



小型月着陸実証機(SLIM)

月面着陸の結果について

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



▶ 本日のご報告内容

本日は、2024年1月19日～1月20日に実施した小型月着陸実証機(SLIM)の月面着陸降下運用の結果について、以下の通りご報告します。

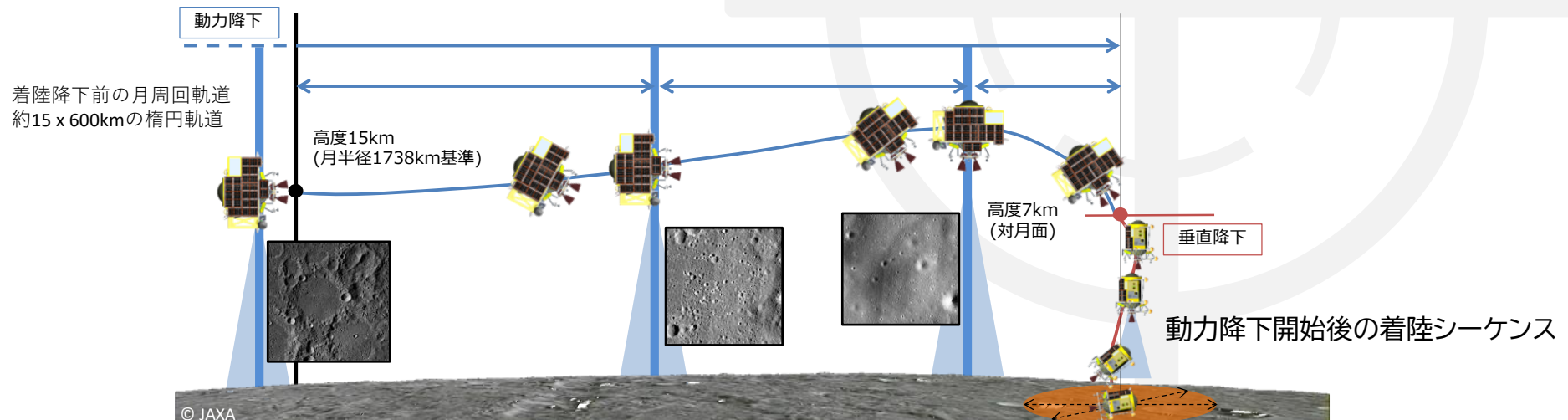
1. 実際の着陸降下の経過について(高度50m付近まで)
2. 画像照合結果、およびピンポイント着陸精度の評価結果について
3. 高度50m付近で発生した事象について
4. 異常事象発生後の探査機挙動の推定について
5. 着陸後の探査機運用と、得られたマルチバンド分光カメラ画像について
6. 今後の運用再開の見通しについて



▶ 着陸シーケンスの概要

1. 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。
2. 目標地点上空からは、着陸レーダによる高度・地面相対速度の精密な計測も開始し、航法誘導に反映。
3. 着陸地点上空約50mで画像ベースの障害物検出を行い、危険な岩などを自律的に避けて着陸する。すなわち、上空50mまでは着陸のピンポイント性を追求するが、それ以降はむしろ着陸の安全性を優先して障害物回避を行う。

【補足】 探査機の位置・速度は、搭載している加速度センサにより伝搬され、画像航法によって正確な値へと補正される。また、画像航法実施時以外も、着陸後の後解析に利用する目的で一定間隔で航法カメラ撮像を行っている。





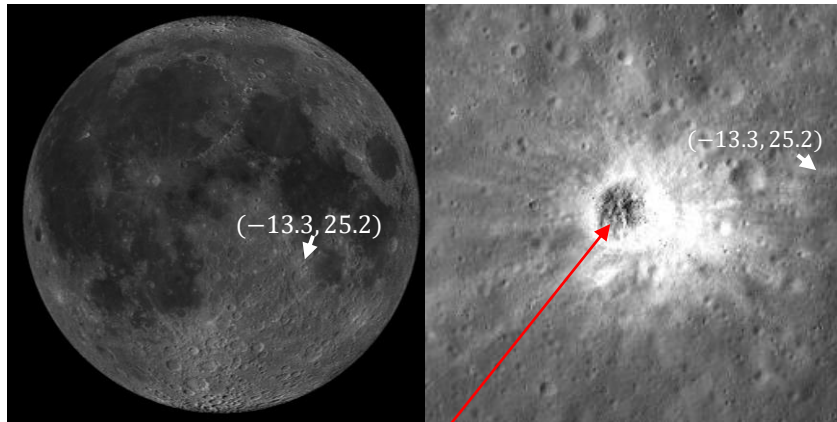
▶ 着陸目標地点の精位置情報

SLIMの着陸目標地点は、以下の通り*1(平均地球/極軸系(ME))

経度 : 25.24889 [deg] / 緯度 : -13.31549 [deg]

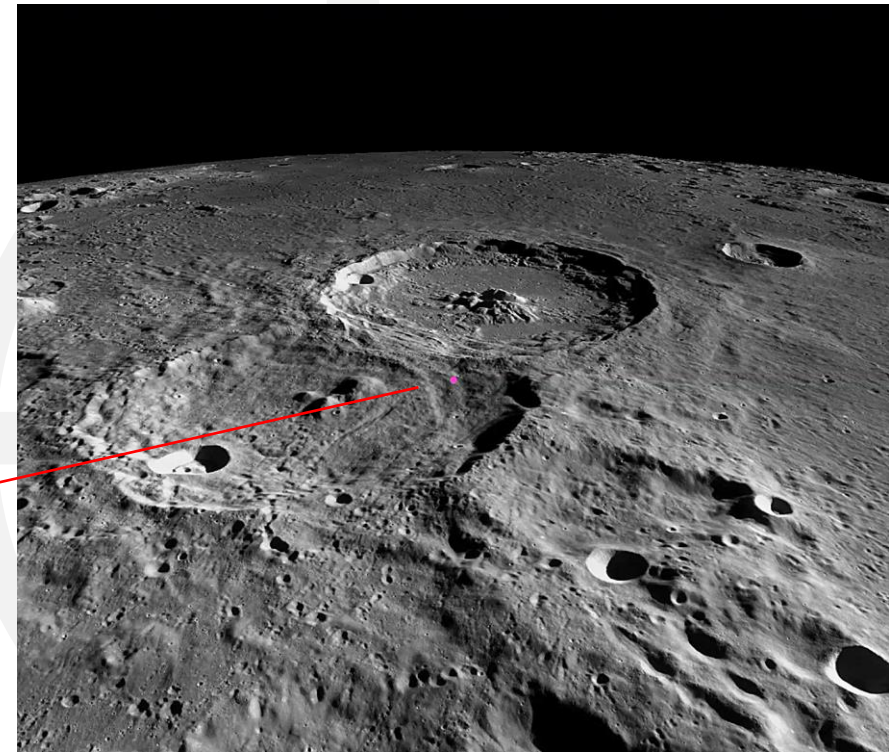
*1… より厳密には、着陸目標地点は月面画像上で定義されており、その緯度経度がこの値となっている。

- なお従来、着陸目標地点としては、NASA、ISRO等の協力先を除き緯度/経度で小数点第一位までを公表していた。
- これは、科学的意義と着陸安全性を両立する地点の精位置情報自体に意義があると考えていたためである。
- 実際、SLIMでも、長い議論の末に着陸目標地点を選定した経緯がある。



