

月面での科学・工学

JAXA宇宙科学研究所
稻富 裕光

最近、「月」の話題が増えている！

「アルテミス計画」のスケジュール

2022年
8月以降

無人での初飛行。宇宙船「オリオン」をロケット「SLS」で打ち上げて月周辺を飛行させる。4~6週間で地球に帰還

2024年

初の有人飛行で、月のまわりを飛び、地球に帰還

2025年

人類が月面着陸する。初の女性による着陸をめざす

2020年代

日本人宇宙飛行士で初めて後半の月面着陸の実現を図る

2030年代

火星の有人探査へ



2025年の月面着陸で飛行士が着用する予定の次世代宇宙服のイメージ=コリンズエアロスペース提供



ロケット「SLS」と、その先端に付けられた宇宙船「オリオン」=NASA提供

(朝日新聞の記事からの切り抜き)

本講演について

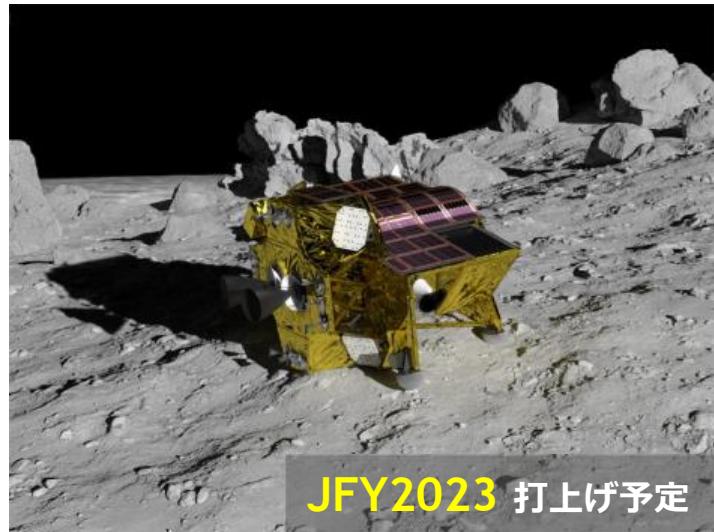
近年、国策にとどまらず民間も月面への着陸そして探査を目指すようになり、有人を含む月探査への動きが加速している。

人類の活動圏を宇宙へと拡げ、月に長期的な活動拠点を構築することは重要なテーマである。

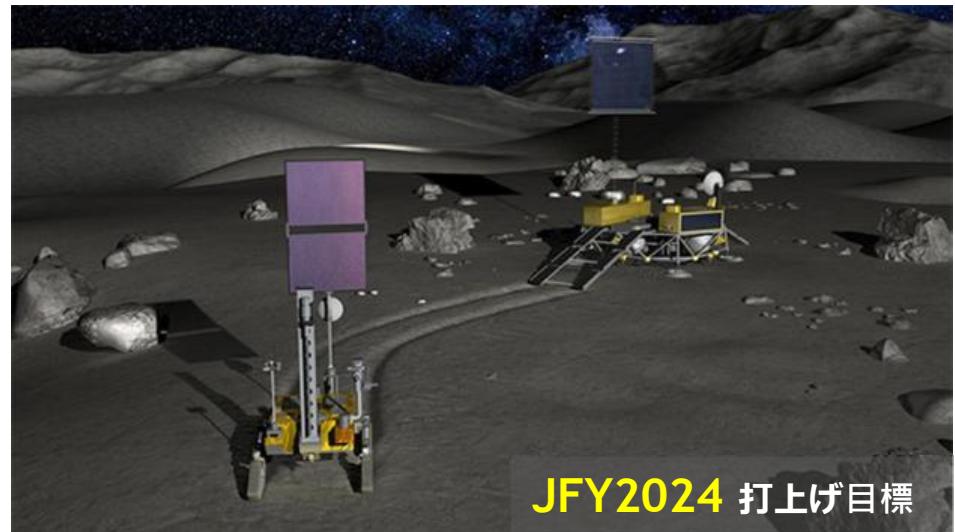
本講演では、月で何が出来て、これから何が起きようとしているのかについての考察を深めることを目的として、月面での科学・工学を概説する。

日本における月・火星探査の取り組みの例

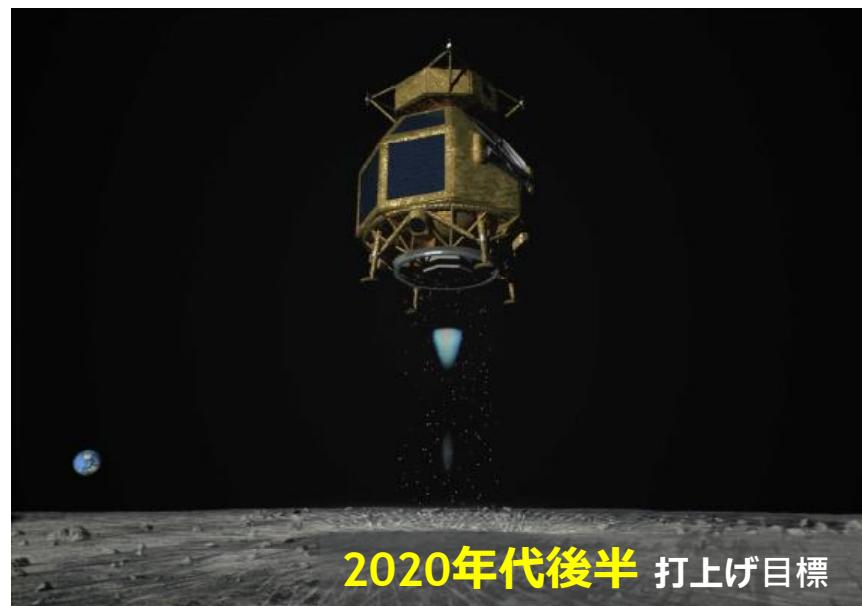
小型月着陸実証機 (SLIM)



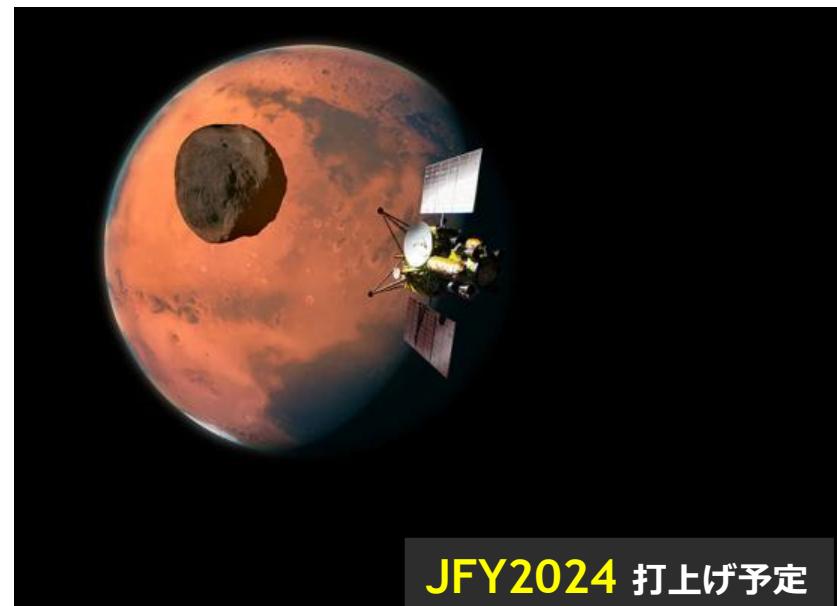
月極域探査ミッション (LUPEX)



中型ランダ



火星衛星探査計画 (MMX)



