

月面基地基本計画に関する研究（その1）

粟生啓之¹・高橋富美²・五十嵐知宏³・梁田雄太⁴・松嶋健太⁵

¹技術士（建設部門） 株式会社建設技術研究所 大阪本社道路・交通部
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: aou@ctie.co.jp

²技術士（建設部門） 株式会社建設技術研究所 大阪本社道路・交通部
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: f-sugiyam@ctie.co.jp>

³技術士（環境部門） 株式会社建設技術研究所 東京本社地球環境センター
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: igarashi@ctie.co.jp

⁴技術士補（環境部門） 株式会社建設技術研究所 東京本社地球環境センター
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: yt-yanada@ctie.co.jp

⁵技術士（総合技術監理・建設・環境・衛生工学部門） 株式会社建設技術研究所 東京本社地球環境センター
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: matsushima@ctie.co.jp

本報告は、当社の新たなまちづくりの方向性を示す仮想環境としての月面への基地建設に係る研究の枠組みを示したものである。月面基地研究に関する目標として、現在日本を含む各国が目指す入植拠点に係る提案を目指す「短期目標」と、月面での大規模拠点に係る提案を目指す「中長期目標」を掲げた。また、基地形成のシナリオ構築のため、アメリカやロシア、欧州などの月面探査計画を把握するとともに、わが国の探査技術開発の動向を把握した。その結果、技術開発について、要素技術の検討は進んでいるものの、それらを結びつける建設計画となっていないこと、月面での拠点形成は宇宙技術よりは地上の土木技術に親和性が高く、建設コンサルタントの参入意義が確認できた。今期はこれらの背景を踏まえ、基地建設に係る概略シナリオを構築するとともに、基地建設に必要な検討事項を整理した。

Key Words : *lunar base, regional planning, virtual research*

1. はじめに

アポロ11号が有人で月面に初めて到達したのは1969年7月20日¹⁾である。宇宙飛行士が宇宙服に身を包み月面を探査する姿は現実のものとは言えSFの世界に近い感覚ではなかったか。40代以上の世代にとって月面や月面基地は、アポロの月面探査を同時代で見てきたことに加えテレビアニメでも描かれる憧れの世界であったのではなにか。有人探査による月面をめぐる状況は、人類が月に降り立ってから50年近くを経て、米国や中国、欧州などの宇宙開発の先進国が2030年代をめどに月面有人探査を目指すなど、にわかに現実味を帯びてきている²⁾。

月研究に携わっていなかったものからすれば、月がSFから科学技術の領域に戻ってきたといえる。

一方で、米国NASAや欧州ESAにより描かれる月面拠点は、数人から十数人が月面で活動するための小規模な基地として描かれ、大規模な拠点ははまだSFの領域にある³⁾。

翻って地球上では、わが国においては少子高齢化や

人口減少が進展し、コンパクトシティ等の都市の縮減やスマートシティ等の新たなまちづくりが求められている。広く世界では人口爆発による食糧生産の問題、水や化石燃料等の資源の配分とひっ迫、無秩序な都市建設など「まちづくり」は多くの課題を抱えている。このような環境制約、資源制約下での「都市」とは「社会」とはどのようなべきか又は構築すべきかが問われており、今後のまちづくりのあり方の提案が求められている。

このような課題に対し、月面基地という一種の理想条件下で、都市の立地、都市計画、空間設計、エネルギーシステム、資源循環システム、社会システムの検討を行うことで、課題に対する解決の方策を網羅的に示すことができる可能性がある。

月面基地に関する技術開発が小規模拠点形成レベルとはいえ近い将来実現される水準にきていること、その技術開発の実績を用いながらSF（アニメ）の世界に描かれた大規模な月面拠点を、地球上で現実のものとなっている課題認識を踏まえて構築検討を行うことは、SFを現実のものに引き寄せる科学的試みと考えることがで

きるのではないか。

平成28年4月に閣議決定されたわが国の宇宙基本計画では「①宇宙安全保障の確保」「②民生分野における宇宙利用推進」「③産業・科学技術基盤の維持・強化」を基本的な方針とし、目標達成のための取組は「衛星」や「宇宙輸送システム（ロケット）」「リモートセンシング」が中心であり月面には至っていない。このような状況化で、検討結果だけでなく、検討プロセスをあわせて示すことで、建設技術研究所が考えるこれからの「まちづくりのあり方」の提案、月面開発に関する「考え方」を示すことを本研究の目的とする。



図-1 本研究の進め方

2. 目標とする成果と研究の進め方

本研究では、2030年代など短期的に実現できる可能性のある時点を想定した「短期目標」と2100年代など技術開発の検討水準が構想レベルの時点を想定した「中長期目標」のふたつを掲げることとする。

短期目標では、現在の月面基地に関する研究や技術開発動向をレビューしたうえで、拠点に必要なインフラ、インフラを維持するために必要となるエネルギーや資源、拠点を構築するための整備手法などを検討し、NASAやESAなどが描く月面拠点を当社なりの視点で検証した「CTi 月面拠点モデル」の構築を目指すものとする。

中長期的目標では、数百人から数万人の大規模な月面基地形成を、その必要性や役割を含めて検討し、月面空間での新たな都市・インフラ構築の可能性を提案する。これは、当社が強みとする社会インフラの調査・計画、設計、マネジメントに関する技術を総合的に示すものであり、本研究が当社が宇宙・月面開発に着手したこと、当社の強みを生かした宇宙・月面開発の事業化とは何かを検討するものともなる。

表-1 本研究が目標とする成果

区分	成果
短期目標	月面探査に必要な月面拠点を検討。月面地形、拠点に必要なインフラ等を踏まえた「CTi 月面拠点モデル」を構築。
中長期目標	月面での大規模拠点形成に関する検討。今後の新たな都市・まちづくり在り方を見すえた「月面基地」を提案。

本研究は、平成30年～31年の2ヶ年で実施するものであり、今回は研究が達成を目指す成果、及び月面基地開発に関する既往の研究や技術開発動向の収集・整理、研究の進め方について検討を進めた。

来期以降はより具体的に次の検討を進めるものとする。

表-2 月面基地基本計画に係る検討内容

①月面基地の立地と必要なインフラの検討	
区分	検討内容
基地の立地検討	・月の地形・地質条件、日照条件(太陽との関係)、地球との位置関係、整備する都市の規模などから立地選定 ・造成計画及び造成方法を検討
基地に必要なインフラ検討	・基地形成の各段階において必要となるインフラを検討
②月面基地計画の検討	
区分	検討内容
都市計画・空間計画の検討	・都市計画(都市機能配置、公共交通計画) ・空間計画(月面ドーム、建築物、インフラ設計)
エネルギーシステムの検討	・エネルギー需要を推計し、エネルギー供給システム計画(太陽光発電と水素燃料電池等) ・空間内の水循環、空気循環など生息環境維持のためのシステム、熱循環(熱収支)
食糧生産、資源循環システムの検討	・基地での自給自足システム(昆虫食や人工肉、植物工場など) ・基地建設に必要な資材調達(鉱物資源や生産)、循環型の水や物質の利活用システム
閉鎖的かつ国籍多様化での社会システム、産業政策の検討	・多様化を目指す社会、限定空間での人口配置(再生産)、産業(社会経済システム)のあり方 ・月面基地での産業化の可能性(希少元素の採掘と地球への販売、1/6重力下での特殊医療や月面基地観光など)

3. 月面基地開発に関する研究・技術開発動向

(1) 各国の月面探査計画

近年、宇宙探査、とりわけ月面探査の機運が世界中で高まっている。ここでは、アメリカ、ヨーロッパ、中国、

日本の月面探査計画について記述する。

a) アメリカ

NASAは2006年12月、コンステレーション計画の一環として月面基地の建設構想を発表した。この発表では、2020年までに建設を開始し、2024年頃には長期滞在を可能とするとしていた。

この計画では、スペースシャトルでの運用の反省を踏まえ、低コストで信頼性の高い輸送手段として、アレスロケット及び月面着陸機アルタイルの開発が決定された。

月面着陸機アルタイルは、月面における有人活動の要となる着陸船及びローバーとなり4人の宇宙飛行士が1週間程度生活できる装備を具備され、14.5トンの荷物を月面へと輸送することが可能となっている。

月探査についての計画も着実に進行する一方、無人探査機(ルナー・リコネサンス・オービター)による月面基地候補地の探索も進み、アルテア月着陸船を利用して月の極地域に着陸し、有人月探査を実施するというプランが策定されたが、計画の遅れや予算の圧迫を理由として2010年に中止が発表された。

しかし、National Space Council(2017年10月5日)で、米国は、再び米国宇宙飛行士を月に連れて行き、これを足掛かりに火星を目指すことを宣言された。将来の有人探査での現地資源利用の可能性を探るための月極域着陸無人探査ミッション(Resource Prospector Mission: RPM)を2022年の打上げに向けて検討している⁴⁾。

b) ロシア

ロシア連邦宇宙局は、2016年ころから無人探査機を連続して打ち上げ、2030年代からは月の南極地域に月面基地の構築を開始、2040年台には月面基地を備えた本格的な基地へと進める構想がある⁵⁾。

また、ロシアの宇宙開発全般を担当する国営企業「ロスコスモス」では、月探査計画の一環として長期滞在可能な月面基地を建設し、アバターロボットを用いて遠隔操作で月を探査していく構想を発表した。具体的には、3Dプリント技術を応用し、研究部品などを宇宙船内で作ることで、宇宙に出るときの荷物を大幅に削減し、月面の岩石に発見される「ヘリウム3」を応用して月面での核融合によるエネルギー確保を検討しており、常時居住可能な月面基地開発を構想している。

c) 中国

第7回「宇宙技術革新国際会議」において、エネルギーを長期にわたり供給できる前提で、「自主的に運用できる無人月面インフラ」を構想中と発表し、中国の国家戦略「中国製造2025」とともに出された「2016中国宇宙白書」に則って月面基地を作ることにに向けて取組みが進められており、2018年12月8日に、月探査機「嫦娥4号」を打ち上げられた。「嫦娥4号」は、人類初の月

の裏側の軟着陸を実現し、着陸地点とローバーによる走行探査を展開し、地球-月系L2点で通信中継を行う予定となっている。月探査プロジェクトの実施により、月面の地形検出および地質の観察を展開し、月面サンプルの研究を行い、月の裏側の地質学的特徴の探測と研究を行い、また低周波の電波天文観測や研究を行い、月の起源と進化に関する認識を深めるとされている⁶⁾。

d) 欧州(欧州宇宙開発機構: ESA)

ESAでは、2014年のESA閣僚級理事会での宇宙探査戦略に関する決議を基に、「ESA宇宙探査戦略(ESA Space Exploration Strategy)」が策定され、ロシアの月探査ミッション(南極)に関して着陸センサやドリルの提供などでの協力を進めており、中国の嫦娥ミッションの追跡を支援している⁷⁾。また、月を民間などへのオープンな形で継続的に探査するためのムーン・ヴィレッジ構想の具体化を図っている。

ムーン・ヴィレッジの建築資材は地球から運ばれていくのではなく、3Dプリンティング技術により月面の土壌成分を使って基地を造り、宇宙飛行士がロボットや無人ローバーとともに活動する深宇宙探査の拠点とすることを想定している。

e) 日本

2006年7月31日の月周回衛星(SELENE)シンポジウムにて、2020年前後の有人月面着陸と、2030年前後の月面基地建設構想を明らかにしている。

また、宇宙基本計画の工程表改定が進められ、アメリカが構想する月面の有人探査などへの参加に向けて、関連する技術開発や各国間の調整を主体的に進めるとした。具体的には、人工衛星に衝突する可能性がある宇宙ゴミなどの動向を追う監視システム(SSA)の2023年度からの運用開始を念頭に置いた米国、フランスとの協力強化や、月の着陸探査活動に関するインドなどとの技術協力を盛り込んだ⁸⁾。

