



資料29-6
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29回H28.7.14)



小型月着陸実証機(SLIM) プロジェクト移行審査の結果について

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 常田佐久
SLIMプロジェクトマネージャ 坂井真一郎





本報告の位置づけ

- 宇宙開発利用部会における、JAXAが実施する研究開発プロジェクトの評価については、以下のように定められている。

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27年6月3日改訂)

- 上記における調査審議のうち、実施フェーズに移行する際には「事前評価」を実施するものと定められている。
- 本報告は、この「事前評価」に資するため、平成28年3月8日にJAXAが小型月着陸実証機(SLIM)について実施したプロジェクト移行審査の結果について報告するものである。具体的な内容を、以下にまとめる。
 1. プロジェクトの目標と成功基準
 2. 小型月着陸実証機(SLIM)の概要
 3. 小型月着陸実証機(SLIM)の開発計画
 4. プロジェクト移行審査のまとめ



1. はじめに



1.1 SLIMプロジェクト移行審査の経緯について

- SLIMは、理学委員会・工学委員会が発出した「公募型小型計画」の募集に対して、平成26年2月28日に提案を行った。
- その後のJAXAにおける検討を踏まえ、平成27年6月3日の第21回宇宙開発利用部会において、「小型探査機による高精度月面着陸の技術実証(SLIM)について」報告を行った。
- 各種審査や議論を経て、平成28年3月8日にJAXAのプロジェクト移行審査を受審し、プロジェクト移行が妥当であるとの判断を得た。



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.1 プロジェクトの目的

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。

【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、大幅に軽量の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

例: 米国月着陸機「サーベイヤー」打上重量995kg vs SLIM打上重量 約590kg

【将来探査への貢献】

- 重力天体への高精度着陸探査技術を習得。火星着陸探査への応用も期待される
- イプシロンロケットで月惑星探査を実現するのに必要な諸技術を習得
- 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



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.2 100m精度のピンポイント着陸の必要性

将来の月惑星探査において、精度100m級のピンポイント着陸が必要とされている。これは、より詳細な地質探査をするという科学探査からの要求であるとともに、将来の国際宇宙探査シナリオからの要請でもある。

宇宙科学からの必要性

- 惑星の誕生と進化という大目標を解明するために、月惑星表面で着陸探査すべき対象はクレータ内の特定岩石やクレータ中央丘の岩相境界などであり、着陸候補／可能エリアは100mオーダーである。
- 例えば、月の起源を解明するためには、特定地域に分布するマントル由来の物質を観測することが必要であり、これがSLIMにおける月面活動ミッションの最有力候補となっている。
- 科学探査のために着陸すべき地点は、場所によって地形的な特徴は異なるが、1) 幅50m～200m程度の尾根の上、2) 1m級以上の岩石が多数分布しており50m程度の限られた着陸可能領域に誘導する必要がある地形、などであり、いずれも100m精度の着陸が必須となる。
- これらの地点の特徴を次ページ以下に例示する。
- 将来的には、火星などの他の重力天体についても探査対象の特定化が進み、ピンポイント着陸は宇宙科学成果創出の大きな技術インフラとなる。