これから目指す月探査・観測の候補

月周回および月面を利用した探査

- ・ プラズマ電磁環境および月表層・地下環境の計測
- ・ 地球惑星磁気圏・大気圏撮像
- ・ 月面固体環境および隕石・ダストの計測
- ・ 地上では困難な天体観測
- ・ 宇宙環境利用実験
- ・ 将来探査に向けた技術の実証

月面その場観測探査

- ・ 月の（極での）揮発物質の挙動
- ・ クレータ年代測定の精密化
- ・ 全球熱源元素量推定
- ・ 古月磁場測定
- ・ トモグラフィー内部構造探査
- ・ 溶岩チューブの構造探査
- ・ 資源探査・基地建設のための地質・地盤調査

サンプルリターン探査

- ・ 初期斜長岩地殻の組成及び形成過程の理解
- ・ マントル起源橄欖岩探査によるマントル組成理解
- ・ 若い火成活動の詳細調査
- ・ 太陽風や微小隕石による月への揮発物質供給機構の解明

日本の国際宇宙探査シナリオ（2021年度案）

「斜字の打ち上げ年」
は調整中

2020

2025

2030

2040

NASA Artemis Program

Human Lunar Return

Sustained Lunar Presence

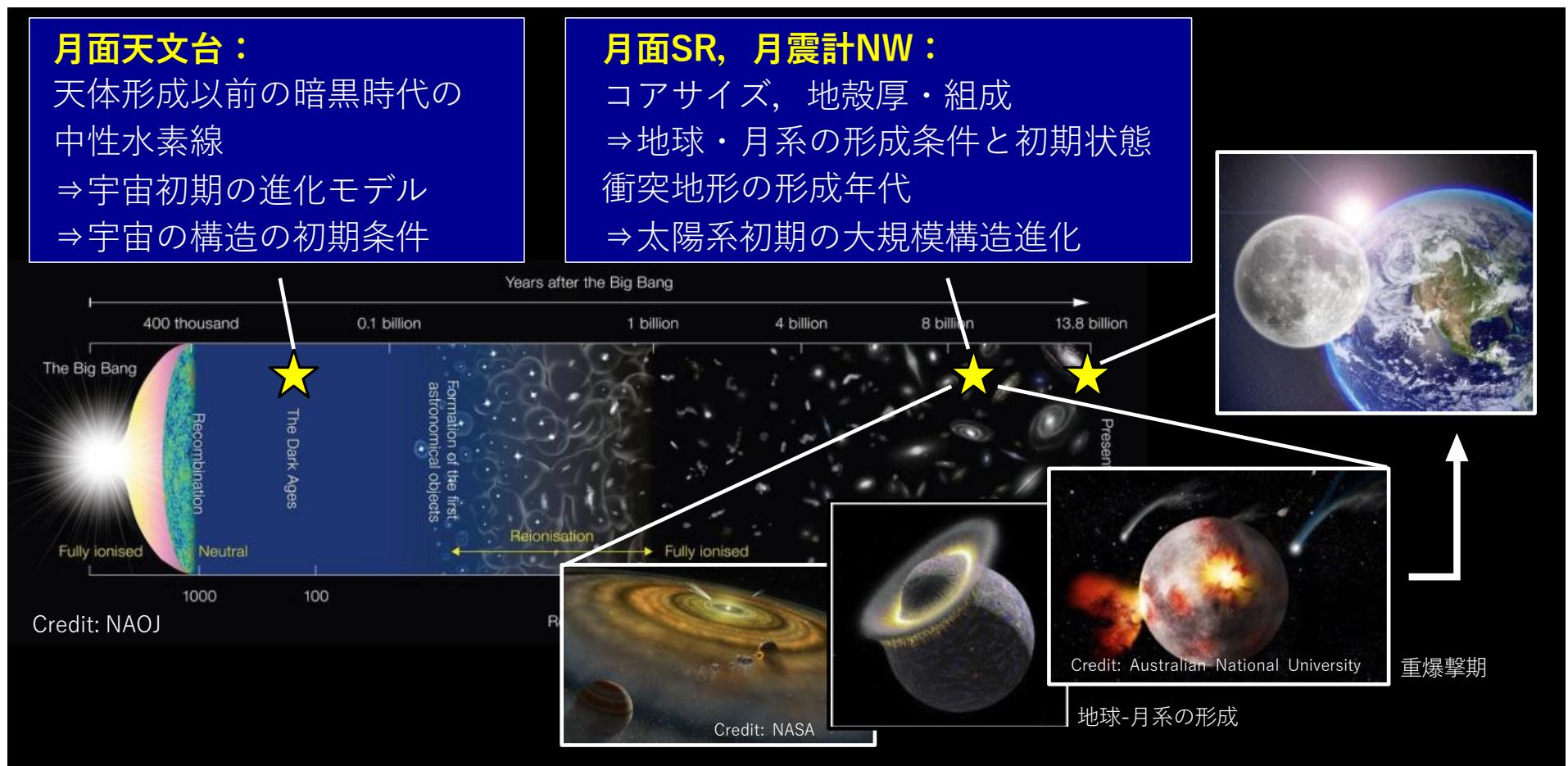


2030年代までの日本の月面活動における大きな柱 —第一級の成果を出す科学探査—

宇宙と太陽系・地球-月系の初期状態・初期進化の理解

- 月面からの天体観測（月面天文台）
- 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
- 月震計ネットワークによる月内部構造の把握

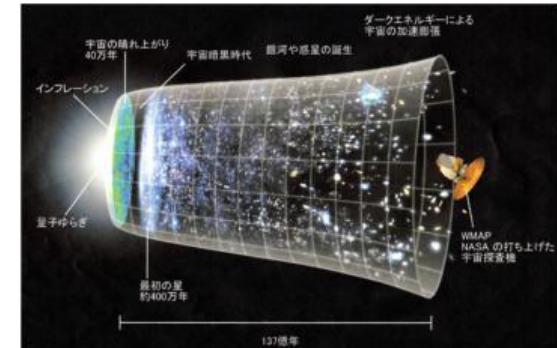
資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)



月面3科学

月面からの天体観測（月面天文台）

- 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。
- これらに着目し、地上では不可能な低周波電波天文観測により初期宇宙へと迫ることを月裏側で実施する。



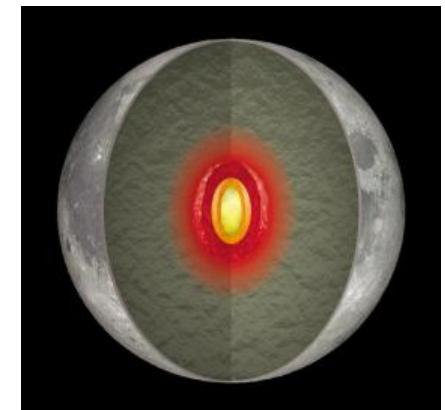
© NASA

宇宙の年表



© NASA

初期の太陽系で起こった惑星同士の衝突 (想像図)



© 国立天文台

月の内部構造 (想像図)

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

- 天体進化が早い段階で止まった月の表面には、太陽系形成時における天体衝突の記録が残されている。
- それら衝突盆地の年代決定から、ダイナミックであったとされる太陽系形成過程の理解を実証的に進めるための知見を獲得する。

月震計ネットワークによる月内部構造の把握

- 天体進化が早い段階で止まった月は、天体進化の基本過程を理解する上で最適の研究対象である。
- この観点から、月の内部構造を把握する。

月面からの天文観測（月面天文台）

科学目標

資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)

