



資料60-2-1  
科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
ISS・国際宇宙探査小委員会  
(第60回)

## 小型月着陸実証機 (SLIM)

### 月着陸の成果と 実証された技術について

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

着陸後、月面で航法カメラ(CAM-PX)により撮像された月面画像

着陸後、マルチバンド分光カメラによるスキャン撮像により得られた月面画像 (JAXA、立命館大学、会津大学)



## ▶ 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(2016年4月～)。

### 【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、「**画像照合航法**」「**自律的な航法誘導制御**」および「**細かく推力調整可能な推進系**」

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

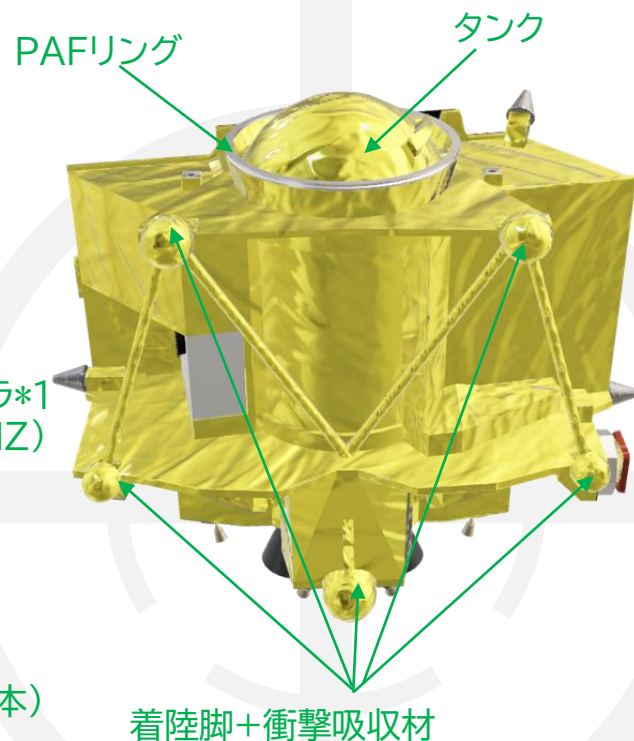
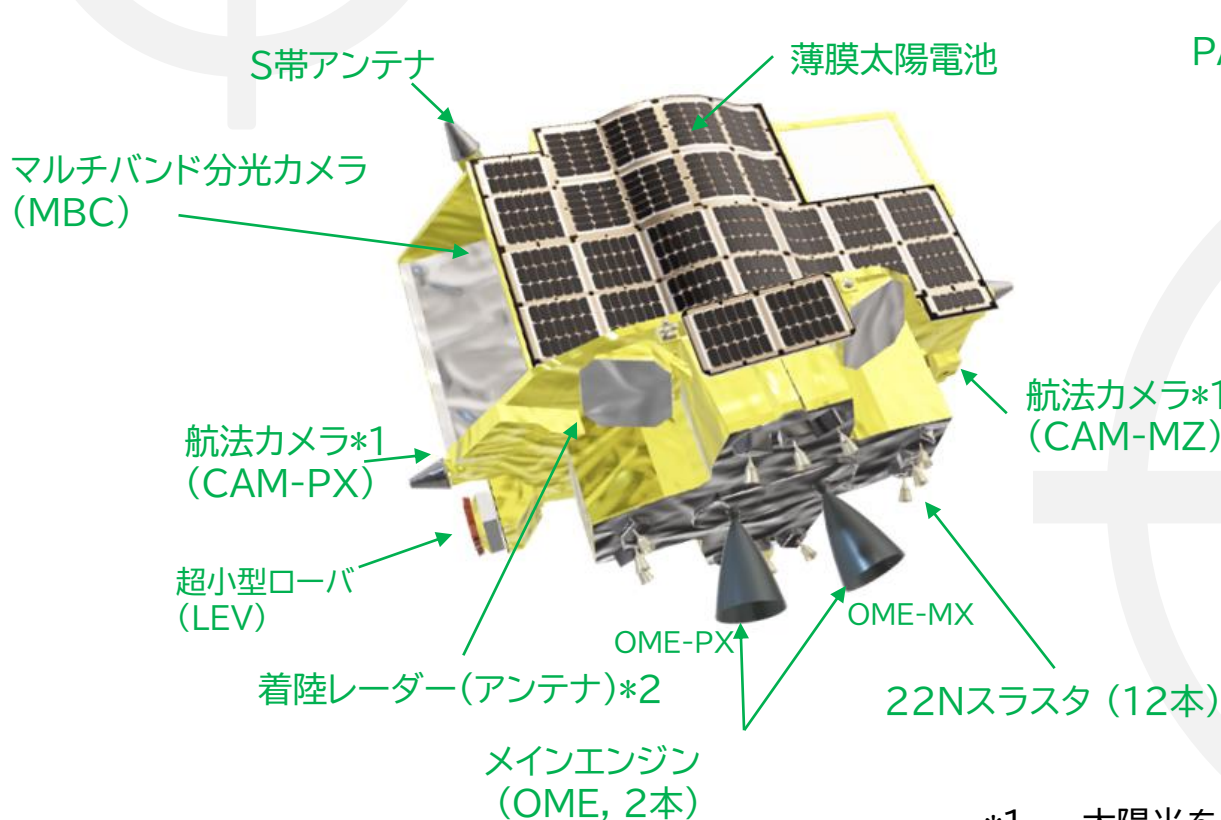
- 小型・軽量で高性能な化学推進システムの実現
- 宇宙機一般で中核をなす計算機や電源システムの軽量化



