小惑星探査機「はやぶさ2」
記者説明会

2019年3月5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、

・今後の運用方針

・タッチダウン運用の結果

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. 今後の運用方針
3. タッチダウン運用の結果
4. CAM-Hによる画像
5. タッチダウンに関するサイエンスからのコメント
6. 今後の予定
・参考資料

「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

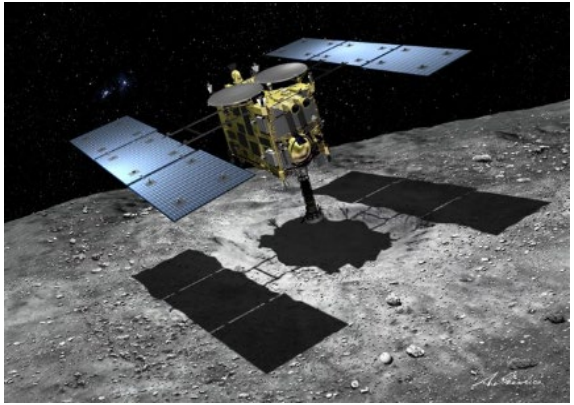
・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

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

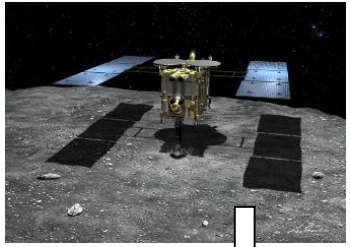
打上げ → 小惑星到着

2014年12月3日

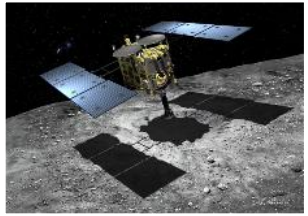
▲ 地球スイングバイ 2015年12月3日

2018年6月27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。



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。



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。

小惑星出発 ← 地球帰還

2019年11-12月

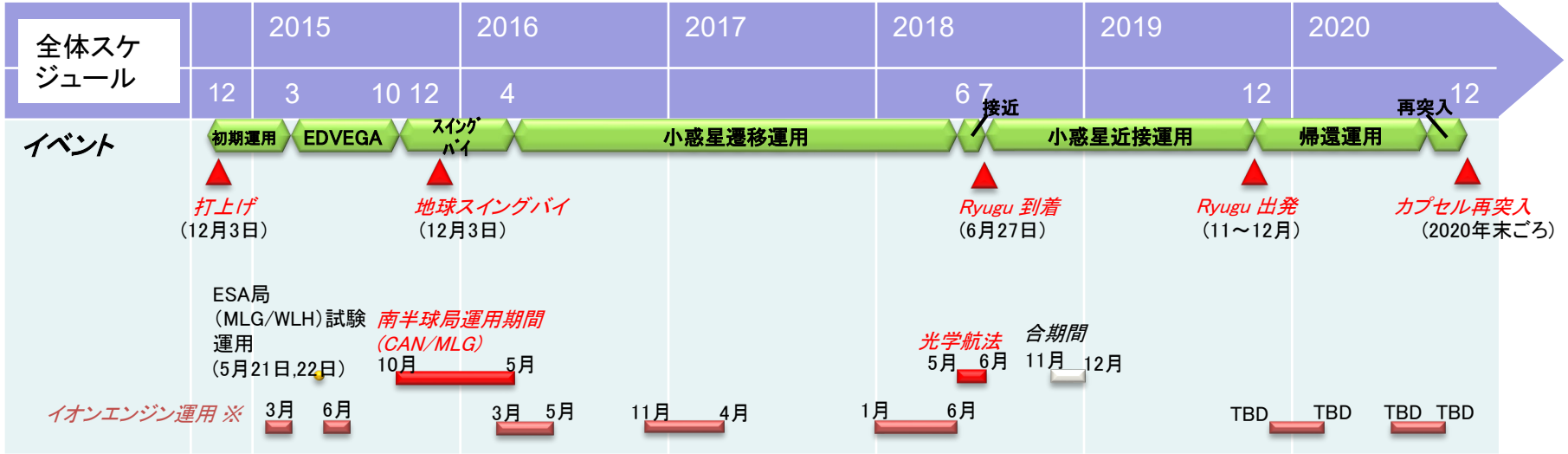
2020年末ごろ

サンプル分析

（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：
- タッチダウン運用を2月20日～22日に行った。タッチダウンは成功。
- 2月28日の週はBOX-C運用を行い、高度約5kmからの観測をした。
- 3月4日の週は調査降下運用を行い、S01周辺を観測する。



