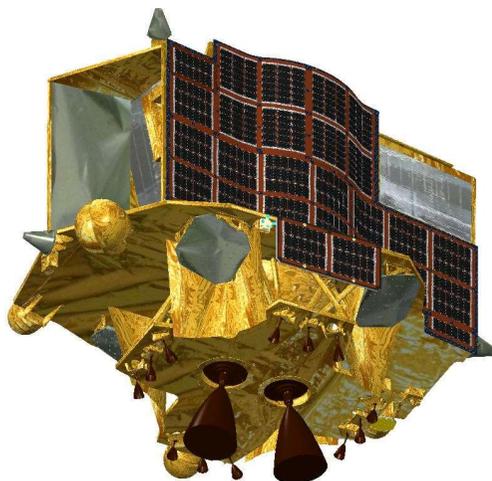




資料 43 - 3
科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第43回H30.8.2)

小型月着陸実証機(SLIM)の 計画見直しについて



平成30年8月2日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所長 理事 國中均

SLIMプロジェクトマネージャ 坂井真一郎



本資料の位置づけ

- 本資料は、打上手段変更に伴う小型月着陸実証機(SLIM)の計画見直しに関するものであり、宇宙開発利用部会が計画の大幅な変更等に際して実施する「中間評価」に資するものである。

JAXAは、プロジェクトの企画立案と実施に責任を有する立場から、JAXA自らが評価実施主体となって評価を行うことを基本とする。これを踏まえ、宇宙開発利用部会では、JAXAが実施した評価の結果について、調査審議を行う。

「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について(改訂版)」(平成29年5月9日改訂)

- 平成30年3月27日に実施したSLIMプロジェクト計画変更審査の結果、計画変更は妥当と判断した。審査における主たる審査項目は以下のとおり。
 - プロジェクト目的・目標、ミッション意義・価値の妥当性
 - 開発スケジュールの妥当性
 - セラミックスラスタ・一体型タンクに係る確認
 - 資金計画の妥当性
 - リスク識別及び対処方策の妥当性
- 本資料では、SLIMプロジェクトのミッション概要と計画変更に至った経緯、JAXAの計画変更審査の判定について1～3章に記載する。また、計画変更を受けた現状の探査機構成案を4章に、計画変更も踏まえて選定された着陸目標地点を5章に、それぞれ示す。



目次

1. SLIMミッションの概要
2. ASTRO-H運用異常を踏まえた計画見直し
3. プロジェクト計画変更審査の結果
4. 打手段変更に伴う探査機構成の変更
5. SLIM着陸目標地点の選定結果
6. まとめ

- 参考1. 「より確実な開発」の質量インパクト
- 参考2. 今後の国際宇宙探査への貢献
- 参考3. 着陸方式について
- 参考4. SLIMプロジェクトの成功基準

- SLIMのミッション目的を維持しつつ、打手段をX線分光撮像衛星(XRISM)とのH-IIA相乗りと変更することが妥当と判断した(1~3章)。
- 打手段変更に踏まえて探査機システムを確定する作業を進めている(4章)
- 打手段変更に伴う成果最大化の一環として、月面着陸後、月マントル由来物質の分光観測を実施する「分光カメラ」の性能を向上したが、月マントル由来物質が露出すると考えられる場所は「かぐや」により特定されている。そこで、これらの場所のうちから、着陸性などを考慮してSLIM着陸目標地点を選定した(5章)



1. SLIMミッションの概要(1/2)

SLIM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提案である(参照: 参考4「SLIMプロジェクトの成功基準」)。

