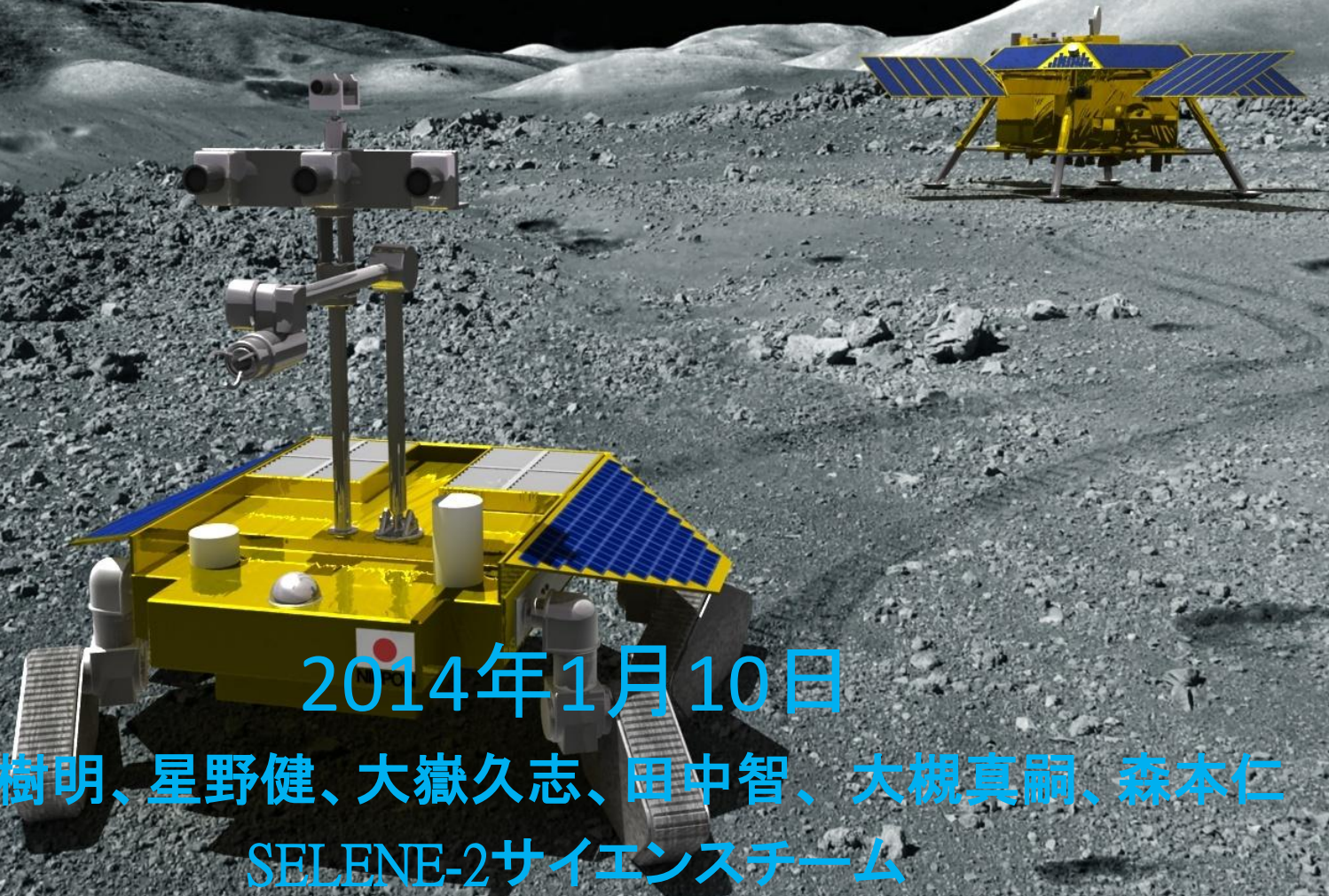


SELENE-2プリプロジェクトの検討状況 ～合わせ技は難しそうだ～



2014年1月10日

橋本樹明、星野健、大嶽久志、田中智、大槻真嗣、森本仁

SELENE-2サイエンスチーム

(JAXA 月惑星探査プログラムグループ)

This document is provided by JAXA.

本日の内容

- SELENE-2は「合わせ技」ミッション
- 検討経緯と周辺状況
- 「合わせ技」が難しい場合の対応
- まとめ

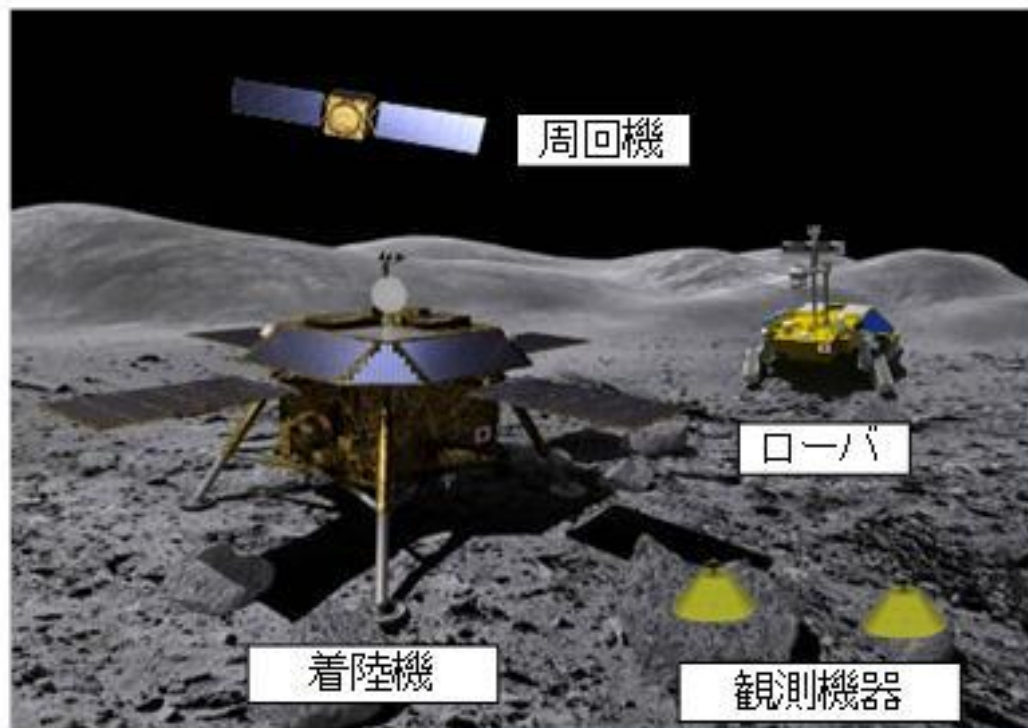
SELENE-2のミッション

(2011年10月改訂)

- ①将来の月面活動に必要な着陸技術と表面移動技術、越夜技術の開発・実証
- ②その場観測による月の科学探査と月の利用可能性調査
- ③上記を通じての国際貢献と国際的地位の確保