(2) わが国の探査技術開発の動向

わが国では、宇宙基本計画に基づき、「太陽系探査科学分野については、効果的、効率的に活動を行える無人探査をボトムアップの議論に基づくだけでなく、プログラムも行いつつ進める。」とされている⁹⁾。さらに、この実現に向けた「宇宙基本計画工程表(平成30年度改訂)」が平成30年12月11日に宇宙開発戦略本部で決定された¹⁰⁾。この中では、月・火星・水星といった重力天体への着陸実証実験、深宇宙探査技術実証機開発、国際協力・民間活力活用による有人宇宙活動の方向性が示されている。

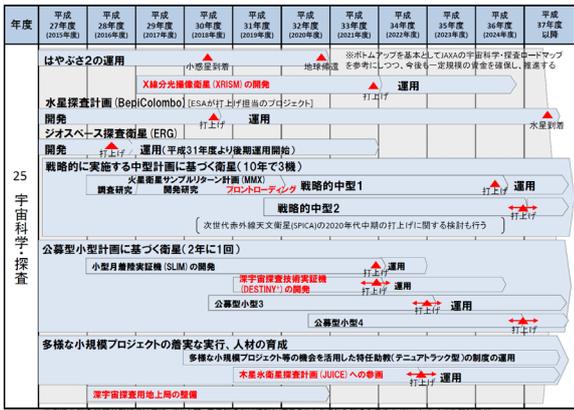


図2 「宇宙科学・探査」に関する工程表

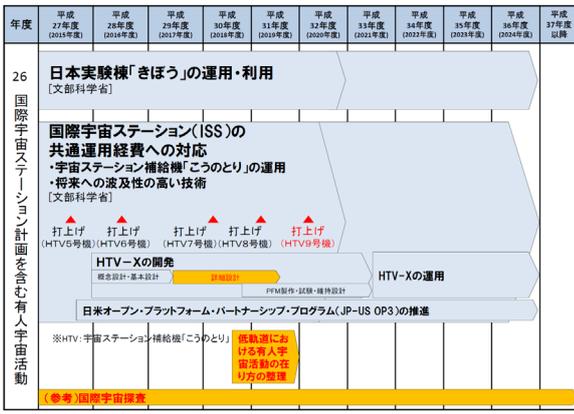


図3 「国際宇宙ステーション計画を含む有人宇宙活動」に関する工程表

この目標達成に向けて、JAXA では「宇宙探査イノベーションハブ（以下、探査ハブ）」を創設し、民間企業や大学、研究機関との共同研究を開始した¹³⁾。

この取組みには、以下の特徴がある。

- ・発注型から参画型へ（課題設定段階から民間企業等ニーズを取り込む）
- ・設計思想（集中から自律分散協調）の変革
- ・技術開発の出口戦略の転換（宇宙探査技術と地上産業への波及を同時に）行う
- ・人材糾合、異分野融合によるオープンイノベーションの実現

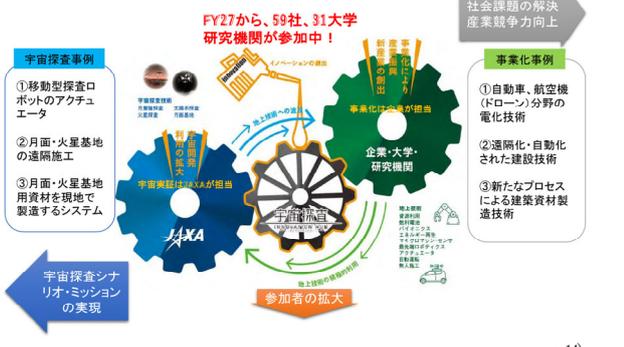


図4 「宇宙探査イノベーションハブ」の取組み

この「探査ハブ」には、多数の民間企業・大学・研究機関等が参画しており、非宇宙の民間企業では、大手ゼネコンやハウスメーカーといった建設・建築業の参画も見られるものの、現時点では、建設コンサルタント会社の参画は見られない。

探査ハブ参加企業・大学等一覧(FY27~29) 中小ベンチャー26社

新明和工業㈱	柳安川電機	柳明治ゴム化成	鹿島建設㈱	エクストコム㈱	並木精密宝石㈱
日東製鋼㈱	東急建設㈱	三菱マテリアル㈱	柳大林組	柳タチ工業	柳東洋技術工業
中国工業㈱	日立造船㈱	キリン㈱	ソニー㈱	モルタルマシニング㈱	シラハレーザ㈱
㈱IXI	㈱タカトミー	THK㈱	㈱竹中工務店	神楽テックロー㈱	マイクロ炭化㈱
㈱竹中土木	ヒロセユニエス㈱	日東精工㈱	日特建設㈱	㈱オスマカ研究所	㈱名越カクパレ
酒井重工業㈱	清水建設㈱	トビー工業㈱	㈱ミサワホーム総合研究所	㈱イチカワ	ベレリアテック㈱
ヤンマー㈱	リコー㈱	ミサワホーム㈱	パナソニック㈱エンターテインメント	紀州技研工業㈱	㈱アイヴィス
高野分限会社内所	大分大学	玉川大学	中央大学	㈱ビュープラス	㈱コンセプト
茨城大学	静岡大学	日本文理大学	東京農工大学	㈱モルフォ	Siber㈱
芝浦工業大学	京都大学	電気通信大学	山口大学	ケニックス㈱	㈱翔栄
電気通信大学	東京農工大学	北海道大学	東京工業大学	㈱光電製作所	スプレックス㈱
九州工業大学	東北大学	金津大学	東京工業大学	宇宙実証有8社	
立命館大学	九州大学	福井大学	桐蔭横浜大学	㈱Space	
大阪府立大学	名古屋大学	信州大学	東京理科大学	㈱センチシア	
兵庫県立大学	日本大学	千葉大学	浜松トキンス㈱	㈱4711	
超精密エネルギー研究セタ	㈱I I	㈱エアスペース	千代田化工建設㈱	㈱4711 エンタープライズ	

図5 探査ハブ参加企業・大学等一覧

「探査ハブ」では、宇宙探査・宇宙開発の技術研究・開発が進められているが、要素技術の開発が先行しており、それらをつなぐ技術・体系化に関する研究が不足している可能性がある。



図6 宇宙探査技術のポートフォリオ

JAXA 担当者への聞き取りでは、予算的・政治上の制約により、国主導の宇宙開発では月面探査・到達までがやっとの状況とのことであり、月面到達後のビジョンを描けていないことが現状と考えられる。一方で、現在の宇宙技術開発では、「宇宙利用」と「地上展開」を同時に行うことがトレンドとなっている。

(3) 月面基地研究上の留意点

月面基地開発に関する研究・技術開発動向を踏まえ

ると、世界的には、月面基地は将来的な火星開発・深宇宙探査に向けた宇宙拠点の一つとして捉えられており、その実現に向けた探査・技術開発が進められている。半面、わが国では、月面基地のあり方に対する方針等は明確化されていない。

わが国の宇宙開発を主導する JAXA においては、「探査ハブ」の創設により技術開発を加速化しているが、有人宇宙基地に対する横断技術開発・体系化などは、今後の課題である可能性がある。さらに、JAXA は宇宙到達・探査が主事業であり、社会インフラの構築は未着手の領域になっていると考えられる。

将来的な月面基地は、多種多様な人々により構成される一つの「都市」といえる形になることが想定されるため、その創設・維持管理に向けてたインフラ・社会システムの構築に向けた研究・技術開発が必要と考えられる。また、その実現にむけては、現行の宇宙開発技術だけでなく、地上のインフラ等をどのように実装していくかが重要な課題となる。

以上を踏まえた、月面基地研究上の留意点は、以下のとおりである。

- ①月面基地開発の目的明確化
- ②月面基地開発の条件整理
- ③要素技術開発のトレンド整理・体系化
- ④月面基地開発に向けた課題整理
- ⑤不足する技術・システムの明確化
- ⑥課題解決に向けた方向性の整理

前述のように、将来的な月面基地とは、極限状況下における都市構築が求められるものであり、建設コンサルタントの持つ技術全般が要求されるものと考えられる。

4. 月面基地の開発動向を踏まえた基地基本計画検討のあり方

(1) 火星の入植拠点としての月

人類が月面に到達したのは 1969 年。それから約半世紀が経過し、新たな宇宙開発に向けたレースが始まっている。各国が掲げる次の目標は、月面に「基地」を建設し、火星移住への足がかりにすることである。火星は、人類が移住できる可能性のある、太陽系唯一の惑星といわれる。月は水と大気がほぼ存在せず重力が小さい一方、火星には水と大気が存在し、地球の 3 分の 1 に相当する重力がある。火星への入植を目的に、最終的には地球と同様の暮らしを可能とするように火星の大気や環境を惑星ごと改造するテラフォーミング計画などの考え方も存在する。火星が人類にとっての新居なら、月は入植拠点として位置づけられている。

表-3 火星の入植の主な活動団体

年	団体名	概要
2012	Mars One	2025年までに火星に人類初の永住地を作ることを目指すオランダの民間非営利団体。移住希望者を募集し、約20万人の移住希望者の中から日本人10人を含む1058人の候補者を選んだと発表
2018.02	SpaceX社	アメリカの民間企業。火星有人飛行の実現に向けて無人ロケットを打ち上げ
2018.03	The Mars Society	火星への移住を研究している国際機関。MORS（火星砂漠研究基地）にて、火星と同環境を想定して生活する実験を開始。 *世界10か所以上でシミュレーションを実施
2018.05	NASA	火星探査機「Insight」と小型人工衛星2機が火星へ、火星の内部構造を調査

出典：Mars One online¹⁸、Space Exploration Technologies Corp online¹⁹、The Mars Society online¹⁹、NSA online²⁰

火星への「片道切符での」有人飛行を目指すプロジェクトが「Mars One」であり、2031年には最初のクルーが火星へと向かうロードマップを示している。2013年より入植希望者を世界から募り、火星移住候補者を100人に絞りトレーニングを実施。2022年に無人実証機を火星へ送り込み、2024年に火星周回通信衛星を打ち上げ。2026年に火星基地設営地点にローバーを送り込み、入植に向けた基盤を整えるとしている¹⁷。

日本では JAXA が火星衛星探査計画として、2020年を目標に衛星の打ち上げを計画しているが、米の NASA は 2018年11月に探査機の火星着陸に成功。火星の内部を調べ、月や火星へと宇宙飛行士を送り出すための準備に役立つ科学的情報入手を進めている。また、火星居住コンペを行い、日本人を含むチームの提案した、火星の氷を用いて 3D プリンターで建築する Ice House が優勝した²⁰。

アラブ首長国連邦 (UAE) では 2014年に宇宙庁を設立、2017年にドバイで開催された世界政府サミットで「Mars 2117」を発表。UAE の建国 50周年となる 2021年に中東地域で初となる無人探査機を火星の軌道に乗せること、2117年には火星に居住可能な都市 (約 600km²) を作り、60万人を移住させることを目標に掲げた。さらに「Mars Science City Project」と名付けられた計画では、ドバイ近郊の砂漠の中に火星移住にまつわる研究を行う人工都市を建設することを目指している。総面積約 18ha の敷地に火星における住環境を再現する施設を作り、いくつもの透明ドームで覆うプランが立てられている。ドーム内には実際に人が生活できる環境を作るほか、荒れた土地での農耕栽培やエネルギーおよび水の循環システムなどの研究や、砂漠の砂を材料とする 3D プリンターで作られた建築物が予定されている²¹。

上記のように、火星移住計画に向けた取り組みが進んでいるが、その足掛かりとして、月面基地が重要な役割を果たしているのが、現在の宇宙開発の動向である。

(2) 入植シナリオの想定

月面空間において、大規模な月面基地整備を行うには、本格的な基地整備のための資材確保や建築機械の整備等が必要となるなど、段階的に整備を進める必要がある。そのため、本研究では月面への入植を行う（以下「入植期」と言う）から、基地形成を進める「開拓期」、月面基地が完成し、目的とする機能や活動を行うことのできる「完成期」の3段階を想定した検討を行うものとする。