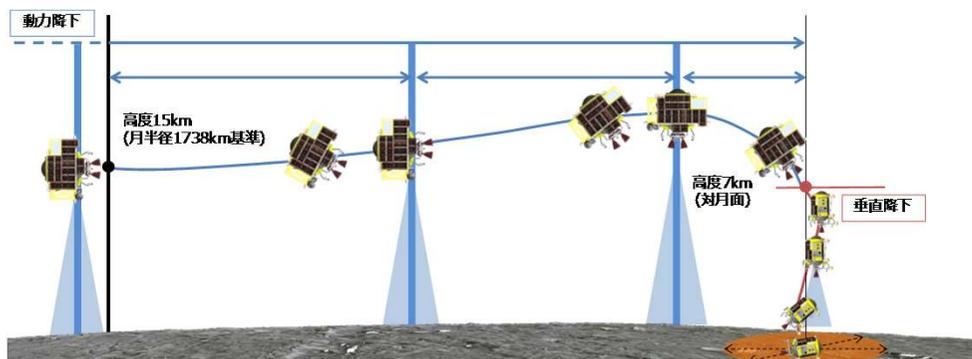
【2つの目的】

- <<目的A>> 小型の探査機にて、月への高精度着陸技術の実証を目指す
 - ✓ 諸外国で行われてきている月着陸の精度はkmオーダー。これに対して、SLIMでは将来の科学探査・国際宇宙探査で必要とされる100mオーダーを目指す
- <<目的B>> 従来と比較して、大幅に軽量な月惑星探査機システムを実現し、着陸後の月面活動の実証実験を含めて実施することで、月惑星探査の高頻度化に貢献する
 - ✓ 軽量化に伴うコスト低減を含めた低リソース化は、我が国における惑星探査の自立性確保の観点からも重要
 - ✓ 諸外国の月着陸機と比較して大幅な軽量化を目指している
 - ✓ 推進を除いたドライ質量: 約200kg
 - ✓ 小型探査機を実現する技術は、将来、月面から帰還するシステムを考える上でも重要



1. SLIMミッションの概要(2/2)

- SLIMは打上ロケットにより地球周回長楕円軌道に投入された後、自身の推進系により月遷移軌道、月周回軌道へと軌道遷移する。
- 月周回軌道から着陸降下を開始、航法カメラによる画像航法を行って高精度に自身の位置を推定しながら、自律的な航法誘導制御により、月面上の目標地点に接近する。
- 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する。





2. ASTRO-H運用異常を踏まえた計画見直し(1/2)

- ◆ ASTRO-H運用異常を踏まえ、改めてSLIMでの対応を検討した。
- ◆ その結果として、XRISMとのH-IIA相乗りにより打ち上げることが妥当と判断した。
- ◆ これにより、技術実証時期が遅延するものの、小型探査機による高精度着陸実証というミッション目的のより確実な実現と、月面活動ミッションの質向上が期待できる。

- SLIMのプロジェクト移行(2016年4月)とほぼ同時に、ASTRO-H運用異常が発生した。
- これを受けて「より確実な開発」を目指して検討を進めた結果、探査機質量の増加が見込まれ(参照:参考1)、イプシロンロケットによる打上に質量成立性のリスクが生じた。
- また、X線分光撮像衛星(XRISM)を開発する方針となったことから、宇宙科学・探査全体の計画への影響を最小限とし、宇宙科学プログラムの効率化を図る必要が生じた。
- このため、SLIMをXRISMとのH-IIAロケット相乗りで打ち上げる案について、従前のイプシロンロケットによる単独打上とのトレードオフを行った。
- その結果、技術実証時期が遅延するというデメリットはあるものの、より確実なSLIMの開発が可能となることなどから、打上手段を「代替機との相乗」へと変更するべきと判断した。
 - なお現状、SLIMで実現する小型軽量探査機に限らず、重力天体への高精度着陸を実現した宇宙機は依然として存在せず、SLIM技術実証時期までに実現すると見込まれる確実な計画も、見当たらない(参照:参考5)。
 - 宇宙基本計画工程表でも、平成29年12月の改訂において、国際有人宇宙探査分野で目指すべき4つの技術実証の1つとして「重力天体離着陸技術(高精度航法技術等)」が識別されている(参照:参考2)。



