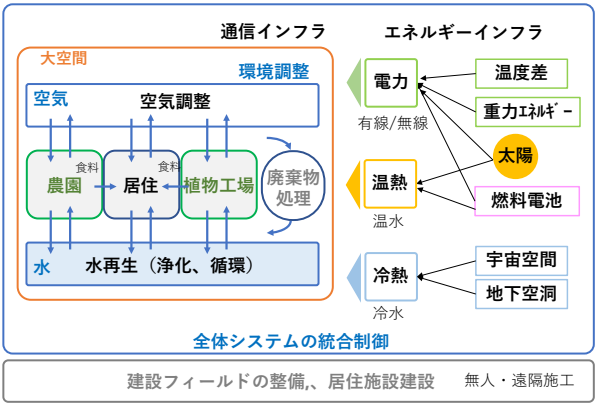


図-4 月の居住施設の構成要素
Fig.4 Components of the lunar habitats

表-1 環境要素と調整技術の例⁵⁾
Table1 Environmental factors and adjustment techniques⁵⁾

環境要素	パッシブ技術	アクティブ技術
温度	放射冷却(冷熱) 日射受熱(温熱) 断熱	ヒーター(温熱) ヒートポンプ(冷熱・温熱) 冷凍機(冷熱)
湿度	人(呼吸、汗) 植物(呼吸等) 水面	加湿器 ミスト
光	自然採光	LED照明
風	温度差による対流	送風機
空気調整 (成分、圧力)	光合成 呼吸 内外圧力差	水の電気分解 圧縮ガスポンプ サバチエ反応 吸着材利用
空気浄化	多孔質建材(吸着)	空気清浄機
食料生産	農園(人が栽培)	植物工場(自動栽培)

2.3.4 太陽熱・太陽光利用技術

月で必要なエネルギーは主に太陽から得る。温熱と冷熱をできるだけ電力によらず確保するため、昼は太陽熱で温水を作り夜間に放射冷却で冷水を作り蓄熱して冷暖房の熱源を得る計画とする。蓄熱媒体は熱容量が大きく搬送も容易な水が他用途にも使え候補となる。

エネルギーインフラは建設の初期段階から必要であり、熱・電力の需要予測を元に、段階的な能力拡大も視野に計画する。

2.3.5 内部の圧力制御

居住空間内の気圧の維持は空間構築の構造強度や人体への影響もあり重要なテーマである。健康への影響が小さい範囲で気圧をできるだけ低く抑えることは、内圧を抑制し構造的な負担を軽減するとともに、空気輸送の点でも有利である。仮に地球と同じ 1 気圧を維持するには、壁面に約 100kPa の圧力がかかる。その実現には強度と気密性を有する接合・構築方法の工夫が必要となる。

本計画では縦孔に近い順に農園、居住エリア、植物工場を隣接させ、各空間を構成する壁が段階的に圧力を負担する計画とした。植物は低圧環境でも生育することから^{3),4)}、各エリアの内部圧力は、中心の居住エリアは 0.7~1 気圧、隣接する植物栽培エリアは 0.5~0.7 気圧程度と想定した。これにより植物生育への影響を最小限として必要な空気量を減らすことができる。

2.3.6 温湿度制御

居住空間の温湿度環境の制御は、エネルギーの効率を考え最小限の電力で行いたい。そこで外皮の断熱性の調整による温度制御の可能性を考える。居住空間は基本的には外部環境に対して十分な断熱をすべきであるが、内部が冷房か暖房かにより、外壁の断熱性能を変化させてあえて熱の流れを作ることにより、空調エネルギーを削減できる可能性がある⁵⁾。また湿度調整には居住空間の緑化計画も植物の蒸散効果が期待でき、省エネルギー的にも有効と考えられる。