本報告時点で想定している各時期ごとの基地の役割と規模等を次に示す。

a) 入植期

月面基地形成の最初期段階である。入植者の居住サイトの形成を主たる目的とし、次の開拓期に必要な鉱物・水資源探査、居住サイト・鉱物資源採掘に必要なインフラの構築を行う。居住規模は、数人～数十人程度を想定する。

表-4 入植期の月面基地の規模と活動内容

時期	月面基地形成のための最初期段階、2040年代
役割	・基地建設用資材の確保 ・基地建設用機械・プラントの製造（組立）
規模	・面積：300m ² （居住地部分のみ：1人あたり15m ² ） ・居住規模：数人～数十人程度
活動内容	・入植者の居住サイトの形成 ・開拓期に必要な鉱物・水資源探査 ・開拓期に必要な居住サイト及び鉱物資源採掘に必要なインフラの構築 ・建設用機械の組立

b) 開拓期

月面基地を建設する段階である。月面基地建設に必要な資源探掘、資源からコンクリートや鋼製構造物等の資材製造を行い、基地建設を進めることを主たる目的とする。居住規模は、数百人～数千程度を想定する。

表-5 開拓期の月面基地の規模と活動内容

時期	月面基地形成の建設段階、2040年代中盤以降
役割	・月面基地の建設
規模	・面積：90,000m ² （居住地部分のみ：1人あたり30m ² ） ・居住規模：数百人～数千程度
活動内容	・基地建設用資源採掘 ・採掘資源からの資材製造（コンクリート、鋼材など） ・建設・建築用部材の製造（プレキャスト、鋼板など） ・基地建設

c) 完成期

月面基地として機能する段階である。本研究では火星入植のための資源採掘と資材製造、火星や深部宇宙探査のための宇宙船の製造、1/6重力化での医薬品製造や食糧生産、特殊医療など月の特性を生かした産業活動、月面観光、火星入植者の訓練など月面での自立した社会経済活動が行われることを想定する。居住規模は1万人～10万人程度を想定する。

表-6 完成期の月面基地の規模と活動内容

時期	月面基地として機能する段階、2100年代
役割	・火星入植拠点 ・特殊産業拠点 ・観光拠点
規模	・面積：25,000,000m ² （居住地部分のみ：1人あたり250m ² DID相当） ・居住規模：1万人～10万人程度
活動内容	・火星入植のための資源採掘と資材製造 ・宇宙船製造 ・火星入植者の訓練及び適正検査 ・1/6重力化での医薬品製造や食糧生産、特殊医療など月の特性を生かした産業活動 ・月面観光

(3) 基地の立地に必要なインフラ

a) 入植期の月面拠点

月面での有人基地開発には、厳しい環境下で、誰もが迅速に作業を進めていけるインフラ整備が求められる。ここでは、地球環境で最も過酷な南極基地（昭和基地）のインフラ技術等が入植期の月面拠点へ応用できるとみて、南極基地を例に必要なインフラを示す²⁾。

① 建築構造

南極基地は、工場で部品を生産して現地で組み立てる建築方法であるプレハブ工法を取っている。プレハブ工法は1～2名の建築隊員の指揮のもと、素人でも組み立てが可能であり、重さや大きさに制限のある資材で素人の隊員たちが建設をするという条件をクリアすべく生まれた工法である。

② エネルギー

基地の電力を賄う発電装置は発電棟に設置されている2基のディーゼルエンジンと発電機となっている。発電装置のエンジン部分はエネルギーの有効利用を図るために熱電併給（コージェネレーション）システムの一部を担っており、冷却水熱や排気ガス熱は造水や温水暖房の熱源となっており、回収率は約75%にもなる。

補助電源として太陽光発電が設置されているが、高緯度の極地のため冬季の3カ月間の出力はゼロとなるこ

とから、資源量自体は大きいですが、長期的な出力変動が激しい。そのため、設置されている風力発電装置の出力を一旦水素に変換することにより備蓄し、その後、備蓄した水素からエネルギーを取り出す水素発電機の導入を進めている。

③通信整備

昭和基地が位置する東オングル島は、電波を発する観測機器等が乱立し、電波環境的には極めて厳しい環境にある。現在でも、隊員が生活する場とアンテナ群はゾーニングにより分けられているが、狭い東オングル島の中のみで考えているのは、新たな観測の展開の可能性に対応できない。そこで、基地の利用可能エリアを西オングル島へも大きく広げようと、観測エリアと生活エリアを大別してゾーニングを行っている。観測機器の無人化（遠隔操作）及び基地内ネットワーク網の構築を図っている。

④移動手段

氷床上では、雪上車・スノーモービル・4輪駆動車などの車両を目的に応じて利用できることが重要である。

特に、氷床上で抜群の機動力を誇る4輪駆動車（アークトラック等）の導入は不可欠である。

b) 完成期の月面基地

完成期の月面基地は1~10万人程度の居住を想定するため、月面に一つの都市を形成するに等しい。UAEが2117年に火星へ60万人規模の移住を計画していることから、火星都市形成から約100年後に、月面都市が地球と火星を結ぶ中継基地（都市）として機能していると想定する。

なお、「都市」とは「地域の社会的・経済的・政治的な中心となり、第二次・第三次産業を基盤として成立した人工・施設の集中地域」（建築学用語辞典）と定義されることから、月面都市においても、経済活動等を通じた自立と成長が必要となる。

なお、前提条件として、酸素や食料など人間が生存するために必要な物資の補給と排泄物などの処理を含めた人工閉鎖系の生命維持システムが構築され、低い重力の対応と放射線対策技術の確立、入植の開拓期までの間に月面の資源を用いた製造システムと地球・火星からの人・モノの移動・輸送システムが完成しているものとする。

上記の前提に基づき、完成期における月面都市の物理的なインフラとして①地盤、②交通、③エネルギー供給、④情報、⑤上下水道、⑥住居、⑦街区形成が想定される。月面都市内での活動として居住エリア、資源採掘や製造等の産業活動を行う産業エリア、食料・通信・エネルギー生産等の静的な生産活動を行うエリア、惑星間の物資や人の交通システムが想定されるため、これらの機能を

都市内に配置し、それぞれのエリア間をモビリティで結ぶことが想定される。

なお、インフラ構築においては文化的、政治・社会的側面も重要であり、コミュニティ、教育、治安、文化、医療等のあり方も重要となる。特に月面都市は、多様な人種が集う都市であり、かつ、一つの閉鎖的空間での持続的な活動が求められることから、現代の持続可能な開発目標（SDGs）が具現化されているとともに、IoT、ロボット、AI、ビッグデータ等の新たな技術をあらゆる産業や社会生活に取り入れた「Society5.0」の次の形態が実現している都市といえる。そのような意味では、月面都市のインフラを検討することは、未確立の技術が多くなかでも、これからの都市のあり方を示す一方策になると考える。

(4)月面基地計画の検討要素

月面基地における都市計画や食糧生産システムなど多くの検討課題があるが、それらを駆動させるために必要なエネルギーシステムについて概略検討を行うとともに、その他の検討要素について研究の論点整理を行った。

a) エネルギーシステム

月面基地において想定されるエネルギーシステムの主なエネルギー源としては、太陽光と原子力が考えられる。十分な太陽エネルギーが得られる所では太陽電池による太陽光発電が、太陽エネルギーが得にくい所では原子炉での熱電変換による原子力発電が、それぞれ有効であると考えられる。

月面への入植期～開拓期においては、現在普及している太陽光発電が現実的であるが、月面では約2週間ごとに昼夜が入れ替わるため、昼間に発電した電気を貯めて夜間に利用できるようにする必要がある。ただし、月の地軸は約1.5度傾いているため、地球と同様に日照時間は季節変化し、極地方では白夜と極夜が現れると考えられる。月を完全な球体と仮定した場合の同一経度上における緯度ごとの理論上の日照時間を図-7に示す。地軸の傾きの影響を受けにくい緯度88度までは、昼夜が入れ替わる時間は約2週間ではほぼ一定しているが、緯度89度の所になると120日間以上も連続して極夜に近い状態に晒されることが想定される。

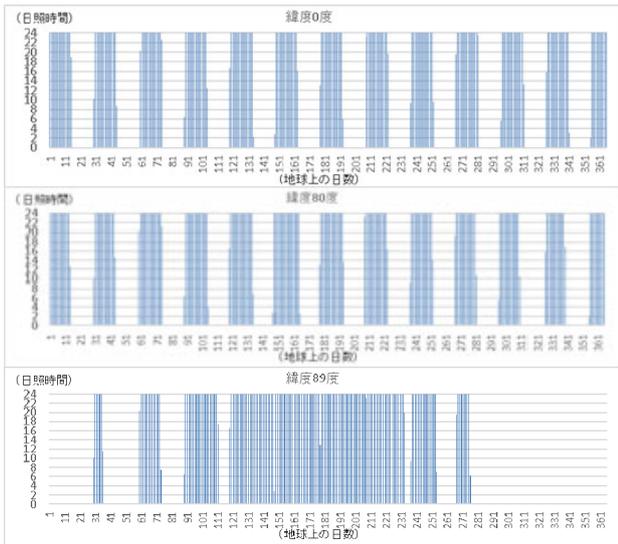
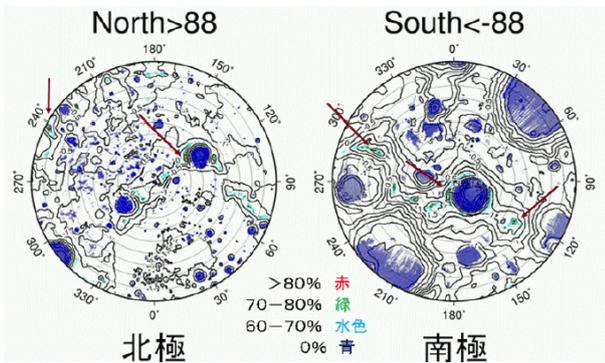


図-7 月の同一経度上における緯度ごとの理論上の日照時間

しかし、実際には月の表面は数千mの起伏に富んだ地形をしているため、極付近の高い山頂部では、極夜の時期であっても日照を受けることができると考えられ、「かぐや」による観測結果によれば、日照期間が80%以上ある地域は5箇所確認されている(図-8参照)。これらの地域の周辺では、太陽光発電による安定した発電と電力供給が期待できる。



出典：国立天文台 online²⁹

図-8 月の北極周辺と南極周辺における日照率

月面基地のエネルギー需要量は滞在人数に概ね依存するものと考えられることから、国際宇宙ステーションの事例から1人あたり20kWの電力供給能力が必要と見込み、太陽光発電と燃料電池によるエネルギー供給システムの規模を推計した。なお、入植エリアは緯度89~90度の極地域を想定し、太陽光発電所は極を挟む形で複数箇所を設置する想定とした(図-9参照)。この条件下での連続夜間期間は約100日間で、現状の宇宙用の技術として確立しているアルカリ電解質型燃料電池(発電効率70%)²³⁾で連続夜間期間のエネルギー供給を行う場合(図-10参照)、出力規模は1,000kWとなり、これを賄う8,400Nm³/日(350Nm³/h)の水素製造能力と1,100,000Nm³の水素貯蔵能力が必要であると考えられる

(表-7参照)。中長期的には、宇宙空間で複数の太陽電池を周回させて発電した電力を、月面基地まで無線送電することで、長期間の夜の電力の問題を燃料電池なしで解決できると考えられる(図-9参照)。

