

第22回「月惑星に社会を作るための勉強会」
月社会実現のための直近の準備と宇宙開発の裾野の拡大について

2022/6/27

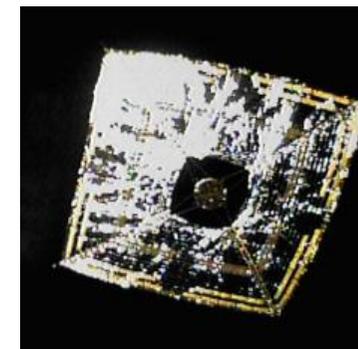
宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙科学研究所(ISAS)

学際科学研究系

佐伯 孝尚

自己紹介

- 名前: 佐伯 孝尚(さいき たかなお)
 - ◆ 所属: 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙科学研究所(ISAS)
 - ◆ 専門: 宇宙工学(軌道, 姿勢制御, 宇宙機システム)



IKAROS

- プロジェクト
 - ◆ ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」
 - システム, 姿勢制御系担当
 - ◆ イプシロンロケット
 - 誘導制御系担当
 - ◆ はやぶさ2
 - 開発フェーズ: 衝突装置開発責任者
 - プロジェクトエンジニア(探査機システム取りまとめ)
 - 探査機の工学側の取りまとめ
 - 運用計画立案の責任者



イプシロンロケット



はやぶさ2

- 現在
 - ◆ 次世代小天体サンプルリターン計画, 軌道間輸送機
 - ◆ 月面の科学

本講演の内容

■ 概要

月社会を実現するためには、早くから将来の形を考えるとともに、必要な技術を確実に獲得していく必要がある。2023年度には小型月着陸実証機SLIMの打ち上げが行われる予定であり、日本の月面活動が本格的に開始される。現在アルテミス計画で国際的に月探査が盛り上がりつつある中、月面の科学の実現と日本の月面探査技術の獲得双方を目指す活動がJAXA内で開始されようとしている。本講演ではこの活動の内容を紹介するとともに月開発を継続的に行うために不可欠な宇宙開発の裾野の拡大をどのように実現していくかの一案を示す。

■ 講演の流れ

- ◆ 自身の経験から
 - はやぶさ2ミッションの紹介
 - はやぶさ2から得られたこと
- ◆ 月探査・月の科学
 - 現在の活動の紹介
 - 継続的な月開発と宇宙開発の裾野の拡大について

はやぶさ2について

はやぶさ2とは

- 2010年に、小惑星「イトカワ」からのサンプルリターン(往復探査)を成功させた、小惑星探査機「はやぶさ」の後継機
 - ◆ 世界初のC型小惑星からのサンプルリターンを完遂
 - ◆ その他、人工クレータの生成等、新しいミッションを実施。



はやぶさ2ミッションの流れ

往復ミッション

打ち上げ
2014年12月3日



地球スイングバイ
2015年12月3日



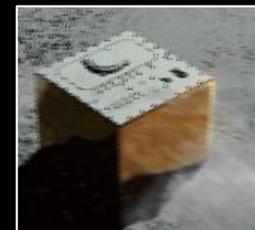
リュウグウ到着
2018年6月27日



MINERVA-II-1分離
2018年9月21日



MASCOT分離
2018年10月3日



52.4億km完走!!

リュウグウ出発
2019年11月13日



地球帰還
2020年12月6日

MINERVA-II-2
2019年10月2日



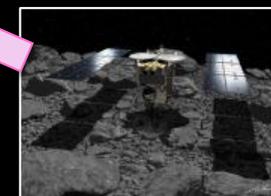
第2回タッチ
ダウン
2019年7月11日



衝突装置
2019年4月5日

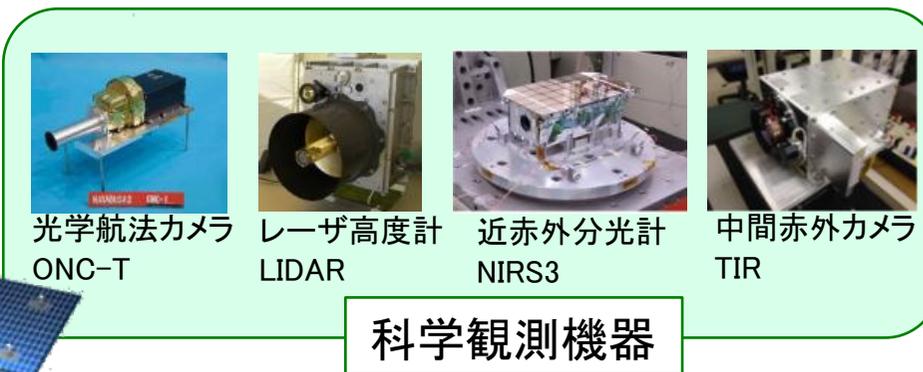
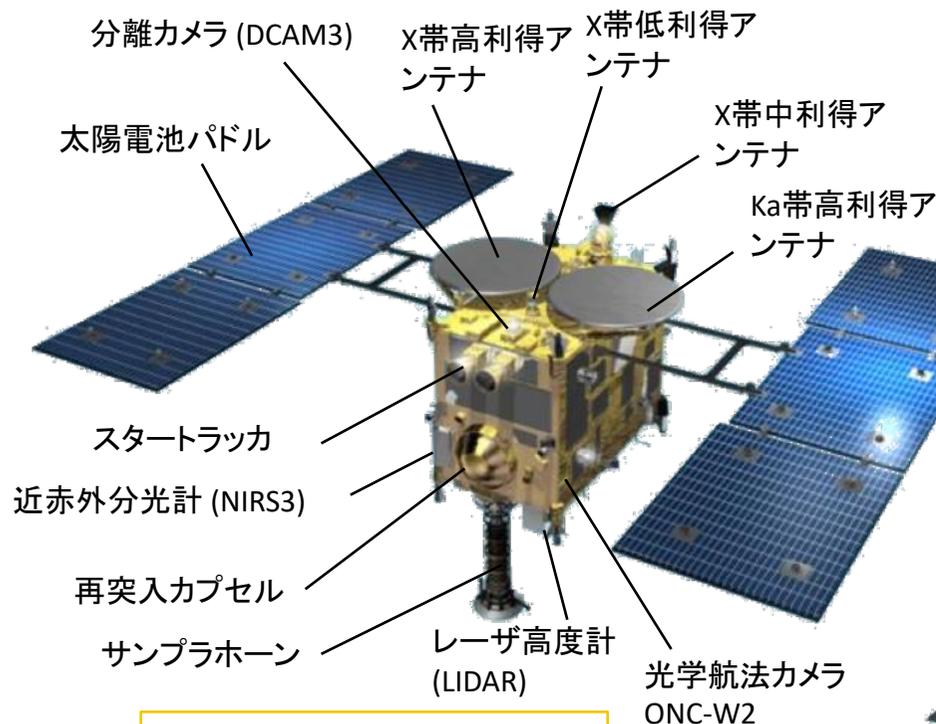


第1回タッチダウン
2019年2月22日



(画像クレジット：探査機を含むイラストは 池下章裕氏、他はJAXA)

探査機概要



小型着陸機・ローバ

MASCOT

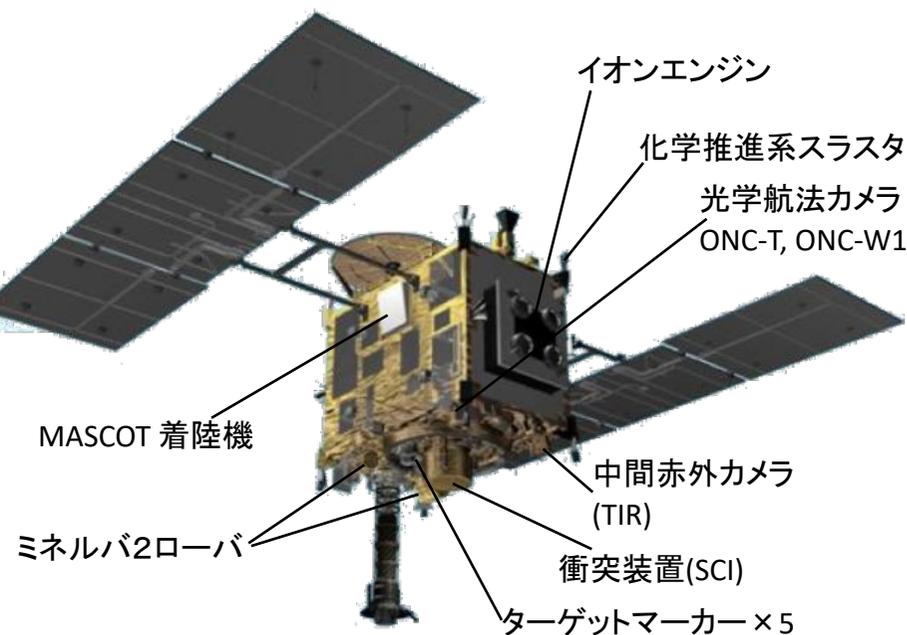


DLRとCNES製作

ミネルバ2



II-1 : JAXA MINERVA-II チームによる
II-2 : 東北大およびミネルバ2コンソーシアムによる



大きさ: 1m × 1.6m × 1.25m (本体)
太陽電池パドル展開幅6m
重さ : 609kg (燃料込み)



(© JAXA)

2014年8月31日 : JAXA相模原キャンパス

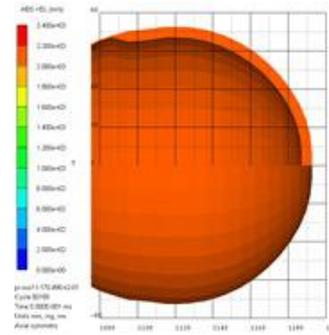
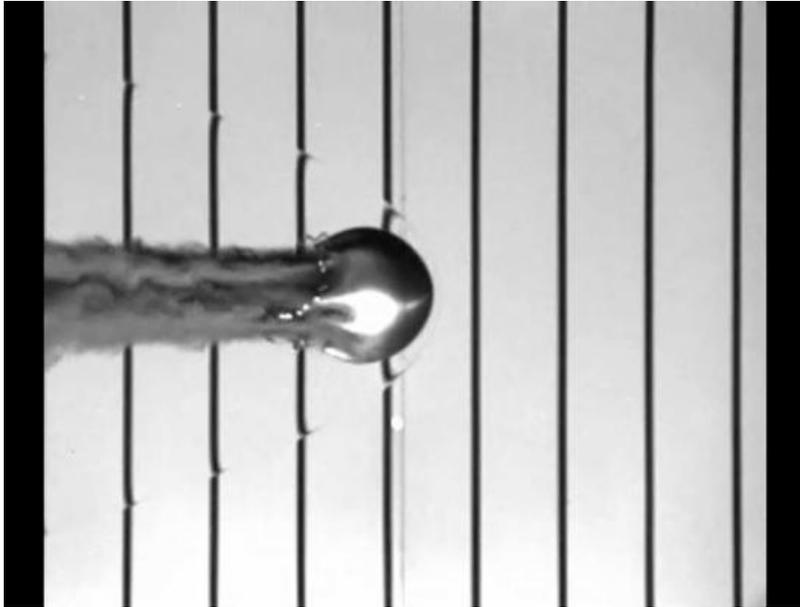
強烈な飛び道具

- 小惑星の「地下」の情報を取得したい
- 衝突装置(SCI: Small Carry-on Impactor) 小惑星にクレータをつくる機器
 - ◆ 爆薬を使用して衝突体を加速



強烈な飛び道具(2)

