



小惑星探査機「はやぶさ2」の 運用状況

2018年10月11日

JAXA はやぶさ2プロジェクト



本日の内容



「はやぶさ2」に関連して、

- ・MASCOT分離運用の報告
- ・タッチダウンに向けたリハーサルとタッチダウンの方針

について紹介する。



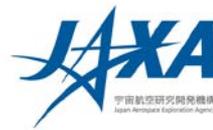
目次



0. 「はやぶさ2」概要・ミッションの流れ概要
1. プロジェクトの現状と全体スケジュール
2. MASCOT分離運用
3. タッチダウンに向けたリハーサルとタッチダウンの方針
4. 今後の予定



「はやぶさ2」概要



目的

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星リュウグウの探査及びサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用を解明することで、地球・海・生命の起源と進化に迫るとともに、「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を維持・発展させて、本分野で世界を牽引する。

期待される成果と効果

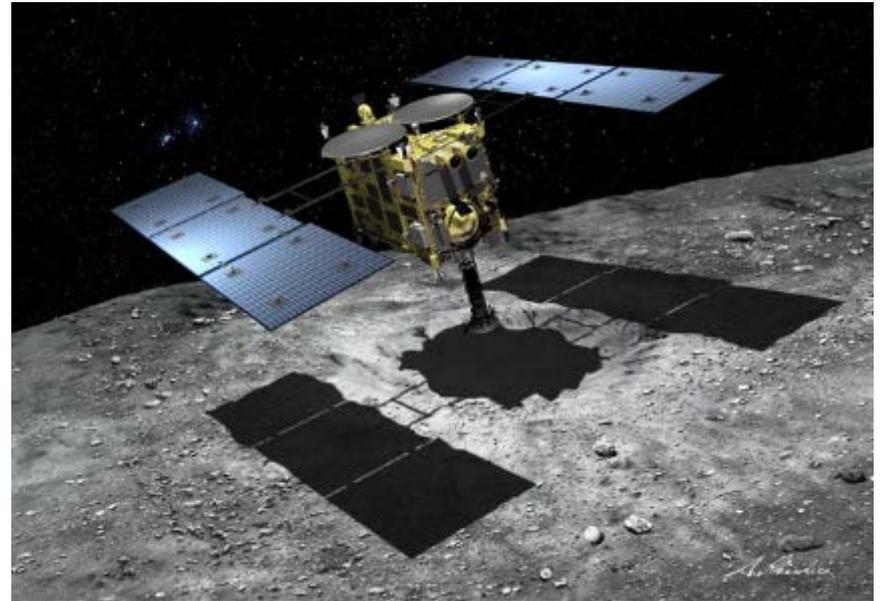
- ・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
- ・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
- ・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

特色:

- ・世界初のC型微小地球接近小惑星のサンプルリターンである。
- ・小惑星にランデブーしながら衝突装置を衝突させて、その前後を観測するという世界初の試みを行う。
- ・「はやぶさ」の探査成果と合わせることで、太陽系内の物質分布や起源と進化過程について、より深く知ることができる。

国際的位置づけ:

- ・日本が先頭に立った始原天体探査の分野で、C型小惑星という新たな地点へ到達させる。
- ・「はやぶさ」探査機によって得た独自性と優位性を発揮し、日本の惑星科学及び太陽系探査技術の進展を図るとともに、始原天体探査のフロンティアを拓く。
- ・NASAにおいても、小惑星サンプルリターンミッションOSIRIS-REx（打上げ:平成28年、小惑星到着:平成30年、地球帰還:平成35年）が実施されており、サンプルの交換が取り決められていることに加えて科学者の相互交流が行われており、両者の成果を比較・検証することによる科学的成果も期待されている。



(イラスト 池下章裕氏)

はやぶさ2 主要緒元

質量	約 609kg
打上げ	平成26年(2014年)12月3日
軌道	小惑星往復
小惑星到着	平成30年(2018年)6月27日
地球帰還	平成32年(2020年)
小惑星滞在期間	約18ヶ月
探査対象天体	地球接近小惑星 Ryugu(リュウグウ)

主要搭載機器

サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、衝突装置、小型ローバ



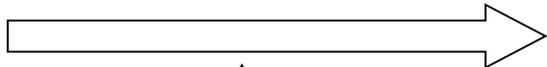
ミッションの流れ概要



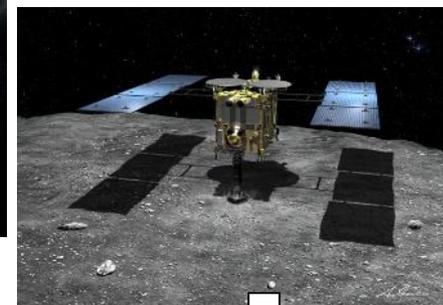
打上げ
2014年12月3日



小惑星到着
2018年6月27日



▲
地球スイングバイ
2015年12月3日

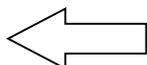


リモートセンシング観測によって、小惑星を調べる。その後、小型ローバや小型着陸機を切り離す。さらに表面からサンプルを取得する。

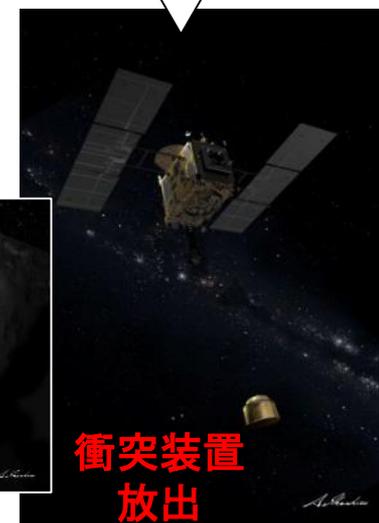
地球帰還
2020年末ごろ



小惑星出発
2019年11-12月



人工クレーター
の生成



衝突装置
放出

サンプル分析

安全を確認後、クレーターにタッチダウンを行い、地下物質を採取する。

衝突装置によって、小惑星表面に人工的なクレーターを作る。

(イラスト 池下章裕氏)

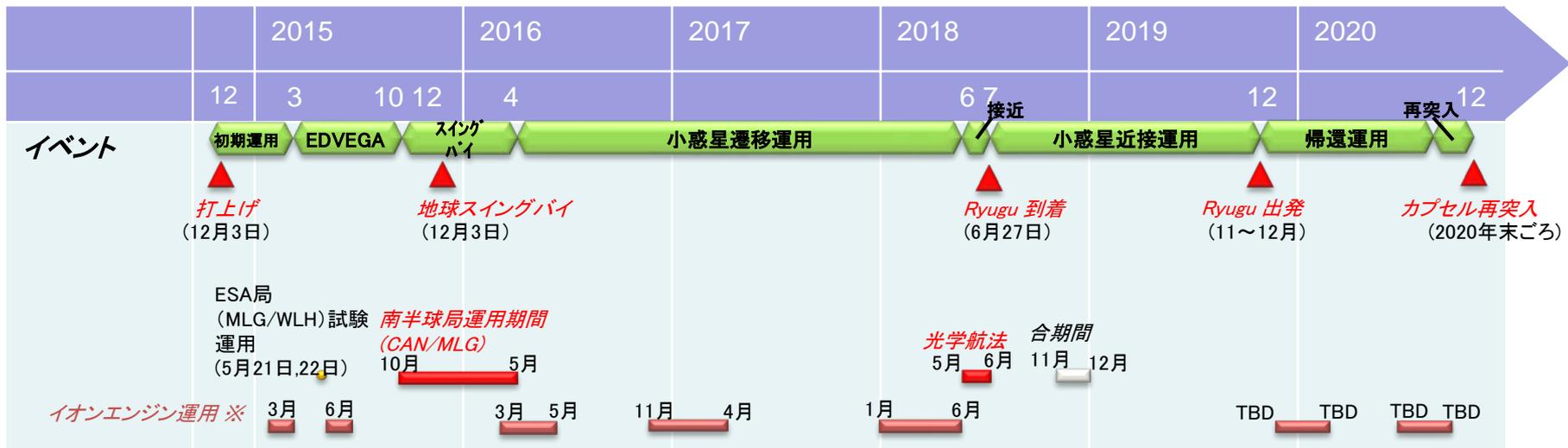


1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

現状:

- 9月30日から10月4日にかけてMASCOTの分離運用を行い、10月3日にMASCOTの分離に成功した。その後、MASCOTはリュウグウ表面に着地し、約17時間動作した。
- 1回目のタッチダウンに向けた再度のリハーサル(TD1-R1-A)は10月14-15日に行う。

全体スケジュール:





2. MASCOT分離運用



運用概要

- 9月28日 : MASCOTプロジェクトマネージャTra-Mi Ho氏より分離同意書を受領
- 10月2日、11:50(日本時間、以下同様) : 降下を開始
- 10月3日、10:57:20 : MASCOTを高度51mで分離
- 10月4日、04:30 : Tra-Mi Ho氏よりミッション終了宣言受領
(MASCOTは分離後17時間動作し続けた)
- MASCOTとの通信が正常に行われ、MASCOTがリュウグウに着地したことが確認された。また、MASCOT搭載観測機器により観測が行なわれ、取得データはMASCOTチーム(ドイツ)に伝送された。
- MASCOTは途中ホップして移動したことも確認
- MASCOTそのものの運用はドイツ側で行われ、DLRケルンで約40名が運用に対応した。なお、CNESトゥールーズで約5名が運用をサポートした。
- DSN(米国ディープスペースネットワーク)はレベル2*の体制
- 取得されたデータはタッチダウン運用の参考情報としても使う