表-7 月面基地におけるエネルギー供給システムの種類と規模

入植期	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電：供給電力 2,020kW (1,010 kW × 2 基) 燃料電池：供給電力 1,000kW 水素製造能力：8,400Nm³/日 (350 Nm³/h) 水素貯蔵能力：1,100,000Nm³ 滞在人数：50 人程度
開拓期	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電：供給電力 40,400kW (10,100 kW × 4 基) 燃料電池：供給電力 20,000kW 水素製造能力：16,800Nm³/日 (7,000 Nm³/h) 水素貯蔵能力：16,300,000Nm³ 滞在人数：1,000 人程度
完成期	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電：供給電力 200,000kW 滞在人数：10,000 人程度
[参考]国際宇宙ステーション	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電：供給電力 84~120kW 蓄電池：充電能力 8.4kW, 放電能力 6.6kW 滞在人数：6 人

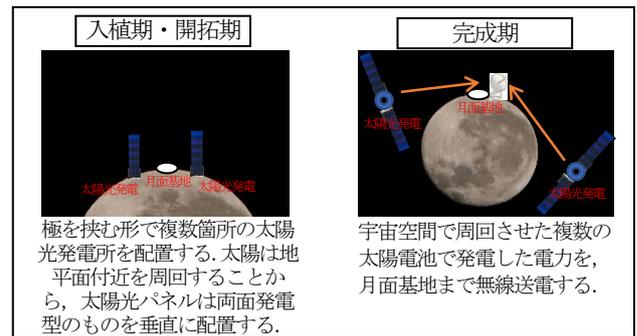


図-9 月面基地において想定する太陽光発電システム

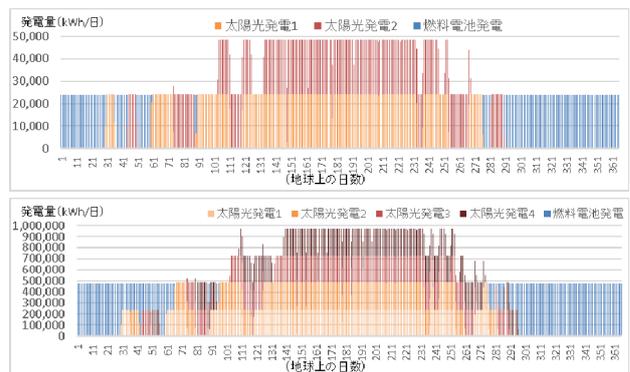


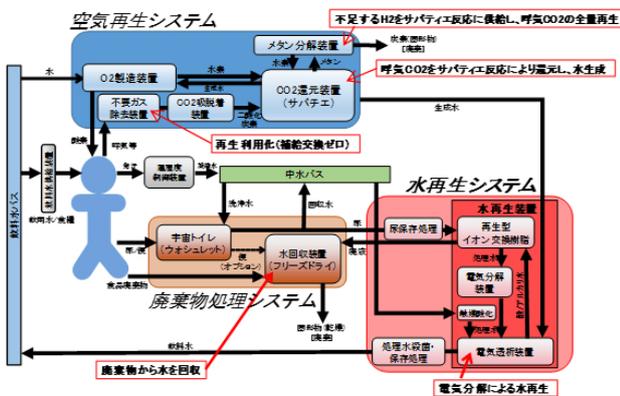
図-10 入植期・開拓期における年間発電量

b) その他の検討要素

月面基地計画において検討課題として考えられる要素について、今後の研究の方向性として考えらえる事項を表-8に整理した。

表-8 月面基地計画におけるその他の検討要素

都市計画, 空間計画	<ul style="list-style-type: none"> 都市計画(都市機能配置, 公共交通計画) 空間設計(月面ドーム, 建築物, インフラ設計)
食糧生産, 資源循環システム	<ul style="list-style-type: none"> 基地での自給自足(昆虫食や人工肉, 植物工場) 基地建設に必要な資材調達(鉱物資源や生産), 循環型の水や物質の利活用システムの検討(図-11参照)
閉鎖的かつ国籍多様化での社会システム, 産業政策	<ul style="list-style-type: none"> 多様化を目指す社会, 限定空間での人口配置(再生産), 産業(社会経済システム)のあり方を検討 月面基地での産業化の可能性(希少元素の採掘と地球への販売, 1/6重力下での特殊医療や科学実験, 月面基地観光)



出典: JAWA crkine⁹⁾

図-11 宇宙探査において目標とする再生型ECLSSの系統図

6. まとめ

地球の人口増等に伴う人類の新たな入植先として、火星移住計画の検討がアメリカ航空宇宙局(NASA)やヨーロッパ宇宙機構(ESA)で進められているところである。これらの計画では、月面に火星への入植拠点としての月面基地計画が位置づけられている。本研究でも、このシナリオを採用し、月入植から基地形成までの検討を進める予定である。

つまり本研究では、火星での都市形成に必要な資材や人材等を構築し輸送するための拠点となる月面基地基本計画の検討として、入植から基地形成までの段階的なシナリオを明らかにするとともに、月面基地において必要となる社会経済システムを含む社会インフラとその構築手法を明らかにすることを本研究の目的とする。

【本研究によって明らかにしたいこと】

- ① どのような街や社会が必要なのか
- ② 月面基地をつくるために必要な技術とその課題
- ③ 月面基地の維持に必要な技術とその課題

また本研究の位置づけをより明確にするためには、次の点を明確にする必要があると考えた。

- ① 人類の新たな入植先の必要性
なぜ宇宙に行かなくては行けないか、特に地球の人口爆発と環境収容力の限界について。
- ② なぜ月か
入植先としての月、火星、コロニーなどについてもレビューの必要がある。
- ③ 人類にとっての入植
これまでの入植や民族大移動の歴史を紐解く必要があるのではないか。

今期の研究成果を踏まえ、来期以降、月面基地基本計画の検討をより具体化する予定である。

謝辞: 本研究に際し、大阪大学大学院理学研究科佐々木教授に有益な助言を賜りました。ここに記して、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) NASA: Apollo11 Mission Report, 1969.
- 2) 国際宇宙探査協働グループ: 国際宇宙探査ロードマップ, 2013.
- 3) JAXA: 宇宙情報センターHP, 2018.
- 4) 文部科学省: 国際的な宇宙探査の状況, pp.2, 2017
- 5) 日本国際フォーラム: 「宇宙に関する各国の外交政策」についての調査研究, pp.45-48, 2013
- 6) 科学技術振興機構: 2016年中国宇宙白書(仮訳), 2016
- 7) 文部科学省: 国際的な宇宙探査の状況, pp.3, 2017
- 8) 宇宙開発戦略本部: 宇宙基本計画(平成30年度改定), 2018
- 9) 宇宙開発戦略本部: 宇宙基本計画, 2016, p21
- 10) 宇宙開発戦略本部: 宇宙基本計画行程表(平成30年改定), 2018
- 11) 宇宙開発戦略本部: 宇宙基本計画行程表(平成30年改定), 2018, p26
- 12) 宇宙開発戦略本部: 宇宙基本計画行程表(平成30年改定), 2018, p27
- 13) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構: 「JAXA 宇宙探査イノベーションハブ」が目指す物, 2017
- 14) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構: 「JAXA 宇宙探査イノベーションハブ」が目指す物, 2017, p7
- 15) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構: 「JAXA 宇宙探査イノベーションハブ」が目指す物, 2017, p11
- 16) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構: 「JAXA 宇宙探査イノベーションハブ」が目指す物, 2017, p23
- 17) Mars One: <https://www.mars-one.com/>, 2018.6.26
- 18) Space Exploration Technologies Corp.: First Passenger on Lunar BFR Mission, <https://www.spacex.com/>, 2018.6.26
- 19) The Mars Society: <http://www.marssociety.org/>, 2018.6.26
- 20) NASA: MARS Insight Mission: <https://mars.nasa.gov/insight/>, 2018.6.26
- 21) The Official Portal of the UAE Government: 2030-2117,

- <https://governmentae/en/more/uae-future/2030-2117>, 2018.11.26
- 22) 国立極地研究所：南極地域観測将来構想中間報告, pp. 25-41, 2018
- 23) 岩田勉：月面基地の実現に向けて, 日本航空宇宙学会誌第36巻第416号, pp.403-409, 1988
- 24) 倉前正志：環境問題と宇宙技術の関わりについて, 衛生工学シンポジウム論文集 9-3-7, pp.179-814, 2001
- 25) 栗木恭一：21世紀の宇宙インフラストラクチャ, 精密工学会誌 54/3/1988, pp.429-434, 1988
- 26) 浜田亘曼, 上坂直行, 浜野亘男：広域・モビリティ・耐災害性に優れる宇宙インフラストラクチャーと ITS, 日立評論 vol.62 No.9(2000-9), pp.13-16, 2000
- 27) 国立天文台：RISE（月惑星探査検討室）, http://www.miz.nao.ac.jp/riase/topics_20090123, 2018.12.21
- 28) 小久見 善八：蓄電技術一月探査のためにー, 月探査に関する懇談会 第3回会合資料6, 2009.11.18
- 29) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構：生命維持・環境制御技術（ECLSS）, <http://www.kenkai.jaxa.jp/research/exploration/eclss.html>, 2018.12.21
- (2018. 12. 25 受付)

A STUDY ON THE BASIC PLAN OF THE LUNAR BASE

Yoshiyuki AOU, Fumi TAKAHASHI, Tomohiro IGARASHI, Yuuta YANADA and
Kenta MATSUSHIMA

The present research indicated a research framework of the construction of lunar base as a virtual environment showing the direction of our new regional planning. As the goal regarding lunar base research, the short-term view is set up aiming at the proposal concerning settlement bases which various countries are aiming for. And the medium-long-term goal is set up aiming at the proposal concerning large-scale bases on the moon. In addition, we also grasp the lunar exploration program of the United States, Russia, Europe, etc., as well as the trend of exploration technology development in Japan. As results regarding the technology development aspect, although the study of elemental technologies is progressing, there has no construction plan to connect them. We also confirmed the significance of construction consultants' entry, because lunar base formation has a higher affinity to the civil engineering technology on earth, rather than the technology in space. In this term, we built a summary scenario related to the construction of lunar base based on those backgrounds, and organized necessary considerations for the construction of the base.

月面基地基本計画に関する研究（その2）

改田行司¹・高橋富美²・梁田雄太³・五十嵐知宏⁴・前川裕介⁵・松嶋健太⁶

¹技術士（地質部門） 株式会社建設技術研究所 東京本社地圏環境部
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: y-kaida@ctie.co.jp

²技術士（建設部門） 株式会社建設技術研究所 大阪本社道路・交通部
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: aou@ctie.co.jp

³技術士補（環境部門） 株式会社建設技術研究所 大阪本社資源循環・温暖化対策室
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: yt-yanada@ctie.co.jp

⁴技術士（環境部門） 株式会社建設技術研究所 東京本社地球環境センター
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: igarashi@ctie.co.jp

⁵技術士（総合技術監理・建設部門）株式会社建設技術研究所 東京本社社会防災センター
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: maekawa@ctie.co.jp

⁶技術士（総合技術監理・建設・環境・衛生工学部門）株式会社建設技術研究所 東京本社地球環境センター
（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1） E-mail: matsushima@ctie.co.jp

月面基地建设を含む月面探査は、米国などを中心に現実のものとなるよう進められている。わが国も米国の計画への参加を表明する等、月面探査に関する技術開発とそれに伴う宇宙産業の成長が期待されているところである。本稿では、少人数の常住拠点をつくる月面探査の初期段階ではなく、初期段階（入植期）から開拓期、完成期への移行のプロセスを踏まえた基地の立地や基地計画の検討が重要であり、そのために必要な都市計画、立地、エネルギー、食糧・資源循環、社会システムの視点から検討を行った。本格的な月面基地建设には、本稿に示した総合的な検討が必須であり、今後のこの研究を深めることが、わが国の月面探査や宇宙産業の育成に貢献できるものと考えられた。

Key Words : lunar base, regional planning, lunar exploration, space industry

1. はじめに ～月面基地は現実のものに～

2019年10月に内閣府の宇宙政策委員会は、米国の国際宇宙探査への参画を決定したと発表し、わが国が強みとする技術提供等を行うかたちで米国と歩調を合わせて月面探査に参加することになった。

