

資料29-3

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
ISS・国際宇宙探査小委員会
(第29回)H31.4.19

月着陸探査活動のJAXAにおける 検討状況について

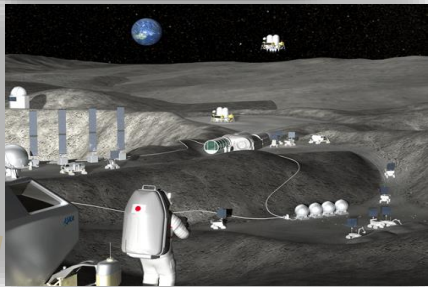
2019年4月19日

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

人類の活動領域の拡大・新たな価値の創出に向けた月着陸探査活動の位置づけ

人類の活動領域の拡大・新たな価値の創出

将来像の実現に向けて
2020年代に国・JAXAが先導して
取り組むべきこと
(バックカスティング)



持続的な活動を支える
インフラ整備
月への往来の高頻度化

持続的な有人活動に必要な
基盤技術を確立
(安全性・信頼性向上)

2040年代

月面の環境の特性を克服し
月での**持続的な活動**に向けた
技術的な見通しを得る

2030年代

具体的には、
・ 月面資源の利用可能性の確認
・ 持続的な探査を可能とする技術の実証

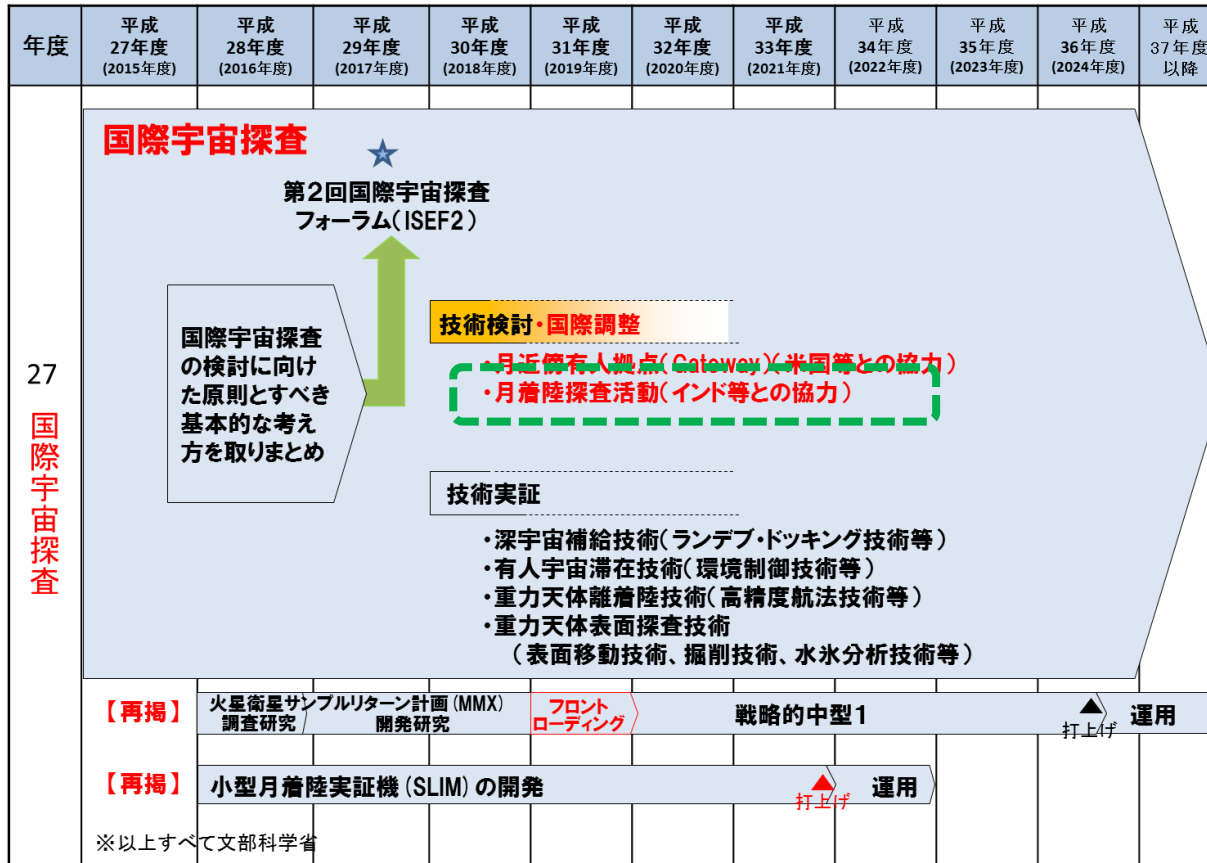
これを
月着陸探査活動
で実施

2020年代



宇宙基本計画工程表の位置づけ

4. (2)① ix) 宇宙科学・探査及び有人宇宙活動



2019年度以降の取組

- 米国が構想する月近傍の有人拠点(Gateway)への参画について、我が国の科学探査への貢献や地球低軌道における有人宇宙活動との関係にも留意しつつ、米国、欧州等も含めた国際調整や具体的な技術検討・技術実証を主体的に進める。
- 国際協力による月への着陸探査活動の実施等についても国際調整や具体的な技術検討を行う。
- 国際宇宙探査の実施に当たっては、引き続き、民間事業者とも連携しつつ進める。
- 小型月着陸実証機(SLIM)について、2021年度の打上げを目指し開発を進める。また、火星衛星サンプルリターン計画(MMX)について、2024年度の打上げを目指してフロントローディングに取り組む。【再掲】

JAXAの当面の国際宇宙探査シナリオ

火星他

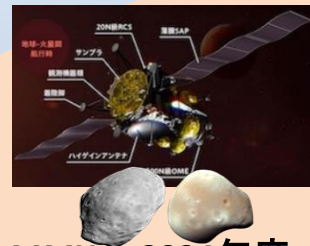
月

地球

人類の活動領域の拡大

ピンポイント着陸技術
重力天体表面探査技術

小天体資源探査他
サンプルリターン



MMX: 2024年度
重力天体
表面探査技術



★ 初期火星探査

- ・火星の生命探査
- ・火星の科学探査



★ 本格探査

- ・火星の利用可能性調査
- ・長期にわたる火星の科学探査

ピンポイント
着陸技術

ピンポイント
着陸技術

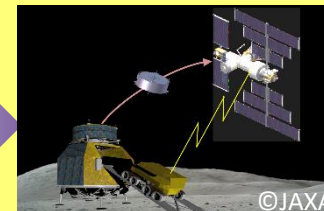


小型月着陸実証機
(SLIM)
(2021年度)



月移動探査(2023年頃～)

- ・月極域の水氷利用可能性調査
- ・月面拠点の調査等



月広域・回収探査(2026年頃～)

- ・南極や裏側探査とサンプルリターン
- ・月面本格探査に向けた技術実証等



月の本格的な探査・利用

- ・無人探査機/有人能力の協調による効率的資源探査・科学探査
- ・多種多様な主体による月面活動

月面活動を主体に

OMOTENASHI EQUULEUS



小型機による実証機会

深宇宙補給技術

革新実証 着陸機相乗り



補給ミッション・月探査支援
(2026年頃～)

- ・小型探査機放出
- ・月面観測他

支援

Gateway組立段階
(2022年-)