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

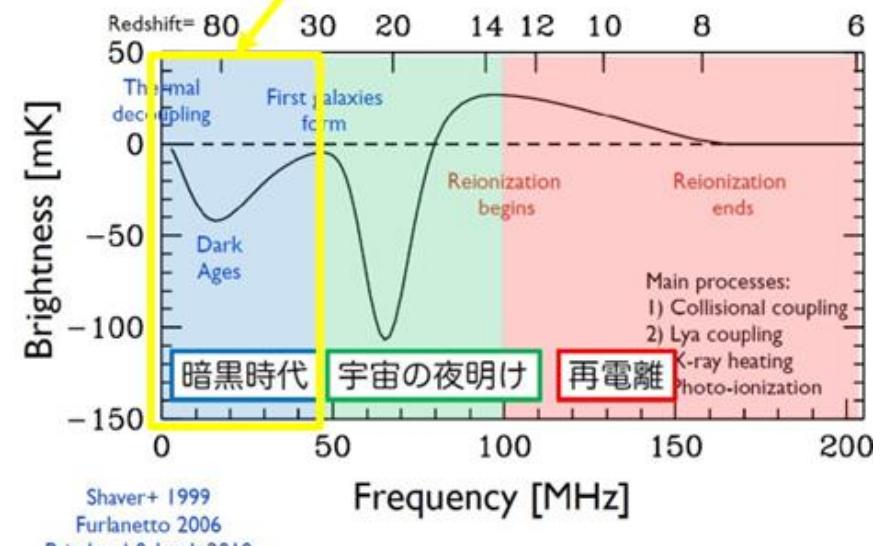
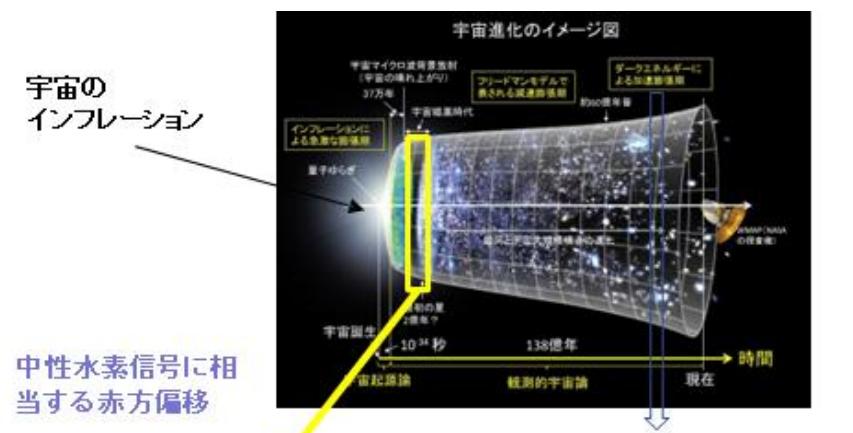
月面では大気に妨害されずに観測ができ、
また、月裏側の電波環境は良好である。
(軌道上と比べて) 安定した接地面があり、
長寿命を実現しやすい。

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。



「月面天文台」にて期待する技術

資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)

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。

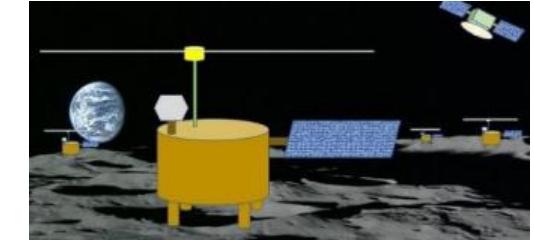


図1 月面に設置する電波干渉計
「自立式ユニット」のイメージ

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

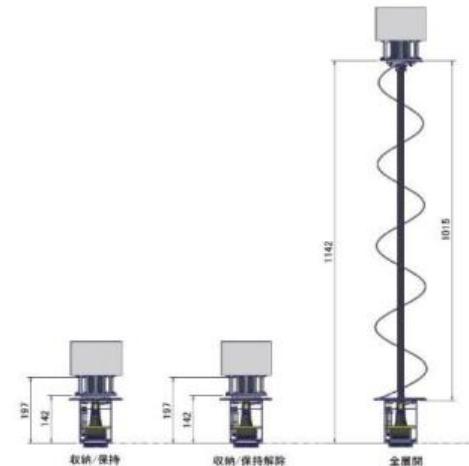


図2 直線展開機構の例

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

月サンプルの採取・選別・地球帰還

科学目標

資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)

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中に衝突溶融岩が見つかっているが、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。

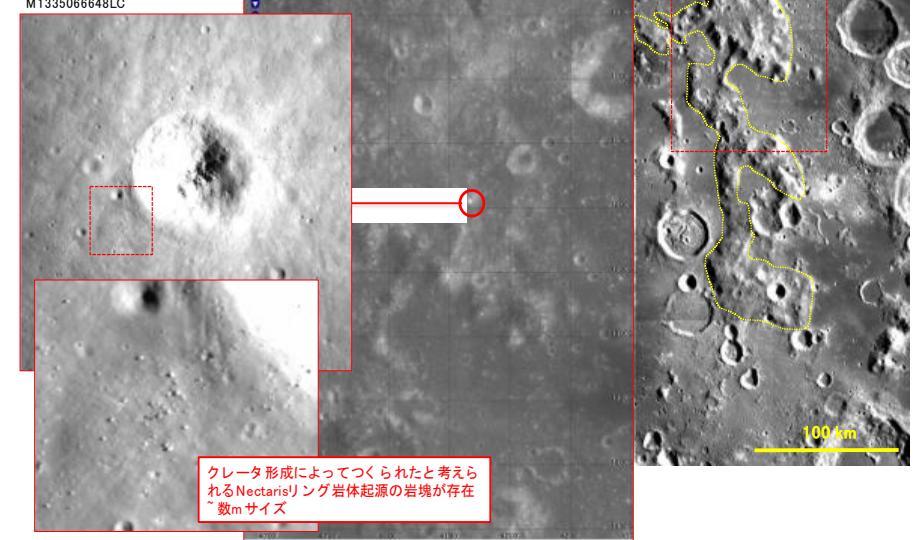
ネクタリス盆地の一部領域では衝突溶融岩の「露頭」がつくられている。

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。

探査領域候補

LRO NAC画像
M1335066648LC



「月サンプルの採取・選別・地球帰還」にて期待する技術

資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)

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10μm/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、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
- 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

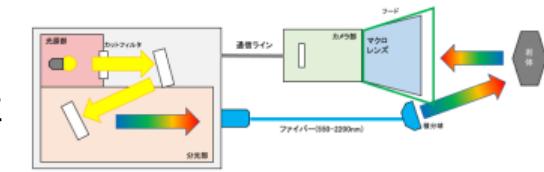


図1 赤外顕微分光カメラ概念図

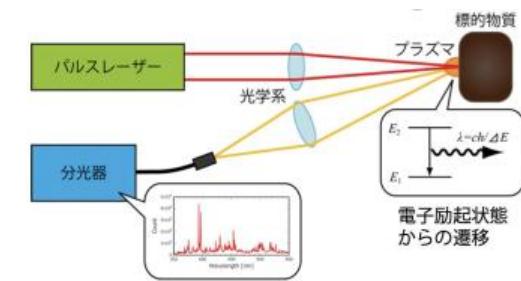


図2 LIBSシステム概念図

月震計ネットワーク

科学目標

資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)

