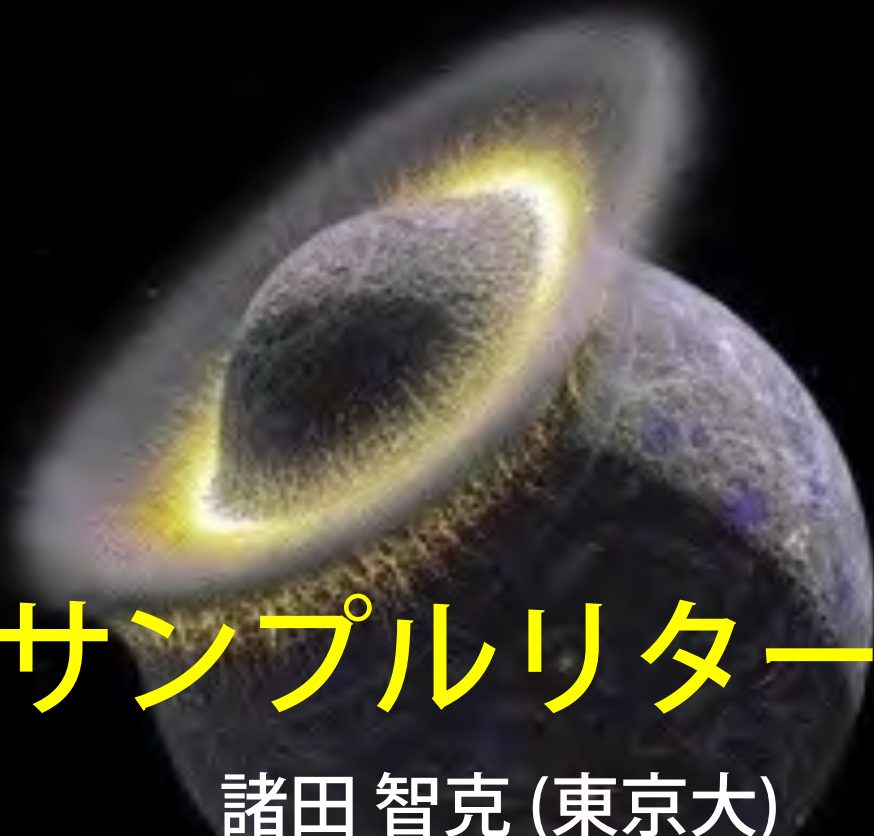


2025/04/28 第66回宇宙科学・探査小委員会



月面サンプルリターン計画

諸田 智克 (東京大)

月面の科学フィジビリティスタディ：「サンプルリターン」チーム

諸田 智克, 長 勇一郎 (東大), 長岡 央, 仲内 悠祐 (立命館大), 杉田 精司 (東大),
大竹 真紀子 (岡山大), 田畑 陽 久, 相田 真里, 与賀田 佳澄, 宮崎 理紗 (JAXA),
鹿山 雅裕 (東大), 新原 隆史 (岡山理科大), 森 治, 吉光 徹雄, 佐伯 孝尚 (JAXA)

SR探査が目指す科学

太陽系の初期進化の解明

目標1：地球-月系の形成条件の制約

目標2：太陽系初期の天体衝突史の復元

始原的天体 or 分化天体
高温 or 低温

© 2009 R.M. Canup, Takaaki Takeda,
4D2U Project NAOJ

円盤組成

円盤温度

月のバルク組成
同位体組成
揮発性元素量

巨大衝突

重爆撃期

Credit: Australian National University

後期重爆撃期
天体衝突の増加
揮発性物質供給

衝突盆地年代
衝突頻度増加の
有無・タイミング

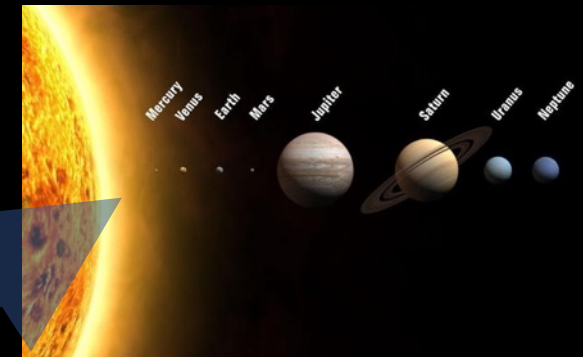
現在

巨大惑星の軌道移動?

原始惑星系円盤

Credit: NASA

Gomes et al. [2005]



