



SS



JAXA

2024/4/26
第46回サイエンティフィック・システム研究会(SS研)

小型月着陸実証機「SLIM」の 月面着陸とその意義

JAXA 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

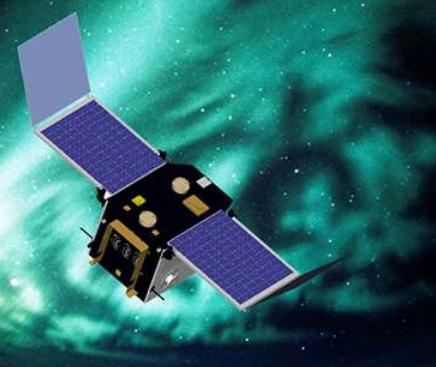


▶ JAXA宇宙科学研究所の紹介&自己紹介

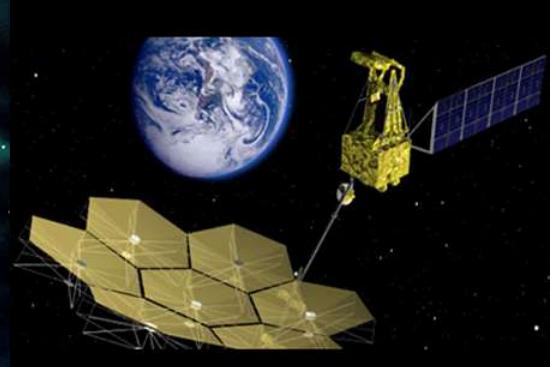
JAXA宇宙科学研究所は、JAXAの中で宇宙科学研究を推進している組織。歴史的には、日本初の人工衛星「おおすみ」を打ち上げた東京大学宇宙航空研究所の系譜であり、大学院教育や大学と連携した研究推進と共に、科学衛星・探査機の開発・運用を行っている。はやぶさ、はやぶさ2なども開発。所在地は相模原。



坂井の研究分野は人工衛星の姿勢制御や運動制御。また、科学衛星の姿勢制御系開発にも参加



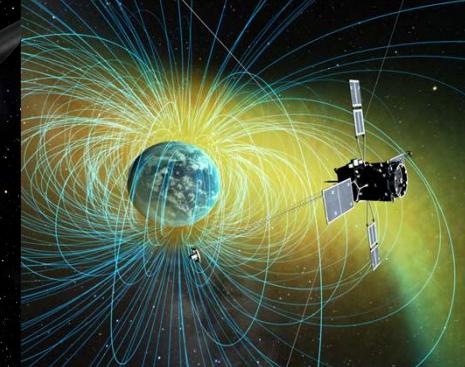
INDEX「れいめい」、2005打上



ASTRO-G、2011開発中斷



SPRINT-A「ひさき」、2013打上



ERG「あらせ」、2016打上

2016年からはSLIMプロジェクトマネージャーを併任





▶ 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



▶ 従来の月着陸機における“航法”的方式

月着陸機の位置・速度を把握する「航法」は、従来は、以下の様に行われている。

- 月周回中の着陸機に対して「軌道決定」を行い、着陸降下開始予定時刻の位置・速度を予測
- 予定時刻となりスラスタ噴射による減速を開始した後は、予測位置・速度を初期値とし、搭載している慣性基準装置(IMU、加速度・角速度を計測)の出力を時間積分して位置・速度を推定(“伝搬”)。
- 高度は、電波やレーザにより従来から降下中に計測できていたが、水平位置や速度については、これまででは計測方法がなかった(なお、月ではGPS電波は非常に微弱で、現状、GPS測位は難しい)。

「軌道決定」って、何？

- 地上局と着陸機が通信する際、電波往復時間から距離を、周波数ドップラーシフトから速度を計測
- これだけだと得られる情報は「2つ」。欲しいのは、3次元の位置・速度で「6つ」なので、情報不足。そのため、着陸機の「運動方程式」を使った推定アルゴリズムを構築して、位置・速度の推定を行う。
- そのため、長時間のデータが必要(=リアルタイムの位置推定はできない)
- また、この推定は現状、地上側でしかできない



慣性基準装置(IMU)の例



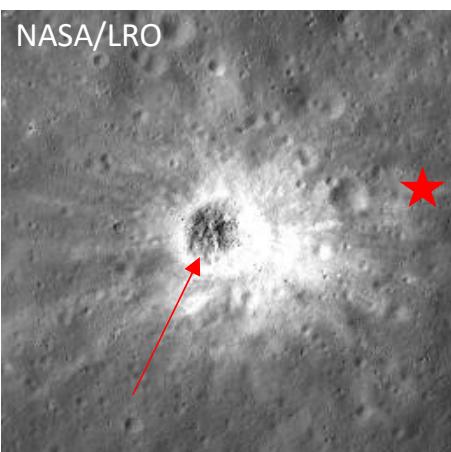
©NORTHROP GRUMMAN



▶ 従来の月着陸機における“航法”的限界

結果として、従来の月着陸機の着陸精度は、数km～10数km程度に留まっていた。

- 軌道決定、およびそれに基づく予測によって生じる誤差
- IMUにより“伝搬”することで生じる誤差(時間積分するので、僅かな誤差でも蓄積していく)
- 「画像データ」に付けられている位置情報の誤差
 - 通常、着陸地点は「画像データ」を見ながら決める(“このクレータの横”)
 - 「軌道決定」やIMU伝搬で得られるのは、月面上の緯度や経度
 - ところが、「画像データ」に付けられている位置情報には誤差がある。これらの画像は月周回機(かくや、LRO、チャンドラヤーン2等)が撮影したものだが、撮影時の位置は、結局、その月周回機の「軌道決定」でしか分からぬため。
 - 従って、「軌道決定」やIMU伝搬だけで着陸すると、着陸したかった“このクレータの横”には降りられない可能性がある。

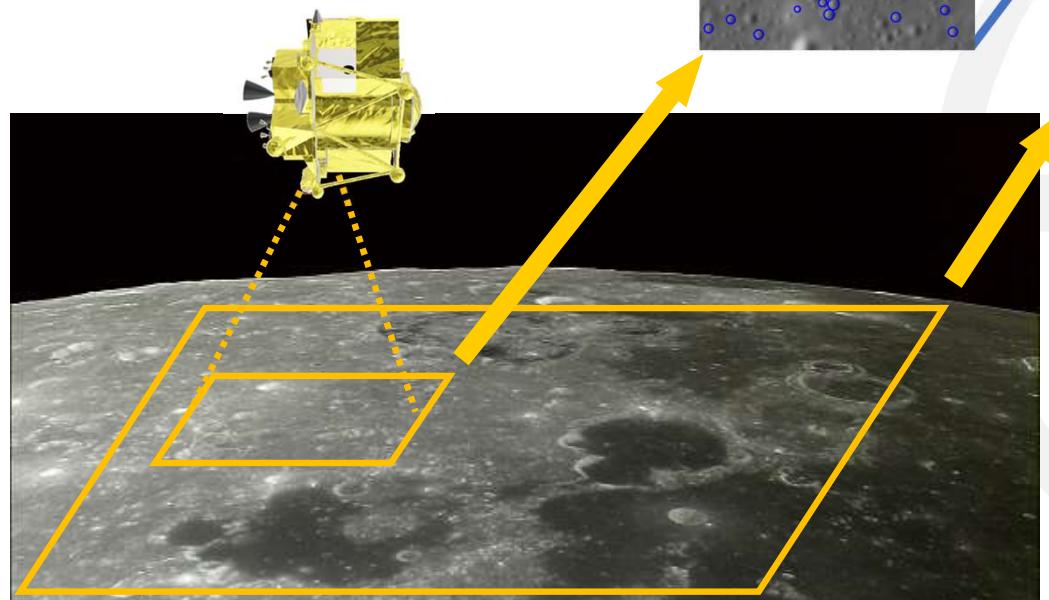
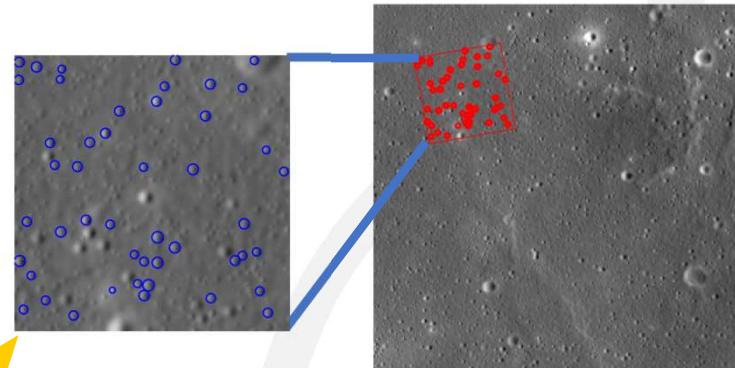




▶ ピンポイント着陸へ向けて:画像照合航法

SLIMは「画像照合航法」により、着陸降下中、探査機自身が位置・速度を高精度に推定し、軌道を修正することでピンポイントな着陸を実現する。

1. 撮影した画像を処理し、「どこがクレータか」を抽出
(クレータ抽出)