■ 地上試験における衝突体の様子と衝突の様子

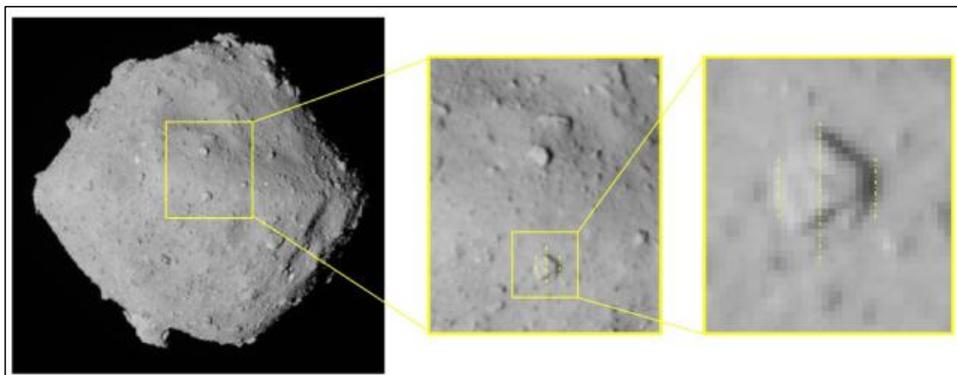
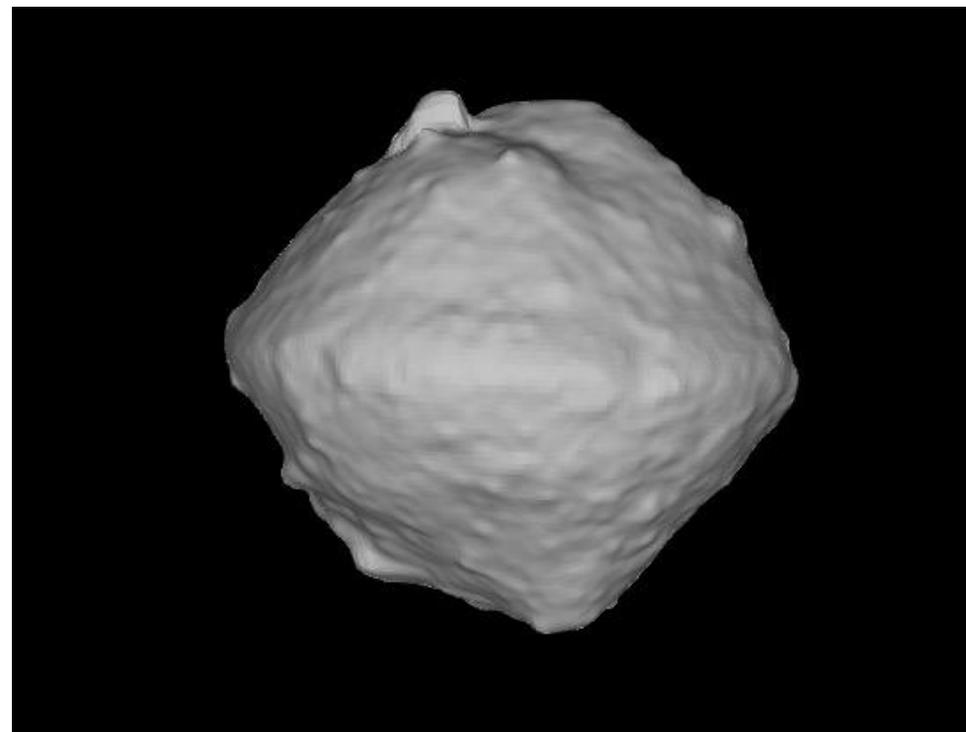
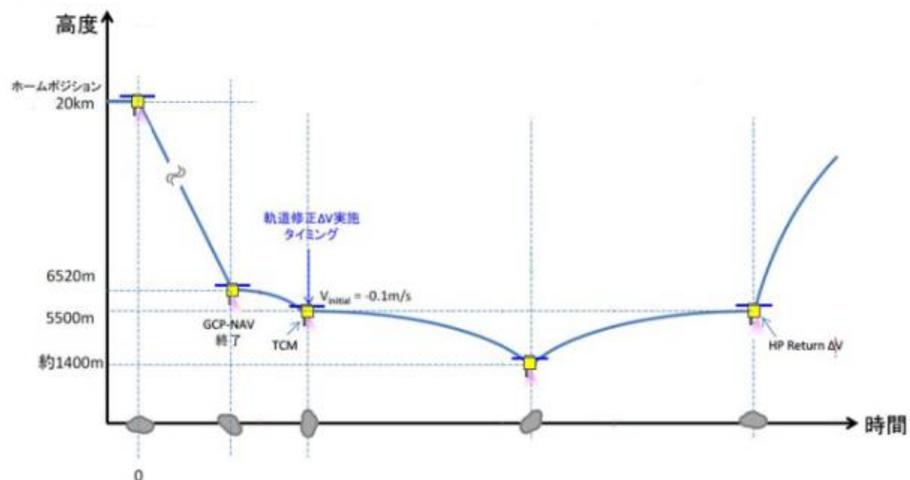




形状 : コマ型, 直径1km
重力 : 地球の8万分の1
自転軸 : 直立・逆行
反射率 : 2%
地表の状態 : クレーターと岩だらけ

リュウグウの観測

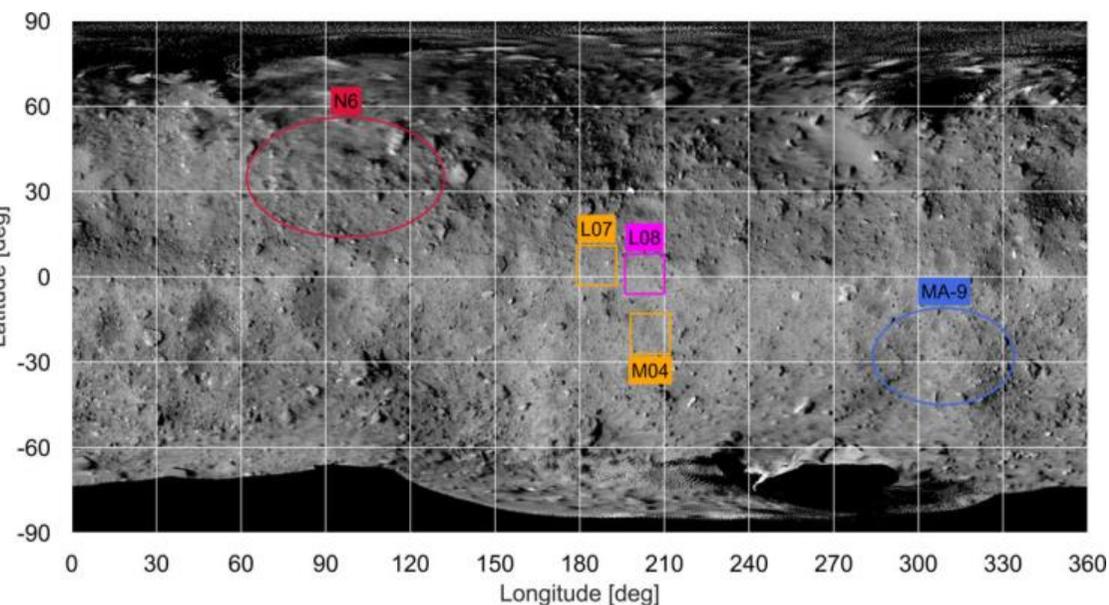
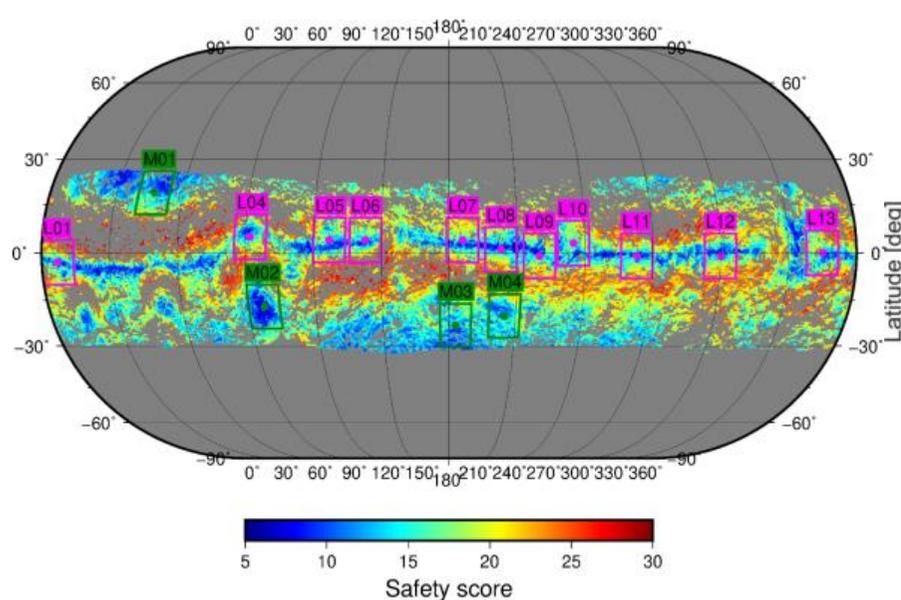
- 2018/6/27 リュウグウ到着直後からリモセンによりリュウグウについての情報を集める
 - ◆ 重力: 低高度で自由運動をさせて重力を求める.
 - ◆ 自転軸方向, 自転周期: 経度ゼロを決める. 画像から求める
 - ◆ 形状: 画像から形状モデルを作る



タッチダウン候補地点の決定

■ LSS (Landing Site Selection) 2018/8/17

- ◆ 高度5kmからの画像で小惑星のスコアマップを作成 -> ボルダーの量等で決定



決定された着地候補地点

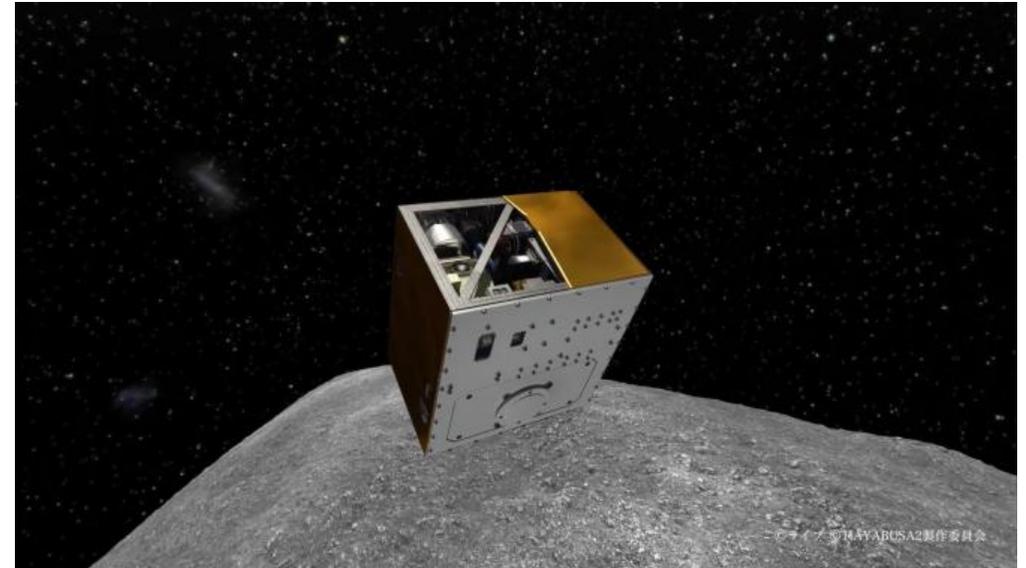
タッチダウン : L08 (バックアップ: L07、M04)
 MASCOT : MA-9
 MINERVA-II-1 : N6

小型着陸機分離

■ MINERVA-II, MASCOT



MINERVA-II-1分離 (2018/9/21)

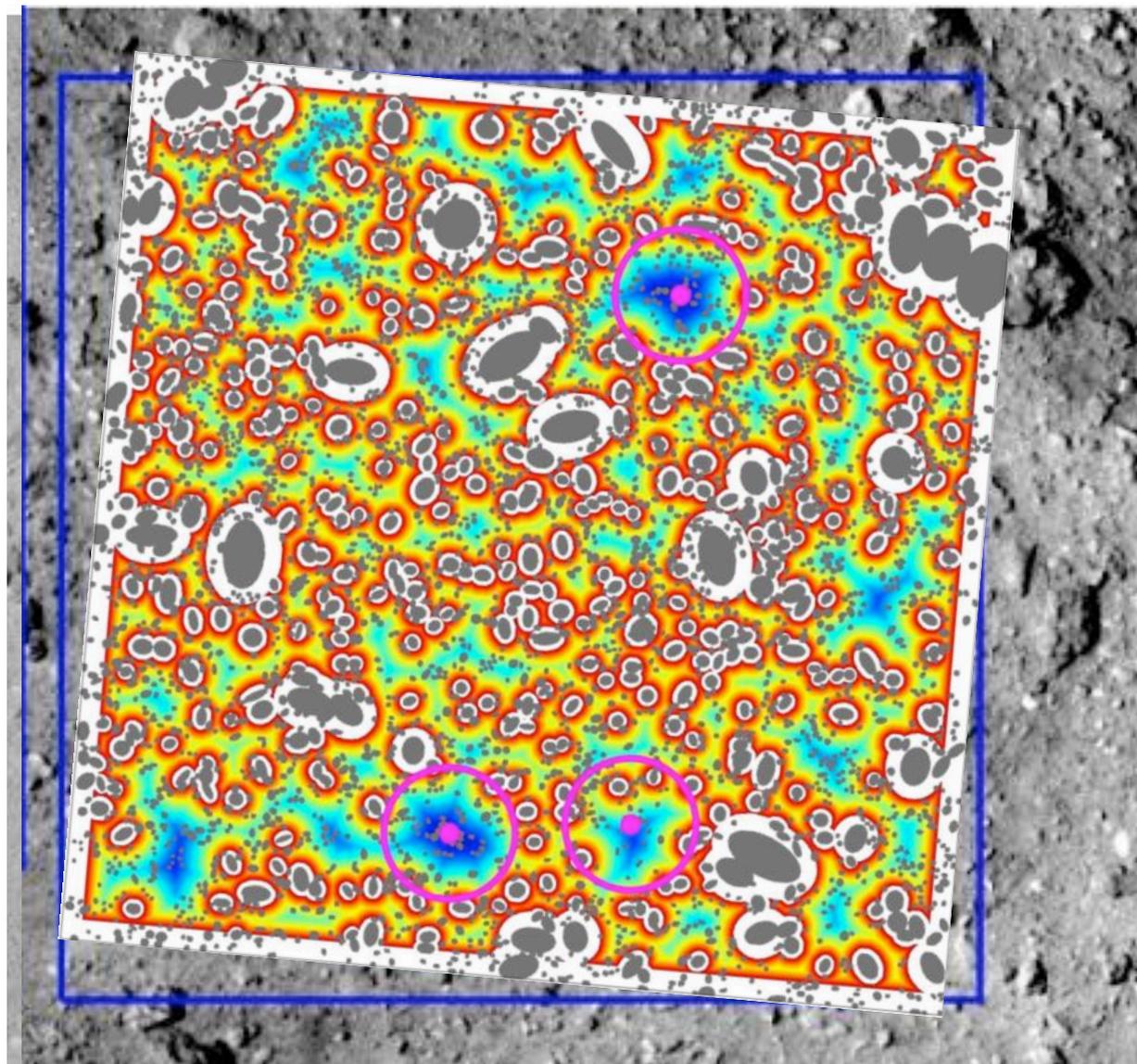
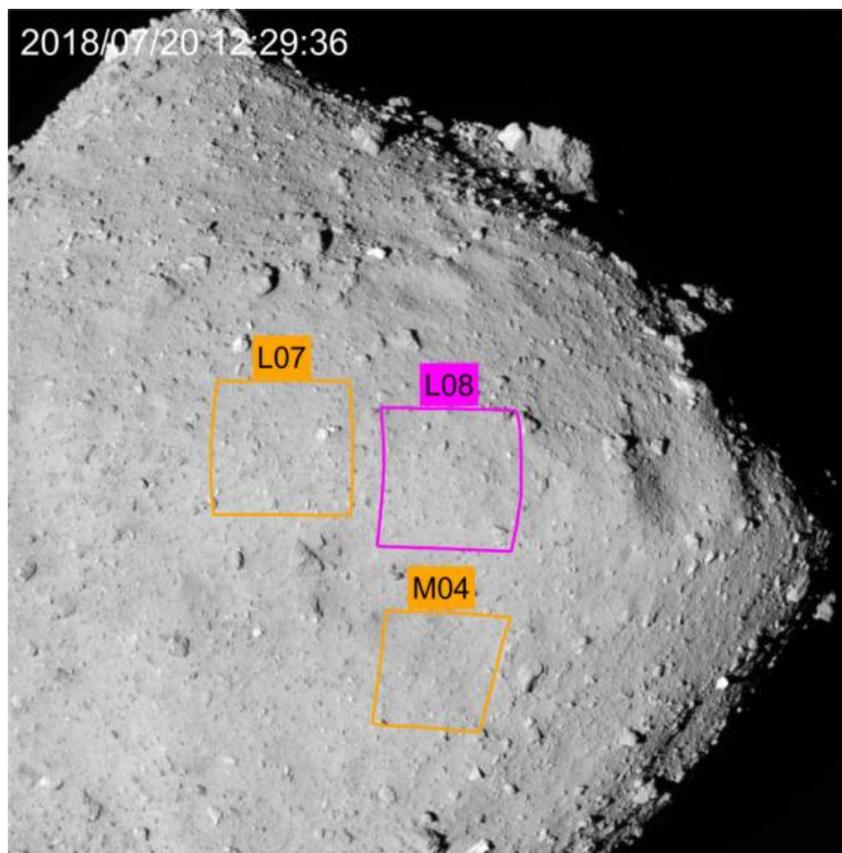