出典:NASA/LRO

SHIOLIクレータ



©藤井大地, LRO

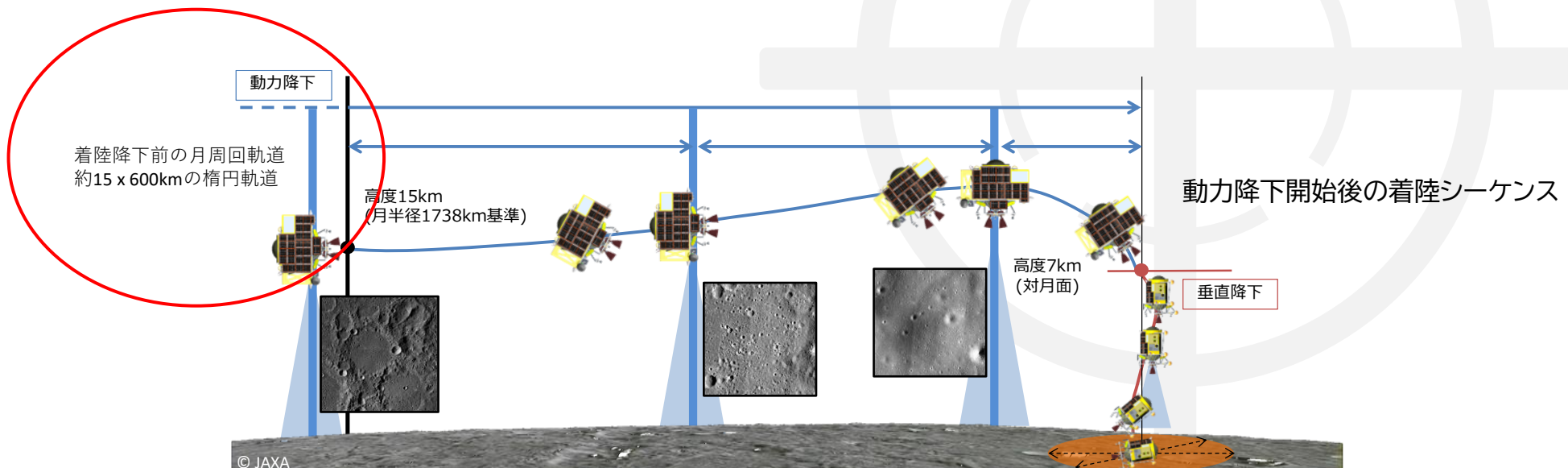
出典 : X, @dfuji1
<https://x.com/i/status/1748103951336227113>



▶ 実際の着陸降下について

【着陸降下開始前】

- 動力降下開始前、3つの領域で画像照合航法を実施した(1月19日 23時52分43秒、54分43秒、56分45秒)
- 各領域2回ずつの画像照合が全て正常に完了し、その結果に基づく探査機上での軌道修正(誘導演算)も正常に完了したことから、着陸降下の開始を最終的に判断した(23時59分頃)
- その後、計画通りメインエンジンの噴射を開始、着陸降下シーケンスの前半部となる動力降下フェーズを開始した(23時59分58秒)

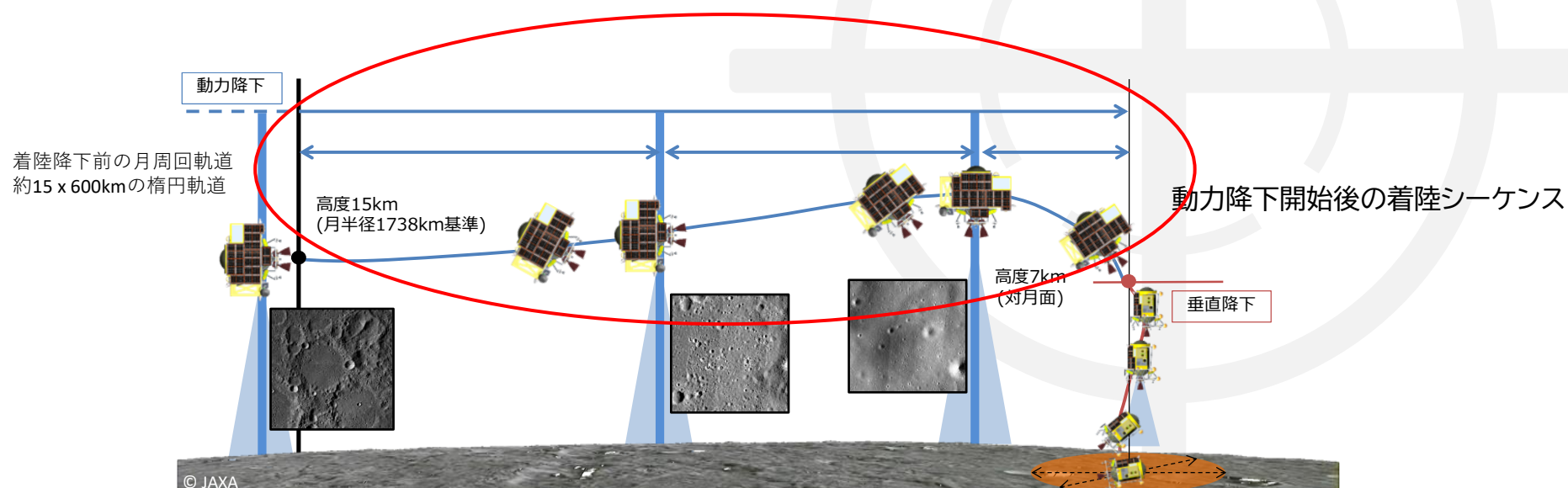




▶ 実際の着陸降下について

【動力降下フェーズ中】

- 動力降下開始後、探査機はほぼ計画された軌道に沿って降下を行った。
- 動力降下フェーズ中、2つの領域で各2回の画像照合を実施し、いずれも正常に完了。1つめの領域では高度約200m/水平位置約100m、2つめの領域では高度1km/水平位置約200mの位置補正が適用され、直ちに誘導再計算により軌道計画に反映された。
- 動力降下フェーズ終了時、探査機は予定通り高度6.2km付近に位置し、水平位置誤差約100m以下と良好な状態で、次フェーズである垂直降下フェーズを開始した。

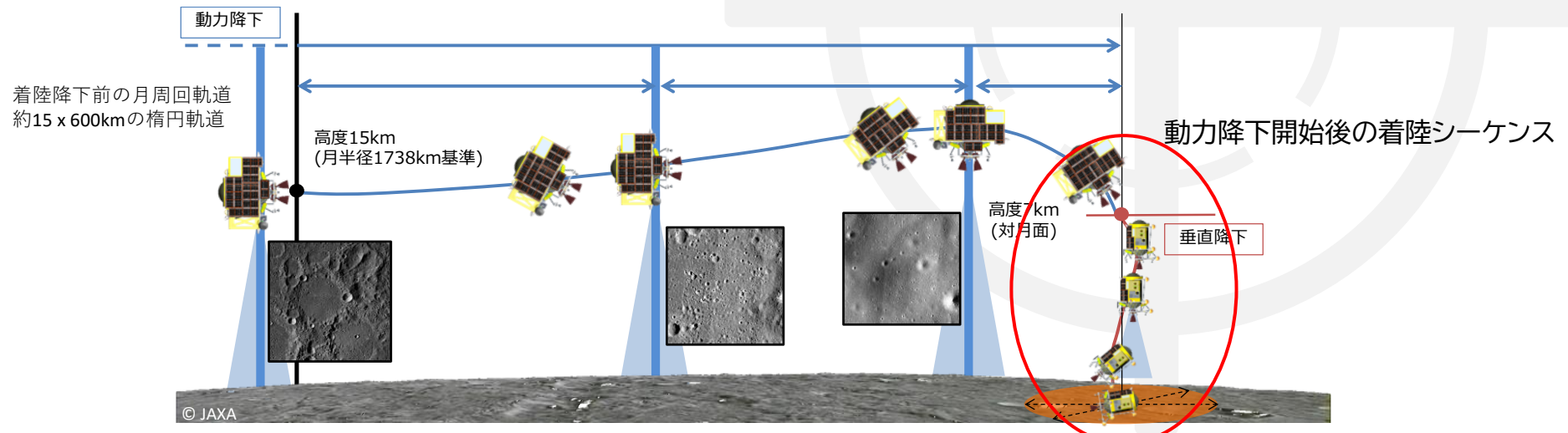




▶ 実際の着陸降下について

【垂直降下フェーズ中】

- 垂直降下フェーズに移行後、着陸レーダによる高度計測が正常に開始された。
 - 高度4000m付近、高度500m付近で、各2回ずつの画像照合が実施され、正常に完了した。水平位置の修正量はそれぞれ、100m程度、50m程度であり、これに対する位置補正の制御も正常に実施された。
 - 高度50m付近では画像ベースの障害物検出も正常に実施され、画像内から最も安全と考えられる地点を自律的に特定し、以降はここが最終的な着陸目標となった。
- 以上から、高度50m付近までの着陸降下は非常に良好だったと考えている。





▶ 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)