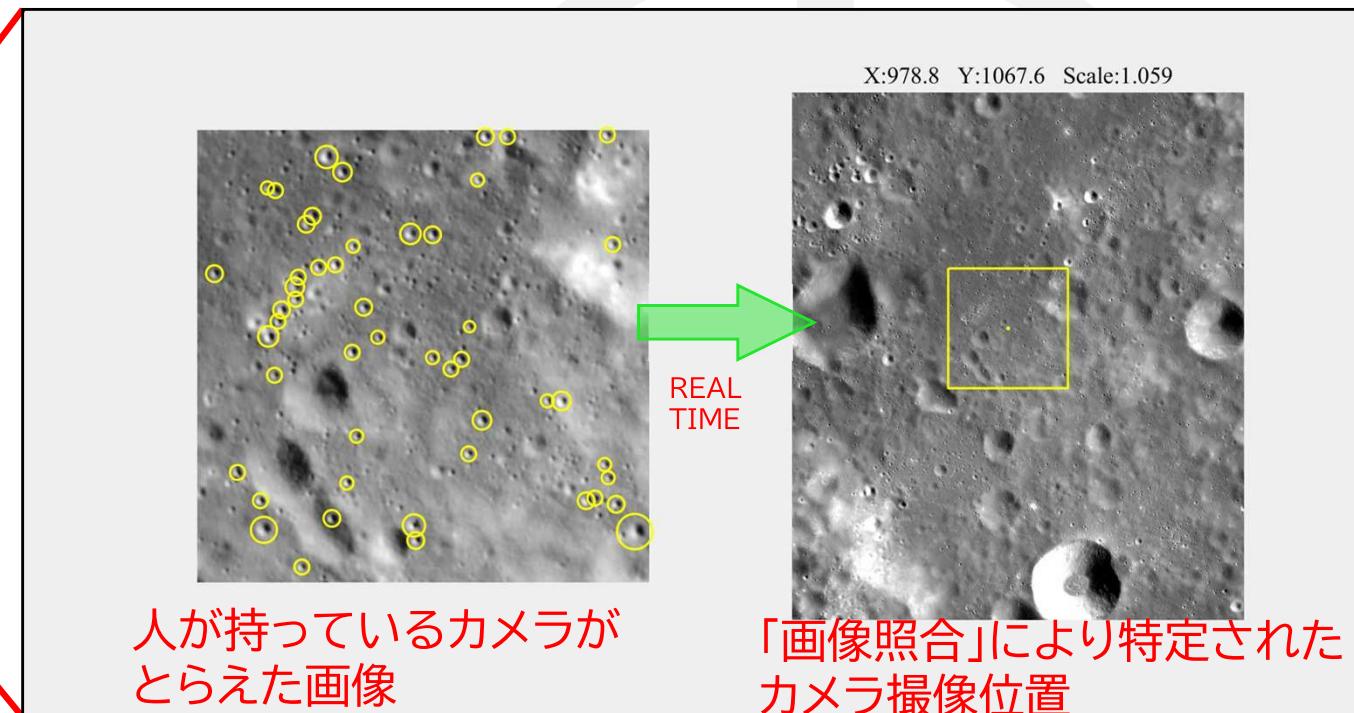


2. ありえる探査機位置を含む広い領域の地図から、抽出されたクレータパターンと一致する場所を特定
(クレータマッチング)



▶ピンポイント着陸へ向けて:画像照合航法

- 「画像照合航法」は着陸降下の制御に用いるため、ほぼリアルタイムの処理が必要となる。
- 一方で、現状の宇宙用CPUは、地上用と比べておよそ1/100程度の能力しかない。
- そこで、宇宙用FPGA上で1~2秒の処理時間で済む画像処理アルゴリズムについて、大学の専門家と共に長年研究開発し、その成果によって実現することができた。