MASCOT分離 (2018/10/3)



着陸する場所がない

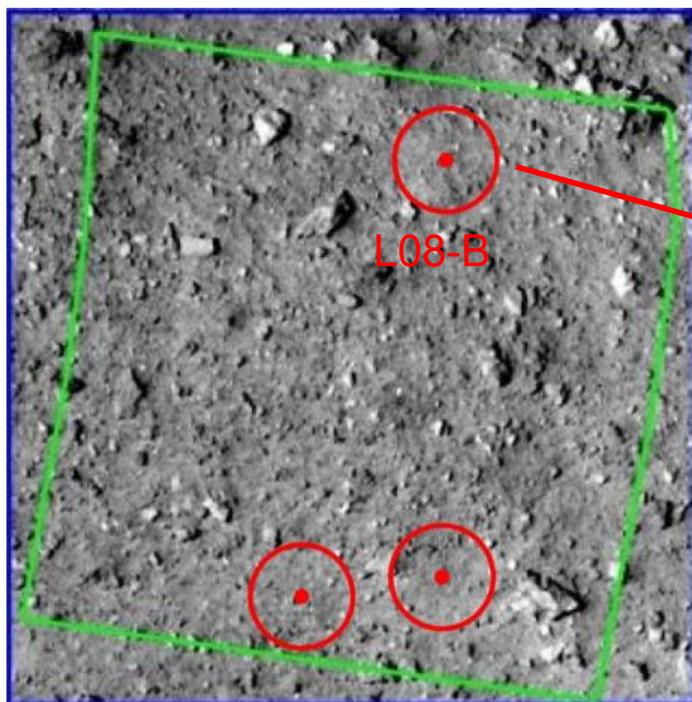
- L08エリアを選定
 - ◆ 選んだものの...



2018年のタッチダウン断念

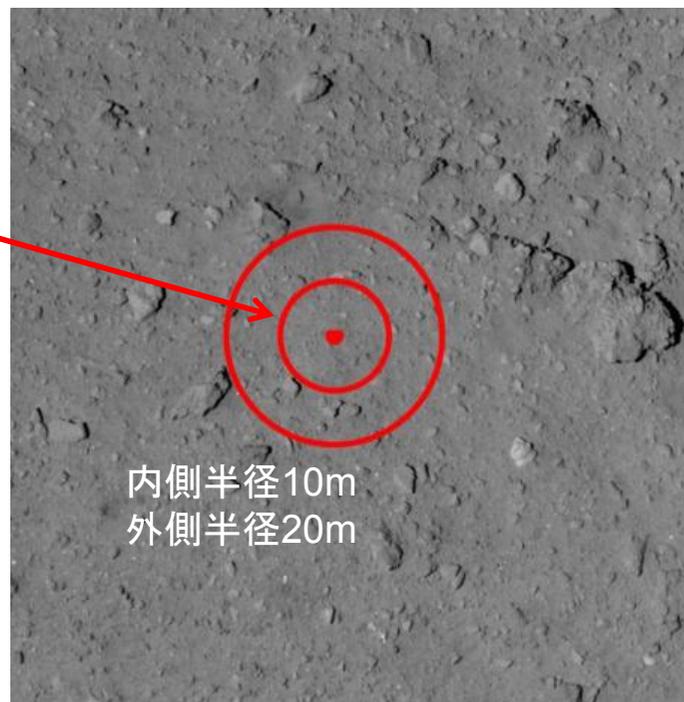
- 低高度画像から、タッチダウン候補地点のさらなる絞り込みを行ったが、危険なボルダーが多いため、タッチダウンを断念し、L08B領域にTMをリリースするリハーサルへの切り替えを行った。
- 元々タッチダウンの精度は半径50m程度と考えていた
 - ◆ 半径10mの安全領域もあやしい状況

TD1-R1画像



分解能: 30cm/pix

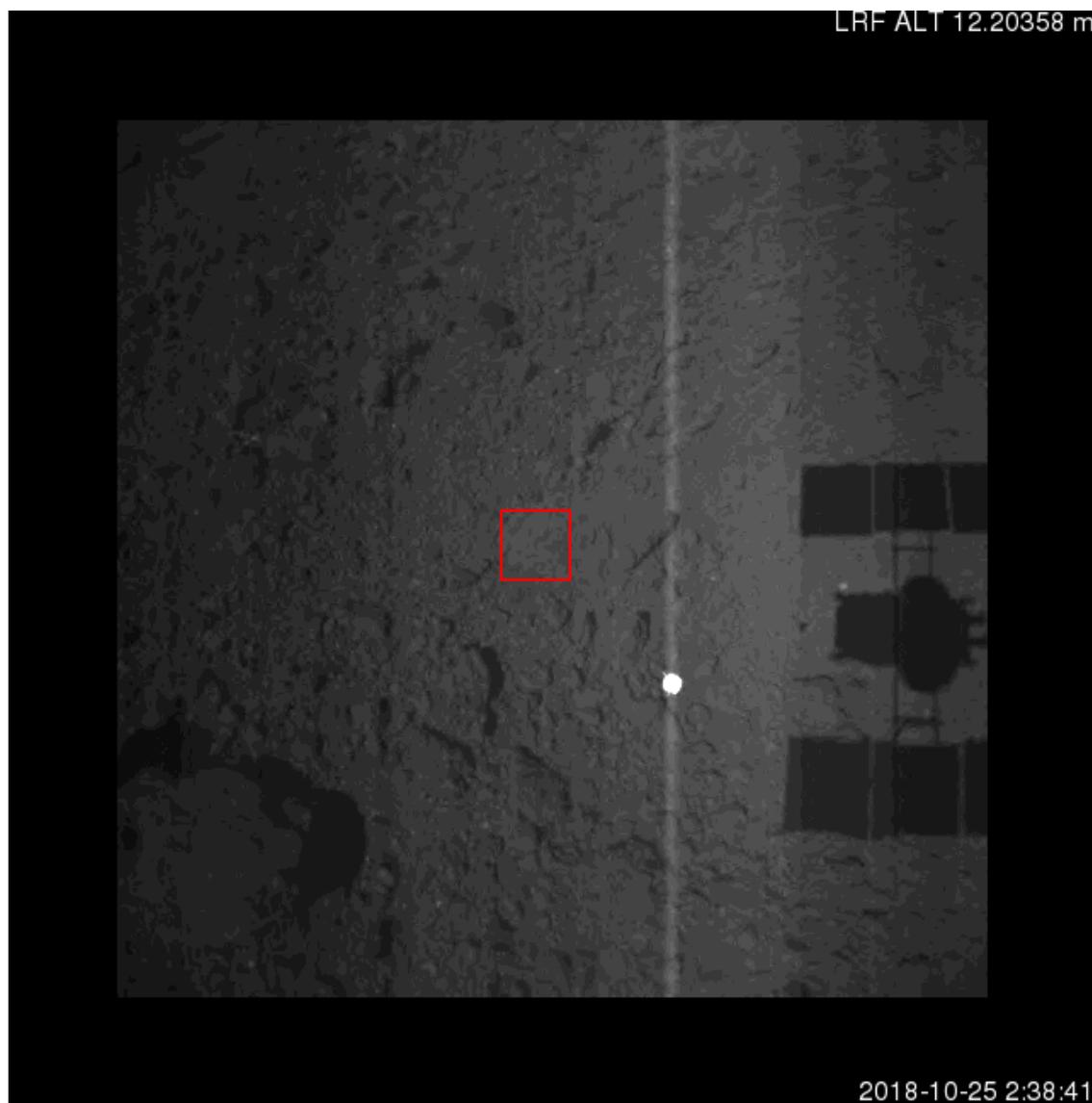
MASCOT運用画像



分解能: 18cm/pix

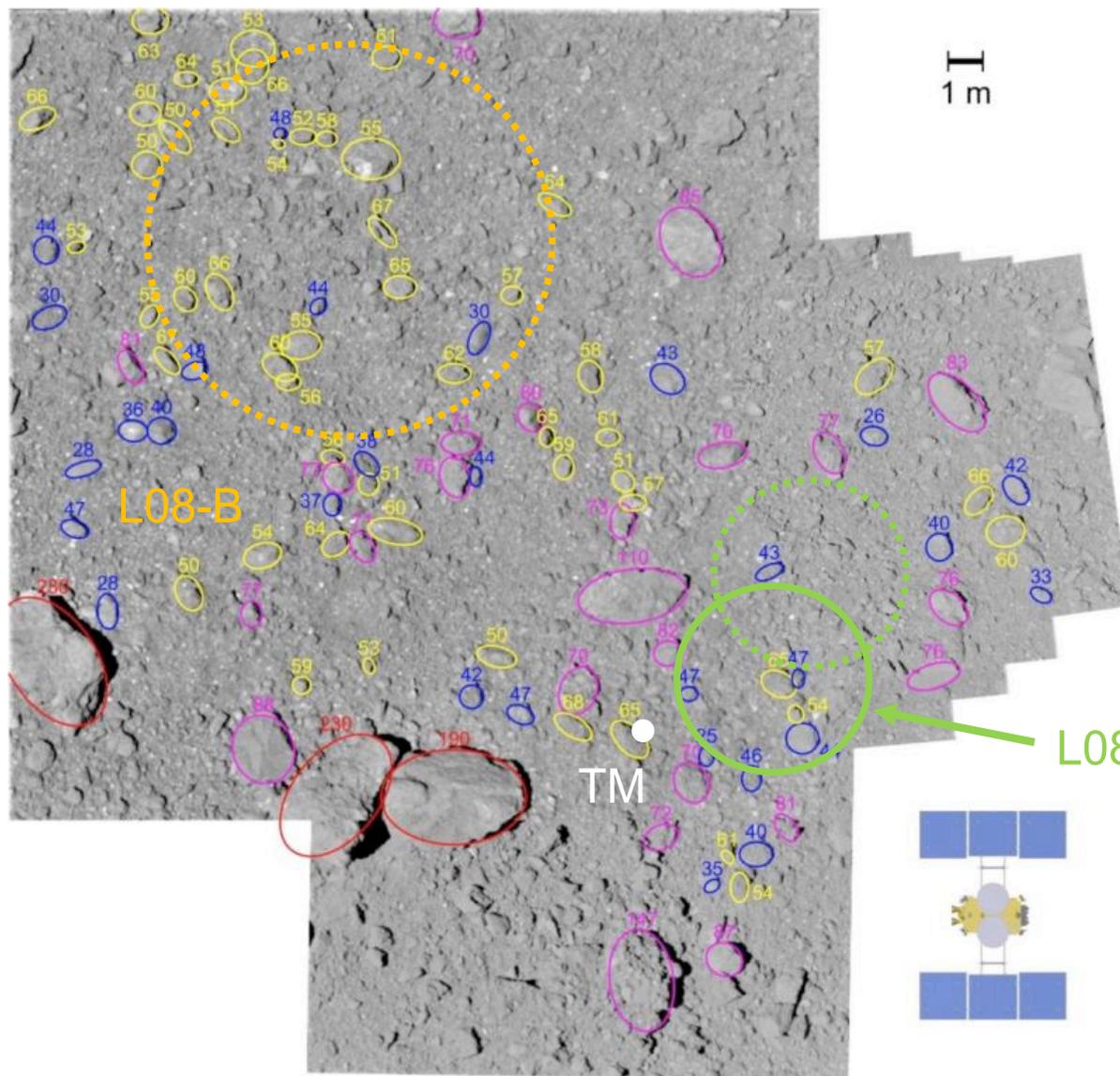
L08Bへのターゲットマーカの分離

- 2018/10/25: 無事TMを分離. 追尾制御も確認できた.