目標 1 : 地球-月系の形成条件

これまでの月バルク組成の常識は揺らいでいる

端成分組成, 構造(それぞれの体積)に大きなモデル依存・複雑な分化過程
→ 揮発性元素量, 難揮発性元素量, 鉄量など ~2倍程度の不確定性

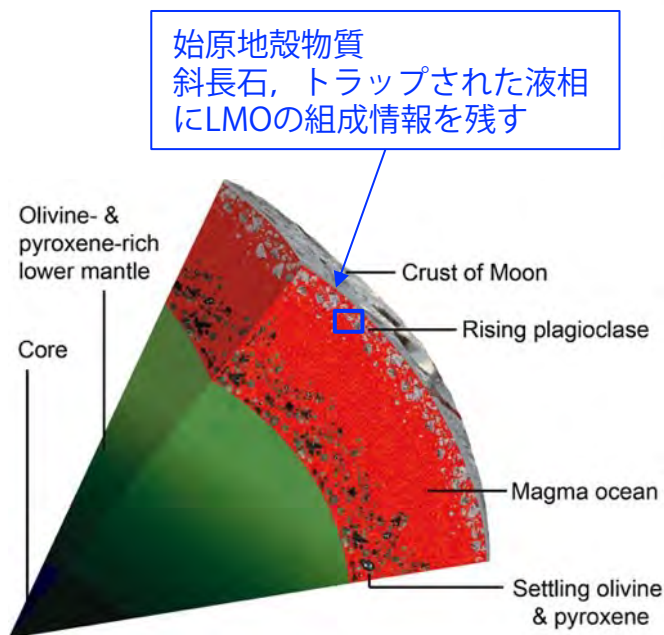


マグマオーシャン(LMO)から直接固化した始原地殻岩をサンプルリターン

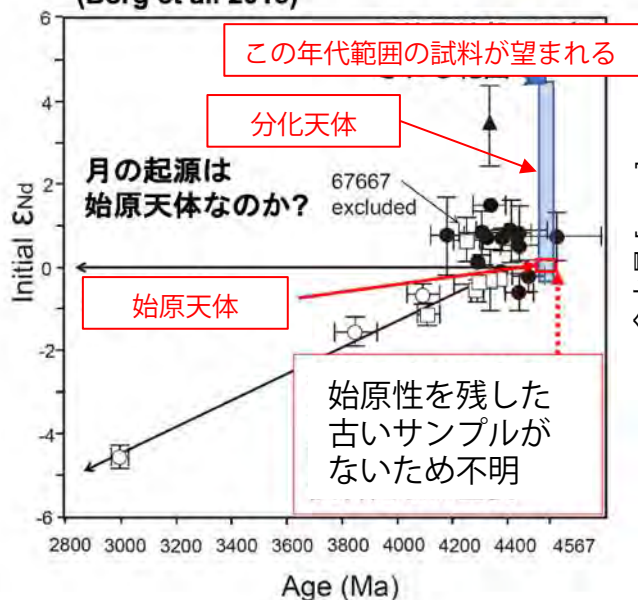
→ マグマオーシャンの初生値をより直接的に決定 → ϵ Nd初生値, 揮発性元素量,

...

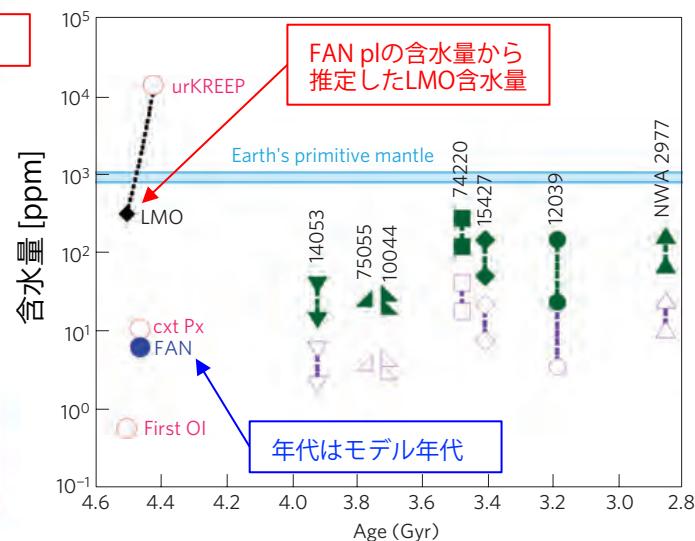
地殻形成時の同位体初生値(ϵ Nd値)



アポロサンプル、月隕石の測定結果
(Borg et al. 2015)



月試料の含水量 [Hui et al. 2013]
アポロ試料から推定.