2. 今後の運用方針

1回目のタッチダウン運用（TD1-L08E1）が成功したことを受けて、今後の運用方針は以下のようにする。

- 衝突装置（SCI）による人工クレーター形成実験を次に行う。
- 2回目のタッチダウンは、SCIによる人工クレーター内部またはその周辺、もしくは、別の場所に行う。（実際に2回目を行うかどうかは、SCI運用後に判断する。）
- 3回目のタッチダウンは行わない可能性が高い。

※衝突装置による実験を優先して行うことにした理由

- 1回目のタッチダウンで、サンプルは十分に採取できていると判断した。
- 1回目のタッチダウンで底面の光学系の受光量が低下したものがある。通常の運用には問題はないが、タッチダウン運用のためには慎重な事前調査が必要である。調査に時間が必要となるため、SCI運用を先行して行う。

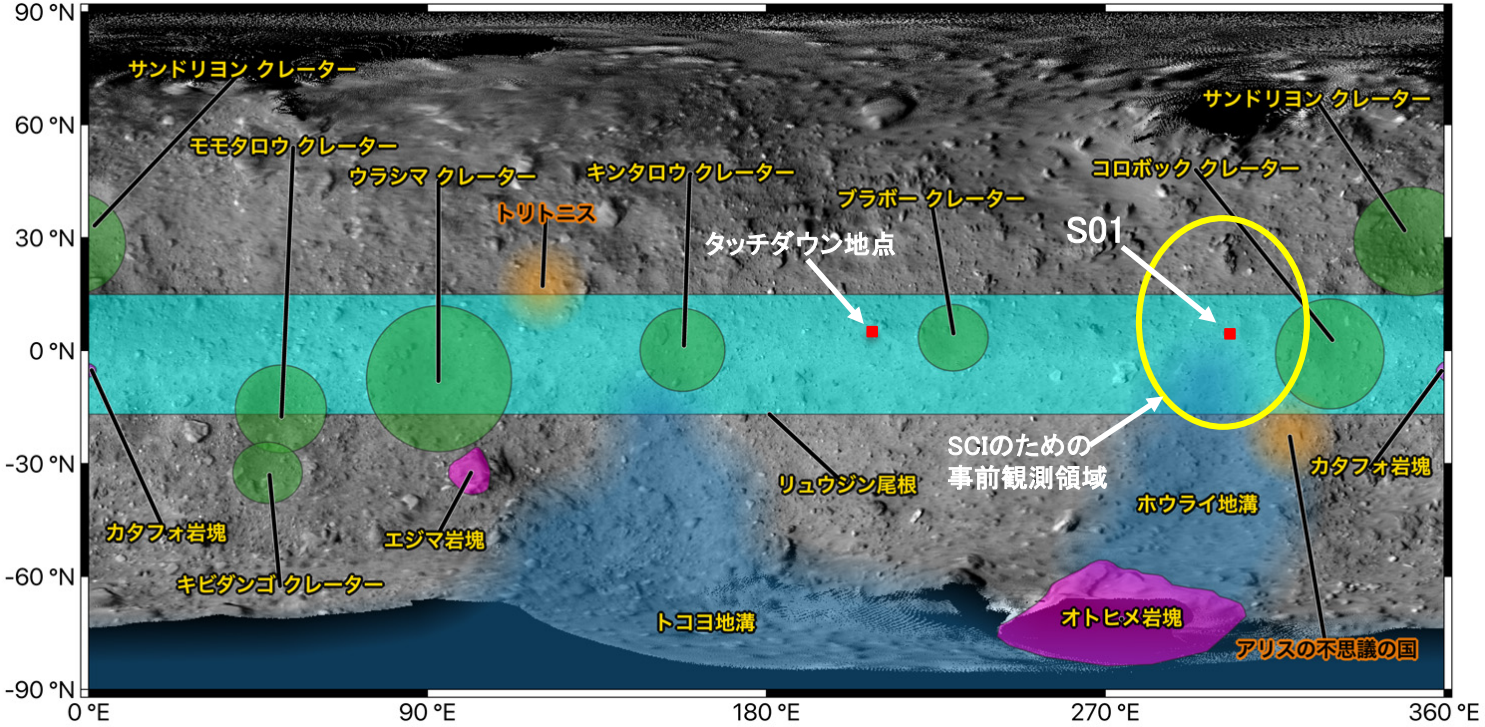
2. 今後の運用方針

今後のスケジュール

時期	運用	内容
3月6～8日	降下運用（DO-S01）	別の場所のタッチダウンのための情報取得
3月20～22日	降下運用（CRA1）	SCIによるクレーター形成地付近の事前観測
4月1日の週	衝突装置（SCI）運用	SCIによるクレーター形成実験
4月22日の週	降下運用（CRA2）	SCIによって作られたクレーターの観測
5月以降	2回目のタッチダウン	サンプル採取
7月以降	MINERVA-II2の分離運用	MINERVA-II2の運用
11月～12月	リュウグウ出発	
2020年末	地球帰還	