月面探査は、国際宇宙探査の大きな流れが月、火星、ついで深宇宙に集約される¹⁾中、いまや米国だけでなく、欧州、中国、ロシアが月面探査を競うように進めている状況である。それだけでなく、スペースXのような民間企業が国際宇宙ステーションへの物資の輸送をNASAから請け負うことや2023年に初の民間人向け月周遊旅行を企画するなど、従来の国家の威信をかけたプロジェクトとしての宇宙探査から宇宙産業としてのビジネス化が著しく進展している状況にある。

わが国でも月面基地建设を含む月面探査について、多くの個別の技術開発が行われている。開発を進めている企業もそれぞれの強みを生かしたうえでマネタイズを目指しているところであり、ビジネスとして今後大き

く進展することが想定されている。

また、本研究で明らかになったのは、月面に当初の基地を建設するだけなら、建設するための技術や基地の立地を含め大きな制約は少ないと考えられた。しかしながら、月面基地が将来的な火星探査や深宇宙探査の拠点として多くの人が常駐する本格的な基地とする場合に、当初の入植拠点をベースにどのように展開することもっとも効率的であるかなど総合的な視点での検討が重要でありながら、現状で十分に検討が行われていない点と考えられた。

つまり、本格的な月面基地建设のフェーズを見すえた基地の立地や計画、その際に考慮すべきエネルギーの供給方法や食糧・資源循環、社会システムの検討は、地球からの輸送効率や基地建设の効率性、月面での資材調達や組み立ての能力、基地内で考慮すべき、安全管理や社会システム構築のための仕組みなどさまざまな論点が提示されるものである。

本稿は、これらの端緒となるものであるが、本格的

な月面基地建設には、必須のテーマであり、さまざまな議論や研究を喚起するものとなれば望外である。

2. 月面基地をどのように本格展開するか

国際宇宙探査調整グループ (ISECG) は、有人着陸を契機に、長期探査・滞在にむけたインフラ開発を中心に進め、長期的には商業利用活性化による月経済圏構築のロードマップを示しており、今後、我が国も月面開発への参加が、官民含めて急速に進むものと考えられる。

本稿では、昨年度整理した入植シナリオの再考を行い、「入植期 (基地)」から「開拓期 (まち)」への移行フェーズ分析から、月面における「都市計画」の視点で考察を行った。

(1) 本稿で想定する月面開発のロードマップ

a) 入植期 (基地)

2024 年のアルテミス計画、2026 年の NASA による月の周回軌道に設置される有人拠点 Gateway の完成を考慮し、2030 年代を月の本格的な探査・利用が始まる³⁾ 「入植期 (基地)」とする。

表-1 入植期 (基地) の想定

時期	月面の本格的な探査・利用の開始 2030 年代
滞在者	・宇宙飛行士 (資源・科学探査、多種多様な月面活動を実施) が短期間滞在
規模	・面積 : 300m ² (居住地部分のみ: 1 人あたり 15m ²) ・居住規模: 数人~数十人程度
活動内容	・月極域に有人月面拠点を形成 (Gateway と月面は有人月面離着陸機で結ぶ) ・月面と圧ローバ、月面無人ローバで月面間を移動し、本格的な探査・利用を実施

b) 開拓期 (まち)

国家・民間資本による複数の有人拠点がビジネスで活用され宇宙滞在者による人間社会が月面で形成されることを想定した 2050 年代⁴⁾を「開拓期 (まち)」とする。

表-2 開拓期 (まち) の想定

時期	有人拠点をビジネス等で活用 2050 年代
滞在者	・宇宙に関する研究者、業務の実務者 ・労働者 (操縦士、技術者、科学者、建設業者等宇宙開発を生業とする人) ・宇宙旅行者
規模	・面積 : 60,000m ² (居住地部分のみ: 1 人あたり 30m ²) ・居住規模: 1,000 人程度
活動内容	・研究者、労働者とも長期滞在し、研究、ビジネス、作業を実施 ・宇宙旅行者が短期に滞在

c) 完成期 (都市)

火星に約 60 万人が居住可能な都市 (約 600km²) が

建設される 2200 年⁵⁾には月面においても一般人も含めた人類が生活を営む都市が形成される「完成期 (都市)」と位置付ける。

表-3 完成期 (都市) の想定

時期	月面都市の完成 2200 年代
滞在者	・研究者、労働者等を中心に一般人が半永久的に居住。家族の形成。
規模	・面積 : 25,000,000m ² (居住地部分のみ: 1 人あたり 250m ² DID 相当) ・居住規模: 1 万人程度
活動内容	・火星入植のための資源探掘と資材製造、宇宙船製造を中心に地球と同様な生活を営む

(2) 入植期 (基地) 開発に向けた技術の動向

入植期は月面移住計画の初期段階であり、本格的な探査・利用が目的である。現在、各種企業や研究機関が、月面での有人滞在に向けた技術・研究開発を進めている。これらの既存の研究動向を、建設、居住、移動(探査)、月へのアクセス、通信、エネルギーの 6 つに大別し、現在の主な開発技術の動向を整理した。この段階では、生命維持のため必要最低限の環境形成や探査技術等が求められる⁶⁾。

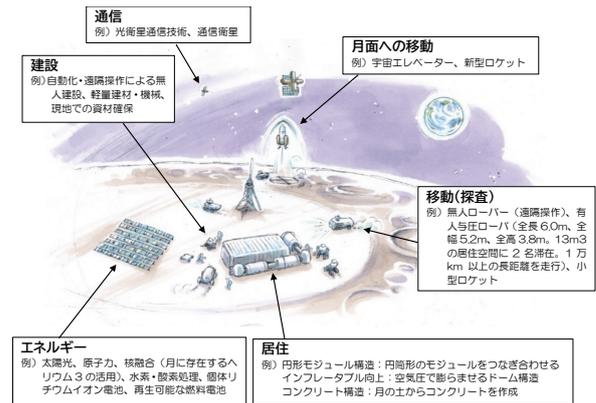


図-1 入植期 (基地) に関する技術開発の動向

(3) 開拓期 (まち) における都市計画

開拓期では民間企業を含めた研究・技術者等が集まり、月面基地におけるビジネス拡大のための研究を進めながらも、各々が独立して生活を行うレベルであると想定した。また、一般人でも比較的月面への移動が比較的容易となり、観光要素も付加される段階と想定する。よって本フェーズでは、都市計画的な要素をふまえた基地の配置計画が必要であると位置づけ、開拓期の基地に想定される機能を整理した (表-4)。

表-4 開拓期月面基地に想定される機能

中央管制機能	基地全体の管理・管制、観測、通信、情報集約・発信
居住拠点	生命維持、環境制御、居住、保健衛生、医療・福祉
食料生産	食料生産(人造肉工場、Solein工場)、屋内栽培施設

拠点	設, 貯蔵
業務拠点	業務・会議, 研究・実験設備
観光拠点	月面観光の宿泊・娯楽
防災拠点	緊急時の避難場所(地下), 医療・福祉,
交通拠点	月面外: 地球・火星の長距離移動と宇宙ステーションとを結ぶ短距離移動 月面内: 月面探査, 月面間移動 (短距離・中長距離)
物流拠点	物資の貯蔵・在庫管理・輸送
エネルギー拠点	電気の発電・配電・蓄積・回収, 熱制御(廃熱収集・輸送・放射)
資源・製造拠点	資源採掘・運搬, 精製・加工, 廃棄物処理
建設拠点	建設重機・資材置き場

さらに, 上記の機能の配置計画を試行した. 完成期に向けた月面都市への発展を念頭に, ①居住地への環境負荷, ②月面生活維持における重要度, ③ビジネスの発展, ④非常時の安全性確保を重視し, 「A.エネルギープラントゾーン(エネルギー拠点・資源製造拠点)」, 「B.中央管制機能」, 「C.生活ビジネスゾーン」の大きく3つに分類し, ゾーニングしていくこととし, 「C」については, 「a.医療・生命維持拠点」, 「b.企業拠点(研究系・業務・物流系・建設系・観光)」, 「c.居住地」, 「d.食料生産ゾーン」に分類し, 配置, ゾーン間の移動について整理した(図-2).

これまでのところ, 入植期から開拓期への移行を見据えた検討は実施されておらず, 月面開発において都市計画を見越した検討や技術開発も重要である.

表-5 各期における基本条件

項目	入植期	開拓期	完成期
平均高さ (m)	10	100	1,000
面積 (m ²)	750	30,000	2,500,000
体積 (m ³)	7,500	3,000,000	2,500,000,000
人数 (人)	50	1,000	10,000
1人あたり面積 (m ²)	15	30	250
必要な電力供給能力 (kW)	1,000	20,000	200,000

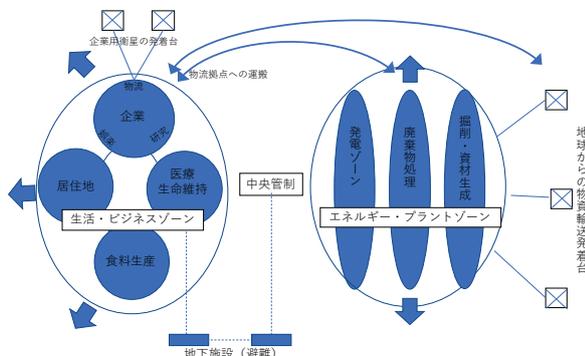


図-2 開拓期(まち)のゾーニングイメージ

(4) 入植期から開拓期への開発シナリオ

入植期から開拓期への遷移にあたっては, 月面基地自

体の拡張を図らなくてはならない. このとき, 建設機械などの重機, 3Dプリンタなどの精密工作機械, 発電パネルなどの資材は, 地球からの輸送が必要となる. ただし, 入植期とは異なり, 月面基地の人員が増強されていることから, 無人施工機械のオペレーターは, 月面基地の人員で充足されていると仮定する. 開拓期に向けた開発シナリオは, 概ね以下のサイクルを繰り返し, 月面基地自体の拡張を目指す.

- ①月面探査: 基地拡張に向けた適地選定・資材探査
- ②電源施設拡張: 太陽光パネルの設置, 送電・蓄電施設の整備
- ③資源採掘施設建設: レゴリス, セメント, 金属等の施設拡張に必要な資源採掘施設の建設
- ④素材製造・資材製作プラント建設: 採掘した資源を精製・加工し, 建設資材や機械材料として製造・部品製作を行うためのプラント建設
- ⑤居住施設等拡張: 施設の拡張に伴う, 作業人員の増強に向けた居住施設を拡張. さらに, 基地拡張に合わせて, 管制施設・業務拠点を拡張.

このとき, ②~④のプロセスは, 基地拡張自体に必要なものであり, 月面基地がその必要機能を充足するまで, 繰り返し行われる. それに対し, ⑤のプロセスは, 月面ビジネスの需要と供給によって, その必要量が規定されると考えられる.

3. 基地はどこにつくればよいか

本稿では, 月面基地の基本条件の整理を行い, 各施設における地形等条件や概算面積の算出を行い, 適地選定に向けた条件を検討した.

(1) 基本条件の整理

適地選定における地形等条件や面積を算出するため, 入植期から必要と考えられるエリア毎の検討を行った.

- ①居住エリア: 滞在者が居住するエリア
- ②発電エリア: 発電施設・蓄電施設を設置するエリア
- ③着発エリア: 月面離着発するエリア

(2) 各施設における地形等条件

a) 居住エリア

居住エリアの地形等条件について, 表-6に整理した.