国際宇宙探査シナリオからの必要性

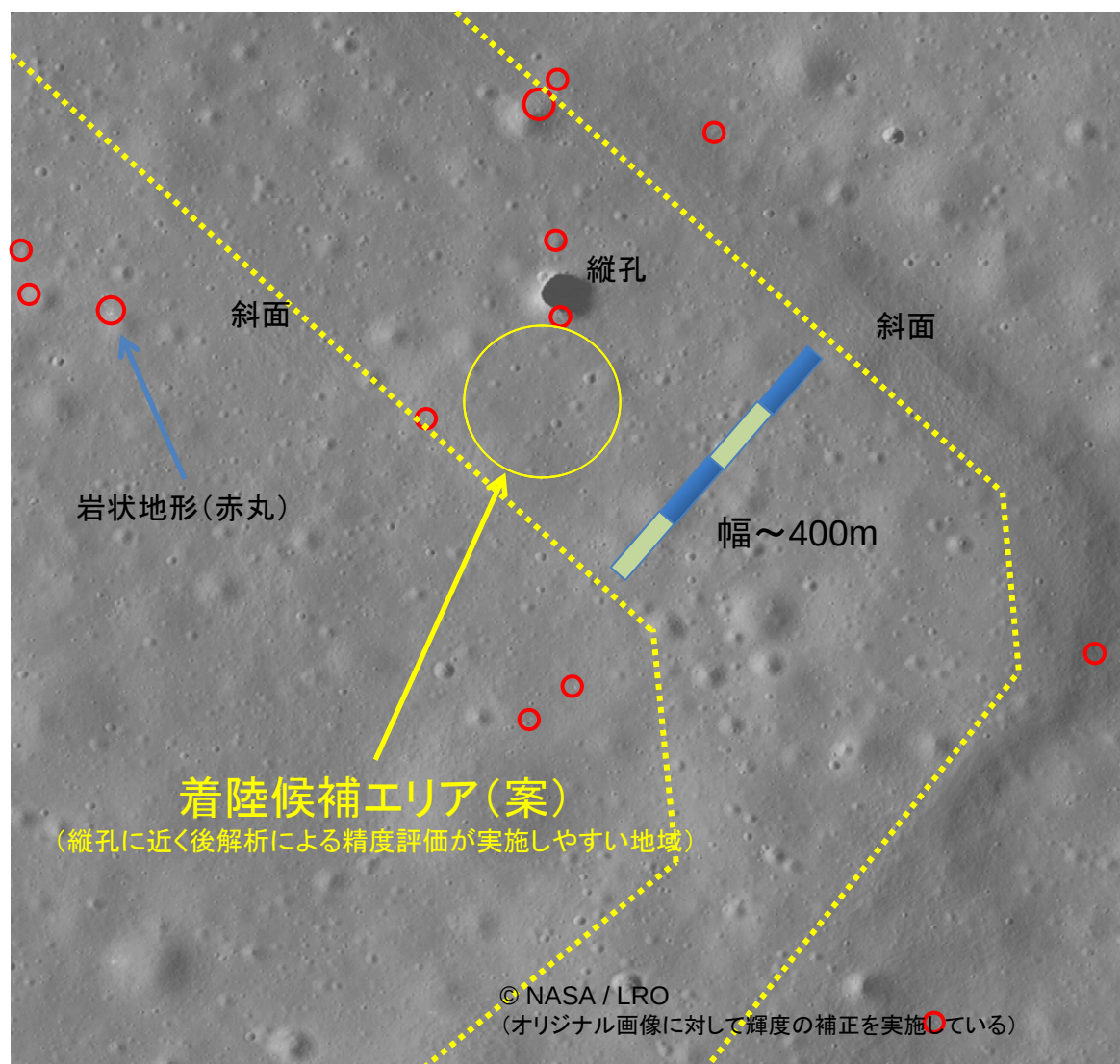
- 将来の国際月探査においては、極域の水氷探査が最重要課題。
- 水は極域のクレータ内の永久日陰に存在すると想定される。
- 永久日陰探査のため、その近傍にある年間80%以上の日照が得られる極域のクレータリム領域に着陸し、探査の拠点とすることが検討されている。
- 日照地域は100m幅程度の希少領域であり、高精度着陸が求められている。



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.2 将来の科学探査候補地点例(1)