2. 今後の運用方針

S01およびSCI運用の領域

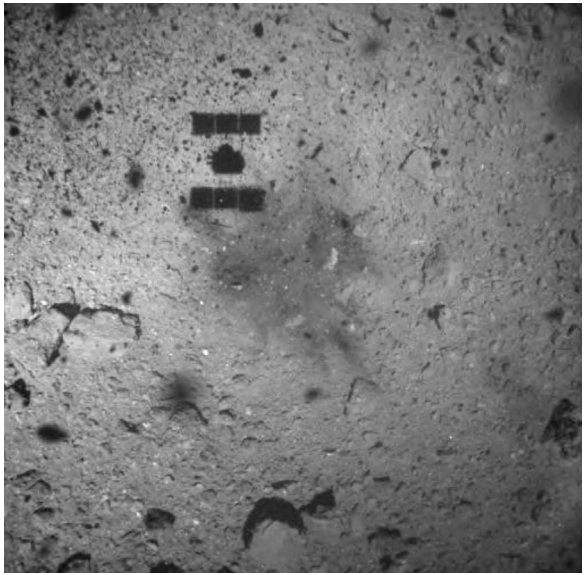


（画像のクレジット：JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

まとめ

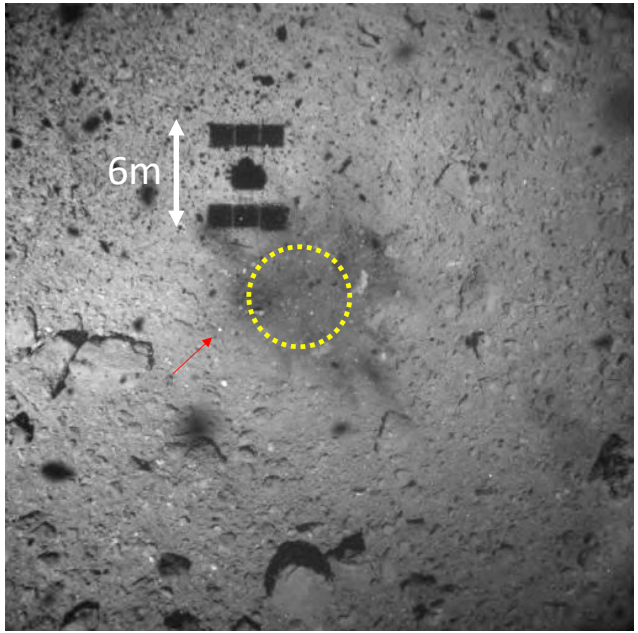
- タッチダウン運用
  2019年2月20日～22日
- タッチダウンの時刻
  2019年2月22日、07:29:10
  （時刻は日本時間、機上時刻）
- タッチダウン場所
  L08-E1内の半径3mの円内
  誘導制御の精度：1m
  サンプル採取地点も特定
- 手法
  投下済みのTM-Bを使ったピンポイントタッチダウンの手法



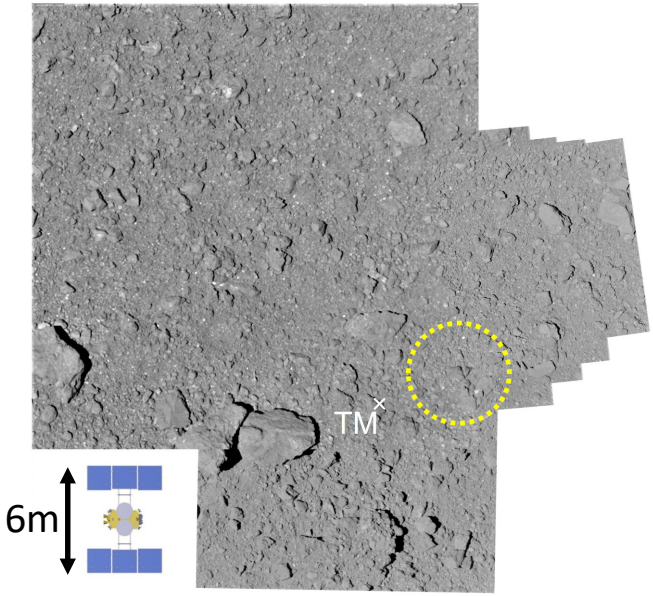
タッチダウン直後の2019年2月22日07:30頃（日本時間、機上時刻）にタッチダウン地点付近を撮影した画像。広角の光学航法カメラ（ONC-W1）で撮影。高度は約25m。