技術実証、科学観測、政策目的の合わせ技！

寄せ集めではなく、これらは有機的に関連している



広帯域地震計などにより、月の内部構造を測定

越夜技術による長期観測が必須

月の原材料物質を推定可能

探査技術確立

月の誕生仮説（ジャイアントインパクト説）の真偽を判定できる。

特徴的地域における、地殻物質の元素、鉱物組成を測定

ピンポイント着陸技術、移動探査技術が必須

地殻形成の仮説（マグマオーシャン説）の修正が可能

月面環境の計測

技術力、科学的知見でのプレゼンス

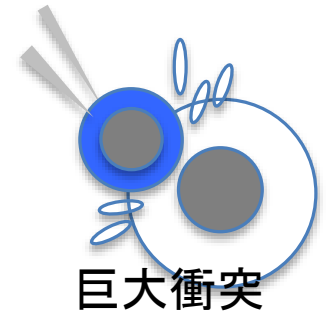
<月科学の重要性>

2007年理学委員会での説明内容

月は全太陽系理解に波及する5つの意義を持つ

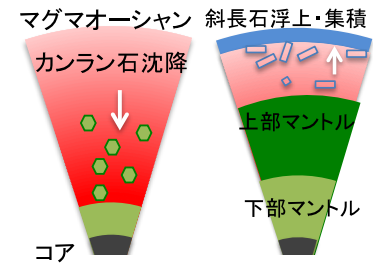
1. 「巨大衝突の産物」

- 月は巨大衝突で放出された物質が再集積して形成
- 巨大衝突は、地球型惑星の形成過程において普遍的過程
- 月の化学組成は巨大衝突の惑星原物質への影響理解に繋がる



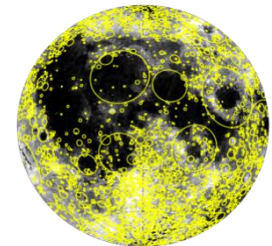
2. 「小型惑星」 (進化, 分化)

- 月はサイズ上は小型の岩石型惑星
- 岩石型惑星の分化と熱進化理解の上で重要



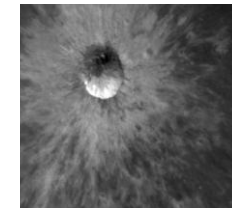
3. 「太陽系小天体衝突史の記録媒体」

- 過去約45億年間分の衝突クレータが保存されている
- 外惑星の大移動など太陽系初期進化過程に繋がる
- 地球表層の生命前駆環境の進化を考察する上で重要



4. 「衝突の実験場」

- 衝突盆地や衝突放出物が保存されている
- 天体衝突過程を解明する上で重要な研究対象



5. 「隣接天体」

- 地球の潮汐や自転進化を引き起こし月自身にも秤動月震、など発生。普遍的な過程だが不明な点が多くその解明に月は重要



月科学の重要な課題

1. 「巨大衝突の産物」 (ジャイアントインパクト)

- ・月は巨大衝突で放出された物質が再集積して形成
- ・巨大衝突は、地球型惑星の形成過程において普遍的過程
- ・月の化学組成は巨大衝突の惑星原物質への影響理解に繋がる

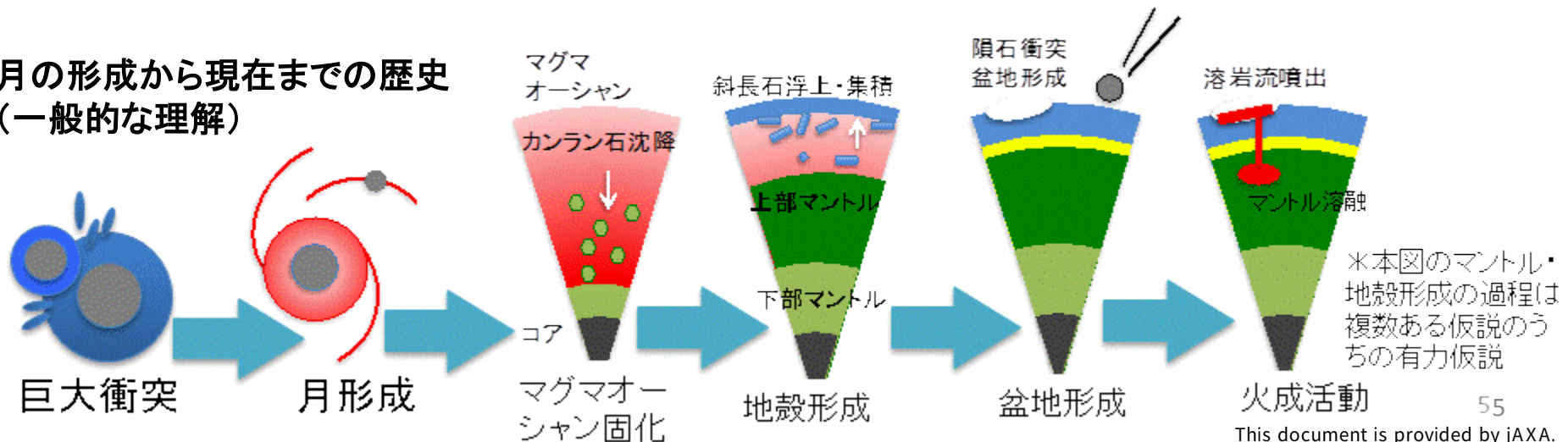
→①a巨大衝突の証拠は残っているのか？

→①b巨大衝突の条件・影響：月の化学組成は？→将来

2. 「小型惑星」 (進化, 分化)

- ・月はサイズ上は小型の岩石型惑星
 - ・岩石型惑星の分化と熱進化理解の上で重要
- ②aマグマオーシャンの固化 (進化) は一様だったのか？
- 表と裏の②b二分性の成因は？
- ②cマントル溶融と火成活動がいつ起こったのか？

月の形成から現在までの歴史 (一般的な理解)



「かぐや」の成果 <まとめ> (*)

1. 「巨大衝突の産物」

①a巨大衝突の証拠は残っているのか？

1) 純粋な斜長岩の発見:

全球マグマオーシャンの証拠 (全球斜長岩) として残る

2. 「小型惑星」 (進化, 分化)

