

# JSASS 宇宙ビジョン 2050 を達成するための宇宙科学技術ロードマップ

## 人間が定住する月拠点建設へのロードマップ【2019 年度・2021 年度増補】

### 【ロボット】補足資料

2021 年度、本文 P20-21 で新たに追加した「ロボット」の技術ロードマップは、紙面の都合上、検討内容の一部の紹介にとどまっている。以下、その検討の背景を含めた詳細を紹介する。

#### 1. 検討の背景、コンセプト検討

##### (1) 縦孔・地下空洞の早期探査

月面は真空であって、昼夜の高温・低温、放射線、レゴリス汚染、アステロイド被弾など、極めて厳しい自然環境であるため、月面上で宇宙システムを(昼夜を超えて)維持することは相当な高い技術と高額なシステム開発を必要とする。これに対して、地下空洞内の環境はかなり緩和される。宇宙システムの維持は比較的容易と考えられるが、電力の確保と地球通信の確保が課題となる。また、月面・地下空洞ともに人類の貴重な財産であることから、『探査作業に伴う環境汚染は極力避ける』ことが前提となる。更に、本探査は『政治的な意味合い』も強いことから、『早期に確実な方法で実施する』こと、つまりできるだけ簡単な既存宇宙技術でコンタミを避けられるシステムで手早く行うことが期待される。

##### (2) 電子システムの月地表面での越夜

地下空洞内では(バッテリー等以外は)保温の必要がないが、日照の途絶えない極高地以外の月地表面=月地表面で『電子装置システムを越夜させる』には、①RTG 方式、②燃料電池方式、③バッテリー方式、④周回衛星からのエネルギー供給などによる保温が必要になる。それぞれの方式には、以下のような課題が識別される。

- ① **原子力電池 (RTG) 方式**：『軽量・高信頼性・シンプル』なので、極めて有用な機器だが、核アレルギー、地球からの打上失敗時/永久に残存する放射線汚染の可能性問題がある。
- ② **燃料電池方式**：小型化のメリットがあるが、水など電気分解と分解気体の収集貯のための仕掛けとその保温システムも必要で、結果大規模システムになることが懸念される。
- ③ **バッテリー方式**：昔から多くの解析・地上実験の実績はあるが、月面上に置いたのでは成立性に懸念がある。
- ④ **周回衛星からのエネルギー供給**：給衛星の故障異常で、月地表のシステムが全滅のおそれがあるので NG。衛星の冗長化は大規模システム。

##### (3) 既存宇宙ロボット技術とのギャップ

月面地下基地の準備実験や建設運用作業には、実用的な宇宙ロボットが必要になる。我が国は MFD・ETS-7 の『小型単腕 Manipulator』や宇宙ステーションの『きぼうロボットアーム』などの

宇宙作業用ロボットを開発してきたが、月面地下基地で期待されるロボットは、次のような特徴を持つ先進的ロボットで、その技術開発に取り組む必要がある。

これまでのような『すぐに修理が可能な状態で』『Move & Wait strategy で操作される』『Pick & Place 型の固いロボット』ではなくて、より先進的な『故障時にも稼働性を維持し』『操作ミスや状況変化・通信途絶でも操作安全性を確保して』『環境との接触を基盤とする柔らかい・滑らかなロボット』

① 稼働性を維持させるモジュール化された再構成ロボット：

ロボットの機能性を上げるためには、自由度が増え複雑化を避けられず、特に機械系の故障が多い宇宙環境では故障の心配は尽きない。一方で、宇宙での OnSite 修理は ISS でも EVA を伴う大変な作業で（内容に依るがたぶん1か月以上）、修理が終わるまでシステムの機能は限られてしまう。従ってロボットに故障が発生しても稼働性を維持し、宇宙システムへの影響を少なくすることが重要となる。例えば、ロボットの構成をモジュール化し電気・機械・情報インタフェースを標準化しておいて、複数のロボットが動作する状態で運用しておき、故障・異常発生時にはロボットモジュールを再構成することで、並列冗長が適用できる。更に、モジュール毎に下位互換性のある機能向上を図れば、旧モジュールの活用も可能になり、基本機能の稼働性の確保を容易にできる。

② 遠隔操縦における操作安全性を確保するための自律ロボット：

ロボットの機能性をあげるには、特に操作計画と試行操作に人間の能力を活用できるようにすることが有効と考えられる。これは、現実には人の介入を必須とするような作業が多く存在することに起因する。