（画像のクレジット：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. タッチダウン運用の結果



タッチダウン直後に撮影された画像にタッチダウン予定地点（円の直径は6m）を重ねた図。矢印の先の白い点がターゲットマーカ。

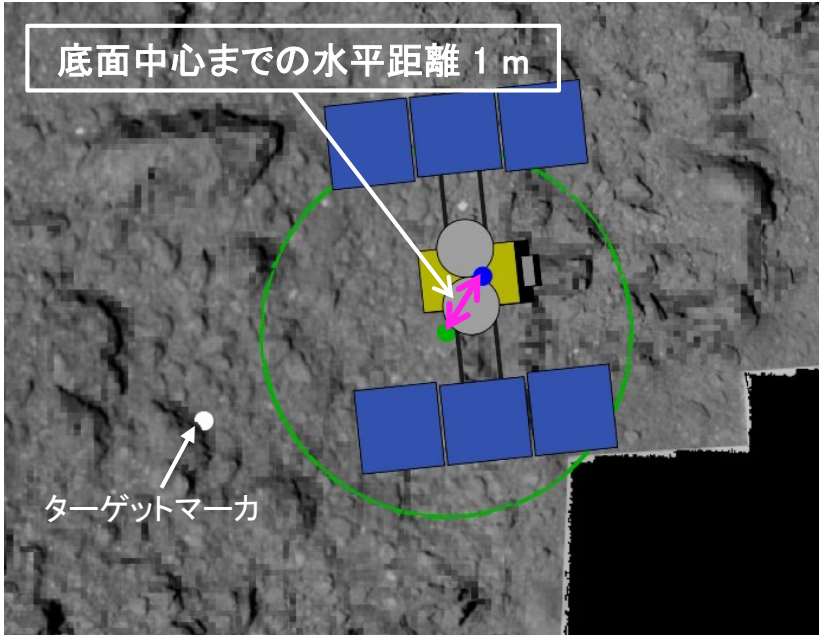


比較のために、タッチダウン以前に撮影された画像。×印がターゲットマーカの位置を示す。左下の探査機のイラストは画像のスケールに合わせたものである。

（画像のクレジット：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）

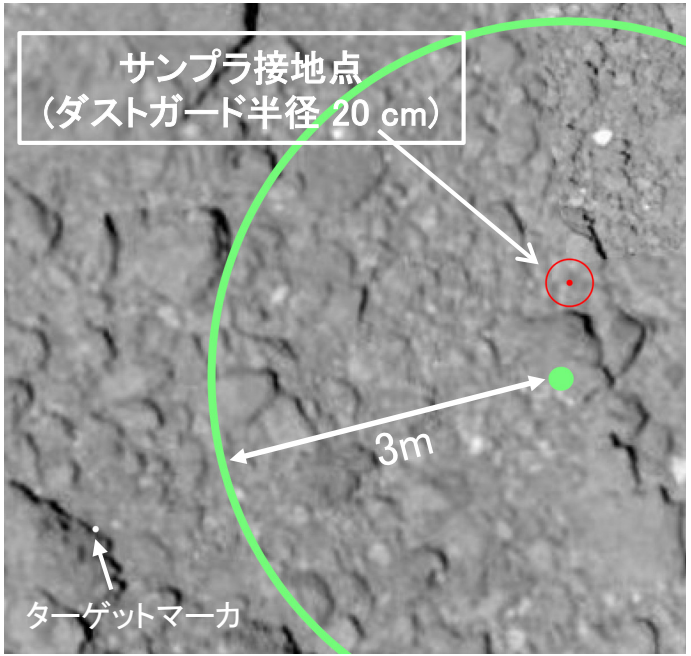
3. タッチダウン運用の結果

タッチダウン地点