②aマグマオーシャンの固化は深さ・空間的に一様か？

1) 純粋な斜長岩の発見: なんらかの非一様性

2) 斜長岩のMg/Fe比の二分性発見: 表と裏の非対称性

②b二分性の成因は？

2) 斜長岩のMg/Fe比の二分性発見: マグマオーシャンの固化過程が寄与

3) 超巨大盆地の直接的証拠の発見: 超巨大盆地形成が寄与

4) 盆地の重力場構造の二分性の発見: 地殻温度にも二分性あり

②cマントル溶融と火成活動がいつ起こったのか？

5) 若い火成活動発現期の発見: 2つの時期でマントル溶融と

火成活動起こりそれぞれ異なる溶融メカニズム、異なる組成



(*) 「かぐや」の成果はこれ以外にも多くあるが、巨大衝突と惑星進化の解明に焦点をあててまとめた一例である。

「かぐや」の成果とSELENE-2の科学目的

- 「かぐや」で得られた知見を使ってその先へ
- 「かぐや」では未実施の重要課題への挑戦

重要な月の課題と「かぐや」成果をふまえた将来展望

重要課題		課題へのアプローチ	かぐや成果	かぐや以降成果	これまでの成果をふまえた将来探査に向けてのターゲット	探査への反映(案)	
1.「巨大衝突の産物」	①a巨大衝突の証拠は残っているのか？	全球規模のマグマオーシャンの有無？	△	-	裏側探査が重要	サンプルリターン技術必要のため将来探査を目指す	
		コアの有無？	▲	▲	かぐやでは直接観測実施せず	月震計による内部探査をSELENE-2で実施	←「かぐや」で未実施の重要課題の挑戦
	①b巨大衝突の条件・影響：月の化学組成は？	マントル組成/月全球組成	▲	△	かぐやではマントル組成観測に限界有り	月震計や測距による内部探査必要 SELENE-2で実施	←「かぐや」で未実施の重要課題の挑戦
2.「小型惑星」(進化、分化)	②aマグマオーシャンの固化は一様だったのか？	地殻組成	○	△	地殻形成過程の見直し必要により直接観測必要	典型的な初期地殻岩体観測が必要 SELENE-2で実施	←「かぐや」知見を使ってその先へ
	②b二分性の成因は？	地殻組成/盆地形成/盆地重力場	◎	▲	裏側探査が重要	サンプルリターン技術必要のため将来探査を目指す	
	②cマントル溶融と火成活動がいつ起こったのか？	溶岩流噴出年代と量	○	▲	従来説の見直し必要→熱源元素量把握	熱源元素濃集層厚の把握必要 SELENE-2で実施	←「かぐや」知見を使ってその先へ
従来説の見直し必要→溶岩流年代精度向上					月面その場年代測定技術必要のため将来探査を目指す		

▲：間接的/部分的にに情報が得られた

△：限られた数の情報が得られた

○：十分な情報が得られ理解が進んだ

◎：複数の情報が得られ飛躍的に理解が進んだ

□ これらを目指す探査目標がSELENE-2で提案されている

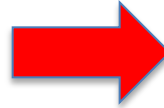
(本表のかぐや成果評価より右側は大竹真紀子氏の私見)

SELENE-2の着陸点検討

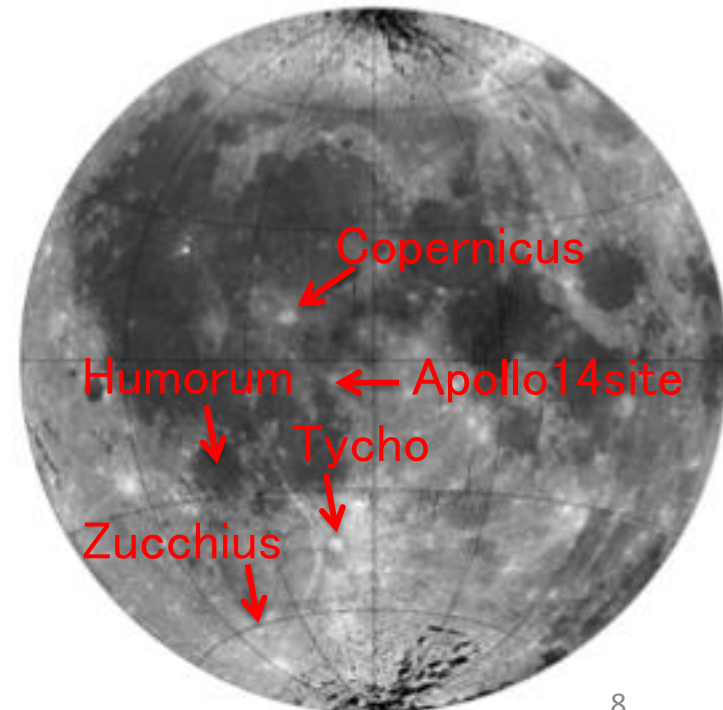
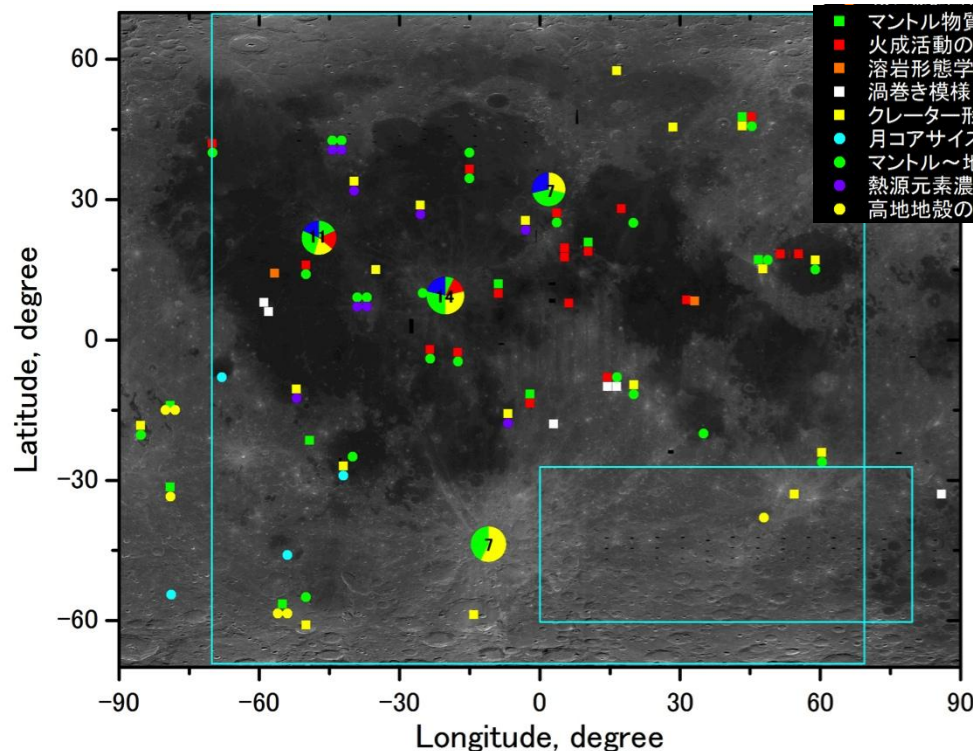
4つの科学目標 5箇所を選定