SLIM Image-based Navigation Ground Support System

User Name : slim_user01
Mode : Manual

CMD-0 GNC CMD-1 OBC CMD-2 IMP1 CMD-3 IMP2

Map VLD1

OP3

Image Information

Switch Images
SHOT PRED

Time Code : 91076206200087
Camera ID : 2
Image ID : 77

Detail

Index	Nav	Diff	Index	Est	Diff	Index	Est	Diff	Index	Est	Diff
X[px]	1313		X[px]	1313	0	X[px]	1315	2	X[px]	1314	1
Y[px]	5057		Y[px]	5072	15	Y[px]	5071	14	Y[px]	5071	14
Z[m]	2306.91		Z[m]	2304.13	7.22	Z[m]	2495.39	100.48	Z[m]	2391.99	5.08
Score			Score	0.8778		Score	0.8751		Score	0.879	

All Result NG NG Already Sent

Transmission completed. (2024-01-19 15:16:34.003155)
[IMP2] image id:77 OK/NG:OK send to:OSM

Setting
TLM RCV : UDSC64
SEND TO : SZSAT64 SZSAT62
UPDATE : Hold Release

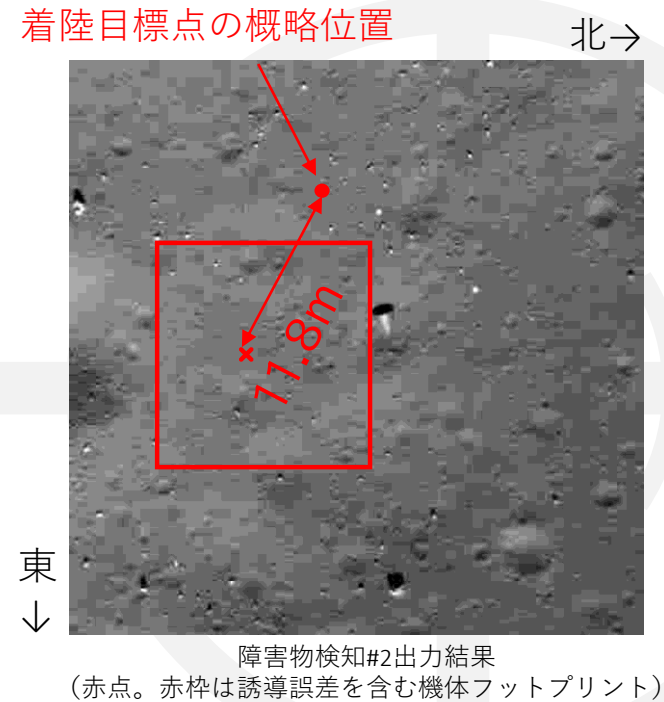
NAV: -13.32deg +25.25deg -407m

CMD-0 [1318,5092]



▶ 高度50m付近までの評価 / 障害物検知結果

- 障害物検知は2回実施され、いずれも正常に完了した。
- 検知に用いられた画像を事後に評価し、いずれも比較的安全性の高い地点を選んでいると考えている。
- 2回目の検知結果が、最終的な着陸目標として採用されている(事前に設定していた着陸目標地点から、約12mほど東南東)



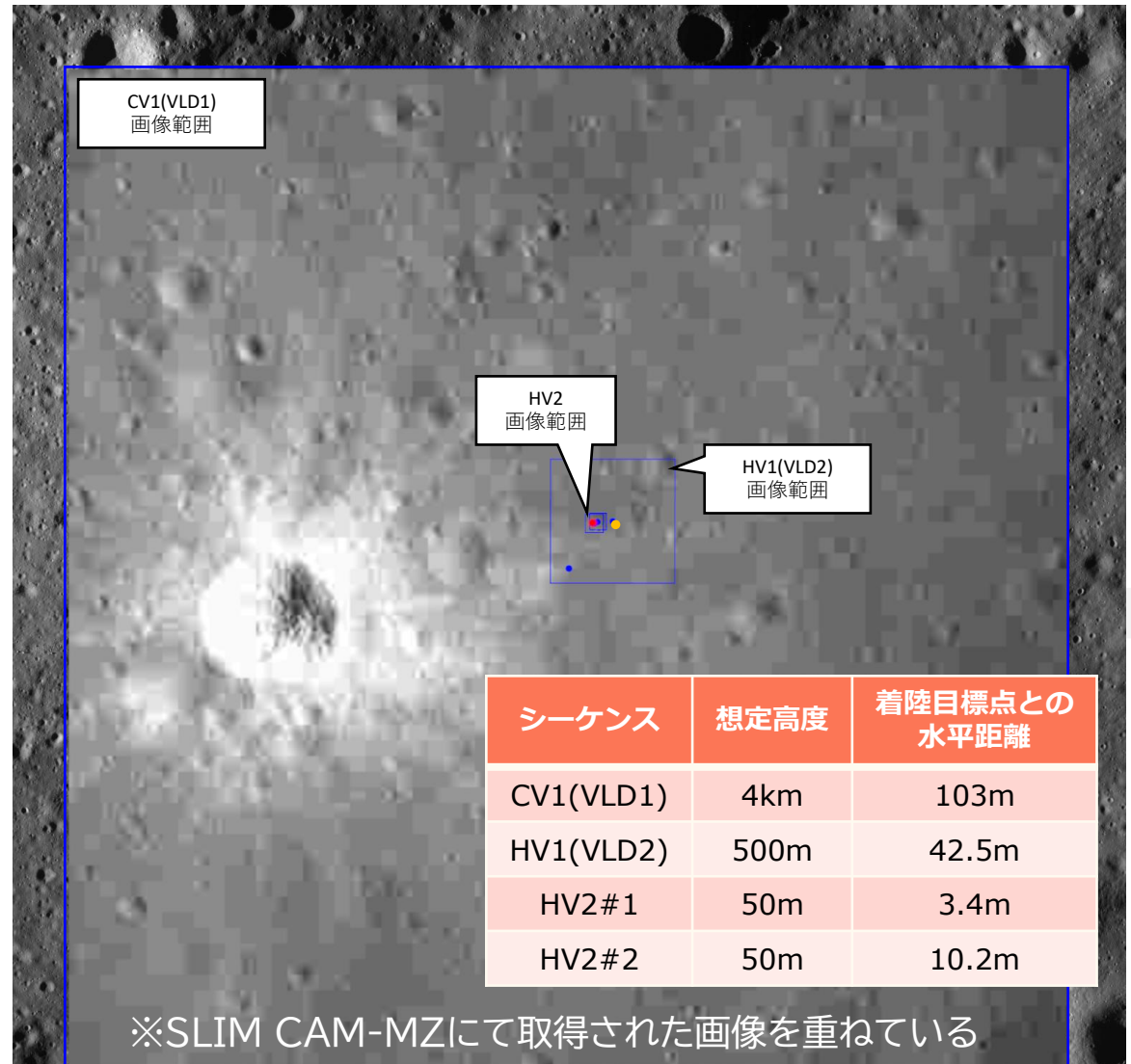
※SLIM 航法カメラ(CAM-MZ)にて取得された画像



▶ 高度50m付近までの評価 / 着陸目標地点へ向けて

- ▶ 比較的分解能が高く着陸目標地点設定の際にも用いられたChandrayaan-2画像を使用した評価を行った。
- ▶ 具体的には、Chandrayaan-2画像の中から、航法カメラ画像と共通する特徴点を探し、2つの画像が重なる領域を特定する作業を行った。
- ▶ 右図は、2つの高度(CV1、HV1)および障害物回避(HV2)時の様子。青点が画像中心、赤点が打ち上げ前に設定された着陸目標地点。
- ▶ 高度低下が低下し月面に接近するにつれて、航法誘導制御の結果、徐々に航法カメラ視野中心が着陸目標地点に迫っている様子が理解できる。

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。

Chandrayaan-2:ISRO/SLIM:JAXA

HV2 (障害物検知) #2
画像範囲

SLIMフットプリント
(誘導誤差含む)