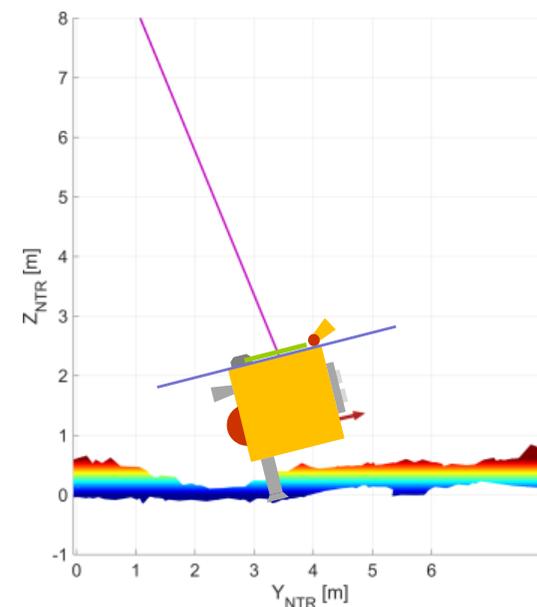


ターゲットマーカの周辺

- ターゲットマーカから近くて広い?場所を改めて探す(70cm以上の高さの岩は危険)



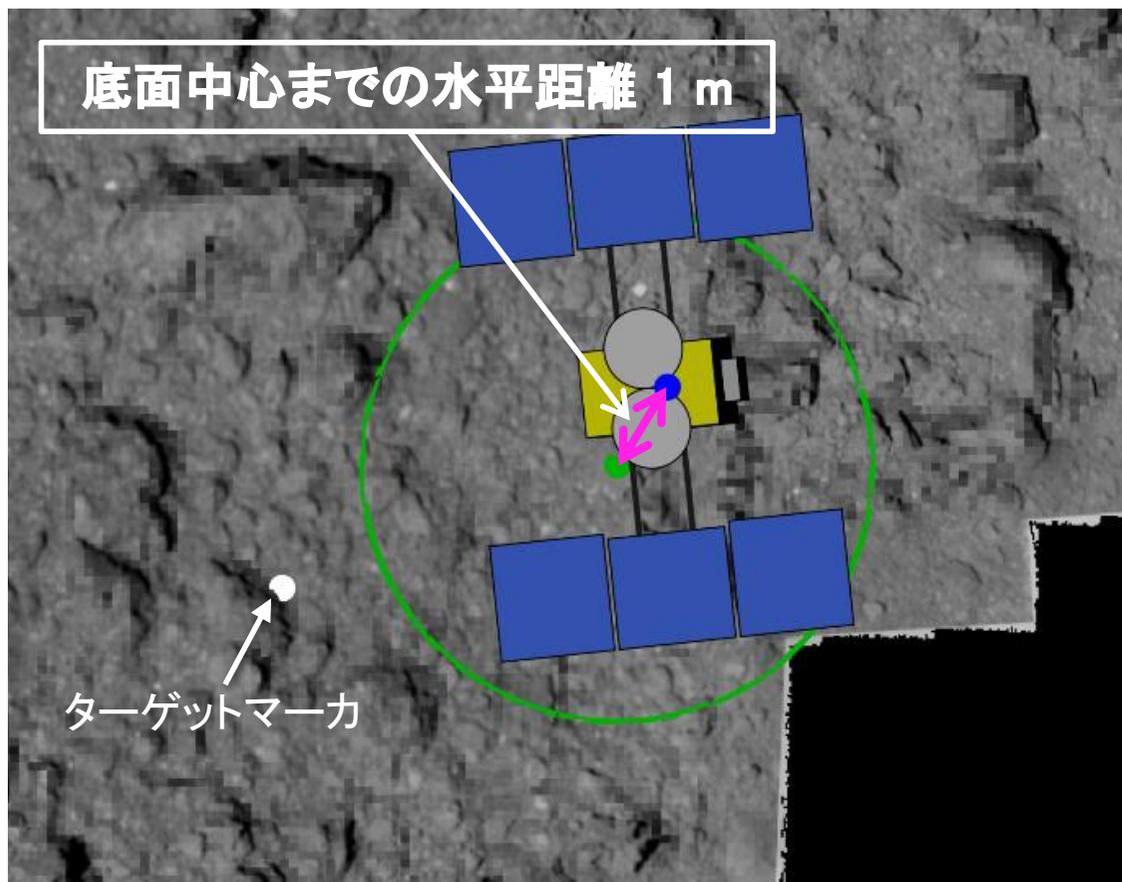
“ヒップアップ姿勢”



L08-E1(半径2.8m)

1度目のタッチダウン成功

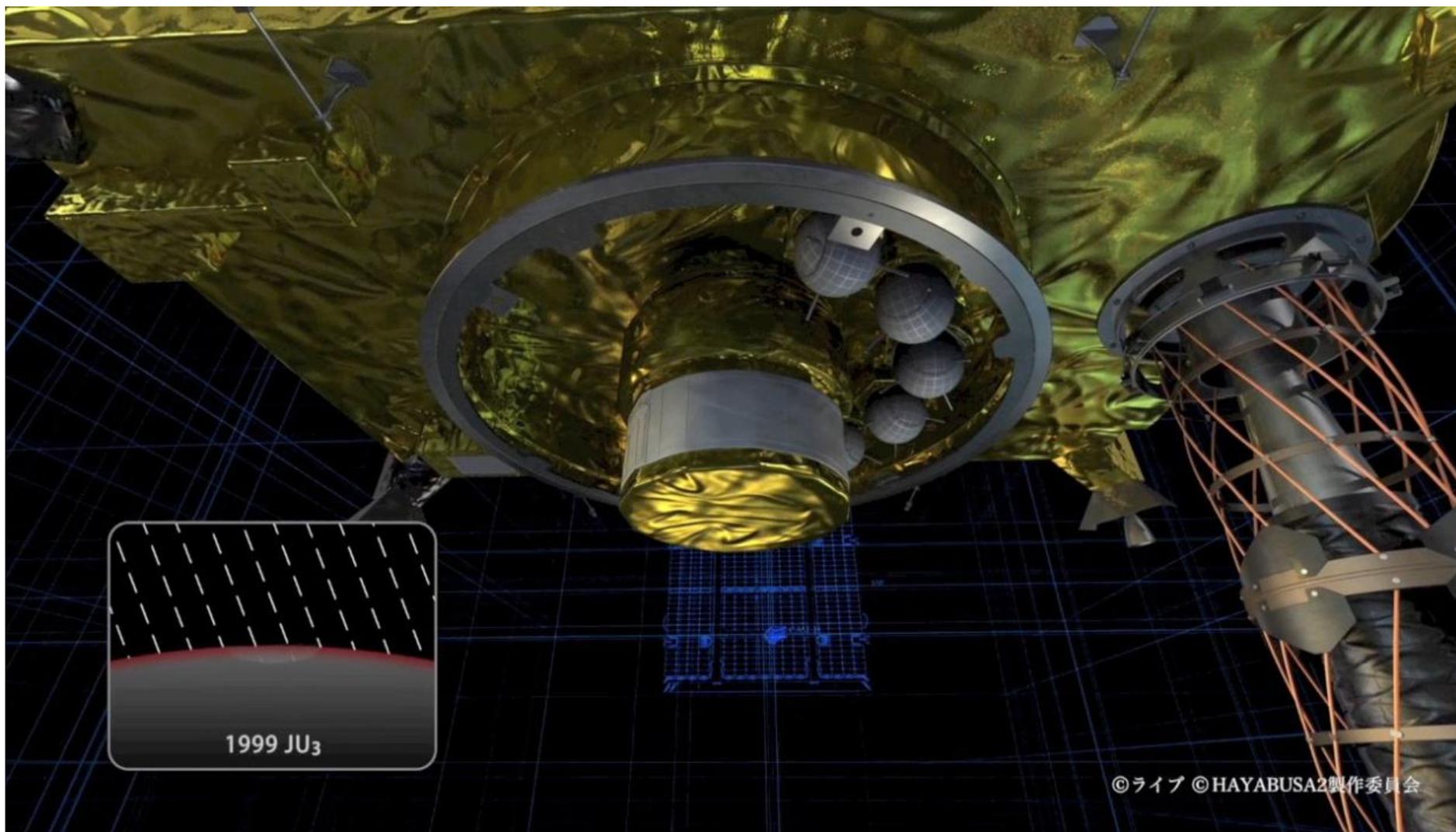
- 2019/2/22 1回目のタッチダウン
 - ◆ 1mの精度のタッチダウン



人工クレータの作成運用

■ 2018/4/5

- ◆ 極めて高い探査機の位置制御が求められる難易度の高いミッション



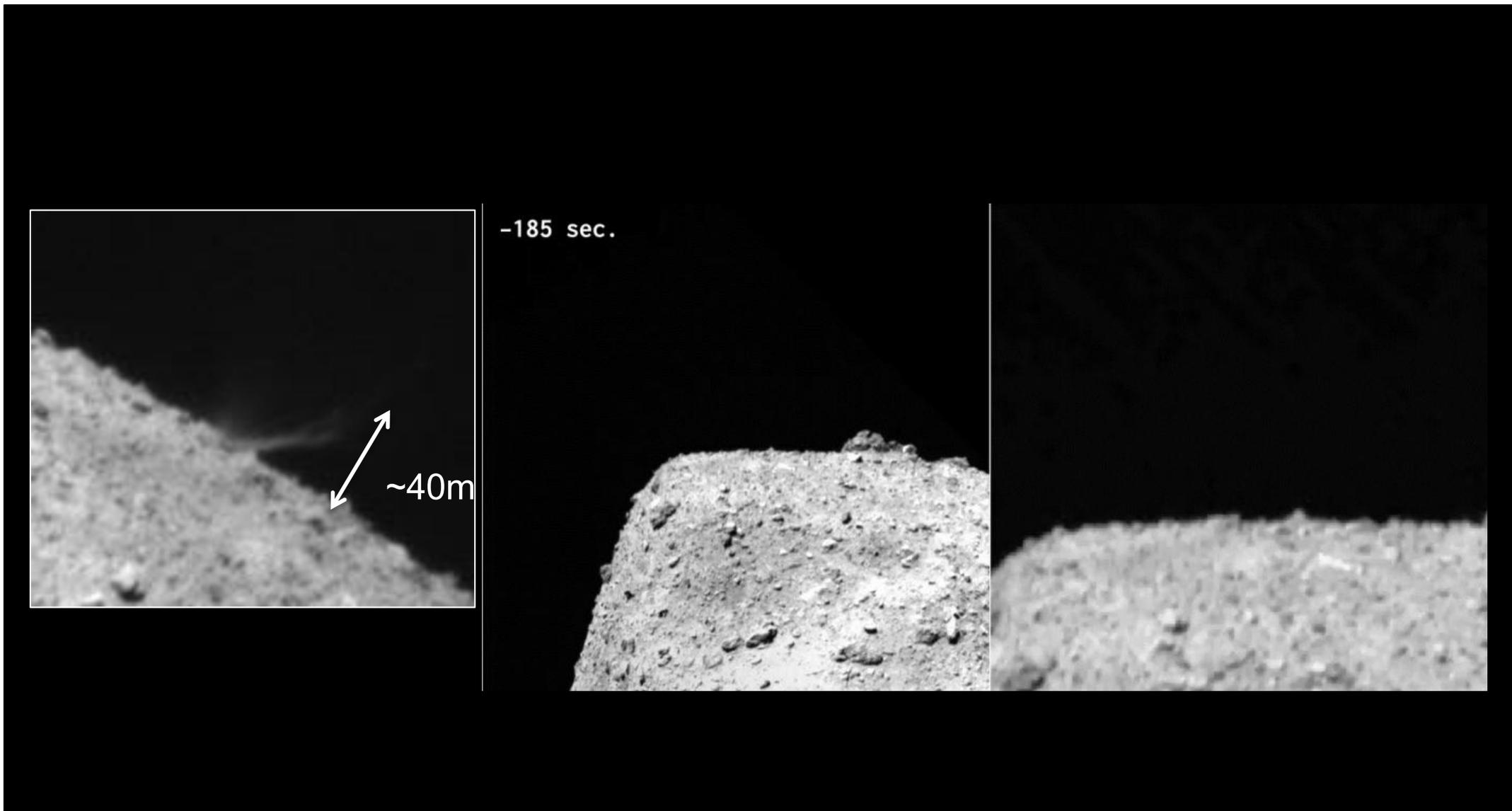
©ライブ ©HAYABUSA2製作委員会

- 2019/4/5 10:56分離



人工クレータ作成成功！

■ DCAM画像



人工クレータ

- 事前探索と同じ場所を撮像(4/25)
 - ◆ 撮像高度 1.7km



第2回タッチダウン (2019/7/11)