- ・月面探査の支援
- ・深宇宙環境を利用した科学

支援

有人滞在技術

Gateway
運用段階

- ・火星探査に向けた技術実証

有人滞在技術

民営化を推進

国際宇宙ステーション

月着陸探査活動に関する検討状況の概要 1/2

●背景・検討方針：

- 月の極域には一定量の水が存在すると考えられており、各国は2020年代前半に、水資源の利用可能性調査を目指した月極域探査を計画。
- 我が国としても各国に遅れることなく、月極域における水の存在量や資源としての利用可能性の確認を主目的とし、さらに、比較的穏やかな環境で、持続的な探査が可能かつ拠点構築にも有利な月極域地域の探査を行う月極域探査ミッションを、インド等との国際協力により検討している。
- この探査の機会を活用して、水資源の利用可能性の確認のみならず、ピンポイント着陸技術や重力天体表面探査技術の発展を目指す。また、この機会を活用して、科学的成果創出にも貢献する。

月極域について

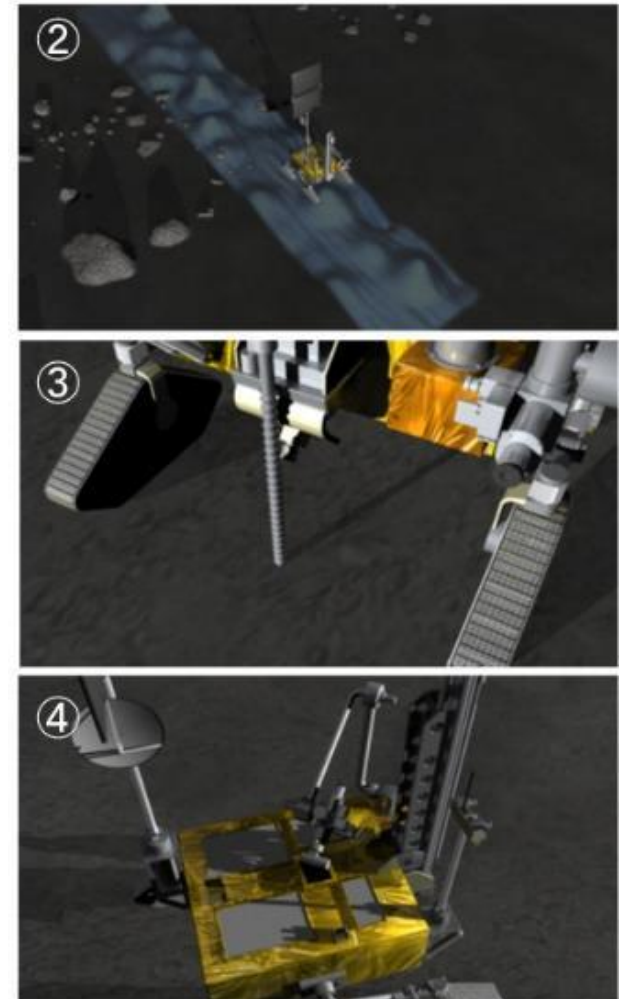
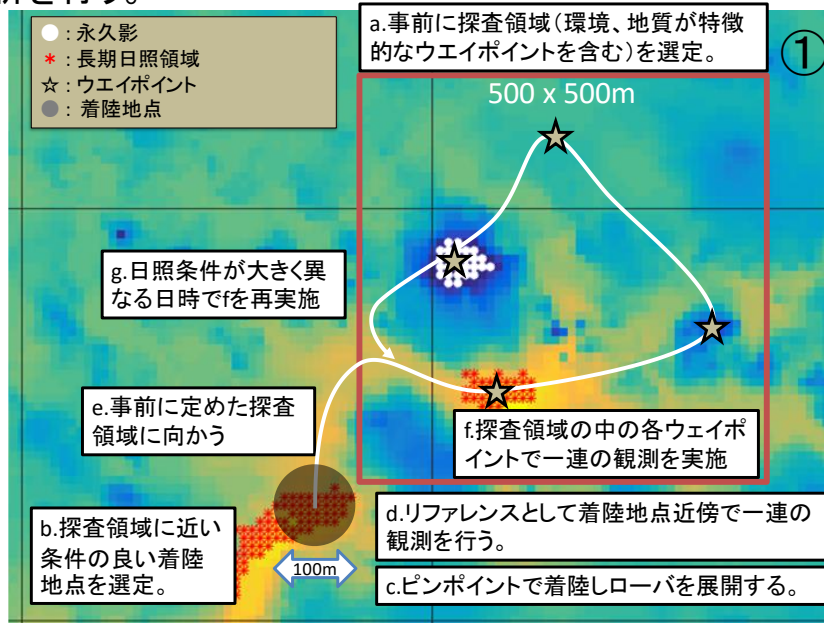
- 月の自転軸の傾きは1.5度と小さいため、永久に日が当たらない永久影が存在し、温度が100Kより低い(30～40K程度)。一方、水の超高真空(月の夜に相当する 10^{-10} Pa)での昇華温度118Kであり、これより低いと水分子は、氷として存在する。
- これまでの観測によると南極も北極も水の量はあまり変わらない。しかし、南極域は、月の裏側からも多様な物質が飛散してきている可能性が高く、科学的価値の高い岩石を採取できる可能性が高い。
- これまでの観測データは圧倒的に南極域が高解像度かつ多量に存在する。そのため着陸地点の障害物の識別が容易でリスクが低い。

月着陸探査活動に関する検討状況の概要 2/2

- 宇宙探査イノベーションハブの成果の取り込み、理工学委員会に設置された国際宇宙探査専門員会の提言の反映を行いつつ、広く関係者の意見の集約を図るためにミッション機器の検討公募を実施し選定中。今後、検討作業を実施予定。

概念検討におけるリファレンスとするミッションは以下の通り。

- ①事前に環境や地質が特徴的な探査領域と、観測地点(ウェイポイント)を選定し、着陸機は観測領域近傍の長期日照地帯に着陸し、ローバを展開する。
- ②ローバで走行しながら地下2mまでの観測により、水氷分布の可能性のある領域を識別する。同時に表層の水(氷)分布の観測を行う。
- ③永久影など水氷分布の可能性のある地点で元素観測を実施し、水素が検出されれば、オーガ等による掘削・試料採取を実施。
- ④試料を加熱し、揮発性物質をガス化して化学種同定、水量分析、同位体分析を行う。



期待される成果

● 資源探査の観点:

- ✓ 世界で初めて水氷の存在確率の高い極域の永久影内探査を行い、これにより、世界に先駆けて月の水資源の存在量・場所等の重要データを取得し、将来の持続的な宇宙探査活動に向けた水利用の可否判断が可能。

● 技術的観点:

- ✓ 移動・走行技術、掘削技術等の実証により、自在な重力天体表面探査能力の獲得とともに、将来の拠点構築に貢献。
- ✓ 日本の優れた電源技術や省エネルギー技術を生かし、世界初の再生可能エネルギーのみによる月面での長期活動の実現。
- ✓ SLIMで獲得するピンポイント着陸技術の極域や山岳地域への適用・発展。

● 国際的プレゼンスの観点:

- ✓ 南極の長期日照地点という貴重な場で活動を行うことにより、将来の民間を含む我が国の月を利用した活動の場を確保。

● 科学的観点:

- ✓ 地球・月系にもたらされた水を含む揮発性物質の由来等に関するデータを取得し、水や有機物に満ちた生命発生可能な環境の形成過程に関する新たな知見の獲得に貢献。

検討中の探査機(ローバ・着陸機)の概要

- ・ 重力天体表面を自在に探査する能力の獲得とともに、将来の拠点構築に貢献
- ・ 世界初の再生可能エネルギーによる月面での長期活動の実現
- ・ SLIMで獲得するピンポイント着陸技術の極域への適用・発展

獲得できる重力天体表面探査技術

重力天体表面を自在に探査する移動・作業手段として、世界の主流である数百kg級ローバによる探査技術を獲得。月面有人ローバ、推薬プラント等に向けた技術ロードマップを推進。

熱制御技術

移動・走行技術

防塵技術

掘削技術

電源(エネルギー)技術
(電池、パネル展開)

資源探査技術



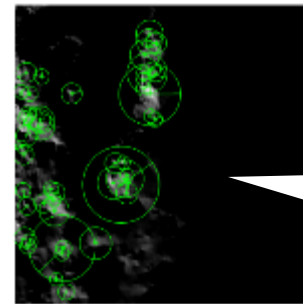
月面有人ローバ
(長距離移動全球探査)



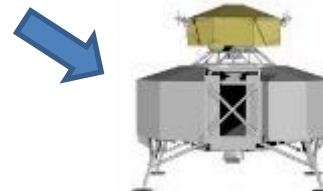
月面拠点構築
(無人での拠点建設、
推薬プラントの実現等)

獲得できる重力天体着陸技術

SLIMのピンポイント着陸技術をさらに発展させ、影の多い極域へのピンポイント着陸可能な影画像航法を実現し月面の全域に到達可能にする。有人着陸船に向けた技術ロードマップを推進。



影画像を用いた高精度画像航法等で極域を含む月の全域に到達可能に。



中型月着陸機

- ・ エンジン技術(大型化等)
- ・ 高精度着陸 (極域含む全球対応)
- ・ 障害物回避

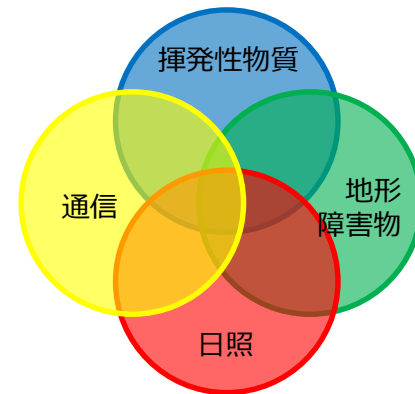
月極域探査における着陸地点

着陸地点の条件

- 揮発性物質の存在可能性、長期運用が実現可能な日照条件・通信条件、着陸可能な地形(傾斜)、クレータやボルダ等の障害物が少ない 等

これらの条件を満たす着陸地点は非常に限られるとともに狭い領域である。

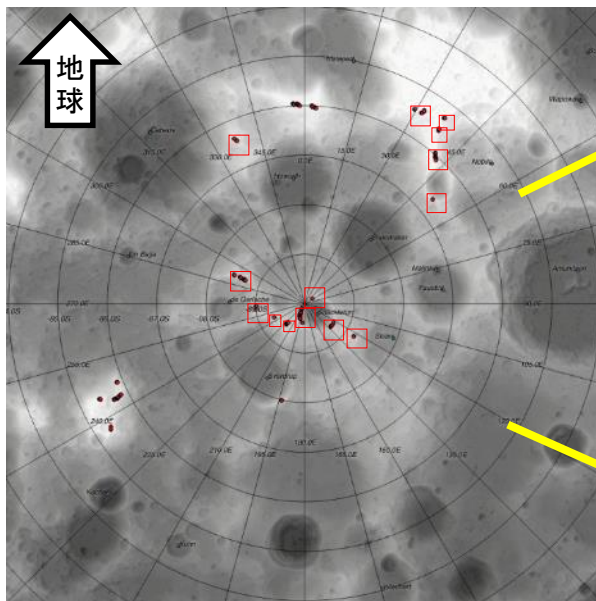
- 水資源に加え、半年以上の連続日照や、80%(年間300日)以上の日照率が得られ、有人無人に関わらず持続的な活動に有利な領域は非常に希少。
- このような希少領域に先に日本が着陸して、活動を開始することは、国際競争、権益の確保の面でも有益。
- ピンポイント着陸技術も必須となる。



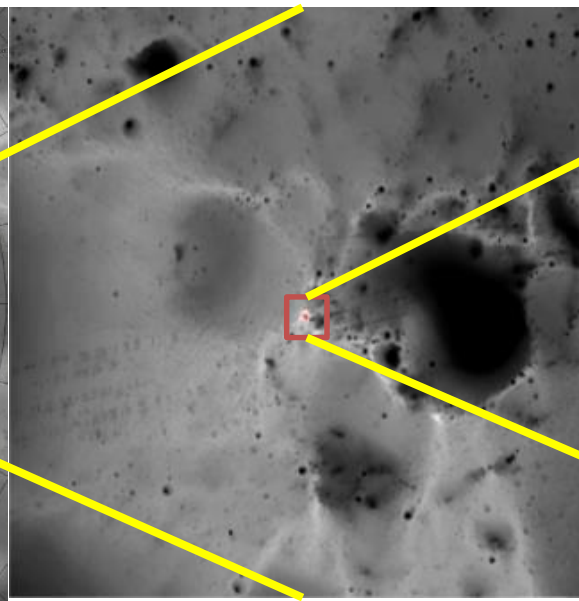
400km

20km

300m



南極400km四方の地形



20km四方の中心の赤い点が80%
(年間300日)以上の日照域



300m四方の赤い領域(1辺20m)が
80% (年間300日)以上の日照域

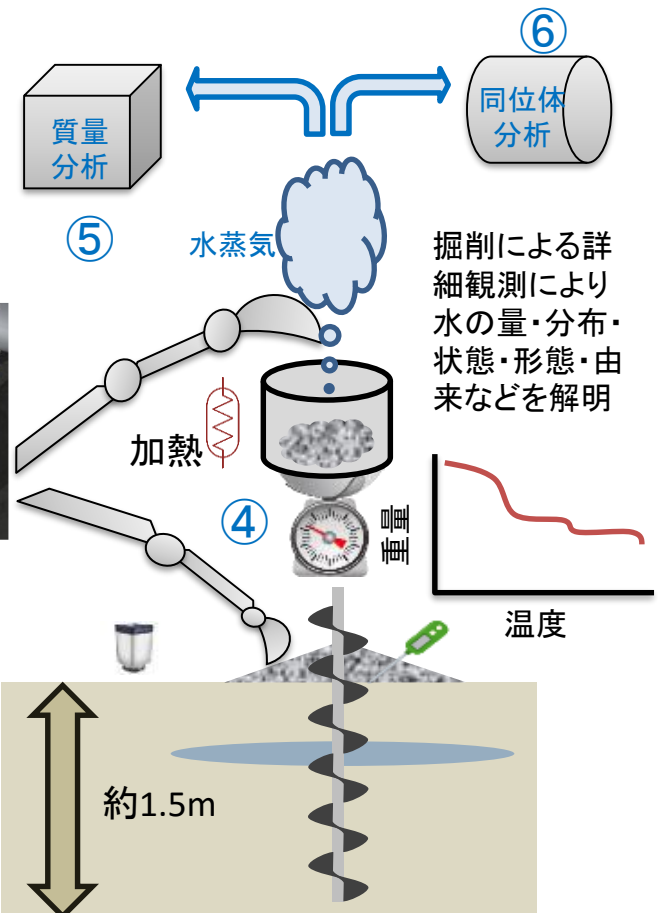
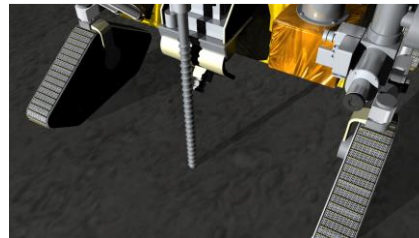
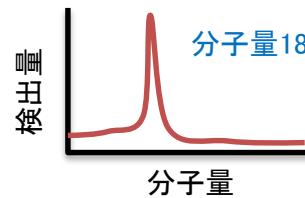
水氷探查機器

