





小型月着陸実証機「SLIM」

月着陸へ向けた今後の予定 等について

宇宙科学研究所 SLIMプロジェクトチーム プロジェクトマネージャ 坂井真一郎



#### ▶ SLIMミッションの目的

SLIM(Smart Lander for investigating Moon)は、以下の2つの目的を達成することで、将来の月惑星探査に貢献することを目指したJAXAプロジェクトです。

## 【目的A】月への高精度着陸技術の実証を目指す

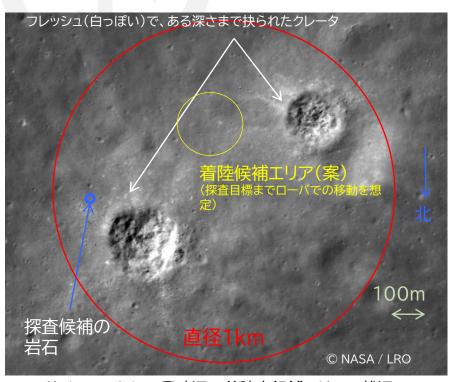
- ・ 従来の月着陸精度である数km~10数kmに対して100mオーダーを目指す
- キーとなる技術は、「<mark>画像照合航法</mark>」および「**自律的な航法誘導制**御」

# 【目的B】<u>軽量な月惑星探査機システムを実現し、月惑星探査の</u> <u>高頻度化に貢献する</u>

- 小型・軽量で高性能な化学推進システムの実現
- 宇宙機一般で中核をなす計算機や電源システムの軽量化



#### ▶ ピンポイント着陸技術の必要性

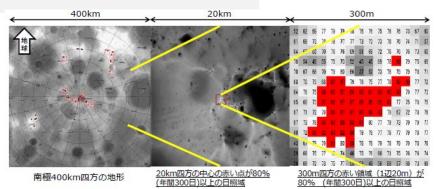


サイエンスとして興味深い着陸点<u>候補</u>エリアの状況 (SLIM着陸点とは異なる)

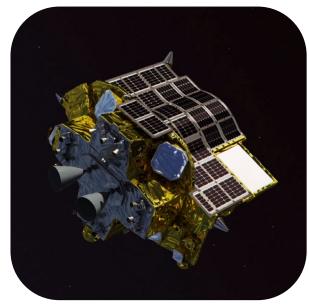
月周回衛星「かぐや」「LRO」が高分解能な月面 観測データを大量にもたらした結果、現在の月 探査ミッションは、「あのクレータの隣のあの岩 石」といった粒度で議論されるようになってい ます。このような岩石の"その場観測(組成分 析など)"を実施するためには、近傍の平坦地 を選んで探査機を着陸させる必要があります。 左の図はSLIMの着陸点とは異なりますがサ イエンスとして興味深い着陸点の例になります。 この例では月面ローバを使用できると仮定し て検討していますが、その場合でも、傾斜地や 凸凹の厳しい地形の走破は難易度が高いため、 ピンポイントで着陸することが重要となります。



#### ▶ ピンポイント着陸技術の必要性



月の極域における、日照時間の長いエリア



小型月着陸実証機 SLIM(スリム)

また、極域で水資源探査を行う場合も、日照率の高さなど、着陸して持続的な探査を行うために有利な場所は、非常に狭い領域に限定されると言われています。
一方で、月のような有重力天体にピンポイント着陸した例は、世界的にもこれまで見当たりません。そのため、「小型の月着陸機により、ピンポイント着陸の技術実証を行うミッション」を実施することとなりました。これが、JAXA / 宇宙科学研究所が推進するSLIMProjectです。

#### 【参考】

- 従来の代表的な月着陸機の着陸精度は、数km ~ 10数km
- 「はやぶさ」、「はやぶさ2」は精密なタッチダウンを実現しているが、小惑星の重力は月や地球と比べて数桁小さいため、ダイナミクスが全く異なる(これらはゆっくり接近し、必要があれば再上昇することも可能。逆にSLIMではゆっくり慎重に接近することはできず、また、着陸のやり直しもきかない)