着陸地点検討の経緯

21グループから
35件の科学テーマと
約70箇所の着陸地点の提案

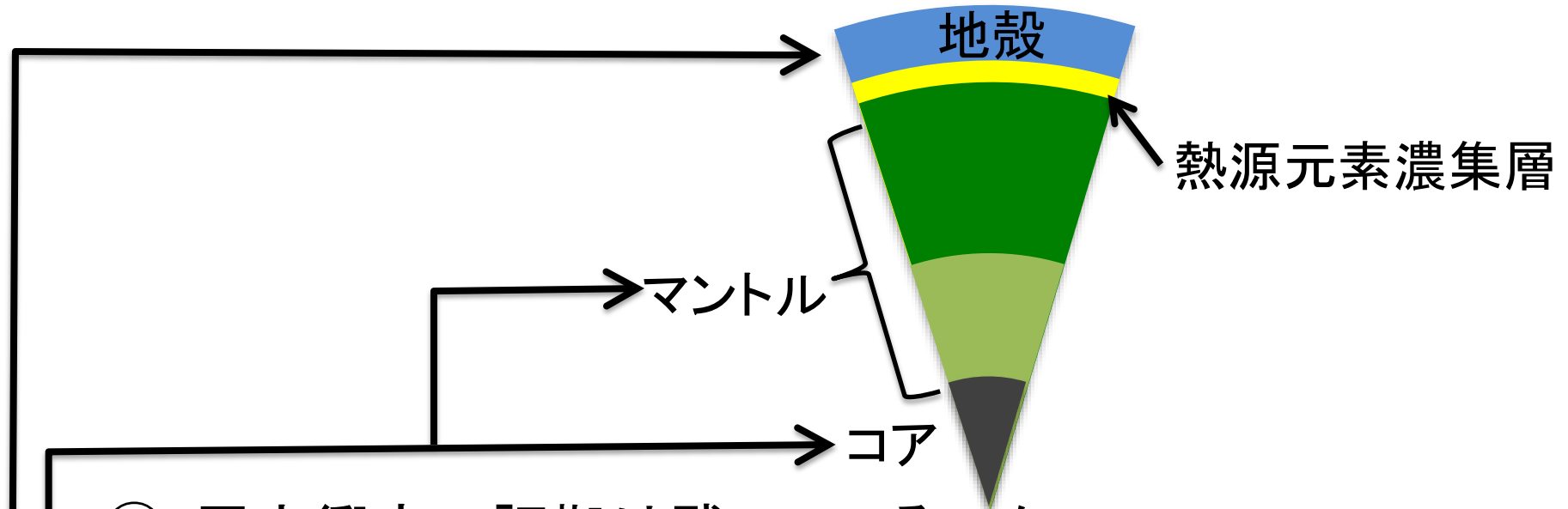


重要課題		課題へのアプローチ	選定着陸点	緯度	経度
1.「巨大衝突の産物」	①a巨大衝突の証拠は残っているのか？	コアの有無？	Apollo 14	3.6S	17.5W
	①b巨大衝突の条件・影響：月の化学組成は？	マントル組成/月全球組成	Mare Humorum	24.4S	38.6W
2.「小型惑星」(進化、分化)	②aマグマオーションの固化は一樣だったのか？	地殻組成	Tycho	43.4S	11.1W
			Zucchius	61.4S	50.3W
	②cマントル溶融と火成活動がいつ起こったのか？	溶岩流噴出年代と量	Copernicus	9.7N	20.1W



初期に提案された70カ所の着陸地点一覧

SELENE-2で選定された着陸候補点と探査目標



①a 巨大衝突の証拠は残っているのか？

– 月震波測定によるコアサイズ、地殻厚: Ap14site

①b 巨大衝突の影響: 月の化学組成は？

– 測距手法によるマントル組成: Mare Humorum

②a マグマオーシャンの固化は一樣だったのか？

– 初期地殻観測: Tycho, Zuccius, (Copernicus)

②c マントル溶融と火成活動がいつ起こったのか？

– 熱源元素濃集層の厚さ観測: Copernicus

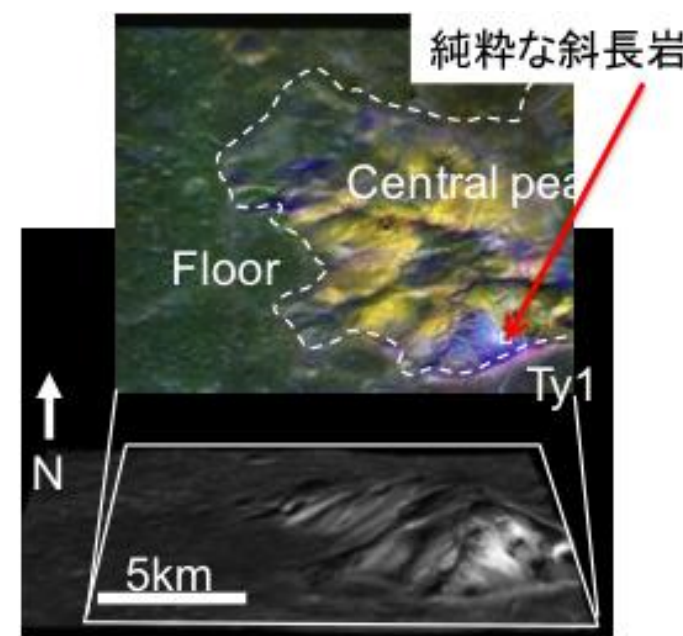
SELENE-2着陸点と探査目標：例1 Tycho

＜探査目標＞②aマグマオーシャンの固化は一様だったのか？

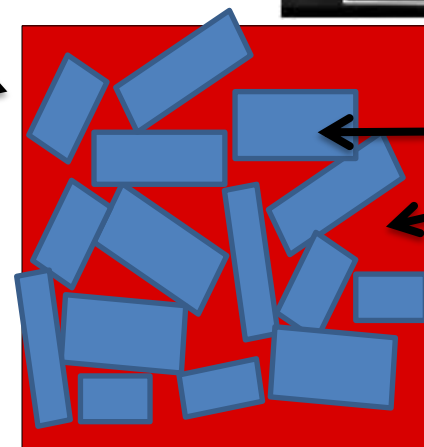
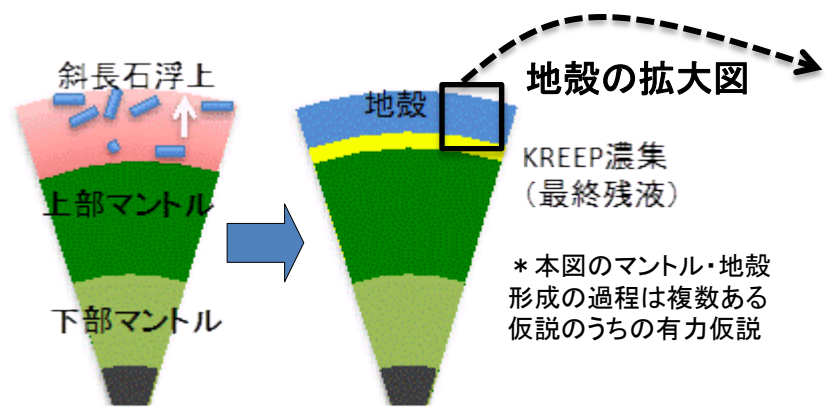
- ・これまでに初期地殻の岩体規模での観察は行われていない
- ・純粋な斜長岩の成因を含めてマグマオーシャンの固化過程を理解するために**典型的な月初期地殻**を観測する
- ・初期地殻が露出するクレータ中央丘近傍に着陸し地殻岩石表面の研磨と**顕微観測** (mmサイズ)により**斜長岩と他鉱物量比や化学組成、結晶サイズ・配置・形状等**を観測