着陸目標点

×HV2#1

11.8m

安全領域中心

×HV2#2

HV2 (障害物検知) #1
画像範囲

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

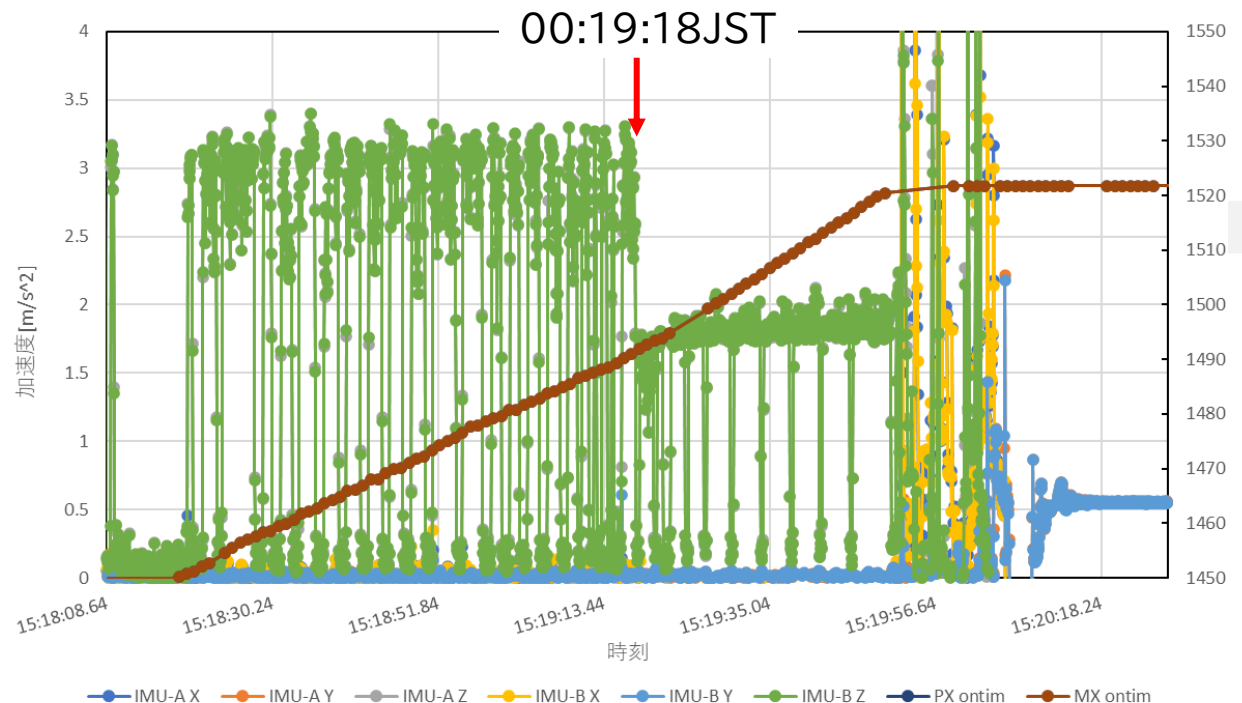
障害物回避以降は、図中の“安全領域中心”を目指した着陸へと移行する。着陸目標地点への正確な着陸より、障害物回避による安全性を優先するため(今回は着陸目標地点から11.8m離れた地点を目指すことになる)。従って、ピンポイント着陸精度については、障害物回避前の精度で評価することが、実力を評価することになる。



▶ 高度50m付近で発生した事象について

- 高度50m付近まで順調に降下してきたが、この付近で、推進系に異常が発生した。
- 具体的には、0時19分18秒付近で、メインエンジン2基の合計発生推力が、突如、約55%程度に低下した。
- 着陸後の温度挙動を調べると、メインエンジン2基のうち-X側について、通常であれば発生する温度上昇（ヒートソークバックによる推薬弁温度上昇）が見られていないことが判明した。
- このことから、この時点で-X側メインエンジンに何らかの異常が発生したと考えている。

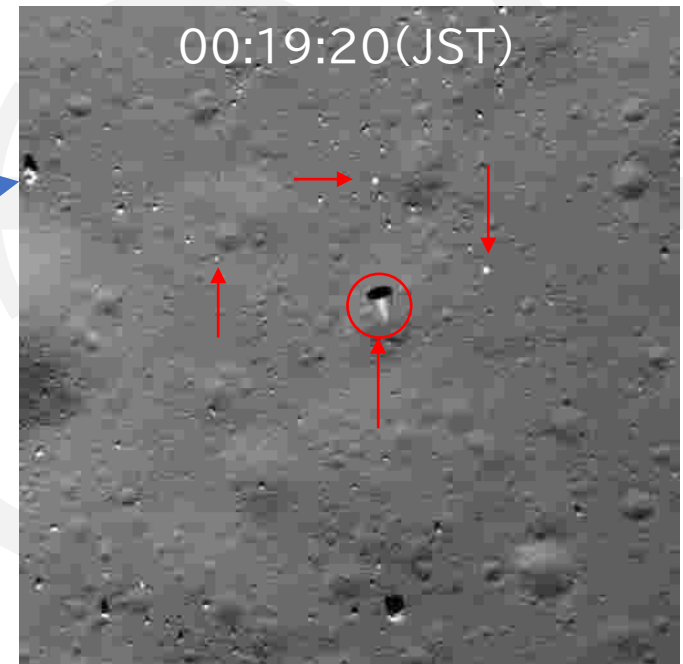
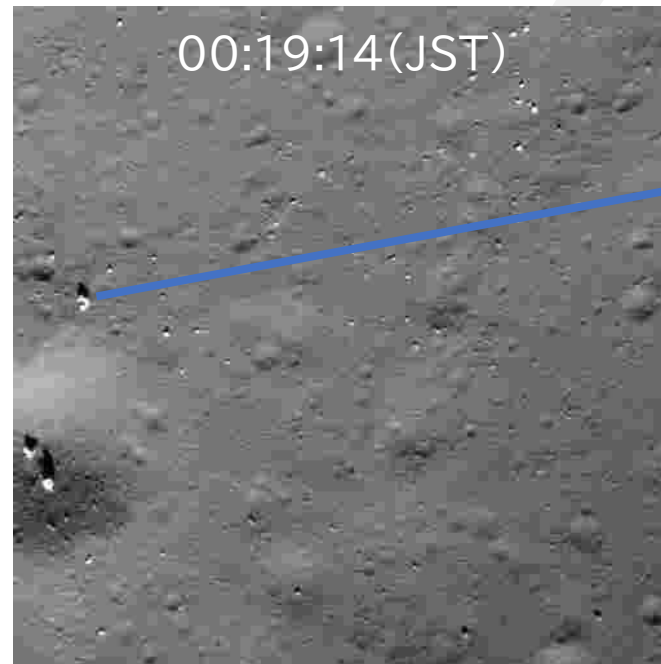
- 茶色線はメインエンジンの積算噴射時間、緑色線が加速度計の計測値で、メインエンジン2基の噴射による発生する加速度が検知されている。
- メインエンジンへの噴射指示はほぼ一定であるにも関わらず、0時19分18秒以降、加速度計の計測値メインエンジン2基の発生する合計推力が、突如約55%程度に低下したことが分かる。





▶ 高度50m付近で発生した事象について

- ▶ 当該時刻付近で撮像されていた、2枚の航法カメラ画像を以下に示す。
- ▶ メインエンジン推力に異常が発生した直後、航法カメラ画像に、それまでの画像には見られていなかった光点や物体が見られていることが分かる。
- ▶ このうちのひとつはノズルのような形状をしていることなどから、0時19分18秒付近で何らかの異常が-X側のメインエンジン付近で発生し、ノズル部が破断して落下、結果として-X側メインエンジンの発生する推力の大部分が失われたと推測している。