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）。

他の観測の課題

アポロの月震計では月裏側未観測、感度・帯域が不十分。

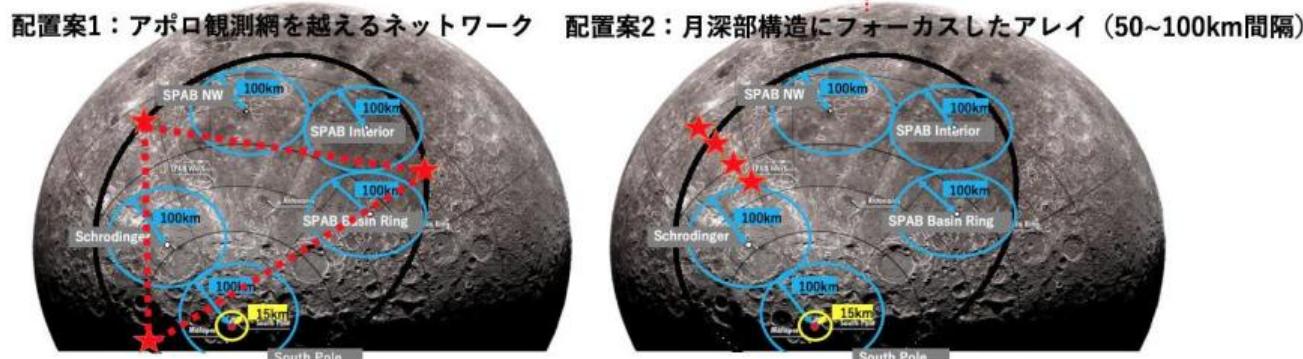
レゴリス層拡散波により走時読み取り誤差大（地殻厚・コア半径推定に大きな誤差）。

2020年代の観測シナリオ案

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。

2030年代の観測シナリオ案

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。



「月震観測ネットワーク」にて期待する技術

資料提供: 月面の科学FSチーム(課題B、ISASテーマ)

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。



図1 プロトタイプとして開発した光学干渉式地震計

② 目標仕様

- 0.1-1000秒の帯域で 10^{-9} ($m/s^2/\sqrt{Hz}$)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



図2 地球用に開発が進められている超小型振動励起源

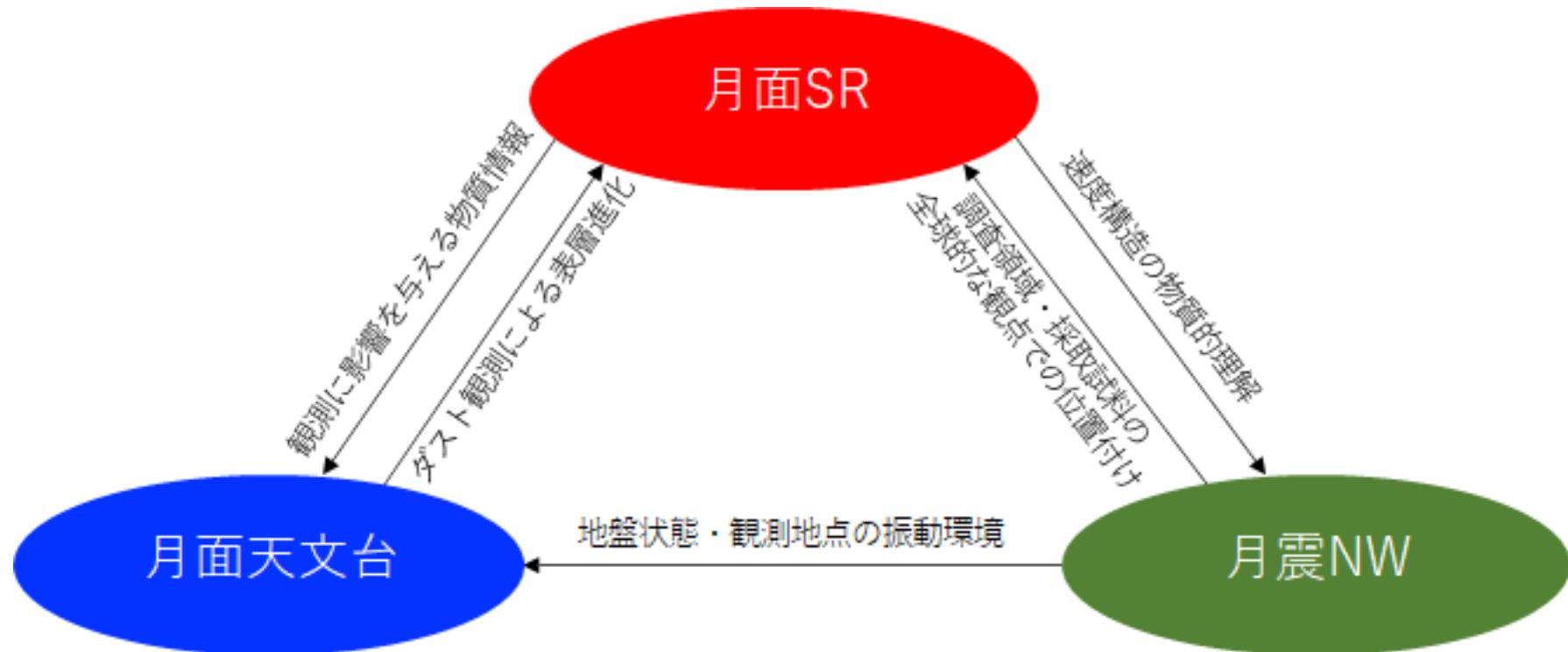
③ 注目技術

- 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、地震アレイ観測など

月面3科学の相乗効果

月面3科学はそれぞれで第一級の科学成果を創出するものであるが、相乗効果も期待できる。

- 月震観測による物理的性質を物質理解まで進めるには、SRでの科学成果が必須。
- 着陸地点付近の月サンプルの情報や地震探査による浅部構造は、月面天文台の観測環境に対して有用な情報。
- 月面天文台でのダスト観測は、SRのその場観測から表層地質進化を解釈する上で重要。

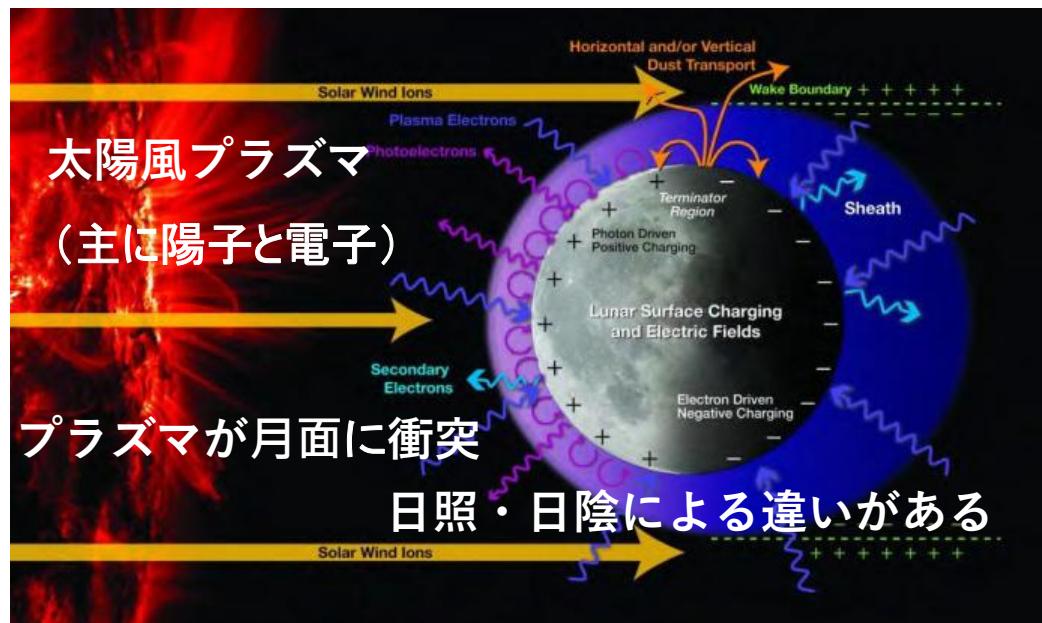


月開発に向けた月科学・工学

- ・ 民間資本による月での活動は、いかに経済的価値を生み出すかという目的を持ち、そのためにはどのように月面に機器を持ち込むか、資源を開発するか、エネルギーを獲得するか、といった点が重視される。
- ・ **月開発に向けた新しい月科学・工学**は今後注目を集めると考えられるが、こうした分野の研究は**従来の惑星科学的な探査と調和的に進めること**ができる。