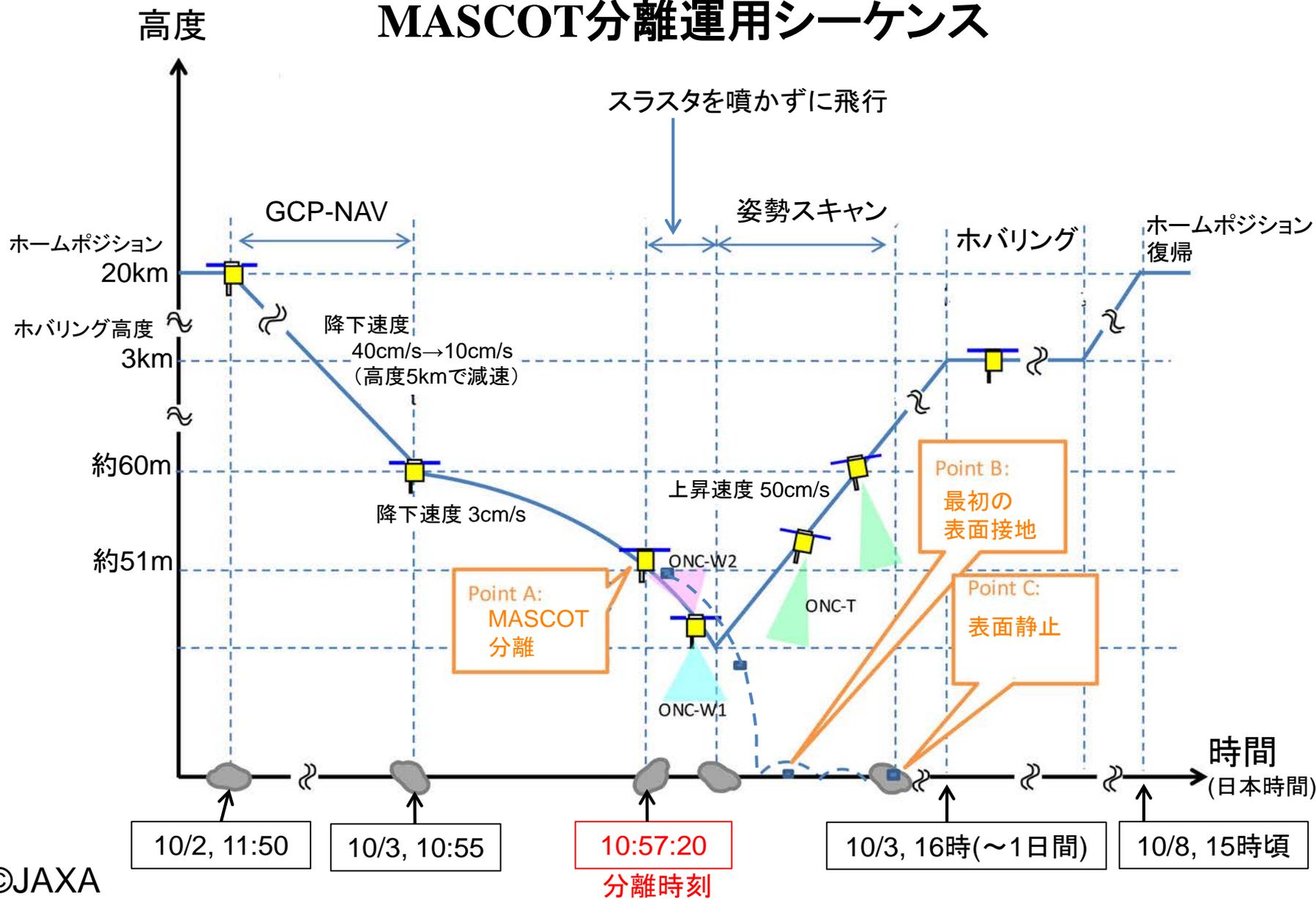
*レベル2
アンテナが冗長
手厚い人員配置



2. MASCOT分離運用

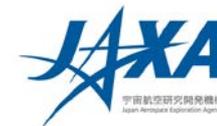


MASCOT分離運用シーケンス





2. MASCOT分離運用



注目!



ONC-W2によるMASCOTの撮影



広角の光学航法カメラ(ONC-W2)によって連続した3枚の撮影に成功。

撮影時刻:2018年10月3日

1枚目 10:57:54

2枚目 10:58:04

3枚目 10:58:14

※参考:分離時刻 10:57:20
(掲載時刻はいずれも日本時間)

(3枚の画像のアニメーション)

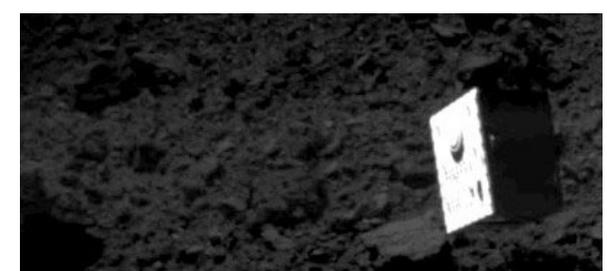
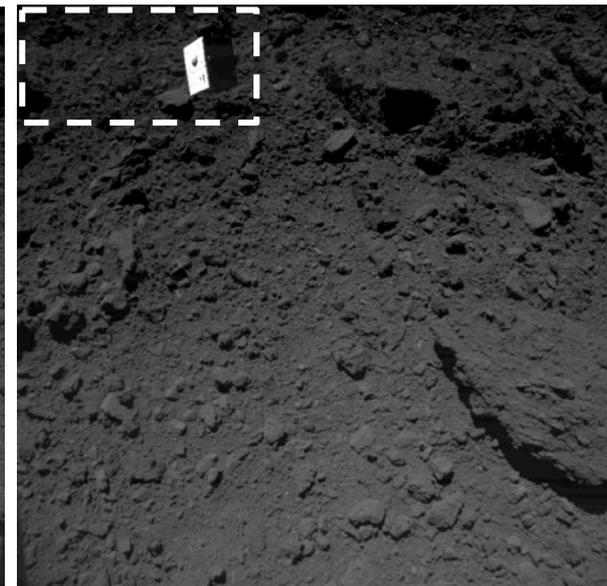
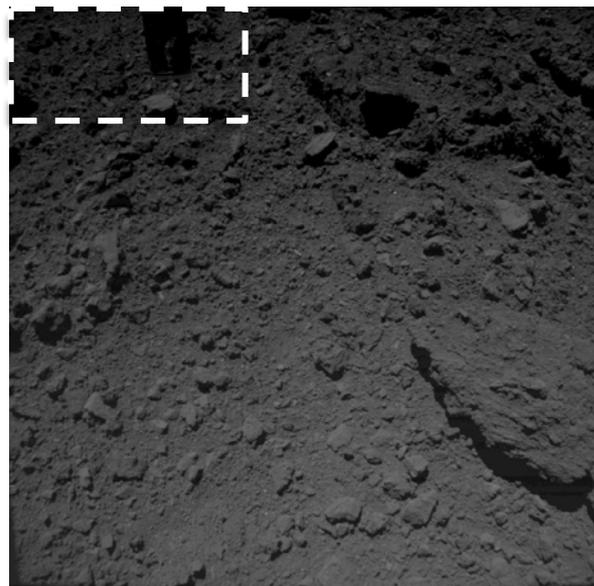
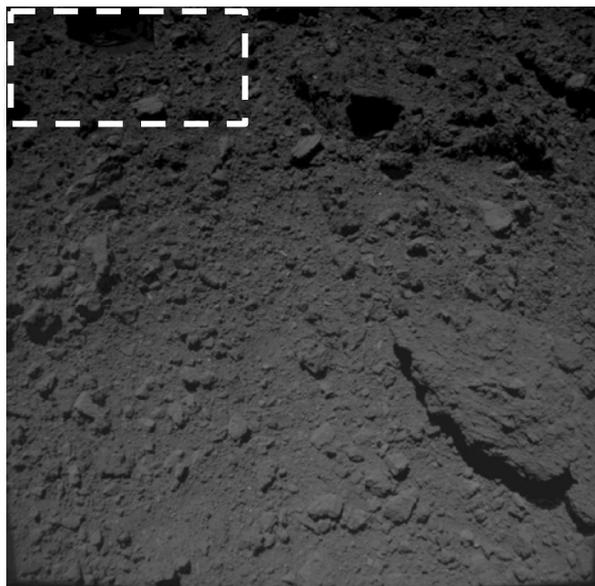
(画像クレジット:JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



