

月・火星における宇宙科学と探査のシナジー強化に向けて

関 華奈子

アルテミス計画が急速に進む中、月・火星探査における宇宙科学と探査のシナジー強化に向けて、話題提供依頼をいただきましたので、(私の知る範囲内の)科学研究の現場からの期待と懸念に基づき、論点をまとめました。なお、本件をまとめるに際し、JSEC および ISAS 国際宇宙探査委員会から資料提供等でご協力いただきました。

1. 月については、現在 JSEC で進められているアルテミス計画への日本の参画項目の多くは、与圧ローバに活かされていく構想であり、日本の産業界の国際競争力を強みとして出しつつ火星にもつなげていく、という観点は将来性を秘めている(関連資料 1)。こうした動きに対し、宇宙科学としては、広域での有人探査による月震観測やレーダー観測等による地質・資源調査等により、大きな発展につながる可能性があるという認識が持たれつつあるとともに、将来の大型研究拠点の設営のための地盤調査への寄与という宇宙工学的な期待もある(関連資料 2)。しかし、こうした JAXA の中期的な開発方針に則した科学面での検討は、まだ十分とはいえない。有人与圧ローバはよい例なので、宇宙理学工学両面から期待される観測要求などについても、開発に反映させていく仕組みが必要なのではないか。(語弊を覚悟で言えば、箱物をつくってからどう使えるかを考えるのではなく、せっかく魅力的なプラットフォームなのだから、作る段階から科学者の意見も反映される仕組みが作るべきではないか、という趣旨です。)
2. 火星については、日本では独自の構想(戦略的火星探査 JSMEP)があったところに、JSMEP と親和性の高い有人探査の先行調査という位置づけの国際協働計画(MIM: Mars Ice Mapper)の打診があった(議題 2)。JSEC からの呼びかけで、MIM に参画することでどのような科学と探査のシナジーが見込まれるのか、単独ではできない科学成果を得られるかの検討に、科学コミュニティは協力してきた。その結果、JSMEP と整合したサブペイロード提供を含む形で MIM に参画すれば、探査と科学のシナジーが見込まれることがわかりつつある。一方で、もし日本が衛星バスを提供するだけ等の中途半端な参画になると、JSMEP で目指している着陸探査へつながる科学ロードマップを実現できなくなることが懸念材料となっている。JSMEP と整合した形での MIM への参画を、JSEC と ISAS が協力していかに実現していくかは、探査と科学のシナジーを強化するための試金石といえる。MIM は NASA ではアルテミス計画の月から火星への流れにそった火星有人に向けた先行探査という位置づけの計画であり、MMX 等のヘリテージを活かした日本の貢献が、国際的に期待されている。国際的な検討は急ピッチで進みつつあり、月に続いて火星探査も JSEC が主導で実施するのであれば、MMX, LUPEX の経験・反省も踏まえて、探査と科学とのシナジーを最大限引き出す枠組み作りが早い段階から必要と思われる。

1. 国際宇宙探査の最新動向

【米国アルテミス計画】

- 2019年3月、米国は2024年までに有人月着陸を目指すことを発表。
(後日「アルテミス計画」と命名)
- NASAは、月面での持続的な活動を通じ、2030年代に火星有人着陸を実現すべく必要な技術を獲得しようとしている。
- アルテミス計画は国際パートナーと産業界との連携を重視：
 - 月近傍有人拠点(ゲートウェイ)について、ESAは国際居住棟(I-Hab)等で参画(10月、NASAとの合意(MOU)に署名)。CSAはロボットアームでの参画(12月にNASAとの合意を発表)を決定。