表-6 居住エリア条件

項目	条件
緯度・日照	・条件なし
地形	・宇宙線を考慮し, 日照が遮れる地形 (例えば2方又は3方が崖地形) ・開拓期に拡張ができるように, なるべく広い平坦地
他エリア関係	・着陸エリア, 発電エリアともに近い方が運搬効率や配線距離など効率的

b) 発電エリア

発電エリアの地形等条件を、想定される太陽光発電と原子力発電について条件を検討した（表-7）。

表-7 発電エリア条件

項目	条件
緯度・日照	<ul style="list-style-type: none"> 入植期は太陽光発電が主体になると考えられ、日照時間が長い極付近 原子力や他の発電設備が主体となれば、緯度の条件はなし
地形	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電設備では高台で見通しがよい地形。面積効率を考慮すると傾斜地、施工性を考慮すると平坦地 原子力発電は冷却効率を考慮すると日照が遮れる地形（例えば2方又は3方が崖地形）
他エリア関係	<ul style="list-style-type: none"> 住居エリアに近い方が効率的 粉塵等が発生する発着エリアとの離隔が必要

c) 発着エリア

発着エリアの地形等条件について、表-8に整理した。

表-8 発着エリア条件

項目	条件
緯度・日照	条件なし
地形	高台で見通しがよく平坦地
他エリア関係	<ul style="list-style-type: none"> 住居エリアに近い方が効率的 粉塵等が発生により、発電エリアとの離隔が必要

(2) 各施設における必要面積

a) 居住エリア

月面での居室用ユニットの開発が各機関で進められているなか、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構国際宇宙探査センターが“地上の先端建設技術を適用した月面拠点建設の概念検討”によると、2人用居室は30㎡（必要面積50㎡）の設計としている。

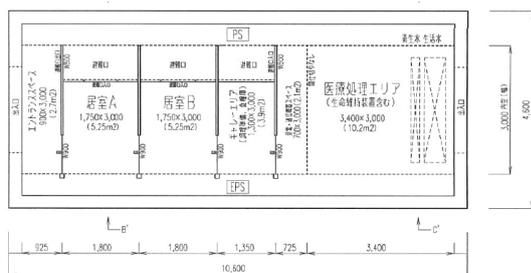


図-3 居室イメージ図

表-9 各時期における居住エリア必要面積

時期	滞在人数 (人)	1人当たりの必要面積(㎡)	2人用居住ユニット数 (個)	総面積 (㎡)
入植期	50	15	25	1,250
開拓期	1,000	30	1,000	50,000
完成期	10,000	250	80,000	4,000,000

b) 発電エリア

発電に使用する太陽光パネルは、販売されているものを参考にし、軽量型のフジプレミアム FCT-225Y3（出力225W、面積1.46㎡）の発電率を100%とした場合の

必要な設置数量及び、平坦地に設置した場合の占有面積を整理した。

表-10 各時期における発電エリア必要面積

時期	滞在人数 (人)	必要電力供給能力 (kW)	必要太陽光パネル(枚)	総面積 (㎡)
入植期	50	1,000	4,445	6,490
開拓期	1,000	20,000	88,889	129,778
完成期	10,000	200,000	888,889	1,297,778

c) 発着エリア

入植期では、NASAで過去に検討されたアルタイル月面着陸機（4人乗り）を想定した発着エリアのサイズを図-4示す。発着エリアは、垂直離着陸に対応したものとなる。レゴリスの飛散対策のため1箇所につき直径200m程度必要となり、セーフティーゾーンを含めると、直径1100m程度の敷地が必要となる。

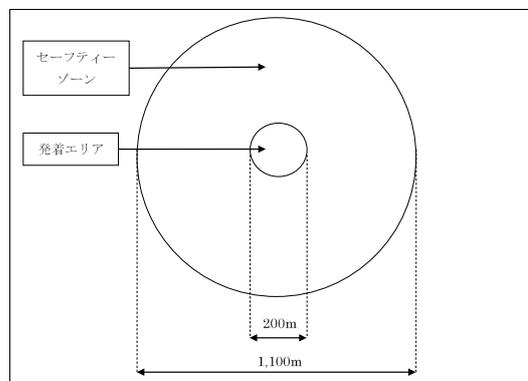


図-4 発着エリアサイズ

出典：The Space Congress Proceedings 2012 - Launch and Landing Infrastructure on the Moon, Robert P. Mueller, NASA, et al.

発着エリアは、事故などで使えなくなった場合を想定し、2箇所以上設置することが望ましい。よって、入植期の発着エリアの概算面積は、以下ようになる。

$$\text{入植期：} \pi \times 0.55\text{km}^2 \times 2 \text{箇所} \div 2 \text{km}^2$$

開拓期では、スペースX社が開発中のスターシップ宇宙船（直径9.0m、高さ50m、積載量100t、100人乗り）程度のサイズを想定する。このときの発着エリアも、垂直離着陸に対応したものとなる。事故などで使えなくなった場合を想定し、2箇所以上設置することが望ましく入植期の2倍とし、4km²とした。

完成期では宇宙船の制御技術の発達によりレゴリスの飛散を抑えられ、発着エリアは直径500m程度に抑えられるものと想定する。

$$\text{完成期：} 4\text{km}^2 + 0.5\text{km}^2 \times 20 \text{箇所} \div 2 \text{km}^2$$

(4) 適地選定のまとめ

入植期から開拓期は地形や日照条件のよい場所を選定しておく必要がある。入植期の主要電源である太陽光発電に優位な極付近において平坦地と窪地がある地形を選定する必要がある。

表-11 各時期における概算必要面積 (m²)

区分	入植期	開拓期	完成期
居住エリア	1,250	50,000	4,000,000
発電エリア	6,490	129,778	1,297,778
発着エリア	2,000,000	4,000,000	13,000,000
合計	2,007,740	4,179,778	18,297,778

理想的な配置平面図・断面図を次に示すとおりであり、今後は月の地形情報から適地選定を行うものとする。

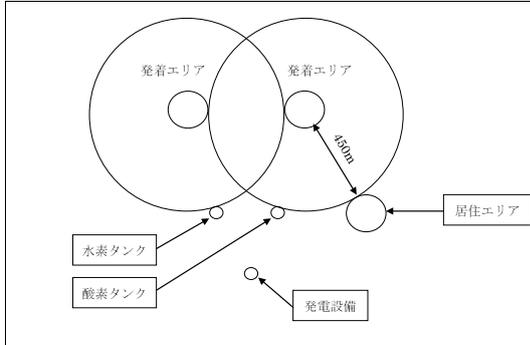


図-5 平面図 (入植期イメージ)

出典：The Space Congress Proceedings - Launch and Landing Infrastructure on the Moon, Robert P. Mueller, NASA, et al.

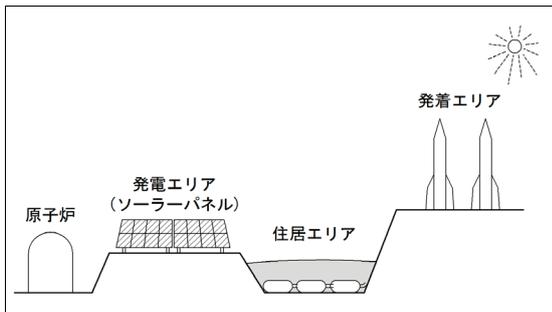


図-6 断面図

4. エネルギーをどのように確保するか

昨年度報告にて、月面基地に必要なエネルギーを太陽光発電と燃料電池の組合せにより供給可能であることを明らかにした。本稿では、エネルギーを考えるうえで重要な要素となる熱収支に着目した検討を行った。

(1) 月面基地の熱設計

1) 熱収支の概要

月面は真空であるため、太陽や惑星などの熱源から基地表面への熱入力「放射の吸収」によって、一方、基地表面から宇宙空間への熱出力は「放射の放射」によって行われる。また、太陽光発電による搭載機器の動作により、基地内部で発熱があり、これらのバランスによって月面基地の排熱・保温を担うラジエータ・ヒーターが決定する⁹⁾。従って、表面の熱光学特性(太陽光吸収率 α 、および赤外放射率 ϵ)は、基地の温度を決定する上で重要なパラメータであり、この熱光学特性をうまく組み合わせた(熱の入出力収支)月面基地の熱設計が必要である。

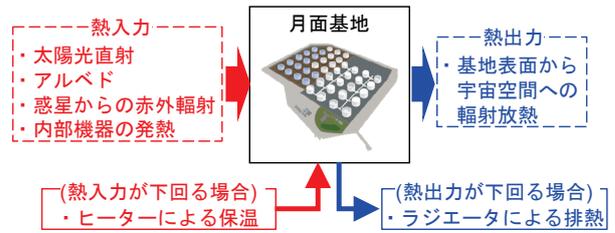


図-7 月面基地の熱環境条件

2) 熱の入出力収支

熱の入出力収支より、ヒーターとラジエータの必要熱供給、排熱量を試算した。

ヒーターとラジエータを稼働しない場合、月面基地と宇宙間の単位表面積当たり熱流束 q は下式となる。

$$q = G - \alpha \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

G : 太陽光直射の熱流束 T : 月面基地内温度

α : 太陽光吸収率

ϵ : 赤外放射率

σ : ステファン・ボルツマン定数

右辺第一項は太陽光直射、第二項は基地表面からの放射放熱を表す。アルbedo、赤外放射、内部機器の発熱は単純化のため無視した。このとき、日照時と日陰時を想定し、月面基地への熱流束 q を求めた。

表-12 日照時と日陰時の月面基地への熱流束

区分	日照時	日陰時
$G[W/m^2]$	1370	0
α^{**}	0.07	0.07
ϵ^{**}	0.03	0.03
$T[K]$	300	300
$q[W/m^2]$	82	-14

※ 太陽光吸収率、赤外放射率は、高い断熱性能をもつアルミ蒸着面の値を用いた

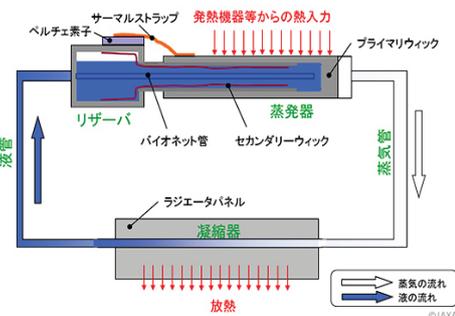
表-12より、月面基地におけるヒーターとラジエータの必要量は以下のとおり試算される。

日陰時のヒーター必要熱供給量：14m³/s

日照時のラジエータ必要排熱量：82m³/s

3) 熱制御技術の概要

月面上の熱制御においては空気による対流熱伝達を利用できない。基地内からの発熱はラジエータへと輸送され放射放熱される(図-8)。熱輸送には一般に高熱伝導材料による伝熱促進が、より大量の熱を輸送する場合はヒートパイプという熱輸送素子が用いられる¹⁰⁾。



出典：JAXA 資料¹⁰⁾

図-8 LHP(ループヒートパイプ)ラジエータの構成

(2) 月面原子力発電技術の概要

入植期、開拓期を経て月面基地の大型化に伴い、エネルギー需要が拡大することから、太陽光発電だけでは賅えない電力を月面で入手可能な物資を利用し発電する必要がある。ここでは、有望なエネルギーとしての原子力発電の整理を行った。

1) 月面原子力発電の概要

a) 利用可能物質

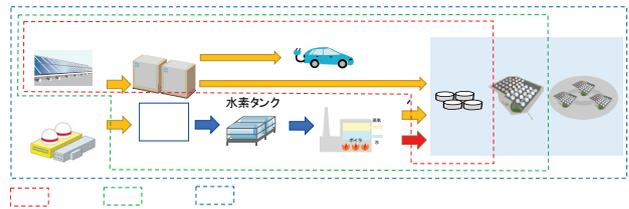
月にはウラン、トリウム等、原子力発電に利用できる物質が確認されている。また、月には、地球上にほとんどない「ヘリウム3」という1万トンで全人類の100年分のエネルギーを生み出せる物質が数百万トンあると推定されている。

b) 発電方法

月面での原子力発電は効率性の観点から、スターリングエンジンと閉鎖ブレイトンサイクルによる発電方式が有力視されている。

光発電による電力を水素の形で貯蔵することで、蓄電池と比べ、エネルギーを大量かつ長期間貯蔵でき、安定的な電力として供給可能である。エネルギー供給技術としては、排熱を熱供給に活用する水素コージェネレーションシステム（以下、水素CGS）を考慮し、付随して水素製造装置、水素貯蔵タンクを考慮する。