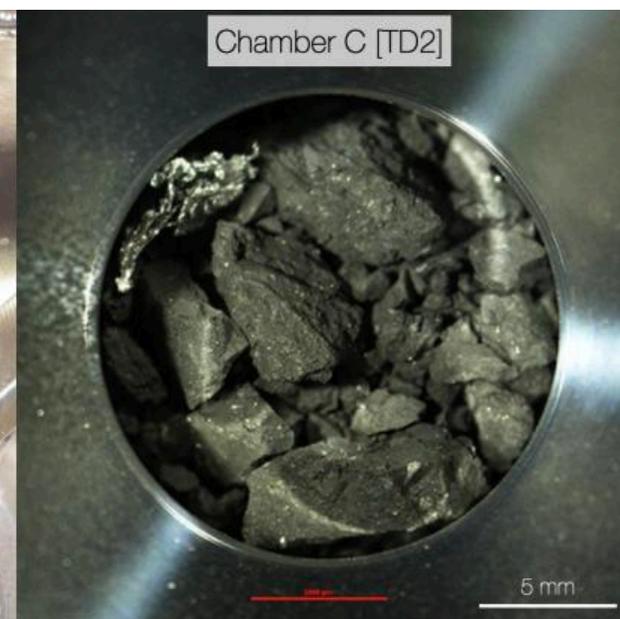
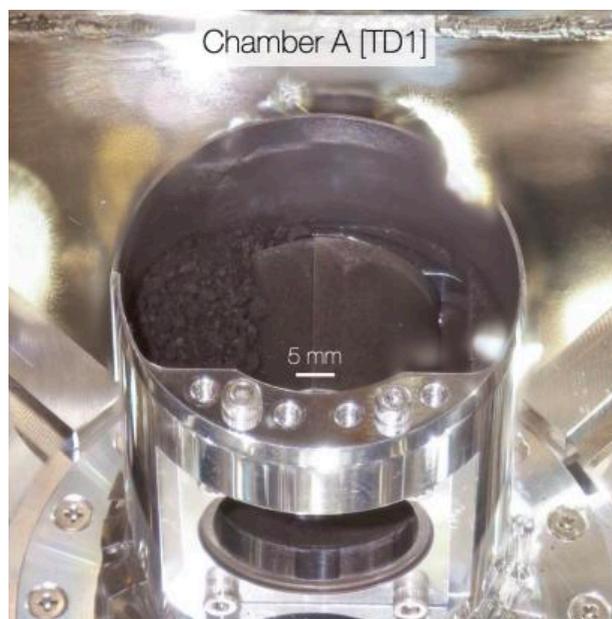
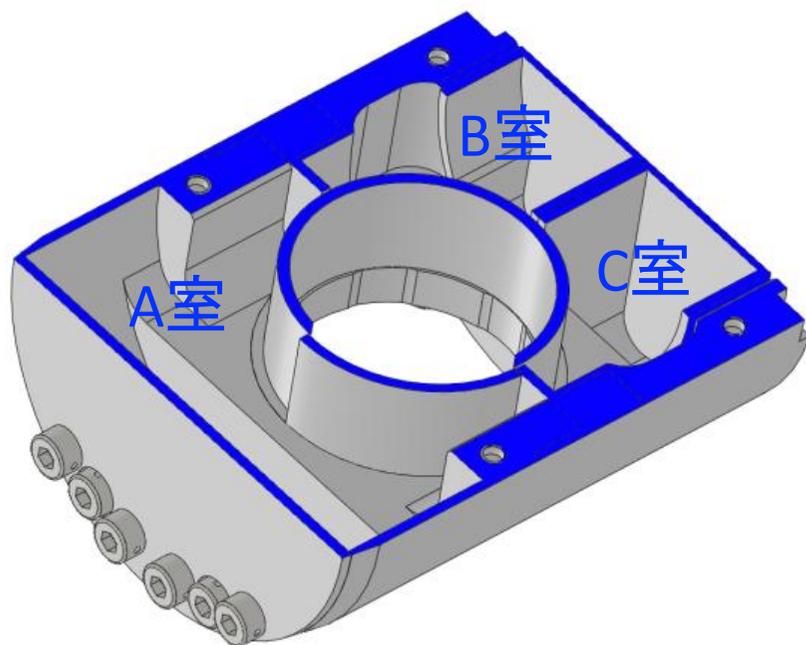


CAM-Hによる撮影

タッチダウン精度: **60 cm!**

リュウグウのサンプル

- サンプラの中身
 - ◆ 3室合計で5.4gものサンプルの採取に成功
 - ◆ 大きなサンプルも



はやぶさ2を振り返って

はやぶさ2の教訓・課題・将来へ向けて

- はやぶさ2の面白さ
 - ◆ リモセンのみならず、**現地での多様な探査**
 - 一番乗り型の探査は一旦終了. 行った先で何をすることが面白いミッションを創る
 - 表面探査が日本の課題

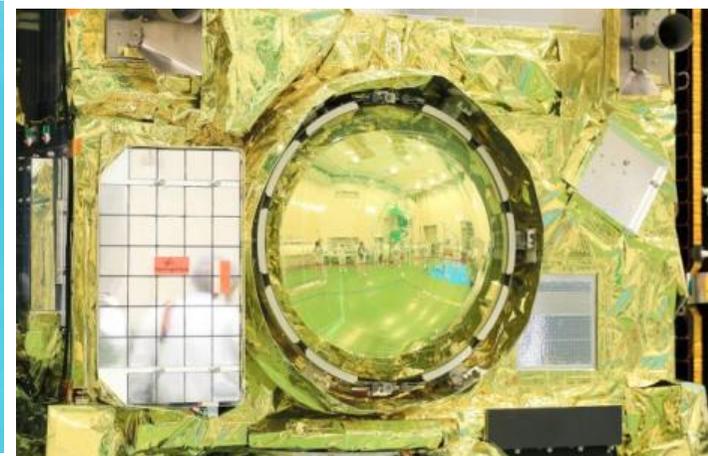
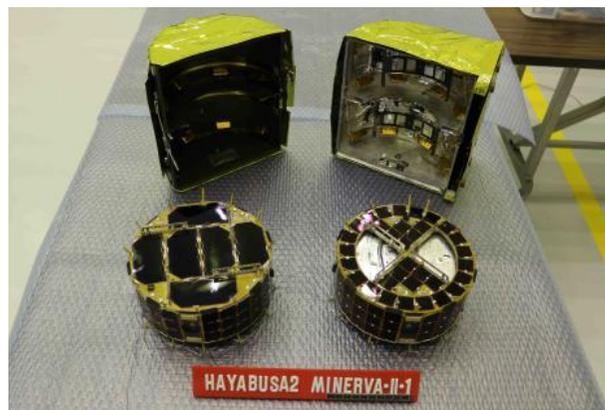
- 小型分離機によるミッションの質の向上(はや2では6機の子機が活躍)
 - ◆ 表面探査ロボット: MINERVA-IIローバ, MASCOTランダ
 - ◆ 単機能子機: 衝突装置(SCI), 分離カメラ(DCAM3)

- 複数回タッチダウン実施にまつわる教訓
 - ◆ 複数箇所のサンプリングの科学的な意義価値は絶大.
 - ◆ 他方で, 複数回着陸は, 科学技術のみならず, マネジメント上の繊細な議論を励起しうる.

- 多種多様な天体への適用性
 - ◆ **重力天体**からのサンプルリターンはサンプルリターンの究極の目標の一つ

はやぶさ2の飛び道具

- はやぶさ2には多彩な飛び道具(分離機, 子機)が搭載されている
 - ◆ (現地までの輸送をしっかりとやれば) 単機能の超小型子機でも面白いことができる
- ◆ ターゲットマーカ x 5
- ◆ MINERVA-II x 3
- ◆ MASCOT
- ◆ 衝突装置(SCI)
- ◆ DCAM3
- ◆ CPSL



はやぶさ2を受けての次世代小天体サンプルリターン

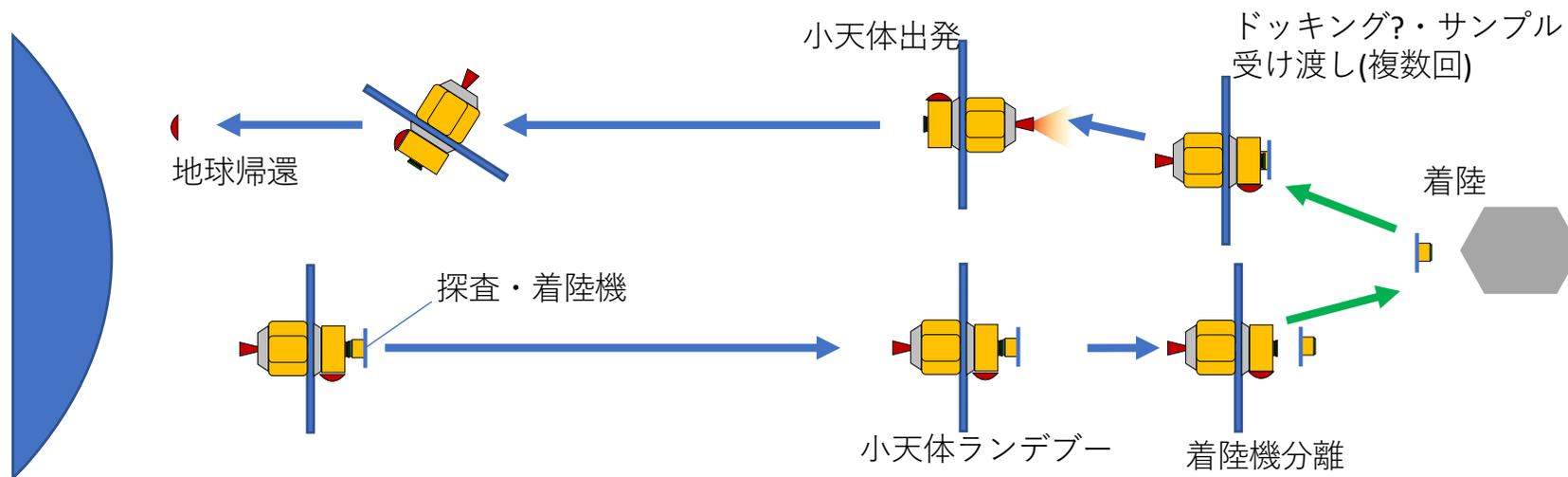
■ 複数機システムによる探査の形態

- ◆ 地球-目標天体間の輸送を担当する往還機と、現地での着陸探査を行う小型の着陸機で構成される探査システム
 - 小型着陸機は複数のサンプリングを行い、都度そのサンプルを往還機に引き渡す。
- ◆ 着陸機以外の小型機をミッションの質を高めるために積極的に利用する

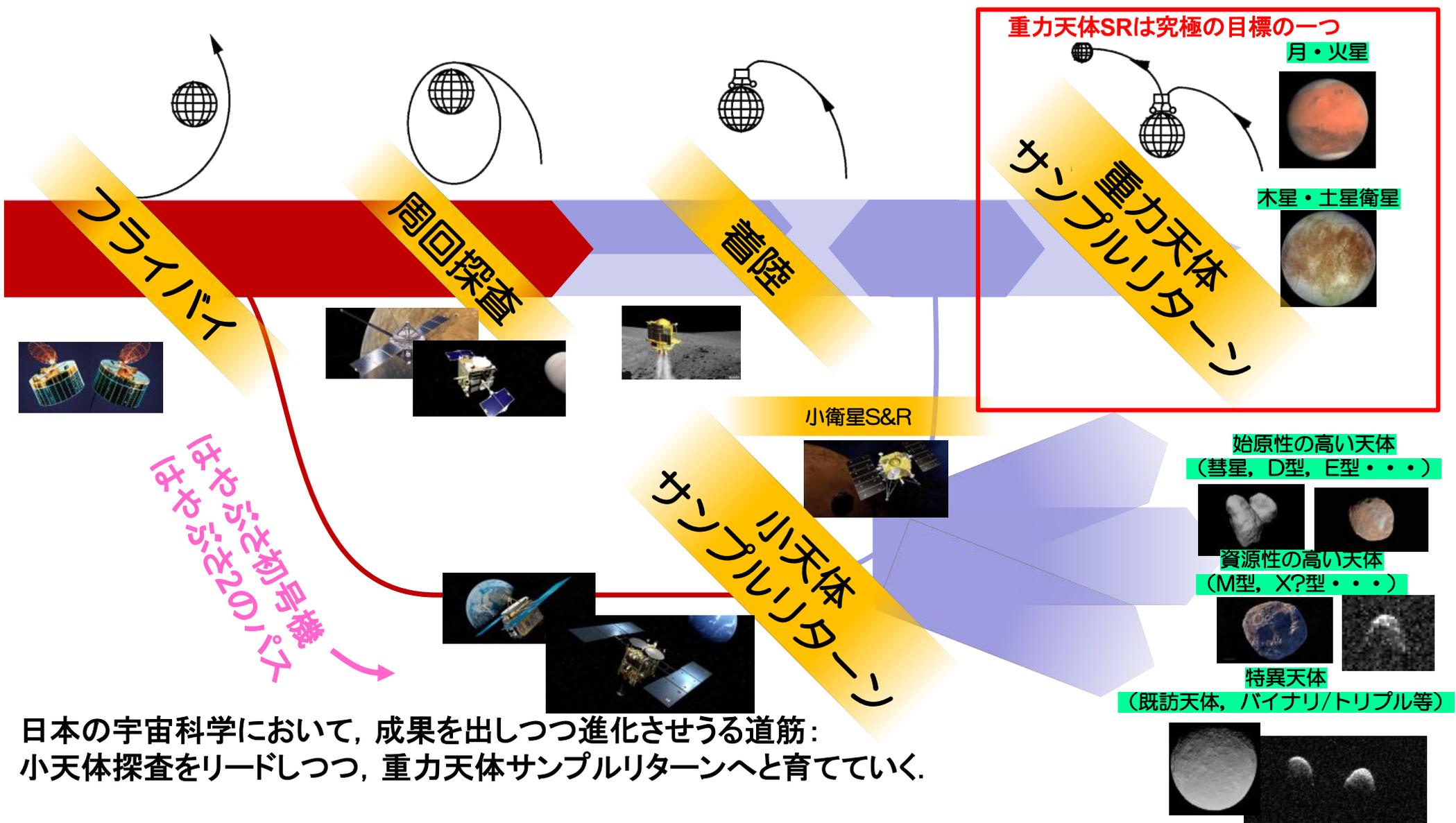
■ 輸送と探査の分離

- ◆ 輸送は手堅く、なるべく同じもので(OTV)
- ◆ 探査は多様に・挑戦的に

この思想は重力天体探査にも適応可能(サンプルリターンなら必須)