3. 月面環境における建設技術

3.1 月面環境の特徴

月面では真空、昼夜の温度変化など厳しい環境条件の中での無人での施工計画が求められる。以下に月の環境条件を示す。

3.1.1 太陽光による温度の変化

月面は真空で、昼と夜が約 14 日間ごとに入れ替わる。昼には月表面は 110℃に達し、夜間や日影は-170℃まで

低下する。このため、油圧を用いた動力機構は使えない。また、空気がないことから対流による熱移動が生じず、機器の放熱が課題となる。

3.1.2 放射線環境

地球は大気や地球の磁場により宇宙放射線から守られているが、月表面では放射線遮蔽が課題となる。放射線の影響を受ける電子機器等は放射線防護が必要であり、故障リスク回避のため地下空間が有利となる。

3.1.3 1/6 の重力

月の重力は地球の 1/6 であり、重量が軽くなるため構造物の構築がしやすいという利点があるが、地面の掘削のような大きな力を要する場合、地上の重機のように自重で反力を支えることができない問題がある。

3.1.4 レゴリス（月の砂）

レゴリスは 1mm より小さい粒子が多く、摩耗が少なく鋭利で、有機物を含まない。静電気や磁気を帯び、ローバーやロボットなどの可動部分への侵入や人体への影響が懸念される。

3.2 モジュール工法による居住空間の構築

大規模な居住空間を実現するには継続的・段階的な建設工事が必要であることから、同形状のモジュールを共通に用いる拡張可能な工法が有効である。図-5 に六角形モジュールのイメージを示す。モジュール同士を連結した後、内部の壁を撤去することにより内部空間を広げられる。これを実現する材料として熱可塑性 CFRP が考えられる。拠点構築の初期段階から少ないモジュールでも稼働し、時間をかけて拡大・成長していけるような計画を想定している。また、モジュールは展開構造を工夫し無人化施工を可能とする。

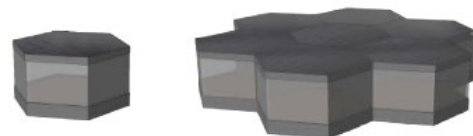


図-5 六角形モジュールのイメージ

Fig.5 Image of hexagonal module

3.3 無人化施工技術の活用

3.3.1 地上における無人化施工

月での建設においては、無人化施工が前提となるが、地上においても建設労働者の減少の問題から、省人化、高効率化が喫緊の課題となっている。そのため国交省は「i-Construction2.0」で 2040 年度までに建設現場の省人化を進めることを明確にしており、宇宙における無人化施工技術を研究することにより、地上にも貢献できると考えられる。

無人化施工技術は、現在、地上においては複数の自

建設の遠隔施工を含む自動運転技術には、自車の位置や姿勢を把握する自己位置推定が重要である。月面では、地上のような GNSS^{注1)}の測位衛星が利用できず、周囲に特徴となるオブジェクトが乏しいと想定されることから推定方法の研究が進められている⁷⁾。一例として、環境情報を活用する LiDAR-SLAM^{注2)}と、人工的な特徴点(AR マーカ)を活用するランドマーク SLAM を組み合わせた方法で、高精度な自己位置推定の実現を目指している⁸⁾。(図-6)

月の重力は地球の $1/6$ であるため、岩石の破壊および掘削に必要な反力を得るには、相応の質量を有する機材を用いるか別手段により月面に機材を確実に固定する必要がある。どちらの方法も、地球から資機材を運搬する際のペイロードの制約を考慮すると現実的ではない。そのため、無反力もしくは極めて小さな反力で岩石を破碎する研究が進められている⁹⁾。これは岩石表面に大きな温度変化を短時間で与えることで、熱応力により岩石表面を剥離、破壊させるものである。月面において電力や太陽光を利用して、破壊したい岩石の所定の位置に熱を与えることができれば、岩石を破壊する装置の小型化が可能になる。

建築 BIM は多数の情報を 3 次元モデルに統合・活用するものであり、複雑な宇宙建築プロセスの計画・管理に応用できる可能性がある。宇宙のミッションにおいては様々な専門分野の技術が組み合わされて実現することから、月面環境の影響も含めた複合的な環境状況を事前に再現し課題を検討することが必要である。専門分野を横断した情報を一元管理・共有することにより、前後プロセスとの関係を踏まえたコミュニケーションが取れ、合理的な計画立案に貢献できる。図-7 に LifeCycleOS^{®10)} の概念図を示す。LifeCycleOS は建設段階から運用、廃棄まで、建物のライフサイクルを通じて情報を管理・活用する仕組みである。月面の拠点建設においては、投入した資源は最終的には新たな資源としての活用を求められることから、LifeCycleOS の応用が資源循環管理には有効と考えられる。