緑の円内がタッチダウン予定地点。その中心が着地の目標地点であり、探査機の中心（青い点）の目標地点からのずれは1m。（背景は形状モデルより）

サンプル採取地点

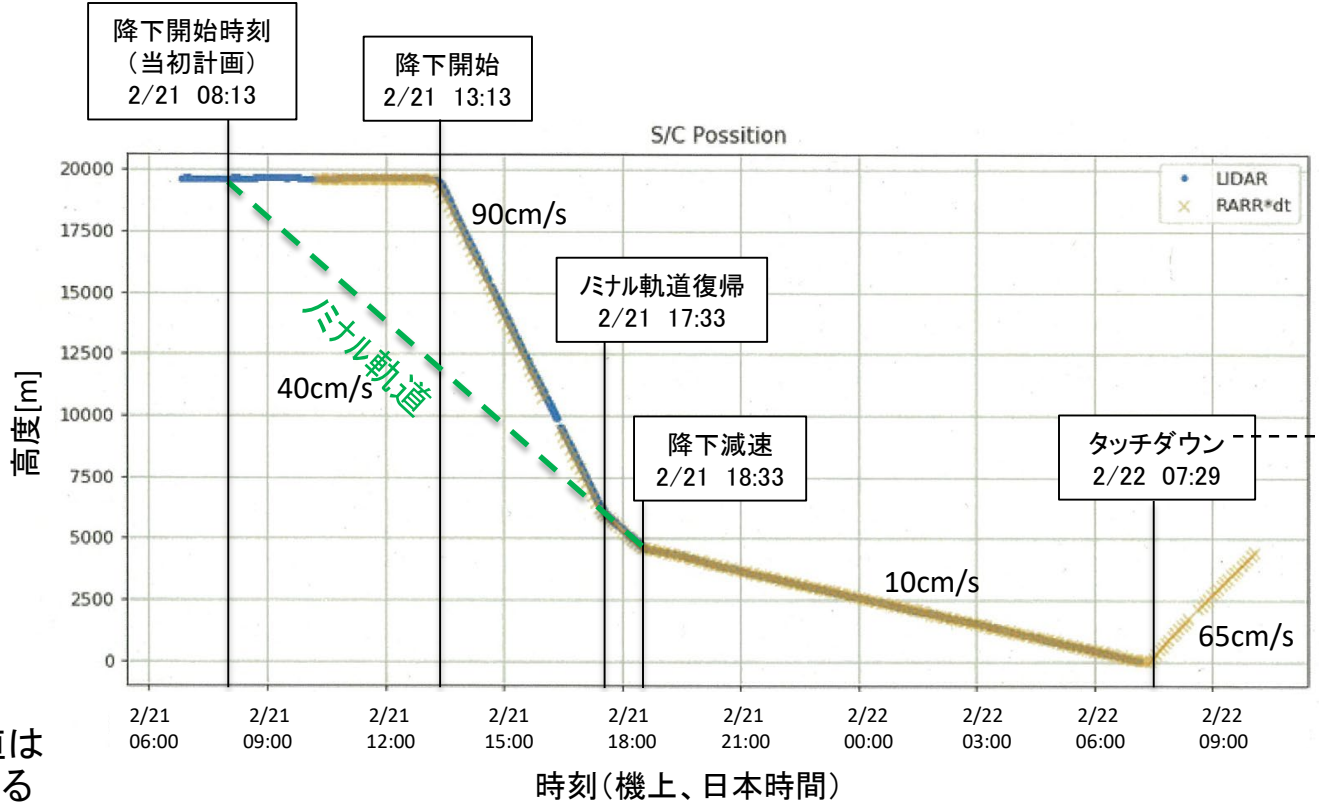


赤い円がサンプラホーンが接地したと考えられる場所。緑の円内がタッチダウン予定地点。背景は実際のリュウグウの画像。

（©JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

降下時



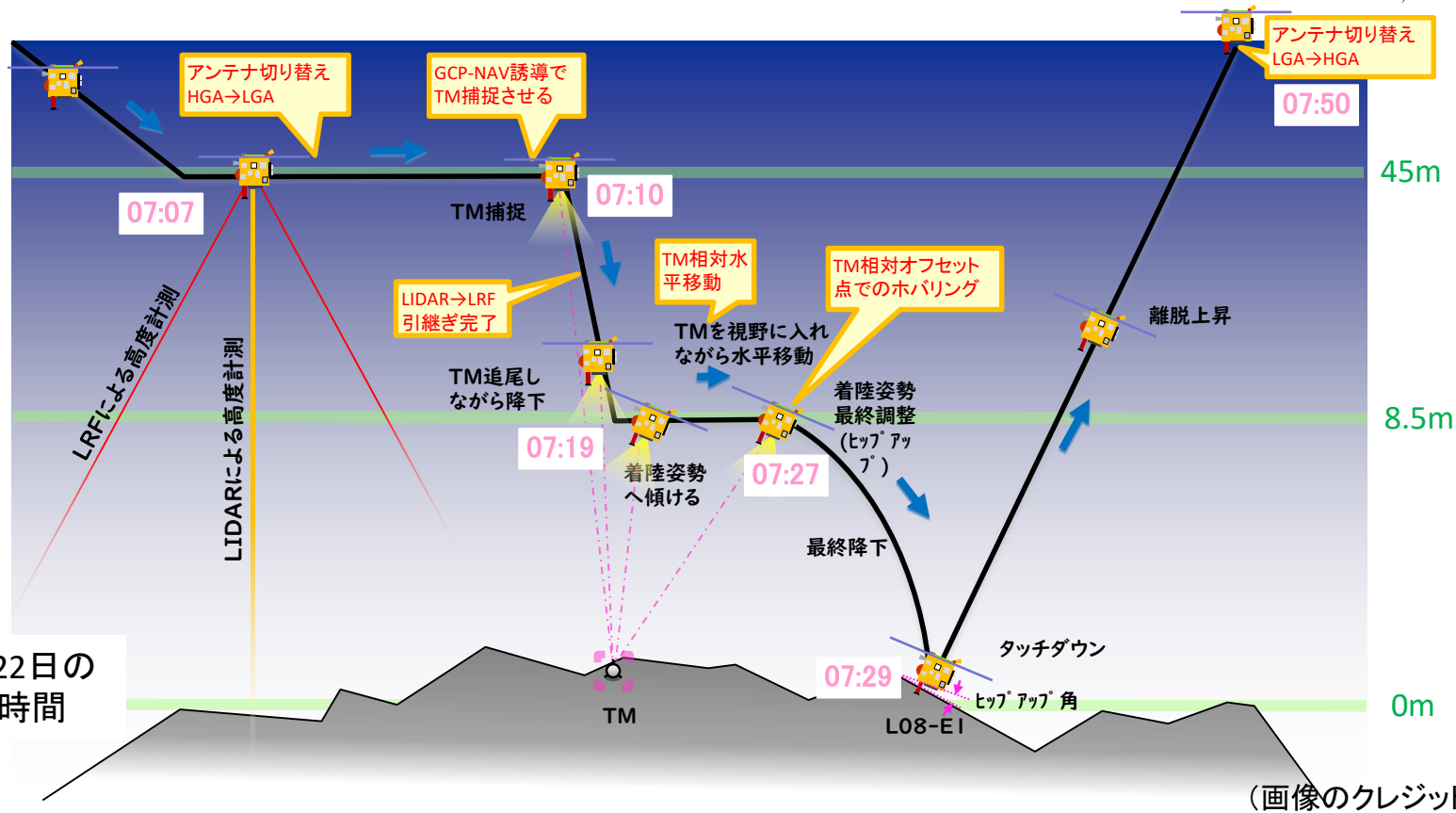
注）タッチダウンは姿勢の変化によって検知された。

速度の値は概数である

（画像のクレジット：JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

低高度