## ▶ SLIM探査機外観

- 質量:200kg(推薬なし) / 約715kg(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る



\*1 … 太陽光を光源とする可視光の輝度カメラであり、いわゆるアクティブセンサではない。

\*2 … 電波を送信し、その反射波から距離(高度)と速度を検出する(アクティブタイプだが、レーザ光ではなく電波を使用)



## ▶ 月面着陸・ピンポイント着陸技術実証の結果

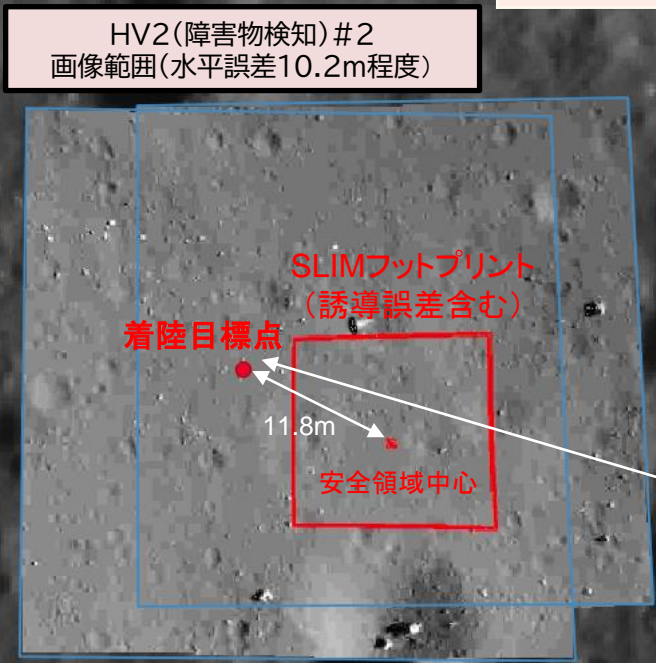
- ・SLIM探査機のピンポイント着陸を可能とする**キー技術である画像照合による高精度航法及び障害物検知回避機能は正常に動作した**。航法カメラ撮像画像から評価されるピンポイント着陸性能は、高度50m付近での2回の撮像でいずれも、**位置誤差10m程度以下**となっており、**十分なピンポイント着陸性能の達成が確認された**。なお2回目の障害物検知時にはメインエンジン異常により既に探査機は東に流れ始めていたと考えられており、実際の**ピンポイント着陸性能は3-4m程度だった可能性が高い**と考えている。
- ・**月面ピンポイント着陸の実現は世界初**、月面軟着陸成功は日本初（世界で5ヶ国目）