空気は閉鎖空間で最も重要な環境要素である。呼吸



Fig.6 SLAM autonomous driving using AR markers⁷⁾

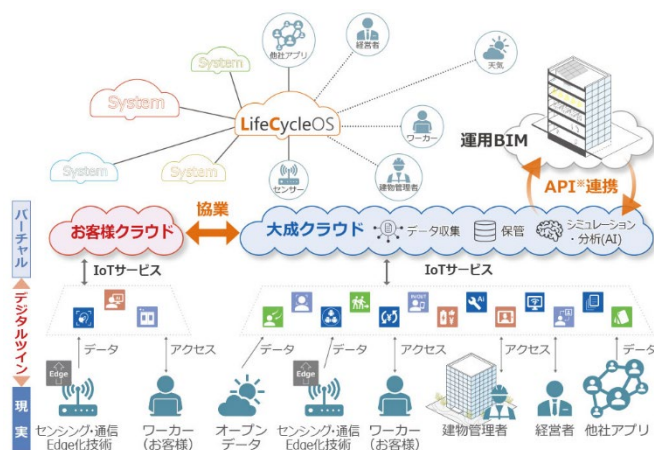


Fig.7 Conceptual diagram of LifeCycleOS¹⁰⁾



Fig.8 WELL certification items¹¹⁾

に必要な空気組成と空気量（圧力に影響）が大きな変動なく維持されなければならない。適正な空気組成は気圧との関係性があることから適正な範囲での制御を行う。その上で温度・湿度が適正範囲にあることで温熱快適性が確保され、これに匂いが加わって空気のイメージが作られる。この室内の温熱・空気環境を快適

な状況に維持することはストレスの少ない生活には、特に閉鎖空間においては重要と考えられる。

4.2 ウェルネスへの対応

将来の宇宙居住を考えると、人を中心とした環境づくり、ウェルネスの視点が重要である。快適性や利便性の観点に加え、在室者の健康的な行動を促すような仕組みをデザインすることで、建築空間は魅力的なものとなる。地上の建築においてはウェルビーイングに関する建物や街区の環境性能評価システムとして WELL 認証¹¹⁾がある (図-8)。これは、10 のコンセプトについてチェックし 4 段階のレベルで判定するものである。これを月居住の観点で見直して計画に反映することで月での生活をより豊かにできると考えられる。

一方、月居住においては、医療機関がないため健康を維持するための衛生的な環境、ストレスの検知など体調不良の予兆をいち早く把握することが重要である。そのための健康モニタリングシステムなどが発達すると考えられる。この技術は地上においても、健康維持を支援する技術として展開が可能である。

5. 物質循環のシミュレーションの宇宙居住への適用

5.1 シミュレーションの概要

宇宙の閉鎖空間での居住においては、必要な資源を最大限循環利用することが必要となる。空気、水、食料、廃棄物は異なる循環サイクルを持ちながら、互いに連携する物質があり複雑である。そのため事前に物質の流れを予測し、全体のシステムとして物質の収支を維持できる流れを計画する必要がある。

そこで月の居住空間構築に当たり、滞在人数に応じて生活に必要な物質循環システムの規模に関する与条件を得る目的で、物質循環に関するシミュレーションを実施した¹²⁾。

図-9 に物質循環シミュレーションモデルを示す。これは 2050 年代の月地下に 50 人が生活する居住空間を仮定している。シミュレーション結果から、必要となる設備や空間を把握することで、必要資材の地球からの輸送、また、現地材料の活用など、拠点建設ミッション全体の最適計画を行い、実現可能性を検討できる。