- 水の質と量に関するデータおよび水の濃集原理を明らかにするためのデータを取得するためのミッション機器をローバに搭載する。
- より良い観測機器の実現のため公募を発出した(後述)。

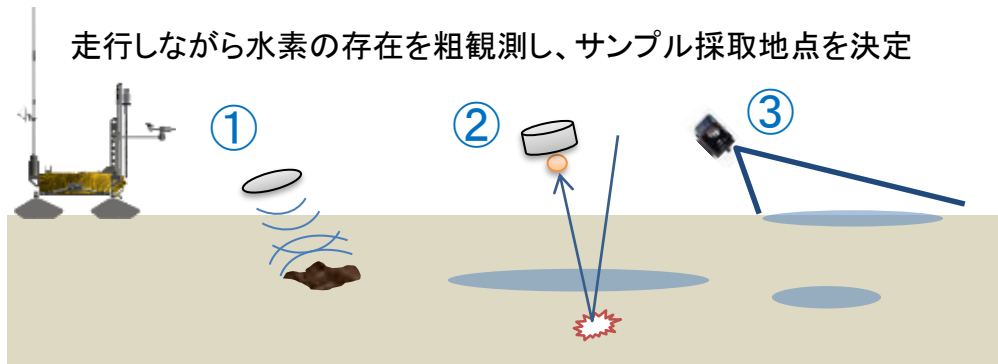
「月極域探査のための観測機器の検討提案および搭載希望調査」

水氷探查機器の一案

- ① 地中レーダー
- ② 中性子分光計
- ③ イメージング分光カメラ
- ④ 熱重量分析計
- ⑤ 質量分析計
- ⑥ 微量水分計



走行しながら水素の存在を粗観測し、サンプル採取地点を決定



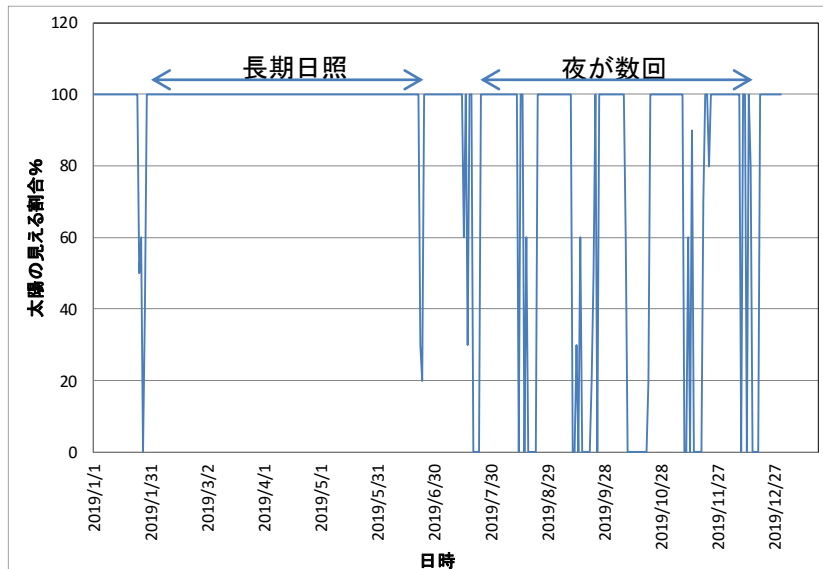
越夜技術の状況

月の厳しい環境に対応し長期間の活動を実現する越夜技術が重要

- 日陰や夜間の極低温環境での機器の越夜のための技術(発電技術、蓄電技術、節電技術)が重要。
 - 月面での長期活動はすべて原子力エネルギーによる越夜が前提(参考参照)
 - 原子力を用いないと活動は昼間に限定
- 原子力に頼らない越夜技術(電源技術、熱制御技術等)の確立を目指す。



再生可能エネルギー社会を先導



極域の日照パターンの例

熱制御技術の例

- 夜間の断熱と昼間の放熱を両立させるには、可変熱コンダクタンスデバイスであるヒートスイッチが必要であり世界最高レベルの熱的性能を達成している。
- 真空多層断熱に、PEEKで成形したMLI締結具やスペーサにより従来比5~40倍の断熱性能を実現。



電源技術の例

- 我が国の宇宙用の薄膜太陽電池及びそれをフィルムアレイ化する技術は世界最先端である。
- 我が国のリチウムイオン電池技術は世界最先端であり超高エネルギー密度の電池を開発中。
- 厳しい高温・低温環境(-40~120℃)に耐え、かつ安全な全固体リチウムイオン電池も開発中(現時点では液式よりエネルギー密度は低い)。
- 再生型燃料電池は、いわば超軽量の蓄電池であり、500Wh/kg以上を目指して研究開発中。