Chandrayaan-2:ISRO/SLIM:JAXA

シーケンス	想定高度	着陸目標点との水平距離
ホバリング2#1	50m	3.4m
ホバリング2#2	50m	10.2m

【各国の着陸機比較】※公開・報道情報を踏まえ整理

	SLIM	HAKUTO-R (M-1:1号機)	Chandrayaan-3	Luna-25	Peregrine Lander (M1:1号機)	Nova-C (IM-1:初号機)
機関	JAXA (日)	Ispace社 (日)	ISRO (印)	Roscosmos社 (露)	Astrobotic社 (米)	Intuitive Machines社(米)
打上げ時期 着陸結果	2023年9月 成功	2022年12月 失敗	2023年7月 成功	2023年8月 失敗(着陸せず)	2024年1月 失敗(着陸せず)	2024年2月 成功
着陸機等質量 ※打上げ時(燃料込み)	約715kg	約1,000kg	約3,900kg	約1,750kg	約1,480kg	約1900kg
※(燃料除く)	約200kg	約340kg	(不明)	約800kg	約480kg	約620kg
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 (着陸には不使用)	搭載
目標着陸精度 (km)	0.1km	数km ※同社記者会見に関する報道情報による	4km×2.4km	30km×15km	24km×6km	(詳細不明だが結果は数km)
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	民間月面着陸



55m程度

着陸地点

NASAの月周回探査機LROにより撮影された軌道上画像から推測されたSLIM探査機位置

なお上記以外に、中国の嫦娥5号が2020年12月1日に成功しているが、これを含めても、**2020年代に入ってからの世界における月面軟着陸の成功率は5割程度**。

\*撮像画像はChandrayaan-2画像に合わせてフィッティング済



## ▶ 超小型ローバ2機の月面活動成果

月着陸直前の高度約5m付近から、2機の超小型ローバLEV-1およびLEV-2を分離し、以下のような月面での動作を確認した。

- LEV-1、LEV-2は、それぞれ**月面での完全自律動作に成功**。また、**世界で初めて、複数ロボットの連携動作による月面探査**を達成。
- LEV-1は、跳躍 (ホッピング) および車輪による月面移動の実験を行った。
- LEV-2は、**SLIM探査機本体の撮像及びLEV-1を介した地球への画像伝送に成功**した。また、**世界最小・最軽量の月面探査ロボット**となった。

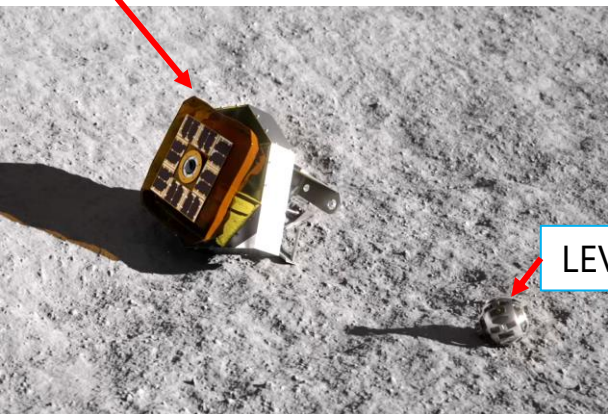


JAXA/タカラトミー/ソニーグループ(株)/同志社大学

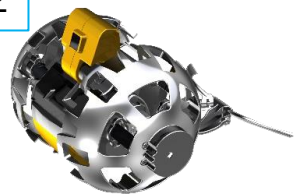
着陸直前に分離した2基の超小型ローバ (LEV-1、LEV-2) が連携して取得した月着陸後のSLIM探査機。LEV-2(SORA-Q)が、撮影した複数枚の写真の中からSLIMが映っていると思われるものを選んでLEV-1に近距離無線により送信、LEV-1が地球とダイレクト通信してその画像を地上局に送信した (この間、地上からのローバ運用は一切行っていない)。