2. MASCOT分離運用



ONC-W2によるMASCOTの撮影



2018年10月3日 10:57:54

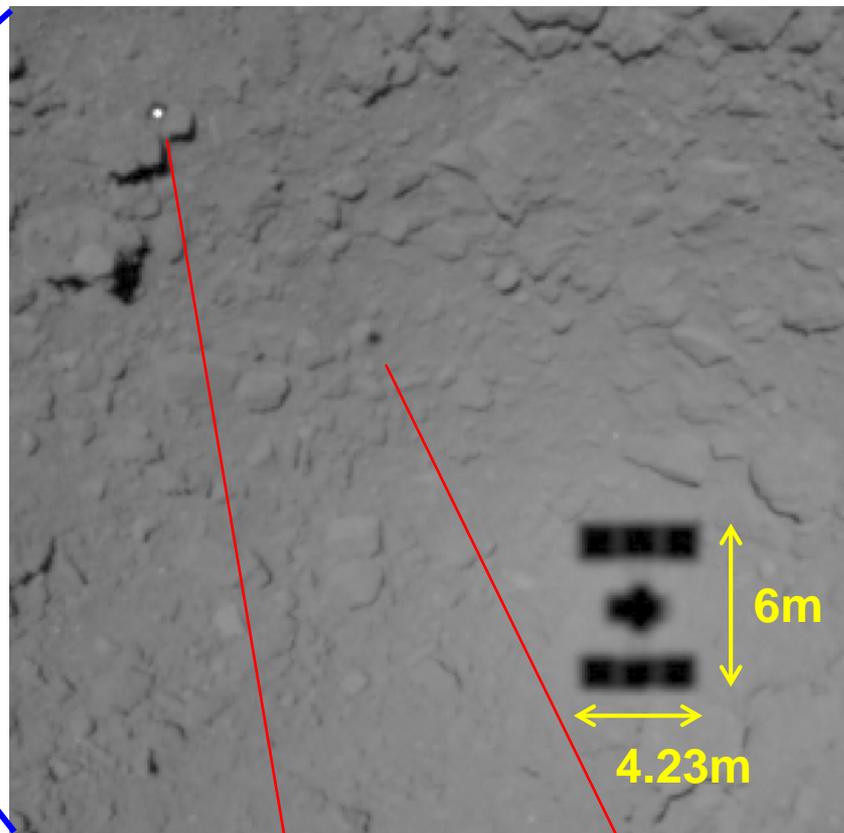
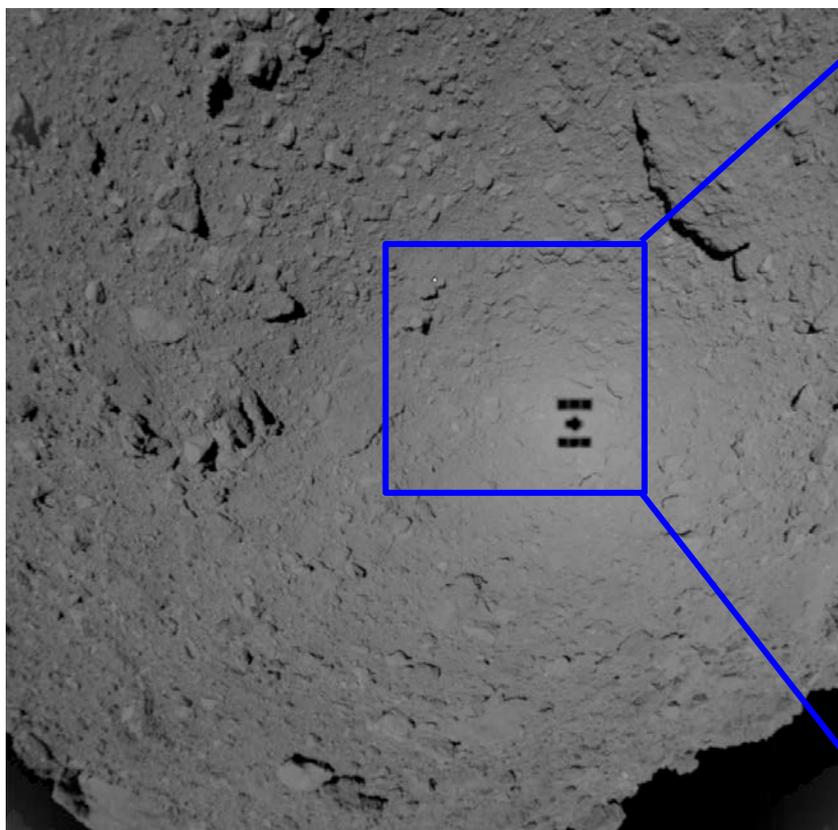
2018年10月3日 10:58:04

2018年10月3日 10:58:14

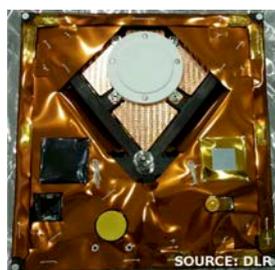
(画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



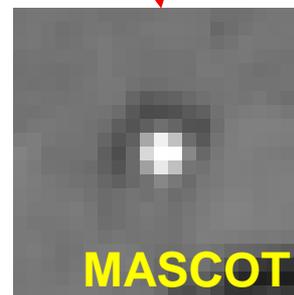
2. MASCOT分離運用 ONC-W1によるMASCOTの撮影



- ・撮影時刻 2018年10月3日
10:59:40(日本時間)
- ・MASCOTの高度:約35m



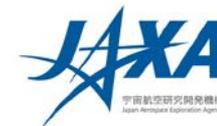
MASCOTの底面 (©DLR)



(画像クレジット: 前ページと同じ)



2. MASCOT分離運用



MASCOTのカメラ(MASCAM)による撮影



高度約25mから撮影。右上の黒い点は
MASCOTの影



リュウグウ表面で撮影。

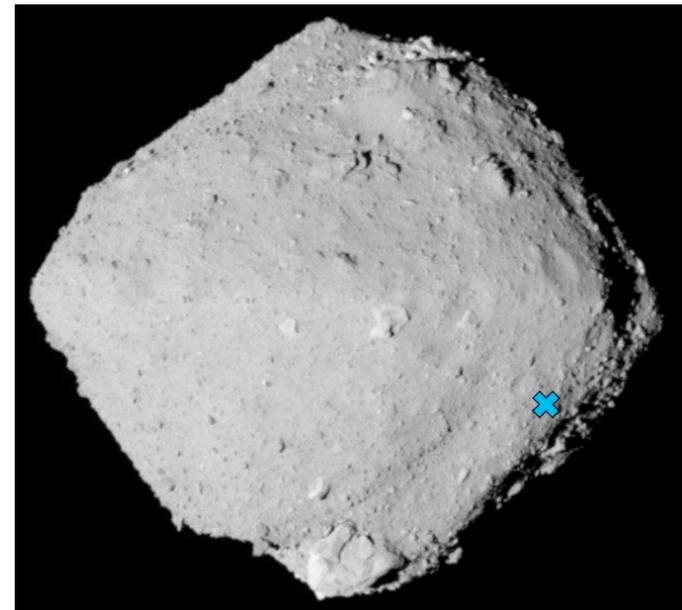
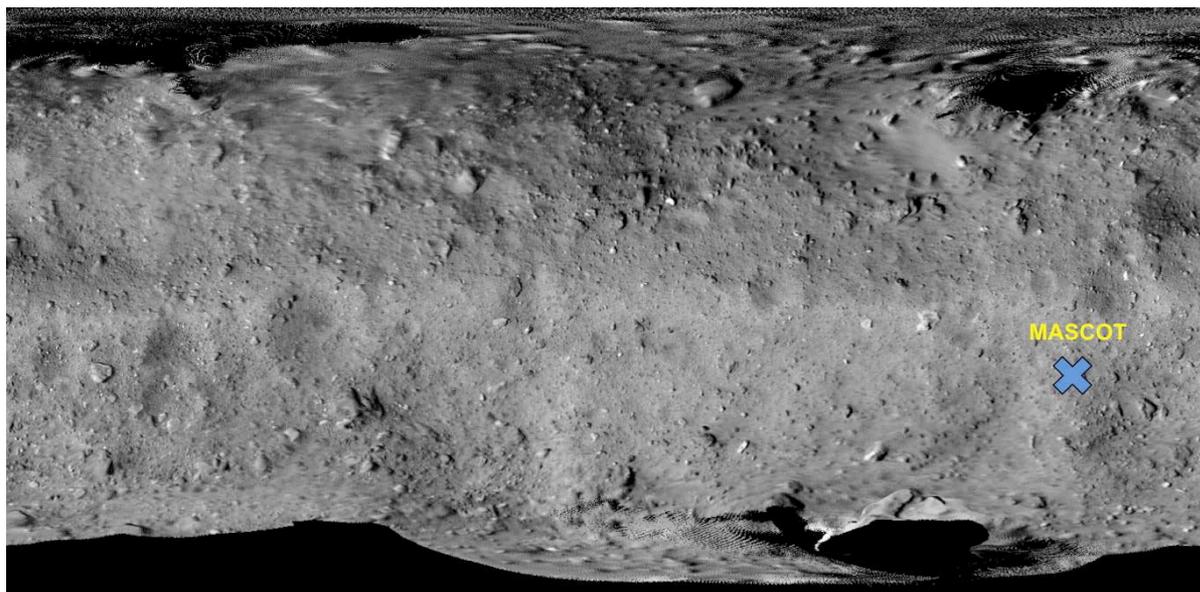
(画像クレジット:MASCOT/DLR/JAXA)



2. MASCOT分離運用



MASCOT着地点



青い×印の地点がMASCOTが着地したと推定された場所

(画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



2. MASCOT分離運用



欧州での反応



IAC (国際宇宙会議)でのMASCOT運用を含む「はやぶさ2」の最新情報を紹介(2018年10月5日、ブレーメン・ドイツ)

写真撮影: 藪田ひかる氏

MASCOTの記者会見

MASCOT's Path on the Asteroid Ryugu
Friday, October 12, 2018, 10:30am
DLR Capital Office Berlin
小惑星リュウグウ上のMASCOTの軌跡
2018年10月12日、17:30(日本時間)
DLR ベルリン

Dear MASCOT-team

2 days after the landing of MASCOT on Ryugu, and analyzing the first data and images, it is time for me to thank all of you for an outstanding job.

When we started the MASCOT-project 7 years ago, it was clear that it will become hard work to build, to integrate, and to test a small lander equipped with 4 instruments in only 2 1/2 years time. I know that all of you had been engaged very much over a long time before launch and later during cruise phase for landing preparation. **I like to thank all of you, and in particular our colleagues and partners in JAXA and CNES, for this work which made a small spacecraft landing a great event in space.** To my knowledge of today, all systems worked nicely and made it possible to record as scheduled which demonstrated a careful and high quality work of all contributors as well as a great team spirit.