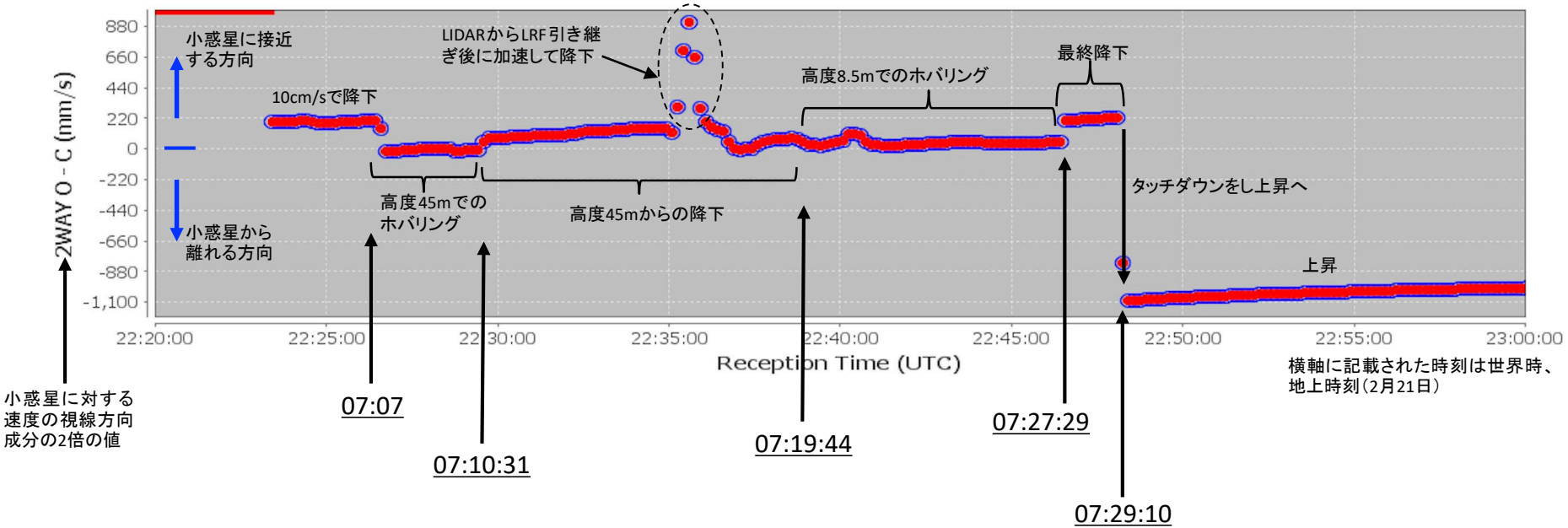
時刻は2月22日の
機上、日本時間

（画像のクレジット：JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

低高度

ドップラーデータ



（下線の時刻：2月22日、機上、日本時間）

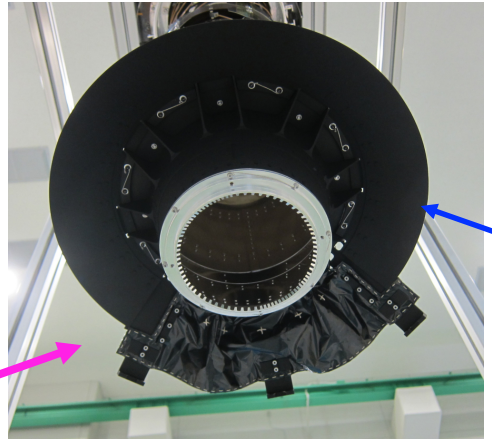
（画像のクレジット：JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

上昇時

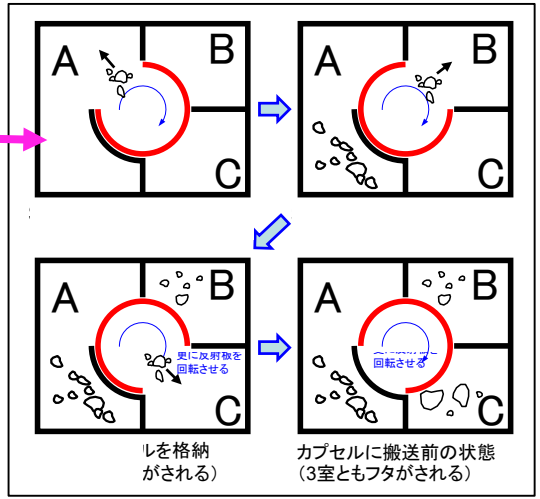
項目	機上時刻（日本時間）
タッチダウン	2/22　07:29
LGA→HGA	2/22　07:50
減速ΔV	2/22　10:40
キャッチャーA室閉鎖	2/22　11:20
姿勢：太陽指向	2/22　13:00