LEV-1

JAXA/東京農工大/中央大学で共同開発  
質量は約2.1kg  
地球と直接通信可能



LEV-2



愛称はSORA-Q  
JAXA/タカラトミー/ソニーグループ (株) /同志社大学で共同開発  
質量は約0.25kg

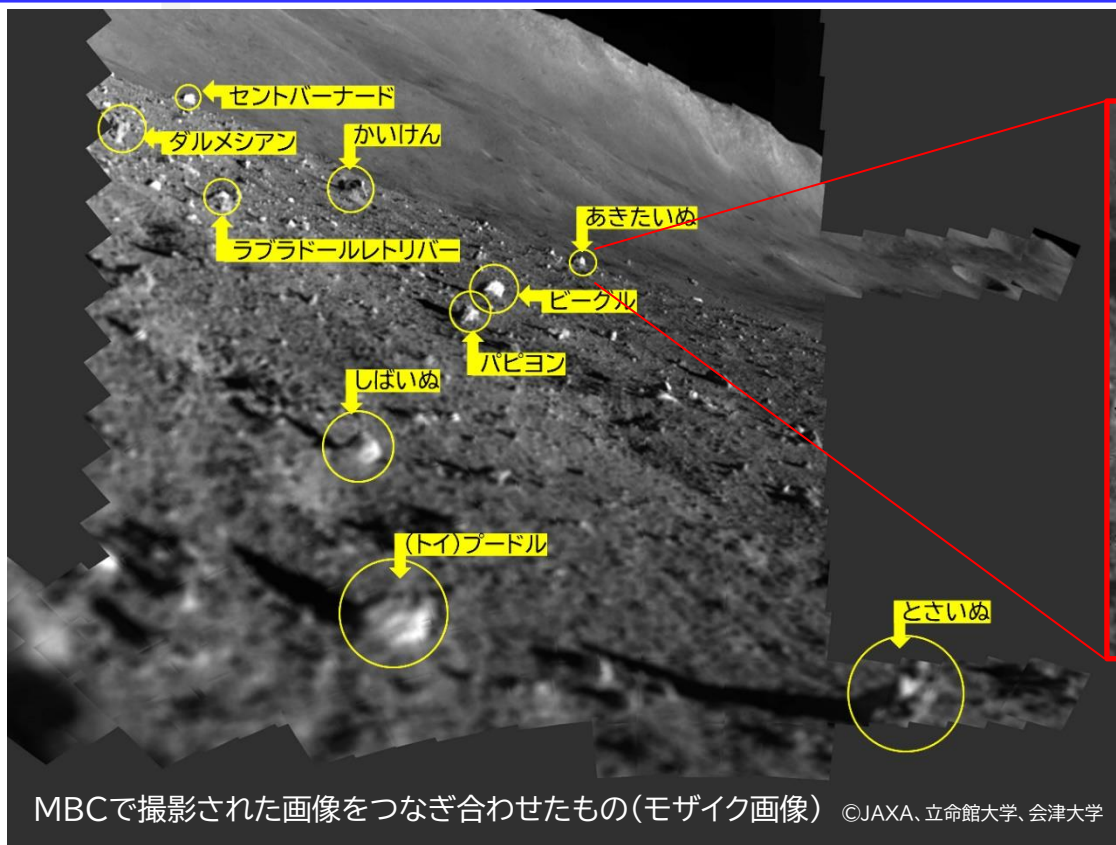
月面上の超小型ローバ (LEV-1、LEV-2) のイメージ



## ▶ 着陸後にSLIMが実施した月面科学観測の結果

- SLIM探査機の電力回復後にマルチバンド分光カメラ（MBC）によって観測を実施し、スキャン撮像から観測対象として選択された10個の岩石（左図）と、1バンド（近赤外線の波長1.65μm）で詳細観測された「あきたいぬ」（右図）。これら**10個の岩石について10バンドでの詳細観測が実施された**。現在、データの詳細解析が進められている。
- SLIM打上げ前の**目標としては1個の岩石に対する撮影であったことから、目標を超えて多くの対象のデータが得られた**。