I am sure that the data recorded during the 17 hours operation on Ryugu's surface will become the basis of important scientific results.

Thank you again!

With regards
Hansjoerg Dittus

DLR理事 Hansjörg Dittus氏
からのメッセージ



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



■今後の運用の再検討

- これまでに6回の降下運用を行ってきた。その航法誘導の実績およびリュウグウ表面の状況を考慮し、今後のスケジュールを再検討した結果、以下に示すスケジュールとする。

(参考)降下運用:BOX-C運用、中高度運用、重力降下運用、TD1-R1(1回目のタッチダウン(TD)リハーサル)、MINERVA-II運用、MASCOT運用

■新しいスケジュール

- 10月14日～15日 : TD1-R1-A(2回目のTDリハーサルに相当)
- 10月24日～25日 : TD1-R3(3回目のTDリハーサルに相当)
- 11月下旬～12月 : 合運用
- 2019年1月以降 : 1回目のタッチダウン

(注)TD-R2は欠番

すでに"TD-R2"という名称で運用の準備を進めており、混乱を避けるため"TD-R2"という名称は使用しない

※2019年1月以降の運用スケジュールは、TD1-R3までの結果を踏まえて合運用期間中に検討する



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



タッチダウンに向けた基本方針:

1つ1つ確認をしながら次のステップに進む

これまでの経緯

- 7月17日～25日 : BOX-C運用 →ホバリングで高度約6kmまで
- 7月31日～8月2日 : 中高度運用 →GCP-NAVで高度約5kmまで
- 8月5日～10日 : 重力降下運用→高度851mまで
- 8月17日 : ここまでの観測データにより着地点選定 (LSS: Landing site Selection)
- 9月10日～12日 : TD1-R1 →高度600mまでで降下中止
 - ・LIDAR(レーザ高度計)近距離計測モードに切り替わらず
 - ・LRF(Laser Range Finder)の確認できず
- 9月19日～21日 : MINRVA-II 1分離運用 →高度55mまで
 - ・LIDAR計測に問題が無いことを確認
 - ・航法誘導データ、TD候補地の高解像度観測データ取得
- 9月30日～10月4日 : MASCOT分離運用 →高度51mまで
 - ・航法誘導データ、TD候補地の高解像度観測データ取得

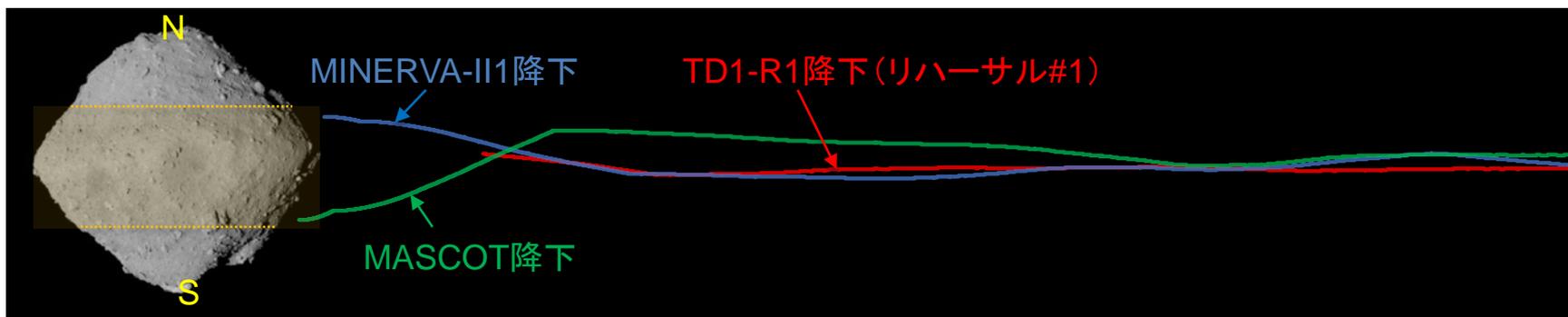


3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



現時点で得られている結果・情報(1)

< 航法誘導精度 >

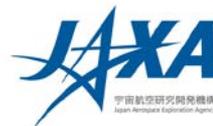


これまでの低高度降下の実績軌道 (©JAXA)

- TD1-R1は赤道域, MINERVA-II1運用は北半球, MASCOT運用は南半球の中緯度に降下した.
- はやぶさ2の守備範囲 緯度 $\pm 30^\circ$ の全域にわたり, 高度約50mまでは精度10m程度で誘導できることが確認できた.

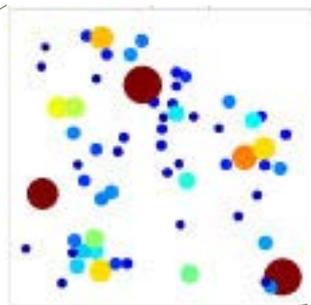
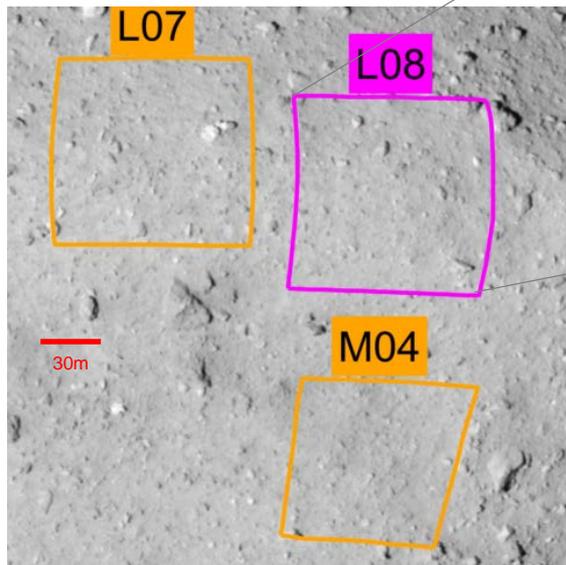


3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針

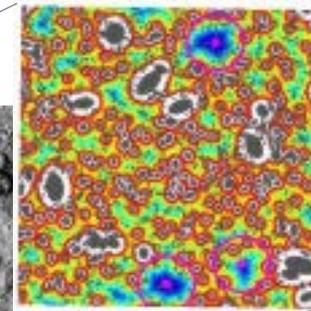
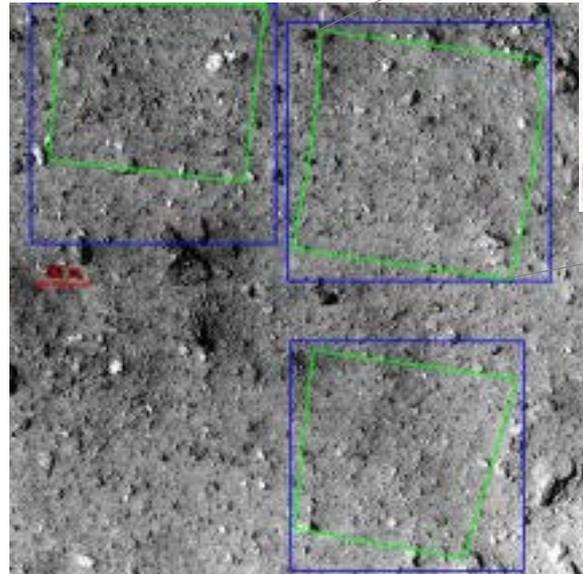


現時点で得られている結果・情報(2)
＜リュウグウの地形＞

◆8月時点でのデータ



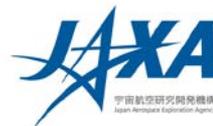
◆現時点のデータ



- これまでの観測により、TD候補地(L08, L07, M04)について50cm程度以上の大きさのボルダースの分布を把握した。
- 着陸候補エリア内にも、着陸安全性に支障のある50cm級以上のボルダースが多く存在。着陸に適した平坦な地域は極めて限定的。



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



現時点で得られている結果・情報(3)
＜ローバ・着陸機による地表面観測＞



©JAXA

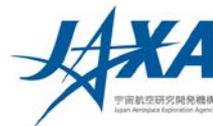


©MASCOT/DLR/JAXA

- ミネルバII, MASCOTが撮影した画像から, リュウグウの表面状態を詳しく解析.
- 「砂地に岩(ボルダー)が散在している」というイメージではなく, 「地面そのものが, 大小さまざまな岩の集合」



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



タッチダウン前に確認すべきこと

＜厳しい凹凸地形の克服、超低高度での探査機挙動の確認＞

- 50mより低い高度までの航法誘導精度 ←TD1-R1-Aで確認
- LRFの特性 ←TD1-R1-Aで確認
- ターゲットマーカ(TM)トラッキング特性 ←可能ならTD1-R3で確認
※TMTトラッキング特性は、これまでの計画では事前に確認する予定ではなかったが、新しい計画では事前に独立して確認することとした。

これらを確認した上で、必要があればピンポイントタッチダウン技術を投入することも検討する。

参考: ターゲットマーカトラッキング(TMT)