重力天体探査



日本の宇宙科学において、成果を出しつつ進化させうる道筋：
小天体探査をリードしつつ、重力天体サンプルリターンへと育てていく。

月は技術獲得・発展と科学にとって良い場所

■ 過酷な環境

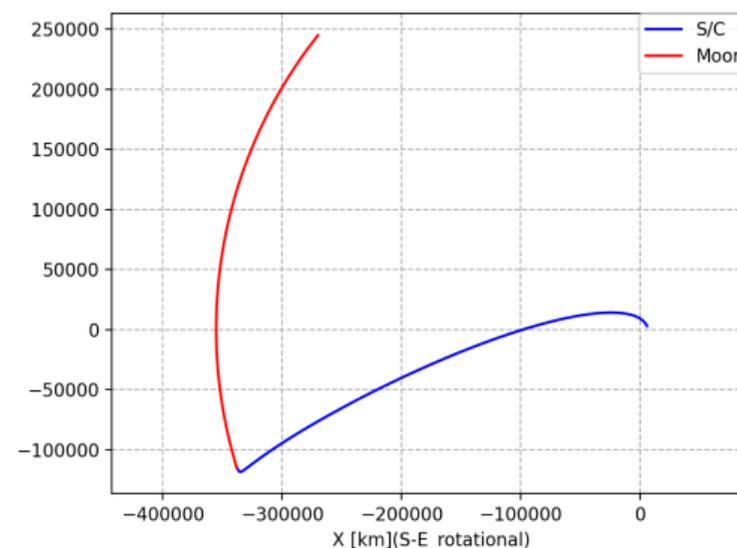
- ◆ 大きな重力: 月で着陸技術をやっておけば, 色々な重力天体に応用が効く
- ◆ 過酷な表面環境: 暑い, 寒い, 電力確保が難しい
- > (特に表面探査の)技術を伸ばすには良い環境

■ 素性がわかりつつある

- ◆ 「かぐや」や海外の探査機の調査によって, 面白い地形等がたくさん見つかったている
 - 面白い場所を徹底的に調査するという科学/探査が可能
- ◆ はやぶさ2等の**未知天体探査とは違う面白さ**

■ いつでも行ける, すぐに行ける気軽さ

- ◆ 数日でいける
 - はやぶさ2は3年半
- ◆ いつでも打ち上げ可能
 - 火星探査機は2年に1度のチャンス
- ◆ 短いサイクルでの技術獲得が可能



月面の科学の活動の紹介

- 宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会において、日本が主導的に月面活動を展開していく上で、30年後の世界を構想するだけでなく、それまでの期間における活動、特に次の10年間の技術開発を支えるものは何か、すなわち、**2030年代で実現すべきことは何か**という議論が展開された。

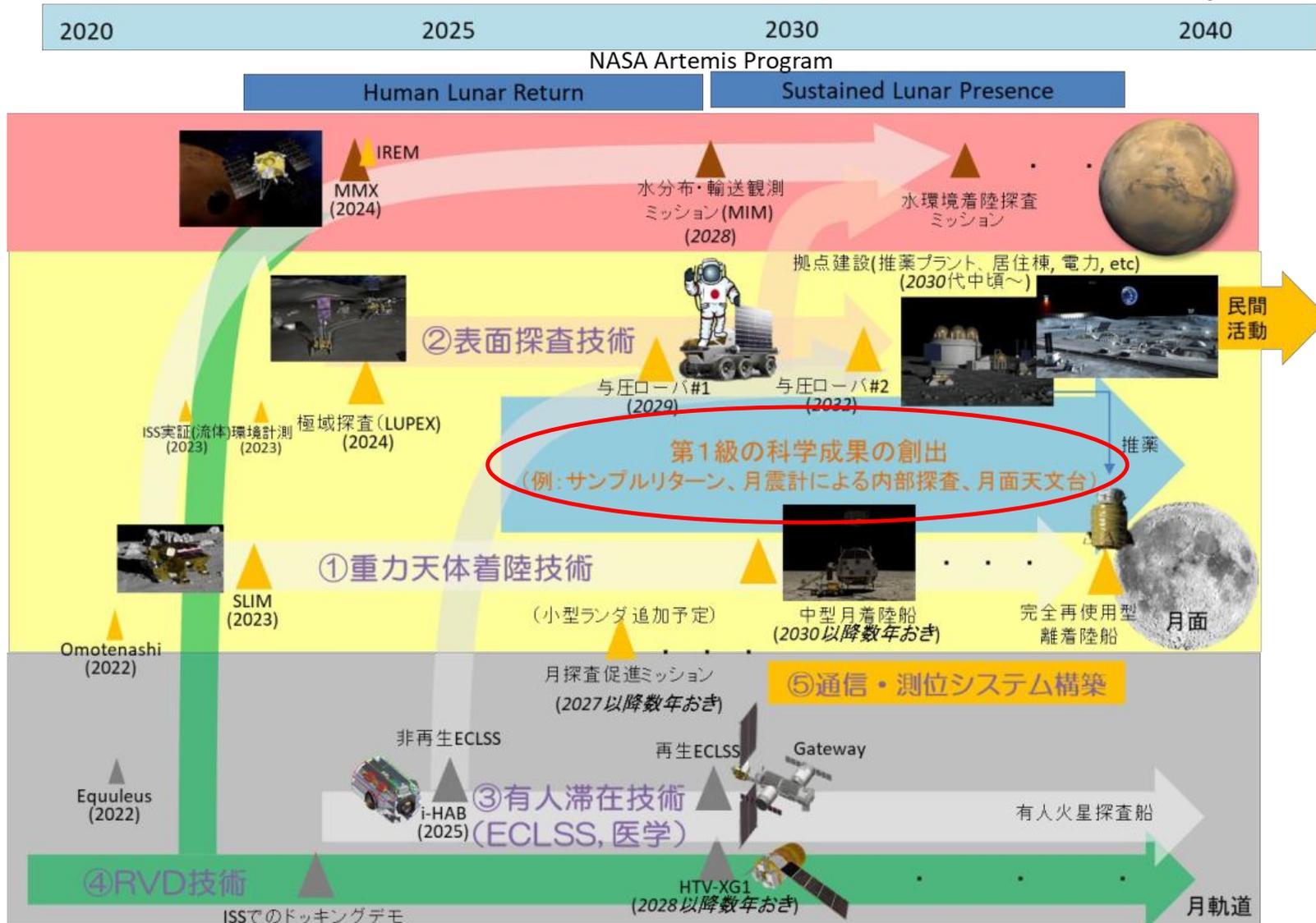
- 宇宙政策委員会基本政策部会より「月面活動に関する基本的な考え方(案)」において、「アルテミス計画への参画により我が国の月面活動の機会が拡大していくことを念頭に、当該機会を活用して新たな知の創造につながる世界的な科学の成果を創出することを目指す。」と示された。

- 上記観点から、第一級の成果をもたらす月面での宇宙科学探査として以下の3つが設定された。(トップダウンの方針)
 - ◆ 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(月面SR)
 - ◆ 月震計ネットワークによる月内部構造の把握(月震計NW)

国際宇宙探査シナリオ(2021)

国際宇宙探査シナリオ

「斜字の打上げ年」は調整中であり、最速を示す。



国際宇宙探査シナリオと科学の融合

- 日本の国際宇宙探査シナリオ
 - ◆ JAXA国際宇宙探査センターを中心にまとめられてきた
 - 国際協力で行う有人宇宙探査の目標や工程, 必要な技術
 - 有人探査に必要なインフラ技術

- 上記シナリオに科学が入っていく意味
 - ◆ 一級の月面の科学によるミッションの魅力の向上
 - ◆ 科学観測要求等を明確にすることで, ミッションおよび探査システムを具体化することが可能
 - 「将来誰かが使うためのインフラ整備」のような構想を, 具体化しミッションとして定義する
 - ◆ プレーヤーを増加させ, 月面探査を盛り上げる

人類の月面活動の本格化と月の科学探査は, 月面への確実な到達や月面での長期滞在というインフラ的技術の獲得が共通的に必要であり, 当面は整合する

月面の科学フィジビリティスタディ

- JAXA 国際宇宙探査センターから科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディテーマ募集
 - ◆ 課題 A: 持続的な月面探査と月面利用の拡大に不可欠な月面環境情報(ground truth)の取得ならびにそれに基づく環境予測モデル(予測方法)の構築
 - ◆ 課題 B: 世界をリードする科学成果の月面活動からの創出

- 課題Bに対し, ISASおよび大学のメンバで応募
 - ◆ 3つの科学それぞれで応募するのではなく, 3つのテーマをあわせて1つの応募とした
 - ◆ 継続的な月面活動ではプログラムの視点が必要
 - 単一の科学を追求しても, 月面活動で必要な幅広い技術の獲得は難しい.
 - 月面は非常に良い科学の場で, 単一の科学のみを推し進めるのではなく, 複数の一線級の科学を実現することを考えるべきである.
 - 複数科学を同時に扱うことで相乗効果が期待できるはず.
 - 複数科学を扱ったとしても, それぞれの科学を別々のミッションに分けて実施すると, 個別科学のアウトプットを最大化することに留まり, 効率的な月面探査技術の獲得につながりにくい.

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.

