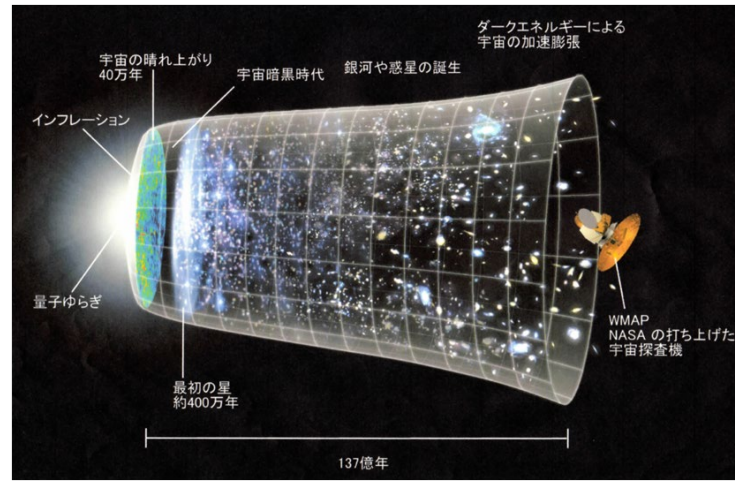
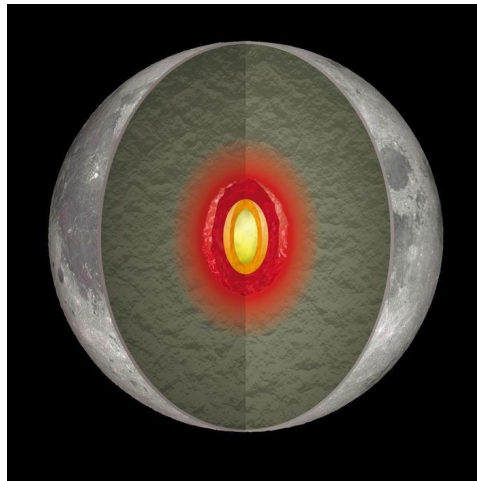