光学航法カメラで撮影した画像から小惑星表面のターゲットマーカを判別し、その位置を探査機が把握した上でタッチダウンに向けた軌道制御を行う。



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



■TD1-R1-Aで行うこと

- 誘導精度の確認
- LRFの特性を把握
- LRFは計測を行うのみで制御には使わない

■TD1-R3で行うこと

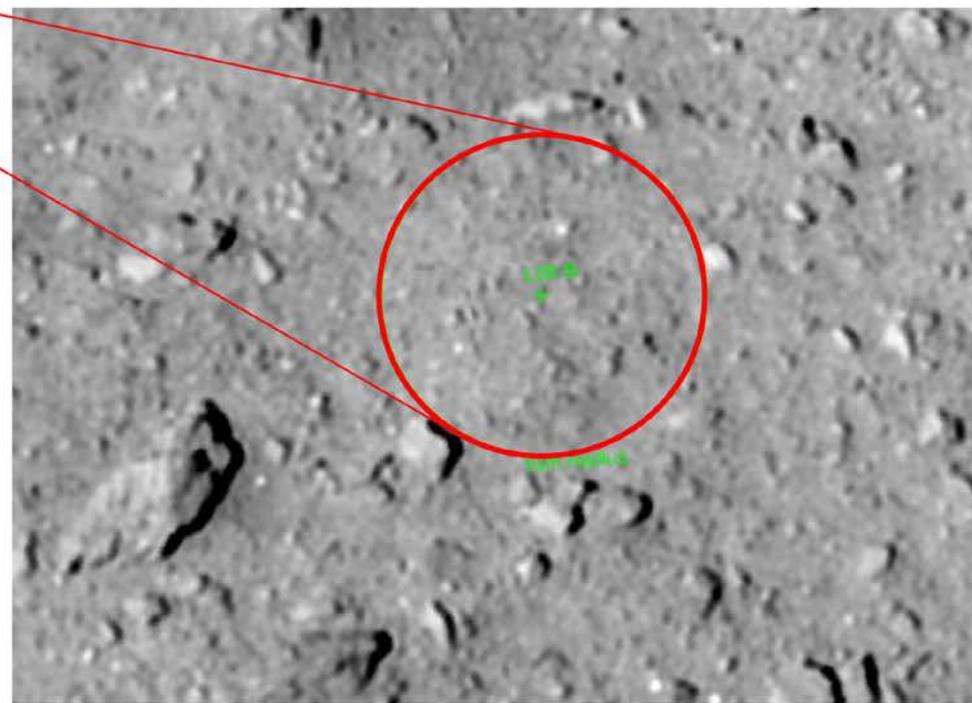
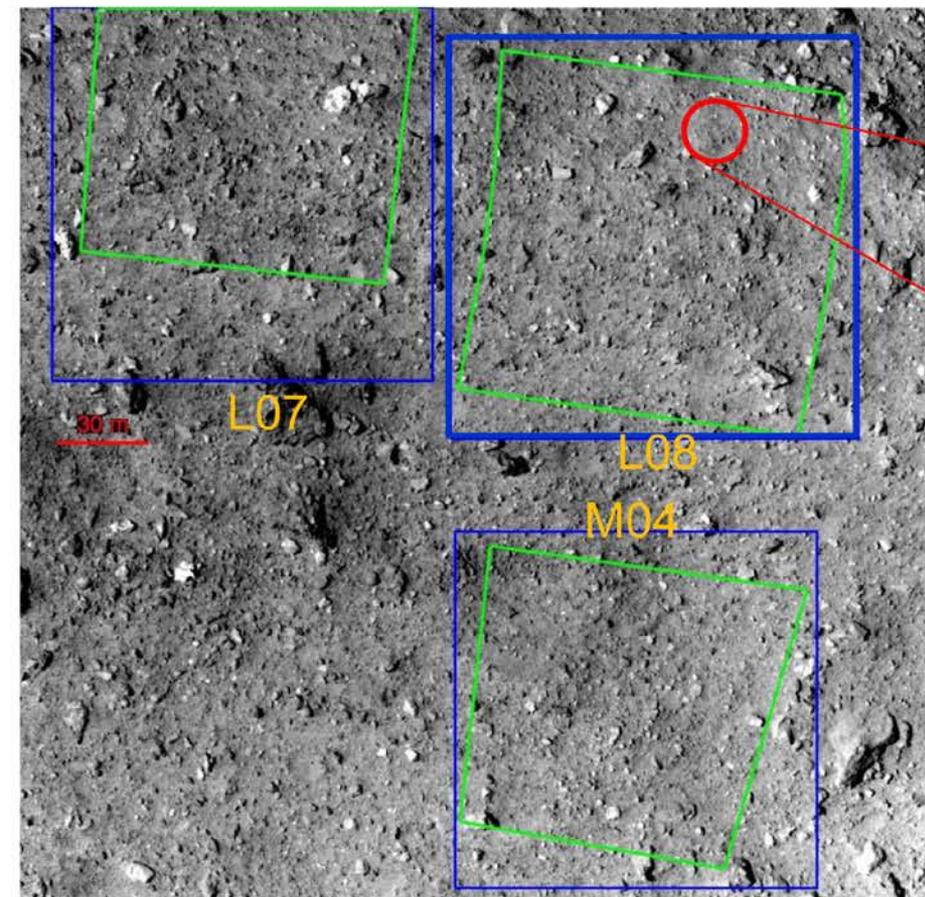
- 誘導精度の確認
- LRFの計測データを制御に取り込む
- 可能ならば、ターゲットマーカ(TM)の分離を行う



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



タッチダウン候補地点：L08-B

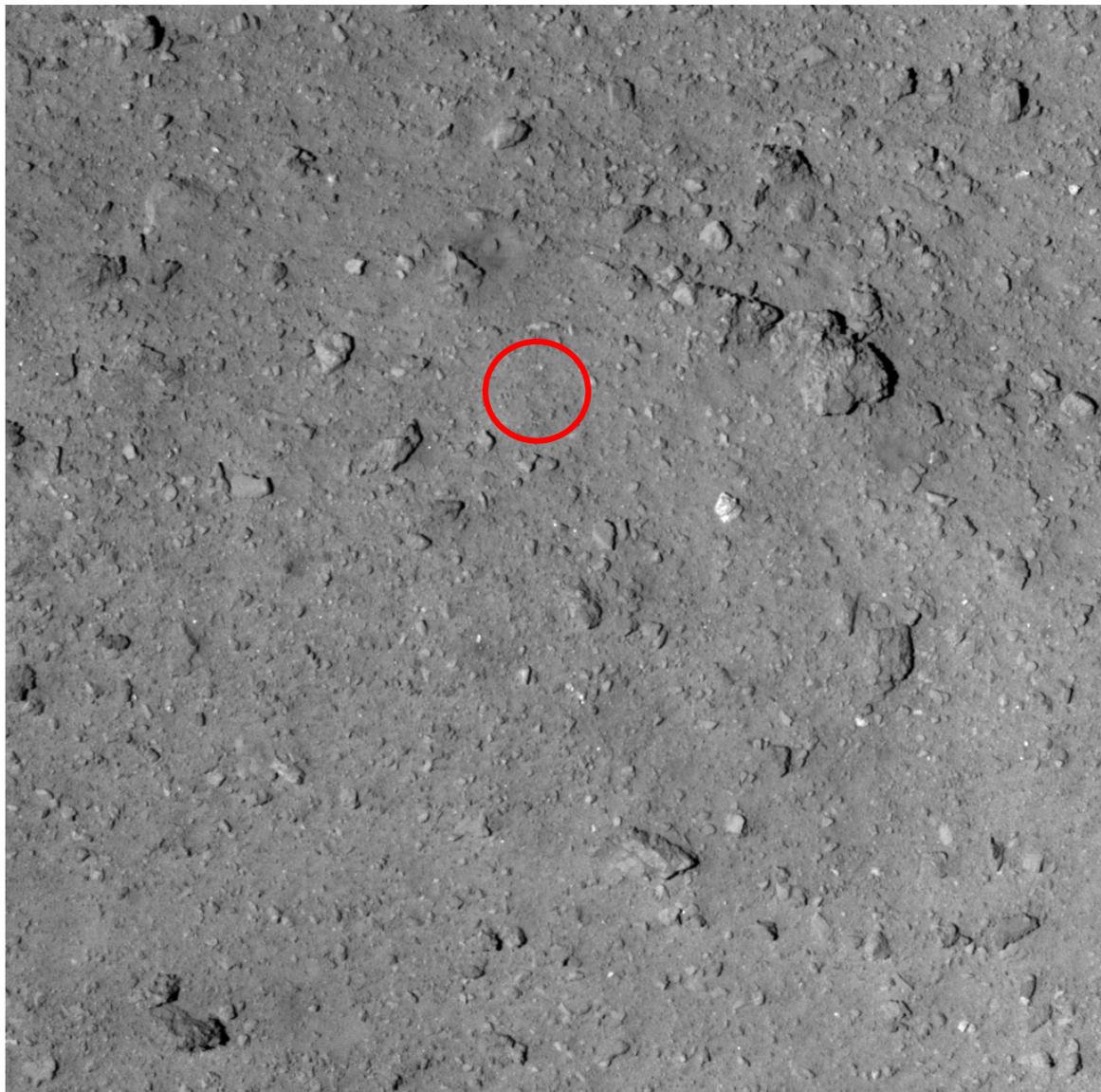
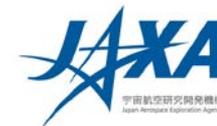


100m

(画像クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



L08-B

MASCOT分離運用において
ONC-Tで撮影されたL08-B
周辺

撮影日時: 2018年10月3日
5時41分(日本時間)