→これにより

- ・地殻形成時の斜長石浮上・集積過程推定
- ・典型地殻・マグマの組成把握



Tychoの中央丘



斜長石
斜長石の隙間にトラップされたマグマから他の鉱物が10-20%程度形成するため、純粋になることは不可能。

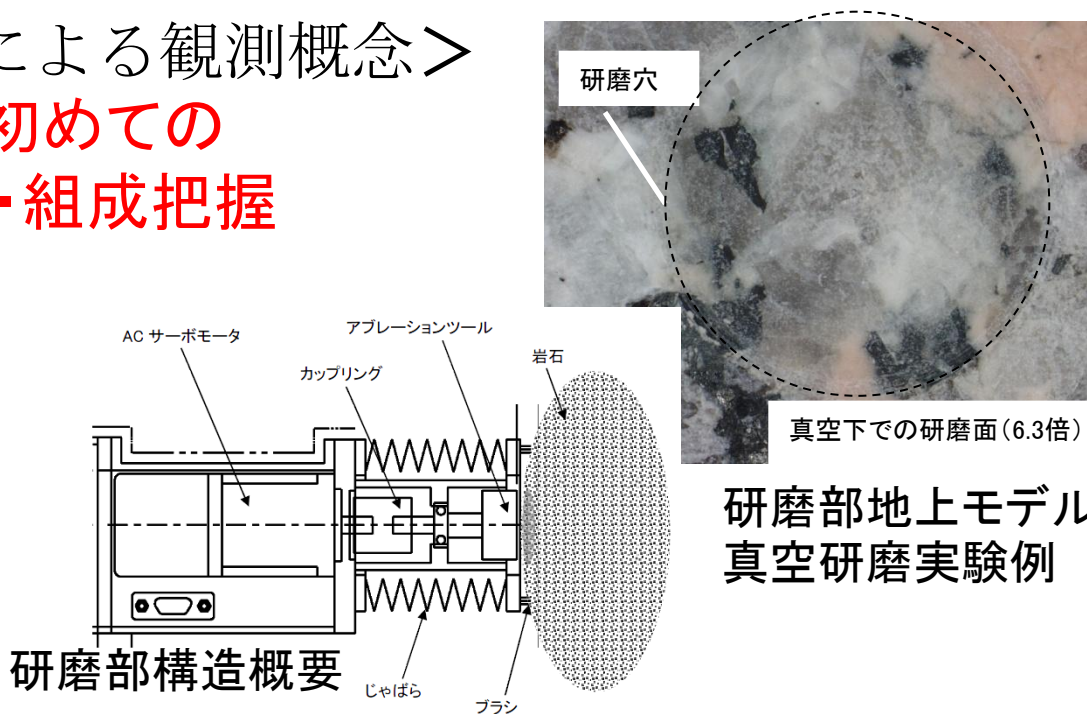
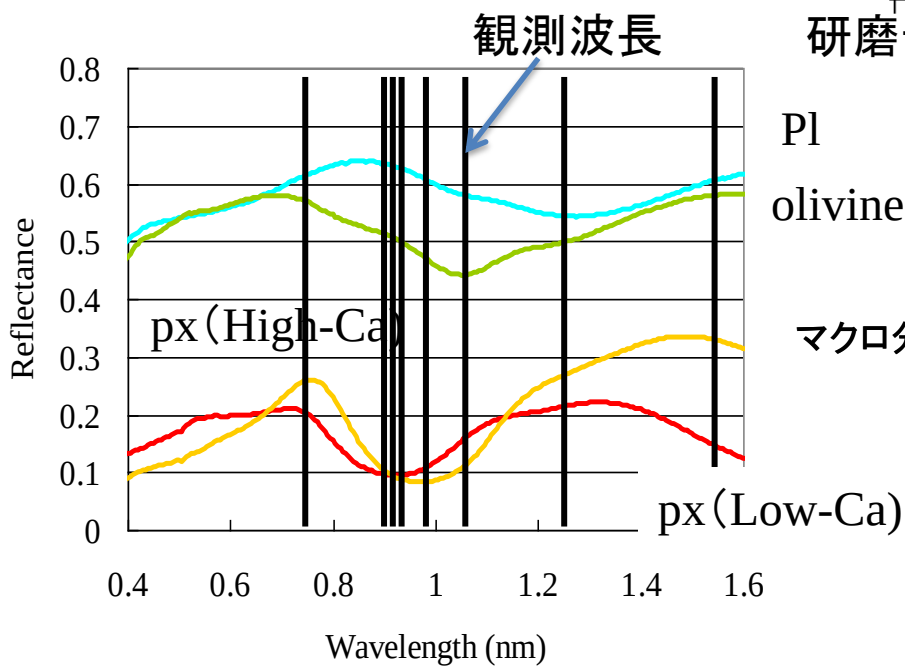
SELENE-2着陸点と探査目標: 例1 Tycho

< 岩石研磨と顕微分光カメラによる観測概念 >

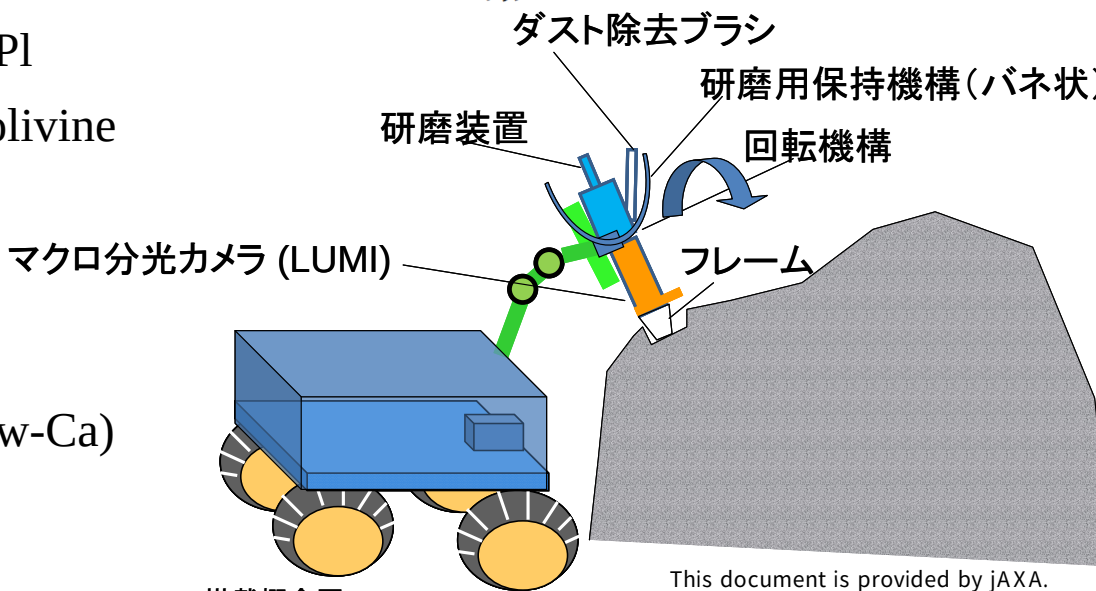
・ **研磨と顕微分光観測により初めての
典型初期地殻の岩体の組織・組成把握**

【主要観測機器仕様】

- 観測波長: 750 – 1700 nm (8 bands)
- 検出器: 非冷却(visible) InGaAs
- 空間分解能: 20 μm / pixel
- 観測視野: 10 mm ϕ
- 研磨面荒さ: $< \pm 100 \mu\text{m}$



