

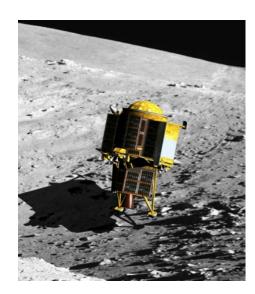






# 月面上、狙った場所へ ~小型月着陸実証機"SLIM"プロジェクトのご紹介~

JAXA宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 准教授 SLIM プロジェクトマネージャー 坂井真一郎









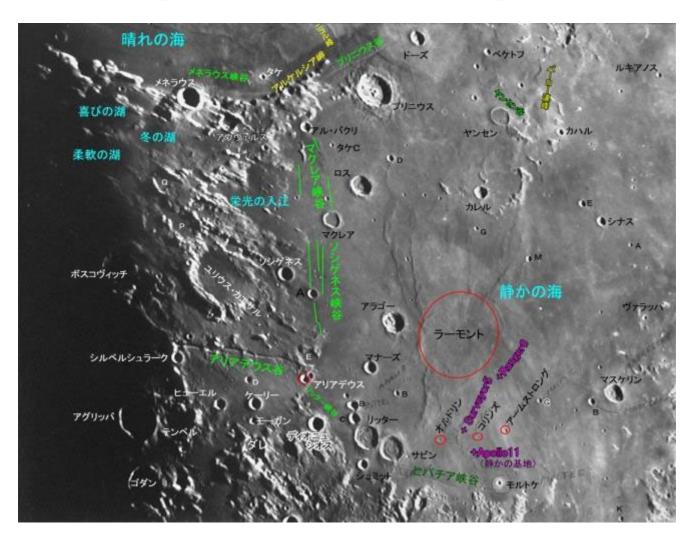
### 【これまでの月面着陸】

- ▶ アポロ計画による有人機の着陸、あるいはそれに先立つ技術 実証計画であったサーベイヤー計画での複数の無人機の着陸 など、これまで月面には多くの無人・有人機が軟着陸してき た。
- ▶ これらはいずれも、なるべく広い範囲にわたって安全そうな 領域を選び(多くは"海"といわれる平地)、そのどこかに降 りる、という着陸の考え方を採用していた。
- ➤ そのため、それほど高い着陸精度は必要とされておらず、数 km~10数km程度の着陸精度(誤差楕円)が達成できれば、 十分であった。
- ▶ この精度の着陸であれば、基本的には、地上から探査機の軌道決定・ナビゲーションを行うことで、十分実現することが可能であった。





# 【これまでの月面着陸】



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







# 【これまでの月面着陸精度】

- ▶ 1960~70年代の計画については、着陸精度情報が公表されているものをリストアップした
- ▶ 嫦娥3,4号については、論文によれば、"着陸精度要求6km"とされている。

計画名	実施国	打上年	ミッション概要/着陸精度	質量	
サーベヤー 1 号~ 7 号	米国	1966	アポロ計画のプリカーサ	995	
, , , , , ,		~1968		∼1039kg	
アポロ11号	米国	1969	誤差楕円 20km(down range)	司令・機械船28.8t	
) N. H. I. I.			imes 5km (cross range)	着陸船:15.2t	
アポロ12号	米国	1969	誤差楕円 13km(down range)	司令・機械船28.8t	
			× 5km (cross range)	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	1538kg	
ルナ13号	ソ連	1966	だった"。エアバッグによるランダ軟着陸)	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	赤道付近に軟着陸(2013/12/14)	3780kg	
			着陸精度要求6km、障害物回避機能有		
嫦娥4号( Chang'e 4)	中国	2018	月の裏側(東経177.6度、南緯45.5度)に軟	3780kg	
			着陸(2019/1/3)。3号機と同一設計		
SpaceIL Lunar Lander	イスラエル	2019	探査機自身がホッピングにより移動	600kg	
	(民間)	2019	休旦  依日  ガー・グーング により		







#### 【かぐや・LROの成果】

- ▶ ところが、近年、月面着陸に求められるものが大きく変わりつ つある。
- ▶ きっかけは、JAXAが2007年に打ち上げた月周回衛星「かぐや」、NASAが2009年に打ち上げた月周回衛星「ルナ・リコネサンス・オービター(LRO)」により、高分解能の月面観測データが大量に得られたこと。その分解能は、例えば最高50cmなど。
- ▶ これにより、月面に関する詳細な地形情報が得られており、また組成についての手がかりも飛躍的に増大している。
- ➤ そのため、それ以降の月科学の関心は、「月面上のどこか」よりもむしろ、「あのクレータの隣のあの岩石」にフォーカスするようになってきている。