月の原材料 → 始原天体 vs 分化天体
月が地球由来か衝突天体由来かがわかる

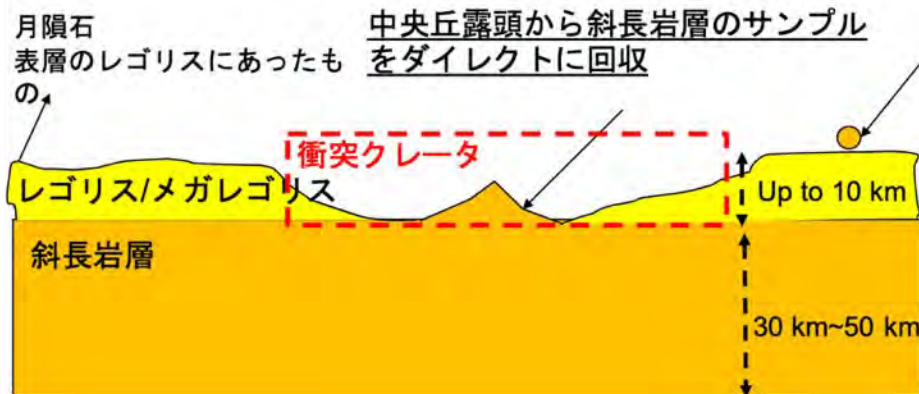
揮発性元素の枯渇

→ 高温ディスク vs 低温ディスク
→ 単一巨大衝突 vs 複数中規模衝突

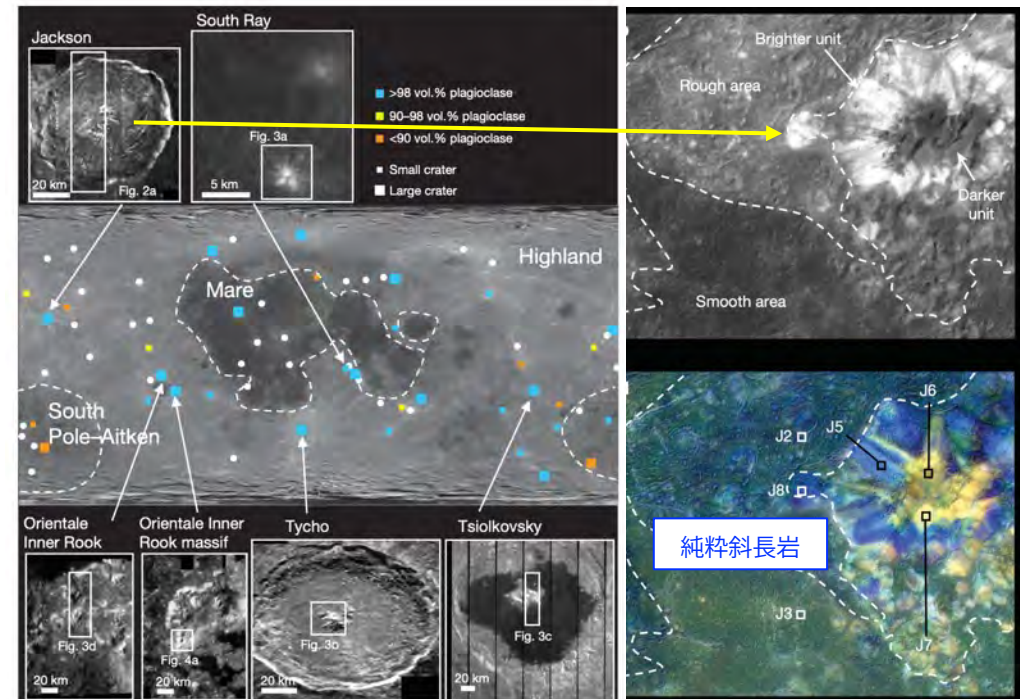
目標 1：地球-月系の形成条件

- かぐや高解像度画像から純粹斜長岩体を発見 [Ohtake et al. 2009; Yamamoto et al. 2012]
- 全球的に分布→マグマオーシャンからの直接生成物 [Piskorz & Stevenson 2014]
 - ・ 起源情報を持った試料
 - ・ アポロ試料/月隕石(転石)とは質的に異なる
- 新鮮露頭または露頭から比較的最近崩落した岩体をターゲットとすることで表層での角礫化の影響が小さい試料を回収可能

→ マグマオーシャンを起源とする
始原地殻岩のサンプルリターン



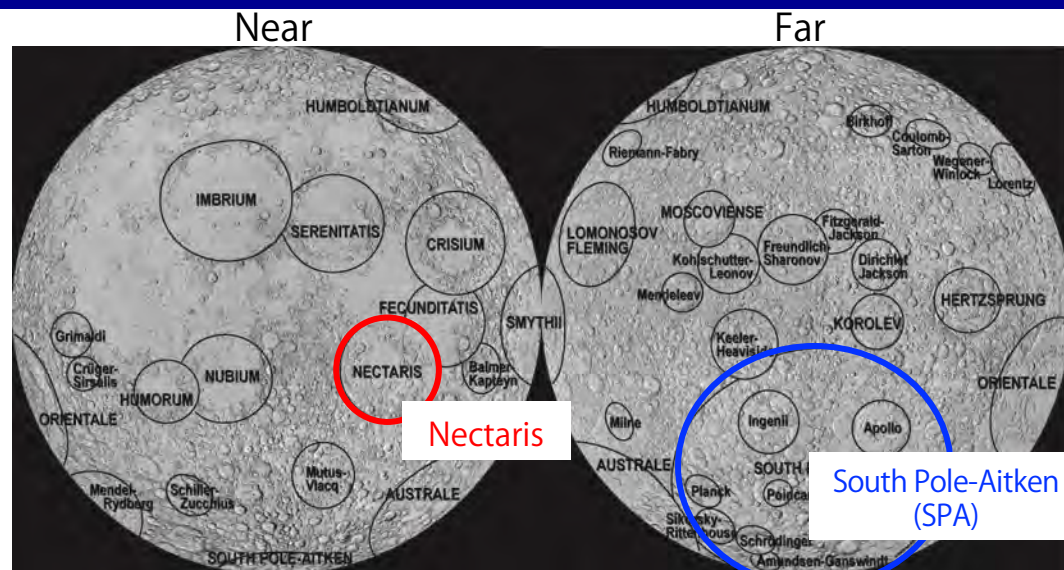
かぐや分光データから発見された純粹斜長岩の分布 [Ohtake et al. 2009]