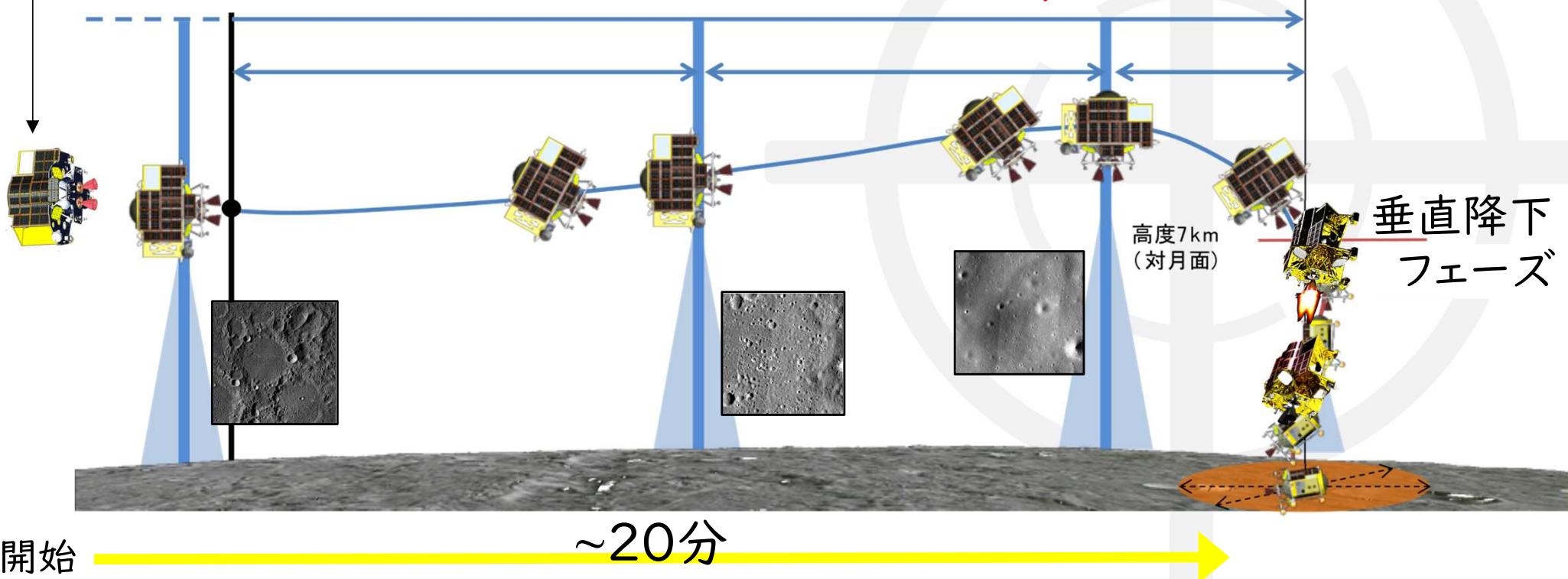
2018年 JAXA宇宙科学研究所 特別公開におけるデモンストレーション



▶ SLIMの着陸降下シーケンス / 前半 = 動力降下フェーズ

高度15km付近から、最終降下開始

動力降下フェーズ：MAX 1700 m/秒

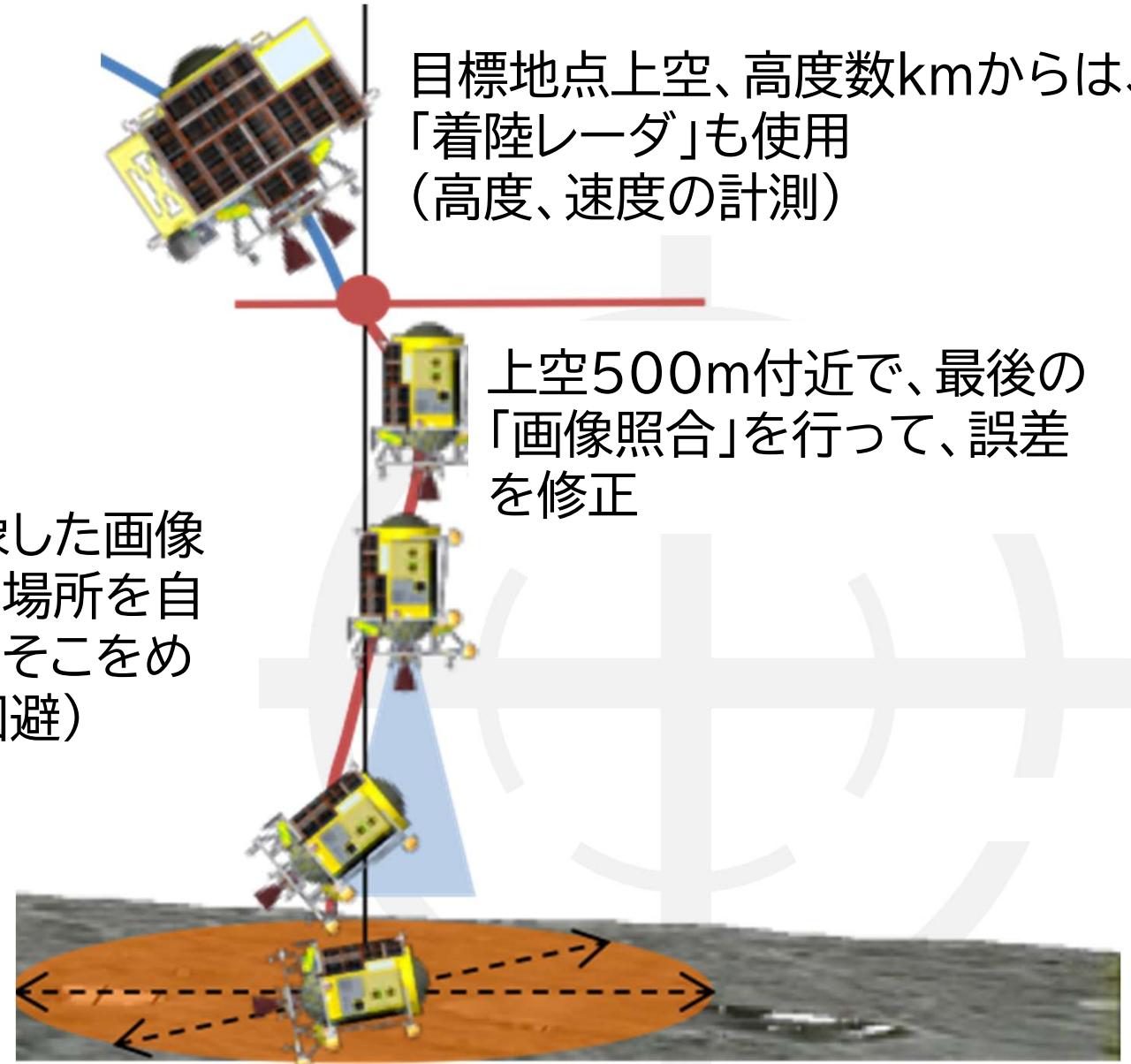




着陸直前には、2つの
小型ロボットを分離！

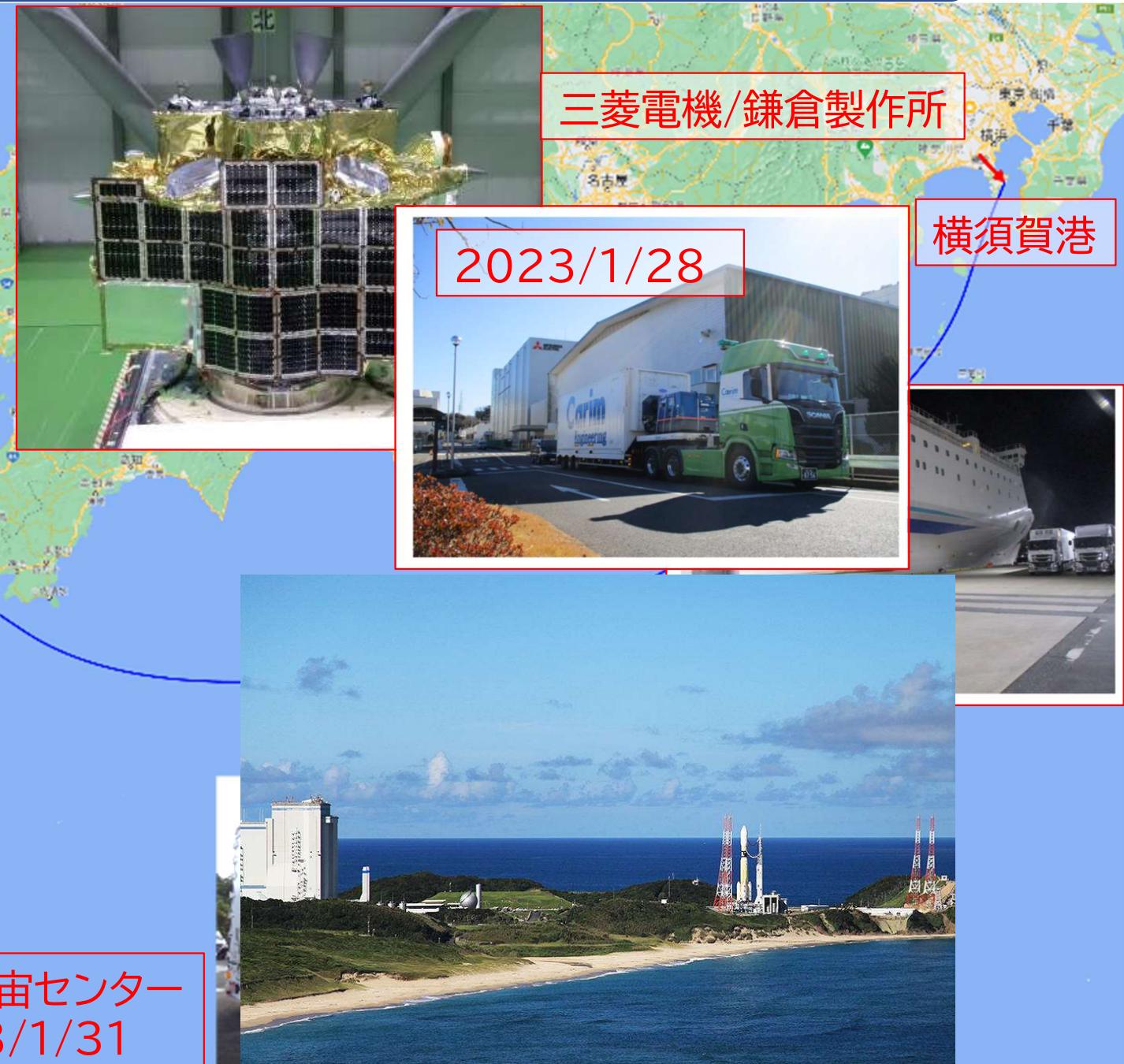
着陸下シーケンス / 後半 = 垂直降下フェーズ

上空50m付近で撮像した画像
から、なるべく安全な場所を自
分で探し出し、最後はそこをめ
がけて着陸(障害物回避)





▶ SLIMの旅路～種子島宇宙センターへ～



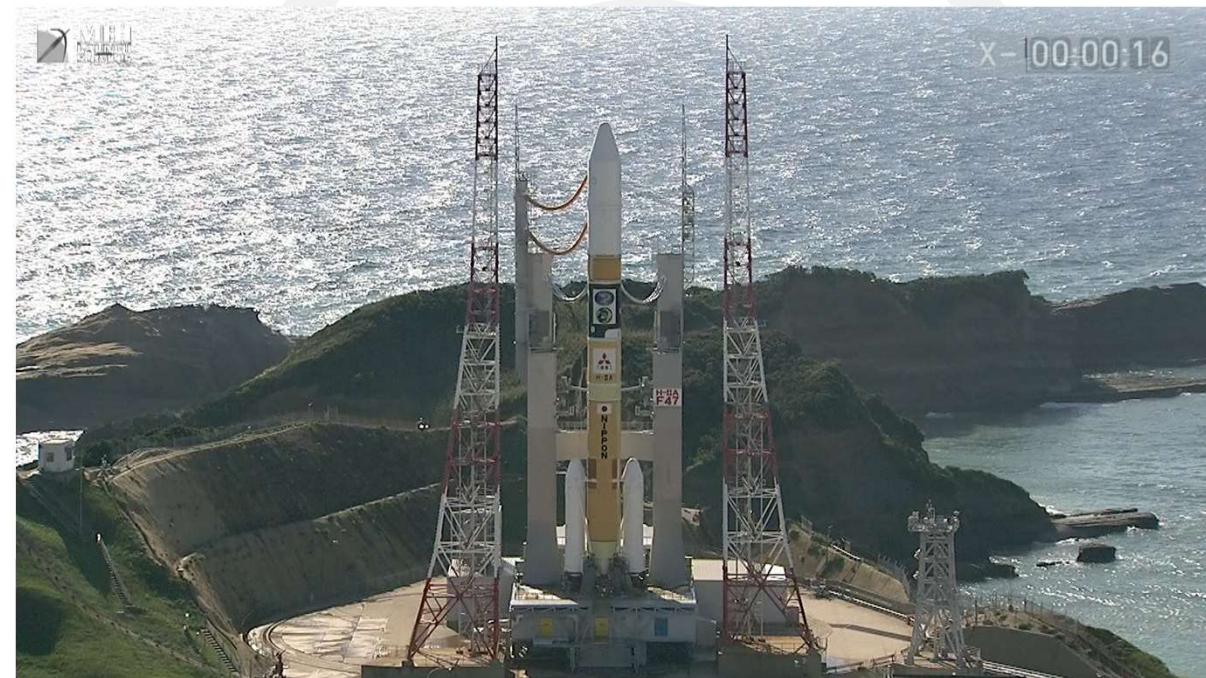
種子島宇宙センター
2023/1/31



▶ 打上(2024年9月7日)



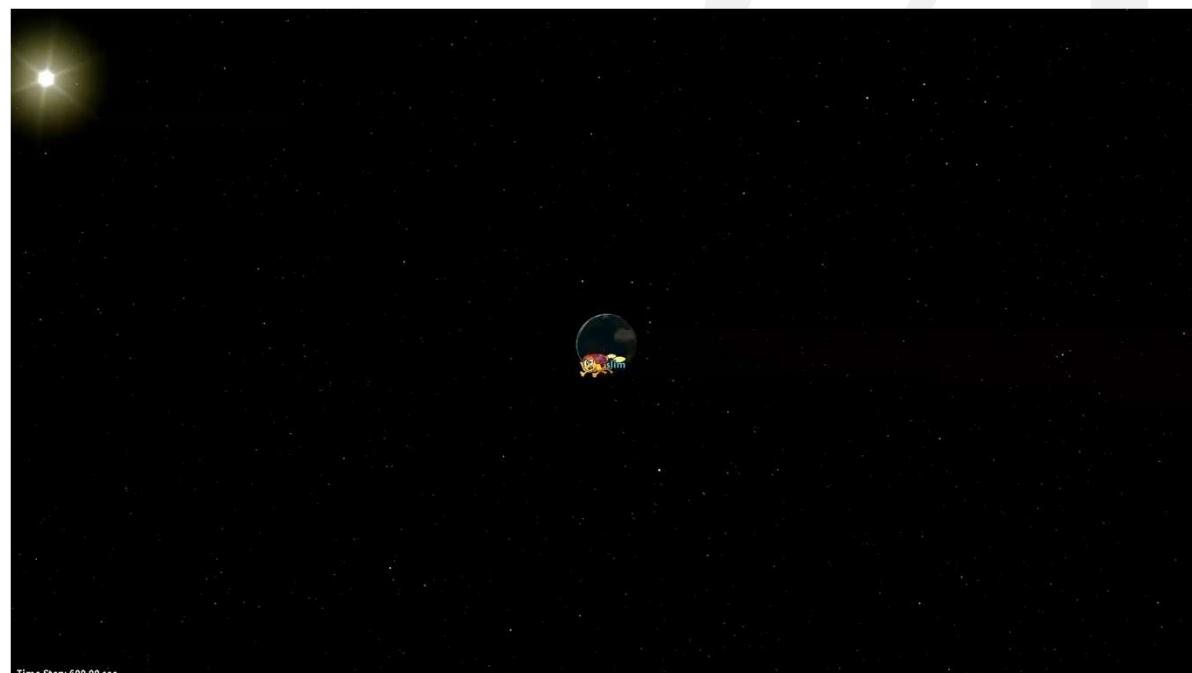
H-IIAロケットによる打上
(X線分光撮像衛星XRISMとの
デュアルローンチ)