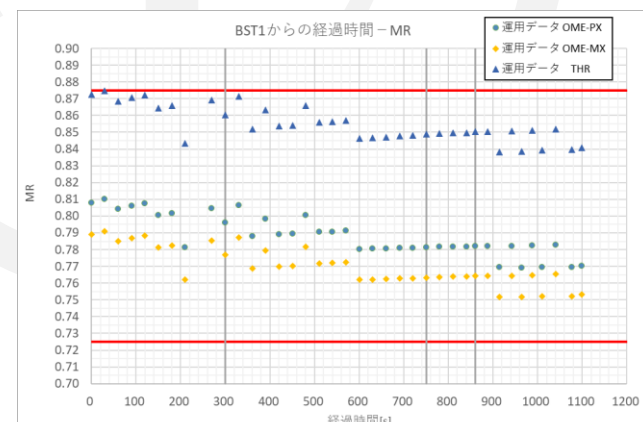
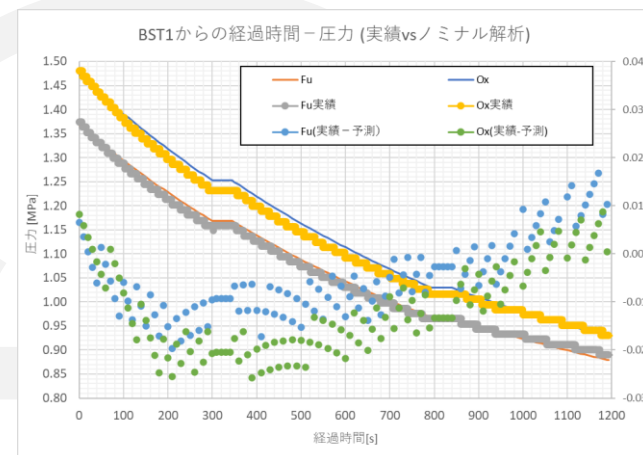


- ▶ 青矢印は、2つの画像間で共通する特徴点の対応を示したもの。
- ▶ 赤矢印の箇所に、左の画像には見られない光点や物体が見られている。



▶ 高度50m付近で発生した事象について

- ▶ 打上げ後、計8回の軌道変更時や動力降下フェーズでは、より供給圧が高くエンジン負荷の高い条件で使用してきたが、事象発生直前までメインエンジンには何らの異常兆候は見られていない。
- ▶ また事象発生時、メインエンジン2基を比べても、-X側エンジンは+X側エンジンと比べて、むしろ穏やかな燃焼条件だったと推定されている。
- ▶ 以上のようなことから、プロジェクトとしては、メインエンジン自体ではない何らかの外的要因が-X側メインエンジンに波及した可能性が高いと考えている。
- ▶ 本事象の原因については現在も調査中であり、詳細判明した時点で、改めてご報告したい。
- ▶ メインエンジン関連データの例。SLIMの推進系はブローダウン方式となっており、徐々に推薬供給圧が低下する設計。実際、燃料、酸化剤とも、打上げ後、推薬消費に従って、徐々に供給圧が低下し、エンジンへの負荷も低下していることが分かる(上図)。
- ▶ 酸化剤と推薬の混合比(MR)も、エンジンへの負荷を決める重要なファクタであるが、-X側エンジンのMRは常に+X側エンジンより低く、従って、-X側エンジンの負荷は+X側エンジンと比べて相対的に小さかったと考えている。





▶ 異常発生以降の挙動の推定について

0時19分18秒付近に異常発生して以降の探査機挙動について、現時点での推定結果は以下の通り。

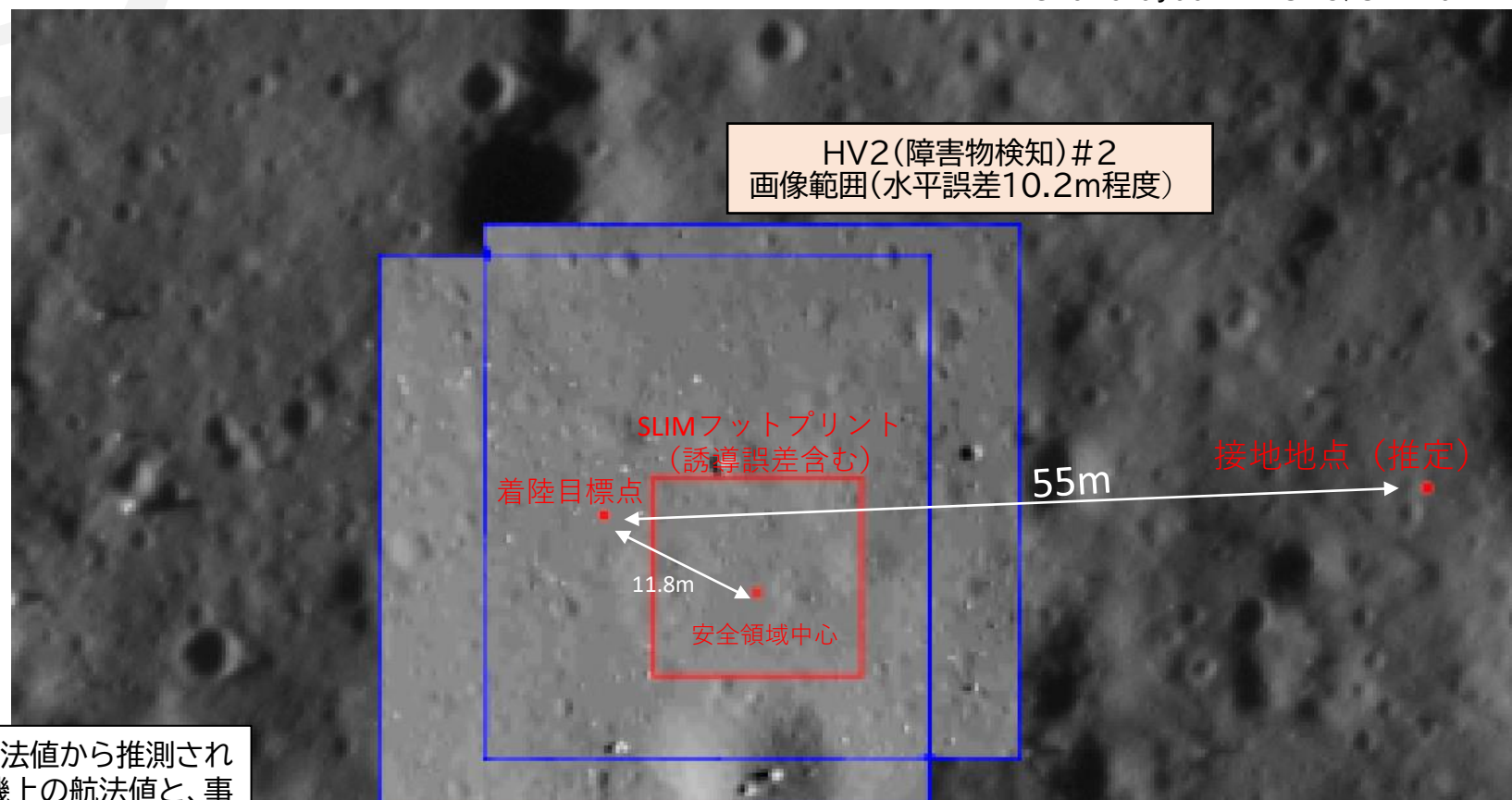
- ▶ 異常発生時、探査機はホバリング中であつた。異常発生によりメインエンジン1基が失われたが、メインエンジンは2基搭載され一定の冗長性を確保する設計となっていたため、月面着陸ができなくなるといった事態は回避することができた。
- ▶ 一方で、メインエンジン1基のみでは月重力と同等の推力しか発生することができず、降下速度を完全に制御することは困難となり、50m付近から秒速2m～3m程度での降下を継続した。
- ▶ また、メインエンジンは2基で双方の横方向推力を打ち消し合う設計となっていたところ、-X側の1基が失われたため、-X側に向かって水平速度が発生した。
- ▶ ホバリング終了時点で、搭載された航法誘導制御系が異常を検知してモード移行を実施。横方向移動を抑制するように姿勢変更をしつつメインエンジンの噴射を継続し、自律的にシーケンスを進めて着陸モードに移行。その過程で、高度約5m付近でLEV-1及びLEV-2(SORA-Q)を放出した。
- ▶ 横方向速度がある状態で、ほぼまっすぐ立った姿勢で接地した(0時19分52秒頃)。接地時の降下速度は秒速1.4m程度で、仕様の範囲(秒速1.8～2.8m)より低速であつた。一方、横方向の速度や姿勢などの接地条件が仕様範囲を超えていたため、接地後に大きな姿勢変動が生じ、想定と異なる姿勢で静定した。



▶ 推定されている着陸地点

- 障害物検知を行った時の探査機位置と、推定される接地地点の位置関係。正常に降下していた際の位置から、東に移動している(東へ約55m程度*1)。

Chandrayaan-2:ISRO/SLIM:JAXA



HV2(障害物検知) #1
画像範囲(水平誤差3.4m程度)