2. ASTRO-H運用異常を踏まえた計画見直し(2/2)

- その後、相乗り打上の場合の探査機コンフィグレーション検討などを経て、2018年3月、JAXAとして計画変更審査を実施し、計画変更が妥当と判断した。
- SLIMのミッション意義・成功基準などについては、従前の計画から変更はない。
- なお、打上手段変更後も、探査機質量は打上時約730kg程度(推薬除くと約200kg)(※1)であり、依然として十分に小型・軽量な月着陸である。
 - 計画変更前の探査機質量見込みは、打上時約600kg程度(推薬除くと約130kg)
- 計画変更後、SLIMプロジェクト総開発費として148.0億円を計上している。
 - 計画変更前は、総開発費(キックステージ開発費を含む)として180.5億円を計上していた。
- 打上時期については、相乗り相手であるX線分光撮像衛星(XRISM)の計画と合わせ、2021年度としている。

※1 ... 「より確実な開発」へ向けた取り組み(参照: 参考1)の反映、ロケット変更に伴う設計変更、成果最大化のための取り組み(4節参照)、その後の設計進捗などの総計として。



3. SLIMプロジェクト計画変更審査の結果

2018年3月、SLIMプロジェクト計画変更審査を実施した。判定結果からの抜粋により審査結果を示す。

SLIMプロジェクト計画変更審査 判定結果

平成30(2018)年3月27日

審査委員長

理事 山本静夫

SLIMプロジェクトの計画変更を行うため、審査実施要領に基づき、以下の項目について経営的視点から審査した。

- 1) プロジェクト目的・目標、ミッション意義・価値の妥当性
- 2) 開発スケジュールの妥当性
- 3) セラミックスラスタ・一体型タンクに係る確認
- 4) 資金計画の妥当性
- 5) リスク識別及び対処方策の妥当性

(結論として、以下の計画変更は妥当と判断した。)

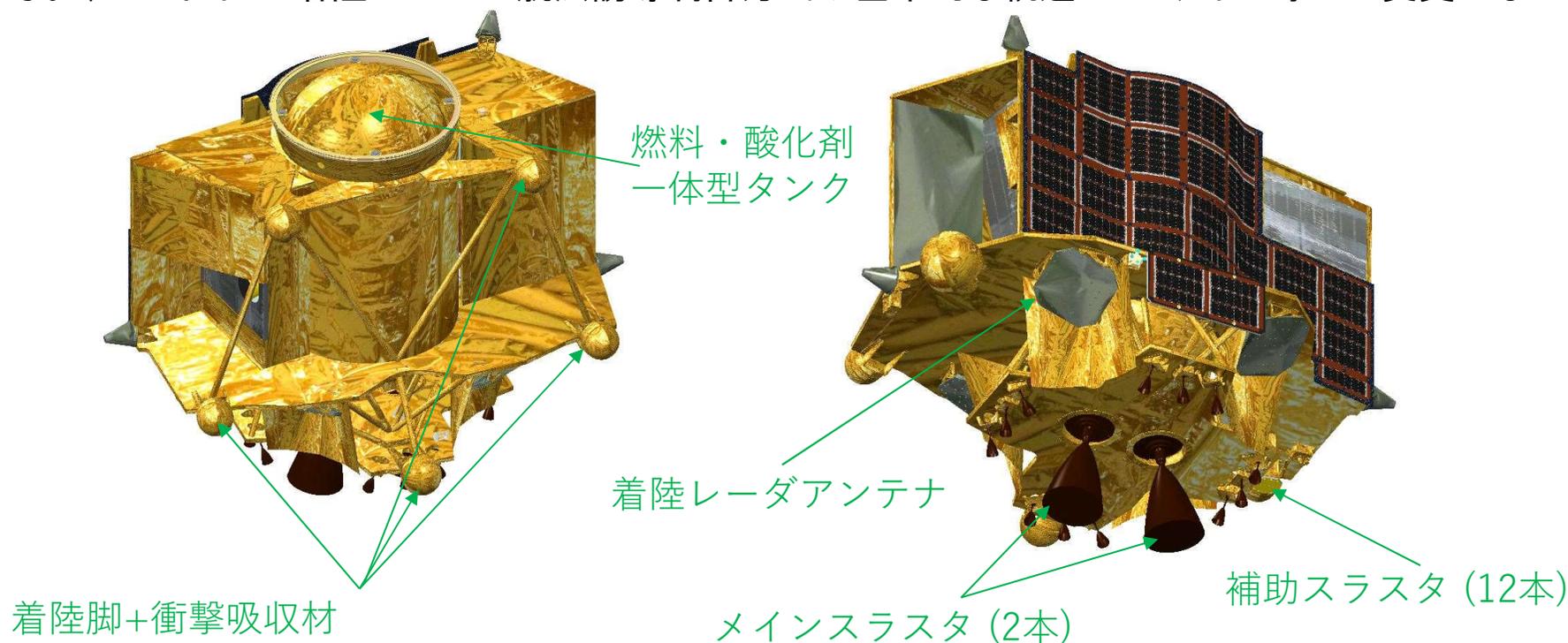
- ① 打上げ手段の変更(イプシロン打上げからX線天文衛星代替機との相乗りによるH-IIA打上げ)
- ② 打上げ時期の変更(2021年度へ変更)
- ③ 総資金(180.5億円から148.0億円※)の変更(上限値)※H-IIA相乗り対応費を含む
- ④ プロジェクト範囲の変更(キックステージ開発の除外)