HP復帰ΔV	2/22　13:30
姿勢：地球指向	2/22　13:40
HP復帰	2/23　12:00

（画像のクレジット：JAXA）



探査機の速度を急に減速することで、サンプラホーンの先端の爪に引っかかった物質をキャッチャーに取り込む。

ダストガード



回転筒（右図の赤い部分）を回転させて、A室を閉鎖しB室を開放した。

3. タッチダウン運用の結果

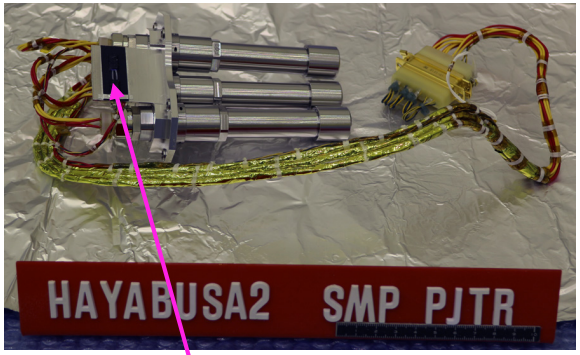
サンプル採取に関して

TDして上昇後、地上にてテレメトリを確認した結果、プロジェクタイルが発射されたことがステータスおよびプロジェクタの温度変化より確認できた。

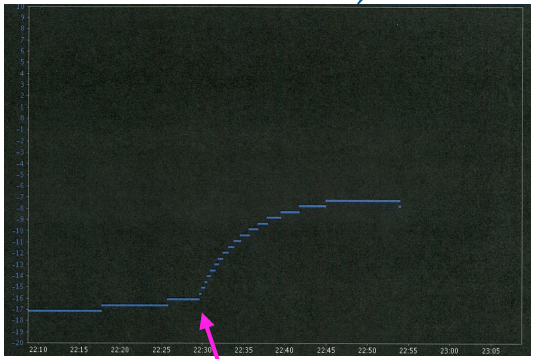
ホーン先端の折り返しで採取したサンプルを上方に浮遊させるため、-1cm/sの⊿Vを10:40に実施。