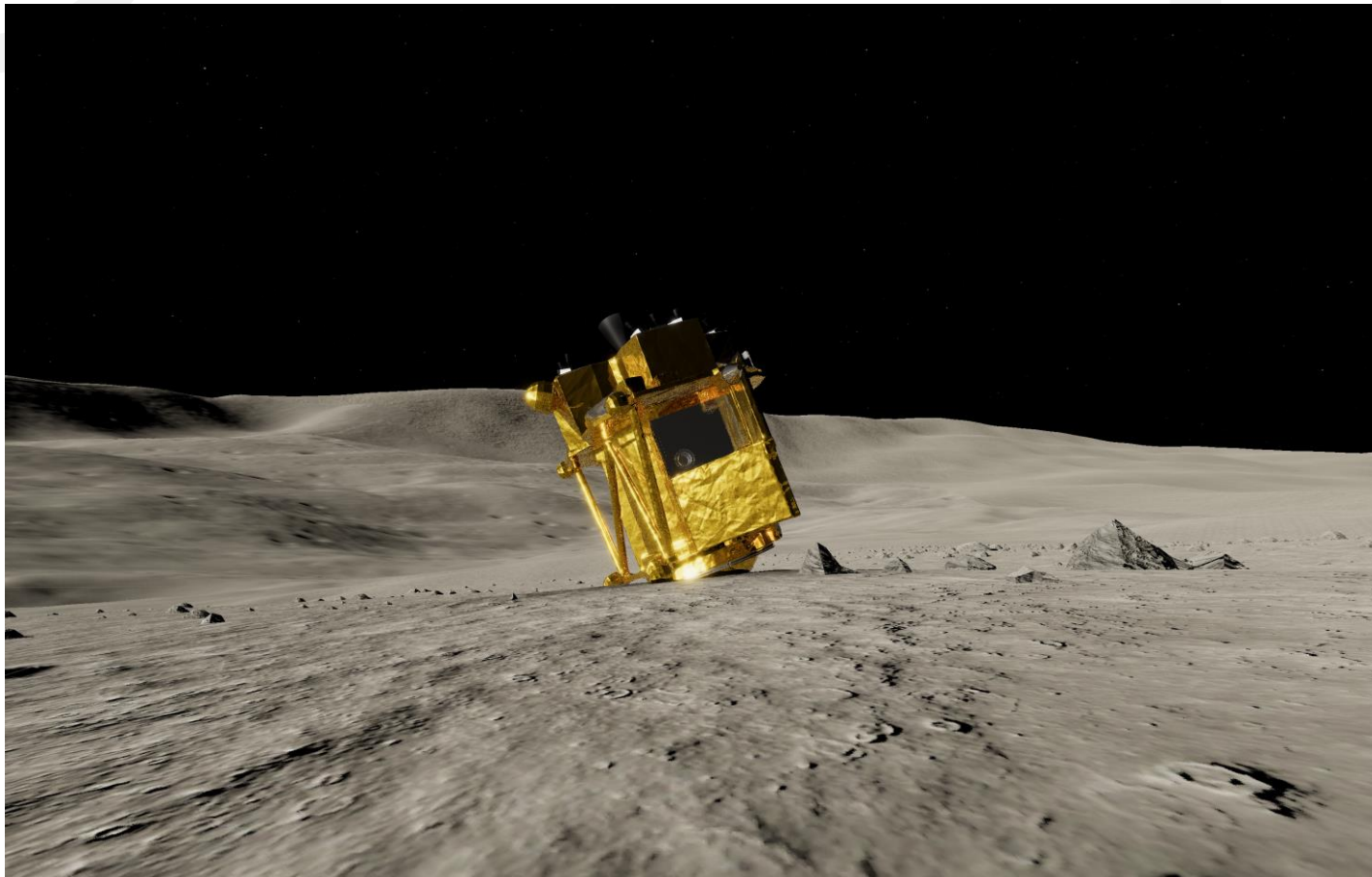
シーケンス	想定高度	着陸目標点との 水平距離
HV2 #1	50m	3.4m
HV2 #2	50m	10.2m

*1 … 探査機上の航法値から推測される位置。なお、探査機上の航法値と、事後にこの画像から推定される位置とは障害物検知(HV2 #1)時点で概ね整合している。



▶ 推定されている着陸姿勢

- 着陸後、最終的な探査機の姿勢は、探査機の各種データから、下図のようにメインエンジンが上を向いたほぼ鉛直の姿勢で、太陽電池パネルが西を向いた姿勢と考えている。



西

推定される着陸位置及び姿勢から作成したCG画像

提供: JAXA
CG製作: 三菱電機エンジニアリング



▶ 着陸直後の運用について

- ▶ 着陸したと判断された直後、太陽電池からの発生電力が得られていないことが確認された。
- ▶ 探査機との通信は確立されていたので、予め用意されていた異常時対応手順を順次実施した。
- ▶ 運用内容の概略を以下に示す(日付は1月20日)。
 - ▶ 0:20 ~ 1:30頃 探査機上データのダウンロード、不要機器OFF、ヒータOFF等
 - ▶ 1:30 ~ 1:50頃 国内地上局の可視時間終了に伴い、NASA深宇宙ネットワーク(DSN)局運用へ移行。
消費電力削減を試みる運用を実施
 - ▶ 1:50 ~ 2:35頃 マルチバンド分光カメラの観測運用実施
 - ▶ 2:57 コマンドによりバッテリーを電源系統から切り離し、探査機電源がOFFとなった。
- ▶ 上記運用の結果、着陸降下中に探査機上で記録された各種データ、画像データについて、所定のものは全て取り出すことができた。
- ▶ なお、バッテリー切り離しは、過放電による探査機の永久損失を避けるための措置である。SLIMは太陽電池からの発生電力が一定以上あれば動作可能なため、今後、発生電力回復による運用再開が期待できる。
バッテリーリレーOFF時のバッテリー残量(SOC)は約12%程度。



▶ マルチバンド分光カメラの観測運用結果

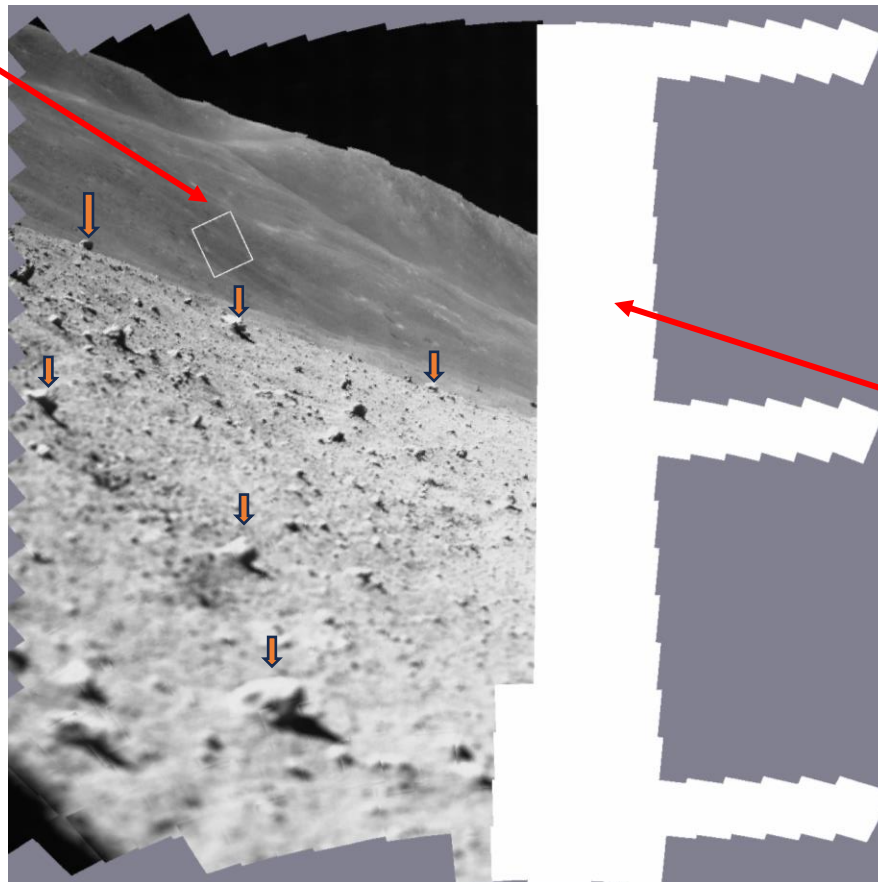
- ▶ 着陸後の約45分間、マルチバンド分光カメラ(MBC)の観測運用を実施した。実施内容は以下の通り。
 - ▶ ロンチロック状態での1バンド撮像(オート露光により露光時間を決定)
 - ▶ ロンチロック解除
 - ▶ スキャン撮像
 - ▶ 探査機の送信機温度が動作保証温度を超えないよう、通常35分程度で333枚の画像を撮るところを、15分のスキャンで打ち切ることとした。結果、333枚中257枚を撮像・ダウンリンクすることができた。
- ▶ 上記運用において、可動鏡のロンチロックは正常に解除され、可動鏡も正常に動作した。オート露光機能及び単バンド撮像についても、正常に動作した。
- ▶ また、次ページに示すスキャン撮像で得られた画像から、詳細観測により科学的成果の創出が期待される観測候補対象を特定することができた。