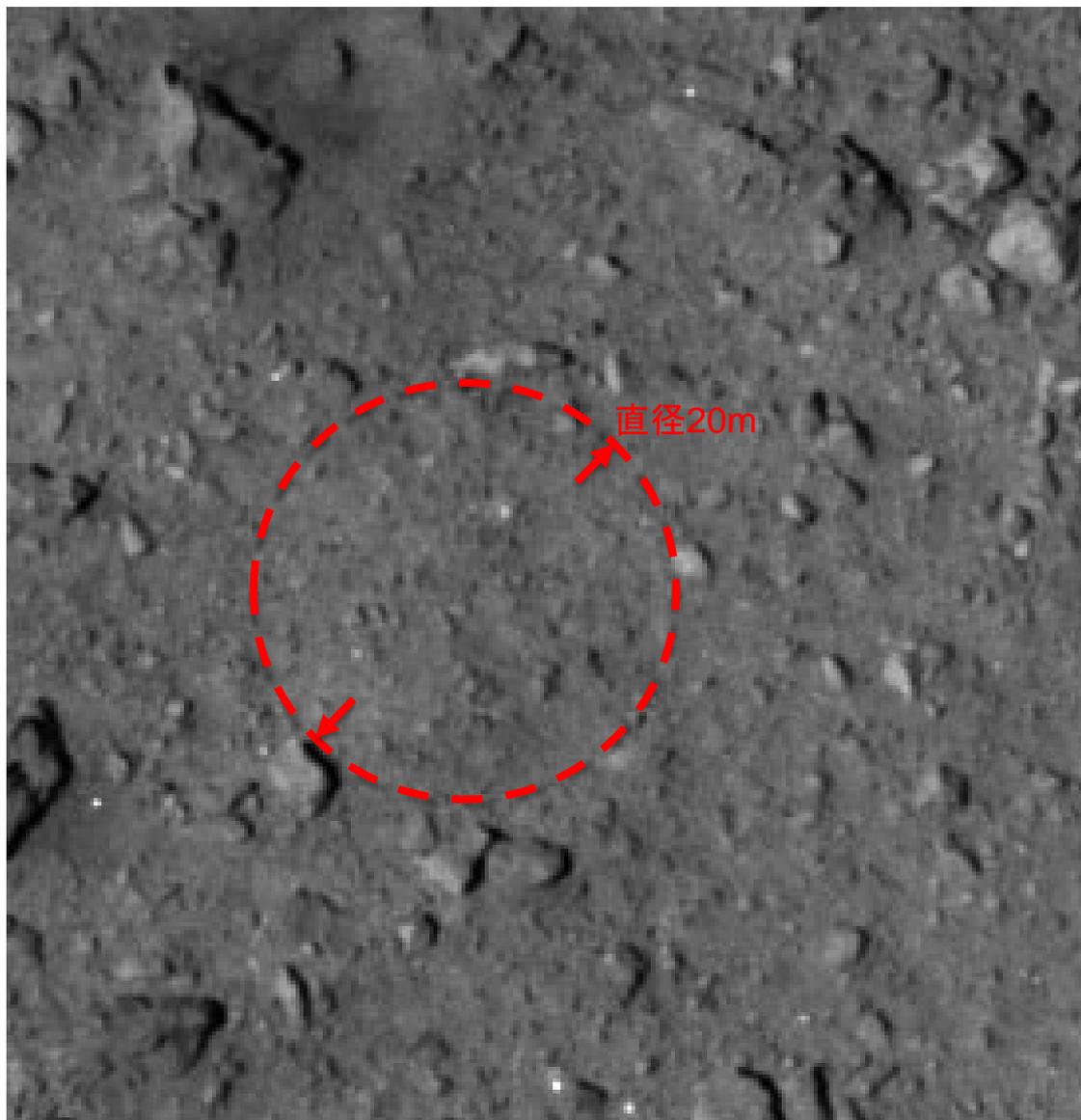
撮影高度: 約1.9km

分解能 : 20cm/1ピクセル

画像クレジット: JAXA, 東京大,
高知大, 立教大, 名古屋大,
千葉工大, 明治大, 会津大,
産総研



3. タッチダウンに向けたリハーサルと タッチダウンの方針



L08-B

前ページの拡大

MASCOT分離運用において
ONC-Tで撮影されたL08-B
周辺

撮影日時: 2018年10月3日
5時41分(日本時間)

撮影高度: 約1.9km

分解能 : 20cm/1ピクセル

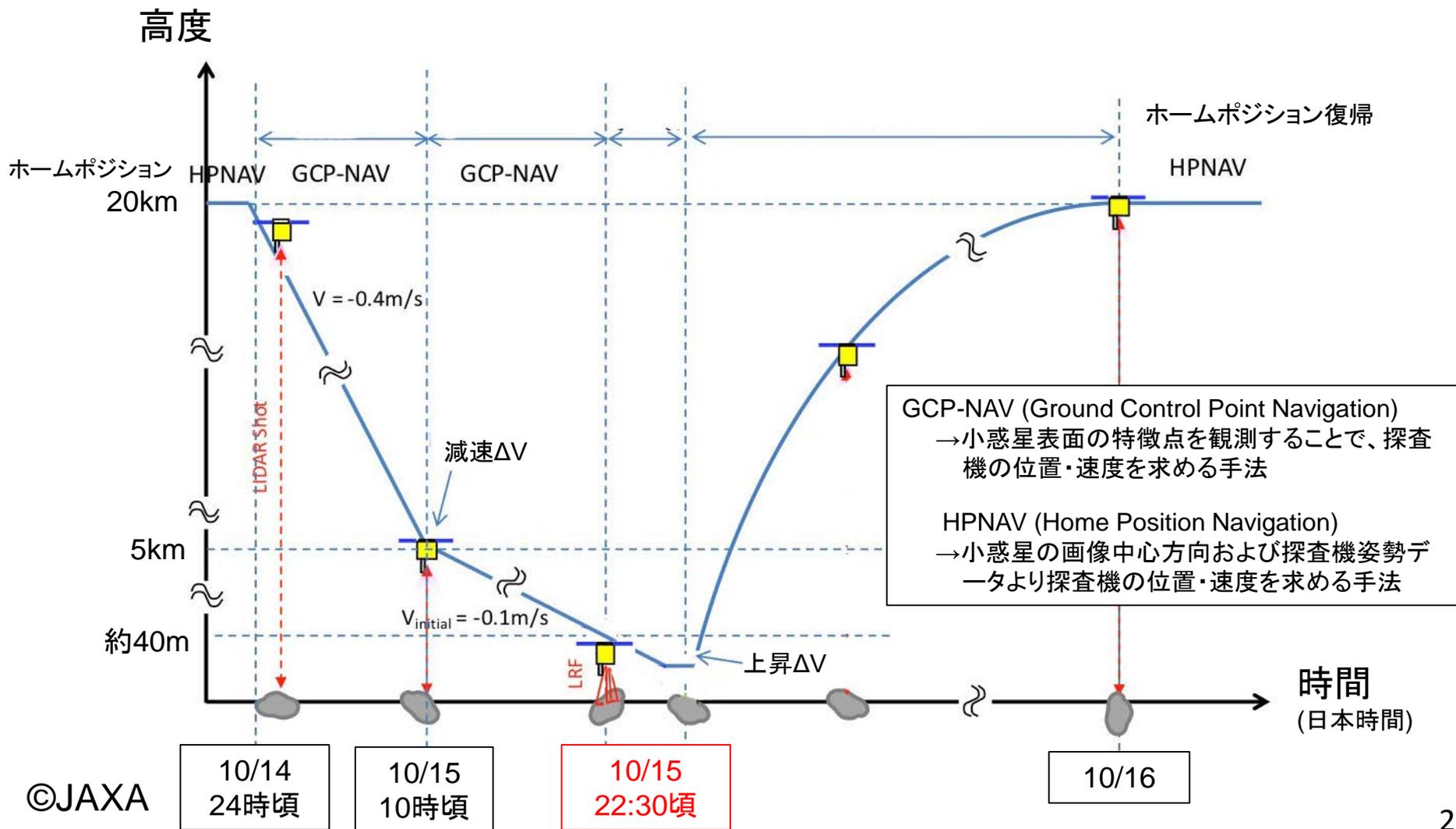
画像クレジット: JAXA, 東京大,
高知大, 立教大, 名古屋大,
千葉工大, 明治大, 会津大,
産総研



3. タッチダウンに向けたリハーサルとタッチダウンの方針



TD1-R1-Aのスケジュール





4. 今後の予定



■ 運用の予定

- 10月14-15日 : TD1-R1-A (2回目のタッチダウンリハーサル)
- 10月24-25日 : TD1-R3 (3回目のタッチダウンリハーサル)

■ 記者説明会等

- 10月23日(火) 16時～ 記者説明会@お茶の水
- 11月 8日(木) 11時～ 記者説明会@お茶の水

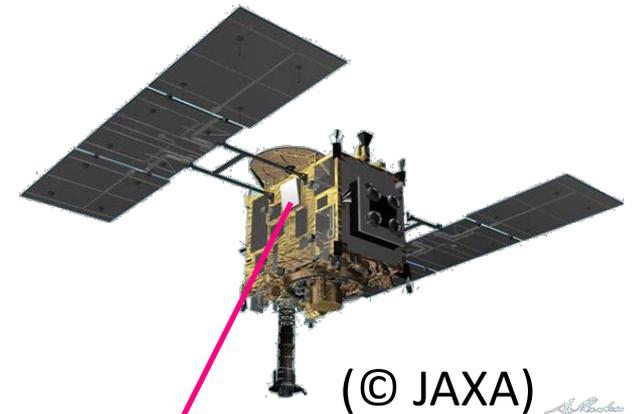


参考資料

MASCOTシステム概要

MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout)

- DLR (ドイツ航空宇宙センター)とCNES (フランス国立宇宙研究センター)によって製作
- 小惑星上、その場観測を目的とした軽量かつコンパクトな着陸機
- 着陸機質量: ~9.8 kg
- 着陸機サイズ: 0.275 x 0.290 x 0.195 m
- 4つの科学観測機器を搭載: MASCAM, MicrOmega, MARA, MASMAG