【日本の動向】

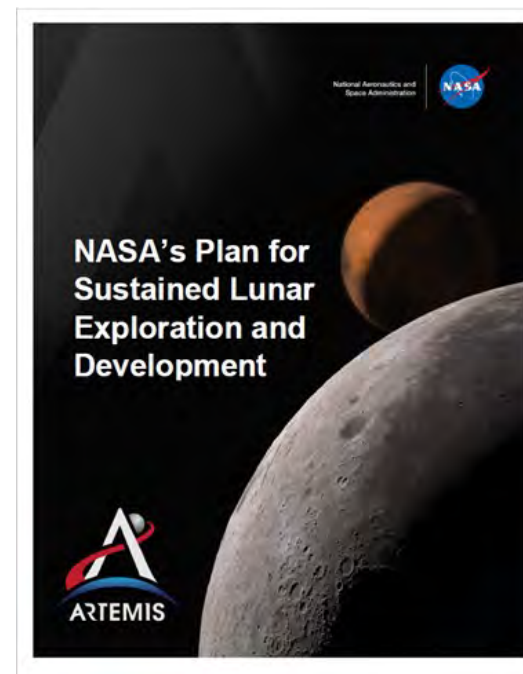
- 2019年10月、アルテミス計画への参画を政府決定。
- 2020年7月、日本人宇宙飛行士の月面での活動機会を含めた日米両国の協力内容を具体化するべく、文部科学省－NASAが共同宣言(Joint Exploration of Intent : JEDI)に署名。
- 2020年12月、日本政府とNASAの間で、Gateway合意へ署名。居住機能及び補給の提供で貢献。



【補足】 米国アルテミス計画: NASA持続的月探査・開発計画

- NASAは2020年4月、「**持続的月探査・開発計画: NASA's Plan for Sustained Lunar Exploration and Development**」を発表。
- 有人探査の主要領域として、地球低軌道、月、火星を設定。技術的に密接な連携を意図。

- 低軌道の有人運用を民間に移管しながら、ISSを月・火星探査のためのテストベッドとして活用する等、低軌道活動の必要性も明示。
- 2024年の月面着陸以降、有人火星探査ミッションに向けた準備として、持続的な月面活動を実現すべく、月南極域に有人活動拠点Artemis Base Campを建設。
- Gatewayを活用した火星探査模擬ミッションやその場資源利用技術(ISRU)等の月面革新イニシアチブも促進。



NASAが公表した
“持続的月探査・開発計画”

2. JAXAの取り組み: 日本の参画(貢献候補)

注: 下記の各番号は、参考資料(P.6~9)の各要素に対応したもの

- ⑥ 有人拠点(Gateway): **開発フェーズ**
- 生命維持/環境制御システム(CO2除去、微量ガス除去、酸素分圧制御等)(2020年代中頃)
- ④ 物資輸送: 地球→月周回拠点Gateway
- 新型補給機HTV-X **開発フェーズ※** ※Gateway補給対応型のHTV-Xの研究開発を進めている。
- ⑤⑨ 無人着陸・探査ローバ
- 小型月着陸実証機(SLIM) **開発フェーズ**
 - ✓ 小型高精細の着陸実証(2022年度打上げ予定)
 - 月極域探査ミッション(LUPEX) **開発フェーズ**
 - ✓ 月極域(米国VIPERとは異なる地点)の水氷探査を行う(2023年度打上げ目標): インド宇宙研究機関(ISRO)との協働。
- ⑪ 有人与圧ローバ: **開発研究**
- 居住機能と移動機能を併せ持つことで、探査領域を格段に拡大(2020年代後半の月面展開を目標)



有人与圧ローバ
(広域探査)

2. JAXAの取り組み：日本の参画（貢献候補）

● 開発フェーズにある各項目で得られた知見が、開発研究中の有人与圧ローバにどう活かされるのか？

- ⑥ **【有人拠点】** ISS「きぼう」与圧部の生命維持・環境制御（ECLSS）の開発・運用成果を、GatewayのECLSS開発へと引き継ぎ、その成果をさらに与圧ローバのECLSSへと繋げていくことを検討中。
- ⑤ **【無人着陸・探査ローバ】** 特に、LUPEXローバの月極域における走行で得られる地盤等の環境情報は、与圧ローバの走行系の開発・検証に活かすことを検討中。
- ④ **【物資輸送】** 直接的な接続は少ないが、HTV-Xや「きぼう」、Gateway-ECLSSの計装設計の知見を、与圧構造やハッチなどの機構、居住区の内装設計等、与圧ローバの与圧区設計に活かすことを検討中。

我が国の強みを活かした各貢献項目が相乗効果を生み、有人与圧ローバの開発研究を経て大きな開花を目指すとの考え方のもと、有人施設の中核となるECLSSの分担を日本が確保し、それを与圧ローバの開発研究へ、さらに、火星へとつなげていくことを検討中。また、与圧ローバについては、日本の産業界（自動車業界等）の国際競争力を強みとして出していく観点も有している。