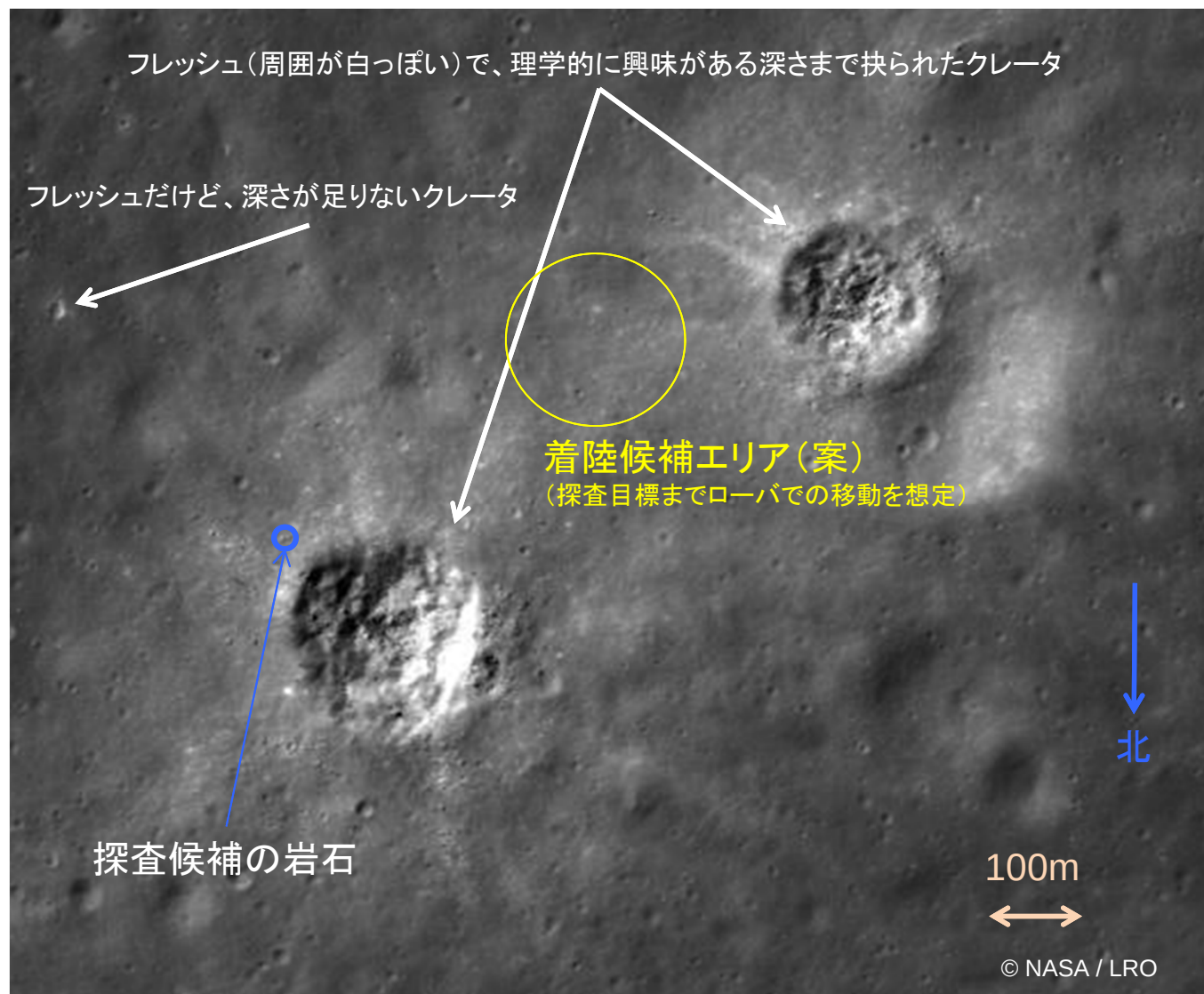
- 斜面(高低差30m程度)に挟まれた帯状の窪地
- 小さいクレータは多いが、岩(赤丸)は比較的少ない
- 溝状地形内にも高さ10mオーダーの丘があるなど、起伏が比較的大きいというのが特徴。起伏を避けて着陸候補エリアは設定される(注:黄色の円は半径100m程度であり、参考として図示した)
- この溝状地形内に着陸するためには、従来の「地上からの軌道決定＋慣性航法」による着陸方式では精度が不十分であり、月面地形の情報をフィードバックした着陸方式が必須となる



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.2将来の科学探査候補地点例(2)



- 直径約200mのクレータの脇にある岩石を探査
- 類似形状のクレータが2つ近接している
- 岩石が少なく比較的平坦な数百メートルのエリアがある
- その地域の上空まで探査機の誘導ができれば、適切な障害物回避動作により着陸が達成できると想定される(注: 黄色の円は半径100m程度である)
- 着陸地点から目標岩石まではローバ走行が必要となる