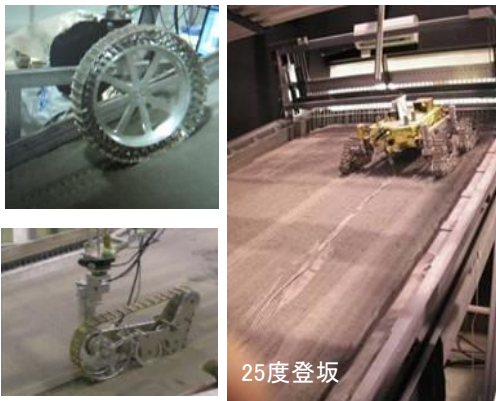


移動・走行技術の研究開発状況

長期・広域探査のための耐久性(寿命)の確保を最優先とし効率化も検討。

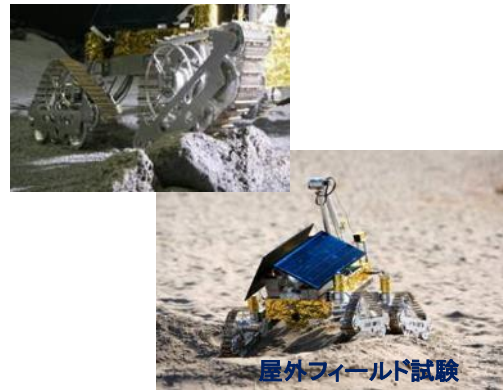
・登坂性能評価

模擬砂上で斜度25度までの登坂試験を単輪及び車体で実施。



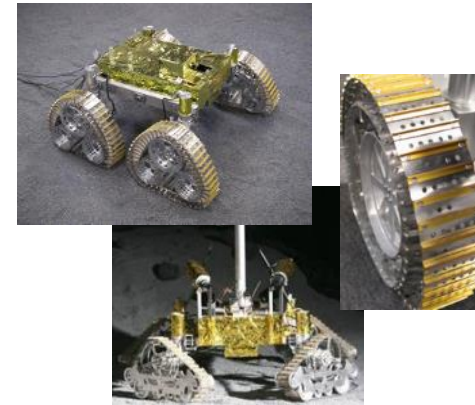
・乗り越え性能評価

段差・岩石の乗り越え、クレータリム乗り越えなどを実施。



・操舵性能等評価

4輪操舵や定点回転機能等の各種走行モードの試験を実施。



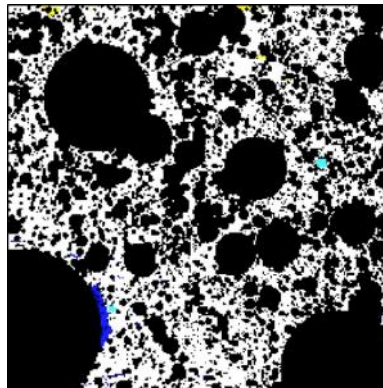
・長距離走行試験

模擬砂上の真空環境で走行機構の長距離連続走行(10km走行)を検証。



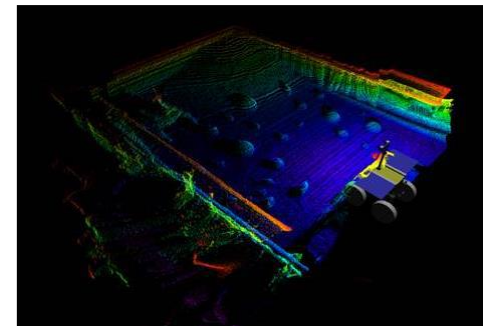
・広域経路計画

日照・通信の時間変化を考慮した広域経路計画を事前に実施。



・その場経路計画

ローバサイズのローカルな地形は事前に得られないため、その場で地図作成・経路計画を実施。



コミュニティとの連携状況

- 月極域探査ワークショップの開催
 - 最新の検討状況を共有するとともに、本ミッションを利用して行われる科学観測等に関し、幅広い分野のコミュニティからご意見をいただき、ミッション定義に反映することを目的として継続的に開催している。
 - 2018年12月に月極域探査ワークショップ(その3)を開催。その2(2018年2月)と比較して参加者数は179名と倍増。
- 月極域探査のための観測機器の検討提案および搭載希望調査
 - 資源利用可能性を判断するための観測項目について、観測機器の検討を行う提案を募集。 観測機器の概念検討提案： 11件の観測機器
 - 宇宙理学委員会/宇宙工学委員会国際宇宙探査専門委員会推薦者を含む評価委員会による評価を踏まえ、現在選定中。速やかに検討に着手し、2019年8月まで実施する予定。
 - 併せて、科学的観点の検討である「月極域探査タスクフォース」からの提言を受け、同提言で提案された観測やその他の科学観測機器等についても希望調査を実施。 希望調査： 10件の観測機器や月面実証提案

月極域探査ミッションをなぜインドと協力するのか？

- Chandrayaan-1で月周回の経験を有しているとともに、Chandrayaan-2で月着陸機の技術開発を日本に先行して取り組んでいる。
 - Chandrayaan-2は、周回機と着陸機の組合せで月軌道に投入し、着陸機を切り離して月面に着陸させ、ローバを展開する計画で間もなく打上げ予定。月極域探査ミッションに必要な技術開発は行われている。
 - 月極域探査ミッションの打上質量が約6トンの計画に対して、Chandrayaan-2の打上質量が約3.3トンと、若干小さいが、SLIMの打上質量が約0.6トンに比べると大きく、機体システムの変更リスクは小さい。
 - なお、誘導制御の精度や電池の効率などについてはJAXAの技術が優位。
- NASAとの協力の場合は、JAXAの位置づけは「Provider」となり、技術開示がされないなど情報共有の点で不都合がある。(過去に協力して検討を進めた際のNASAのスタンス)一方、ISROとは対等の関係を築き、適切な情報共有が可能。(現状、ISROはこのスタンス)
 - 当面の月面ミッションは、中国は単独で、ESAとロシアは協力して進めている。
- インド(ISRO)の方針として、日本(JAXA)との協力を重視していること、政権が一貫して宇宙開発の取り組みを進めていることから、安定した協力関係を築くことが可能。

インドとの協力の基本的考え方

- 対等でかつ、お互いの強みを活かしたWIN-WINの協力を目指す。月極域探査ミッションにおける協力を契機に、月・火星探査等に意欲的に取り組むインドとの持続的な協力につながるようにする。
- 数多くのミッション実績に裏付けられたインドの高い技術能力、また政府挙げて宇宙活動に投入される大きなリソースとミッション機会を活用する形での協力を実施することにより、JAXAが実施したい研究開発やミッションの効率的かつ効果的な実現を図る。
- インドは日本の外交上の重要国であり、極めて良好な外交関係を土台として日本政府の「自由で開かれたインド・太平洋構想」に則した協力を展開することにより、事業の政策的意義を高める。
- 技術標準・インタフェースについて情報の共有、共通化を図り、日本とインド間の機器の共用可能性を探り、将来のインドから宇宙実績がありかつ安価なコンポーネントの輸入や発展するインドの市場への日本の機器の輸出、さらには連携した事業化に向けた礎とする。
- 今までの独立に進んできた両国の研究開発・技術開発の成果の交流を図り、相互の技術の発展を促す。なお、安全保障上問題となり得る技術や最先端技術については、慎重かつ戦略的に対応する。
- 地上局などのインフラについても、共有を図ることで、運用の効率化を図る。

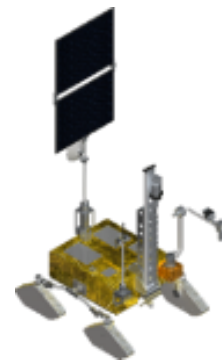
インドとの協力の考え方

分担の考え方	備考(JAXAとしての狙い)
JAXAがローバとロケット、ISROが着陸機を担当し、重力天体表面探査技術を実証・獲得する。なお、着陸機にも電源(太陽電池、バッテリー)を提供する。	SLIMで獲得できない本格的な重力天体表面探査技術(走行技術、掘削技術、越夜技術など)を早期に実証する。
JAXAが着陸機の航法誘導センサと誘導アルゴリズムを担当し、ピンポイント技術を発展させる。	SLIMのピンポイント着陸技術を極域に発展させ、月面の全域にピンポイントで到達可能にする。
データは双方のデータの共有と一定期間後に公開(双方が合意したもののみ、PDS4形式)する。	PDS4: Planetary Data System Version4 (惑星探査データアーカイブの標準)

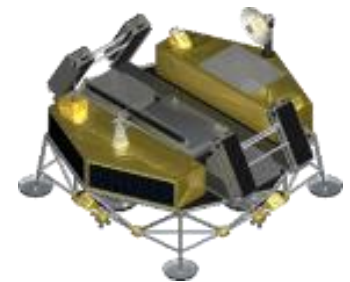
打上時期	2023 年頃を目標
打上ロケット	H3 ロケット
打上げ軌道	月遷移軌道
打上時質量	6トン以上
ペイロード質量	500kg以上 (ローバ含む)
運用期間	半年以上
着陸地点	月の南極域
主要ミッション機器	水氷探査機器、科学探査機器、環境計測機器 他