Gatewayへの居住機能や
物資輸送での参画



小型月着陸実証機
（高精度着陸）



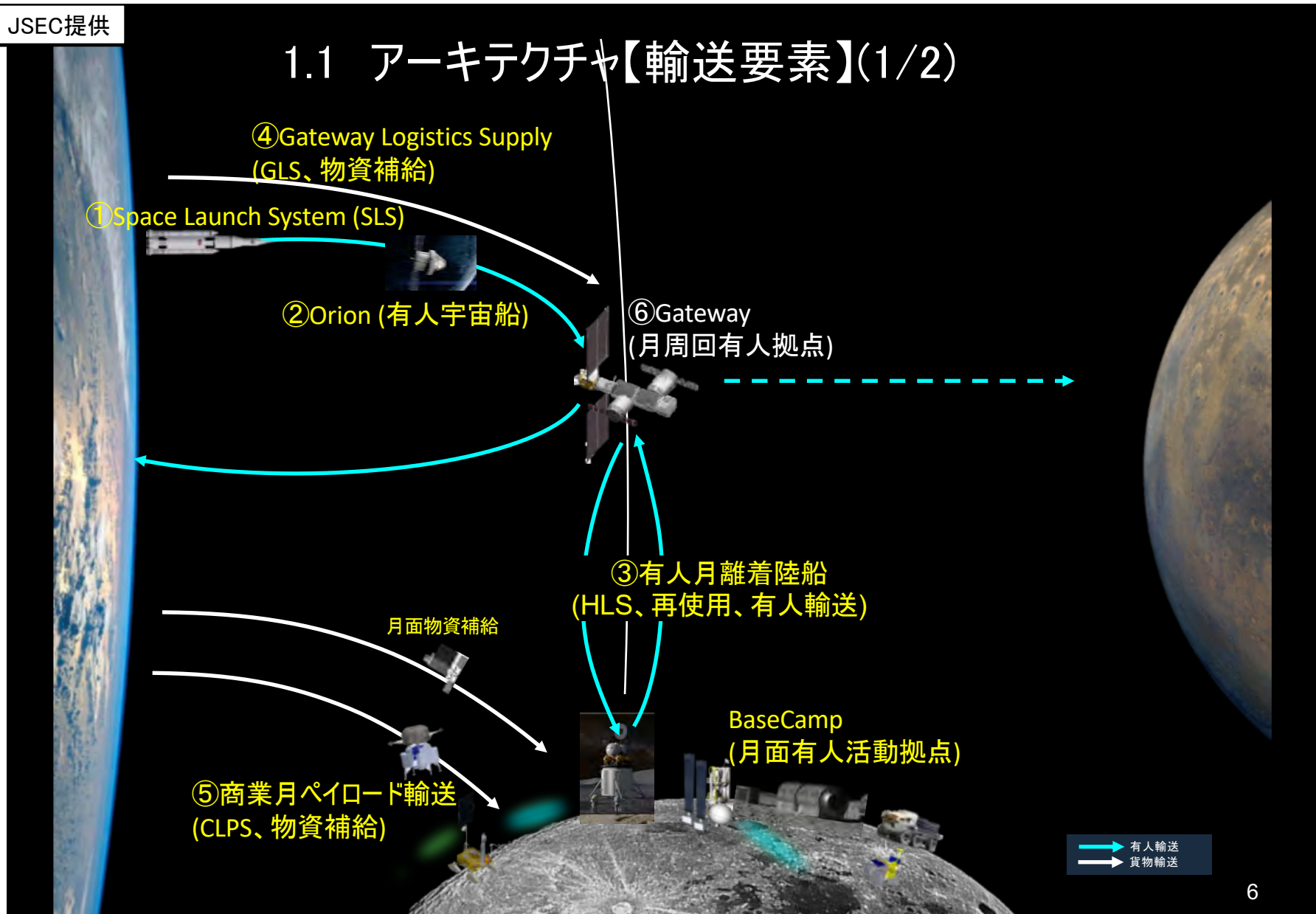
月極域探査ミッション
（水氷探査を計画）



有人与圧ローバ
（広域探査）

参考資料

1.1 アーキテクチャ【輸送要素】(1/2)