#### ▶ ピンポイント着陸技術の必要性

- ▶ 有人月面探査等において水資源の探査等を有利に行う上でピンポイント着陸を実現することが重要です。
- ➤ 直近月着陸を予定している国内外の着陸機の制度が数km~10数kmである中、SLIMの着陸精度は 100mであり、今後に向けた挑戦的な着陸技術実証ミッションになります。
- > SLIMでは画像照合航法や傾斜地に適した二段階着陸方式といった新規技術を実証します。

【各国の着陸機比較】※公開・報道情報を踏まえ整理

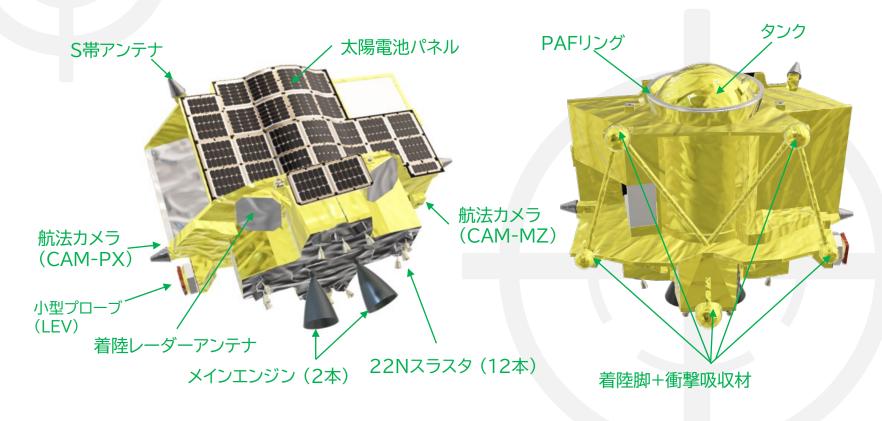
【参考:キューフ サットの着陸機】

THE PROPERTY OF THE PROPERTY O						ファイ ショーエルス』
	SLIM	HAKUTO-R (M-1:1号機)	Chandrayaan-3	Luna-25	Peregrine Lander (M1:1号機)	OMOTENASHI
機関	JAXA (日)	Ispace社 (日)	ISRO (印)	Roscosmos社 (露)	Astrobotic社(米)	JAXA (日)
打上げ時期	2023年9月	2022年12月	2023年7月	2023年8月	2023年後半	2022年11月
着陸機等質量 ※打上げ時(燃料込 み)	約700-730kg	約1,000kg	約1,750kg	約1,750kg	約1,300kg	約13kg
画像照合による 高精度航法	搭載	非搭載	非搭載	非搭載	試験搭載 (着陸航法には不使用)	非搭載
着陸精度 (km)	0.1km	数km ※同社の記者会見に関す る報道情報による	4km × 2.4km	30km × 15km	24km × 6km	_
主要ミッション	高精度着陸 技術実証	民間月面着陸	月面着陸、 科学ミッション	月面着陸、 科学ミッション	民間月面着陸	超小型での月面着陸技術 実証(セミハードラン ディング)、放射線環境 測定



### ▶ SLIM探査機外観

- 質量:200kg(推薬なし) / 約700kg(打ち上げ時)
- 高さ:約2.4m、縦:約1.7m、横:約2.7m



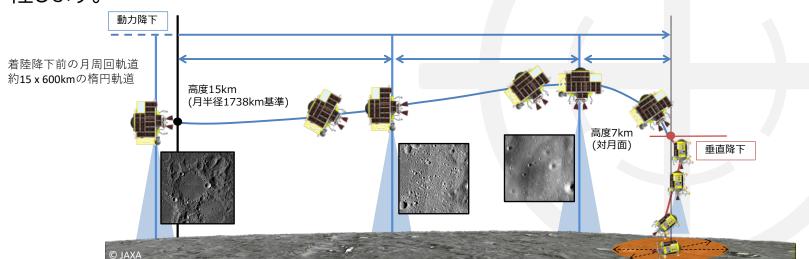
軽量化のため燃料・酸化剤一体型タンクを採用しており、これが探査機主構造を兼ねています