目標 2 : 太陽系初期衝突史

- 月面の衝突盆地 46個発見されている
- 層序関係・クレータ数密度から相対的な年代は決まっている
- 最も若い盆地の一つであるImbrium盆地は38.5億年 [Stöffler & Ryder 2001]
- “古典的”後期重爆撃期モデルでは、短期間に全ての衝突盆地が形成されたとされてきたが、近年はNectaris盆地以降に穏やかな衝突ピークがあった可能性が指摘されている

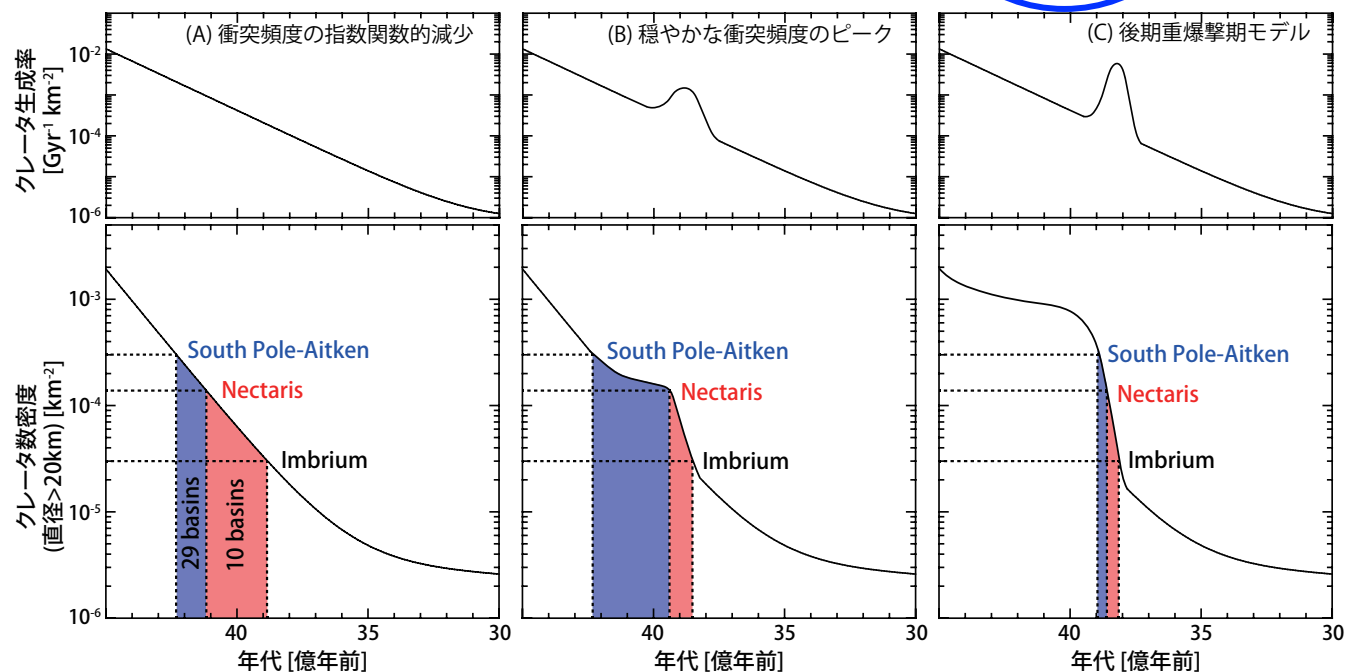
地質年代区分に用いられる**Nectaris (Ne)** 盆地と最も古い**SPA** 盆地の形成年代が鍵



表面年代とクレータ数密度の関係→

- (A) **Ne ~41億年, SPA ~42.5億年**
→ 指数関数的減少
- (B) **Ne ~39.5億年, SPA ~42.5億年**
→ 穏やかな衝突ピーク
- (C) **Ne ~38.5億年, SPA ~39億年**
→ 大規模衝突ピーク
 (“古典的”後期重爆撃期仮説)