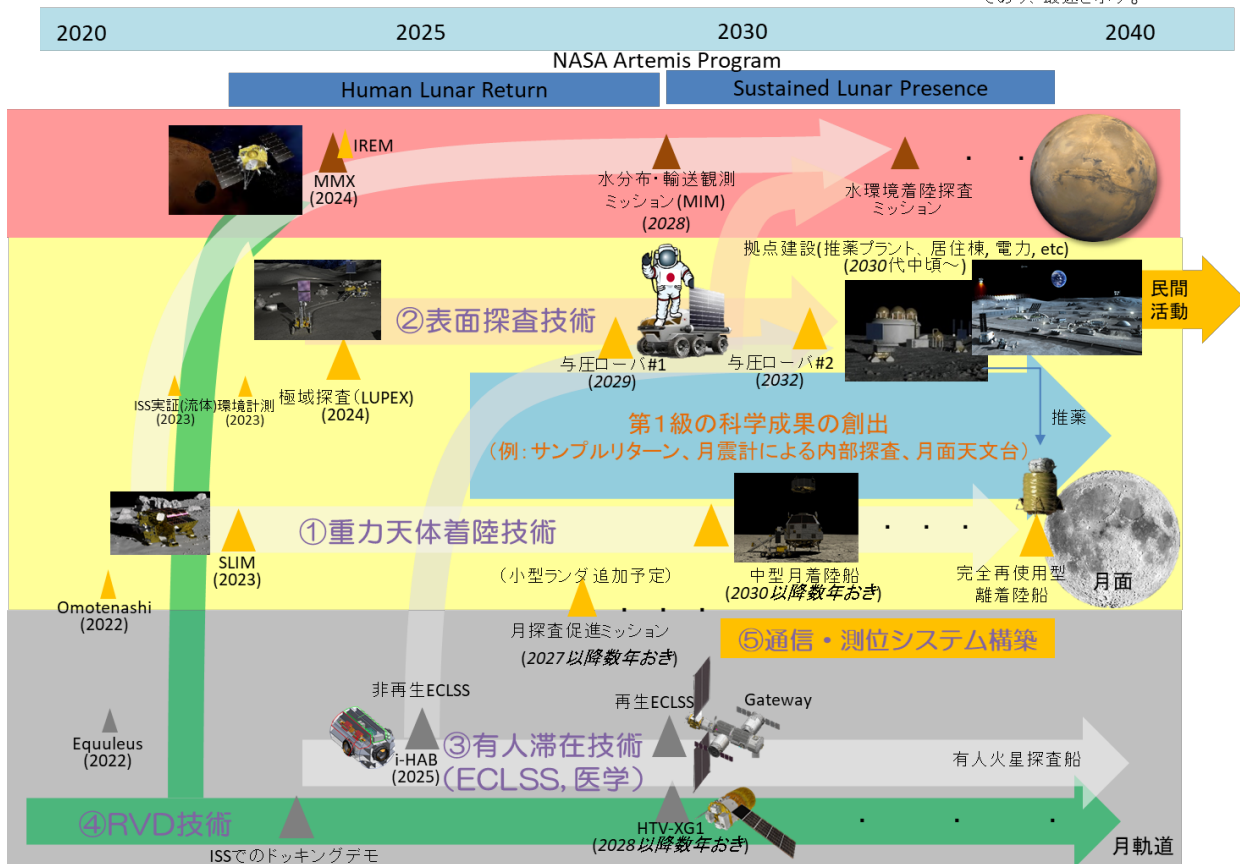
月面3科学の実現に向けて

JAXA 宇宙科学研究所 学際科学研究系
稲富裕光



日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2021

「斜字の打上げ年」は調整中であり、最速を示す。



科学目標

月面の衝突盆地の衝突溶融岩帯の露頭から試料採取し、その形成年代を決定する。45億年前から38億年前までの衝突頻度の時間履歴を復元することで、巨大惑星の軌道移動の有無、その時期や規模を制約する。

他の観測の課題

アポロ試料や月隕石のなかに衝突溶融岩が見つかるが、それらは「転石」であるため、月面の地形・地質との対応関係が不明である。

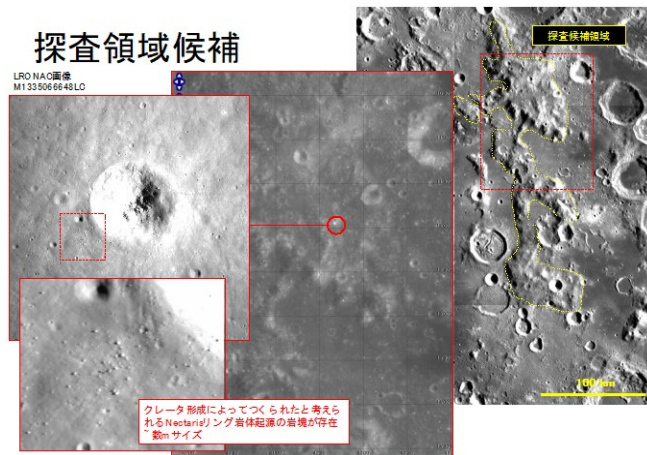
2020年代の観測シナリオ案

ネクタリス盆地の露頭サンプルを採取・識別し、その場で分析する。

ネクタリス盆地の一部領域では衝突溶融岩の「露頭」がつかれている。

2030年代の観測シナリオ案

月の起源を解明する決定的な証拠となるサンプルを地球に持ち帰る。



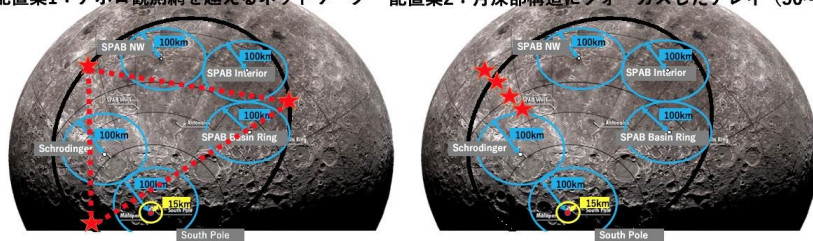
月の正確な一次元内部構造に加え、地質構造による内部構造の違いも明らかにし、月の起源や進化・分化を理解する（月面建設予定地の地下構造や振動環境の把握）。