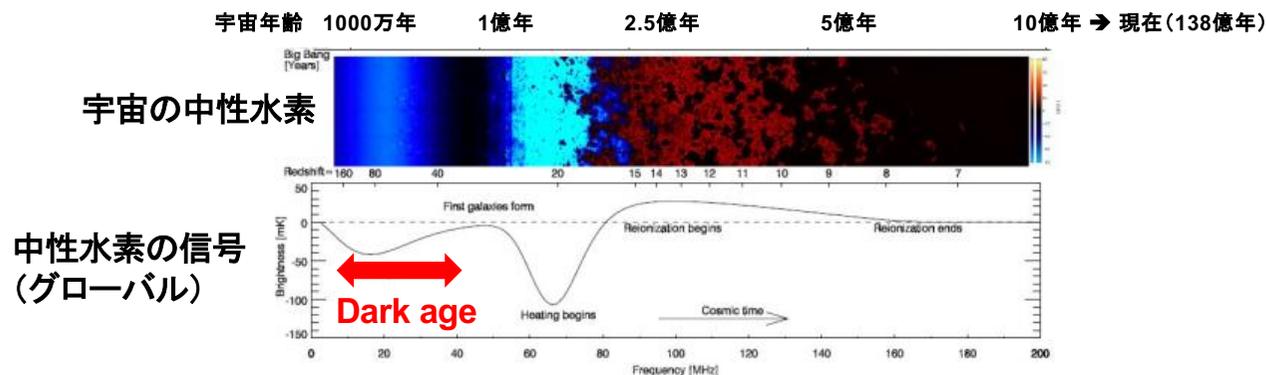


直近の観測シナリオ案

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SR

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。



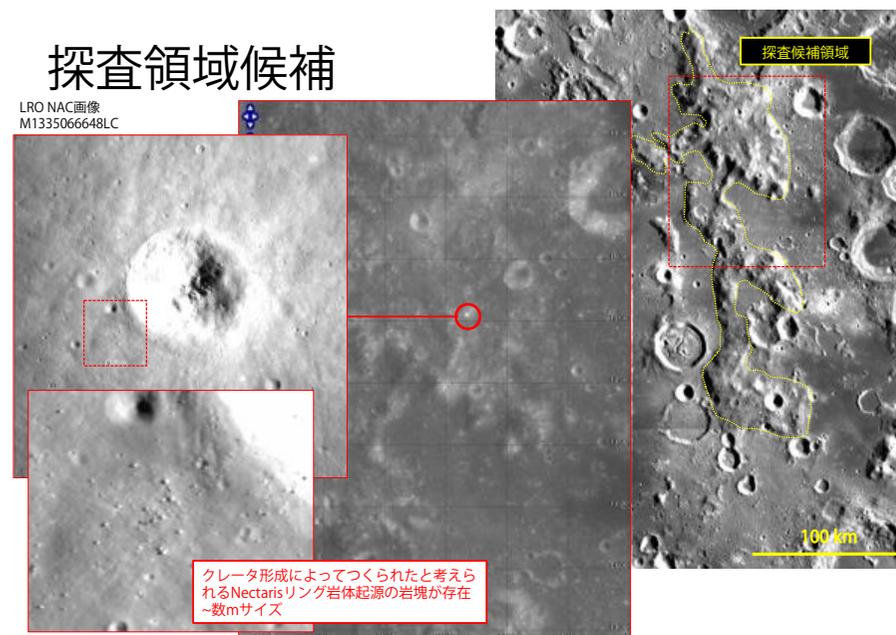
直近の観測シナリオ案

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」がつかわれている。

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。



月震計NW

科学目標

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)。

直近の観測シナリオ案

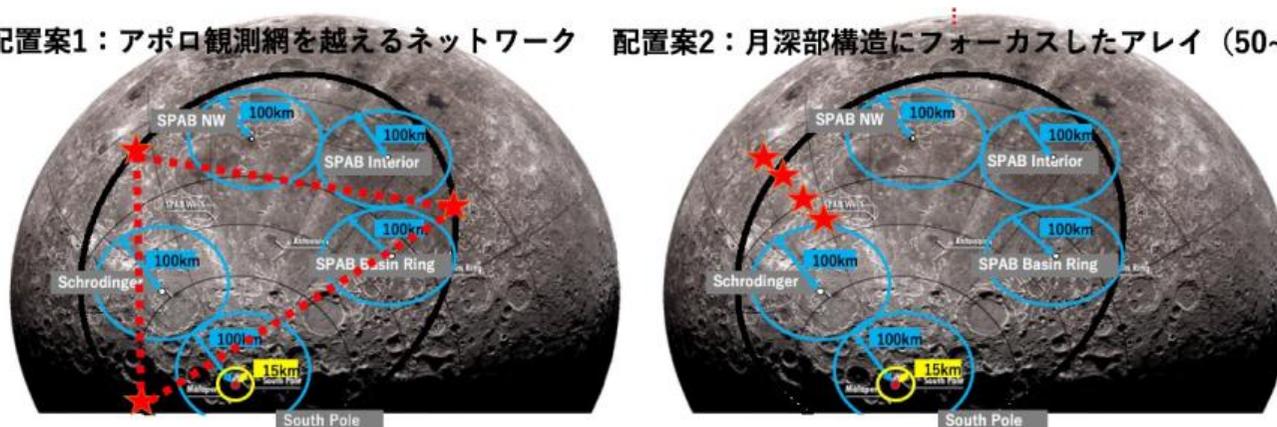


新たな月震計(広帯域・高感度・小型)を適切に設置し、年単位の運用を行う。

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。

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)



日本の置かれている状況

■ 日本の立ち位置

- ◆ 月面探査の経験はないが、月面活動に対する高いポテンシャルを持っている。
 - はやぶさ1, 2等深宇宙探査の実績あり.
 - OMOTENASHI(超小型月面着陸), SLIM(月面ピンポイント着陸), MMX(火星衛星SR)などを実施予定.
 - ISSで重要な役割を担っている(きぼう, HTVなど).
 - 民間企業が高い技術力を保有している.

■ 日本がとるべき戦略(私見)

- ◆ 国際宇宙探査の主要参加国の一員としての国際貢献(分担型の国際協力)
 - Gatewayのような大規模拠点は国際協力で推進されるべき
 - 一方で, 重要な技術を海外に全て頼ってしまうと, 日本の宇宙開発の発展につながらない
 - ◆ **日本が継続的にプレゼンスを発揮できる戦略**
 - 対等な国際協力は, 十分な国際競争力を持った上で初めて成立する
 - 分担型国際協力では我が国の戦略が全ての協力国家から常に是認されることが保証されない
- => キー技術を認識しそれを戦略的に獲得し, 独自に自在性を確保する.

月面探査のキー技術

■ 輸送能力の向上

- ◆ ポストSLIMとして、ペイロード輸送能力を向上させた着陸機器の早期実現
 - 必要ペイロード: 数100kg級 (H3-22ロケット以上での打上, 4ton級以上)
- ◆ ピンポイント着陸技術 (より様々な地形へのアプローチ)
- ◆ 大型機の転倒防止
- ◆ 大推力推進系 (スロットリング機能等)

■ 表面探査

- ◆ 日本の表面探査技術は未成熟.
 - LUPEXで本格的なローバを実施予定だが, 1つやれば終わりというものではない
- ◆ 月面の走行技術, 輸送技術
 - 不整地走行, 自律走行技術等
- ◆ ロボティクスを用いた月面探査技術 (ロボットアーム等)
 - ペイロードの設置, 試料の採取等
- ◆ 越夜・越昼技術
 - 熱設計技術, 太陽電池タワー, RHU等

日本独自の着陸ミッション

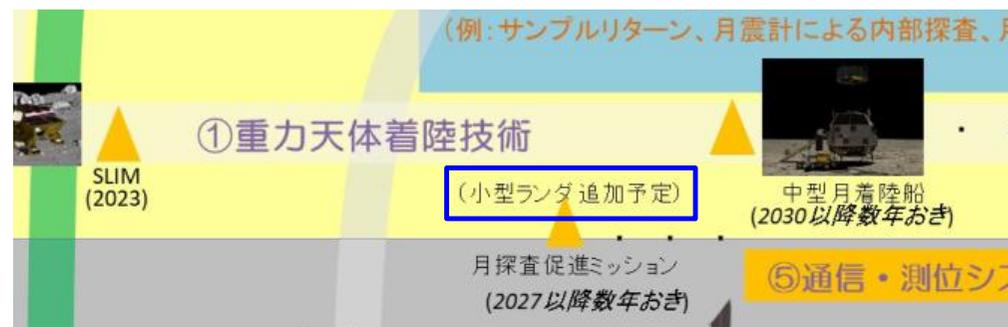
- 月面への輸送機会は、国際探査の枠組みでいくつか存在する
 - ◆ 有人ミッションの一環として打ち上げる海外の着陸船(HLS, 与圧ローバなど)
 - ◆ アルテミス計画の一環として打ち上げる日本の着陸船(中型月着陸船)
 - ◆ 海外の商用月面輸送サービス(CLPS)

日本のみがペイロードを独占できるわけではない

- 継続的な国際プレゼンスの発揮には、日本独自で月面探査を行える状況を作っていくことが非常に重要

■ 月探査促進プログラム (LEAD)

- ◆ 従来的には月周回軌道利用促進であったものを月面輸送まで拡張
- ◆ 中型月着陸船(非常に大きな着陸機)に向けた大事なステップ
- ◆ 月面へのまとまった量(>100kg)の輸送を行える貴重な機会
- ◆ 継続的な輸送機会として期待 (数年ごと)



ミッションシナリオ

■ ミッションシナリオの検討

- ◆ LEADの活動を軸に早期に月面天文台, 月面SR, 月震計ネットワーク(3科学)の技術実証(複数のプリカーサミッション)を実施
 - プリカーサミッションで世界最先端に達することを旨とする。

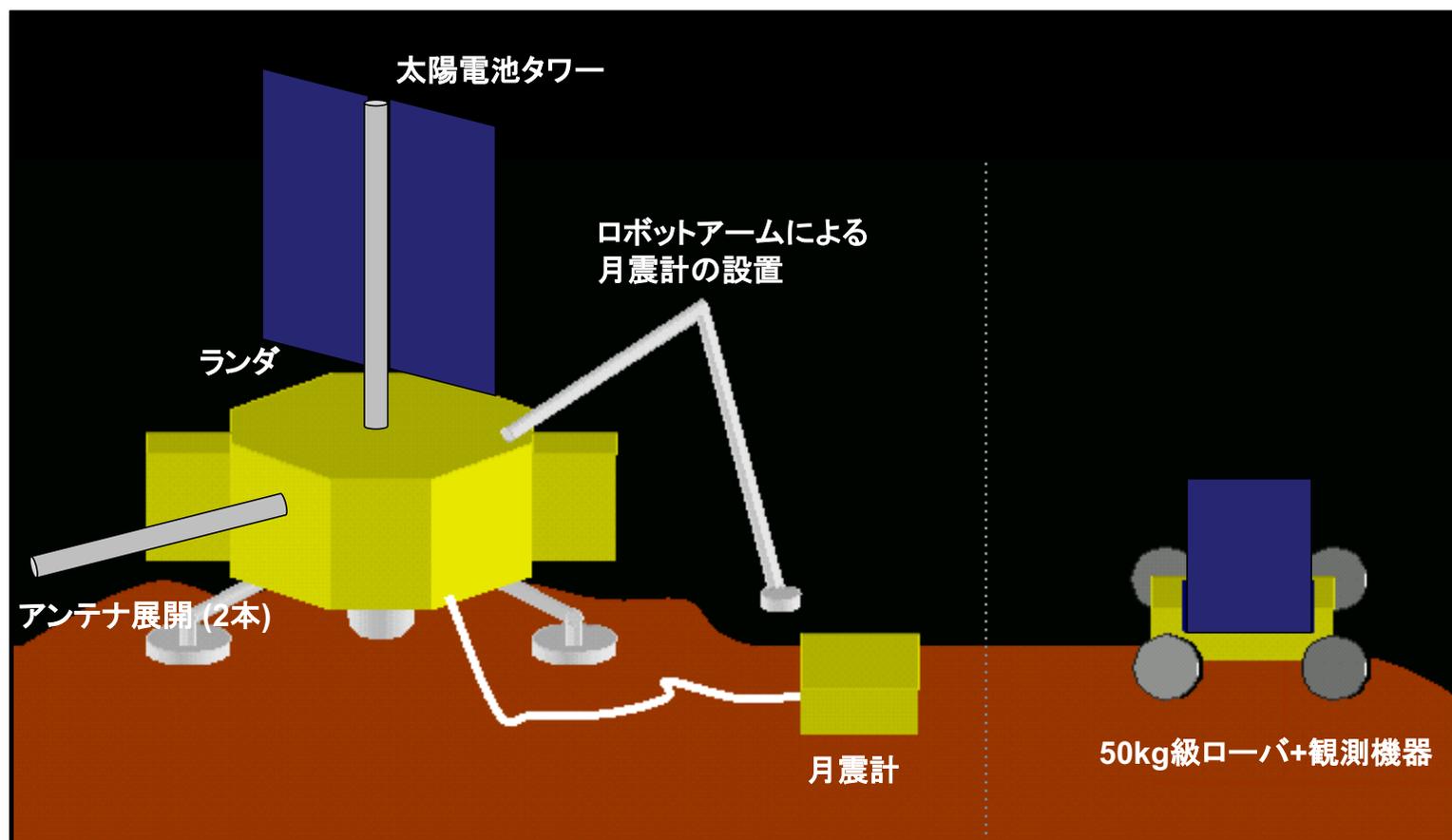
- ◆ 日本が未成熟な表面探査技術を確実に伸ばす
 - 必要な技術レベルを考慮し, 段階的に難易度が上がるようにシナリオを検討する

- ◆ 月面活動以外の太陽系探査にも共通する技術
 - 「太陽系探査の拡大」に貢献する共通技術を意識する

- ◆ 有人探査へつなげる
 - 有人探査に直接つながる技術 (極域着陸)等の技術
 - 有人探査のために無人でできることを増やす
 - 有人探査プログラムの積極利用を考える (インフラ価値の向上に貢献する)

プリカーサミッションの検討

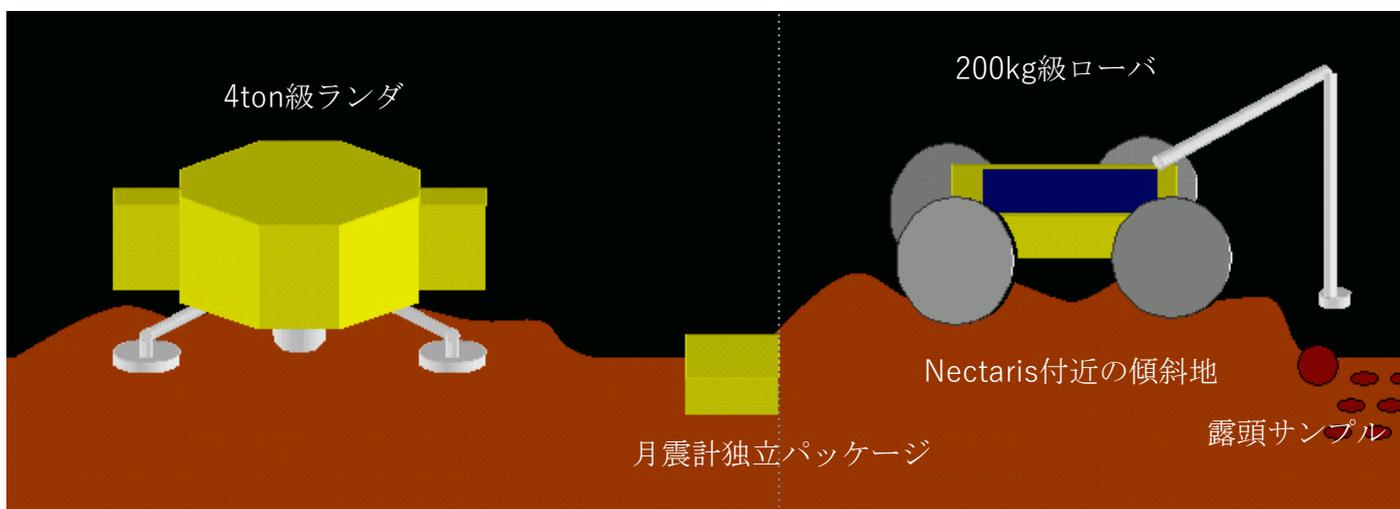
- 第一回目として、有人活動の拠点となる南極域に着陸するとして、ミッション形態を検討中
 - ◆ ロボットアームによる月震計の適切な設置
 - ◆ 50kg級ローバ+観測機器によるサンプルその場分析の練習. 走行試験(自動走行等)
 - ◆ 月面天文台プロトタイプアンテナの展開
 - ◆ 極域における越夜技術の獲得