但し、相乗りを前提とした最終的な打上げ時期及び計画総資金(SLIM/XARM)については、XARMのプロジェクト移行審査にて決定する。



4. 打上手段変更に伴う探査機構成の変更(1/2)

- 計画変更審査を受けて設計を進めている探査機コンフィギュレーションを以下に示す。主な変更点は以下の通り
 - 探査機質量を鑑み月重力に十分拮抗するため、メインエンジンを1本→2本に増強し、併せて補助スラスタ本数も増強した(8本→12本)
 - 傾斜地への着陸性も考慮し、着陸脚の構成と着陸方式を見直した(参考3参照)。
 - 成果最大化のため、月面着陸後のミッションを拡充した(カンラン石の分光観測による月起源解明等、後述)
 - ロケットインターフェースの変更(イプシロンロケット+キックステージ→H-IIA)
- なお、ピンポイント着陸のための航法誘導制御方式や基本的な軌道プロファイル等には変更はない

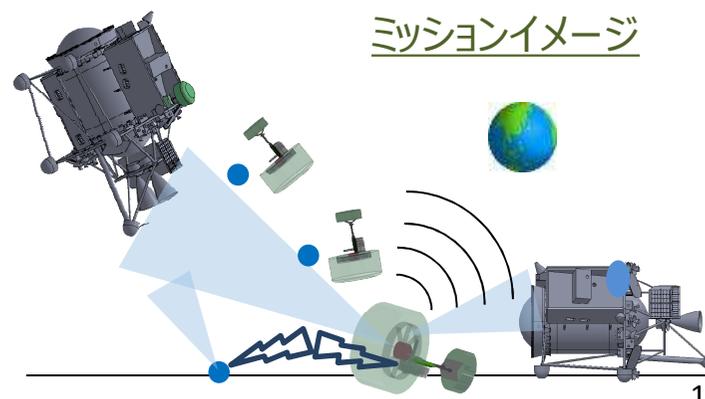




4. 打上手段変更に伴う探査機構成の変更(2/2)