アポロの月震計では月裏側未観測、感度・帯域が不十分。
レゴリス層拡散波により走時読み取り誤差大（地殻厚・コア半径推定に大きな誤差）。

新たな月震計（広帯域・高感度・小型）を埋設し、年単位の運用を行う。

月面の全球（裏側含む）へ多数の月震計を配置し、長期間の計測を行う。

配置案1: アポロ観測網を越えるネットワーク 配置案2: 月深部構造にフォーカスしたアレイ (50~100km間隔)



月面からの天文観測（月面天文台）

科学目標

月面裏側で波長1-40MHz帯の電波干渉計を実施する（低周波電波天文学）。
Dark Age（天文形成前の宇宙最初期）における中性水素線の情報をとらえる。
初期の密度ゆらぎを直接検出する（インフレーション研究）。

他の観測に対する優位性

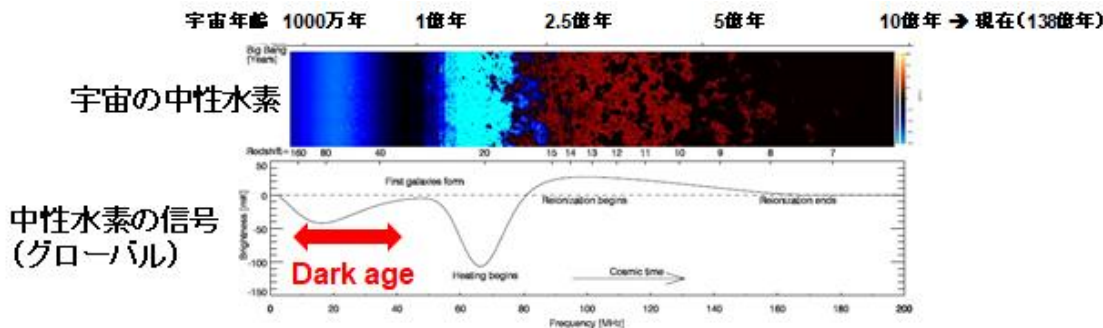
月面では大気に妨害されずに観測ができ、また、月裏側の電波環境は良好である。
（軌道上と比べて）安定した接地面があり、長寿命を実現しやすい。

2020年代の観測シナリオ案

月面裏側に3つのアンテナユニットを100km離して配置し、夜間に干渉観測する。

2030年代の観測シナリオ案

月面裏側にアンテナユニットを多数配置し、長期間の計測を行う。



■ 今後10年間、月面活動の技術開発を支えるものとして、3つの科学（月面3科学）が設定されました。

- 月震計ネットワークによる月内部構造の把握
- 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還
- 月面からの天体観測（月面天文台）

■ また、火星表面探査に向けた地球よりも薄い大気を持った惑星への着陸技術も併せて設定をします。

月面の科学／火星探査技術

輸送技術、重力天体着陸技術

中テーマ	小テーマ
(1)輸送技術、重力天体 着陸推進系技術	● 冷却技術 ● 噴射器技術 ● 電動ポンプ ● 流量調整技術 ● 各種国産バルブ ● 推薬適合性技術 ● 推進系高性能化技術

表面探査技術

中テーマ	小テーマ
(2)走行技術	● 斜面・不整地移動用のインフレータブルタイヤ/多脚ロボット ● 各種センサ（可視光・赤外線カメラ、レーザー測距等） ● 急斜面移動システム ● 自動走行システム ● 砂丘を埋没しながら走破するシステム
(3)ロボティクスを活用した表面探査技術	● 埋設・掘削・岩石研磨・試料ハンドリング・投擲などを実現するロボットアーム/各種エンドエフェクタ ● 低消費電力ロボットアーム（超音波モータなど） ● 洞窟探査システム ● 群ロボットシステム，崖下など難易度の高い地形を探査するため，単一ロボットではなく，バディロボットシステム ● 粉塵に強い着脱式機構 ● 着陸機サービスモジュール ● 母船からの電波支援による相対自己位置同定