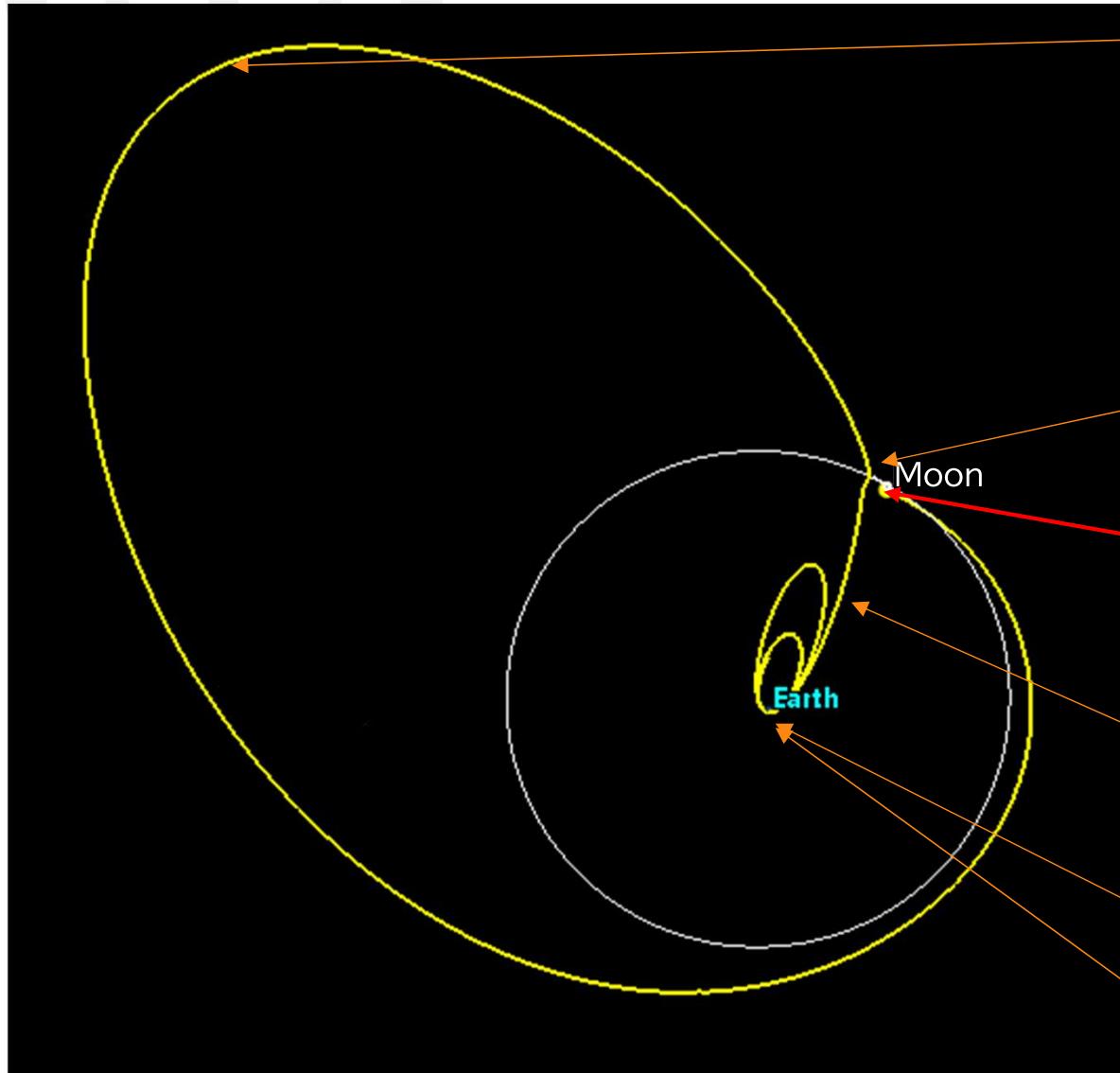
▶ 打上後/月への旅路

- ▶ 打ち上げ後は、各機器・各機能のチェックアウトを行いながら、所定のタイミングで軌道変更(“ ΔV ”)を行つて月へ向かっていく。
- ▶ 月へ向かう軌道には様々な種類があり、直接向かう軌道を採用する場合、打上から数日で到達することも可能(例えば、米国IM-1ミッションの月着陸”NOVA-C”は、2024/2/15打上、2/21月周回軌道投入)。
- ▶ SLIMでは、小型軽量化のために推薄件消費量が最小となるような軌道設計を行つており、そのため、打上から月周回軌道到着までは概ね4ヶ月弱程度であった。
- ▶ 軌道変更の際は一般に、所定のタイミング、所定の姿勢で、所定量のスラスタ噴射を行う。計画立案は事前の軌道決定値を元に地上で行い、立案された計画を予め探査機に送信することで実施する。





▶ 打上後/月への旅路



5. 11/6 地球からの最遠点通過

4. 10/4 月スイングバイ

6. 12/25 月周回軌道投入(LOI)

3. (月遷移軌道を巡航)

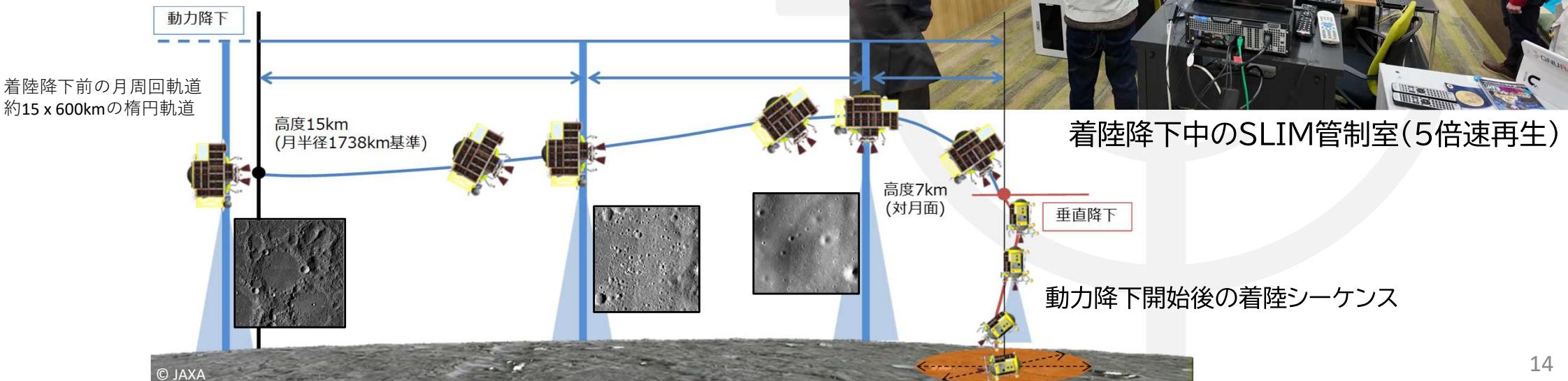
2. 10/1 月遷移軌道投入(TLI)

1. 9/7 打上



▶ 着陸降下開始！(2024/1/20 0時頃)

- 一旦メインエンジンによる逆噴射を開始すると、その後は、中断もやり直しもできなくなる。
- そのため、逆噴射開始前の画像照合航法(3つの領域で各2回ずつ)結果の正常と、全ての機器動作等の正常を確認した上で、1月19日 23時59分頃、着陸降下開始を最終的に判断した。
- その後、登録された計画に従って、23時59分58秒からメインエンジンの逆噴射を開始、SLIMは着陸降下を開始した。



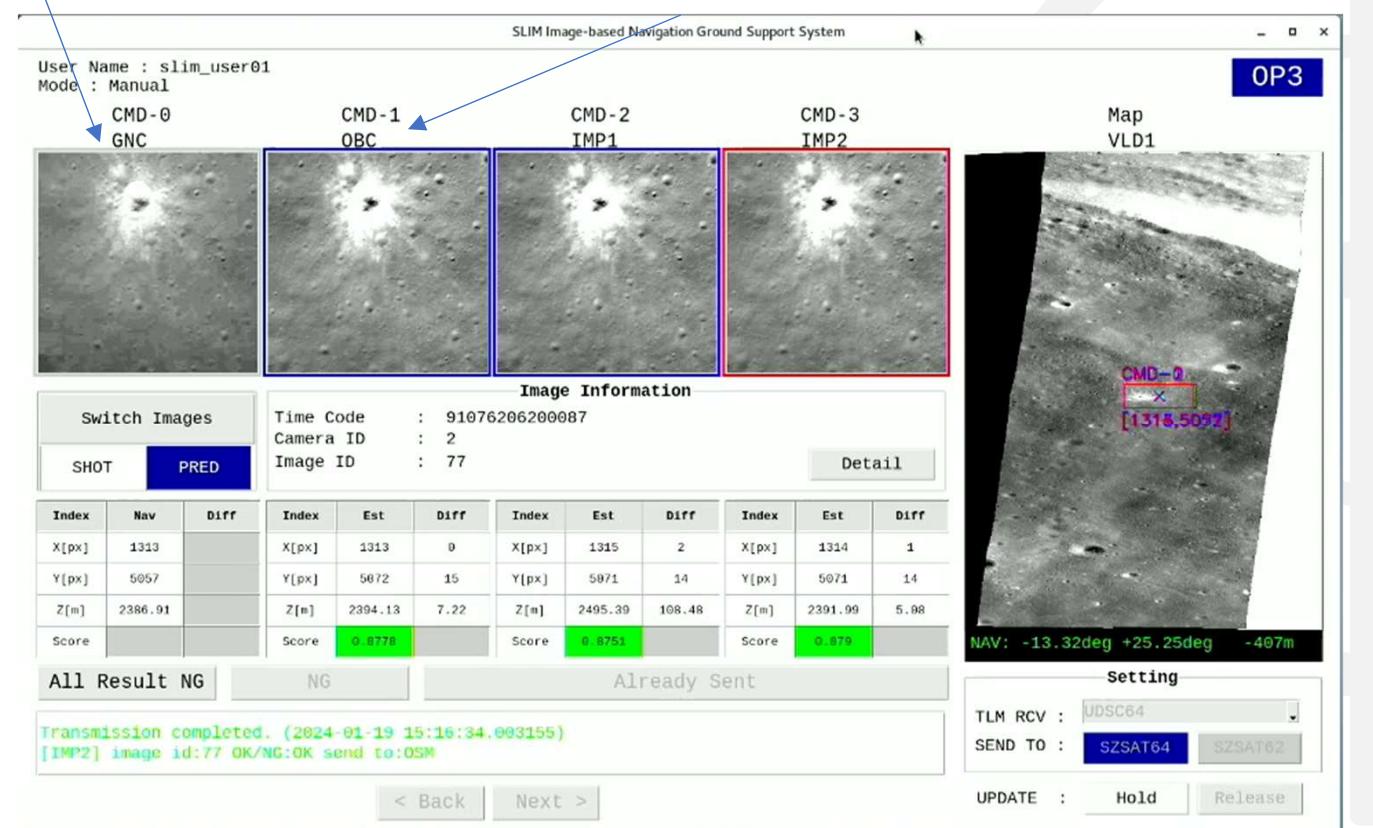


▶ 高度50m付近までの評価 / 画像照合結果

- ▶ 全7領域について2回ずつの画像照合航法が探査機上で実施され、いずれも正常に完了した。
- ▶ 異常時の地上支援を目的として、探査機から送信される画像を元に、より計算量の多いアルゴリズムを用いた画像照合を地上の計算でも実施していた。
- ▶ いずれも整合する結果であり、14回の画像照合航法の結果は全て正確であったと判断している。