# 【今後の月探査に求められるもの】

- ▶ これらの例が示すとおり、今後の月探査の対象は、極めて狭い、 特定された領域に絞られつつある。
- ▶ これらの領域は、例えば比較的新しいクレータの近くなどにあることも多い。この場合、付近の地形は、従来の月面着陸機が降りてきた"海"などと比べて複雑で、岩石なども多く分布することが典型的。
- ▶ 従って今後、科学探査のための月面着陸においては、科学的に 関心のある特定地点の付近にある、限られた安全領域(平坦で 岩石分布の少ない領域)を狙って、着陸する必要がある。
- ▶ すなわち、新たに「ピンポイント着陸」の技術が必須となる。
- ▶ 必要な着陸精度に明確な基準はないが、様々な地形等を俯瞰すると、およそ100m級の精度が必要と考えている。







# 【SLIMプロジェクトの成り立ち】

- ▶ 宇宙研におけるプロジェクトの大部分は、「公募」により研究コミュニティからの提案を募り、国内の大学や研究機関に所属する研究者からなる委員会による競争的な選定プロセス、JAXAによる審査等を経て、発足してきている。
- SLIMの源流は、「かぐや」(SELENE)の後継プロジェクト として検討・提案された、SELENE-B計画に遡ることができ る(2005年頃)。
- ➤ その後、SELENE-B提案を"スリム化"し、小型探査機による技術実証ミッションとしての「SLIM」検討が開始されている。
- ➤ 2012年2月、JAXA宇宙科学研究所が公募した「イプシロン搭載小型計画」に対し、「小型月着陸実証機(SLIM)計画」を提案した。
- > 2016年4月、JAXAプロジェクトとして活動を開始した。







# 【SLIMプロジェクトの計画概要】

- 以下の2つを大きな目的としたプロジェクト
  - 1. 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 ✓目標着陸精度は100mオーダー
  - 2. 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
- ▶ 2021年度打上を予定。打上手段はH-IIAロケット、別の宇宙 研プロジェクト(X線分光撮像衛星XRISM)との相乗り打上。
  - ✓ XRISM分離後、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、月周回軌道へと遷移して、着陸降下を 行う。

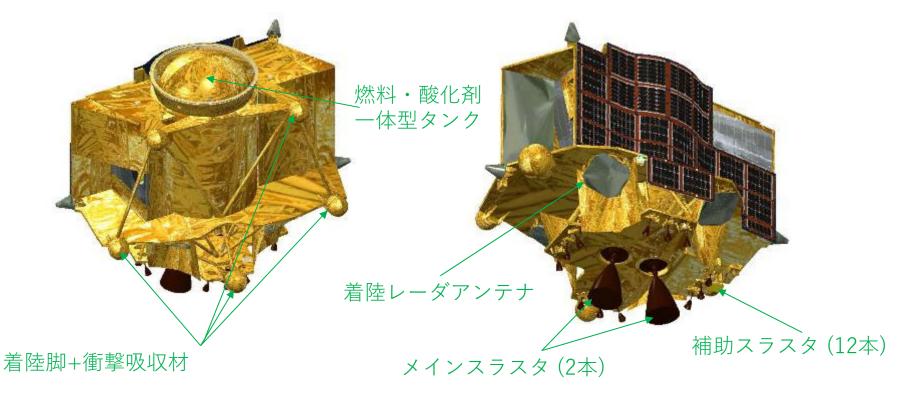






### 【SLIM探査機の概要】

- ▶ 推薬を除いたドライ質量は約200kgであり、従来の月着陸機 と比べて小型・軽量。
- ➤ 推薬を含む打上時質量は約700kg。打上質量の約3/4が推薬で あり、これを反映した構造となっている(ロケットに近い)