▶ マルチバンド分光カメラの観測運用結果

スキャン撮像で得られた257枚の画像を繋ぎ合わせた画像(モザイク画像)

1ショット画像の撮像
範囲



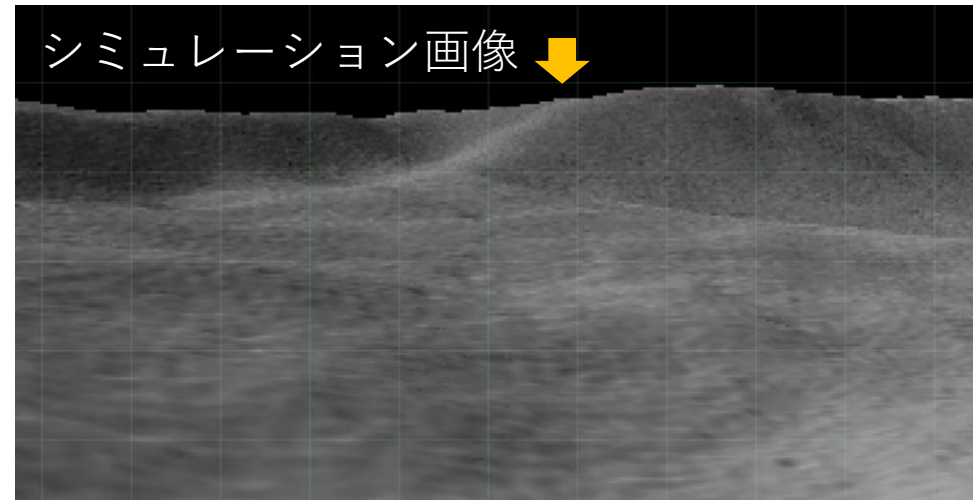
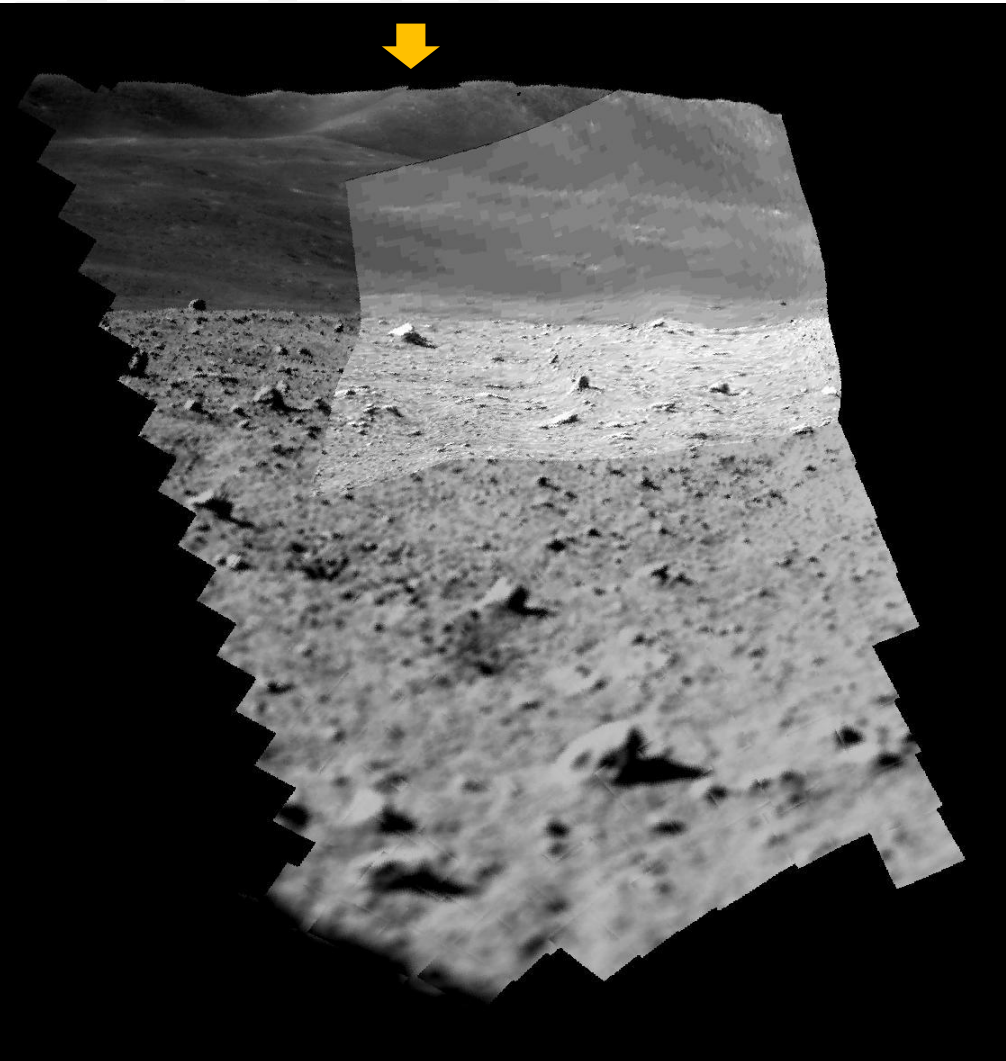
本来は画像の右側が上
方向になるはずであった。

白い部分はスキャンを
途中で打ち切ったため
にデータのないところ

↓ 観測候補を示す



▶ マルチバンド分光カメラの観測運用結果



「かぐや」TCのDTMに基づく、
景観シミュレーション

CAM-PX:JAXA
MBC:JAXA、立命館大学、会津大学

航法カメラ(CAM-PX)とマルチバンド分光カメラ(MBC)スキャン画像とのマッチング。
右上のやや白みがかった部分がCAM-PX画像



▶ 今後の復帰運用の見通しについて

- 着陸直後に行った運用の結果、高温化による機器故障等のリスクはあるものの、探査機は現状、太陽電池による電力発生が回復すれば運用再開が期待できる状態にある。
- 着陸後の姿勢についての推定結果から、西を向いた太陽電池に太陽が入射する状態、すなわち、月面における夕方になれば、電力発生が回復して探査機運用を再開できる可能性があると考えている。
- 現時点での推測に基づき、日没となる2/1までの探査機運用再開を想定して準備を行っている。電力発生により探査機は自動的に起動する予定であり、並行して、着陸後は毎日数時間程度、探査機との通信確立を試みている。
- 通信が確立し運用可能となった後、速やかにマルチバンド分光カメラの観測運用を再開し、取得されたスキャン画像を元に選定された観測候補について、優先順位に従って、順次、10バンドでの分光撮像による科学観測を実施する予定。



▶ まとめ(月面降下・着陸の結果 1/2)