1.1 アーキテクチャ 【輸送要素】(2/2)



● 有人輸送:地球～月周回拠点間

① Space Launch System(SLS):

- ・ 超大型ロケット(低軌道に100トン強)、2021年テスト飛行予定、主契約者ボーイング社

② Orion有人宇宙船:

- ・ クルー搭乗(最大4名)、2021年無人テスト飛行予定(同上)、主契約者ロッキードマーチン社、サービスモジュール部分は別途ESAが担当(エアバスD&S)

● 有人輸送:月周回拠点～月面間

③ Human Lander System(HLS):

- ・ 米企業3社(Blue Origin社、Dynetics社、SpaceX社)を候補として選定、概念設計中。
- ・ 2021年2月以降、初回月面着陸(2024年目標)の担当企業が選定される予定。
- ・ 再使用型を目指す、当初の月面着陸はGatewayを経由せず、使い捨てのシステムとなる見込み。

● 物資輸送:地球→月周回拠点

④ Gateway Logistics resupply Service(GLS):

- ・ SpaceX社を初期の輸送サービスプロバイダとして選定(最低2回の補給)。将来的には新たな企業の参入もあり得る。
- ・ 5トンの与圧/曝露貨物を搭載可能、6～12ヵ月間Gatewayに係留

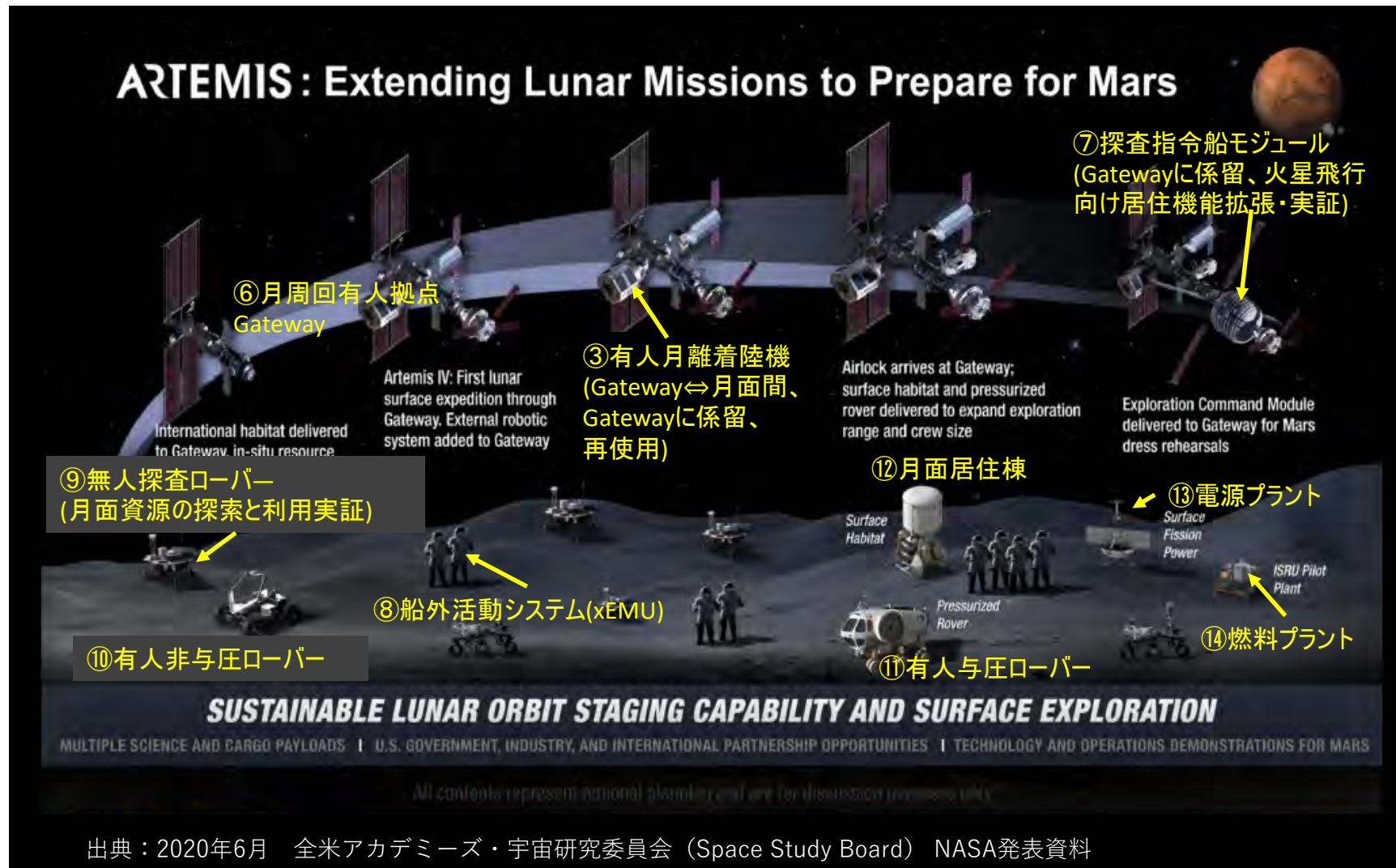
● 物資輸送:地球→月面

⑤ 商業月ペイロード輸送サービス(CLPS):

- ・ 月への輸送サービスプロバイダ候補として複数社を選定