# 【"ピンポイント着陸"へ向けて 1/4】

- ▶「100m級ピンポイント着陸」を実現は、なぜ難しいのか?
  - 1. 軌道決定・予測精度の限界
    - ✓ 地上から電波により着陸機の軌道を決定する方法では、 特に瞬時の位置決定やその先の予測が難しく、数100m 程度の誤差が生じてしまう。
    - ✓ 月面画像と月緯度・経度情報の間にも不整合がある
  - 2. "大きな"月重力による、スピーディーな着陸降下の必要性
    - ✓ 月の重力は地球の1/6だが、例えば「リュウグウ」のような小惑星等と比べれば圧倒的に大きく、降下を開始したら"一気に"着陸する必要がある(例えば20分)。
    - ▶ 「ピンポイント着陸」のための補正を、全て地上から 行うことは難しい(間に合わない)。



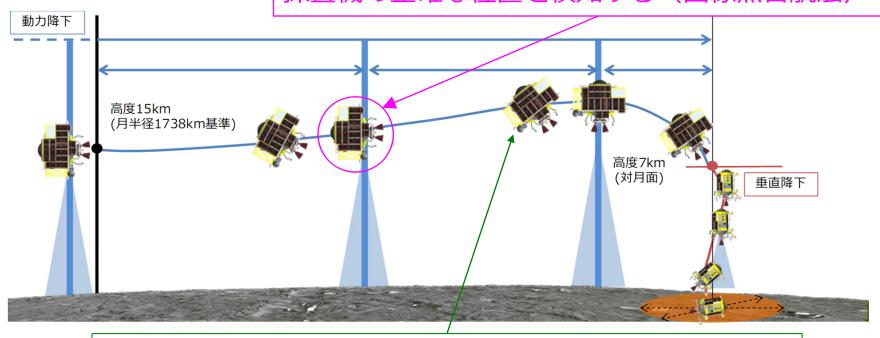




# 【"ピンポイント着陸"へ向けて 2/4】

必要なものは、「月面画像に基づく航法」と、 「探査機自身による自律的な誘導制御」

> 要所で月面を撮像、その画像から計算機が瞬時に、 探査機の正確な位置を検知する(画像照合航法)



画像照合航法の結果に基づき、時々刻々、軌道を修正しながら 目標地点に迫っていく(自律的な誘導制御)



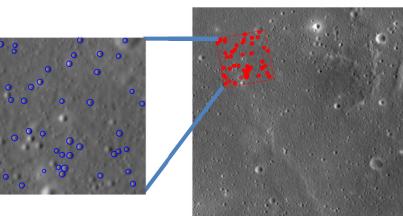


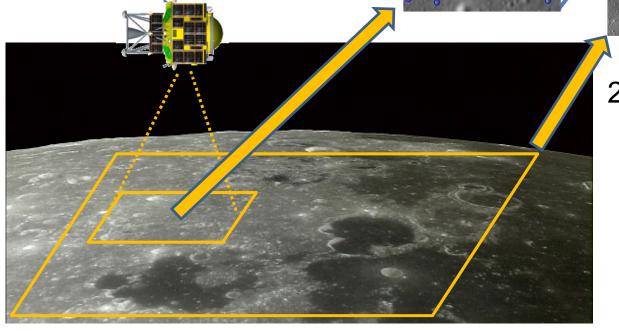


# 【"ピンポイント着陸"へ向けて 3/4】

#### 画像照合航法の概要

1. 撮影した画像を処理し、 「どこがクレータか」を抽出 する(クレータ抽出)

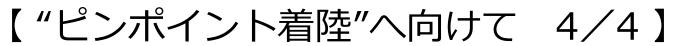




ありえる探査機位置を 包含する広い領域の 地図から、抽出された クレータパターンと一 致する場所を特定する (クレータマッチング)



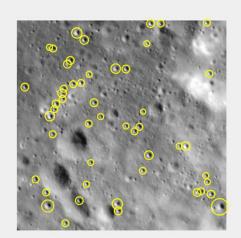




- 「画像照合航法」実現にあたっては、処理時間が重要な観点
  - ✓ 現状の宇宙用CPUは、地上用と比べておよそ1/100程度の能力
  - ✓ 宇宙用FPGA上でも数秒の処理時間で済む画像処理アルゴリズム を長年開発しており、実現の目処が得られている。