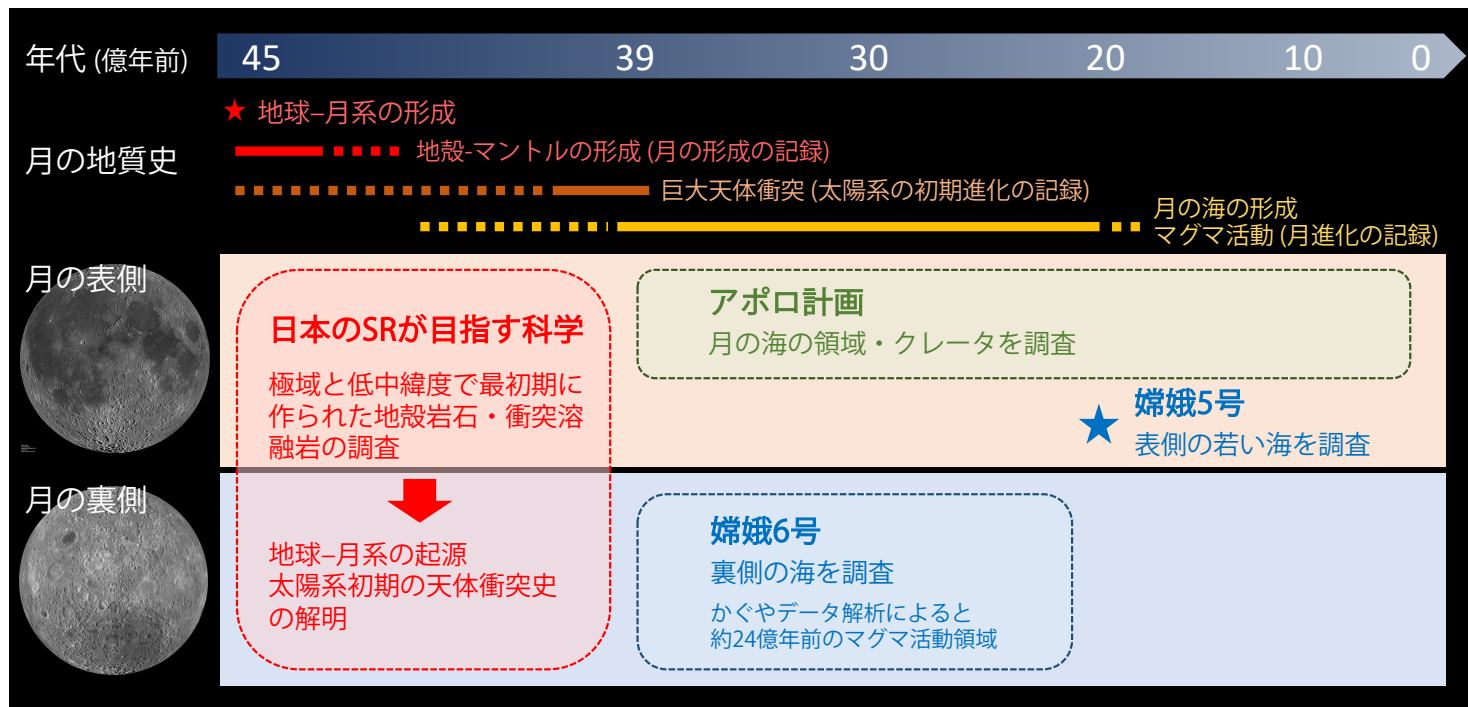
Nectarisの年代から後期重爆撃があったか否かが決着する



月面SRの課題

- アポロ試料・嫦娥試料：>39億年前の年代を持つ岩片は発見されているが転石であった
→地形との対応関係が不明であり，地殻・衝突盆地の形成の年代を表しているか不明
- 表層での天体衝突による他種混合
→始原的情報が失われている
→地質調査の訓練を受けた宇宙飛行士でも目視観察で始原的岩石の選別は困難