- ・ 2021年初回輸送を実施予定
(Astrobotic社・Intuitive Machines社)



1.2 アーキテクチャ【拠点活動要素】(1/2)



1.2 アーキテクチャ【拠点活動要素】(2/2)

● 月周回要素

⑥ Gateway:

- ・ 月周回軌道上の有人拠点
- ・ 電力・推進モジュール(PPE、MAXAR社)、小型居住棟(HALO、ノースロップグラマン社)、国際居住棟(I-HAB、ESA/JAXAで分担開発)等
- ・ 2023年建設開始予定。4名の宇宙飛行士が年1回の頻度で30日程度滞在(想定)

⑦ Exploration Command Module

- ・ 火星への有人飛行(2年以上無補給、自立運用)のための宇宙船モジュールをGatewayに係留し、実証する計画(2020年代後半以降)

● 月面要素

⑧ 船外活動システム(xEMU):

- ・ 月面上(重力下)での船外活動服のシステム

⑨ 無人探査ローバー:

- ・ 2024年有人着陸に先立ち、月極域探査ローバ(VIPER)で月極域の水氷探査(2023年後半打上げ予定)
- ・ ゴルフカート大、運用期間は100日を予定。Astrobotic社が輸送を担当。

⑩ 有人非圧ローバー

- ・ 宇宙飛行士の月面上移動手段としてNASAが検討中。

⑪ 有人圧ローバー

- ・ 広域の月面探査を支える移動手段。JAXAが民間企業及びNASAと検討中。

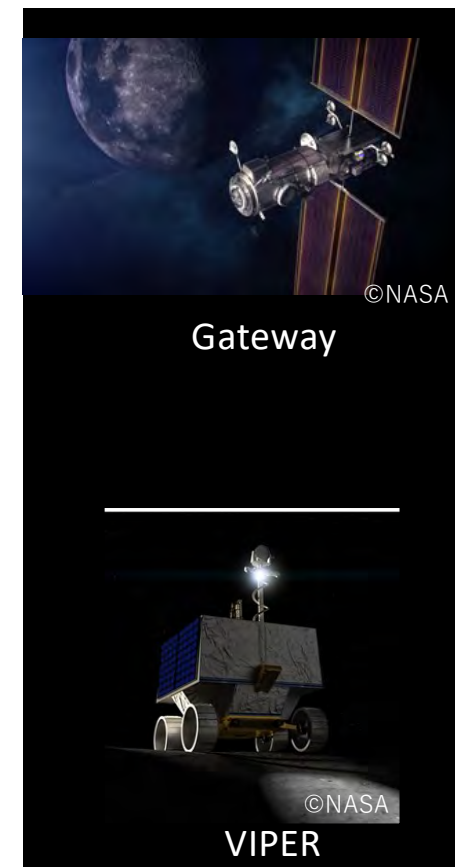
⑫ 居住棟: 有人滞在拠点(30日~45日程度想定)