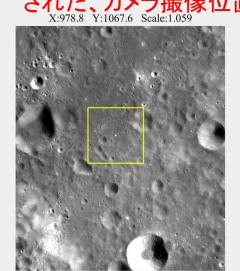


#### 人が持っているカメラが とらえた画像



2018年 JAXA宇宙科学研究所

「画像照合」により特定



特別公開におけるデモンストレーション

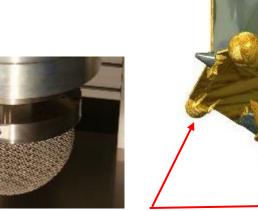


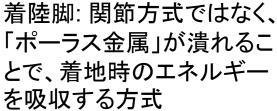


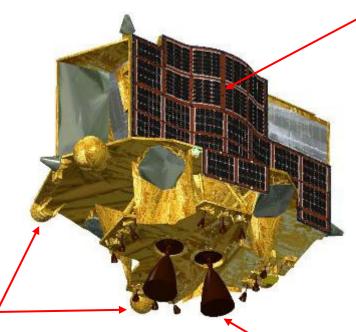


# 【小型・軽量化のために】

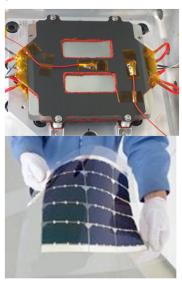
電源系:軽量な「SUSラミネートバッテリ」と 「薄膜太陽電池セル」を採用







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

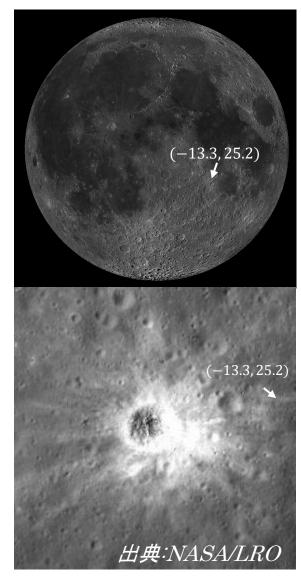






### 【月面着陸後の科学観測と着陸目標地点】

- ✓ 着陸成功後は、「分光カメラ」により、月マ ントル由来と考えられる物質の成分分析を行 う予定(月起源解明が狙い)
- ✓ そのためには、特定クレータ近傍への着陸が 必要 = ピンポイント着陸により初めて可能 となる観測
- ✓ この観測に適し、かつ着陸技術実証に適した。 地点("神酒の海"近傍)を着陸目標地点とし て選定した



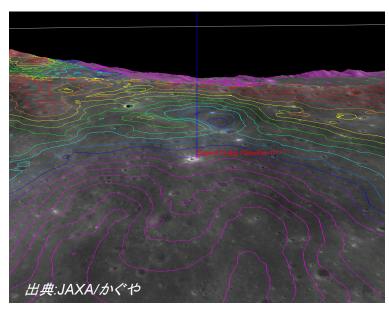


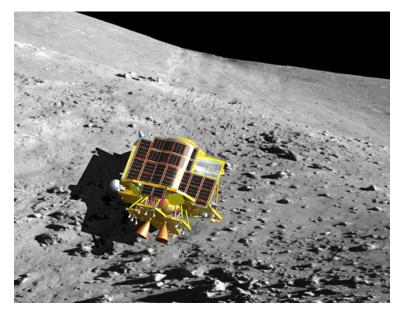




### 【傾斜地への着陸のために】

- ✓ この地点は、月内部のマントル由来の物質が露出している可能性 があることから選定されており、すなわち、クレータの近くに位 置している。
- ✓ そのため、付近一帯は斜度15[deg]程度の傾斜地となっている。
- ✓ 従って、小型軽量な機体で、このような傾斜地に安全に着陸する ことがが、重要となる。
- ✓ 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る。