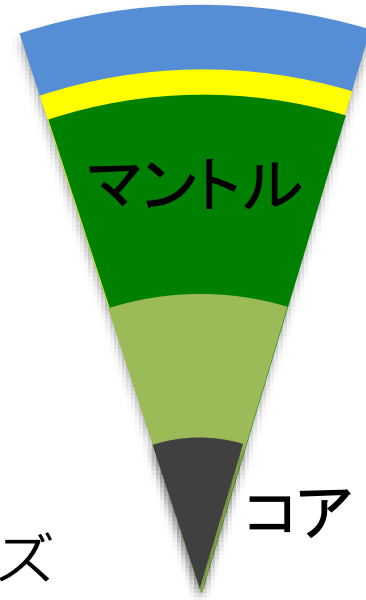
研磨部地上モデル
真空研磨実験例



SELENE-2着陸点と探査目標：例2 Ap14 site

＜探査目標＞①a巨大衝突の証拠は残っているのか？

- ・重要な**月コアサイズ**や**地殻の絶対厚**はこれまでに確かな値が得られていない
- ・Ap14着陸点に着陸し**月震波測定**によってコアサイズを求め、また同地点での地殻厚を求めこれを基準として既存の相対的な地殻厚データから地殻厚絶対値を決定する。
- ・Ap14着陸点に着陸する事でアポロで得られている震源位置情報や波形を利用できるため1地点着陸であってもコアサイズや地殻厚の決定が可能



観測項目：

- レーシーバー関数法による地殻厚さの推定
- 長周期実体波波形による内部不連続面の検出
- 深発月震の発生機構の解明
- 未観測領域の月震活動のモニター
- 地盤構造の調査と環境モニター

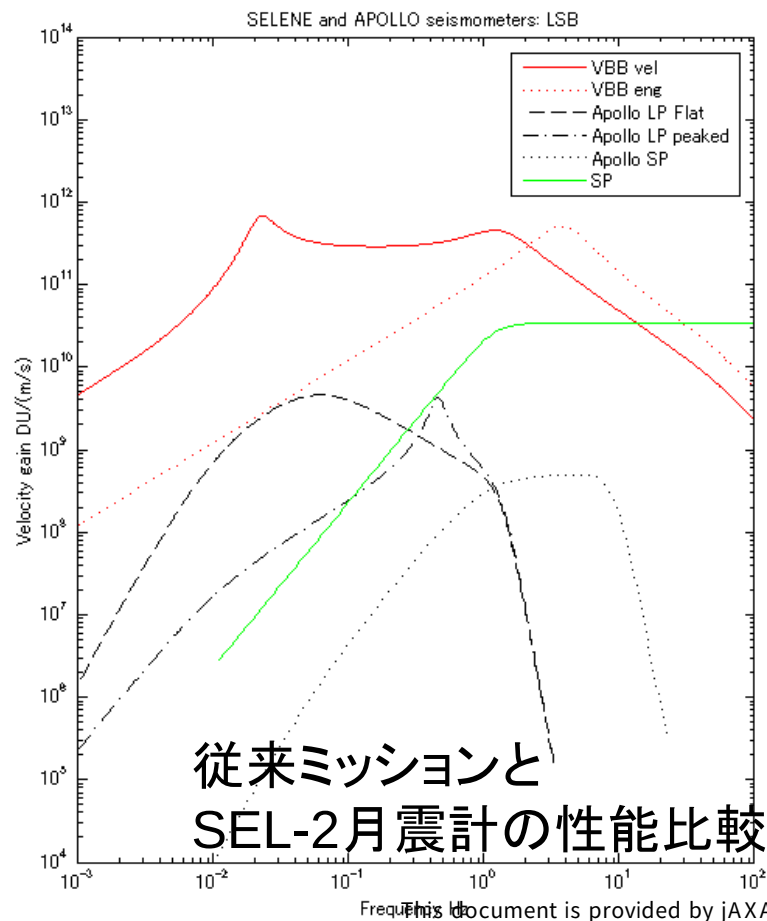
SELENE-2着陸点と探査目標: 例2 Ap14 site

＜月震計の観測概念＞

【機器仕様】

- ・観測帯域 0.02～50 Hz
- ・感度 長周期計: 3×10^{-11} m/s @ 0.1 Hz
短周期計: 3×10^{-10} m/s @ 1 Hz
- ・水平動(直交2成分)と上下動の計測
- ・ダイナミックレンジ24 bit
- ・サンプリングレート100 sps

従来に比べ**低周波・高周波帯での感度が格段に向上**→**コアサイズ・地殻厚精度が格段に向上**



有線で電源供給、デジタルI/Fで送受信

MBMは着陸機付近に降ろしてMLIを展開
(電源・データ処理・通信系を搭載) ㊦

LBBSのMLIを展開
(SP、VBB、計測回路、
レベルリング装置を搭載) ㊦

ローバーでTBDm
離れたところに運ぶ ㊦

MBM, LBBSは着陸機から
ロボットアームで月面に降ろす
(互いに日陰が重ならない程度の配置)

?

小型モジュール(SPのみ、
7～8kg)のMLIを展開 ㊦

(1) 着陸技術

誘導制御アルゴリズム

着陸準備軌道 100 × 15km

①レーザ高度計

②推力可変エンジン

③地形照合航法

①着陸レーダ

④障害物検知・回避

⑤着陸脚

•動力降下

周回速度(約1.7km/s)をゼロまで減速しながら着陸点上空約3.5km まで降下

•垂直降下(3.5km～)

月の重力加速度を減じながら垂直に降下

•障害物回避(500-100m)

障害物検知結果に基づき着陸選定地点上空まで移動

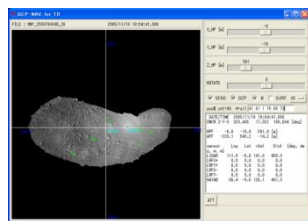
•最終降下(3m～)

エンジンを停止し自由落下により着地

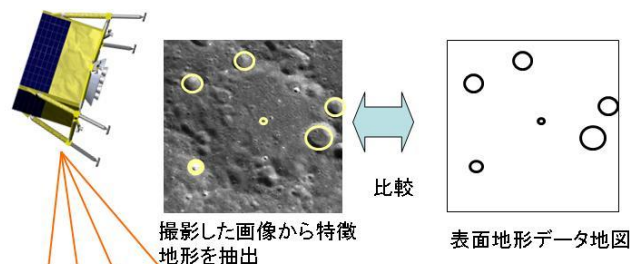
着陸技術は、米国、ロシア、中国が既に成功させている基盤技術。世界で何番目であっても、必ず習得すべき必修科目。

100m精度の高精度ピンポイント着陸技術は、世界的にも未実施の、質的に異なる先端技術。(小惑星については「はやぶさ」が唯一実現) 今後の高度な探査を実施するためには必須の技術。