撮影された月面画像

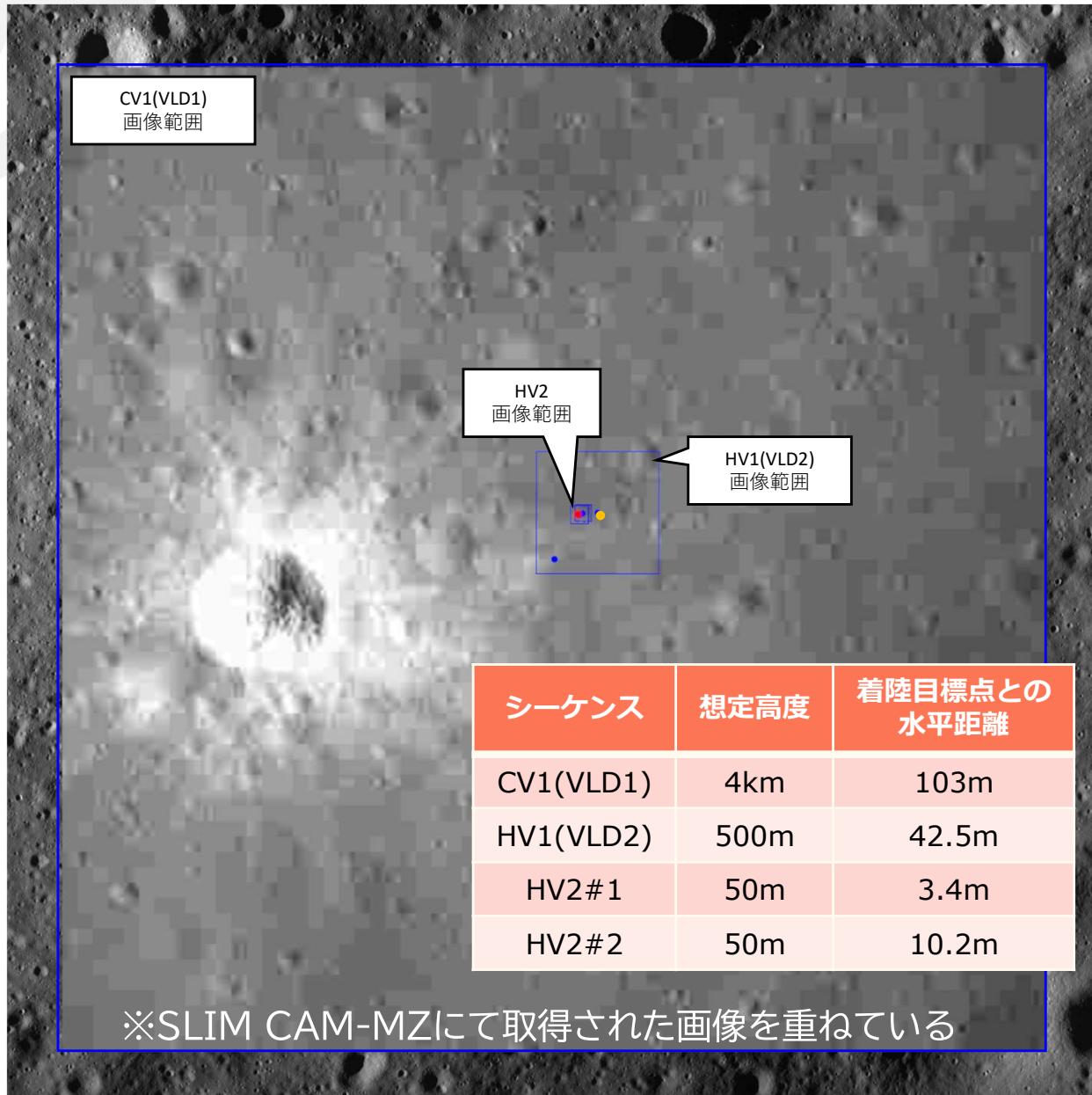
オンボード画像航法で推定された位置近傍の月面地形図(CG)





▶ 高度50m付近までの評価 / 着陸目標地点へ向けて

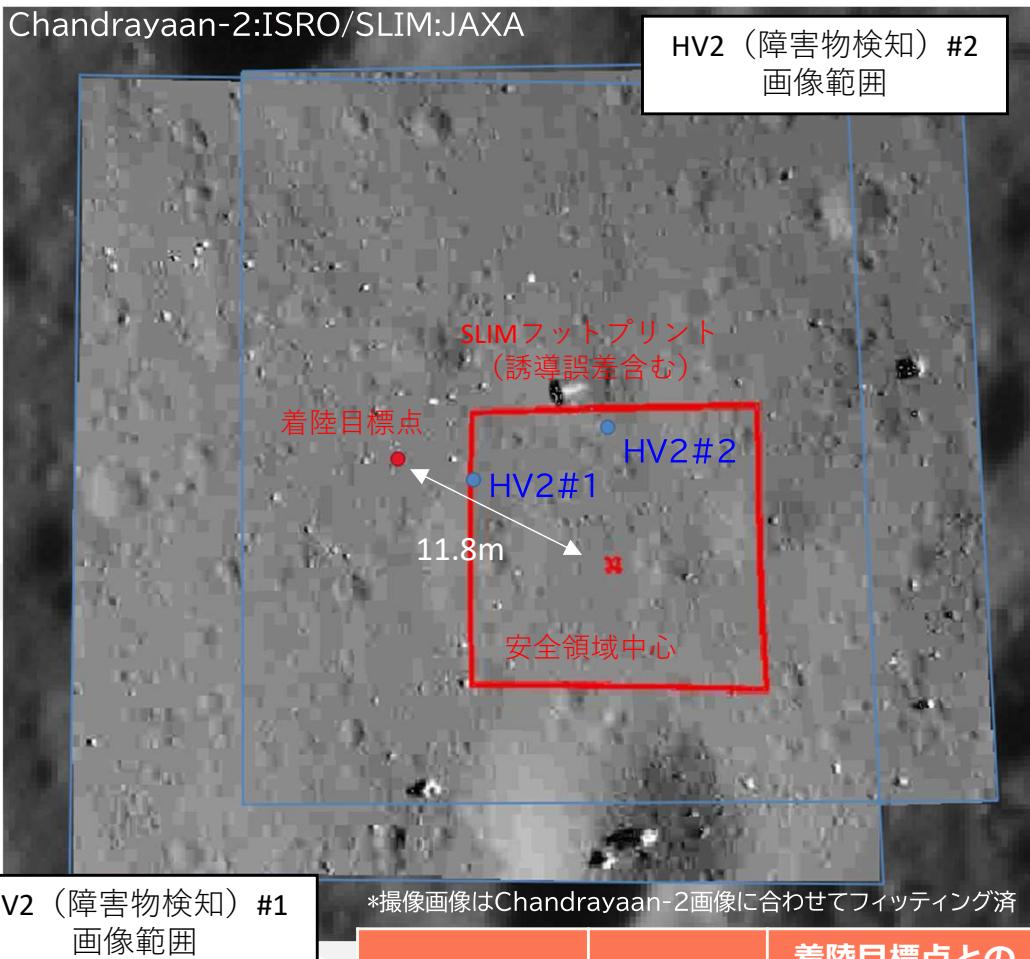
Chandrayaan-2:ISRO/SLIM:JAXA





▶ 高度50m付近までの評価 / ピンポイント着陸精度評価

- 右下図は、障害物回避時の画像付近を拡大して示したもの。青い×点が、1回目(#1)、2回目(#2)の撮像画像(青枠)の中心位置を示しており、この位置がSLIMの水平位置に相当し、その着陸目標地点からの距離を右下表に示している。
- この図から、障害物検知実施中の位置精度は、#1で3~4m程度、#2で10m程度だったと推定される。
- 前述の通り、この高度付近以降は着陸安全性を優先して着陸目標が設定される(障害物回避)。その意味で、ピンポイント着陸精度としては、概ね10m程度以下と評価している。
- さらに、#2については既に後述する異常事象により東へ流されている可能性が高く、実際のピンポイント着陸精度は3-4m程度だった可能性が高い。



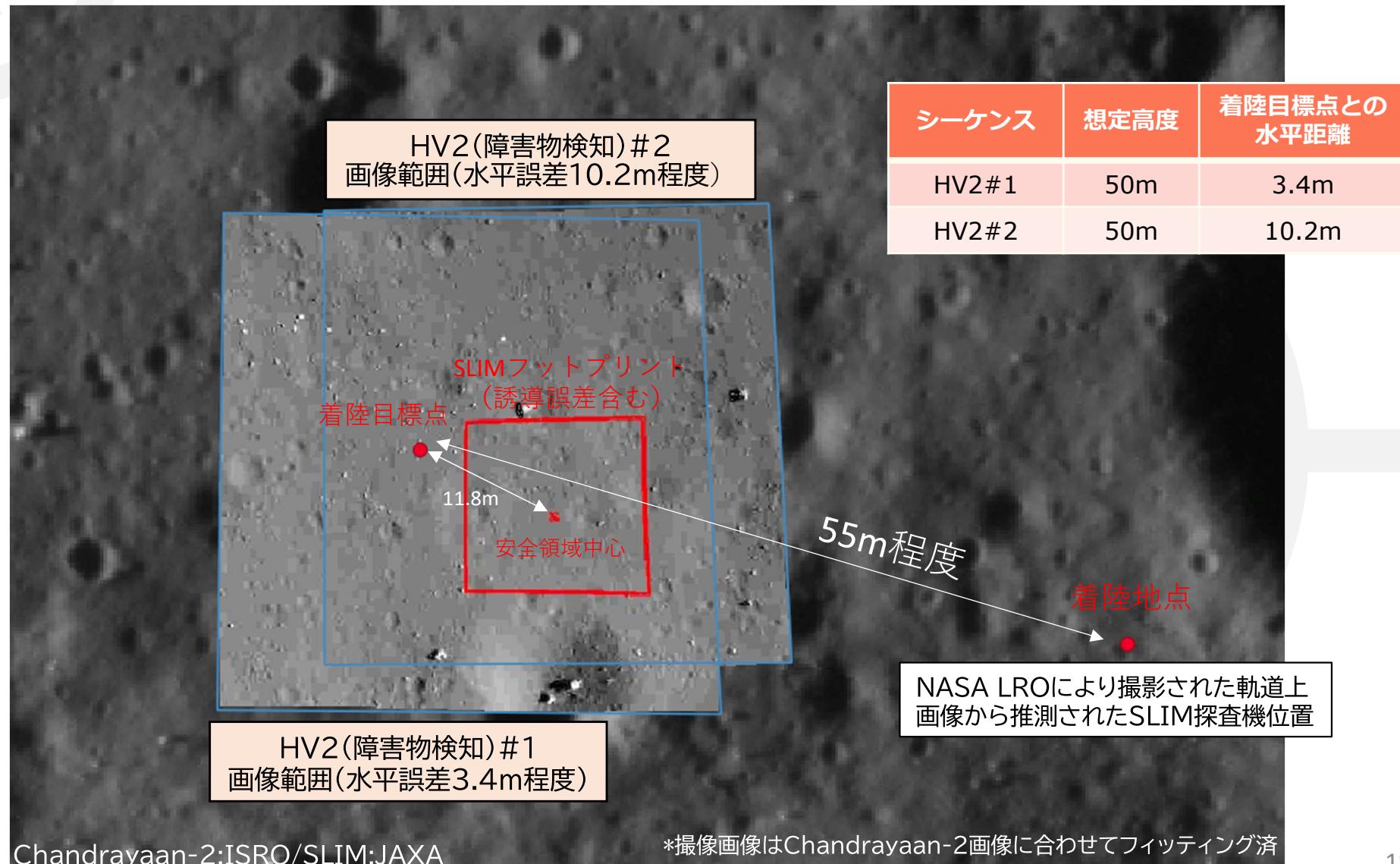
障害物回避以降は、図中の“安全領域中心”を目指した着陸へと移行する。着陸目標地点への正確な着陸より、障害物回避による安全性を優先するため(今回は着陸目標地点から11.8m離れた地点を目指すことになる)。従って、ピンポイント着陸精度については、障害物回避前の精度で評価することが、実力を評価することになる。