⑬ 電源プラント: 月面インフラに必要な電力の供給

⑭ 燃料プラント: 月の資源を利用し、燃料を生成(持続的な探査活動へ)

概念検討中

概念検討中



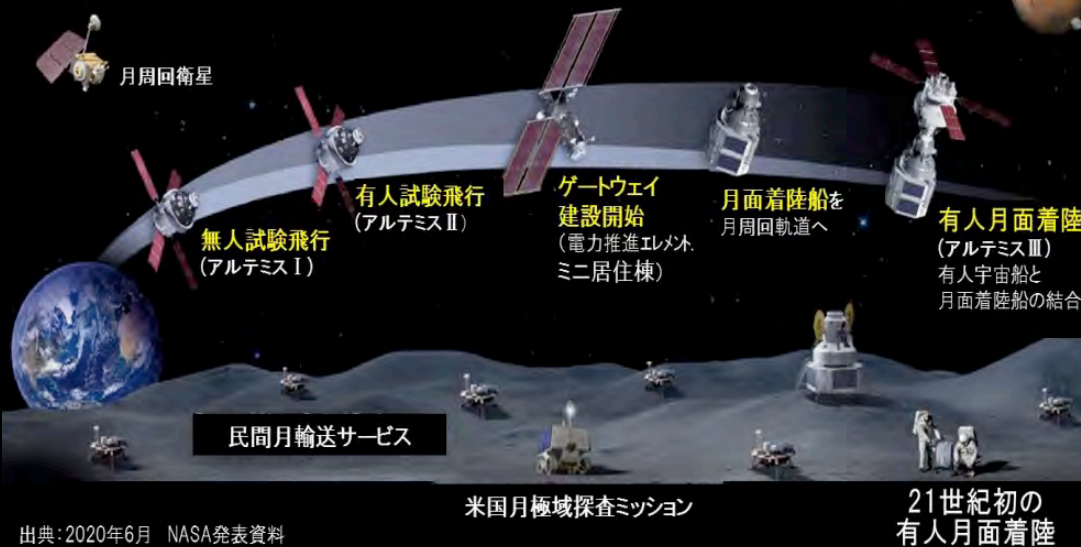
3. 国際宇宙探査における科学利用機会



3.1項 Gateway利用(船内、船外)【国際連携】

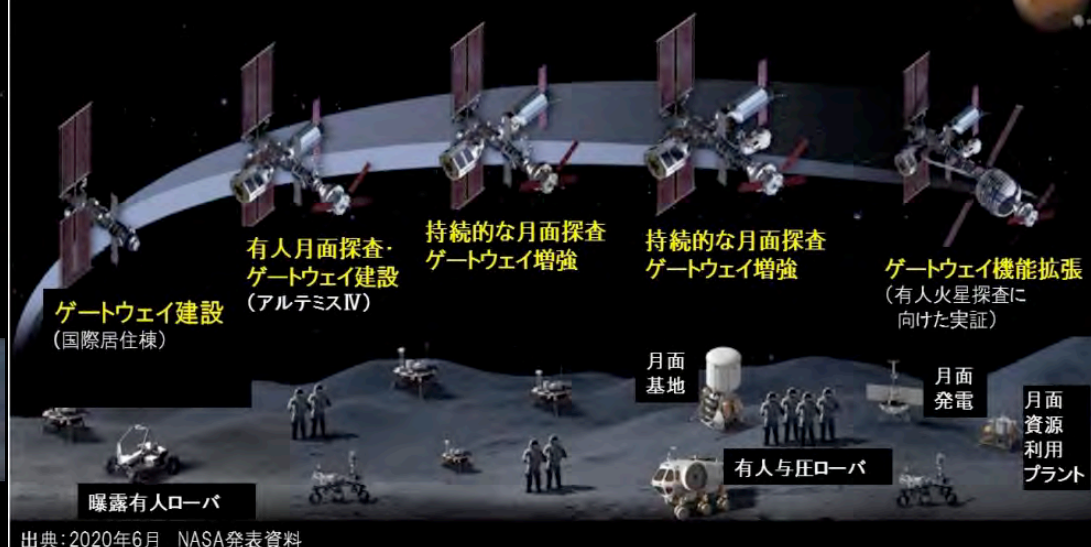
3.2項 月周回利用促進プログラム(JAXA)【検討中】

2021



2025

2030



3.3項 無人月面探査(NASA-CLPSプログラム、LUPEX他)【国際連携】

3.4項 有人月面探査(NASA-Artemis、JAXA与圧ローバー)【国際連携】

「日本の強みを活かす」方策についてのアイデア： 有人と圧ローバーを用いた月面での多点探査、研究拠点の設営、物資輸送

【目的】

月面において、有人と圧ローバーにより長期・長距離の探査移動しながら、リモートセンシングや少量のサンプルリターン時代のさらに先に行く本格的な月面調査、そして将来的には月面研究拠点の設営、物資輸送を担う。

【意義】

(月そのものの科学)

- 太陽系惑星形成における重大な謎である月の起源と進化過程の理解(後期重爆撃の有無、ジャイアントインパクト等)、月環境の理解のために、月での広範囲における地質調査および地下探査、プラズマ環境やダストの定点・移動計測が極めて有効な手段となる。

(月面および月周回を利用した科学)

- 有人と圧ローバーは各国、各研究者が提案するサイエンス機器や掘削機器を搭載する移動式プラットフォームになる。このプラットフォームは都度、自在に担う役割を変えていく。このローバーは重要な長期・長距離手段となるので、将来的にはこれを用いた月面研究拠点(月面天文台、月面ラボ)の設営、物資輸送を担う。

【太陽系科学、宇宙工学への波及効果】