成果最大化のための月面着陸後ミッションの拡充

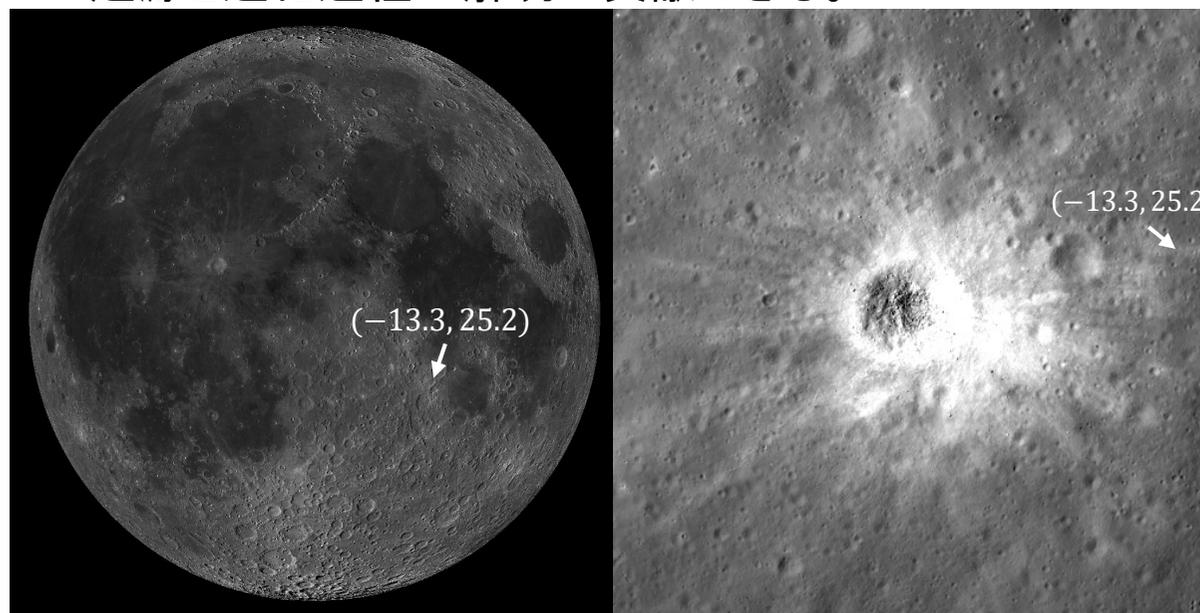
- SLIMではプロジェクト移行時、「分光カメラ」を月面活動ミッションとして選定していた。これは、マントル由来物質(カンラン石)の成分分析により、月の起源と進化を解明する野心的な装置である(地球組成との類似性を比較することで、地球と月を形成したとされる巨大衝突仮説の検証や、その後の天体初期進化過程の理解に繋がる重要な知見を得る)。
- 打上手段変更に伴い、この「分光カメラ」に追加質量リソースを割り当てフォーカス機構を付加し、かつ望遠光学系へ変更する。従来案に比べ格段に高い空間分解能を実現することで、組成推定精度が向上する。加えて、岩石構成物質の粒径が観測できる可能性があり、マグマの冷却速度推定などに繋げられる(月進化過程の理解に於いて重要な情報)
- 併せて、プロジェクト移行時には分光カメラ搭載はオプション扱いとしていたが、打上手段変更に伴いベースライン化することとした。
- また、以下のような特徴を有する小型プローブの追加搭載についても、現在検討を進めている。
 - 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





5. SLIM着陸目標地点の選定結果

- 月マントル物質の可能性のあるカンラン石が露出している地域は、「かぐや」により特定されている。
- 月表側にあるこのような地域の中から、斜度・地形等、着陸性の観点から選定を行い、SLIM着陸目標地点を選定した。
- SLIMがこの地点へピンポイント着陸して観測を行うことで、巨大衝突仮説の検証など月の起源と進化過程の解明に貢献できる。