まず、協働する人・協働ロボット・非操作物・環境に危害を加えないこと（操作の失敗によって状況を悪化させてしまう場合も含む）が第一に要求される。宇宙ロボットの操作は、数 sec 以上の時間遅れを伴い、精密ロボットが得意とする Model\_base 環境ではなく、更に Worksite 側の状況が時間的に変化し得る状況で行われると考えられる。更に、ロボット操縦者は人間であり、当然に操作ミスは起こり得る（JEMRMS の与圧部内操縦卓からのクルーによるジョイスティック操作には、操作ミス時の危険発生回避のために、作業ごとに Software による空間 Barrier を予め準備するが、この手法は高コストで制作に時間がかかる）。

そこで、危害発生の可能性を打ち消すために、『危害に繋がり得る状況を防ぐ自律ループをロボットに搭載してガードする方法が有効』と考えられる。操作入力もガードをかけ易い方法でのみ操作することが求められるであろう。ただし、多くの産業用ロボットで AI による操作スキルの獲得は実現されているが、今日において、操作安全性に注目した遠隔操作技術の研究は未着手である。

### ③ 柔らかく滑らかな操作を実現するロボット：

人の代替・補助を行うロボットは、環境や対象物への機械的接触を基盤とする。②項で述べた状況での操作も接触操作を前提としていて、応答遅れがなく、環境温度に依存せず、柔らかく滑らかに制御し得る機械制御システムの実現が必須であるが、未だ実現されていない。この技術が地上応用を含めた『ロボット実用化の鍵』を握っていると認識されている。

例えば『ISS の EVA 作業による ORU 交換』を例にすると、「コネクタを取り外して旧 ORU 取り外し&新 ORU 設置」までは定型作業でできるが、「コネクタ取り付け」の際には「ハーネス&コネクタが無重力空間に漂ってしまい、「艀装調整のためのちょっとした双腕作業」が必要になる。これを、時間をかけずに安全に行うには、試しながら操作する『試行操作』が要求される。同じように、船内での Captive Bolt を締める操作では、不完全ねじ部が斜めに入ってしまうように「鉛直性を直交する 2 方向から確認しつつ、軽く締めていく」という操作になる。人が普通に行う『安全性を確かめながら行う操作』には応答遅延のない滑らかな試行操作が含まれている

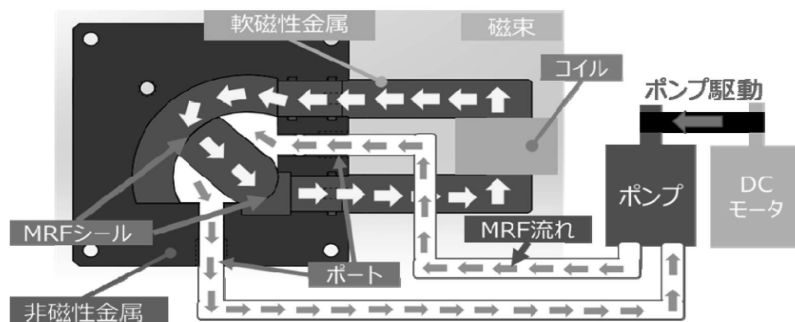
近年の地上ロボットの研究では、宇宙ロボット関節方式として有望な方式が複数出現してきている。例として、下記に 2 例を挙げる。

- ① 磁気粘性流体(MRF)を電気静油圧アクチュエータ(EHA)に用いて『柔らかく安全で、精密作業・大出力作業への対応を目指す早稲田大の SRAI/AIREC (Moon Shot 研究、下図参照)、
- ② 減速比 10:1 程度の逆動特性良い遊星ギア/サイクロ減速機/アバカスドライブなどと高出力 DD モータを用いて、遅れのないセンサレスの柔軟性を実現するメカトロ

(日本ロボット学会誌 Vol.39, No.2, 2021<NEDO 先導プログラム -解説-> 参照)

これまでの『固く精密な産業用ロボット』から介護・看護などの『安全で柔軟なロボット』へのブレークスルーは、シンプルさと確実さを信条とする『宇宙ロボットの技術開発で先導が可能である』と考えられる。無重力・低重力で動作する宇宙ロボットには、(1G 化で動作する地上ロボットが、大きな関節力と大きな減速比ギアを備えることが必須であるのに対して)組み込みやすい技術といえる。

なお、宇宙ロボットが大きな操作力を必要とするのは大型ペイロードの運搬・位置決めなど接触を前提としない場合が多く、力と柔軟性は同時に両立させなくても良い可能性がある。つまり、力作業にはギヤードモータに MRF クラッチを介して並行入力する方式で実現可能である。



磁性粘性流体アクチュエータによる逆可動性モータの構成概念

#### ④ 月面（船外）活動ロボット

『縦孔・地下空洞探査』や『地下基地建設実験・各種実験』に使用するロボット、並びに『月地表面の昼間に下記のような用途で使用し、何らかのシェルタでの越夜が可能なロボット』は、必須の船外ロボットであって、その形態はローバ型, Humanoid, 4 limbed Robot 型が考えられる。

➤ 領域探査・領域調査：

無人探査：偵察(reconnaissance)、nav-aid 設置、地図作成、長時間計測、...