| シーケンス | 想定高度 | 着陸目標点との水平距離 |
|--------|------|-------------|
| HV2 #1 | 50m | 3.4m |
| HV2 #2 | 50m | 10.2m |



▶ 推定されている着陸地点

着陸直前、高度50m付近で2本あるエンジンのうち1本に異常が発生、結果として少し東に流れながら着陸した。但し降下速度は十分低く、SLIMは着陸後も健全に動作した。





▶ 着陸直後の状況

- 着陸後の姿勢は、メインエンジンが上を向き、太陽電池パネルが西を向いた姿勢と推定された(右図)
- 着陸は月面上の“午前中”であり太陽は東に位置していたため、着陸時点では太陽電池からの電力発生が失われた状態となった。そのため、バッテリ残量をモニタしながら、所定の手順に従って着陸降下中のデータをダウンロードし、科学観測機器の運用を一部実施した後、コマンドによりバッテリを電気的に切り離す措置を行った(短絡故障による探査機永久故障を避けるため)。
- 結果、探査機は一旦電源オフとなった(1/20 2:57頃)



提供:JAXA / CG製作:三菱電機エンジニアリング

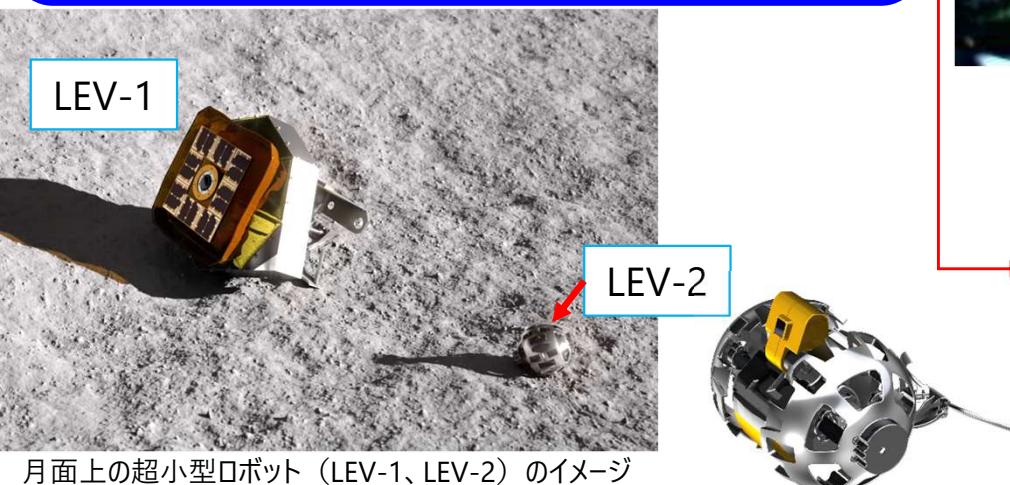
推定された着陸位置及び姿勢から作成したCG画像



▶ 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/同志社大学

着陸直前に分離した2基の小型ローバ(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)。



▶ 超小型ローバLEV-1 / 跳躍移動の様子(※地上実験)

- 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(恐らく月面から地球と直接通信したものとして世界最小)
- 小型ローバでは、複雑な地形の踏破性が課題となる。
- 月重力が地球重力の1/6程度であることを活かし、跳躍移動することでローバの大きさに対して大きな岩石等も踏破できることが期待される。
- 跳躍後は、次の跳躍方向を調整して再度跳躍することが可能



※月の重力は地球の1/6なので、月ではこの実験の約6倍の跳躍量となる

クレジット：JAXA／東京農工大、中央大学



▶ マルチバンド分光カメラによる「特別な石」の観測

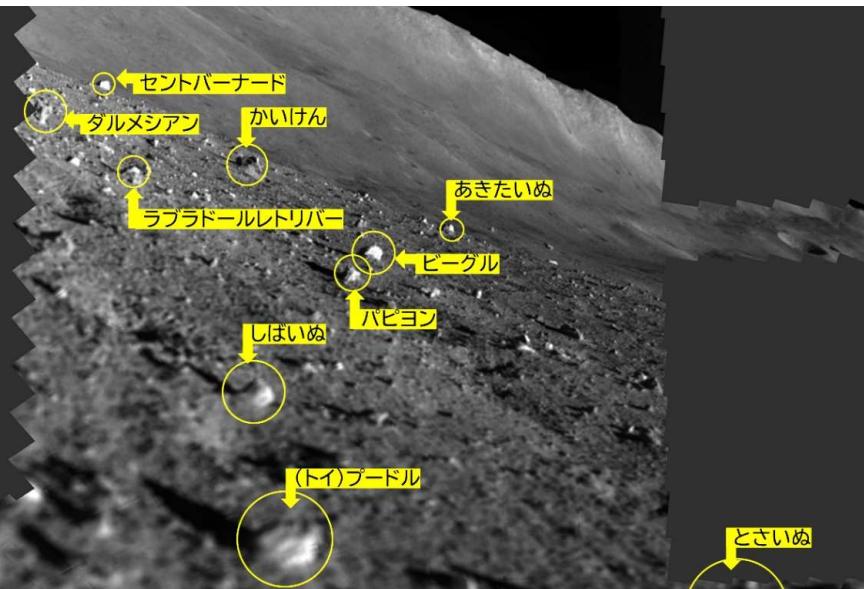
- 電力回復後にマルチバンド分光カメラ(MBC)によるスキャン撮像を実施、観測対象として選択された10個の岩石。これら**10個の岩石について10バンドでの詳細観測が実施された。**



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

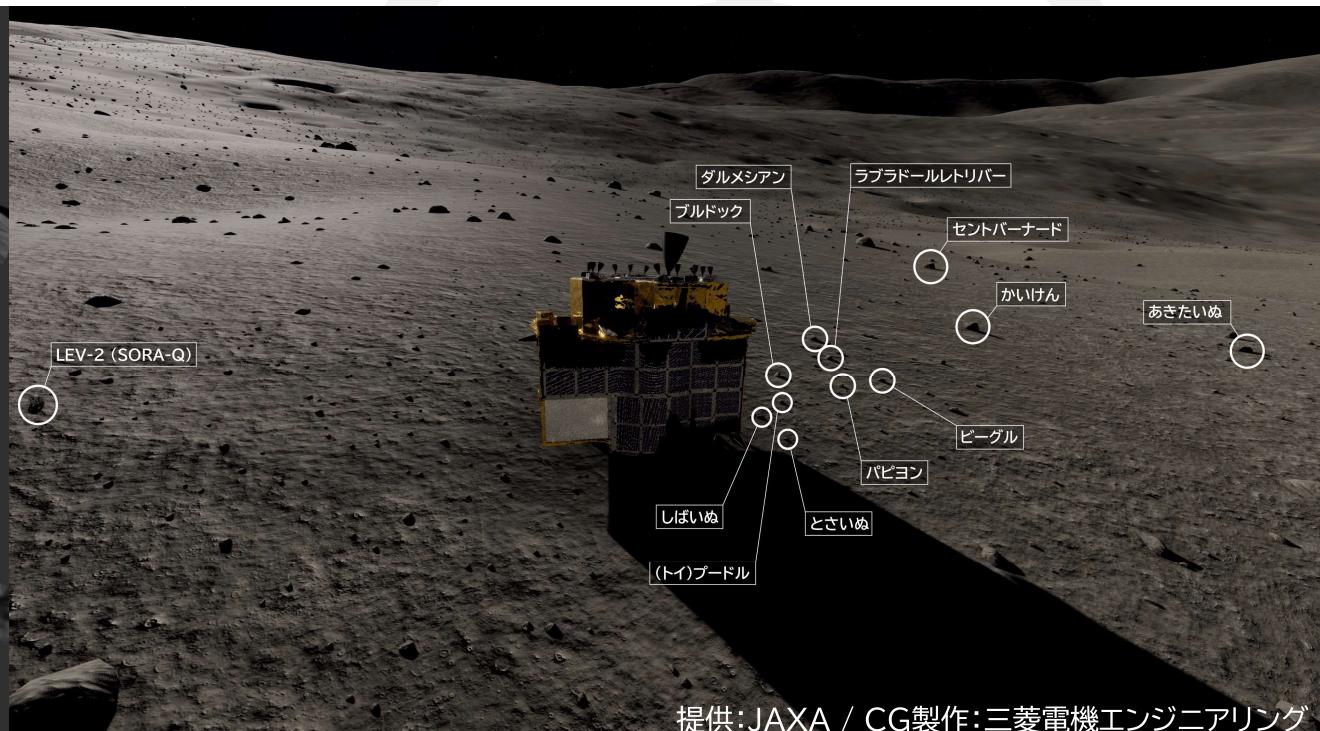
重力天体上での本格的な科学観測実施は日本初。
月面での近赤外波長帯での岩石の分光画像取得は世界初

「月マントル由来と考えられるカンラン石」



MBCで撮影された画像をつなぎ合わせたもの(モザイク画像)