月表面と宇宙プラズマの相互作用

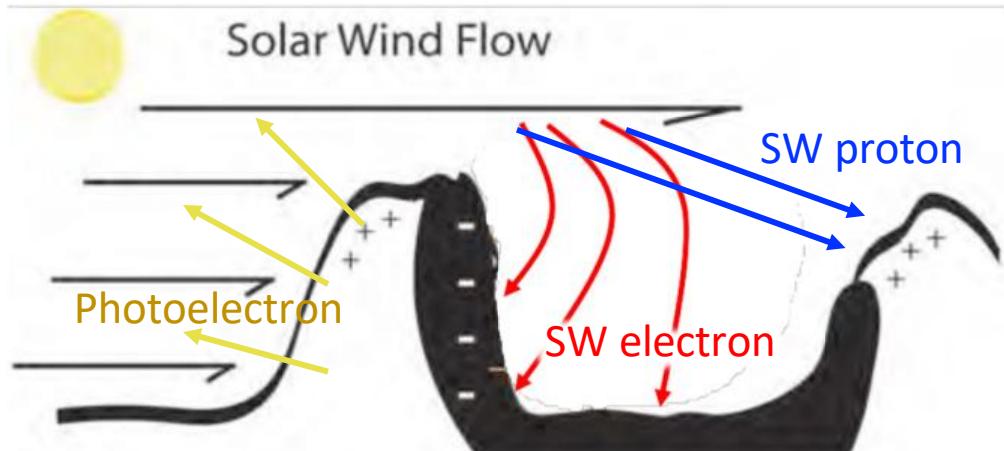
全球的スケール



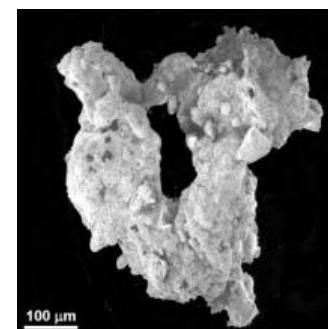
- 8割は太陽風中
- 2割は地球磁気圏内

http://psp.gp.tohoku.ac.jp/hisaki/lib/exe/fetch.php?media=text_reading:lapyuta_reading_nishino_210913.pdf

局所的スケール



プラズマ & 帯電ダスト (modified after Farrell+2007)



月表層レゴリスのサイズは
最小で10 nm程度か

月の地形と地質

海：月表面の15%

高地：月表面の85%



月表面はレゴリス（砂礫）に覆われている

レゴリスの厚さ

- 「高地」（比較的古い地形）：20～30m
- 「海」（比較的新しい地形）：2～8m
- 最も新しいクレーターの周辺：数cm

月のレゴリスの化学組成

Compound	Concentration (%)
SiO_2	42-48
TiO_2	1-7
Al_2O_3	12-27
FeO	4-18
MgO	4-11
CaO	10-17
Na_2O	0.4-0.7
K_2O	0.1-0.6
MnO	0.1-0.2
Cr_2O_3	0.2-0.4



出典： NASA

H.R. Fischer
et al. 2018

本格的な月開発への準備

- 月面の環境について、異なる場所で各々精密に調査する必要がある：探査機機器類・太陽電池パネル・宇宙服の性能劣化、健康被害など、月面探査・開発への影響を明らかにする。
- 表面ダスト粒子の挙動や人工物への付着、掘削や土砂採取、人工物との相互作用やスラスタによる巻き上げ、越夜の電力維持など、**将来の月面での活動を考えると不可欠な情報・技術が数多く存在する**
- 月面での移動や人工物の敷設、建築などインフラ整備、資源利用などを考えると、**レゴリスの特性を理解**することが必須となる。



月資源の可能性の調査

- 月は安定した軌道を持つ最も地球に近い固体天体であり、各種元素のフィードストックとしての必要性が高い。
- 特に宇宙空間で比較的豊富に存在している始原的隕石とは異なり、地殻濃集元素が高い濃度で存在することが期待される。

【残された課題】

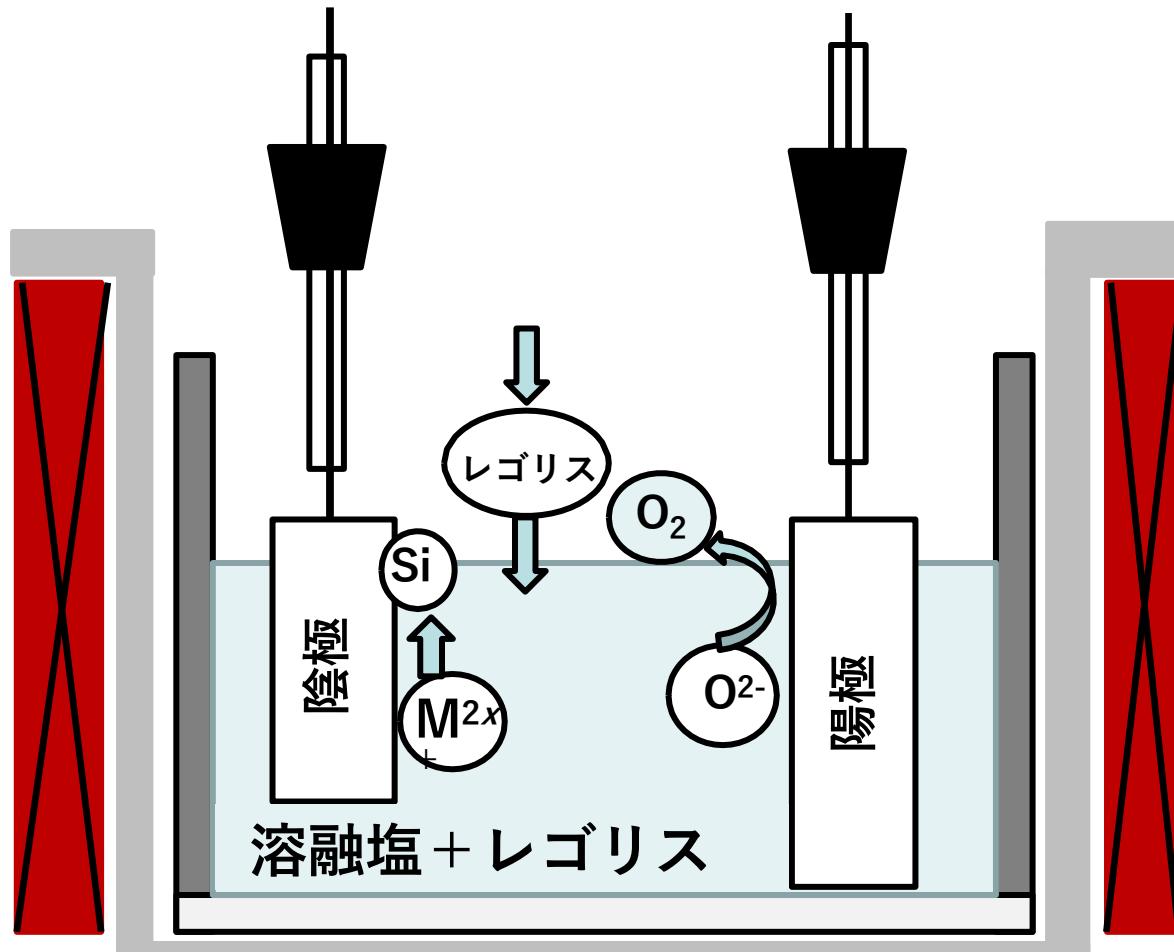
- Al、Ti、親鉄元素、希土類元素、太陽風・隕石起源の揮発元素は、フィードストックとしての可能性について頻繁に議論されている。
- 月面を覆うレゴリスの粒径や密度、鉱物組成、機械特性などは、地域性も含めあまりよく分かっていない。
- レゴリスなど惑星鉱物資源を原材料とした材料プロセス、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬、材料加工技術を高度化することが求められる。