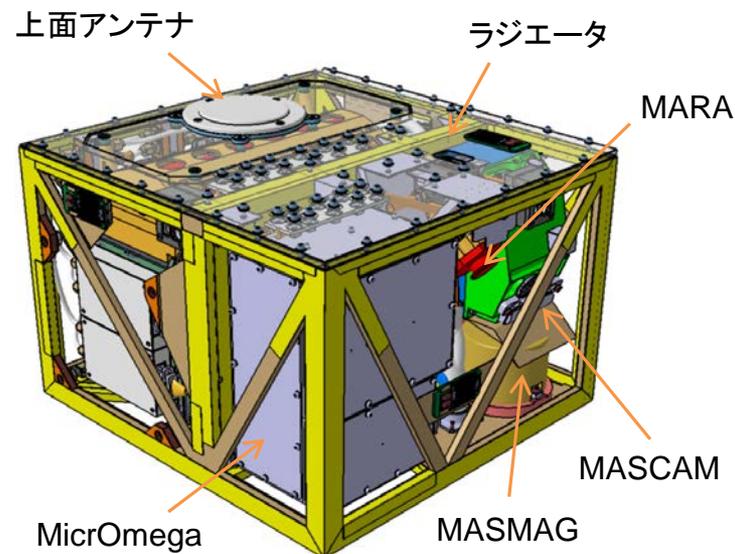
フライトモデル (© DLR)



MASCOTシステム概要

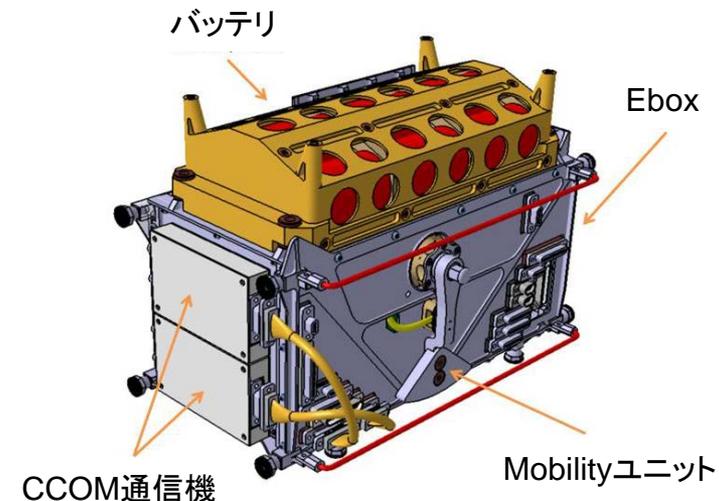
MASCOT搭載科学機器

機器名	機能
広角カメラ (MASCAM)	複数波長での画像の撮影
分光顕微鏡 (MicrOmega)	鉱物組成・特性の調査
熱放射計 (MARA)	表面温度の測定
磁力計 (MASMAG)	磁場の測定



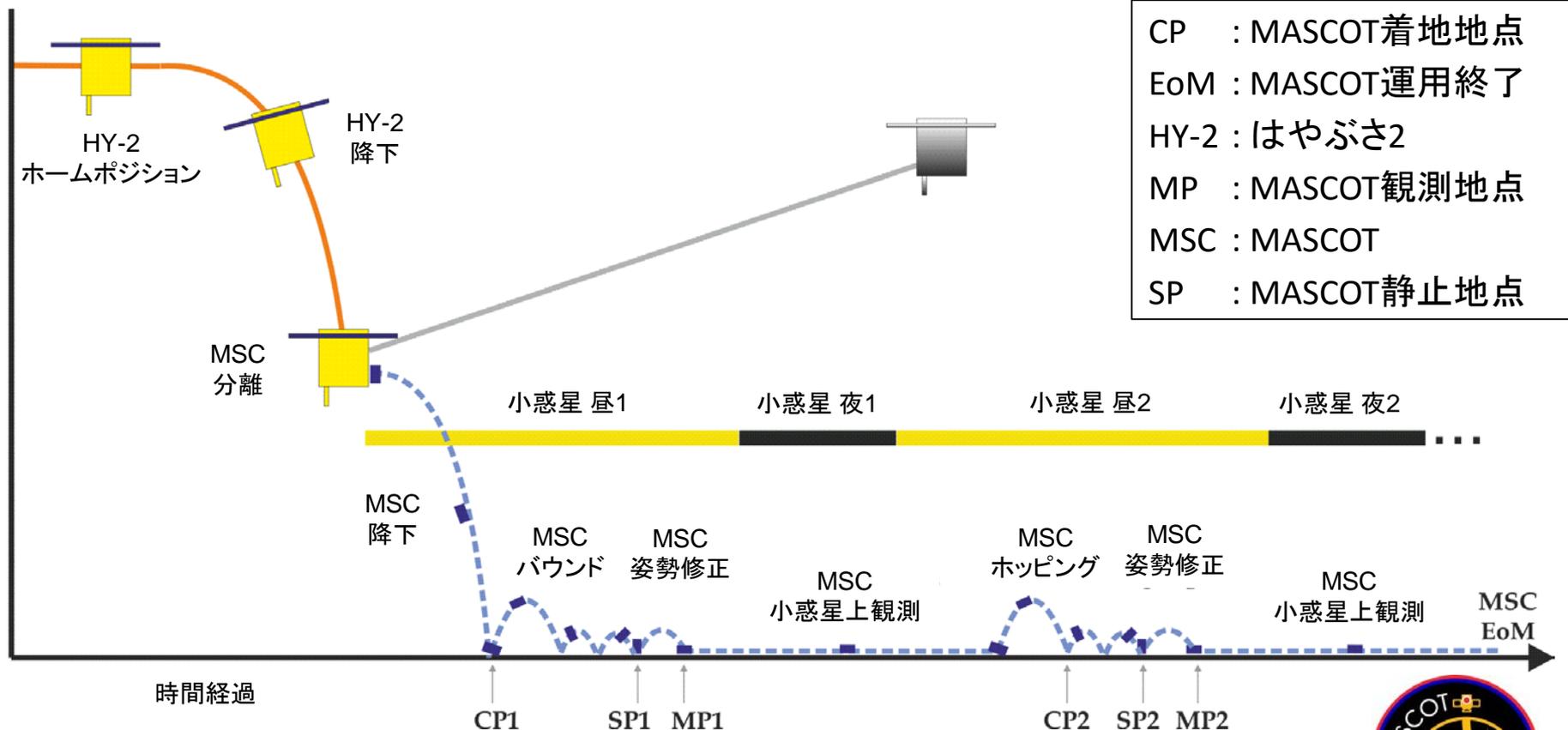
MASCOTバスシステム

- 電源: リチウム一次電池を使用
- 通信: MINERVA-IIと同様の通信機を使用した通信システム
- Mobility: モーターを用いたMASCOTの起き上がり・ホッピングメカニズム
- GNC: センサを用いたMASCOTの姿勢検知