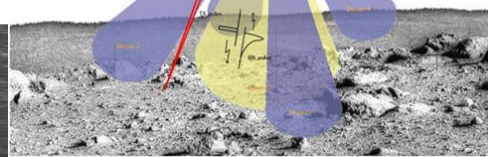
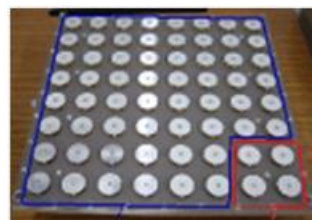
安全確実に、かつ目指した場所に着陸するためには、障害物を回避する機能も必要。



「はやぶさ」では地上ベースの地形照合航法システムを用いて小惑星イトカワに10m程度の精度で着陸させることに成功した。



着陸レーダ



着陸脚



(2) 探査ロボット技術

表面移動技術は、天体表面の詳細探査には必須のツール。米国、ロシア、中国が実証している。(欧州も開発段階にある)

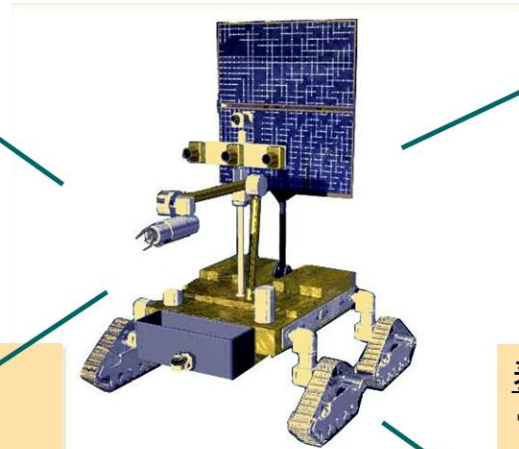
レゴリス地形での斜面走行や段差乗り越えは難しい技術。特に小型の探査ローバで科学的興味の高い地域を探査するためには技術開発が必要。
SELENE-2では、20deg程度の斜面まで走破することを目指。

作業技術

- ・把持、研削
- ・計測
- ・接続、組立

耐環境性

- ・日陰、低温
- ・電源供給
- ・レゴリス防塵

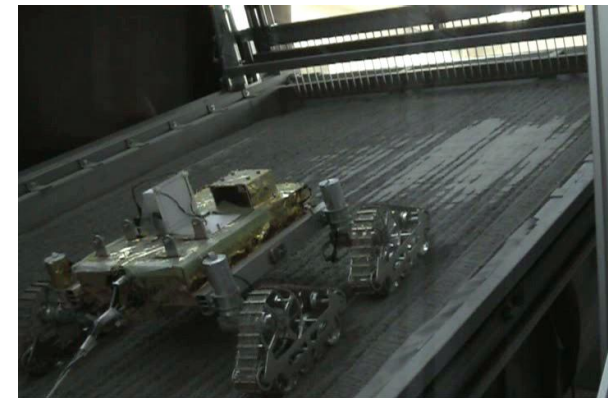


操作・制御系

- ・部分自律系
- ・LRF地形計測
- ・マッピング・経路生成

表面移動技術

- ・レゴリス上走行
- ・不整地走行、登坂
- ・リリース、収納

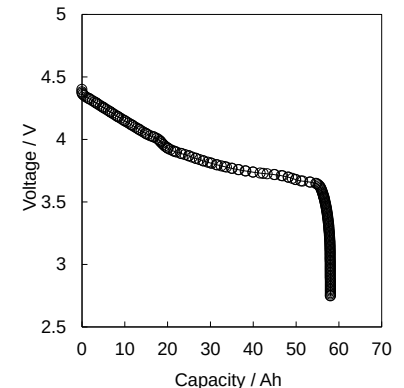
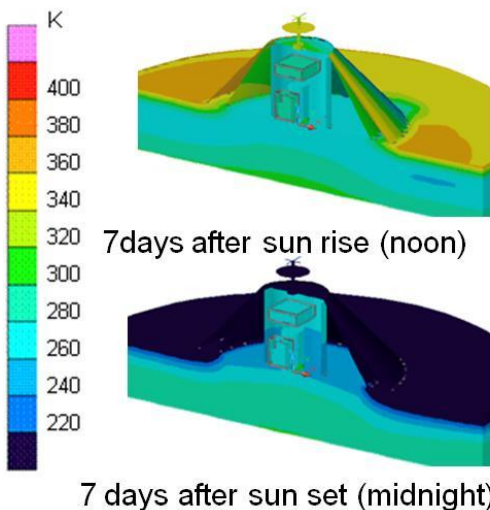


(3)越夜技術

月面上での2週間の夜を越す「越夜」は、長期観測を行うためには必須技術

米国、ロシア、中国は、原子力エネルギーによる越夜を行っている。しかし、その取り扱いには注意が必要であることから、コスト上昇要因になっている。SELENE-2では、熱設計の工夫により、世界初の太陽電池とリチウムイオン電池による越夜を行う。

- 小型観測機器の越夜
 - 高度な熱制御技術の研究開発により、小型の観測機器であれば10W程度の電力で、越夜可能との見通し。
 - 優れた日本の電池技術(200Wh/kg級リチウムイオン電池)を活かす。
 - 実現するためには、観測機器、通信機器の低消費電力化が鍵となる。



JAXAの考える月探査プログラム案

07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			25			30
H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32			H37			H42

▲「かぐや(SELENE)」

SELENE-2

SELENE-X

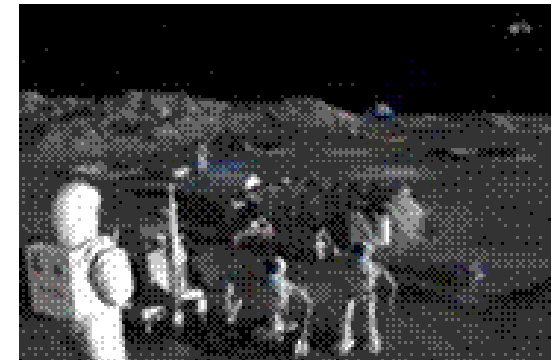
月探査計画



有人技術

ISS、HTVの運用・利用等を通じて、
有人基盤技術を獲得・発展

国際月面拠点プログラムへ参加し、
日本人が月面へ到達する。



Global Exploration Roadmap Ver.2 (2013年8月策定)

Global Exploration Roadmap



2013

2020

2030

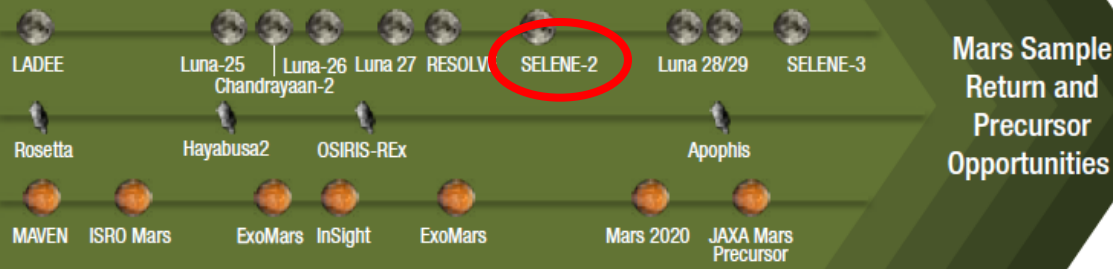
International Space Station

General Research and Exploration
Preparatory Activities

Note: ISS partner agencies have agreed to use the ISS until at least 2020.