- 「月、そして火星へ」の文脈において、火星など重力天体における将来の本格的3次元表面探査に資する。
- 表面移動・掘削、Gateway利用、小型探査機・探査体、軌道間輸送、通信・データ処理、エネルギー源確保、有人活動などに関する挑戦的・先駆的研究開発を促進する。

有人与圧ローバー計画にてアピール出来る点

日本の強みを活かす

- 地質・資源調査の決定打は、高解像度かつ広域のその場観測である。それは地球外での超長距離・超高速移動の記録保持者となることであり、大型かつ月でない出来ない。
- 無人ローバー開発実績で日本は欧米に水をあけられている。一方、有人与圧ローバーは無人ローバーと異なる開発要素を多く持っている。日本の大手自動車メーカーの参加は、現在開発中の自動制御技術と蓄積した自動車開発技術を用いて、有人与圧ローバーを短期間で開発することが期待される。
- 有人活動技術に関連する日本の実績として、ISS「きぼう」モジュールそしてHTVの開発・運用が挙げられる。

有人ミッションを探査に活かす

- 有人の目視による地質、地形、地層の判読から適切な地学標本を効率よく取得できる点は、有人ミッションと極めて整合性の高い研究手段と言える。
- 有人での作業では、複雑な作業が可能となる一方で搬送可能な質量と作業時間が限られるため、自動化軽量化された宇宙用の分析・観測機器が基本となる。この点では、これまで開発されている宇宙用小型機器が基本的に利用可能である。
- 月面での地学的知見そして有人活動の経験は、月面天文台や月面ラボ等の月面研究拠点の設営・運用にも資する。

日本の国際的貢献

- 日本の主導的なプログラムとして有人与圧ローバーの実現を目指すことにより、その手前に多数実施されることが期待される国際的な小型無人計画（LUPEX、CLPSなど）における成果創出の方向性を明確にし、各々の成果を束ねる効果が期待できる。その結果、このプログラム実行の敷居を下げることにもつながる。