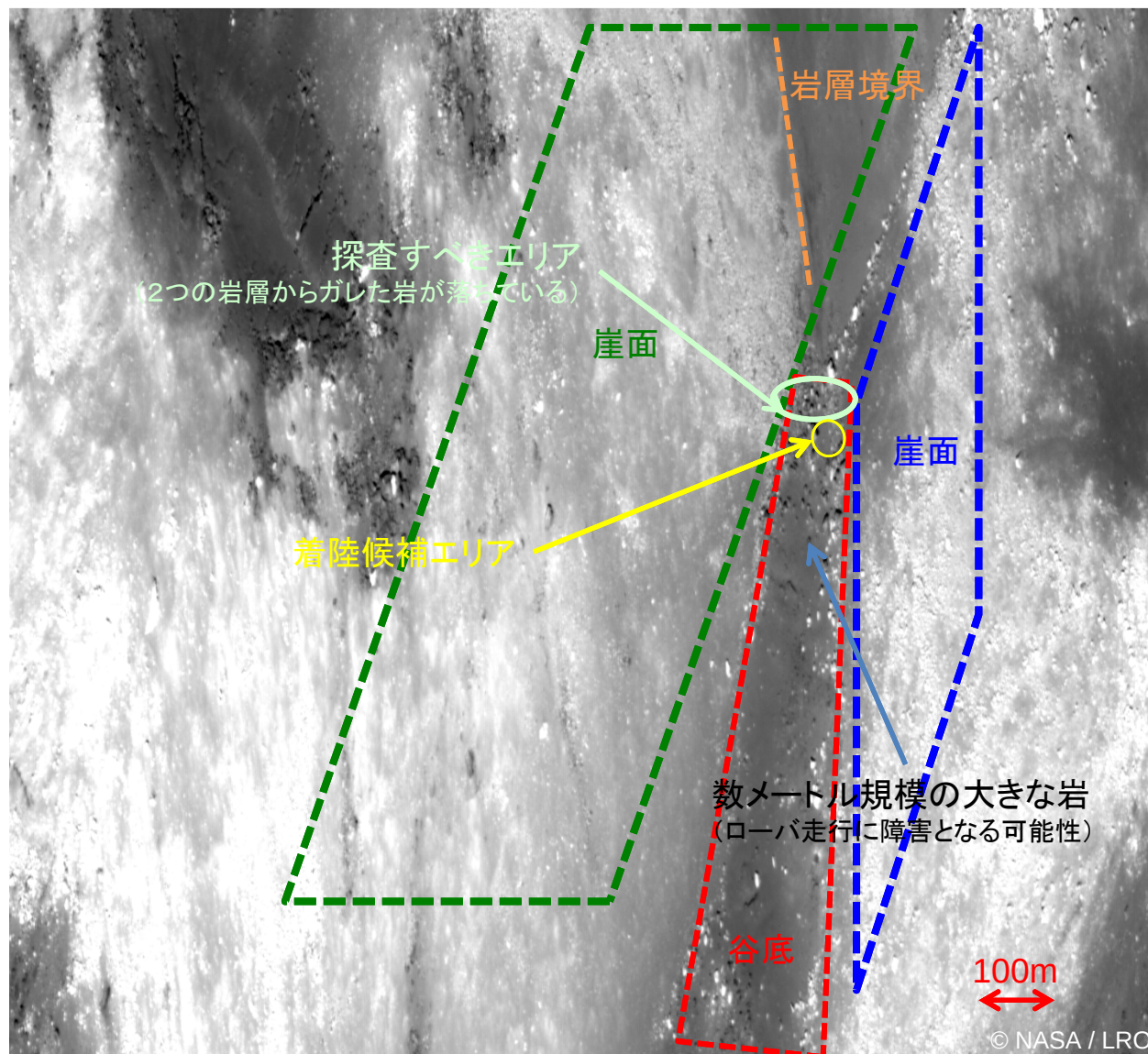
© NASA / LRO



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.2 将来の科学探査候補地点例(3)



- 崖に挟まれた幅100m程度の谷底地形の最深部
- 崖面に岩層境界が露出している
- 谷底には数メートル規模の岩石が多く転がっており、ローバ走行や表面での通信確保には比較的不向きである
- 着陸エリアは探査エリア、障害物(岩石など)を考慮し、ピンポイントで指定される



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.3 他国の着陸技術の動向などについて

- 諸外国の月着陸探査機について、次ページに整理した
- 我が国は、「はやぶさ」で小天体への高精度着陸は実現しており、その点では優位性を持つが、一方で重力天体への着陸は未達成である
- 諸外国で実施済みの重力天体着陸は、基本的には地上からの軌道決定と慣性航法を使用しているため、精度はkmオーダーに留まる。
- これに対して、SLIMでは、天体の地形を撮像した画像を利用することで位置推定精度を高め、1桁以上良い精度の実現を目指している。
- 同様の精度を目指す着陸技術については、米国の民間ベンチャーでも検討がされている。しかしながら、SLIMでは、将来科学探査や国際宇宙探査からの要請に応えた高精度な着陸技術及び探査機小型化技術の獲得を目指している。将来の高頻度探査・複数同時探査などへの布石となる軽量化を考慮しているという観点も考え合わせると、現状、SLIMが唯一の計画と自負している。
- SLIMに続く月南極域での水・氷の利用可能性調査に基づき、月での本格的な有人活動の方向性を判断し、将来宇宙探査の国際的な調整において、我が国が先導的な役割を担うことに貢献する。重力天体への高精度着陸技術は、将来の深宇宙探査の基本インフラであり、自在性確保の観点からも我が国として早期に獲得すべき技術である。



2.プロジェクトの目標と成功基準



【参考表】諸外国の月着陸探査機

探査機名	実施国	打ち上げ年	着陸精度	重量(打ち上げ時)
サーベイヤー1号	米国	1966	(アポロ実証機)	995.2kg
サーベイヤー7号	米国	1968	(アポロ実証機)	1039kg
アポロ11号	米国	1969	誤差楕円 20km(downrange) x 5km(crossrange)	司令・機械船 : 28.8t 着陸船 : 15.2t
アポロ12号	米国	1969	誤差楕円 13km(downrange) x 5km(crossrange), 結果は163[m] (ターゲット: Surveyor III)	司令・機械船 : 28.8t 着陸船 : 15.2t
ルナ9号	ソ連	1966	("Luna-9,13はシンプルなナビゲーションだった"。エアバッグによるランダ軟着陸)	1538kg
ルナ13号	ソ連	1966		1620kg
ルナ20号	ソ連	1972	("Luna-18クラッシュ地点から1.8km")	5727kg
嫦娥3号 (Chang'e 3)	中国	2013	("予定していた虹の入江ではなく、やや東にずれた雨の海北西部に着陸")	3700kg
Astrobotic Griffin Lander (Google Lunar XPRIZE)	米国	~2017(予定)	100m	2360kg
Resource Prospector Mission	米国	2020(予定)	100m	
ルナ25号 (Luna Grob Lander)	ソ連	2019(予定)	30km	1450kg
ルナ27号 (Luna Resurs Lander)	ソ連	2021(予定)	3km	2200kg
嫦娥4号 (Chang'e 4)	中国	2018(予定)	(月の裏側への着陸)	3700kg
嫦娥5号 (Chang'e 5)	中国	2017(予定)		
チャンドラヤーン2号	インド	2017(予定)	誤差楕円 30km(downrange) x 15km(crossrange)	3200kg
SLIM	日本	2020(予定)	100m	約590kg