- 障害物回避を行う直前、高度50m付近まで、SLIMは正常に着陸降下した。
- 特に、14回実施した画像照合航法は、その航法結果も含めて、全て正常であった。
- SLIMのピンポイント着陸精度は障害物回避の直前で評価することが適切であり、評価の結果、ピンポイント着陸精度は10m程度以下であり、3～4m程度であった可能性が高いと考えている。
- 高度50m付近で、何らかの異常が発生し、結果としてメインエンジン2基のうち1基を喪失した。
- 一定の冗長性を有していたことから、SLIMは着陸できなくなるといった致命的な破綻をきたすことなく、ゆっくりと東に移動しながら緩降下を続け、高度5m付近で小型プローブ(LEV-1及びLEV-2(SORA-Q))を分離、月面に送り届けることを達成した後、仕様範囲より低い降下速度で接地した。但し、降下速度以外の接地条件が仕様範囲を超えていたため、想定と異なる姿勢で静定した。
- 接地した位置は、着陸目標地点から東に55m程度の地点と推定されている。静定後の姿勢は、太陽電池パネルが西を向いた姿勢と考えており、着陸時に太陽は東側に位置していたことから、太陽電池からの発生電力が失われた状態となった。



▶ まとめ(月面降下・着陸の結果 2/2)

- 着陸後、探査機との通信は確立されていたものの、太陽電池からの電力発生が確認できなかったことから、異常時対応手順に従い、着陸降下中の画像を含む各種データを取得し、マルチバンド分光カメラのスキャン撮像を実施した後、探査機機能維持のためにコマンドでバッテリーを電源から切り離した。これにより、SLIMは電源オフとなった。
- 今後、太陽が西側に移動してくるにつれて、徐々に太陽電池による電力発生が回復し、運用再開が可能となることを期待している。運用再開後は、マルチバンド分光カメラによる10バンドでの科学観測を実施する予定であり、観測候補地点はスキャン撮像結果から選定済みである。



▶ まとめ(得られた成果と課題)

- 以上の通り、詳細データ評価は継続する必要があるものの、SLIMは予定していた工学実験項目のうち、2段階着陸ダイナミクスを除く着陸技術について技術実証できたと考えている。
- 特に、画像照合技術が実証され、ピンポイント着陸精度としても10m以下(恐らく3-4m程度)が達成されたことは、今後の月惑星探査に対して、大きな成果である。
- 着陸後の月面活動についても、放出後のLEV-1、LEV-2(SORA-Q)の動作が確認されており、これらを月面に送り届けることに成功している。マルチバンド分光カメラについても既にスキャン撮像を実施しており、機器の健全性は確認できている。今後観測運用を再開することができれば、さらなる科学的成果が得られることが期待できる。
- 一方で、障害物検知前後に生じた異常事象については、今後、詳細な検討を実施して原因を特定し、課題や対策を明らかにする必要がある。
- 今回は技術実証することができなかった2段階着陸ダイナミクスを含め、SLIMで開発された工学技術については整理し、今後のミッションへの継承に備えることとしたい。
- 今後の運用や検討、整理等の結果については、適時、何らかの方法で公表していく方針。

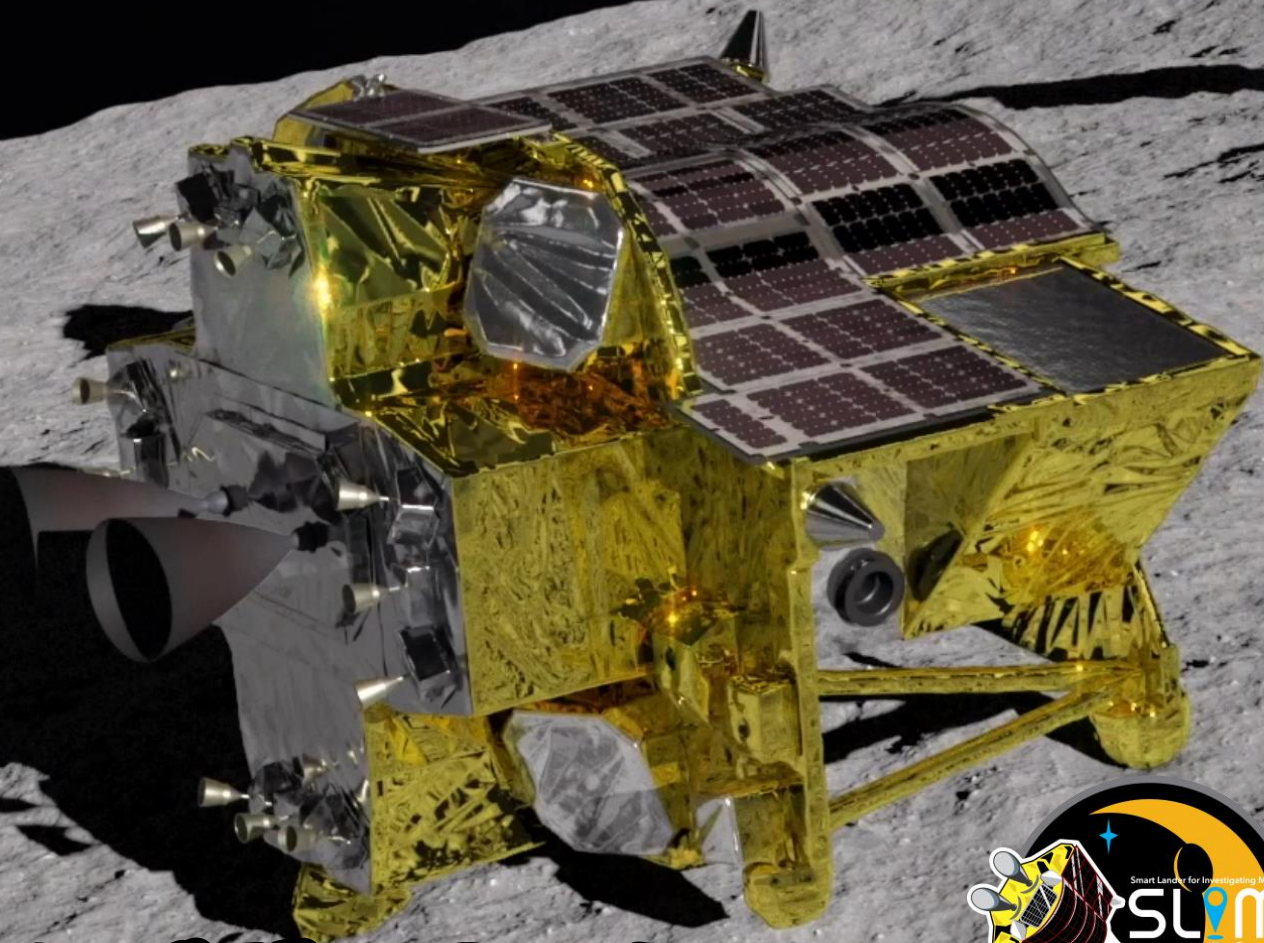


▶ まとめ(得られた成果と課題)

	工学実験目標項目	達成状況	評価状況など
ミニマム サクセス	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100m程度の航法誤差を実現する。	達成	軌道上で実施された14回の画像照合は全て正常に完了した。得られた着陸精度から、航法精度も10m程度以下と評価できる。
	軟着陸のためのシンプルな衝撃吸収機構を実現する。	調査中	
	小型・軽量で高性能な化学推進システムを実現する。	調査中	
	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。	達成	小型軽量の計算機、電源システムを開発して搭載した。いずれの機器も、打ち上げから着陸後まで正常に機能し、ピンポイント着陸の成功に貢献した。
フル サクセス	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。	達成	障害物検知前後まで、着陸誘導則は良好に動作し、ピンポイント着陸の性能を実証することができた。障害物検知結果についても妥当であることが確認されている。
	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。	達成	障害物検知付近の評価から、ピンポイント着陸精度は10m程度以下(恐らく3~4m程度)であった。その後発生した事象を経ても、着陸目標地点から55m程度の位置に着陸したと推定されている。
	着陸後に探査機が機能を維持する	達成	着陸後、探査機の動作は継続されており、着陸降下中に得られた各種データを再生して地上で受信することができた。
エクストラ サクセス	月面到達後、日没までの一定期間、ミッションを行う。	継続中	太陽電池からの電力発生が再開されれば、マルチバンド分光カメラの観測運用を一定の期間実施する計画

※ プロジェクトにおける定義から、プレスキット等には概要記述部分を引用していたが、今回は対比をとるため、より詳細な細目記述部分を引用している。

「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）