MASCOTの小惑星上運用

はやぶさ2探査機から分離後のMASCOT運用予定

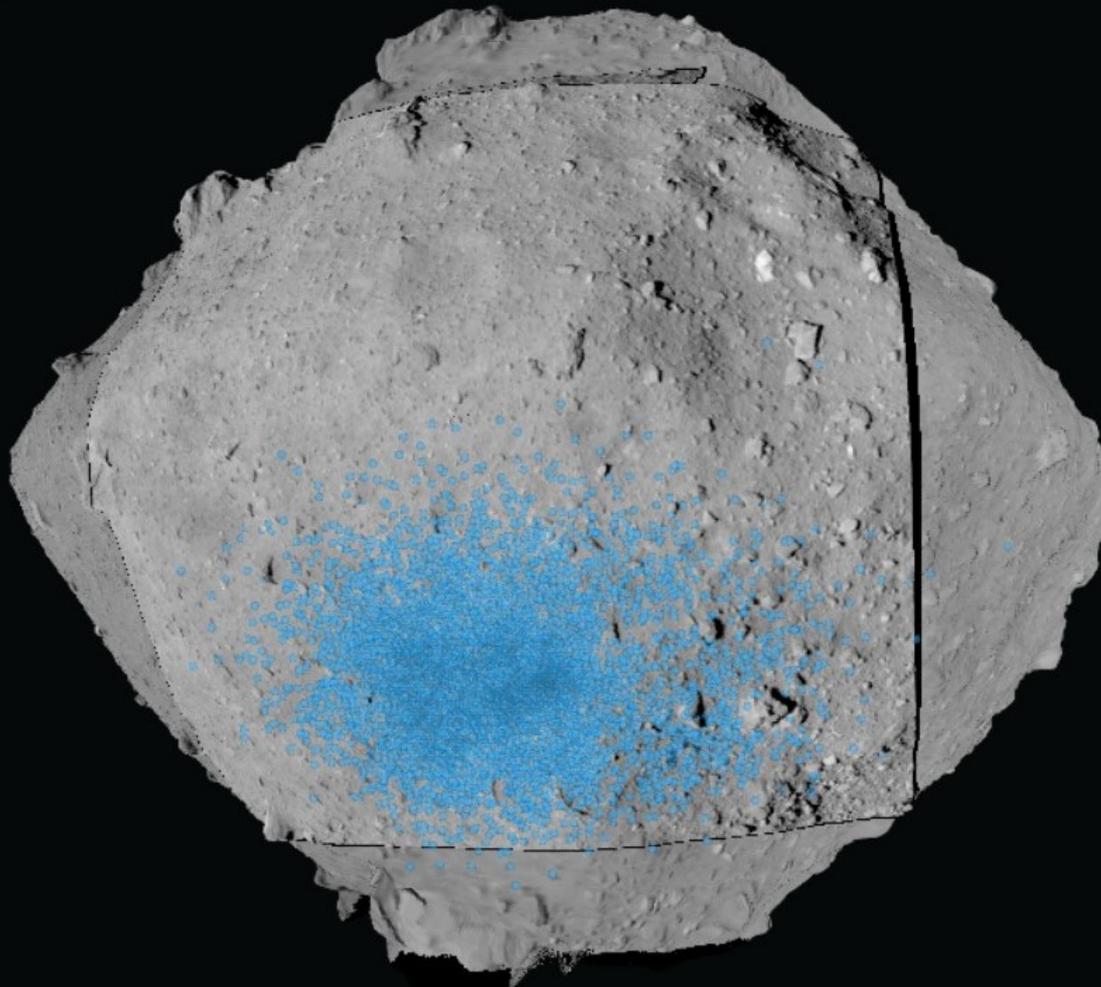


MASCOT着陸候補地点

2018-08-15T12:20:56.995 UTC

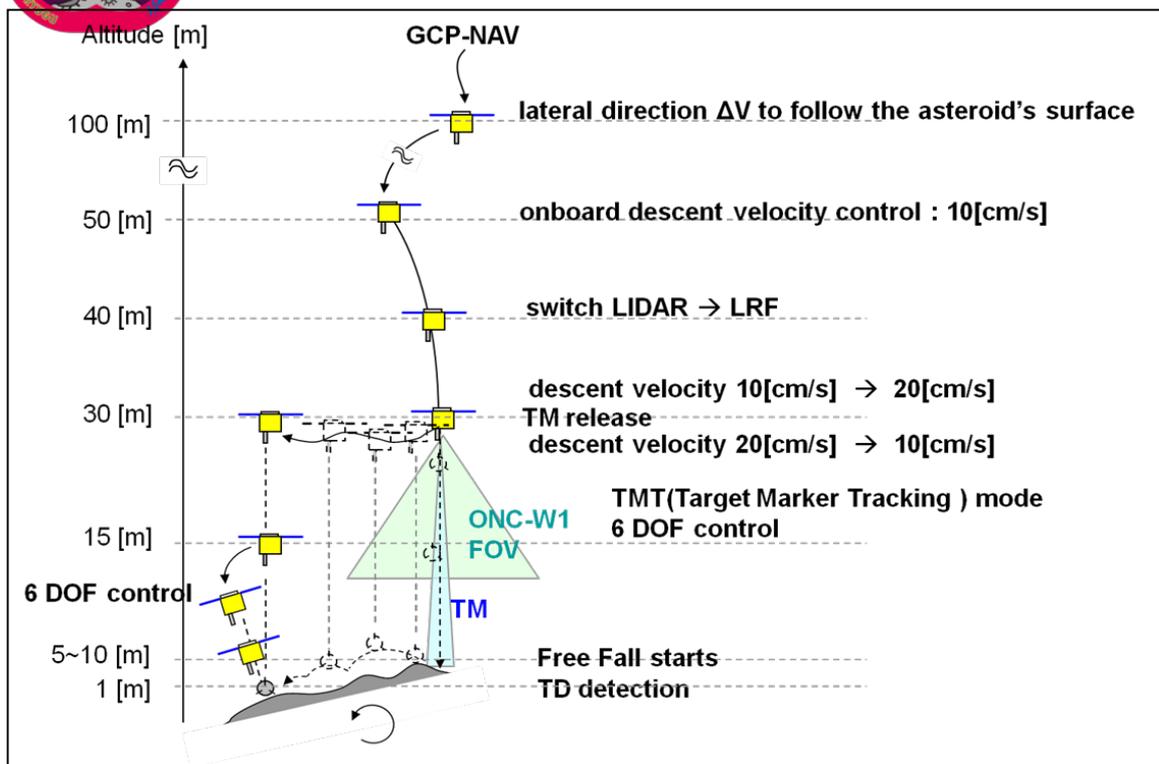
vFoV : 45.00 deg

Earth-Ryugu-Sun : 18.22 deg

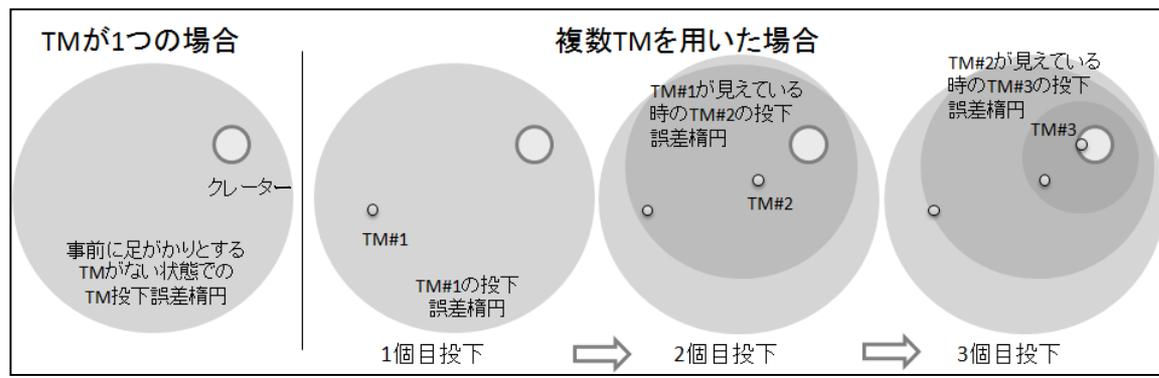




ピンポイントタッチダウン



- ターゲット・マーカ(TM)
 - ✓ 高度数十メートルでTMを分離し, TMにフラッシュランプを断続的に照射しながらカメラで撮像する。
 - ✓ フラッシュランプ照射時の画像と非照射時の画像の差分をとり, TMを抽出することで, 地表の様相や太陽光などに影響を受けにくい確実な認識を行う。
 - ✓ 認識したTMに向かい, レーザ測距計から得られる地表との距離姿勢情報も使いながら降下する。
 - ✓ 燃料消費を抑えながら, 高い目標追従を行う6自由度(位置+姿勢)ガスジェット噴射制御もキー技術

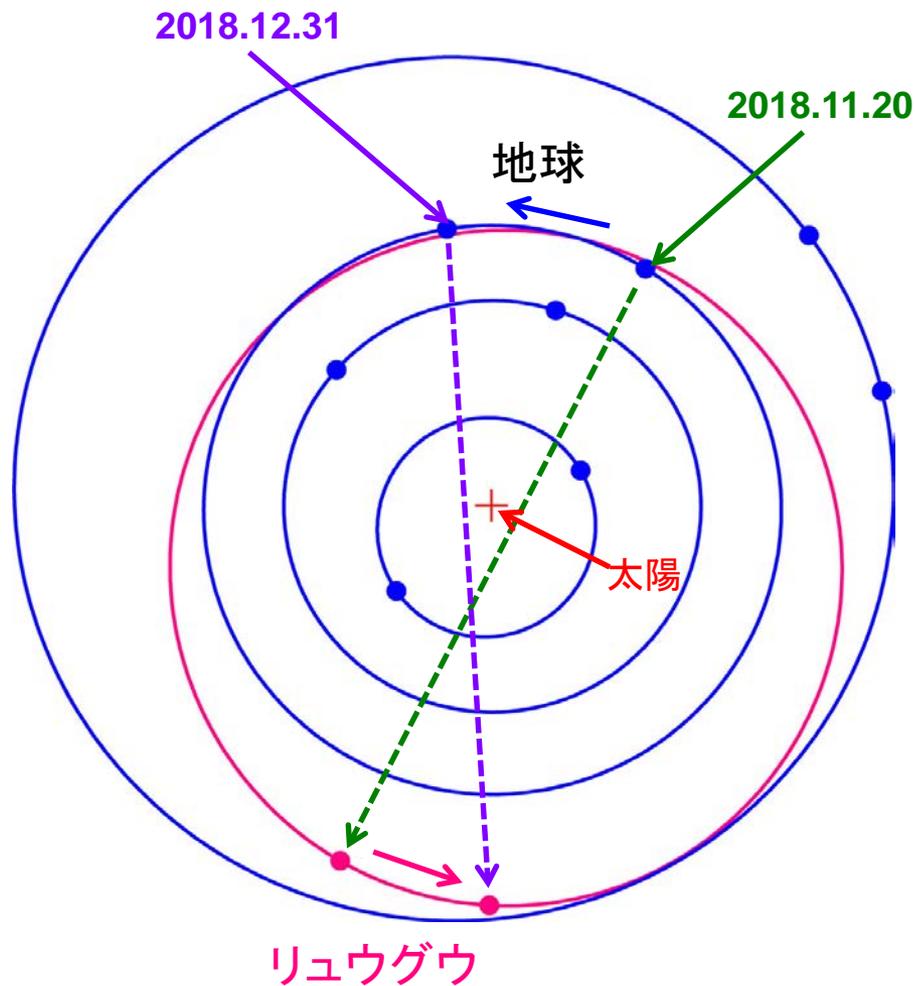


- 複数TMの利用
 - ✓ 人工クレーター近辺にタッチダウンし, 露出した内部物質の採取を試みる。
 - ✓ 人工クレーターの大きさは直径数メートル程度と見積もられている。複数のTMを順次足がかりとして目標地点に近づいていくことで, より高精度な着陸(ピンポイントタッチダウン)に挑戦する。



合運用

- 深宇宙探査機の運用における「合」とは、地球から見たときに探査機が太陽とほぼ重なる方向にある場合のことを指す。(天文学の「合」と同意)
- 合となると、太陽が放射する電波によって探査機との通信が確保できなくなる。
- 合の期間はクリティカルな運用は行わない。
- 「はやぶさ2」では合の期間は2018年11月下旬から12月末まで。



地球とリュウグウの位置関係