©JAXA、立命館大学、会津大学



提供:JAXA / CG製作:三菱電機エンジニアリング

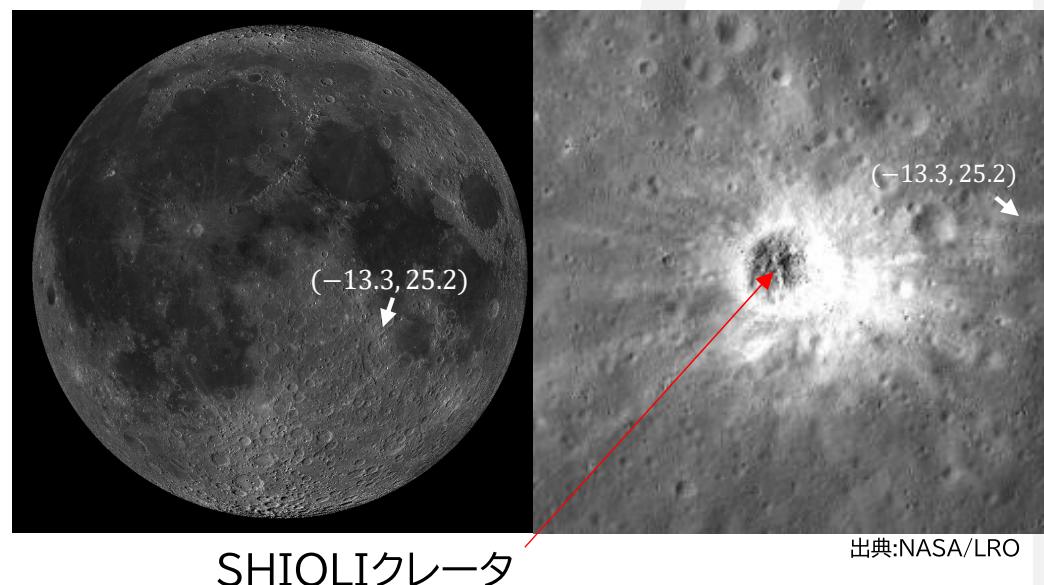
各岩石等の位置関係の推定(CG)



▶「月マントル由来と考えられるカンラン石」は、どこに？

- ▶「月マントル由来と考えられるカンラン石」の大まかな分布は、月周回機「かぐや」等による軌道上からの化学観測により判明しているが、月の表側には高々40カ所程度しかない。
- ▶隕石が衝突してクレータができる際に月内部から噴出する。太陽風の影響を長年受けると組成が変化するため、比較的新しいクレータ周辺にしか存在しない。
- ▶従って、いわゆる「海」には存在せず、従ってこれまで月表面で観察された例はない。
- ▶すなわち、クレータ近傍に安全に降りるための「ピンポイント着陸」技術なくしては、このようなカンラン石近傍に着陸して観測することはできない(ピンポイント着陸ができる初めて実現できる科学観測)。