Commercial or Government Low-Earth Orbit Platforms and Missions

Robotic Missions to Discover and Prepare



Human Missions Beyond Low-Earth Orbit

Explore Near-Earth Asteroid

Extended Duration Crew
Missions

Humans to
Lunar Surface

Missions to
Deep Space and
Mars System

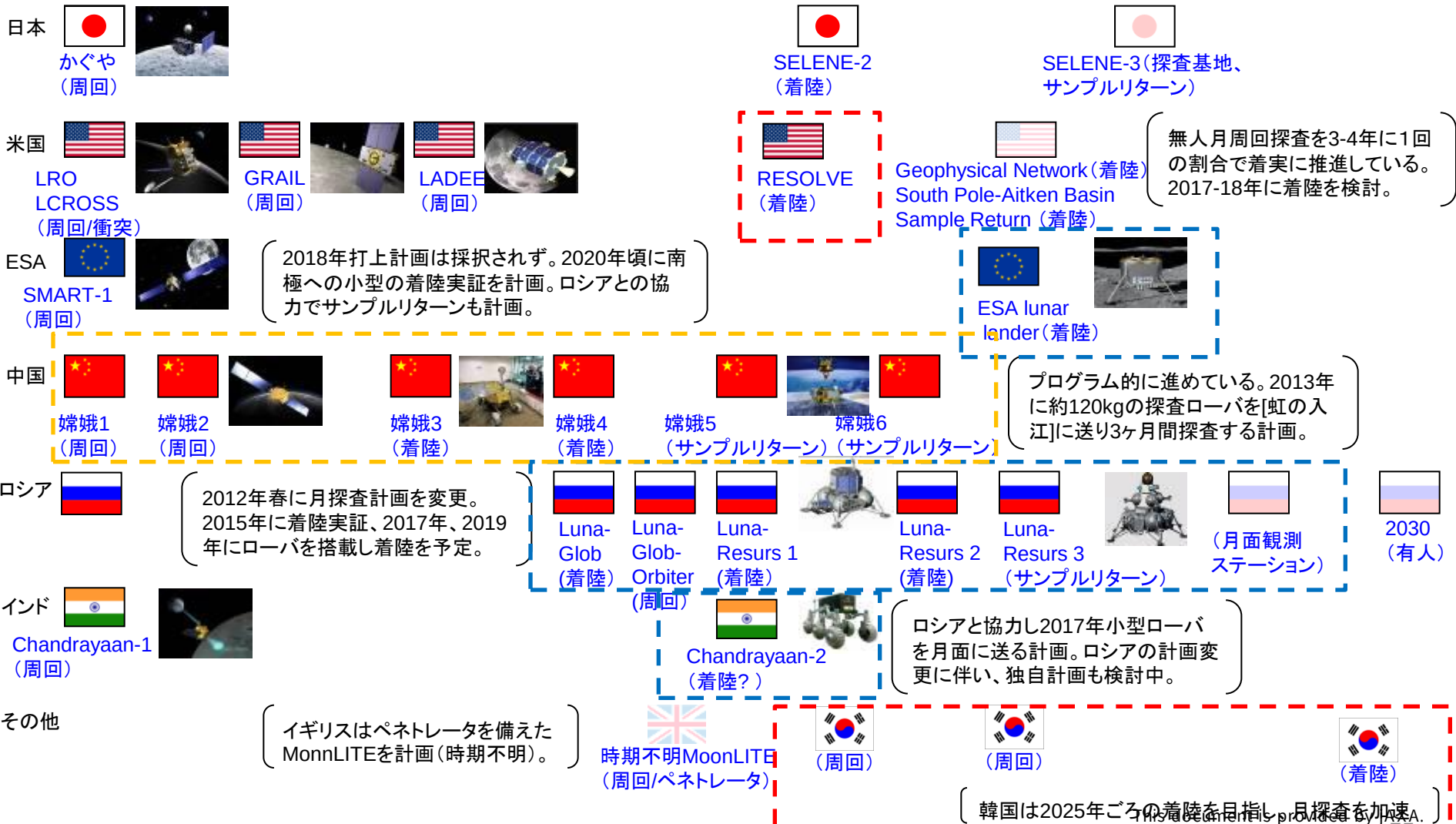
Sustainable
Human Missions
to Mars Surface

SELENE-2検討経緯

- SELENE-2計画は、天体表面探査技術(着陸技術、表面移動技術、越夜技術)の開発・実証と、月の科学(月～地球系の起源と進化)、月面環境調査(特に将来の有人月面探査に必要なデータ)を目的としている。
- そのため、JSPECより提案し、2007年6月にMDR/プロジェクト準備審査を行い、プリプロジェクト活動を開始した。
- その後、2007年9月の理・工学委員会でミッションの説明を行い、同年秋のSAC計画部会月探査WGにおいて方向性が承認された。
- 2009年8月～2010年7月には、宇宙開発戦略本部の下に「月探査に関する懇談会」が設置され、議論が行われた。その報告書では、2015年にSELENE-2に相当する着陸探査、2020年には極域探査を実施すべきとされたが、「国際協力による効率的な実施の検討や、予算等の状況に応じ、実施時期などについての柔軟な対応が望まれる」と付記された。
- 月探査懇談会の結果を受けてミッション内容を微改訂し、2010年10月にΔMDRを実施した。しかしながら、以降、予算状況が厳しく、Phase-B移行の目途が立っていない状況である。
- 現在、国際協力での早期実現を目指して、外国宇宙機関と技術的な検討を実施している。この場合、極域探査が有力である。

各国の月探査計画一覧(2013年12月現在)

~2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025~
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------



ミッション変更の可能性

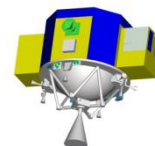
SELENE-2



SELENE-R
(国際協力案)



SLIM
(小型科学衛星)



技術
実証
(工学)

着陸技術
ピンポイント着陸

表面移動技術

越夜技術

着陸技術
ピンポイント着陸

表面移動技術
(国際協力)

着陸技術
ピンポイント着陸

小型軽量技術

月の
科学
(理学)

月内部構造探査

表面地質探査

揮発性物質探査

縦穴の探査

有人
プリカーサ
(国際)

月面環境調査

観測機器国際協力

月面環境調査

システムレベル
国際協力

縦穴は有人基地
の候補？

まとめ

- 月探査においては、国際的プレゼンスの観点でも、早期の着陸探査の実施が重要と考えている。
- SELENE-2計画のミッション目的はどれも重要であり、必ず実施すべきと考えるが、早期の月着陸探査実現の観点からは、ミッションを変更することも視野に入れて、国際協力での実現可能性等の検討を実施している。
- 科学の優先順位を尊重しつつ、実施の順番については、現実的な状況を見据えつつ考えていきたい。
- 皆様の御理解、御支援をよろしくお願いします。

じゃあ、いつやるか？ 今でしょう

2020年までには月面から「おもてなし」

(註)「表無し」ということではありません。