インフラ技術、観測技術

中テーマ	小テーマ
(4)建設技術	● 太陽電池タワー ● アンテナ展開機構 ● 将来の拠点建設に向けて土質調査を行なうセンサ・計測システム
(5)観測技術	● 月震計パッケージ ● 干渉計パッケージ ● その場分析パッケージ ● RIセンサ（元素分析）
(6)月面の科学を支える電気電子技術	● 探査ロボット向けの低消費電力で自律性を実現できる処理系
(7)火星表面探査ためのEDL(※)技術	● インフレータブル構造用の材料 ● インフレータブル構造用ガス発生技術 ● パラシュート放出機構 ● ヒートシールド用断熱材 ● 最終着陸用エアバック関連技術



月面3科学の実現に向けて、 RFIを募集する課題例

第10回情報提供要請（RFI）では、特に重点化したいテーマとして以下を設定します。

中テーマ	小テーマ
(2)走行技術	● 斜面・不整地移動用のインフレータブルタイヤ/多脚ロボット ● 各種センサ（可視光・赤外線カメラ、レーザ測距等） ● 急斜面移動システム ● 自動走行システム ● 砂丘を埋没しながら走破するシステム
(3)ロボティクスを活用した表面探査技術	● 埋設・掘削・岩石研磨・試料ハンドリング・投擲などを実現するロボットアーム、各種エンドエフェクタ ● 低消費電力ロボットアーム（超音波モータなど） ● 洞窟探査システム ● 群ロボットシステム、バディロボットシステム ● 粉塵に強い着脱式機構 ● 着陸機サービスモジュール
(5)観測技術	● 月震計パッケージ ● 干渉計パッケージ ● その場分析パッケージ

① 実現したいこと

- 地球外天体にて未踏かつ難易度の高い地形を探査する走行機構と探査システム
 - ・ 地形の例：縦孔、崖下、急斜面地形、岩・石の多い不整地、砂丘
 - ・ ロボットシステムの例：複数のロボットを用いる
- 探査に必要なあらゆるプロセスの自動化・自律化
- 地球外天体表面におけるリアルタイム自己位置同定
- 科学的興味の高いサンプルの研磨、切り出し



② 目標仕様

- 移動機構
 - ・ 岩・石の点在する急斜面地形を走破する大いいが軽量の移動機構
 - ・ 砂丘をスタックすることなく走破する移動機構
- 自動化・自律化
 - ・ 画像と距離計を用いた自動走行
 - ・ 科学的興味の高い石・岩を自動抽出するアルゴリズム
- 自己位置同定
 - ・ 母船からの電波による支援を用いたローバの相対自己位置同定の確立
- 研磨・切り出し
 - ・ 真空環境で岩塊からのコアサンプリング



③ 注目技術

- 移動機構、自動化・自律化、自己位置同定、研磨・切り出し

① 実現したいこと

- 月面岩塊の岩石組織、鉱物組成・元素組成、年代をその場分析する技術の確立。

② 目標仕様

- 赤外顕微分光カメラ：光源分光型。光ファイバーを利用、撮像部にはフォーカス機構を搭載した小型マクロレンズを採用、撮像波長範囲550-2500 nm程度、空間分解能 10 μ m/pixels
- ハンドヘルド型レーザー誘起ブレイクダウン分光計(LIBS)：波長範囲380-800 nm
- ハンドヘルド型ラマン分光計：ラマンシフト0-4000 cm^{-1} を15 cm^{-1} の分解能で計測
- ハンドヘルド型XRF：宇宙用の小型高圧電源（Min. 10kV程度）
- 年代計測装置：試料から抽出されたごく微量(0.01 Pa以下)のガスを計測

③ 注目技術

- **小型光源分光装置、フォーカス調整機構搭載小型マクロレンズ、自動制御ソフトウェア**
- **>20 mJの出力パルスレーザー、高い環境耐性・温度耐性・明るい光学系を持つ可視分光器、ナノ秒時間ゲート動作が可能な分光器**
- **プローブ、20 mW以上の出力を持つCWレーザー**
- **宇宙用蛍光X線分析装置、小型高圧電源**
- **試料から抽出したガスを逃さない真空容器蓋開閉技術、配管内部の希薄ガスを制御する小型バルブ**