#### ▶ 着陸シーケンス

SLIMの着陸シーケンスは以下の通り実施します。

- 1. 月周回軌道から着陸降下を開始、<u>航法カメラによる画像航法</u>を行って高精度に自身の位置を 推定しながら、<u>自律的な航法誘導制御</u>により、月面上の目標地点に接近します。
- 2. 目標地点上空からは、着陸レーダによる高度・地面相対速度の精密な計測も開始し、航法誘導に反映します。
- 3. 着陸地点上空では画像ベースの障害物検出・回避を自律的に行い、危険な岩などを避けて着陸します。

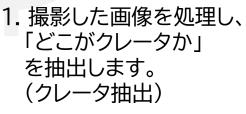


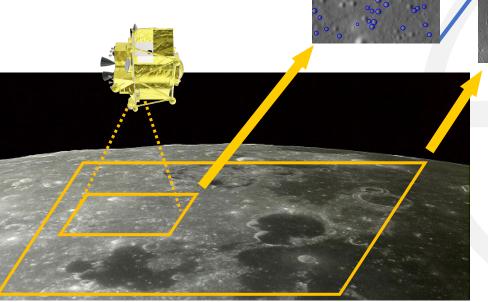
動力降下開始後の着陸シーケンス

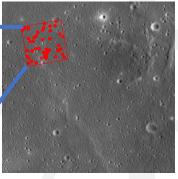


### ▶画像照合航法

SLIMは「画像照合航法」により自己位置を測定し、修正することでピンポイントな着陸を実現します。







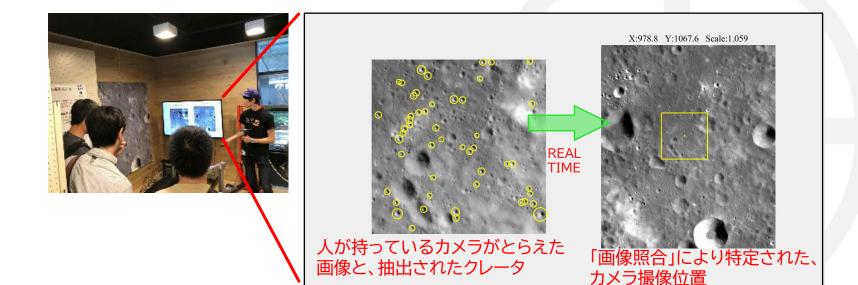
2. ありえる探査機位置を包含する広い領域の地図から、抽出されたクレータパターンと一致する場所を特定します。 (クレータマッチング)



### ▶画像照合航法

「画像照合航法」実現にあたっては、処理時間が重要な観点です。

現状の宇宙用CPUは、地上用と比べておよそ1/100程度の能力しかありません。そこで、宇宙用FPGA上でも数秒の処理時間で済む画像処理アルゴリズムを、大学の研究者の方々と共に長年研究・開発することで、実現の目処を得ています。



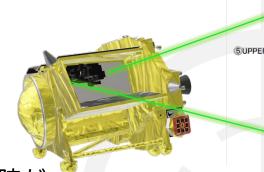
2018年 JAXA宇宙科学研究所 特別公開におけるデモンストレーション



### ▶月着陸後の運用予定 / マルチバンド分光カメラ

着陸成功後は、探査機の状態モニタを行いながら、「マルチバンド分光カメラ」により、月起源解明を狙い月マントル由来と考えられる岩石の組成分析を行う予定です(数日程度)。

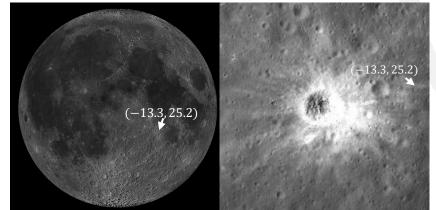
そのためには、狙ったクレータ近傍への 着陸が必要であり、ピンポイント着陸に より初めて可能となる観測になります。