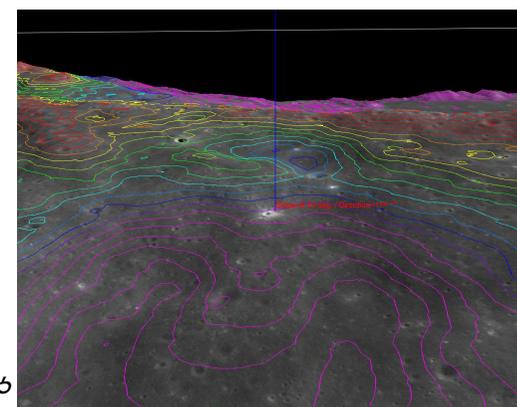


SLIM着陸地点
(左:月全体における位置、右:拡大図)

出典:NASA/LRO

選定された着陸目標地点は、“神酒の海”と呼ばれる低緯度地域に存在する。斜度が15deg程度以下で概ね一定の地点である。

南緯: 13.3degS / 東経: 25.2degE



出典:JAXA/かぐや



6. まとめ

- 以上、SLIM打上手段を、イプシロンロケットによる単独打上から、X線分光撮像衛星(XRISM)とのH-IIA相乗り打上へと変更するに至った経緯と、変更後のSLIM計画概要について報告した。
- この変更により、より確実にSLIMを開発することができ、また着陸後の成果についても拡充が見込める。併せて、相乗り打上とすることでJAXA全体として資金削減効果も得ることができる。
- なお、計画変更後のプロジェクト規模も考慮して、JAXAとしては従前同様、SLIMプロジェクトを公募型小型計画の1つとして位置づけている。
- また、今回の計画変更は、SLIMプロジェクト移行直後にASTRO-H運用異常が生じてその反省を反映する必要があったこと、その際、投入軌道条件が例外的に緩い相乗り相手が存在したこと、といった特殊事情が背景となっている。すなわち、公募型小型計画における例外的な計画変更であり、公募型小型計画には原則イプシロンロケットを用いるとの従来の考え方に変更はない。
- SLIMプロジェクトは現在、打上手段変更を経て探査機設計のベースラインを確定し、現在、JAXA内で設計審査を進めているところである(2018年5月~9月)。
- 引き続き、確実な開発を期してプロジェクトを推進していく。



【参考1】「より確実な開発」に向けた取り組み

- SLIMのJAXAプロジェクト移行(2016年4月)とほぼ同時に、ASTRO-H運用異常が発生した。
- これを受けて「より確実な開発」を目指して検討を進めた結果、以下のような見直し項目が識別された。
 1. 電気系コンポーネントの確実性向上(太陽電池セルの特性変化予測マージン拡大など)
 2. 着陸誘導制御誤差の許容範囲拡大(着陸脚の強度マージンの見直しなど)
 3. 着陸後ミッション検討深化(着陸後の月面観測のための熱・電力マージンの見直しなど)
- 上記見直し案を採用することのインパクトを評価したところ、探査機質量(ドライ質量)に約15kg程度の増加が見込まれた。
- また、SLIMは月着陸機であることから、これらの探査機質量(ドライ質量)増に対応して、搭載推薬量についても大幅に積み増す必要が生じることが見込まれた(約45kg程度)
- 結果として、打上時質量(ウェット質量)が約60kg程度増加(※)するとの見込みを得た
 - ※イプシロンロケットでの打上を前提とする見積もり
- なお、このリソース増を考慮しても、依然として、従来と比べてSLIMは大幅に小型・軽量の月着陸機である。



【参考2】今後の国際宇宙探査への貢献

- 国際宇宙探査を巡る議論・検討は、現在、官・民を問わず活況を呈している。
- SLIMで実証される技術や得られる知見は、サンプルリターンを含む今後の各計画において基盤となるものである。