ロケット



ローバ



着陸機

JAXA主担当

ISRO主担当

インド宇宙研究機関 (ISRO) との検討経緯

- 2016年11月 ISRO-JAXAの機関間協力協定締結
- 2017年5月 ISROと月極域探査ミッションの協働実施の可能性の検討を開始
- 2017年12月 ISRO-JAXA間で月極域探査ミッションの協働実施の可能性を検討する
Implementation Arrangement(IA)締結
- 2018年3月 上記検討結果を、「JOINT REPORT on a Joint Lunar Polar Exploration Mission Between ISRO and JAXA」として取りまとめ。検討継続で合意。
- 2018年10月 日印共同声明2018 に本活動について言及される(下記)。
- 2018年12月 **12月21日にインドにおいて共同でミッション定義審査を開催するとともに、
上述のIAを2019年12月まで延長することに合意した。**
- ～現在 **ワーキンググループ(WG1: ミッション機器と着陸地点、WG2: 軌道と着陸航
法誘導制御、WG3: 通信)を設立、PhaseAに向けた共同検討に着手。**
- 2019年 2月 ISRO-JAXA機関間共同ワーキンググループ開催
- 2019年 3月 日印宇宙対話にて活動を報告

日印共同声明(2018年10月29日発信)

両首脳は、宇宙活動の長期的な持続可能性を促進するとのコミットメントを改めて表明し、宇宙における二国間協力を強化するために、年次の宇宙対話を立ち上げることを決定した。また、両首脳は、共同月極域探査ミッションに係る関係当局間での技術協力が進展していることを歓迎した。



インドの宇宙探査への取り組み

政策動向概要

- 第 12 次5ヵ年計画(2012 年4 月-2017 年3 月)に、宇宙探査計画として、月及び火星を含めた惑星探査計画が盛り込まれた。
- 2017年3月、インド宇宙庁(DOS)は議会に送付した書簡の中で、上記計画を再確認した。さらに、2018年8月、モディ首相は演説の中で、2022年までに有人宇宙飛行を目指すと発表。低軌道に宇宙飛行士を1週間程度滞在させる計画。



モディ首相の演説の様子
(出典: CNN)

各ミッション計画

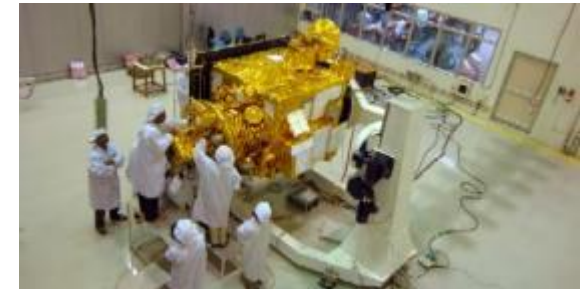
月探査

- 2008年に「チャンドラヤーン1号」の月周回ミッションを実施。
- 2019年に「チャンドラヤーン2号」を打上げ予定。月周回機、月着陸機(月面探査ローバ)にて構成され、ローバによる土壌サンプル収集等を計画。
- 2023年頃打上げ目標にJAXAと協力して月極域探査ミッションを計画。

火星探査

- 2013年11月に火星探査機「マンガルヤーン」の打上げ、2014年9月に火星周回軌道への投入に成功。(アジア初)
- 2022年を目標に、2 回目の火星探査ミッション「MOM-2」を計画中。CNESが協力する予定。

計画規模、頻度は大きくはないが、探査ミッションを実行させる資金と確実に成功させる技術力を有している。



チャンドラヤーン1号(出典: ISRO)



チャンドラヤーン2号のローバ
(出典: ISRO via Spaceflight Insider)

検討状況のまとめ

- JAXAにおいて、開発移行を目指して、システム概念設計を進めるとともに、移動・走行技術、越夜技術等の重要要素技術のリスク低減策の研究、観測機器の概念検討を行っている。
- インド(ISRO)との共同ミッション定義審査(JMDR)においてミッション要求を合意し、システム、利用運用コンセプト、開発方針、試験検証計画、データポリシー等について概要を合意している。現在、ミッションプロファイル(着陸点を含む)など詳細化を進めている。
- 従来の民間企業等への探査機技術支援や施設供与に加えて、打上げ能力に余裕が見込まれることから、民間企業、科学コミュニティ等に機会を提供することを検討中。
- 今後、2019年度に本格的に開発研究を進めるために、JAXAにおいてプロジェクト準備審査を開催してプリプロジェクトへ移行し、さらに開発着手が認められた段階で、プロジェクト移行審査を開催してプロジェクトへの移行を計画している。



参考

Chandrayaan-2の概要

- インド宇宙研究機関(ISRO)の2機目の月探査機。着陸機としてはインド初となる。

着陸機(LC、別名Vikram)→

(ローバ内蔵→月面で放出)

周回機(OC)→



出典: ISRO

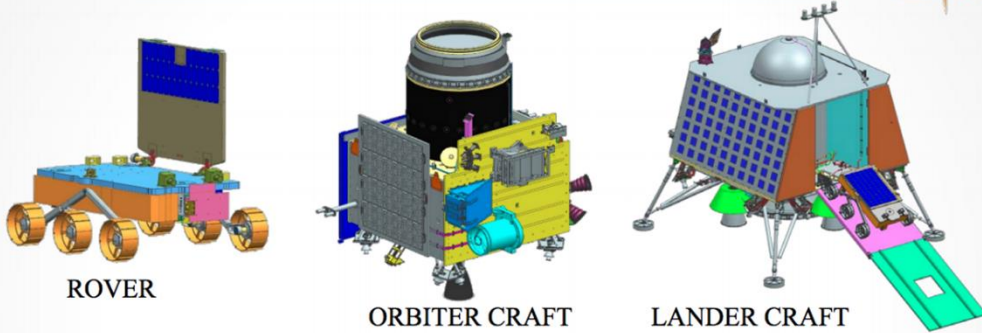
- 打上げロケット: GSLV Mk3、射場: スリハリコタ
- 着陸エリア(候補は2か所) SLS54 南緯70.9度、東度22.8度
ALS01 南緯67.9度、西経18.5度
- 質量 打上げ時 3,877kg(月周回機2,379kg+着陸機1,471kg+ローバ27kg)
- 搭載機器
周回機(OC)6種類、着陸機(LC、Vikram)4種類、ローバ2種類

(出典)

・打上げ時質量について <http://pib.nic.in/PressReleaseDetail.aspx?PRID=1544147>

Chandrayaan-2の外観・ミッション機器

Chandrayaan – 2 Configuration



- ・ ミッションの目的: 月の起源と進化に関する知見を深めること。

着陸機のミッション機器

- ①地震計 (Seismometer)
→着陸地点付近の月震観測
- ②熱プローブ (Thermal probe)
→月表面の熱特性を推定
- ③ラングミュール・プローブ (Langmuir probe)
→ 月表面プラズマの密度と変動の測定
- ④電波掩蔽実験 (Radio occultation experiment)
→総電子量の測定

周回機のミッション機器

- ①広域軟X線分光計 (Large Area Soft X-ray Spectrometer : CLASS) 及び太陽X線モニタ (Solar X-ray Monitor: XSM)
→月表面のマッピング
- ②Lバンド・Sバンド合成開口レーダ (L- and S-band Synthetic Aperture Radar: SAR)
→影の部分での氷の存在
- ③撮像赤外分光計 (Imaging IR Spectrometer: IIRS) → 鉱物・水分子・水酸基の研究のためのマッピング
- ④中性質量分光計 (Neutral Mass Spectrometer: ChACE-2)
→月の外圏 (Exosphere) の詳細な研究
- ⑤地形マッピングカメラ (Terrain Mapping Camera-2: TMC-2)
→月の鉱物・地質学的研究のための三次元地図