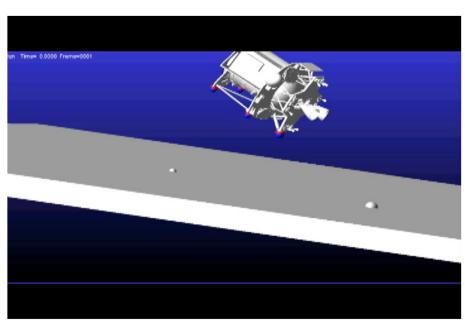


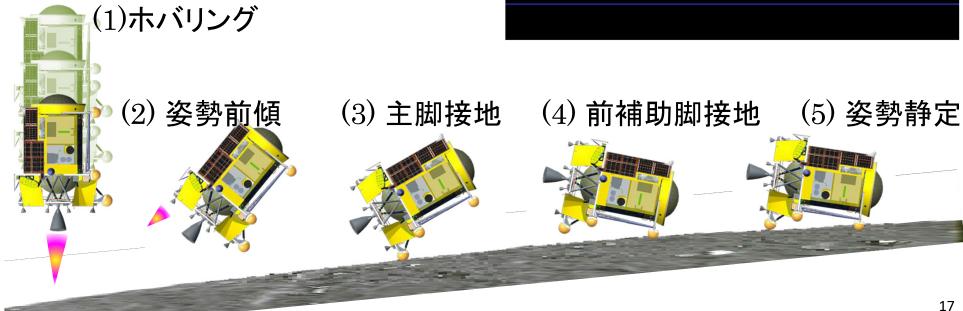




#### 【2段階着陸方式】

✓ 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、「2段階着陸方 式」が耐転倒性に優れることが 明らかになりつつある。





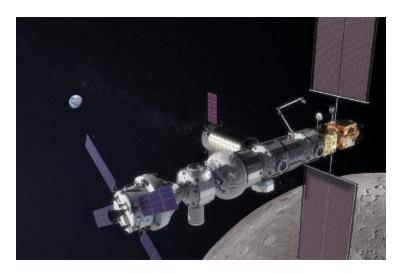


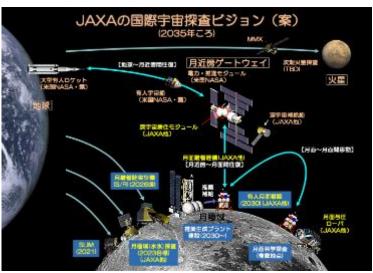




### 【まとめ ~SLIMが拓く世界】

- ✓ 現在、国際協力による宇宙探査のシナリオが検討されており、国際ミッションである月近傍有人拠点(Gateway)計画への参加、月極域での水資源探査、月離着陸実証機(HERACLES)などが検討されている。これらの活動は、昨年末に改訂された宇宙基本計画工程表にも取り込まれている。
- ✓ 例えば、月極域での水資源探査のためには、永久日照地域への着陸が必要となるが、このようなエリアは高々100m程度の広さしかなく、ピンポイント着陸技術が必須となる。
- ✓ 従って、SLIMはこれらミッションに対する重要なプリカーサと位置づけられている。











# 【まとめ ~SLIMが拓く世界】

- ✓ 実際、今後の月着陸機計画の中には、ピンポント着陸に言及するものが現れ始めている。
- ✓ すなわち、SLIMが実証する技術は、実際に将来に繋がるもの

計画名	実施国	打上年	ミッション概要/着陸精度	質量
嫦娥3号( Chang'e 3)	中国	2013	赤道付近に軟着陸(2013/12/14)	3780kg
ががなる ( Change 3)			着陸精度要求6km、障害物回避機能有	JIOUNE
嫦娥4号( Chang'e 4)	中国	2018	月の裏側(東経177.6度、南緯45.5度)に	3780kg
Stange 4)			軟着陸(2019/1/3)。3号機と同一設計	
SpaceIL Lunar Lander	イスラエル	2019	探査機自身がホッピングにより移動	600kg
Spaceic Luliai Lailuei	(民間)	2019		
嫦娥5号( Chang'e 5)	中国	2019	サンプルリターン	8200kg
Chandrayaan-2	インド	2019	着陸精度: 30km x 15km (誤差楕円)	3290kg
Astrobotic Peregrine Lander	米国	2020	着陸精度:24km x 6km (誤差楕円), M1	1283kg
Astrobotic r eregime Lander	(民間)	2020	着陸精度:100m(2号機以降?)	
ルナ25号(Luna Grob Lander)	ロシア	2021	南極近傍のBoguslavskyクレータに着陸	1750kg
iSpace Lunar Lander M2	日本 2021		月面への輸送システムデモ、	
Ispace Luffar Laffder M2	(民間)	2021	輸送したローバによる月面走行。	
ルナ27号(Luna Resurs Lander)	ロシア	2023	極域着陸	
Astrobotic Griffin Lander	米国(民間)	?	(Peregrine Landerの大型版)	







### 【まとめ ~SLIMが拓く世界】

- ✓ SLIMは多くの新規技術開発の上になりたっており、若手技術者達が 研鑽する場にもなっている。
- ✓ ミッション提案段階から、大学との共同研究によって進められており、現在でも協力を頂いて開発を進めている。
- ✓ 「研究開発要素の多いプロジェクトをどう確実に進めるか」という 1つの実例としても、重要と考えている。