4. (2)① ix) 宇宙科学・探査及び有人宇宙活動

FY29検討



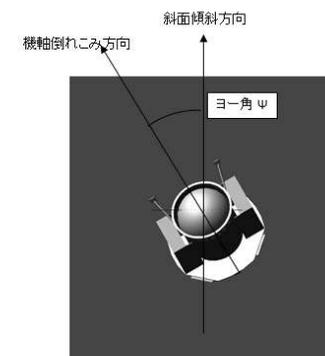
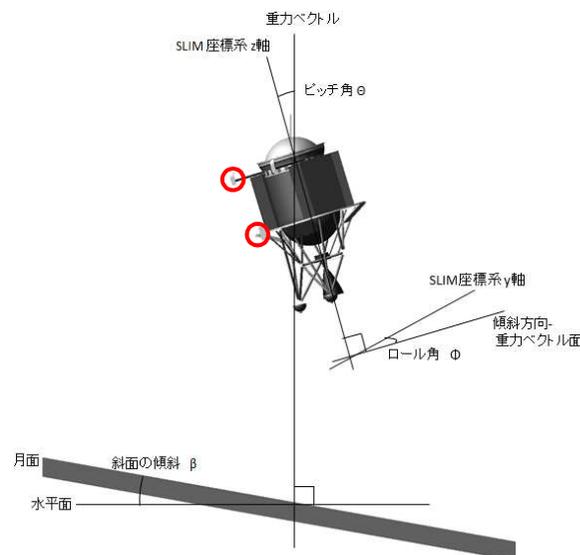
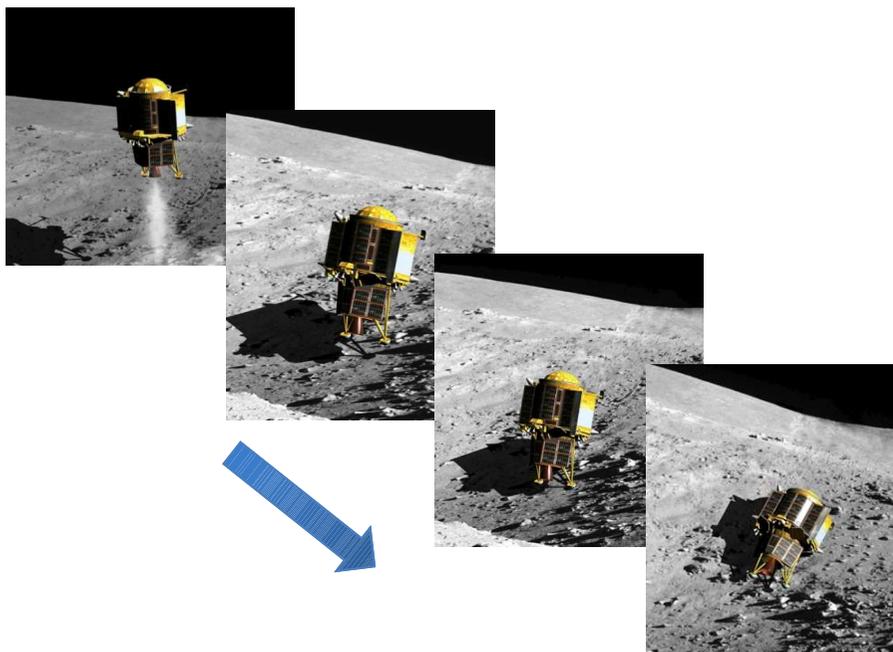
“国際宇宙探査のプログラムの具体化に先立ち、我が国として優位性や波及効果が見込まれる技術の実証に、宇宙科学探査における無人探査と連携して取り組む。”

宇宙基本計画工程表
(平成29年12月 改訂版)



【参考3】着陸方式について

- (意図せぬ転倒をすることなく)斜面に確実に着陸するための方式として、「2段階着陸方式」と名付けた方法を採用し、設計を進めている。
- この方法は、最終姿勢が、従来の「立った姿勢」ではなく、「(管理された)寝た姿勢」となる。そのため、急斜面への到達の場合などに有効である
- このことより、将来の小型探査機による着陸科学探査においては、2段階着陸方式がキー技術のひとつとなりうる
- なお、着陸に至る直前までの諸シーケンスは、2段階着陸方式も、従来の4脚着陸方式などと同様であるため、SLIMにおけるピンポイント技術実証の意義には影響しない