©AZ-EL回転軸用 ロンチロック ④フォーカス機構用 ロンチロック

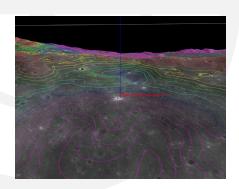
分光カメラとSLIMでの搭載位置

また、クレーター近傍、つまり<u>「斜面」</u>への着陸が 必要となり、2段階着陸技術を開発することとなりました。



SLIM着陸地点 (左:月全体における位置、右:拡大図)

出典:NASA/LRO



"神酒の海"と呼ばれる低緯度地域に存在。斜度が 15deg程度以下で概ね一定の地点

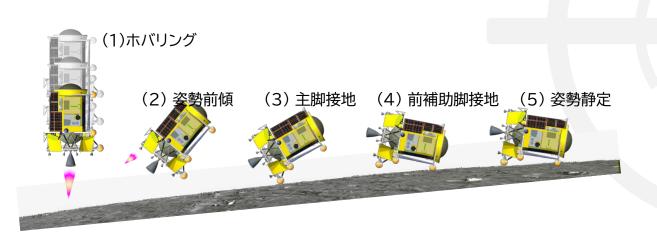
(南緯: 13.3degS/東経: 25.2degE)

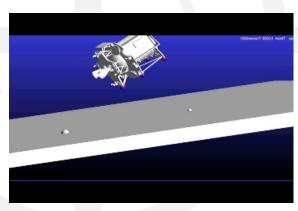


### ▶ 傾斜地に適した「二段階着陸」方式

着陸目標地点は前述の通りクレータ近傍に位置し、そのため付近一帯は斜度15[deg]程度の傾斜地となっています。従って、SLIMのような小型軽量な機体で、このような傾斜地に安全に着陸することが重要です。

科学・探査目的の高度化に伴い、今後はこのような地形への着陸が一般に求められるようになると考えています。着陸シミュレーション等による検討を重ねた結果、SLIM規模の機体の場合、始めに主脚で一度接地してから、機体を前方に回転させて静定する「2段階着陸方式」が耐転倒性に優れることが明らかになっています。