ローバ搭載機器

- ①レーザ誘起ブレークダウン分光器 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy : LIBS)
- ②アルファ線粒子誘起X線分光器 (Alpha Particle Induced X-ray Spectroscopy : APIXS)

(出典)

・ミッション機器に関して Gunter's Space Page

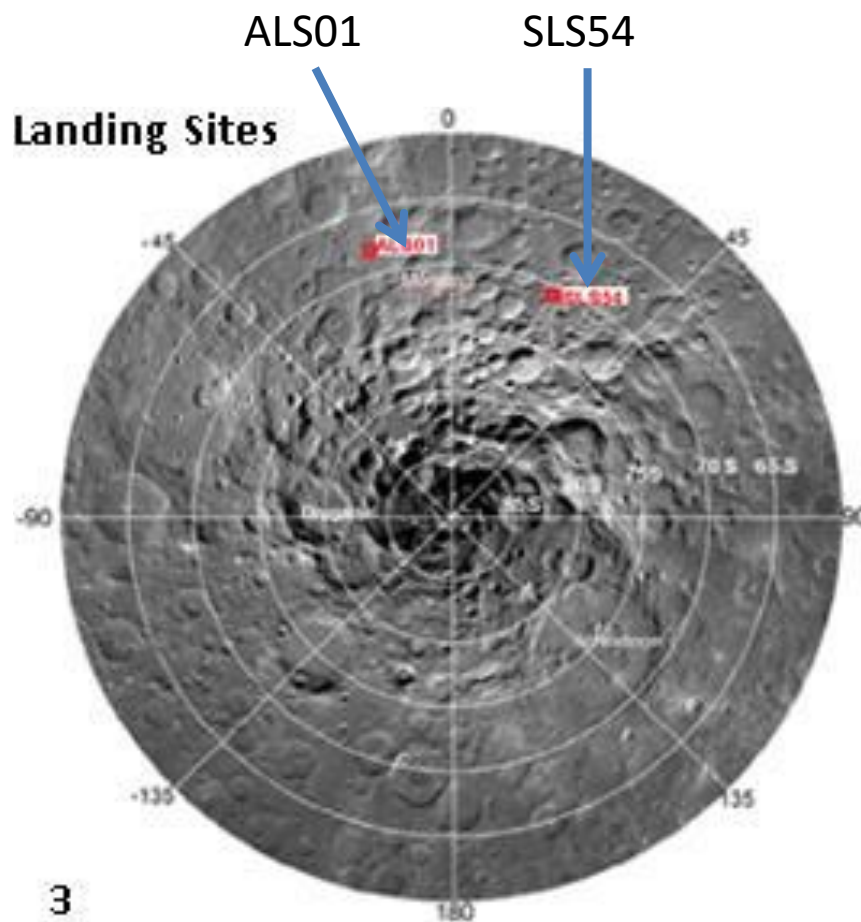
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/chandrayaan-2.htm

・外観図

<https://futurism.com/indias-chandrayaan-2-apollo-missions-cheaper>

Chandrayaan-2の着陸候補地

南極中心座標

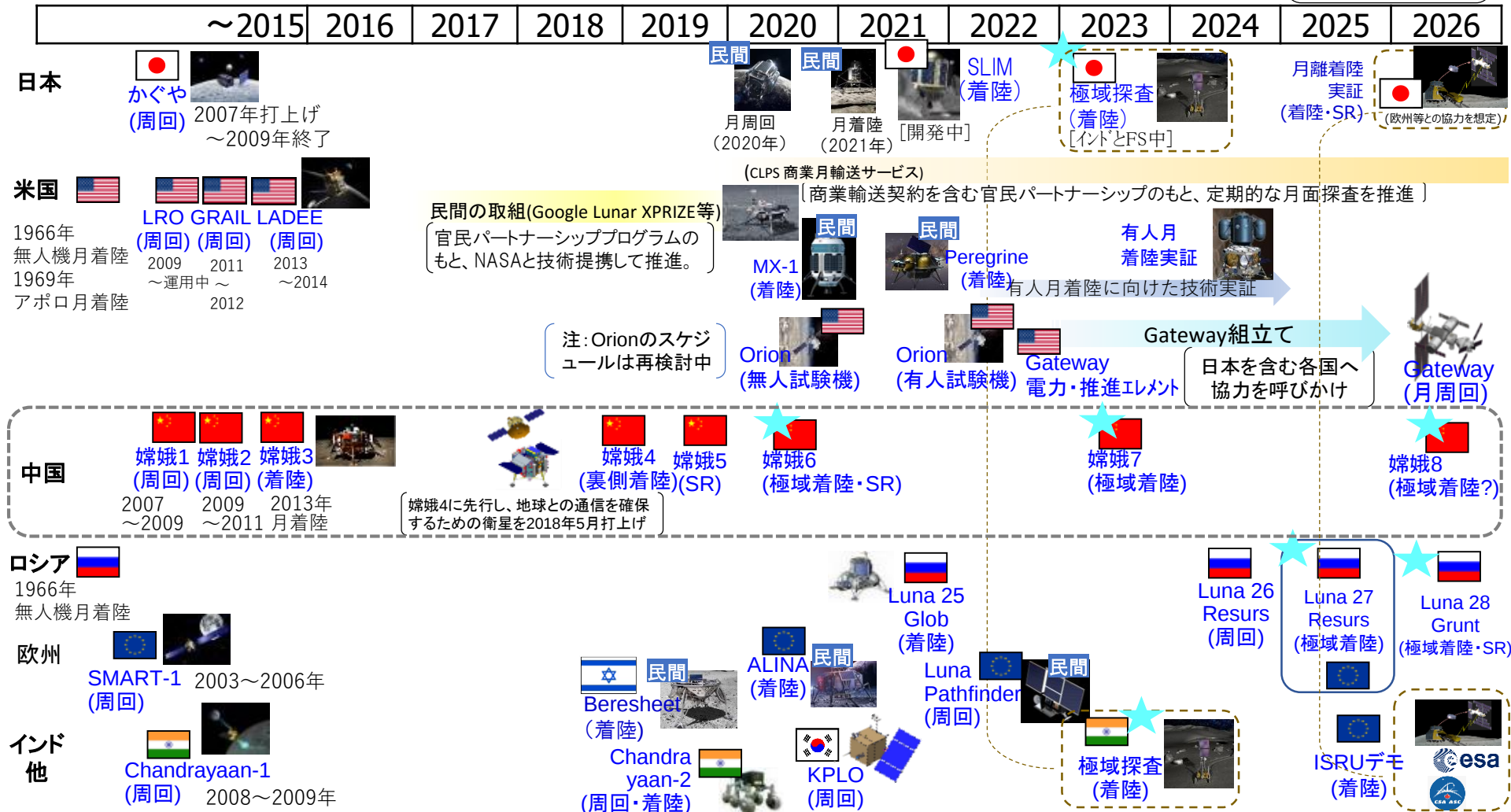


出典: Amitabh, K Suresh and T P Srinivasan, (2018), "Potential Landing Sites for Chandrayaan-2 Lander in Southern Hemisphere of Moon", 49th Lunar and Planetary Science Conference 2018.