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.4 SLIMの目標(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を実施し、検証を行う。



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.4 SLIMの目標(2／2)

【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。



2.プロジェクトの目標と成功基準



2.5 SLIMの成功基準

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。 - 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ヶ月以内(TBD)に実施
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ヶ月以内(TBD)に実施
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



3. 小型月着陸実証機(SLIM)の概要



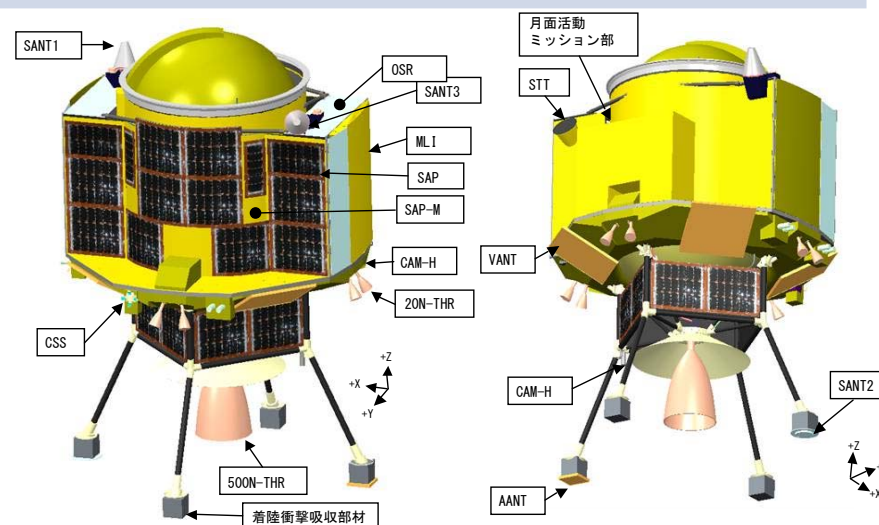
3.1 探査機の主要諸元と概観

項目		諸元
打上	時期(ノミナルウィンドウ)	平成31年度
	ロケット	イプシロンロケットにキックステージを付加
質量	打上時全重量	約590kg
	最大搭載可能推薬量	約460kg(ヒドラジン／MON-3)
探査機寸法		1.5 × 1.5 × 2m
消費電力		約200W(最大)
設計寿命		打上後6ヶ月(月面着陸後は数日以上)

ミッション期間について

打上後、地球周回中に軌道を調整 (地球重力歪みを利用)	約1ヶ月程度
月遷移軌道へ遷移、月周回軌道へ	1週間程度
月周回軌道到着から着陸降下実施 まで	2～3週間程度 (ノミナル)
着陸降下後の活動	数日以上(*1)