レゴリストから始める資源開発

(シリコン、鉄、酸素など)

電解による分離回収

月表面にはレゴリストが
無尽蔵にある



溶融塩（イオン液体）の特性

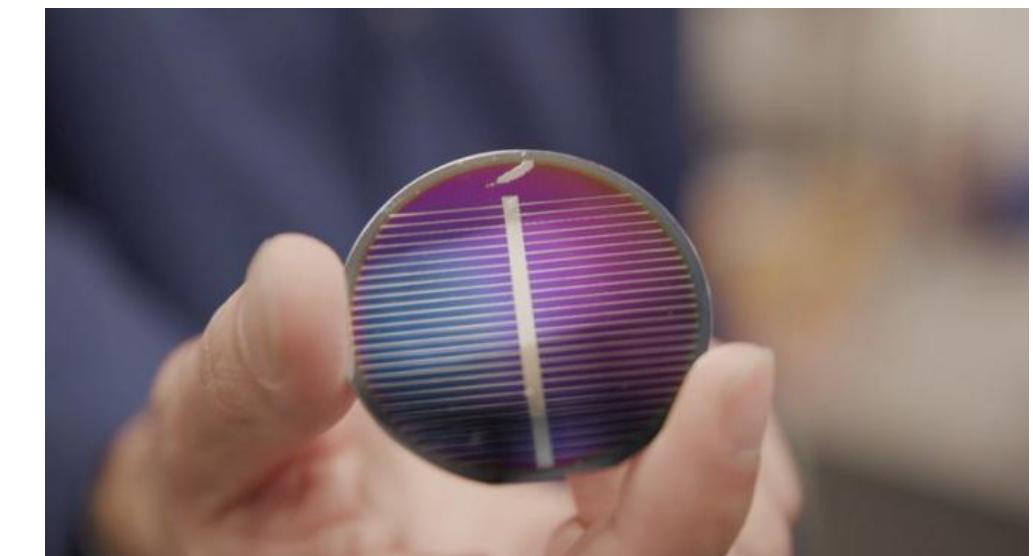
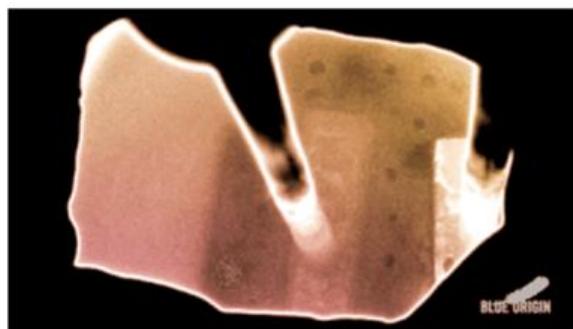
- 何でも溶かすことができる
- 不揮発性
- 化学的・物理的に安定
- 放射線損傷を受けにくい

ほぼすべての元素を
電気化学的に析出可能

月レゴリスを資源として活用する試み

- Blue Originは、月レゴリスから太陽電池や電線の材料を抽出する「Blue Alchemist」技術を発表した（2023年2月）。
- この技術では、月レゴリスに豊富に含まれるアルミニウム、鉄、マグネシウム、シリコンといった元素を、溶融塩電解法を用いて抽出し、太陽電池やその他必要なものに利用する素材として取り出す。
- **月の資源だけを使って太陽光発電を造るという目標**はまた、NASAが進める『月から火星へのインフラ整備』という目標とも合致する。

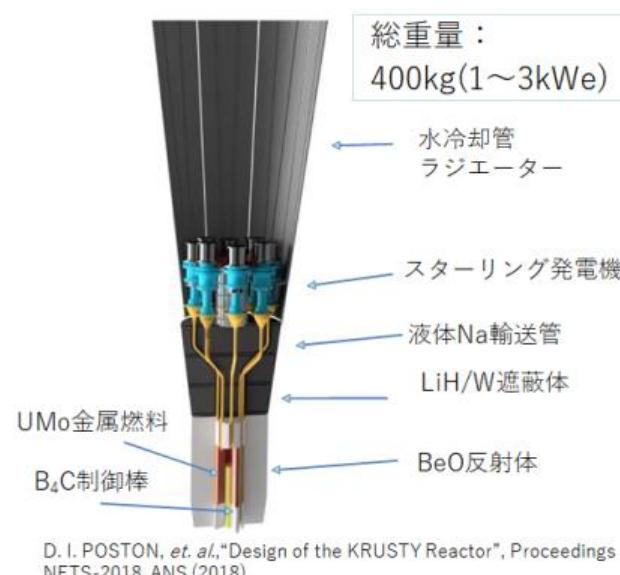
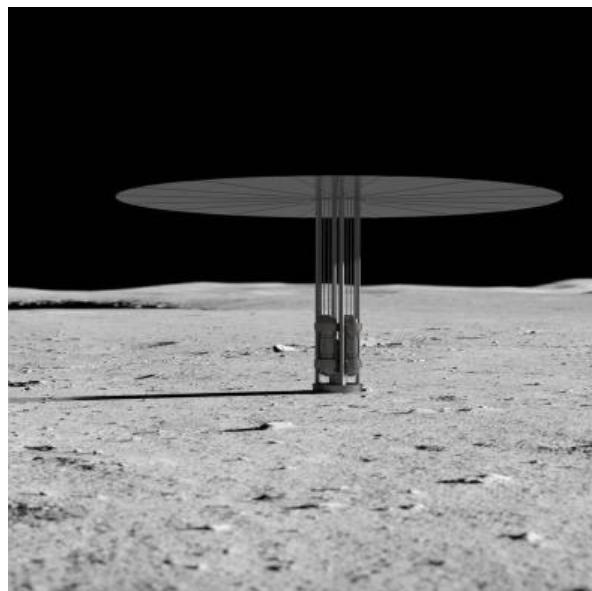
<https://www.blueorigin.com/news/blue-alchemist-powers-our-lunar-future/>
<https://www.techno-edge.net/article/2023/02/14/865.html>



月のレゴリスを模した物質から造られた
太陽電池の試作品

その場資源エネルギー開発

- ロボットや人間による拠点構築では、長期間安定に多量の電気 ($>100\text{kW}$) を供給できる電源が不可欠
- ニュートラルな立場から検討する必要（是々非々の議論）
 - シリコン⇒太陽電池
 - 鉄、アルミニウム⇒構造材料等、セメント等
 - 酸素⇒生命維持、推進剤
- すべての元素について、究極の資源・エネルギーエコシステムの開発が必要