現在詳細解析を実施中。月マントル由来と考えられるカンラン石について、その組成に関する情報が得られれば、月起源に迫る重要な手がかりとなる可能性がある。



「あきたいぬ」の1ショット画像 ©JAXA、立命館大学、会津大学

MBCのオートフォーカス機能により焦点を合わせており、結果として、「あきたいぬ」はSLIM探査機から約18mの距離に位置し、横幅が約63cmであるとの推定が得られている。

重力天体上での本格的な科学観測実施は日本初。月面での近赤外波長帯での岩石の分光画像取得は世界初



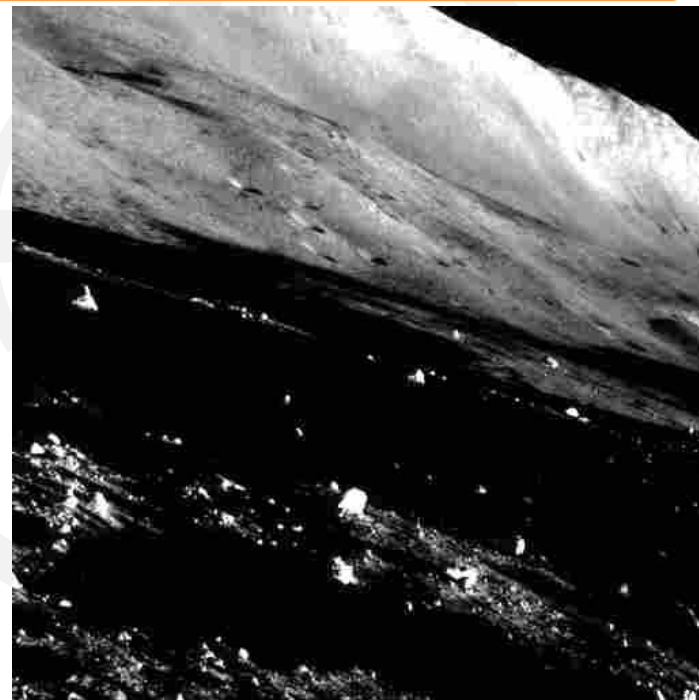
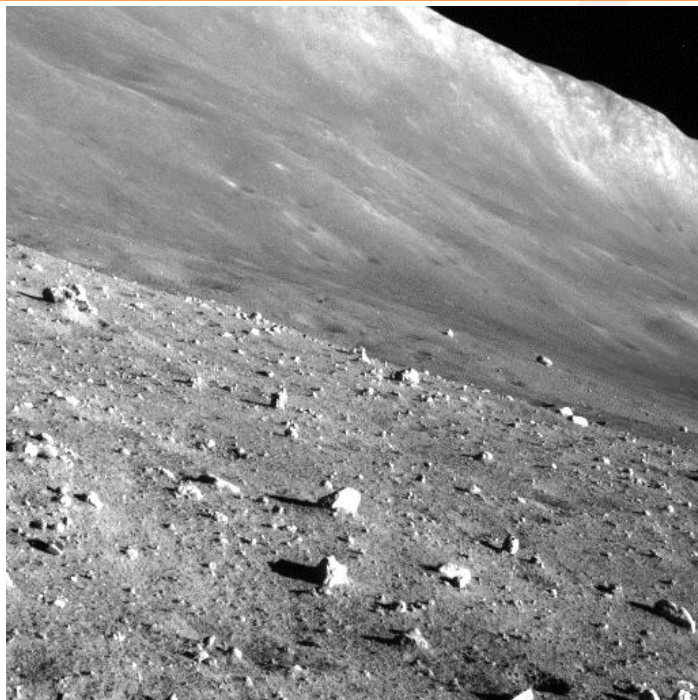
## ▶ 月面での越夜の結果