完成期には、月面基地が大型化してくると、太陽光発電だけでは電力をまかなえなくなる可能性があるため、月に存在するウランやトリウム、またはレゴリスに含まれているヘリウムなどを利用した原子力発電を新たにエネルギー供給技術の選択肢として考慮する必要があるが、エネルギーインフラの整備に必要な地球からの輸送能力の検討が必要である。



2) 各機関の現在の取組

a) JAXA

「地上の先端技術を適用した月面拠点建設の概念検討：平成31年3月」の中に委員B社より原子力発電設備の意見が寄せられている。

- ・システムの電力出力：160kW
- ・原子炉1基当たりの出力40kW→4基設置
- ・原子炉機器本体：φ1m×H1m

b) NASA

NASAのマーシャル宇宙飛行センターとロス・アラモス国立研究所の共同による「Kilopower」宇宙用の原子炉を開発している。2017年11月～2018年3月の地上試験をクリアした状態。燃料はウラン235で、大きさはペーパータオルの芯程度。現在は、1基1kWであるが将来10kW、10年間稼働まで高める。大きさの詳細不明。高さ約3.4m、重さ2000kg（うち保護シールド1500kg）シールドを軽量化すれば重量は大幅に削減できる。

(3) エネルギー需給の整理

① エネルギーシステムの概況

ここでは、再生可能エネルギー（太陽光等）、コージェネレーション（燃料電池等）、蓄電池などを組み合わせたシステムを検討し、月面基地の各シナリオ（入植期、開拓期、完成期）におけるエネルギーシステムを検討・整理した。

入植期の構成機器として、電力供給技術には、比較的成本等が抑えられる太陽光発電、太陽光発電システムの安定稼働を図るための蓄電池を設置する。

開拓期には、新たなエネルギー供給技術の選択肢として、水素エネルギーを考慮する。月面には長い間太陽風に曝されて水素を豊富に含んだ物質を有している。太陽

5. 食糧や資源をどのように確保するか

本稿では、月面基地の基本条件に基づき、月面基地の入植～開拓～完成までのシナリオごとに人口規模や生活レベル等の条件を想定し、必要となる食糧や資源等の量の算出を行い、食糧生産・資源循環システム構築に向けた検討を行った。

(1) 食糧・水の需要量、廃棄物の要処理量等の検討

a) 食糧

宇宙では微小重力によって地上よりエネルギー消費が低下すると考えられていたが、宇宙飛行中の研究で飛行中のエネルギー消費は地上にいるときよりも増えていることが報告されている¹²⁾。

そのため、入植期・開拓期・完成期のいずれも1人あたり必要カロリーは地球上の平均的な成人男性値である2,500kcal/人/日で、カロリーベースでの食糧需要量を試算した。また、米、小麦、とうもろこし、サツマイモの食糧需要量¹³⁾をまとめた。

表-13 食糧需要量の試算結果

項目	単位	入植期	開拓期	完成期	
時期	-	2040年頃	2040～2100年	2100年頃	
人数	人	50	1,000	10,000	
必要な熱量	1人、1日あたり	kcal/(人・日)	2,500	2,500	2,500
	1日あたり	kcal/日	125,000	2,500,000	25,000,000
必要耕地面積	米	ha	3.05	60.98	609.76
	小麦	ha	2.40	48.08	480.77
	とうもろこし	ha	1.54	30.86	308.64
	サツマイモ	ha	3.57	71.43	714.29

b) 水

入植期・開拓期については既往研究における宇宙船搭

乗員の想定例¹⁵⁾、完成期については南極基地の事例¹⁶⁾から1人あたり生活水の需要量を用いて試算した。

また、必要となる水需要量に対して求められる水処理再生装置の規模を、国際宇宙ステーション「きぼう」の日本実験棟での「水再生技術実証システム」の設備仕様¹⁴⁾に基づき推計した。

表-14 水需要量の試算結果

項目	単位	入植期	開拓期	完成期
時期	—	2040年頃	2040～2100年	2100年頃
人数	(人)	50	1,000	10,000
飲用水の必要量	(L/人/日)	3.4	3.4	3.4
	(L/日)	170	3,400	34,000
	(kL/年)	62	1,241	12,410
生活用水の必要量	(L/人/日)	20	20	120
	(L/日)	1,000	20,000	1,200,000
	(kL/年)	365	7,300	438,000
水の必要量	(L/日)	1,170	23,400	1,234,000
	(kL/年)	427	8,541	450,410
	水処理再生設備 ^{※1)}			
	幅 (m)	10	33	171
	奥行 (m)	10	33	171
	高さ (m)	3	5	10
	面積 (m ²)	92	1,104	29,098
	体積 (m ³)	276	5,518	290,977

※1: 国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟「水再生技術実証システム」の設備仕様に基づく推計。処理水量0.8L/日、寸法: W535mm x D600mm x H480mm (水処理装置)、W120mm x D580mm x H475mm (制御装置)

c) 廃棄物

入植期については国際宇宙ステーションの事例¹⁷⁾、開拓期・完成期については地球上の事例¹⁸⁾から1人あたり一般廃棄物の発生量を用いて試算した。

表-15 一般廃棄物の要処理量の試算結果

項目	単位	入植期	開拓期	完成期
時期	—	2040年頃	2040～2100年	2100年頃
人数	(人)	50	1,000	10,000
一般廃棄物の発生量	(kg/人/日)	50	1,000	10,000
	(kg/日)	1.4	1.4	1.4
	(t/年)	70	1,400	14,000
	(m ³ /年) ^{*1}	128	2,555	25,550
一般廃棄物の要処理量 ^{*2}	(kg/日)	42	840	8,400
	(t/年)	15	307	3,066
一般廃棄物の処理後残渣発生量 ^{*3}	(kg/日)	4.2	84	840
	(t/年)	1.5	31	307
	(m ³ /年)	3.8	77	767
一般廃棄物の要処分量 ^{*4}	(kg/日)	1.1	22	224
	(t/年)	0.4	8	82
	(m ³ /年)	1.0	20	204
	処分量			
処分量	処分量 (t/年)	30	60	100
	容量 (m ³)	31	1,226	20,440
	深さ (m)	3	5	10
	面積 (m ²)	10	245	2,044

*1: 比重は圧縮前の状態の0.2t/m³とした。
 *2: 発生量の60%が可燃性廃棄物である想定とし、熱溶解処理するものとした。
 *3: 熱溶解処理による減容率は10%とした。処理後残渣の比重は0.3t/m³とした。
 *4: 処理後残渣の10%と、不燃物の1%を最終処分量とした。比重は0.4t/m³とした。

(2) 関連技術情報の収集及び整理

a) 食糧供給関連技術

食糧供給の求められる要件として、宇宙飛行と地上における栄養素の要求量と栄養素の概要を整理した。

また、月面での食糧生産が期待できる技術について、微生物由来の食用タンパク質である“Solein”¹⁹⁾、3Dバイオプリンターによる人工肉の培養技術²⁰⁾を整理した。

月面での作物類の栽培技術²¹⁾²²⁾と動物の養殖技術²³⁾²⁴⁾については、候補となる動植物の特徴と技術を整理した。

b) 水・空気の再生循環技術

月面で人間が生活するうえで、水や空気の再生循環は必須の課題である。ここでは、国際宇宙ステーションなどで用いられている環境制御・生命維持システム (ECLSS: Environmental Control and Life Support System) についての情報を整理した²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾。

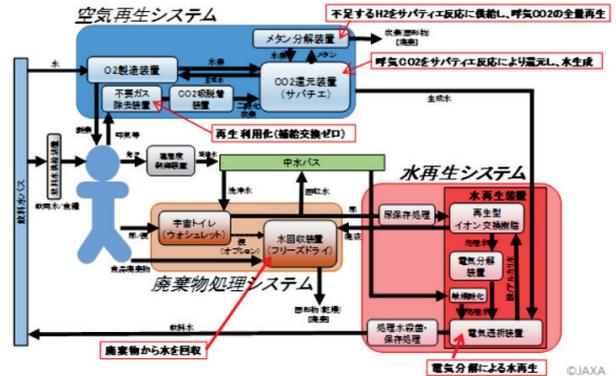


図-9 ISSにおける再生型ECLSSシステム系統図

c) 廃棄物の処理、処分技術

Made In Space 社では、Commercial Polymer Recycling System (CPRS) で、ISS内で発生する廃プラスチックを3Dプリンターの原料とする計画を進めている。CPRSには図-10に示す技術²⁹⁾などがある。また、月面などの微小重力の環境下では、燃焼時に炎の挙動が地球上のようにならず、廃棄物の焼却時にうまく燃え広がらない可能性が考えられることから、Vortical Oxidative Reactor Technology Experiment (VORTEX)と呼ばれる、渦状の酸素の気流を発生させて燃焼させる技術が研究されている³⁰⁾。

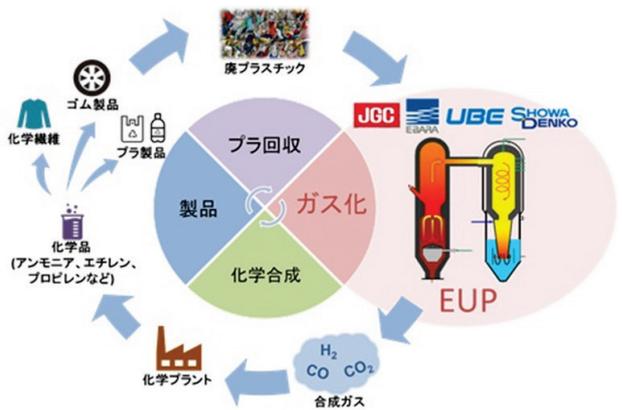


図-10 廃プラのガス化ケミカルリサイクルフロー図

(3) 課題等

a) 水・食糧上の課題

水・食糧上の課題として、栄養管理と病虫害等への対策が挙げられる。

b) 廃棄物の処理・処分上の課題

廃棄物の処理・処分上の課題として、発生抑制・減容化、安全化・安定化、資源回収、保管・廃棄技術、一般廃棄物と産業廃棄物の区別、放射性廃棄物の処分³⁰⁾が挙げられる。

6. 本格的な基地建設に向けた社会システムの構築

月面基地計画においては、いわゆる施設整備に関する計画と併せて、運用ルール等の危機管理面の計画、いわゆる「社会システム」に関する検討が不可欠となる。

本稿では、基地建設に横断的に関わる社会システム上の主なリスクを現時点で考える範囲で整理し、関連する対応課題（検討課題）について取りまとめた。

(1) 社会システム上の運用・危機管理に関する検討課題

ここでは、月面基地の運用に関する社会システム上の検討課題として、以下の5点を整理した。

- ・宇宙開発・月面開発の競争に係る大枠ルール
- ・就労・生活上の環境配慮
- ・将来的な月面環境への影響
- ・事故発生時の対応
- ・長期的開発に伴う開発環境悪化への対策

a) 宇宙開発・月面開発の競争に係る大枠ルール

現状においては、月協定（月その他の天体における国家活動を律する協定）³²⁾への加入が少なく、国家間・開発事業者間における宇宙資源や利用権紛争の調整方法が具体化されていない。また、宇宙条約³³⁾（2条・6条）において、天体の所有は国及び私人も認められていない解釈となっている。しかし、禁止規定がないこと、占有行為ができる耐力のある民間事業者（私人）が管理運用し、実質的な占有が可能であり、宇宙条約未加入の国籍国が自国領域に編入した場合の扱い、更には、国際法上の禁止規範がない以上は容認される（例：ローチェス号事件）等の問題がある。