冥王代岩盤の露出領域の探査：降りたい場所に降りる (SLIMの有効活用) **が必要**
始原的岩石を選別するためのその場分析装置：取りたい試料を取る

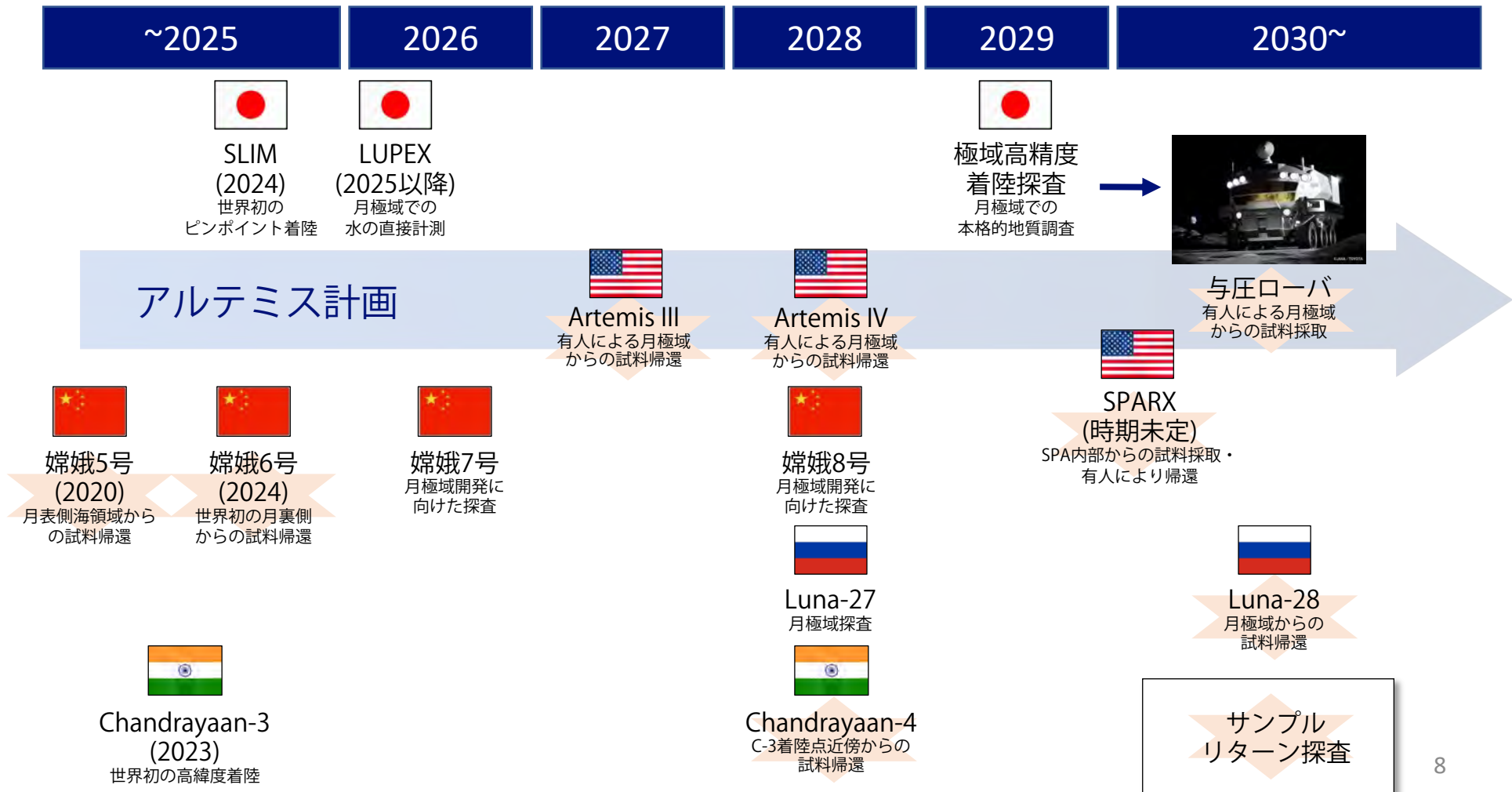


月面SR探査の海外動向

中国をはじめ各国がサンプルリターンを計画

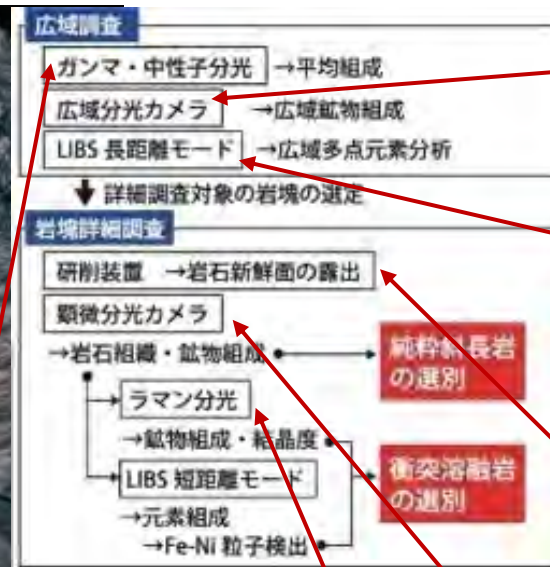
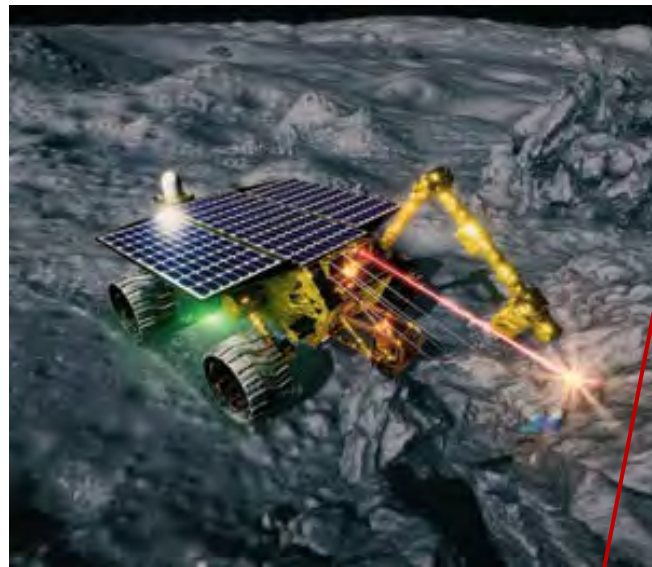
無人探査においてはレゴリス試料，有人探査においても試料選別技術は未実証

→ 始原的岩石試料をその場選別するための分析技術の確立を目指す

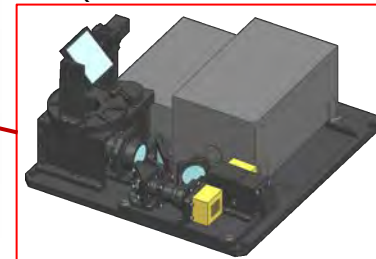


月面その場観測機器の開発

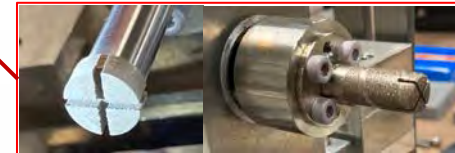
- 月惑星表面の地質調査と試料選別のための**その場分析技術の確立**
- SLIM, LUPEX, MMXのヘリテージを活かしつつ、新規性の高い月面観測装置群
 - 将来の月利用を目指した**水・鉱物資源探査**, **環境調査**とも高い**親和性**
 - **火星表面探査**においても**主軸**となる**技術**