(参考)月探査をめぐる各国の動向

- 月面：2018年以降、主要国は多くの月面探査ミッションを計画。米国は官民パートナーシップを促進。
2020年代前半には露欧中印等が月極域への着陸探査を計画(月の水氷や高日照率域に高い関心)。
- 月近傍：米国は月近傍有人拠点(Gateway)を構築する計画を示し、各国に参画を呼びかけ。
カナダは2019年2月に首相が参画意志を表明。

★：極域着陸ミッション
SR：サンプルリターン
(※検討中のものを含む)



(参考) 月面の環境の特性と持続的な活動に必要な技術

◆越夜技術

昼間は太陽電池等を利用できるが、日陰や夜間の極低温環境での機器の越夜のための技術（発電技術、蓄電技術、節電技術）が必須。**原子力電池に頼らない再生可能エネルギー技術**（Li-Ion電池、再生燃料電池、完全固体電池等）の確立を目指す。

【熱環境】

- ・大気がないため、昼夜の温度差が厳しい。
- ・極域では日照時-40℃～-60℃、日陰時-200℃。低緯度で日照時+100℃以上、日陰時-200℃近くまで温度変化。

【日照】

- ・極域では影の領域が多い（地形計測が必要）。
- ・中低緯度では夜が長い（約14.8日周期）。

【高真空】

- ・大気がほとんどなく、高真空環境（昼間は10-7Pa、夜間は10-10Pa）。
- ・放熱対策や固体潤滑が必要。

【放射線】

- ・大気も磁場もないため、強い宇宙放射線環境。電子部品の故障対策や、人体への防護対策が必要。
- ・月面の宇宙放射線は推定100～500mSv/年（地球上では、2.4mSv/年）。

◆耐環境技術

月面固有の厳しい環境（熱、放射線、レゴリス防塵、低重力等）へ対応した電子部品や機構部品の開発、システムエンジニアリングが必要。有人活動に向けては、加えて**隕石デブリ、放射線防護技術**が必須。

◆着陸技術

ミッション要求に最適な限定的な着陸地（極域等）にピンポイントで着陸する**高精度着陸技術**が必須。

◆移動・走行技術

不整地、登坂走行能力、スタック回避が必要。地形計測、マッピング、自動経路生成や障害物検知も必要。

◆掘削技術

掘削情報から地盤推定（地上技術の連携）。使用できる機材に限られるが、試料採取とともに地盤性状を把握。

【地形・表土】

- ・月面は細かい砂（レゴリス）で覆われた不整地（レゴリスが数m～数十m堆積）であり、砂で滑ったり埋もれたりしてスタックしやすい。
- ・レゴリスは数十ミクロン以下の微粒子が多く、機構部への侵入、摩耗も課題。
- ・極域は山岳地帯（平均斜度15度、最大斜度30度程度）。

【重力】

- ・1/6重力の環境下。軽量のプラットフォームは反力の確保が課題。

【通信環境】

- ・地球から往復3秒程度。ある程度の自動化・自律化が必要。
- ・地球上の1つの通信地上局から常時月と通信することはできず、経度をずらした最低3か所の常時通信用地上局が必要となる（例：NASAのDeep Space Network）。
- ・月の裏面は地球の電波放射の影響を受けず、天文観測等に向く。一方で常に地球と直接通信ができないため、地球との通信には中継基地（衛星）が必要。

◆オペレーション技術

ミッションを実現するために**End-to-End**で（地上から月面まで、事前準備・訓練・実運用を通して）**組織化された運用技術**が重要。国際調整や不測の事態対応など、きぼう運用やはやぶさ運用等で得られた技術を活用する。また深宇宙探査に向けて自動化・自律化との協調も促進する。

◆通信技術

基幹インフラとしての頑健な通信システム構築が重要（光宇宙通信技術等の活用）。常時通信を確保する場合、3局以上の深宇宙通信用地上局を用意するか、地球周回軌道、月周回軌道などにデータ中継衛星を用意する必要がある。

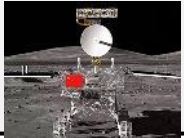
(参考) 越夜のための技術について

世界初の“原子力に頼らない”越夜用エネルギー技術を開発
民間では挑戦が難しい（技術的難易度高）ため、JAXA主体で開発

過去の米・旧ソ連、近年の中国の月面
ミッションで用いられた原子力を利用
した越夜用エネルギー技術

	なし (冬眠)	越夜用エネルギー源					
		一次 電池	太陽電池＋二次電池		原子力		
			リチウム イオン	再生型燃料電池	RHU	RTG	原子炉
適用例	サーバイヤー	ペネトレータ	なし	なし	ルノボート	ALSEP(アポロ)	なし
電力規模	---	<1W	10W ～100W	100W ～10kW	---	100W ～1kW	10kW ～100kW
連続的活動	不可	限定的	夜間は 限定的	可能	可能 (要別電源)	可能	可能
適応場所	全域	中低緯度	全域	全域	全域	全域	全域
適用 ミッション	無人	無人	無人	無人／有人	無人	無人	有人
必要重量100W, 2週	0	80kg (450Wh/kg)	200kg (170Wh/kg)	70～120kg (300～500Wh/kg)	1.6kg (62.5Wt/kg)	20Kg (5We/kg)	>500kg (小容量困難)
寿命	予測困難	<1年	>1年	>1年	>10年	>10年	>10年
リスク	大	小	小	中	大	大	大
課題	部品信頼性	高容量化	高容量化 動作温度	高圧水電解 タンク	国民的合意	国民的合意 熱電素子	国民的合意 超小型化 月環境適応

探査ローバの比較について(実施済/実施中)

名称	天体	時期	質量(kg)	活動期間	走行距離(km)	エネルギー源	画像 (C)NASA、RSA、CNSA
ルノホート1号、 ルノホート2号 (Lunoknod)	月	1970 1973	756 840	10.5ヶ月 5ヶ月	10.5 37	昼:太陽電池 夜:ラジオアイソトープ(保温用)	
アポロ月面車 (LRV)	月	1971	本体+クルー 2名+ツール =708	3~4時間	25-35	1次電池	
ソジャーナ (Sojourner)	火星	1997	10.5	83日	約0.1	昼:太陽電池 夜:ラジオアイソトープ(保温用)	
スピリッツ・ オポチュニティ (MER)	火星	2004 ~	174	15年~	45.16~ 2018年12月時点、 Opportunity)	昼:太陽電池 夜:ラジオアイソトープ(保温用)	
キュリオシティ (MSL)	火星	2012 ~	899	6年~	20~ (2018年12月時点)	ラジオアイソトープ (電源用)	
玉兔(Yutu)	月	2013 ~	約140	8ヶ月~ ※推定	月の1日目の昼に走行 (100m程度)	太陽電池 +ラジオアイソトープ (電源用)	
玉兔2(Yutu2)	月	2019 ~	同上	実施中	実施中	太陽電池 +ラジオアイソトープ (電源用)	

探査ローバの比較について(実施予定、宇宙機関)

名称	天体	時期	質量(kg)	活動期間	エネルギー源	画像 (C)NASA、RSA、CNSA
Chandrayaan-2 rover (インド)	月	2019	25	2週間	太陽電池 +蓄電池	
Resource Prospector (米国)	月	2022	300	6-14 earth days	太陽電池 +蓄電池	
月極域探査	月	2023 ~	数百kg級	数か月	太陽電池 +蓄電池	