*1 ... 着陸地点等に依存する



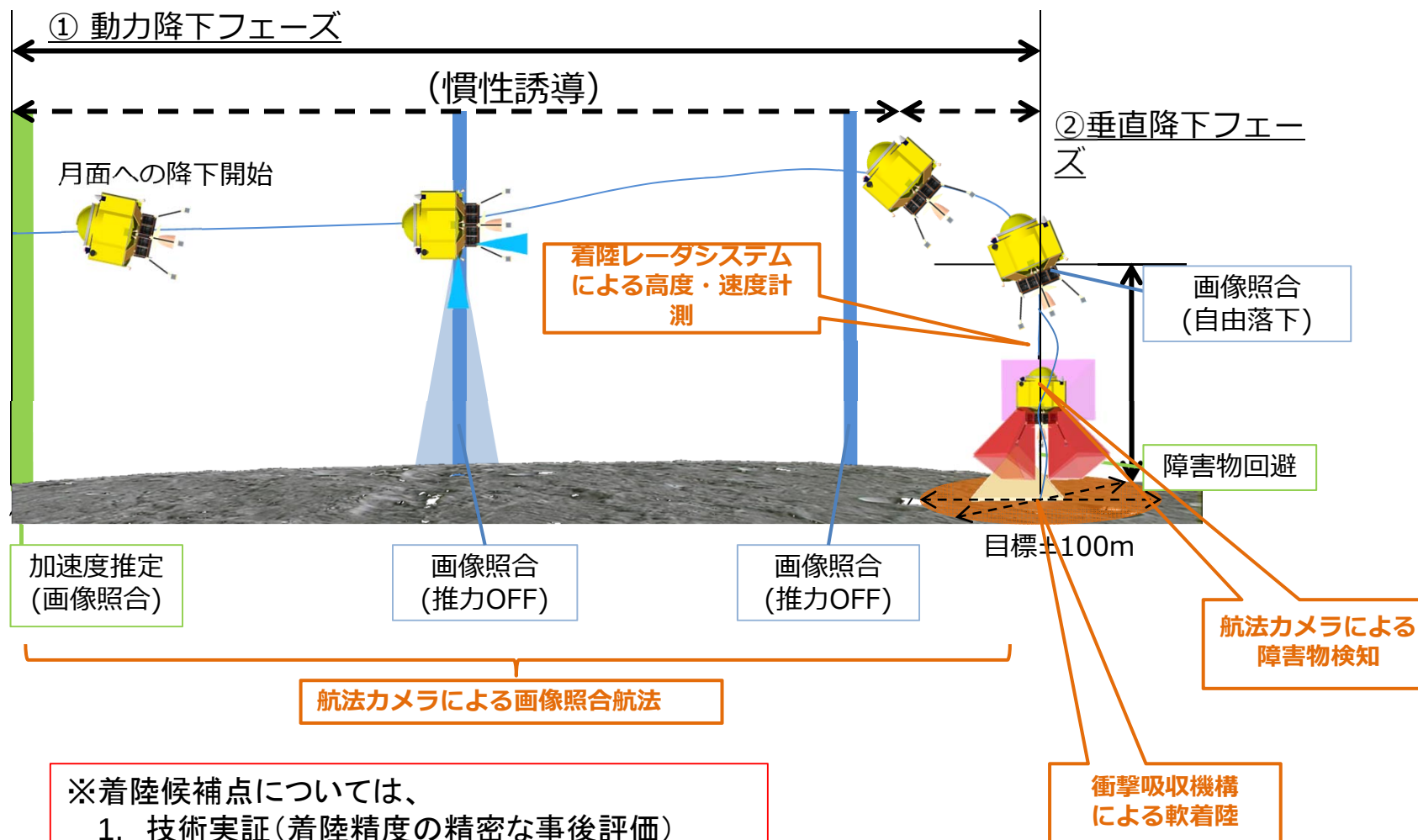
※探査機外観の一案である。着陸地点の地形データを詳細検討の上、他案とトレードオフを実施して最終的に確定させたい。



3. 小型月着陸実証機(SLIM)の概要



3.2 着陸降下プロファイル



※着陸候補点については、

1. 技術実証(着陸精度の精密な事後評価)
2. 技術成立性(着陸可能な地形・日照条件)
3. 科学探査(マントル由来物質の観測)

といった観点から総合的に判断する。



3. 小型月着陸実証機(SLIM)の概要



3.3 月面活動ミッション系

- 月面着陸後の月面活動ミッション系として、「分光カメラ」を搭載する予定として準備を進めている。
 - 基本設計の終了までに、リソース制約も踏まえて搭載可否判断を行う計画である。
-
- 分光カメラは可視・近赤外波長域の分光観測を行う機器である。
 - これによって、これまでの月探査で未だ着陸探査されていない未知の地質 地域の観察を高空間分解能で行い、月の起源と進化を解くための新たな鍵を得ることを目指す。
 - このために必要な活動期間は、着陸後の数日程度である。
 - これらの条件を踏まえた着陸候補点の設定を「かぐや」等の観測データを用いて慎重に行っているところである