LIBS (レーザー誘起元素分析装置)



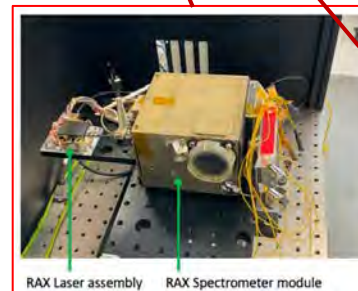
広域分光カメラ
(SLIM搭載MBC後継機)



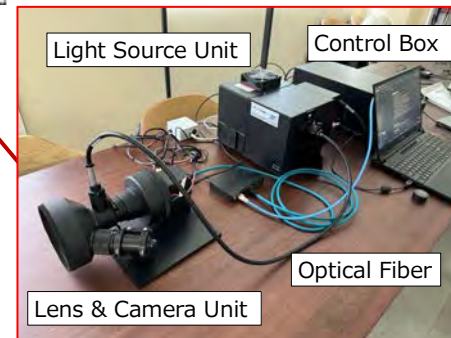
研削機構



ガンマ・中性子分光器
(MoMoTarO)



ラマン分光計 (MMX)



顕微分光カメラ

海外機器開発状況

■ Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)

[火星表面探査]

- NASA/CNES - ChemCam (Curiosity), SuperCam (Perseverance): ~11 kg 70 Wの大型装置
土壌中に普遍的に水素を発見(Meslin et al. 2013 Science), Jezeroクレータ内の堆積岩・火成岩の組成を網羅的に調査, 地質ユニットを特徴づけ (Wiens et al. 2022 Sci. Adv)
 - 中国 - MarSCoDe (16 kg, 65W). 未変成の新鮮な火成岩の発見 (Luo et al. 2024 JGR)
- 火星探査においては標準的な観測装置となっている

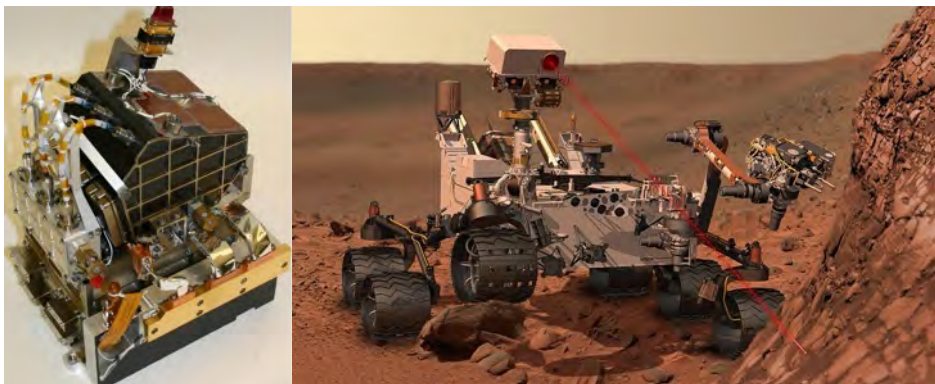
[月面探査]

- LE-LIBS (Chandrayaan-3): ~1.1 kg, 20 cm先の地表 (レゴリス) を測定しながら走行
硫黄検出の報道, その後の科学成果の報告は無し

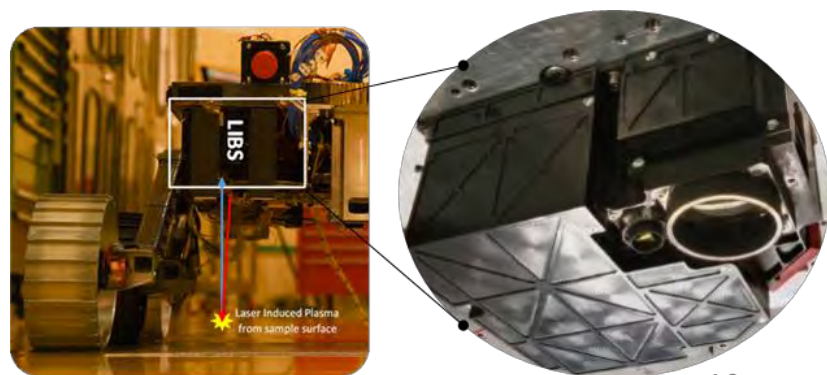
大型長距離化(>10 kg, ~70 W, >5 m)と超小型化(~1 kg, 1.5 W, 20 cm)の二極化

超小型は短距離観測のためレゴリスの観測が主となる → 露頭が重要となる理学観測には不向き

→ 日本は火星探査への接続も見据え小型 (6~7 kg) 長距離LIBSの開発を目指す



ChemCam onboard Curiosity



LE-LIBS [Sridhar et al. LPSC 2024]

海外機器開発状況

■ 顕微分光カメラ

[火星探査]

- NASA Perseverance搭載SuperCam (~11kg)
Vis-NIR領域をカバーする分光器を複数内蔵しスポット分光を実施
NIR領域の解能空間分：~11mm/spot @ 10m