【参考4】SLIMプロジェクトの成功基準(1/2)

【目的A】

月惑星表面への高精度着陸を実現する技術を開発し、実証する

【目的Aに対応した目標】

- (A-1) 高精度着陸に必須となる画像照合航法を開発し、他の航法系とも組み合わせることで、結果として航法誤差100mを実現する。
- (A-2) 軟着陸のためのシンプルな衝撃吸収機構を実現する。
- (A-3) 障害物を検知しつつ、航法誤差・誘導誤差を考慮した自律的な着陸誘導則を実現する。
- (A-4) これらの技術を搭載した探査機により月面への高精度着陸(精度100m)を実施し、検証を行う。

【目的B】

大幅な軽量化を実現する月惑星探査機システム技術を開発する

【目的Bに対応した目標】

- (B-1) 小型・軽量で高性能な化学推進システムを実現する。
- (B-2) 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を実現する。
- (B-3) 着陸後に探査機が機能を維持する。
- (B-4) 月面到達後、日没までの一定期間、ミッションを行う。



【参考4】SLIMプロジェクトの成功基準(2/2)

前述の目標に対応して、成功基準を以下のように定めている

基準	内容	判断時期
ミニマムサクセス	小型軽量の探査機による月面着陸を実施する。それによって、以下の2項目を達成する。 <ul style="list-style-type: none">高精度着陸に必須の光学照合航法を、実際の月着陸降下を実施することで検証する(A-1, A-2)軽量探査機システムを開発し、軌道上動作確認を行う(B-1, B-2)	取得したテレメータを元に地上での解析を月面着陸降下実施後1ヶ月程度で実施
フルサクセス	精度100m以内の高精度着陸が達成されること。 具体的には、高精度着陸航法系が正常動作し、誘導則に適切にフィードバックされ、着陸後のデータの解析により着陸達成に至る探査機の正常動作と着陸精度達成が確認されること。(A-1~4, B-1~3の全てを達成することを意味する)	取得したテレメータを元に地上での解析を月面着陸降下実施後1ヶ月程度で実施
エクストラサクセス	高精度着陸に関する技術データ伝送後も、日没までの一定期間、月面における活動を継続し、将来の本格的な月惑星表面探査を見据え、月面で活動するミッションを実施する。(A-1~4, B-1~4の全てを達成することを意味する)	ミッション終了時



【参考5】月着陸探査を巡る最近の動向

- 近年、NASAを中心に国際的な月探査計画の準備が本格化しており、また民間ベースの検討も行われるようになってきた点が、以前との大きな違いである。
- また、JAXAでは、SLIMの成果を活かす、極域探査(SELENE-R)、サンプルリターン(ヘラクレス)という継続するミッションの準備も進められている。
- 実現性・打上時期含めて確実な情報が少ないものの、これら将来の月探査へ向けて高精度着陸を実証しようという計画も散見される。

計画名	実施国	打上年	ミッション概要/着陸精度	質量
嫦娥4号 (Chang'e 4)	中国	2018	月裏側への着陸	
嫦娥5号 (Chang'e 5)	中国	2019	サンプルリターン	8200kg
Chandrayaan-2	インド	2018	着陸精度 (誤差楕円) : 30km(downrange) x 15km(crossrange)	3290kg
ルナ25号 (Luna Grob Lander)	ロシア	2021	南極近傍のBoguslawskyクレータに着陸	1750kg
ルナ27号 (Luna Resurs Lander)	ロシア	2023	極域着陸	
SpaceIL Lunar Lander	イスラエル (民間)	2018	探査機自身がホッピングにより移動	600kg
iSpace Lunar Lander M2	日本 (民間)	2020-2021	月面への輸送システムデモ 輸送したローバによる月面走行。	
Astrobotic Griffin Lander	米国 (民間)			
Astrobotic Peregrine Lander	米国 (民間)	2020	着陸精度 : 100m	770kg