- 2024年1月31日に着陸地点付近が日没を迎えて探査機が冬眠状態に入った後、2月25日、再度探査機との通信を確立し、**越夜後の動作を確認**した。
  - ✓ 月は昼が14日間、夜が14日間続き、昼間は例えば110°Cといった高温環境、夜間は例えば-170°Cといった低温環境となる。
- 探査機は越夜を意図した設計ではないものの、ラジオアイソトープヒータやラジオアイソトープ電池等を持たずに越夜を果たした月着陸機の例は少ないことから（恐らく米国サーベイヤーのみ）、世界的にも貴重な例と考えている。
- さらに、3月28日にも再度、越夜後の探査機との通信を確立し、**2回目の越夜後にも動作を確認**した。

探査機が越夜を果たしたことにより、越夜後の探査機各部のデータ等から、今後越夜を目指すミッションに貢献しうる何らかの知見が得られる可能性がある。

1回目の越夜後、2回目の夜が始まる前に、SLIMに搭載されている航法カメラにより撮像した月面の風景。

- 左は2024年2月25日に撮像されたもので、月の午後の風景が映っている。
- 右は2024年2月29日に撮像された日没前の風景。





## ▶ SLIMで実証された主な技術

○ピンポイント着陸技術について月着陸で実証された。

- 航法カメラ画像から評価された**ピンポイント着陸性能は概ね10m程度であり、目標としていた精度100mを十分達成**することができた。
- 着陸降下中に実施された画像照合航法（異なる7領域で2回ずつ、合計14回）は、精度含めて全て正常に動作した。また、画像照合航法の反映を含め、自律的な航法誘導制御についても想定通り動作した。ピンポイント着陸実現は、これらの結果によるもの。

○探査機システムの小型軽量化に資する複数の技術について軌道上～月着陸で実証された。以下に例を挙げる。

- **日本の衛星・探査機として初めて薄膜太陽電池を本格採用し、月着陸後、また2回の越夜を行った後も、順調に稼働中**（2024年3月現在）（薄膜のフレキシブルさを活かした曲面形状での搭載は日本初）。
- 電源制御器や送受信機のフルデジタル化を達成した（**S帯フルデジタル送受信機を衛星・探査機に搭載したのは世界初**）。
- **燃料・酸化剤一体型タンクの開発**（新規開発したPTFE製ダイヤフラムも採用し、正常に機能した）、それを主構造とする探査機設計の採用（いずれも探査機としては日本初）
- 結果として、**これまで月面軟着陸に成功した着陸機の中では、恐らく世界で最軽量と推定される。**

○マルチバンド分光カメラ（MBC）では、以下のような工学的成果も得られている。

- **重力天体に着陸後、日本で初めて科学観測機器が動作。**
- **月惑星探査機に搭載された日本の観測機器として初めて、オートフォーカス、可動式ミラーが稼働。**
- **月面観測において、近赤外波長帯での分光画像を取得したのは世界初。**