[月面探査]

- SLIM搭載MBC (~4.0kg)
マルチバンド近赤外イメージング分光観測では最高分解能 (1.1mm/pixel @ 10m)
月面ボルダーにおいて3~4cmのカンラン石クラストを発見 (Ohtake et al., 2025 LPSC)
- Change'5&6搭載LMS(~5.5kg)
可視領域イメージング(480-950nm, 0.56mm/pixels @ 2m)と赤外領域スポット分光(900-3200nm)を実施
(R.Xu et al., 2022 SSR)

➡ 可視近赤外領域をカバーする顕微ハイパースペクトルイメージャは世界的に未実証, 開発途上

日本：空間分解能 10 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 波長0.7-1.7 μm , 波長分解能 2-20nm (Nakauchi et al., 2025)

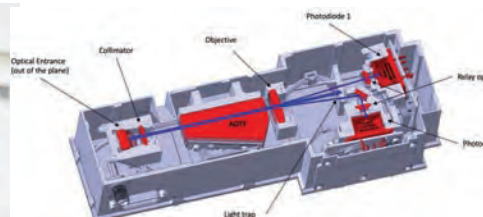
海外：空間分解能 100 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 波長0.45-3.6 μm , 波長分解能 50nm※ (Núñez et al., 2025)

※観測波長範囲が広いため、マルチバンドスペクトルに近い設計

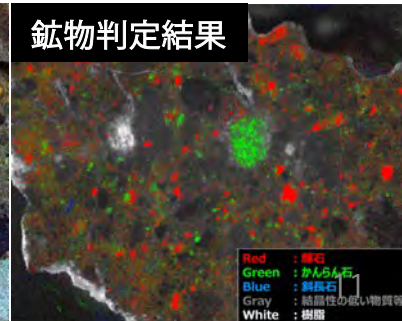
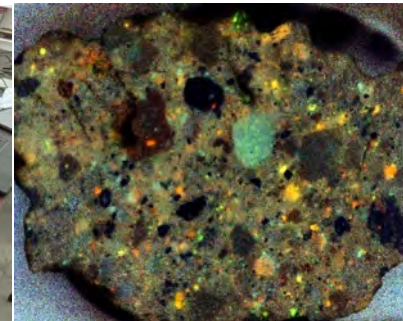
かぐや・SLIMで世界をリードした可視・近赤外分光技術を活かし月面顕微分光を実現する



Perseverance搭載SuperCam
[P. Bernardi et al. 2020]



顕微分光カメラ BBM



開発ロードマップ

- 月面サンプルリターンのシナリオとして以下のロードマップを想定。

- ① 2020年代のプリカーサミッションとしてランダー、小型ローバにその場観測機器を搭載し、「月面技術実証」と「南極域での一級の科学」を目指す。（技術的には、SLIM分光カメラ（MBC）等のヘリテージを最大限活かし短期間での開発を指向）
- ② 2030年代の与圧ローバへの機器搭載、アルテミス飛行士によるハンディ型機器による観測、サンプルの選別、持ち帰りを想定。

2020

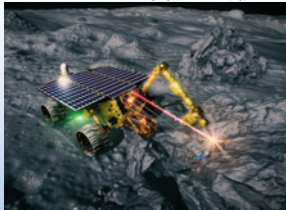
2025

2030

2035

プリカーサ：ランダー・小型ローバ搭載

- ランダー・ローバからのリソース供給
→ ローバを含めた形でのパッケージ化



FS/FL開発

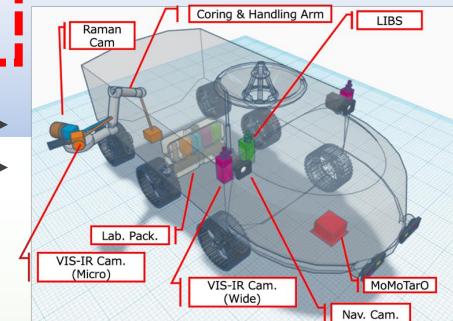
EM開発

★ ~2028 プリカーサミッション

- 月面技術実証
(研削技術・多角的地質把握技術実証)
- 南極域での一級の科学

★ 国際/国内探査 搭載提案
(CLPS等)

★ 与圧ローバ

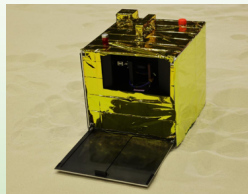


ハンディ化 (自立化/パッケージ化・
ハンドヘルド化)・分析ラボ化

- バッテリー・通信・熱制御
- 安全要求への対応
- 機器の統合化 → 相互参照が可能

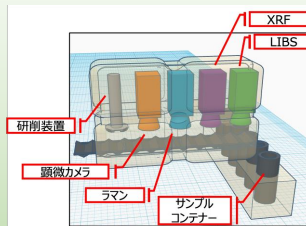
FL開発 (要素開発)

小型化/短距離観測化



自立化LIBS

自立化分析ラボ



★ 有人探査
(Artemis4以降)
搭載提案



ハンドヘルドLIBS
©HITACHI

ハンディ化
機器統合化

★ 国際/国内探査 搭載提案