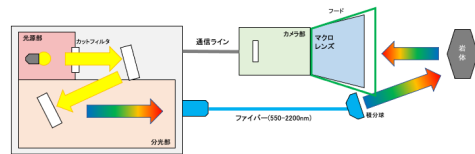


図1 赤外顕微分光カメラ概念図

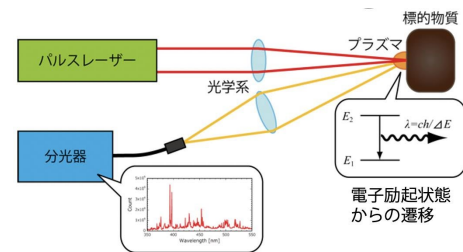


図2 LIBSシステム概念図

① 実現したいこと

- 世界最高感度を有する地震計ネットワークを月面に設置し、月中心部までの内部構造（金属コア、マントル、地殻構造）を決定すること。さらに月深部のダイナミックな3次元構造を明らかにする。
- 地下地点に起震源を設置（移動）し、月面表層下100m程度の3次元地下構造を明らかにする。

② 目標仕様

- 0.1-1000秒の帯域で 10^{-9} (m/s²/√Hz)以下の感度を有する地震計
- 地震計と月面間の良好なカップリングを保証し、1年間以上観測可能なシステムであること
- 月面表層下100mまで到達できる振動励起源

③ 注目技術

- 超高感度広帯域地震計測：光学干渉式、電磁フィードバック方式などの地震計測
- 省電力で越夜可能な月震観測装置のハウジング
- 月面での物理探査：小型振動励起源、地震アレイ観測（DAS）など



図1 プロトタイプとして開発した光学干渉式地震計



図2 地球用に開発が進められている超小型振動励起源

① 実現したいこと

- 1-50MHz帯を受信する電波干渉計を月面に設置し、星や銀河が生まれる前の宇宙「暗黒時代」の中性水素の信号を観測し、宇宙の構造の起源となる物質分布を観測する。
- 月面環境で熱、電力、通信などで成立する「自立型アンテナユニット」を開発し、これを3機、10機、将来的に100機など段階的に設置する。月面着陸・運搬手段により最大100kmの範囲に配置する。

① 目標仕様

- 電波干渉を排した5m級の伸展式ダイポールアンテナを用いた天体電波の受信システム
- 月裏側で、自立的なアンテナユニットによる夜間継続観測のため
 - ・ 保温または月面に対する断熱を要する。
 - ・ 夜間継続受信運用のための蓄電、受信データの蓄積、昼間に中継衛星（または月面に置かれた中継ユニット）へのデータ送信機能を要する。
- 中継衛星（中継ユニット）-地上局間の大規模データ通信の実現

① 注目技術

- 一次元展開・支持機構
- 夜間保温のための放射性ヒータ
- 月周回中継衛星-地上局間の長距離超高速通信、宇宙光通信

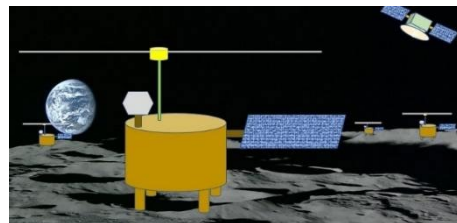


図1 月面に設置する電波干渉計「自立式ユニット」のイメージ

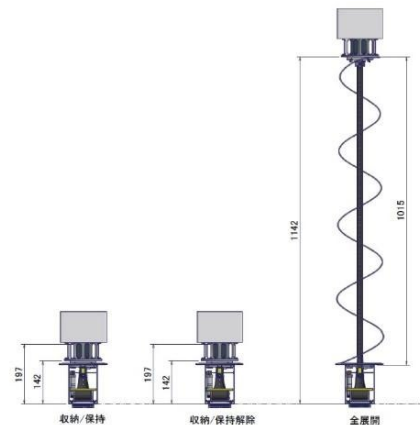


図2 直線展開機構の例



今回ご紹介できなかった課題の応募もお待ちしております！



Technology Advancing Node for SpAce eXploration