○分離した超小型ローバLEV-1、LEV-2では、以下のような成果が得られている。

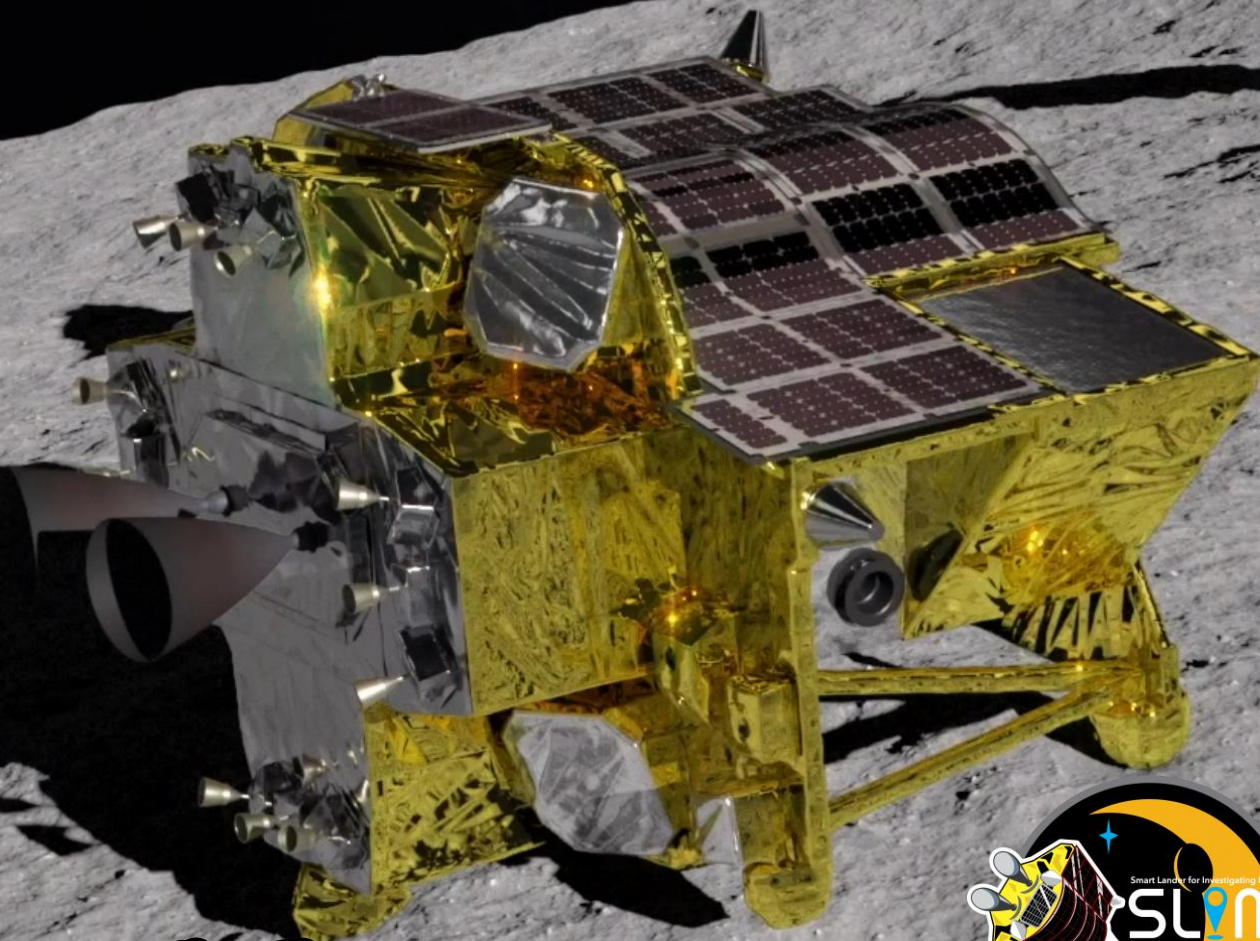
- **日本初の月面探査ロボットとなり、世界初の複数ロボットによる同時月面探査・完全自律ロボットによる月面探査を実現**
- **LEV-1は、世界初の跳躍（ホッピング）による月面移動、世界最小・最軽量通信機による地球との直接通信を実現。**
- **LEV-2は、世界最小・最軽量の月面探査ロボットとなった。**



これらの成果はいずれも、次世代の探査機開発に繋がる重要な実績



「降りやすいところに降りる」  
から  
「降りたいところに降りる」  
時代へ



応援ありがとうございました。



本資料に使用している画像、図のクレジットはJAXA（特にクレジット表記があるものを除く）