SLIM着陸シミュレーションや 模型による着陸実験風景

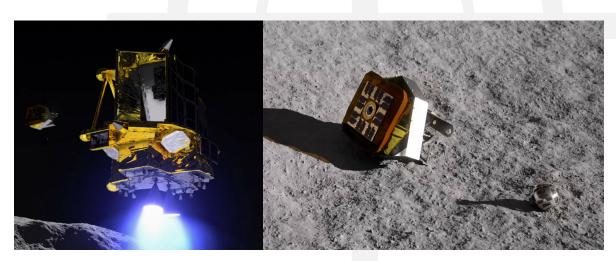


### ▶月着陸後の運用予定 / 小型プローブ

またSLIMは、月着陸直前の高度約2m付近から、2機の小型プローブ(LEV-1、LEV-2)を分離します。それぞれ、以下のような活動を行う予定です。

- 着陸後のミッション状況観測
- 着陸シーンの外部からの撮像(静止画)
- 独立した通信系で地球との直接通信

詳しくは、後ほどLEVチームから説明させて頂きます。



小型プローブ放出(左)と月面上の小型プローブのイメージ(右) 12



### ▶ SLIMの打上げとその後の軌道

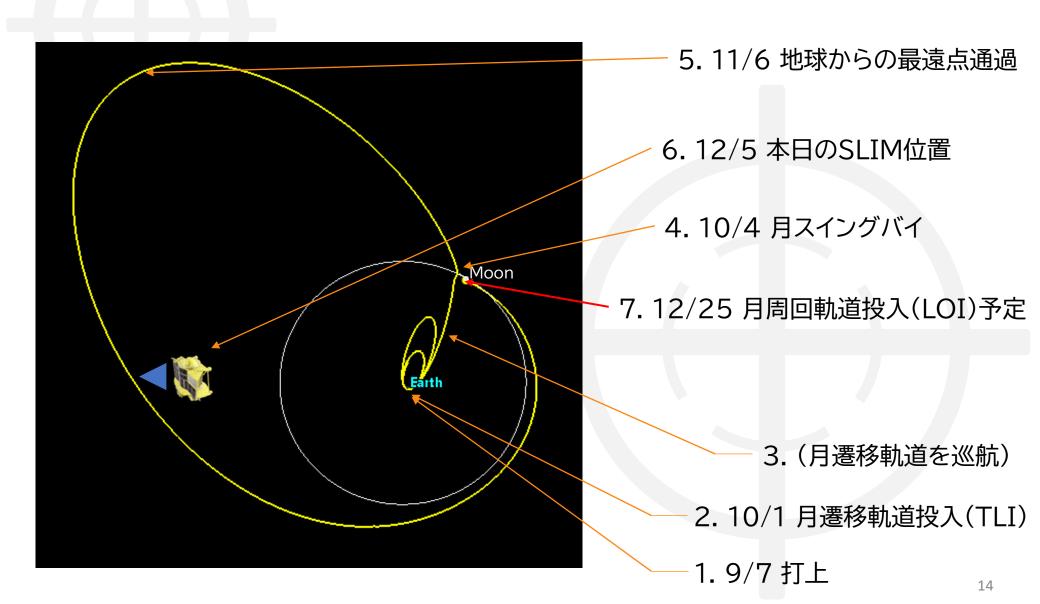
SLIMは、X線分光撮像衛星(XRISM)とのH-IIA相乗りにより、2023年9月7日 に種子島宇宙センターより打ち上げられ、地球を周回する楕円軌道に投入されました。

その後、自身の推進系により軌道変更を行う運用などを実施してきています。 軌道変更の様子を、動画によりご説明します。





### ▶ これまでの主要な運用実績及び今後の計画





### ▶ 月周回及び月着陸運用の概要

\*近月点高度 x 遠月点高度

12月25日 ··· 月周回軌道投入(600 x 4000km\*)

12月下旬~1月中旬 ··· 軌道修正、軌道高度変更(600 x 600km\*)

1月中旬 ··· 軌道高度変更(150 x 600km\*)

#### 1月19日(金)~20日(土)

※時間は全て日本標準時

22:40頃 軌道高度変更(15x600km\*、遠月点で噴射、半周し近月点へ)

00:00頃 着陸降下開始(動力降下フェーズ → 垂直降下フェーズ)

00:20頃 月面着陸

#### [Note]

- 着陸降下開始後は、着陸を中断して元の軌道に戻ることはできません。
- 着陸の制御は探査機が自律的に行い、運用としては探査機の状態モニタが基本となります。
- 着陸降下開始時の探査機速度は、秒速約1.8km(時速約6400km)。強い減速を行いながら飛翔し、約800km先にある半径100mの円内を狙って着陸します。
- 着陸精度を評価しピンポイント着陸の成否を判断できる時期については、概ね、着陸後1ヶ月程度以内を見込んでいます。



### ▶ 着陸時のSLIM CG画像

月着陸時、もし月面からSLIMを見上げることができたとすると、 こういう眺めになるはずです。





### ▶ 探査機の開発経緯

SLIMプロジェクト開発経緯概略は以下の通りです。

2003年頃のSELENE-B計画を源流として、今日に至るまで検討が続けられています。



2002年頃 SELENE-B計画

2012年 SELENE-B計画をスリム化 SLIM計画を提案

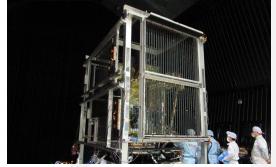
2016年 システム定義審査(SDR)

2016年 プロジェクト移行審査

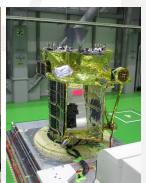
2018年 基本設計審査(PDR)

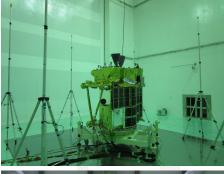
2019年 詳細設計審査(CDR)

2023年 開発完了審査(PQR)











フライトモデルのシステム試験

©三菱電機



### ▶ 関係する大学・機関、研究開発体制

JAXAをはじめとした、多数の大学と機関が参加し、これまでにSLIM実現のための様々な技術の研究・開発に取り組んできました。

