上記の国家間・開発事業者間における宇宙資源、利用権の紛争・調整に関する課題を踏まえ、宇宙開発・月面開発の競争に係る大枠ルールを定めていく必要がある。

b) 就労・生活上の環境配慮

既往の問題点として、月面活動時における粉塵対策問題（例：アポロ計画において指摘された有害な膠着物）による健康被害、機器の早期故障・劣化が懸念されている。特に、働・生活環境、健康維持に悪影響となる有害物資の除去方法を入植規模に応じて定め、生活衛生環境の維持基準等を定める必要がある。

c) 将来的な月面環境への影響

近年の月面における実験用生物サンプル（クマムシ）の落下事故など、月面基地内外における各種実験や入植時

におけるリサイクル不可の持ち込み物品、月面入植環境に影響がある物質など制限についてルール化されていない。これは、直近の防疫上の問題から、将来的な生態系への影響を及ぼすことも十分考えることから、検閲体制についても通常の空港港湾におけるセキュリティ・セーフティ対策以上の持ち込み禁止物のチェック体制及び手続きが必要となる。

d) 事故発生時の対応

基地開発に伴う作業空間・生活空間の増大と燃料等の危険物の使用や主な動力源となる通電による火災、宇宙船・基地内における亀裂・損壊発生の事故発生の潜在リスクの増大と対策の検討が必要となる。

e) 長期的開発に伴う開発環境悪化への対策

月面基地開発に伴う地球や月面基地からの離発着回数の積み重ねにより、長期的かつ大量のスペースデブリ発生が見込まれる。現状では、長期開発期間において、継続的に蓄積発生するスペースデブリ抑止に関する具体的なルール化がなく、結果的には移動手段となる機体の重量増や機器の安全対策へのコストが嵩むこととなる。スペースデブリの発生抑止や回避・改修技術開発についても併せて検討する必要がある。

(2) 対応課題の整理

a)から e)の現状・問題点を踏まえ、今後の対応課題及び検討項目案について以下に整理した。

a) 月協定（宇宙法）等の充実化

- ・具体的な協定項目の体系的整理とルール化（個別条約の締結、許認可権者間の調整手法、占有期限や紛争解決手段の具体化）
- ・国際法、宇宙条約、南極・北極海・深海底におけるルール³⁴⁾の運用（禁止規定の積極的追加）
- ・禁止規定があることにより開発が遅延しないための特例等の条項整備 等

b) 有害物資除去や制約的空間内の居住就労継続に係る技術開発

- ・住環境保全、健康維持に係るアセス、モニタリング技術の開発
- ・屋外活動の制限に係る基準検討
- ・月・地球間の重力均衡域におけるコロニー空間の確保（本格開発事業段階の良好な受け皿（生活基盤）とし、月面との定期交通を確保する）

c) 禁止品目、防疫対策、処分方法のルール化

- ・生植物や病原体を有するサンプル、新たな疾患発生時の対応マニュアルの検討
- ・地上発着時点及び物流拠点ゲートウェイ（月周回拠点基地「NRHO」³⁵⁾）における検閲体制の検討
- ・空港分野における防疫対策及びBCP・危機管理マニュアル等の作成

- d) 救急・救助体制, 必要機材, 脱出船の確保
 - ・防火区画・避難経路, 自動消火機能等の設備の整備・警報及び誘導モニタリングシステム
 - ・防災・危機管理に関わる専任の人員体制
 - ・Gateway (月近傍有人拠点), 脱出船, バックアップ月面代替施設等の2拠点整備の原則(確保)の検討
- e) 長期開発を持続可能とする阻害要素の低減
 - ・宇宙ゴミ観測人工衛星による長期モニタリング, 回収方法の開発
 - ・民間開発事業者の事業参入時における一定負担のルール化及び覚書・協定等の締結

7. ビジネスとしての月面探査

現在の宇宙ビジネス市場は「衛星産業」と「非衛星産業」に大別され, 約8割を「衛星産業」が占める⁷⁾。2018年の世界の宇宙産業の売り上げは3,830億ドル(2016年から10%上昇)とされている⁸⁾。一方国内での市場規模は, 概ね政府の宇宙予算と同様の3,000億円と推定され, うち文部科学省が約半分を占める⁷⁾。これに, 衛星通信・放送サービス産業の約8,000億円, カーナビゲーションやアンテナ等の宇宙関連民生機器産業の約3~4兆円を加えると約5兆円規模となる。

(1) わが国の宇宙開発

月面をはじめとするわが国の宇宙開発の中心はJAXAであり, 近年では補正を含め概ね1,800億円程度の予算化が行われている。予算の多くは, 現在の衛星によるセンシングや宇宙輸送システム, 有人宇宙活動などに使われているが, 今後の宇宙政策の目標達成に向けた分野横断的な研究開発等の取組として186億円(うち業務委託費20億円), 宇宙航空政策の目標達成を支えるための取組として134億円(うち業務委託費3億円)が2018(平成30)年度には予算化されている。わが国も政府方針として月面開発に加わることが表明されたところであり, 今後予算の重点配分化なども想定される場所である。

(2) 世界的に拡大する宇宙産業

わが国の宇宙産業の市場規模が2007年~2016年までの10年間で概ね3兆円前後で推移していたのに対し, 世界の宇宙産業の市場規模は約19兆円から36兆円と2倍程度の水準まで拡大している。

米国や欧州では宇宙産業の育成や活性化を図るための取組が進められており, NASAは, ISSに貨物を輸送することに関する民間能力の開発支援策(COTS)や, ISSへの物資輸送サービスを購入するための支援(CRS)などを, 欧州では中小・ベンチャー企業や研究機関を対象とした「Low-Cost Space Launch」コンテス

トなどが実施されている。

これらは, 従来の宇宙産業が, 民間企業が公的事業として政府等から受託する産業モデルであったものから, 民間の商業ベースのサービスや事業分野が拡大し, 投資者が投資回収を完了する事例なども出現することで, 宇宙産業が投資に値する分野になりつつある。月面基地建设には, 本稿で示したように個別の検討要素を有機的に結びつけ, 総合的に解決を図るべき技術的・社会的検討がある。月面での宇宙ビジネスの育成は, これらの課題を解決しつつ進める必要があると考えられる。

謝辞: 本研究では5つのWGを立ち上げ, 18名のメンバーで短いながらも活発な議論を行ってきました。ここに一人ひとりのお名前をあげることはできませんが, 当社の宇宙開発を担う財産だと思います。また, 小松特別顧問には協議の場にご参加いただき, 的確なアドバイスをいただきました。改めて感謝いたします。

参考文献

- 1) 文部科学省: 国際宇宙探査への参画方針についての検討状況について, 2019年9月5日
- 2) 今井良一: 宇を拓くタスクフォース(第4回) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)プレゼンテーション資料, 2019年1月28日, 宇宙航空開発機構
- 3) 日本航空宇宙学会: JSASS 宇宙ビジョン 2050, 2019年3月
- 4) The Official Portal of the UAE Government: 2030-2117, <https://government.ae/en/more/uae-future/2030-2117>, 2018.11.26
- 5) <https://www.shimz.co.jp/topics/dream/content05/>
- 6) C.R. ワイリー(富久泰明訳): 工学数学(上), pp. 123-140, ブレイン図書, 1973.
- 7) 齊田興哉: 宇宙ビジネスの動向とカラクリがよ〜くわかる本, 秀和システム, pp10-11, 2018.10
- 8) 大貫美鈴: 土木学会誌 Vol.104No.12, 土木学会, pp8~10, 2019.12
- 9) J.HTSJ, Vol.57, No.238: ◆特集: 宇宙機の熱制御フロンティア, pp.2, 2018
- 10) JAXA宇宙科学研究所HP, 2009
<http://www.isas.jaxa.jp/forefront/2009/nagano/>
- 11) JAXA研究開発部門HP
<http://www.kenkai.jaxa.jp/research/allelectric/lhp.html>
- 12) 松本暁子: 宇宙での栄養, 宇宙航空環境医学 Vol. 45, No. 3, 75-97, 2008
- 13) de VRIES, C.A. 1967 Choice of food crops in relation to actual and potential production in the tropics .Neth. Jour. Agric. Science. 15 : 241-248.

- 14) 栗田工業株式会社,
<https://www.kurita.co.jp/aboutus/press190724.html>
- 15) Wastewater Gardens International :
Estimated water consumption in the world +
Per appliance and sector
- 16) オーストラリア : Keeping Antarctic stations
water-wise
- 17) 有人宇宙活動における廃棄物処理に係る研究,
京都大学環境衛生工学研究会 第32回シンポジウム講演論文集
- 18) 三機工業株式会社小関多賀美 : 南極昭和基地
における廃棄物・排水処理, 衛生工学シンポジウム論文集, 6, 1-5
- 19) Solar Foods, <https://solarfoods.fi/solein/>
- 20) 3D Bioprinting Methods and
Techniques: Applications on Artificial Blood
Vessel Fabrication, Acta Cardiol Sin
2019;35:284-289
- 21) 片山直美, 山下雅道, 和田秀徳, 三橋淳 : 火星
居住のための昆虫を考慮した宇宙食の構想, Space
Agriculture Task Force, Biological Sciences in
Space 2006年20巻2号
- 22) GeoTech ジオテック : 自然流栽培の解説
- 23) 遠藤雅人・竹内俊郎 : 閉鎖系における魚類の
生産と微小重力の影響, Int. J. Microgravity Sci.
Appl. Vol.32, No2 2013
- 24) 農研機構,
https://www.naro.affrc.go.jp/org/nfri/yakudachi/gaichu/column/column_069.html
- 25) JAXA,
<http://www.kenkai.jaxa.jp/research/exploration/eclss.html>
- 26) シンポジウム「特殊環境での医療ガス」
Vol.16, No.1, 2014 宇宙ステーションの空気環境
を創る環境制御・生命維持システム
- 27) 桜井誠人 : 宇宙機における生命維持システム
について
- 28) 大西充 : 有人宇宙活動に向けた生命維持シス
テムの研究開発, 宇宙航空研究開発機構 総合技術
研究本部
- 29) 昭和電工,
<https://www.sdk.co.jp/english/news/2019/37672.html>
- 30) NASA,
https://www.nasa.gov/audience/foreducators/k-4/features/F_Recycling_for_Moon.html
- 31) 電気事業連合会,
https://www.fepc.or.jp/nuclear/haikibutsu/high_level/torikumi/index.html
- 32) 月協定 (月その他の天体における国家活動を
律する協定)
http://stage.tksc.jaxa.jp/spacelaw/world/1_01/01.J-6.pdf
- 33) 宇宙条約 (月その他の天体を含む宇宙空間の
探査及び利用における国家活動を律する原則に関
する条約)
http://stage.tksc.jaxa.jp/spacelaw/world/1_01/01.J-1.pdf
- 34) 南極条約
<http://worldjpn.grips.ac.jp/documents/texts/mt/19591201.T1J.html>
- 35) Gateway (月長楕円極軌道「NRHO」) 第27
回 ISS・国際宇宙探査小委員会資料 (H30.11.6)

A STUDY ON THE BASIC PLAN OF THE LUNAR BASE (No.2)

Kaida Yukishi KAIDA, Fumi TAKAHASHI, Yuuta YANADA, Tomohiro IGARASHI, Yuusuke MAEKAWA
and Kenta MATSUSHIMA

The United States and other countries have been making efforts to realize lunar expeditions, including the construction of a lunar base. Japan has also announced its participation in the United States' program, and is expected to develop technologies related to lunar expeditions and grow the space industry accordingly. In this paper, it is important to consider the location of bases and base planning based on the transition process from the initial stage (settlement period) to the reclamation stage and the completion stage, not the initial stage of lunar expeditions in which a small number of people make permanent bases. For this purpose, we examined the necessary regional planning, location, energy, food and resource recycling, and social systems. For the construction of a full-scale lunar surface base, the comprehensive studies described in this paper are essential, and it was thought that deepening this research would contribute to lunar surface exploration and the development of the space industry in Japan.