3. 小型月着陸実証機(SLIM)の概要



3.4 キックステージ

(1)キックステージ概要

- ①キックステージは、SLIMミッション達成に必須の増速機能を提供し、SLIMを所定の軌道へ投入する。

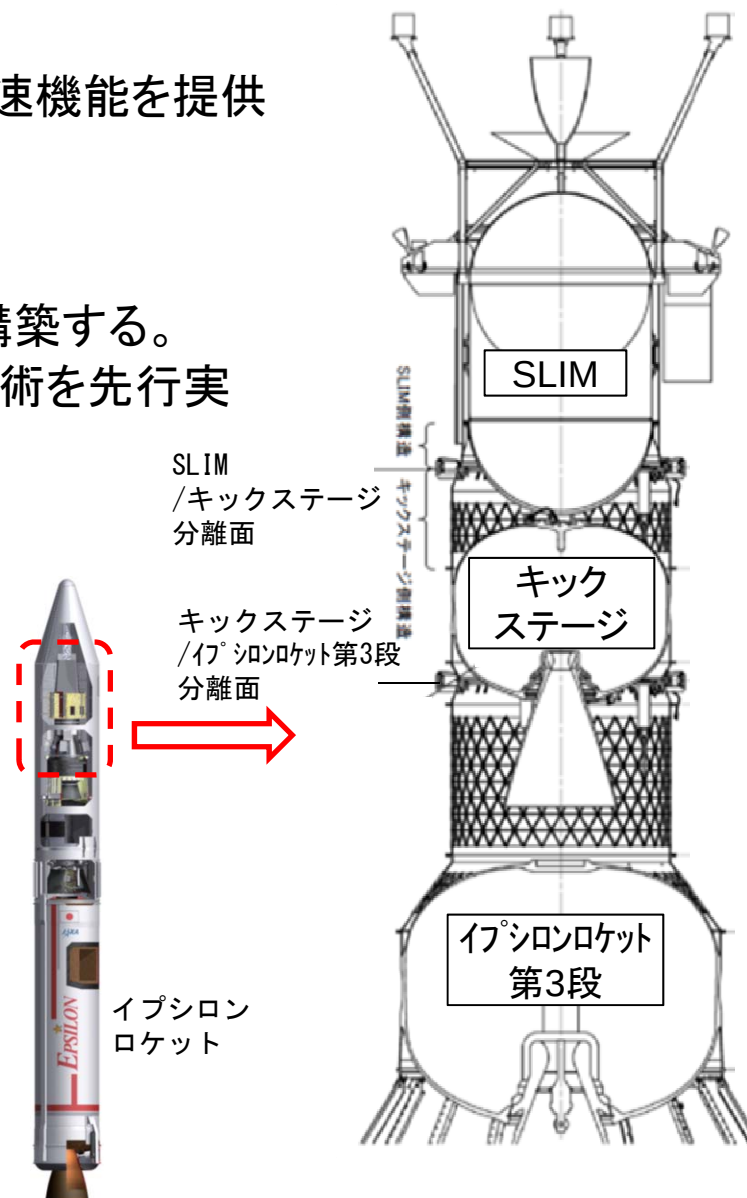
併せて以下を行う。

- ②将来の多様な月惑星探査を実現する輸送手段を構築する。
③固体ロケットシステムの進化・発展に資する先進技術を先行実証する。

(2)仕様

キックステージは、上部でSLIMと結合し、強化型イプシロン基本形態に搭載する。

項目		諸元
性能	推力/比推力	37.5kN/290s
質量	全備重量/推進薬量	約900kg/約750kg
寸法		約φ1.0×約1.5m

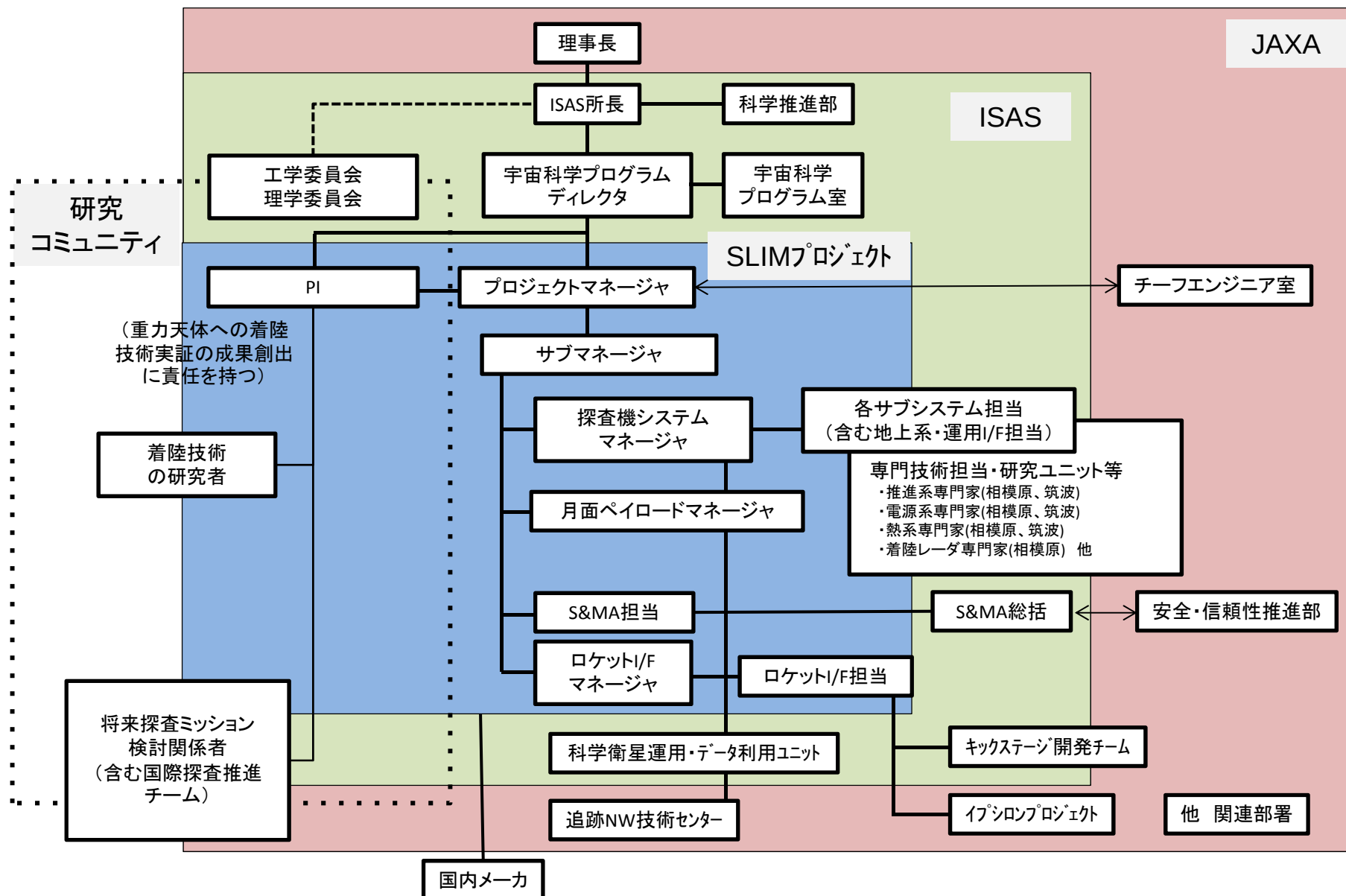




4. SLIMの開発計画



4.1 実施体制





4. SLIMの開発計画



4.2 資金計画

- ・ 小型月着陸実証機(SLIM)の開発総資金は、180億円である。

4.3 開発スケジュール

年度	27 (2015)	28 (2016)	29 (2017)	30 (2018)	31 (2019)	32 (2020)
マイルストーン		▲プロジェクト スタート			▲ 打上	▲▲ (バックアップウィンドウ)
探査機		基本設計	詳細設計	維持設計	運用	
		EM製作・試験				
			FM製作・試験			
			システム 機械・熱試験	システム 電気試験	FM総合試験	射場
キックステージ		基本設計	詳細設計	維持設計フェーズ(製作・試験含む)		
			モータ地上燃焼試験/PQR▲		▲PSR	



5. プロジェクト移行審査のまとめ



5.1 プロジェクト移行審査判定

2010 年代後半から2020 年に向けて、世界は、科学探査や資源探査にとどまらずナショナルプライドをかけて月惑星探査ミッションの計画・検討を進めている。各国が国際競争と国際協調を絡め探査ミッション計画を進行させる中で、重力天体への高精度着陸技術は、我が国がイニシアティブを発揮する上で必須であり、可能な限り早期に獲得すべき技術である。