NASA&DOEのKilopowerプロジェクト
最低10年間に亘り1~10kWeの電気エネルギーを供給できる小型・軽量の宇宙原子炉

月面での浅層地盤の探査

資源探査に必要な技術

- **能動的地震学**

- 人工震源を用いて地震波の伝わり方の変化を捉える

- **レーダーサウンダー**

- 非接触・非破壊で月・惑星内部を探査

- **電磁探査**

- 地盤に入射した電磁波に由来する電磁応答を扱う

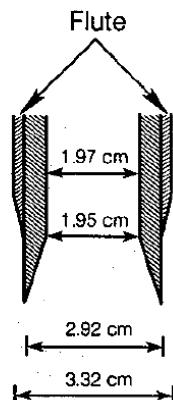
- **掘削**

月・惑星の地下へのアクセスについて

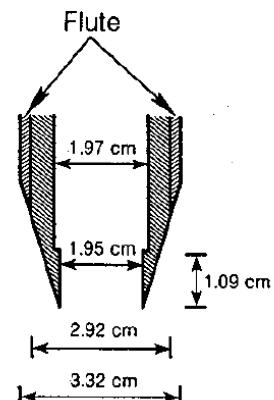
- 1~2mのドリル技術が成熟し、月探査のために計画されている。
- 一方で、2~10mのドリル技術は、火星や月その他の天体の多種多様な岩石や氷物質の地下層から原始物質をしっかりと採取するために不可欠であるが、十分に成熟しているとは言えない。

(深さ70cmまで)

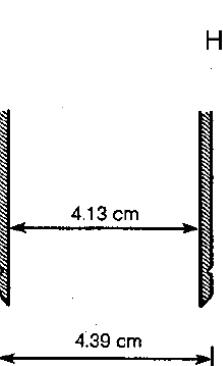
APOLLO 11
CORE TUBE



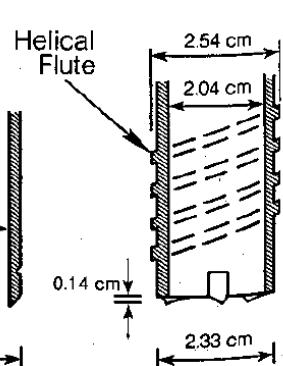
APOLLO 12-14
CORE TUBE



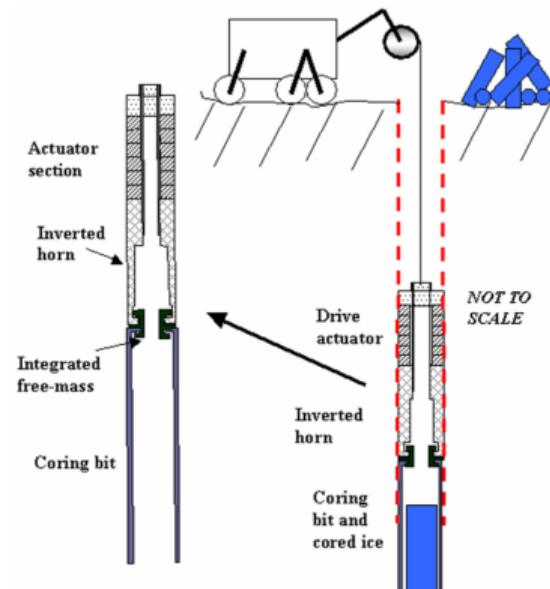
APOLLO 15-17
CORE TUBE



APOLLO 15-17
DRILL CORE



(10mクラス)



アポロ計画におけるコアチューブとドリル

火星用に開発された
ドリル

月での建設

- これまでの軌道上の無重力環境での活動とは異なり、月面における建設は、重力のある宇宙空間において、**不確実性の高いレゴリストとの接触を伴う活動**となる。
- さらに、低重力、高真空、厳しい環境（熱、放射線、日照、隕石・デブリ）など、月面固有の対策も必要となり、**世界の宇宙機関・宇宙関連メーカーにとって経験のない新しい挑戦**となる。
- 月面上に展開する構造物と建設作業を行う宇宙機の設計法が確立していない中で開発を進めていくには、**地上の土木・建築技術の応用を前提とし、その宇宙仕様化に取り組んでいくとともに、輸送コストを考慮した小型軽量な建設機械の利用も必要**であろう。

新しい製造プロセス

- 積層造形法などの新しい製造能力は、いつか微小重力下でのみ作られ、そこでしか機能しないかもしれない新しい材料や部品の作製を実現する可能性を持っている。
- これは、宇宙ミッションのロジスティックと計画のシフト、最終的には宇宙ミッションのコンポーネントを直接宇宙で製造建設することを可能にする。

(出典：ESA)

積層造形法の例

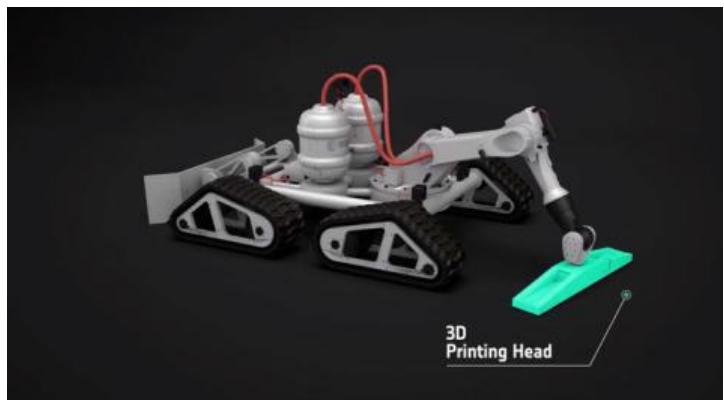


1.5トンの試験体
イタリア中部の火山から取れる玄武岩（成分は月のレゴリスに99.8%合致）を使用

月面基地のデザイン例



(出典 : ESA)



CDFスタディレポート：ムーンビレッジ-概念設計と月居住-

https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/CDF/ESA_engineers_assess_Moon_Village_habitat

- ESA ムーンビレッジ構想の一環として、建築、インテリアデザイン、エンジニアリング、都市計画を手がけるSOMが、ESAおよびMIT航空宇宙工学科と共同でムーンビレッジのコンセプトスタディを実施。
- コンセプトスタディの後、ESAのCDFに、「ムーンビレッジ」と呼ばれる月面に複数のパートナーが永住するオープンコンセプトの前段階として、ハビタットモジュールのコンセプト定義の検討を要請。
- ESAの専門家だけでなく、SOMやMITからも参加した学際的チームによって、2020年1月23日～2020年2月18日の間、6回のセッションで検討実施。
- 先進的な製造業のための将来のソリューション、持続可能な宇宙探査のためのシステム開発、宇宙や非宇宙からの潜在的なサプライヤー、ESAの学術ネットワークからの社会科学者（人類学者、心理学者、人間工学者など）などに関わる多くのヨーロッパの関係者もオブザーバー参加。
- デザインの進行に応じて意見交換やコメントの機会を設置。



ムーンビレッジの完成予想図（出典：SOM）

資料提供：石岡憲昭 ISAS名誉教授

CDF: Concurrent Design Facility

SOM: Skidmore, Owings & Merrill

MIT: Massachusetts Institute of Technology



ムーンビレッジの可能性を示す様々なレンダリング画像

研究開始時に提案されたハビタットの主な仕様は以下の通り：

- 乗員 数：4名
- ミッション 期間：500日
- 場所：南極、シャクルトンクレーター（月面永久影領域付近）
- ハビタット：
 - クラス：クラスII（モジュールのみ）
 クラスIII（ISRU構造あり）
 - 質量：47,960kg（湿式）
 - 高さ：～15.5m（4段階）
 - 直径：～10.5m（展開時）
 - 容積：698.29m³（加圧時）
 388.53m³（居住空間）
 - 面積：180.35m²（グロス）
 104.22m²（ネット）