5.2 物質循環シミュレーションの結果

図-10 に上水と中水の収支を示す。1 日約 6,000kg の水が生活に使われ中水となり、それを上水に再生される結果となった。図-11 に空気系の物質循環収支を示す。空気系については、湿式酸化装置での酸素消費が多い。

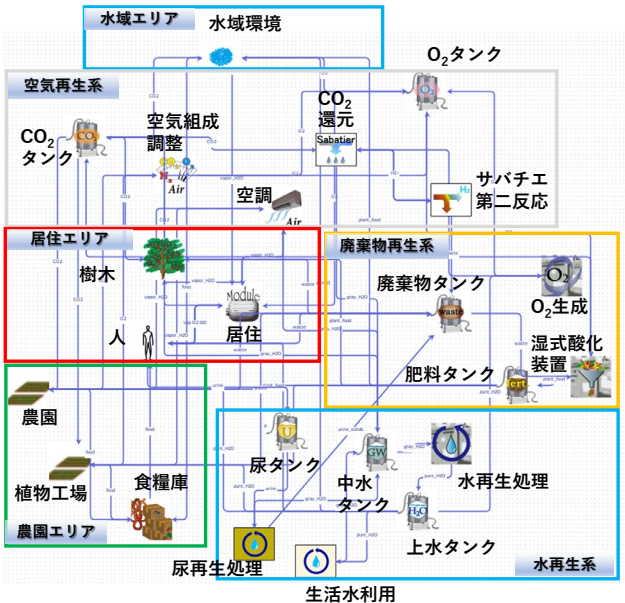


図-9 物質循環シミュレーションモデル⁵⁾
Fig.9 Material circulation simulation model⁵⁾

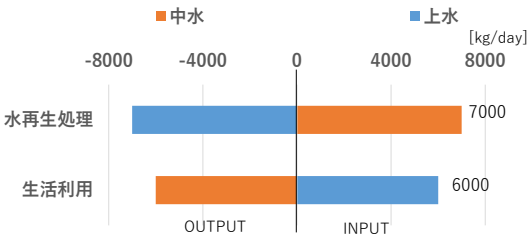


図-10 上水・中水の収支
Fig.10 Water and greywater balance

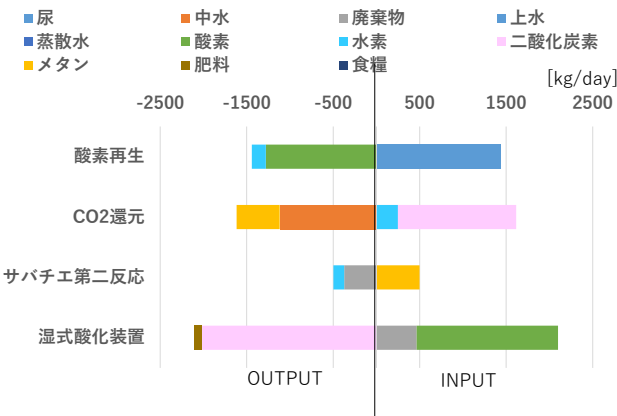


図-11 空気系の物質循環収支
Fig.11 Material balance of the air system

表-2 主なタンク容量の試算 (50 人当り)

Table2 Tank capacity calculation

タンク種類	循環量 [kg/日]	タンク容量 [kg]	タンク種類	循環量 [kg/日]	タンク容量 [kg]
上水	7,000	11,630	O ₂	1,531	2,520
中水	7,459	11,190	H ₂	286	430
廃棄物	488	740	CO ₂	2,069	3,110
尿	84	130			

湿式酸化装置で発生した CO₂ は植物の光合成を増やして処理できれば CO₂ 還元が削減できる分、省エネルギーが期待できる。

表-2 に必要となる主なタンクの容量の試算結果を示す。タンク故障時は 3 日間までの保管を想定している。この他にも、空気濃度、圧力調整のため窒素タンクも必要となる。生活空間の他、これらの物質を貯留するためのタンク、その他の物質変換処理装置なども計画が必要となり、各物質の搬送経路が最短となるよう配置計画に留意する。