2回目以降の構想

■ LEAD 2回目

- ◆ 月面の低緯度(ネクタリス付近)に着陸する
- ◆ 200kg級ローバによる露頭サンプルの採取・その場分析
- ◆ 月震計, 天文台アンテナ(独立パッケージ)の設置



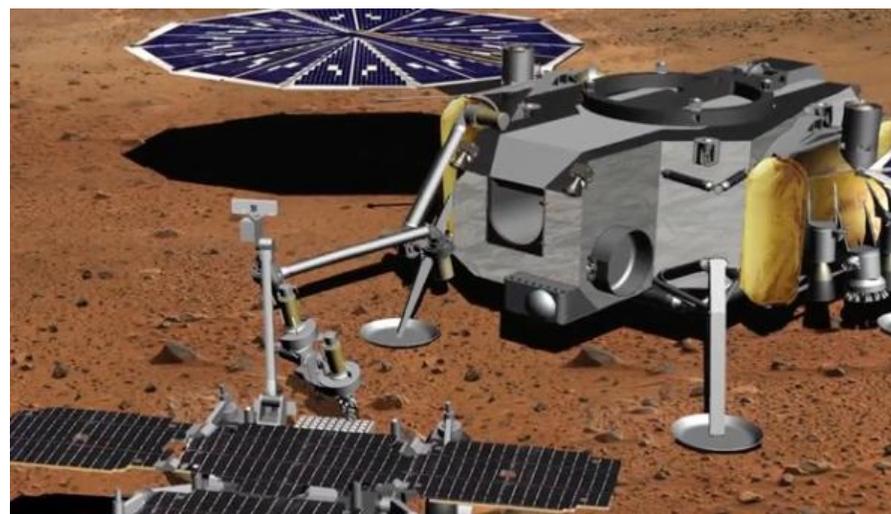
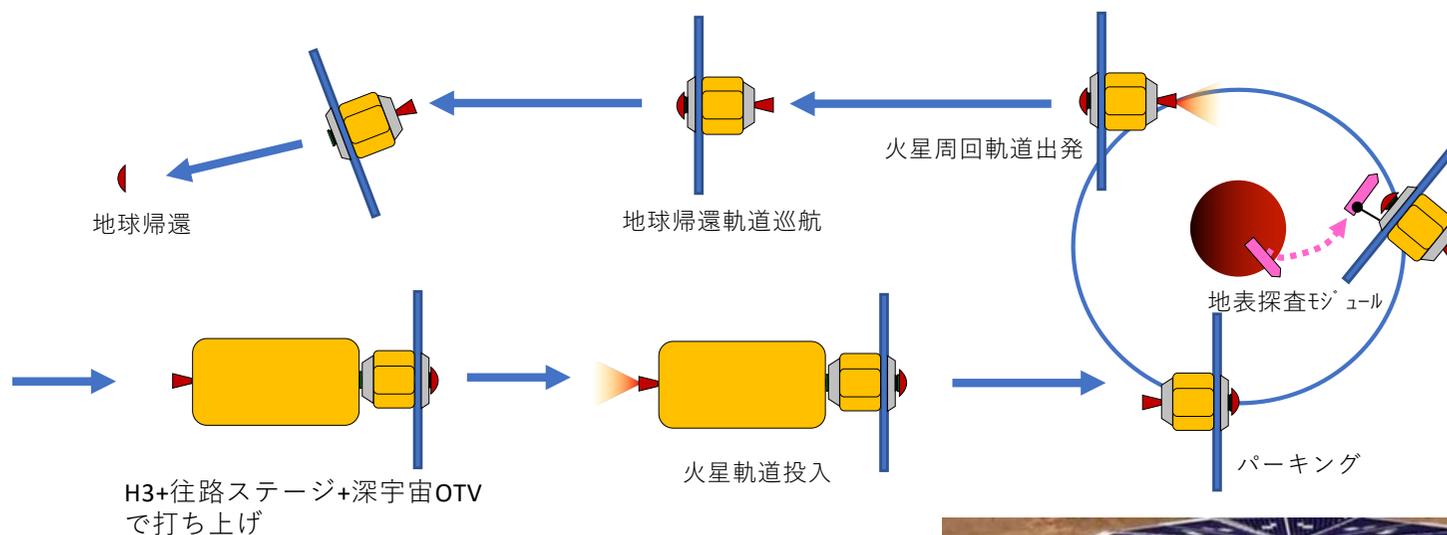
■ 有人与圧ローバへの展開

- ◆ 月震計や天文台アンテナは独立パッケージ化し, 有人与圧ローバ等で展開することも検討



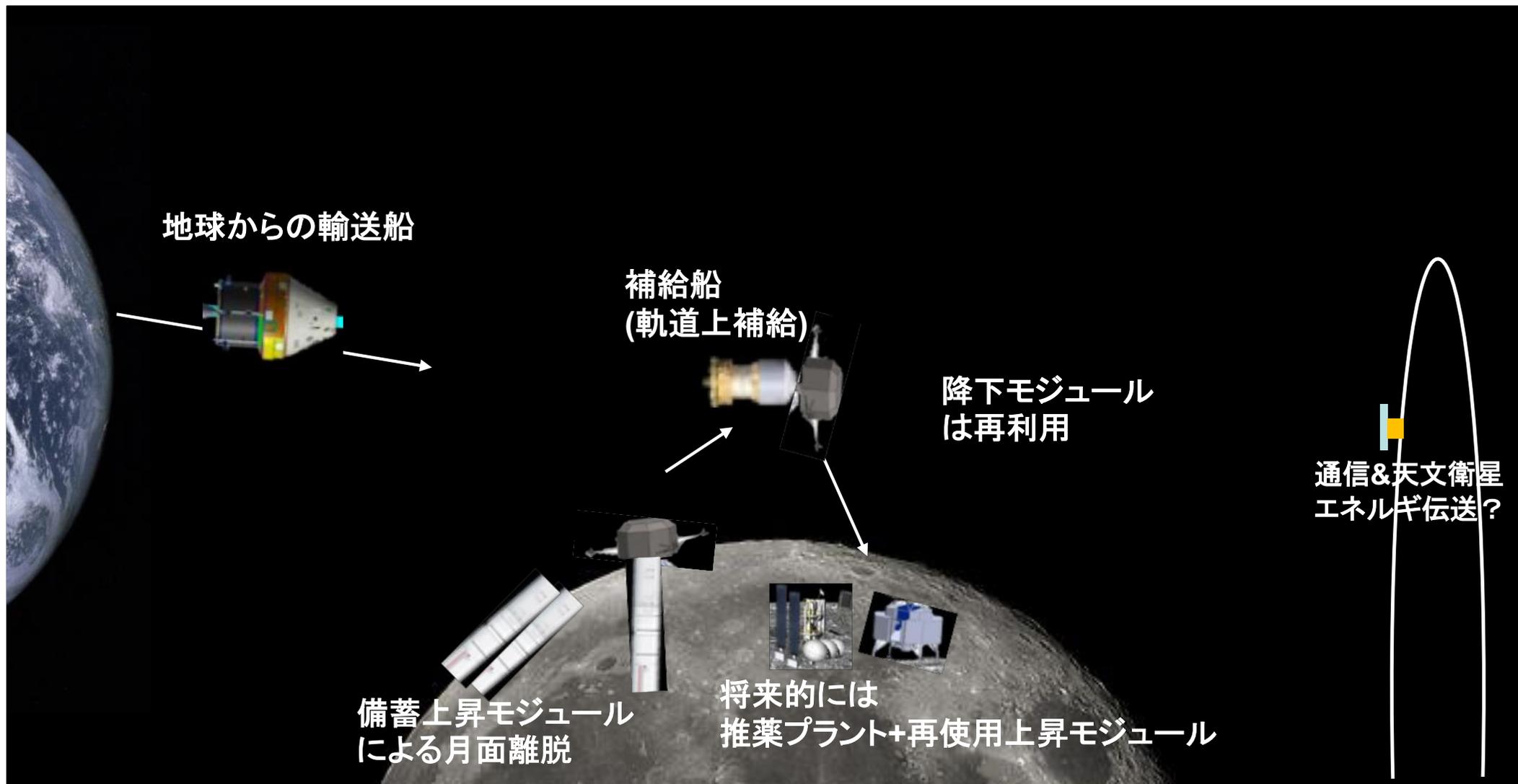
重力天体からのサンプルリターン

- 重力天体のためには探査の自在性を向上させる必要がある。
 - ◆ 複数機を用いたミッションは重力天体探査にこそ必要
 - ランデブドッキング技術, 燃料補給, サンプル受け渡し技術



月面への高頻度アクセスの未来

■ 月における再使用型往復輸送



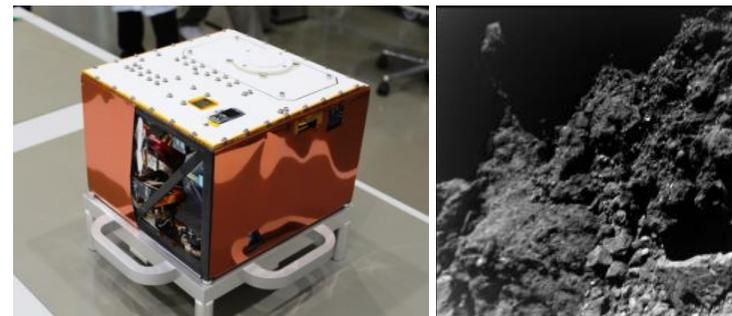
宇宙開発の裾野の拡大のための活動

■ 国際協力と日本のプレゼンスの発揮

- ◆ 国際探査の枠組みで月探査を盛り上げ, 世界的にプレイヤーを増やす
- ◆ 協調型の国際協力
 - 大規模な月探査インフラの中で, 日本が(強みを活かして)重要部分を担当する
 - Gateway /有人与圧ローバ
 - 無人補給機: 昨今提唱されている深宇宙OTVの構想とマッチ
 - 科学ペイロード
 - 国際インフラの積極利用による方向づけと価値の向上に貢献する
 - 有人与圧ローバによる月震計・干渉計の展開.
 - Gatewayを月面裏側の極域と地球との通信に利用 (月面天文台)
 - 日本独自のGateway経由でのSR (固体モータ打ち出し+月周回-Gateway小型輸送機)

■ **ペイロード搭載機会提供型の国際協力**

- ◆ 超一流の科学を単独で実施+海外ペイロード搭載機会提供で国際的なプレゼンスを示す
- ◆ 着陸輸送という月探査の根幹技術を確保した上で, 海外ペイロードでミッションの価値を高める
 - はやぶさ2: DLR/CNESのMASCOTランダを搭載
 - はやぶさ2本体ではできない表面探査を実施.
- ◆ 主ミッションとの相乗効果
- ◆ 日本単独の探査でもペイロード機会の提供は可能



宇宙開発の裾野の拡大のための活動

■ プレイヤーの増大と人材育成

- ◆ ペイロード搭載機会の提供先を大学・民間へ広げる
 - 科学以外の観点を含む大学・民間のペイロードを(無償で)積極的に輸送することで、**挑戦的な活動を促進し**技術の底上げを目指す。
- ◆ 人材育成
 - 人材育成は環境(活躍の場)が重要: 難しいことにチャレンジできる場をつくる。
- ◆ 枠組みの整理とペイロードに対する継続的サービス提供が必要
 - 輸送機から月面への設置
 - 小型ペイロードと着陸機/ローバ間の汎用的通信機



■ 民間との連携

- ◆ 日本の表面探査技術は未成熟. 民間技術を積極的に取り入れることが必要
 - ロボットアーム技術(産業機械)
 - 掘削, 整地等の土木技術. サンプル分析においても重要技術
- ◆ 民間の参加を積極的に促す枠組み
 - (科学以外の)資源探査/利用, 開拓(環境・地質調査, 月面建築)の観点
 - 着陸輸送機をシリーズ化し, (科学以外も含む)ペイロードの月面輸送サービスを構築

まとめ

- ISASの実際のプロジェクトに携わってきた経験から、本格的な月面探査・活動の実現のための直近のアクティビティを紹介した。
 - ◆ 直近では、科学で成果を出しつつ、裾野を広げる活動をしていくことが重要
 - ◆ 第一歩目を踏み出せる準備を進める

- 一方で、面白い将来の構想がないと、小さい活動にまとまってしまう。
 - ◆ ムーンビレッジ勉強会のような活動で、ワクワクする人を増やしていくことが不可欠



**ムーンビレッジの実現のために
畳の下から別の星に行けるくらいの気軽さで
月に行ける未来を目指しましょう！**