SLIMが設定した着陸目標地点

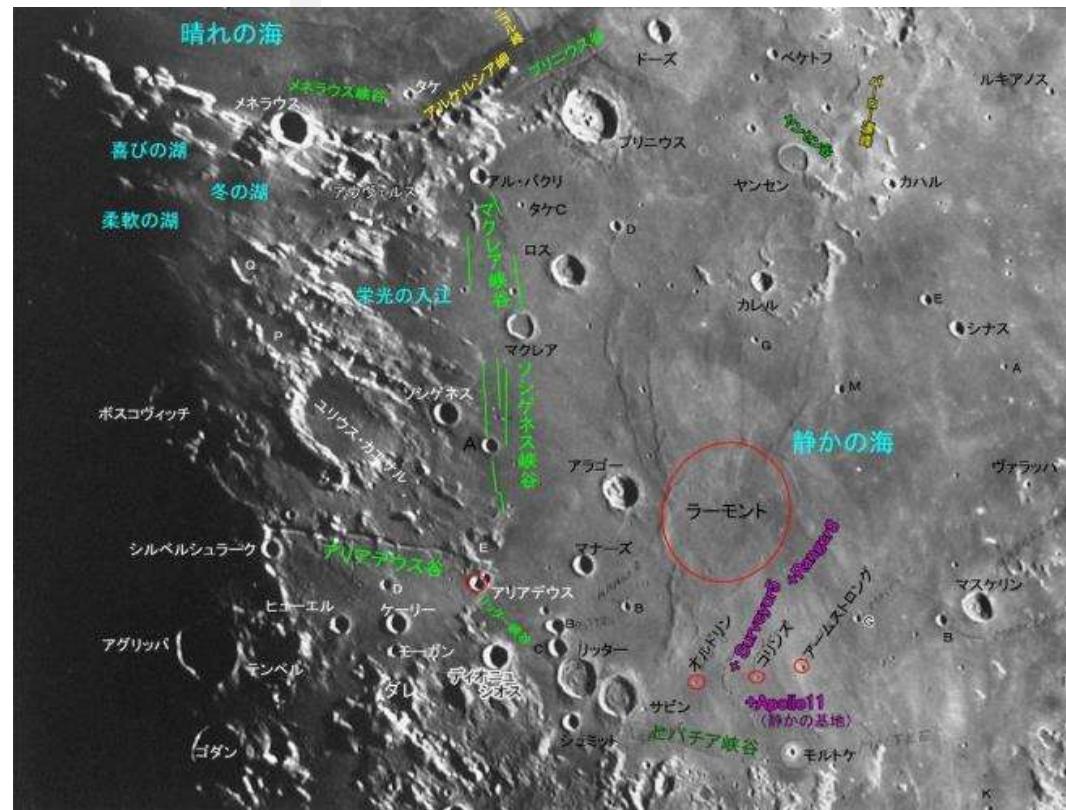




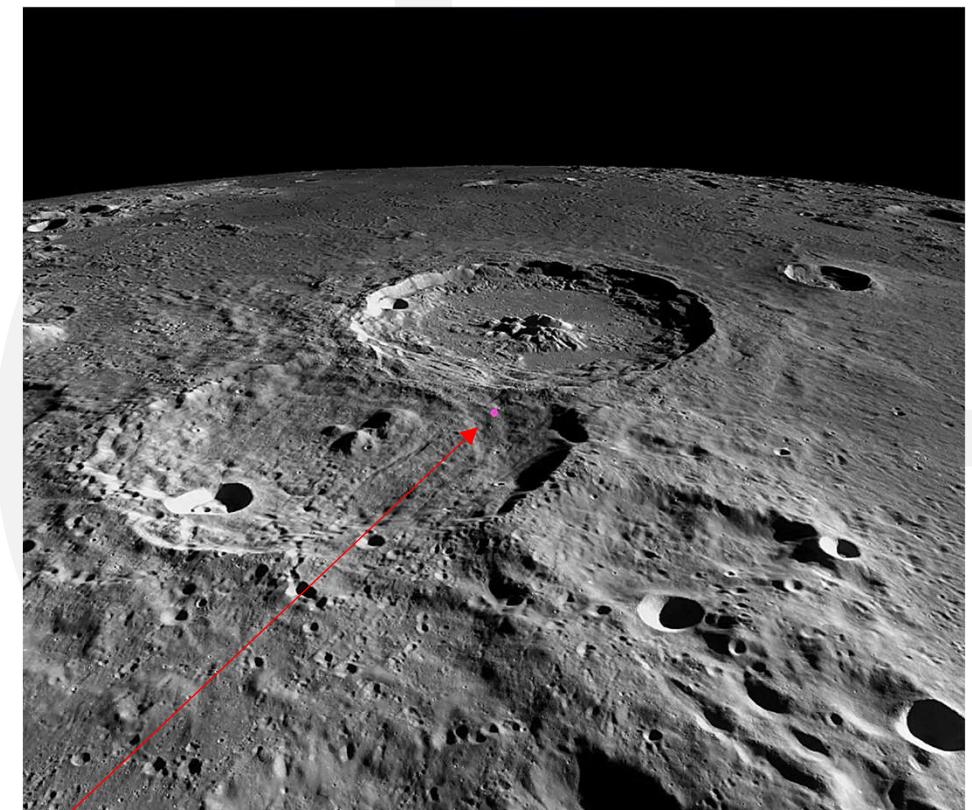
▶ ピンポイント着陸が開いた扉

これまでの月着陸機は、基本的に、「海」と呼ばれるような広い領域に渡って平坦で安全な場所に着陸してきた。

ピンポイント着陸により、これまで降りたくても降りられなかつた様な、複雑な地形への着陸も可能となった。すなわち、「新しい扉が開かれた」。



「-月世界からの報告- Moonlight」より
<http://www12.plala.or.jp/m-light/images/Atlas2/D5.jpg>



出典 : X, @dfuji1
<https://x.com/i/status/1748103951336227113>

SLIM着陸地点



▶ 月面での越夜の結果

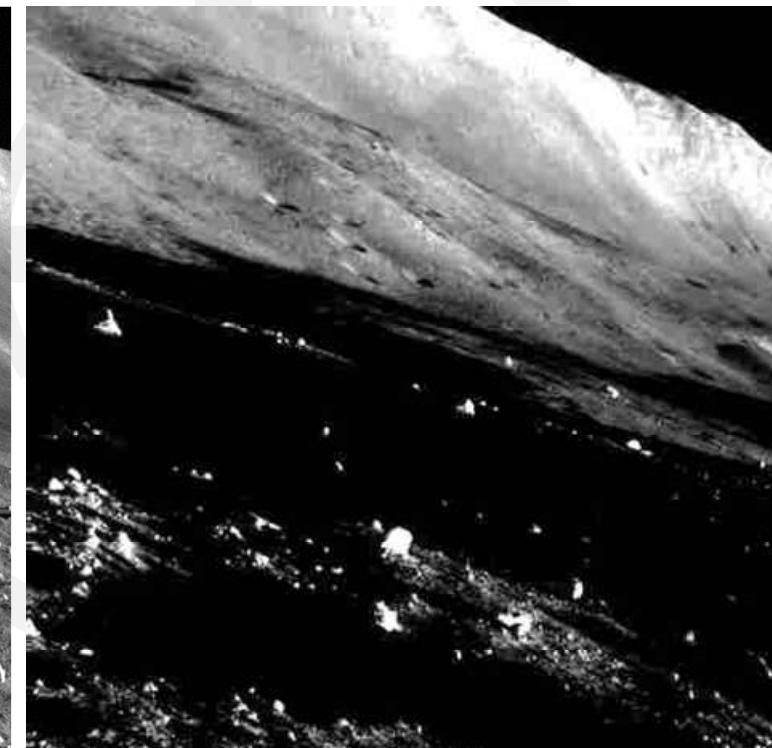
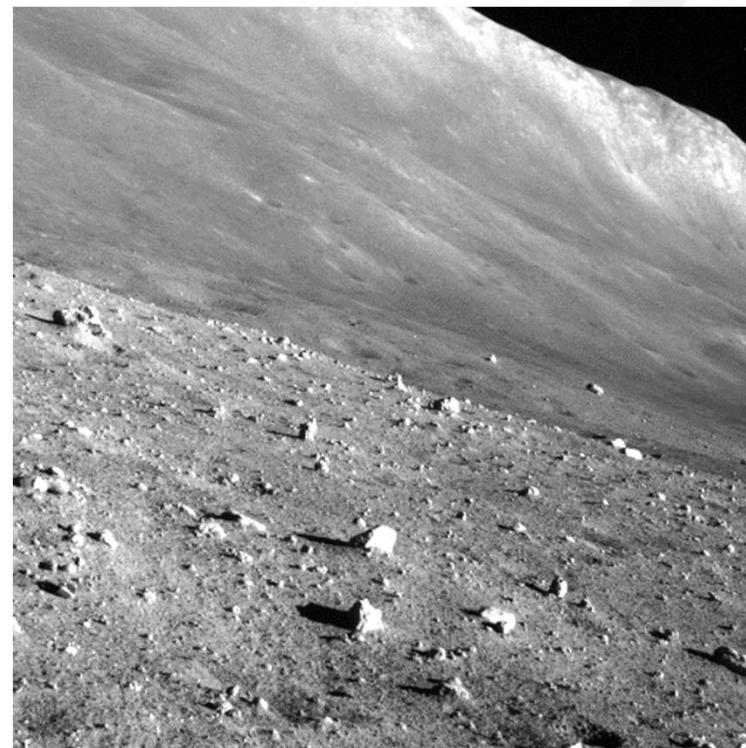
- ・ 2024年1月31日に着陸地点付近が日没を迎えて探査機が冬眠状態に入った後、2月25日、再度探査機との通信を確立し、**越夜後の動作を確認**した。
 - ✓ 月は昼が14日間、夜が14日間続き、昼間は例えば110°C、夜間は例えば-170°C(厳しい温度環境)
- ・ 探査機は越夜を意図した設計ではないものの、ラジオアイソトープヒータやラジオアイソトープ電池等を持たずに越夜を果たした月着陸機の例は少ないとことから(恐らく米国サーベイラーのみ)、世界的にも貴重な例と考えている。
- ・ さらに、3月28日にも再度、越夜後の探査機との通信を確立し、**2回目の越夜後にも動作を確認**した。



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。





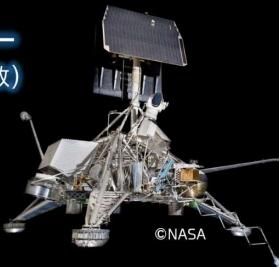
▶月の夜を乗り越えて(越夜-えつや)

月探査機の越夜記録

号 生き延びた夜 @dfuji1

月 **サーベイヤー**
(2号、4号は着陸失敗)

【電力】
太陽電池 + バッテリー
+ 非充電式バッテリー



| | |
|---|----|
| 1 | 6夜 |
| 3 | 0夜 |

| | |
|---|----|
| 5 | 3夜 |
|---|----|

| | |
|---|-------------|
| 6 | 0夜(夜40時間観測) |
| 7 | 0夜(夜80時間観測) |

月 **EASEP**
(アポロ11号)

【電力】
太陽電池
+ ラジオアイソトープ
ヒーターによる保温



| | |
|----|----|
| 11 | 1夜 |
|----|----|

月 **ALSEP**
(アポロ12、14~17号)

【電力】
ラジオアイソトープ電池
(RTG)



| | |
|----|-----|
| 12 | 98夜 |
| 14 | 83夜 |

| | |
|----|-----|
| 15 | 77夜 |
| 16 | 68夜 |

| | |
|----|-----|
| 17 | 60夜 |
|----|-----|

月 **ルノホート**
(ルナ17、24号)

【電力】
太陽電池 + バッテリー
+ ラジオアイソトープ
ヒーターによる保温



| | |
|---|-----|
| 1 | 11夜 |
| 2 | 4夜? |

月 **嫦娥**

【電力】
太陽電池 + バッテリー
ラジオアイソトープ電池
(RTG)



| | |
|---|-----------|
| 3 | 127夜(稼働中) |
| 4 | 63夜(稼働中) |

月 **玉兎**
(嫦娥のローバー)

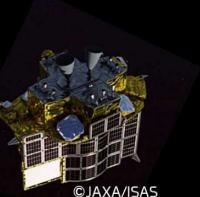
【電力】
太陽電池 + バッテリー
+ ラジオアイソトープ
ヒーターによる保温



| | |
|---|----------|
| 1 | 31夜 |
| 2 | 63夜(稼働中) |

月 **SLIM**

【電力】
太陽電池
+ バッテリー(切断)



| |
|---------|
| 2夜(稼働中) |
|---------|

©藤井大地

出典 : X, @dfuji1

<https://twitter.com/dfuji1/status/1773301918330151408>



▶ 引き続き運用中です！



分光カメラによる観測後、最初の夜を迎えた直後のSLIMチーム
(JAXA相模原キャンパス内のSLIM管制室にて)



ロケット打上時のSLIM管制室の様子



▶ 【まとめ】最近の月着陸機と比べて

- 参考として、近年打ち上げられた月着陸機の着陸精度及び質量を以下に示す。
- いずれも公開情報によるもので、詳細不明なところもあるが、SLIMの達成した着陸精度及び小型軽量化の世界における位置づけを理解する一助にはなる。

【各国の着陸機比較】※公開・報道情報を踏まえ整理

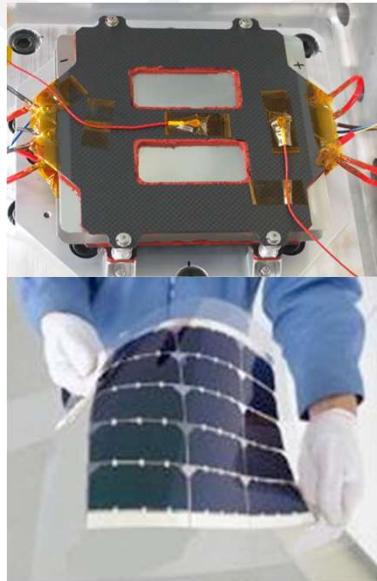
| | SLIM | HAKUTO-R (M-1:1号機) | Chandrayaan -3 | Luna-25 | Peregrine Lander (M1:1号機) | Nova-C (IM-1:初号機) |
|-----------------------|---------------|---------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 機関 | JAXA (日) | Ispace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 |

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、**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。**

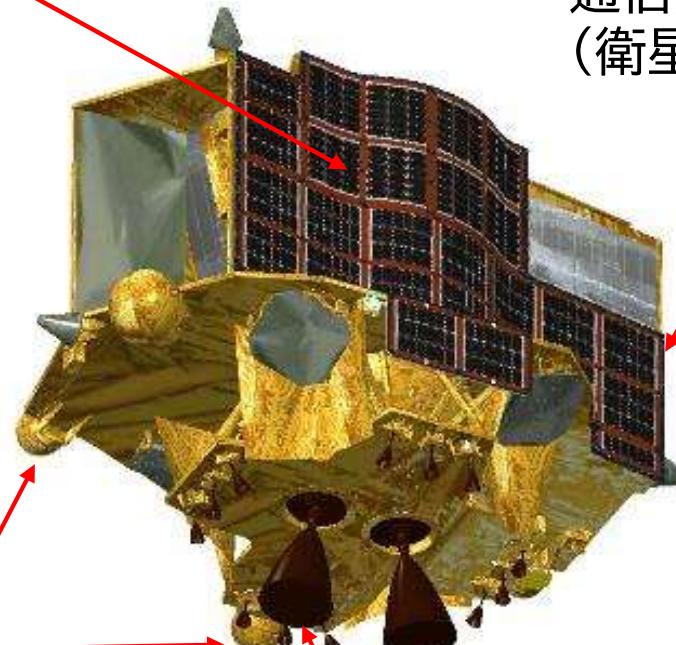


▶【まとめ】小型軽量化のための要素技術

電源系: 軽量な「SUSラミネートバッテリ」と
「薄膜太陽電池セル」を採用(曲面形状での搭載は日本初)
電源制御器もフルデジタル化

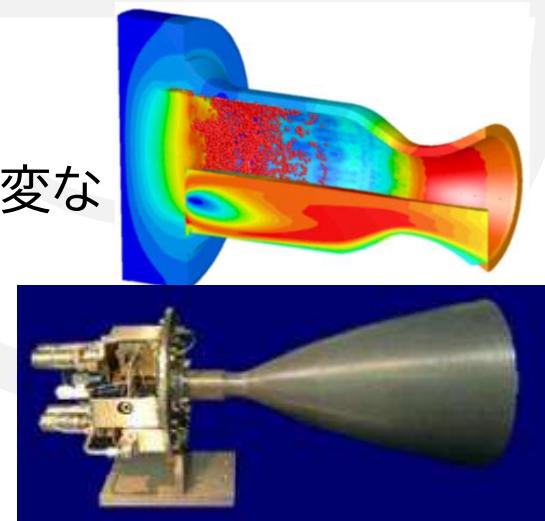


通信系: S帯送受信機をフルデジタル化
(衛星・探査機への搭載は世界初)



着陸脚: 関節方式ではなく、
「ポーラス金属」が潰れることで、
着地時のエネルギーを吸収す
る方式(3Dプリンタで製造)

メインエンジン: 高効率で推力可変な
「セラミックスラスタ」を採用



なお、酸化剤・燃料一体型タンクを主構造とする構造様式
も、軽量化に大きく貢献している



▶ 宣伝

SLIMプロジェクトでは、引き続き、ホームページやX(twitter)等による情報発信を行っています！

ホームページでは、各種写真や動画、技術に関する解説など、多種の情報を掲載しています。
ミュージックビデオも！

検索キーワード: “JAXA SLIM”

Xでは、越夜後運用の速報など、リアルタイムな情報発信を行っています！

@SLIM_JAXA



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



おうえん
応援ありがとうございました。





▶ ご質問があれば、ぜひ！