EVA クルー支援：Side-View 提供、Harness 処理、機材輸送、移動補助、緊急対応...

➤ 月面基地の建設支援

➤ 月面基地の IVA/EVA 維持管理：

➤ 有人機・無人補給機の(不整地)着陸の支援

操縦は、軌道上拠点系・月面基地・与圧車両の IVA クルー、EVA クルー、または地上から実施

その実現を拒む壁（ミッション的、技術的、経済的…）・難しさの例を下記に示す。

➤ 昼間の断熱と排熱、越夜の断熱と保温

➤ 厳しい重量制約 ~ LEO の 1/10 以下

➤ 未知の領域こそが探査・調査の価値が大きい（広大に広がる興味のなさそうな領域）。

➤ レゴリス防塵（sensor 窓、長寿命 seal、熱放射特性…）、放射線レベル（total dose、SEU…）

➤ 外皮のレゴリス汚染のため、On-site 保守は当面困難 ⇒ 極力シンプル化・使い捨て

一方で、このような月面活動ロボットには、次のような技術が期待される。

➤ 複数ロボットの協調作業 アンカーリング、相互軽量ワイヤリング・ウィンチングなど

➤ 簡素・軽量で慣れ易い操縦システム（ex. Handheld 型）

➤ 縮退的機能劣化システム（走行車輪・操舵軸の MPF による従動/固定）

➤ 長時間探査・ルーティン調査計測作業の自律化（全方位 multi-spectral-camera による鉱物探索）

➤ 脚・車輪リンクと着陸ダンパーとの兼用可能性（MPF 可変ダンパー等）

➤ 超軽量・飛行モジュールの可能性（高比推力・非汚染？・再充填？）

数ヶ月程度のミッション期間で、初期の探査や調査（～2030年）を行うロボットは既存技術での開発が期待できる。一方で、年代の経過とともに作業能力の向上が必要になり、さらに数年程度の長期ミッションが計画されるようになれば、能力向上を意識した上での一貫した技術開発が必要だろうと考えられる。

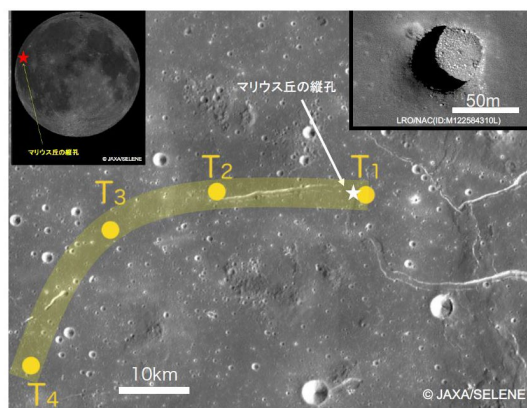
## 2. 月拠点建設に向けたロボット技術のロードマップ検討

本項では、これまでの検討を基礎に、具体的なロボット技術による『定住型の月面地下基地の開発』を構想する。開発は、①月縦孔・地下空洞の探査、②月面地下基地の実験運用、③月面地下基地の建設・運用・維持の3ステップで進める。②および③ステップを実現するために、次世代型の宇宙ロボット技術を研究開発する。ロボットを活用することで未知領域の探査・調査活動を効率的かつ低リスクで行うことができ、要所で、適宜、有人活動を実施してゆくことができる。

### ① 月縦孔・地下空洞の探査の一例（～2030年想定）

初期探査は『月面表面上に宇宙システム機材を維持することなく進める』ことを前提とし、縦孔底にダイレクトに着陸する。縦孔近傍まではヒドラジン系推進薬で制御し、分離前 and/or 分離後に、後続ミッションの離着陸航法支援装置（ex. ステム付き再帰性反射鏡アレイ）を分離投下する。ヒドラジン系推進系を分離後、即座に cold-gas-jet (dry 窒素) 系の制御を開始し、yaw 軸周りに回転しながら壁部データを取得しつつ縦孔を降りてゆき、そのまま (or 推進系を分離して) 縦孔底部に着陸する。