これは地球上の物質循環の縮図とも言え、用いられる技術は地上にも展開していくことができる。外部の空気導入が難しい地下シェルターなどへの適用が考えられる。

5.3 サークュラーエコノミーへの展開

このように月居住のための物質循環においては物質の流れが持続できるように植物の光合成や装置を連携させることが必要であり、バランスを崩すとその影響はすぐに物資の欠乏としてあらわれる。地球よりもシステムが単純で小規模な月居住の物質循環を成立させるための技術は、複雑な地球上の問題への活用が可能と考えられる。

また、地上ではサーキュラーエコノミーへの関心が高まっている。製品の材料調達から利用、廃棄・再利用に至るまで、全ての段階の流れを整理したバタフライ・ダイアグラム¹³⁾では、再生可能資源のフローと有限資源のフローとは異なる流れであることを明確にしている。

月面においても輸送された様々な物資は貴重な資源である。居住空間内の日常的な物質循環だけでなく、装置や構築物についても、材料としての再生を前提として計画することが必要と考えられる。循環フローからの漏れがないような運用管理手法を月面システムにおいて検討した結果は地上にもフィードバックできると考えられる。

6. まとめ

月地下空洞への居住空間構築についての技術と、その一部は地上での活用への展開が考えられていることを述べた。地球と宇宙とでは環境や求められるものが違うものの、技術の本質、特に人に関する部分は同じである。一度、宇宙の厳しい制約下での生活を考えることにより、従来の延長線上にはない革新的な技術を発想するきっかけになると思われる。

謝辞

本研究における物質循環制御シミュレーションは、宇宙システム開発株式会社のご協力により「SCICLE (Simulator for Closed Life and Ecology)」にて計算されたものである。記して謝意を表する。

注

注1) GNSS (Global Navigation Satellite System) : 全球測位衛星システム

注2) LiDAR-SLAM (LiDAR (Light Detection and Ranging) - SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)) : レーザーで高精度な周辺環境地図を作成し自己位置を推定する技術

参考文献

- 1) 河野功, 春山純一, 桜井誠人: 月の縦孔・地下空間利用基地による SDGs 社会実験プラットフォームの研究, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 2C06, 2019.
- 2) 山敷庸亮編: 有人宇宙学 宇宙移住のための 3 つのコアコンセプト, 2023.
- 3) 月面農場ワーキンググループ: 月面農場ワーキンググループ検討報告書第 1 版, 2019.
- 4) 石神靖弘, 後藤英司: 低圧環境における植物の生育, 植物環境工学(J.SHITA), pp.228-235, 2008.
- 5) 庄司研, 村瀬宏典, 渡辺賢, 鈴木菜々子, 廣木正行, 広崎朋史, 山上貴章, 石嶋隆史, 須田恵里香, 諸島玲治, 森山枝里子: 縦孔・地下空洞における居住環境構築技術に関する研究, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 4C16, 2023.
- 6) 協調運転制御システム「T-iCraft®」, https://www.taieci.co.jp/about_us/wn/2022/220803_8896.html (参照 2024-07-17)
- 7) 宇宙無人建設革新技術開発推進事業(国土交通省) <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001494657.pdf> (参照 2024-07-17)
- 8) 中野正晴, 若山真則: 月面適応のための SLAM 自動運転技術, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 1N03, 2023.
- 9) 谷卓也, 水野史隆: 月面における無反力岩盤掘削方法, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 2R08, 2023.
- 10) LifeCycleOS, <https://www.aiiot.taieci-techsolu.jp/mirai/lcos/> (参照 2024-07-17)
- 11) WELL v2: <https://www.gbj.or.jp/well/v2ratingsystems/> (参照 2024-07-17)
- 12) 扇拓矢, 公平綾, 飯野翔太, 森山枝里子, 広崎朋史, 濱田大典, 大熊成裕, 大貫剛, 宮嶋宏行, 石川芳男, 中根昌克: 物質循環制御システム研究開発用シミュレータ SICLE の開発, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2D07, 2012.
- 13) バタフライ・ダイアグラム: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> (参照 2024-07-17)