有人と圧ローバー利用への宇宙理学・工学からの期待の例

【太陽系科学に関する科学調査の何が質的に変わるのか】

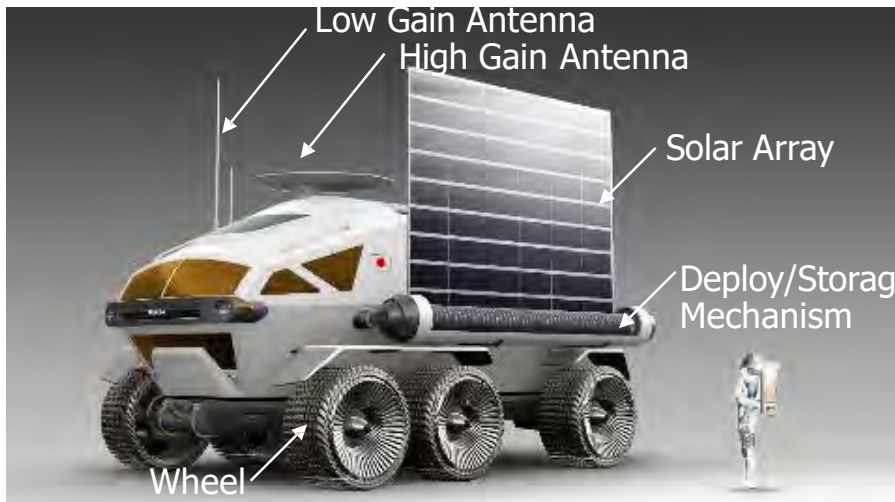
- 惑星科学は、「はやぶさ」によってリモートでの表層観測からサンプルリターンによる物質科学に移行した。さらにその次の段階として内部構造を調べて体積的な性質を明らかにするという流れになる。
- 広域での多点探査の最も大きな意義は、全体の体積的な性質が分かること。どのくらいの深さまで調べられるかは観測ネットワークの広がり按比例する。先例であるアポロの月震計ネットワークは表側の中緯度域に偏っているが、よりグローバルなネットワーク探査実現は日本が先鞭を付ける。
- 月震計は設置精度が観測精度に直結するため、有人設置のメリットは大きい。
- 将来の大型研究拠点（月面天文台、月面ラボ、それらの活動を支えるプラント設備）を設営するためには、事前の丁寧な地盤調査が不可欠である。
- 月震計として受振器（ジオフォン）を多数設置すれば、地下構造が推定できる。インフラ構築に向けた地盤調査としても、資源探査としても非常に良い。地上では、本手法が地下の非破壊調査として地盤調査や資源探査に使われている。ジオフォンは地表面に軽く挿すだけで良いが、設置数が多い方が広い範囲あるいは高い空間分解能での計測ができる。
- 地上でのボーリングでは、ロッドの継ぎや綺麗なコアの採取など人でないとうまく行かない作業が沢山ある。トラックマウントのボーリングリグ、サismic車両（弾性波探査の加振を自動で行う車両）などは、有人と圧ローバと相性が良いだろう。

參考資料

Current Concept of Pressurized Rover

Accommodate crew of two in nominal operation and life support (including Health & Medical), crew of four in contingency. Driving distance in one mission is 600km by rechargeable battery or fuel cell. The target maximum overnight period is 14 earth days while it is 8 earth days initially. It has the support system for rapid EVA access and logistics supply. It will be capable of remote operation from the earth.

Demonstration of mobile mechanism on Lunar surface (1/6G) will provide vital reference data for mobile mechanics design for Mars (1/3G) interpolating from the data on the Earth (1G).



Item		Specification	Maturity
Pressurized or Unpressurized		Pressurized	Requirement
Number of crew and PL Mass		2, 500 [kg]	Requirement
Element Wet Mass		7,000 [kg]	Notional
Element Dimension		6.0[m] x 4.4[m] x 3.8[m]	Notional
Travel spec	Total Travel distance	10,000 [km]	Notional
	Travel distance/Mission	600 [km]	Notional
	Max. velocity	10 [km/h]	Requirement
	Max. slope	15 [deg]	Requirement
	Max. overclimbing ability	30 [cm]	Requirement
Max night survival period		14 [days]	Requirement
Power generation		[Solar battery or Fuel Cell] 10 [kW]	Notional
Autonomy Level		Full	Notional
Ground clearance		0.75 [m]	Notional
Tires type :		Flexible metal	Notional
Thermal controlled (pressurized only)		Fluid Loop	Notional
Habitable Volume		9 [m ³]	Notional
Max. operation duration per mission		30 [days]	Requirement
Communication (Band & Data Rate)		(S, Ka) -10M[bps]	Notional
Spare and consumable		TBD [kg/year]	
Available period / Phase Delivered		2028 / Phase 2A	Requirement
Lifetime		8 years	Requirement