着陸機は、例えば『4輪車両型ロボット』で、Perseverance の火星着陸のように縦孔底面に数mから落下着陸させ、大径(50~80cm φ)の金属タイヤサスペンションで着陸衝撃を受ける。地球通信を確保（アンテナ設置）した上で、機体本体を縦孔底部から地下空洞内の穏やかな環境を確保できる場所を探し移動させる。昼間時には夜間電力と保温エネルギーを確保することが必要なため、その機能を担うシステム（ex. 機体本体）は、昼間は日照場所に、夜間は空洞環境内（立体角として深宇宙を見ない位置）に、地下空洞の一定範囲（片道~200m）を繰り返し移動できることが必要となる。発電装置（または水分解を行う装置）を設置して、昼間に最大充電し夜間保温に備える。このような『縦孔の底と地下空洞での生存継続システム』が構築できれば、続く詳細調査・探査も安定して継続できる。移動台車上にアンテナや太陽電池を展開して活動源のユーティリティを形成する。地下空洞は数10kmと想定されていて、少なくとも2~3km範囲の探査を行おうとすれば、[投光器とカメラ]及びまたは[距離画像センサ]を備えた飛行型の子機ロボットが有効である。これも Cold gas jet による飛行となる。闇の中で地形が不明な閉空間を飛行させ、慣性センサと上記外界センサで地図作成および自己位置同定技術などを確立してゆく。



マリウス丘の縦孔と地下空洞

以上の初期探査ミッション例は、2～3回のH-3打上げミッションを想定する。有人探査に比べればはるかに短期間に安価・低リスクで行うことができる。月1 day mission（～10地球 day）と組み合わせるのも有効で、地下基地への展開を意識した探査・調査を行ってゆくことが重要である。

### ※ 次世代宇宙ロボットの技術開発（～2030 想定）

月面地下基地の実験作業や建設・運用・維持のためには、本格的な実用宇宙ロボットが必須となる。我が国は『きぼうロボットアーム』などを開発してきたが、従前の『すぐに修理が可能な状態で、Move & Wait strategy で操作される、Pick & Place 型の固いロボット』では有効性に乏しく、より先進的な『故障時にも稼働性を維持し、操作ミスや状況変化・通信途絶でも操作安全性を確保し、環境との接触を基盤とする柔らかい滑らかなロボット』が必要である。その主要技術課題は以下の通りで、これらは、地上での幅広いロボット応用を含めて『ロボット実用化の鍵』といえる。

#### ・稼働性を維持させる再構成性：

機能性のためには複雑化は避けられず、厳しい宇宙環境では故障の可能性は尽きない。故障すると修理完了までシステム機能は限られてしまうので、ロボットの稼働性を維持することが重要となる。このためには、電気・機械・情報インタフェースを標準化してモジュール構成とし、Onsiteでのロボット再構成を可能として、並列冗長性・進化性を確保させることが有効である。

#### ・遠隔操作における操作安全性を確保する自律性：

宇宙ロボットは、例えば2重の故障が連続的に発生しても危害を発生させてはいけない。モデルベースではない環境で、数sec以上の時間遅れを伴い、人の能力の介在を必須とする作業が存在する。更に、操縦者の操作ミスにも対処しなければならない。そこで、危害発生の可能性を打ち消すための自律的なガード機能の搭載が必要で、操作安全性に注目したAI等の研究が期待される。

#### ・機械的接触を苦手としない柔らかく滑らかな機械制御システム：

人の代替・補助を行うロボットは、環境や対象物への機械的接触を前提としている。応答遅れが極めて小さく、環境温度に依存せず、柔らかく滑らかに制御し得る機械制御システムを実現し、有用なロボットに必須な『試行操作』を行えるようにする。

### ② 月面地下基地の実験運用（2030～2040年想定）

地下月面基地と月資源利用の可能性を探るための、ロボットベースのさまざまな技術実験を繰り返してゆく。システムが安定した段階での飛行士の訪問を可能とする。具体的な実験例を示す。

- ・縦孔地下基地の技術実験（インフレーター構造・与圧部搬入ポートと環境維持系の確立）
- ・小規模与圧空間での植物育成、生体維持、鉱物利用等の基礎実験
- ・月面活動ロボットの技術向上（外皮耐性・断熱排熱性・軽量低電力化・複数協調制御…）
- ・縦孔エレベータと月面輸送・移動・探査システムの実現性実験（昼間耐熱と夜間保温法を確立）
- ・有人機及び無人補給機の安定した昼夜の離着陸を支援するための航法支援システムの整備
- ・月面着陸場/月面⇄縦孔地下基地 物資・機材の輸送・移動方法の確立
- ・比較的広い地下与圧空間での土壌精製・植物育成の小規模実験

・比較的広い地下与圧空間での月資源精製・利用の小規模実験

**③ 月面地下基地の設置・運用・維持（2040～2050年想定）**

上記の実験フェーズを経て、恒久的な月着陸場・輸送システム・月面地下基地を展開する。