SLIM のプロジェクト目標は、重力天体への高精度着陸技術の実証であり、加えて、大幅な軽量化を実現する月惑星探査システム技術の開発である。特に、高精度着陸技術は、価値ある月探査ミッションを効果的・効率的に実現するために必要な技術である。

上記を踏まえた上で、SLIM のプロジェクト計画(目的・目標、成功基準、スケジュール、資金等)は適切に設定されており妥当である。本審査で設定した要処置事項を確実に処置することを前提に、SLIM はプロジェクトへ移行してよいと判断する。

以上

平成28年3月8日

審査委員長 山浦 雄一



5. プロジェクト移行審査のまとめ



5.2 【補足】プロジェクト移行審査の審査員構成

【審査委員長】

経営推進担当理事

山浦 雄一

【審査委員】

理事

川端 和明

理事

浜崎 敬

理事

伊藤 文和

理事

常田 佐久

理事

今井 良一

理事

山本 静夫

執行役

田中 哲夫

執行役

深井 宏

執行役

伊東 康之

執行役

雨宮 明

技術参与(統括チーフエンジニア)

本間 正修

技術参与(信頼性統括)

武内 信雄



6. まとめ

- 以上、小型月着陸実証機（SLIM）の実施フェーズに移行に際する「事前評価」に資するため、JAXAが実施したプロジェクト移行審査（平成28年3月8日）の結果について報告した。
- プロジェクト移行審査では、主に以下の観点で審査され、プロジェクトフェーズへ移行することが了承された。
 1. プロジェクト目標、範囲の設定の妥当性
 2. 実施体制、人員計画、資金計画、スケジュールの妥当性
 3. リスク識別とその対応策の妥当性
 4. その他、重要な技術要素に関わる計画の妥当性
- 移行審査の判定でも述べられている通り、SLIMが実証しようとしている高精度着陸技術は、まさに“価値ある月探査ミッションを効果的・効率的に実現するために必要な技術”である。
- その実現へ向け、確実な施策により、慎重かつ精力的に実施フェーズにおける基本設計・詳細設計を進めていく所存である。