現行の居住モジュールとの比較

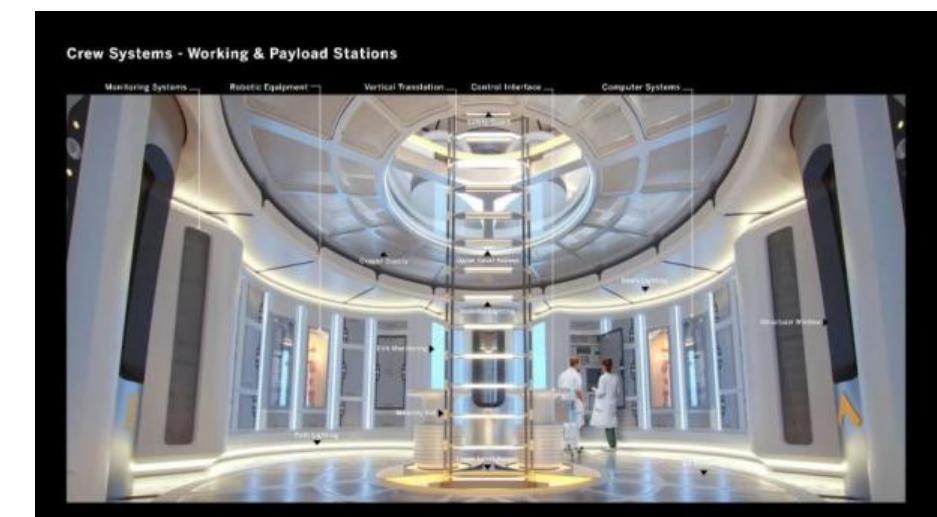
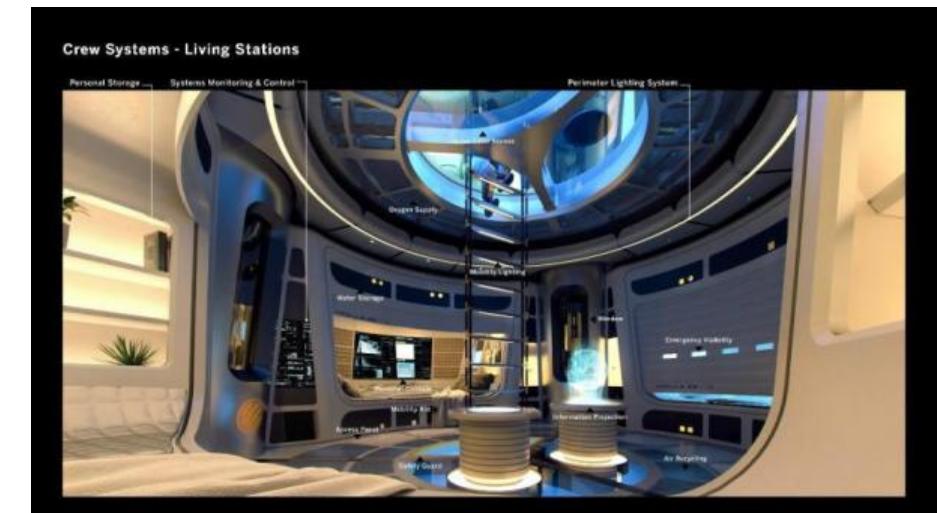
人工衛星を含む宇宙構造物、特に国際宇宙ステーション（ISS）で使用されている居住モジュールの質量と体積の傾向を加圧された容積1立方メートルあたりの湿潤質量で比較検討。

- ◆ Moon Village SOMの提案する居住環境（展開済み）：
68kg/m³
- ◆ Destiny/Columbus（艤装品）：257/229kg/m³
- ◆ Destiny/Columbus（ペイロードなし）：170/139kg/m³
- ◆ Kibo PM：102kg/m³
- ◆ BEAM（インフレータブル）：88kg/m³

ムーンヴィレッジのハビタットの推定質量は、宇宙ステーションやISSモジュールの傾向を下回っている。

ビゲロー・エアロスペース社が開発し、ISSに配備されている拡張可能な宇宙ステーションモジュール（BEAM）の加圧容量に対する質量比に匹敵する。

これらの構造物と比較するとより軽い。



提案されたハビタット内部のレンダリング

人類活動圏の拡大のイメージ

20年以内に20-50名規模の有人月面基地を建設。その先の月面は民間主体の持続的な活動へ移行。JAXAは火星有人へ。



重力天体探査の科学と技術 理工連携・产学連携への萌芽育成

インフラ整備の民間委託 通信、エネルギー生成、 建築、輸送

エネルギー 開発

水資源 極域探査 水生成工場

月環境調査

資源探査

資材としての資源 エネルギー資源

地質調査 地殻内部構造 マントル・コア

月利用 月面天文台

宇宙医学 社会学

宇宙農業

民間活動による持続的探査
例えば4333人規模のPrrq#doh|+
+lvsdfh提案による)

月面基地建設・維持 53083人規模が常駐 南極基地のイメージ

2040-

月面を利
した科学

『作』

土木・建築
構造物建設

輸送技術
低コスト化

探查技術
移動技術
多地点観測

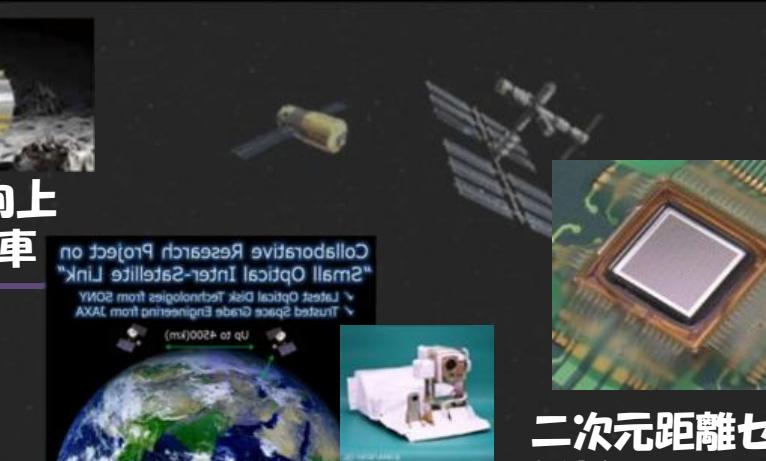
探る



砂地走破性向上
(株)日産自動車



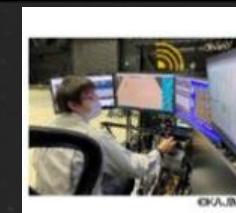
変形型月面ロボット
(株)タカラトミー



小型衛星用光通信モジュール
(株)ソニーCSL



二次元距離センサ
浜松ホトニクス(株)



1000km以上

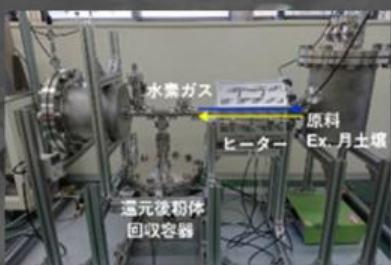


月面拠点の自動化施工
鹿島建設(株)

作る



袋培養
(株)竹中工務店
(株)キリン



水素還元システム
九州大学



固体化マリンレーダ
(株)光電製作所



全固体リチウム
イオン電池
日立造船(株)

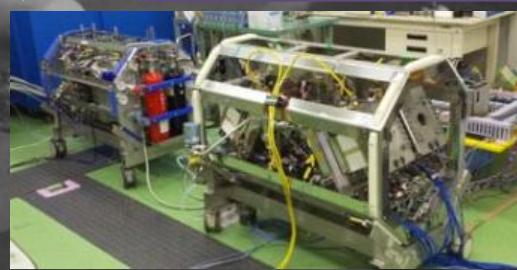


超軽量建機
タグチ工業(株)



アースオーガ掘削
情報による地盤推定
日特建設(株)

住む



燃料電池システム
三菱重工業(株)



持続可能な新住宅
システム
ミサワホーム(株)



高感度ガスクロマトグラフ
ボールウェーブ(株)

補足資料

月での資源調査・利用に係る アカデミアおよび民間の今後の方針性のイメージ