浮遊したサンプルがキャッチャの中に入って落ち着くのを待つため、40分後の11:20にキャッチャの回転機構を駆動しA室のフタを閉めた。駆動が正常に行われたことは、ステータスの変化によって確認した。

（時刻：2月22日、機上、日本時間）



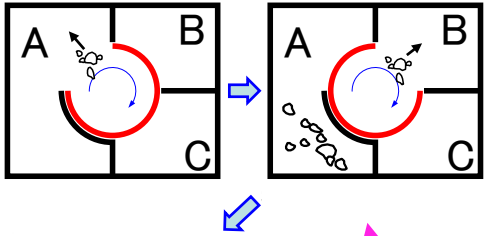
プロジェクタの温度センサ位置



07:29より温度上昇を確認

—<IGBOX>—			
IG_FLIGHT/SAFETY	FLIGHT	NEA_FLIGHT/SAFETY1	SAFETY
IG_ENA/DIS1	DIS	NEA_FLIGHT/SAFETY2	SAFETY
IG_ENA/DIS2	DIS	NEA_ENA/DIS1	DIS
IG_ENA/DIS3	DIS	NEA_ENA/DIS2	DIS
IG_ENA/DIS4	DIS		
		—<SMP>—	
		SMP_HORN	DONE
		SMP_MOVE	NON
		SMP_RELE	NON
—<SEP>—		SMP_REV_SW1	DONE
MASCOT_SEP	SEP	SMP_REV_SW2	NON
DCAM_SEP1	NON	SMP_REV_SW3	NON
DCAM_SEP2	NON	SMP_TUBE	NON

機構が正常動作し「DONE」になったことを確認



現在はこの状態

（画像のクレジット：JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

降下開始時刻が遅れた理由：

- 2月21日、07:15頃（日本時間）、Gate1チェックにおいて探査機の降下準備プログラムを動作させたところ、探査機が認識している位置情報が想定と異なっていることを確認した。
- そのため、降下開始の可否判断を遅らせるとともに状況確認を行ったところ、探査機が正常であることを確認した。また、降下誘導プログラムの動作のタイミングの影響で、起こる事象であることがわかった。
- タイミングの調整を行い、降下シーケンスが問題なく動作できることを確認した。
- Gate1での確認で確認事項が発生した場合に、降下開始時間を遅らせて新たな降下軌道を生成するなどの手順は訓練において行っており、約5時間ほどで 準備ができることを確認していた。
- タッチダウン時刻は決まっているので、降下速度を速くすることとなったが、降下速度約1m/sで高度数kmまで降りる運用は地上訓練において行っていたため、今回の対応に対して問題はないと判断した。

3. タッチダウン運用の結果

<u>タッチダウン地点のニックネーム（愛称）：</u>

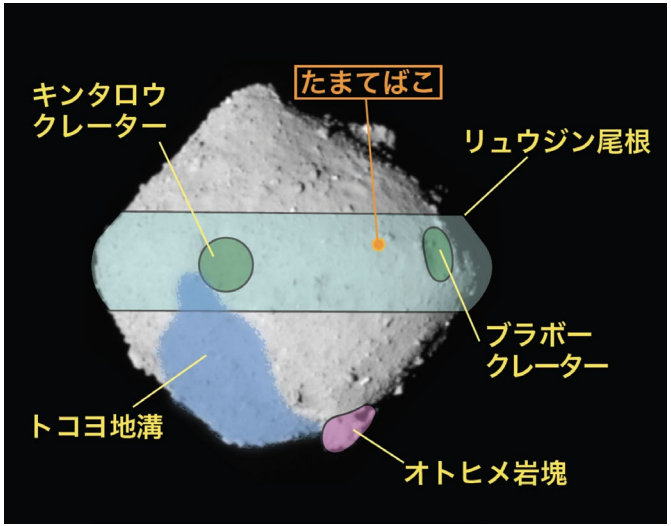
「はやぶさ2」がタッチダウンした地点のニックネーム（愛称）を

たまてばこ（Tamatebako）

とした。（注：これは、国際天文学連合に登録する正式名称ではない。）

理由：

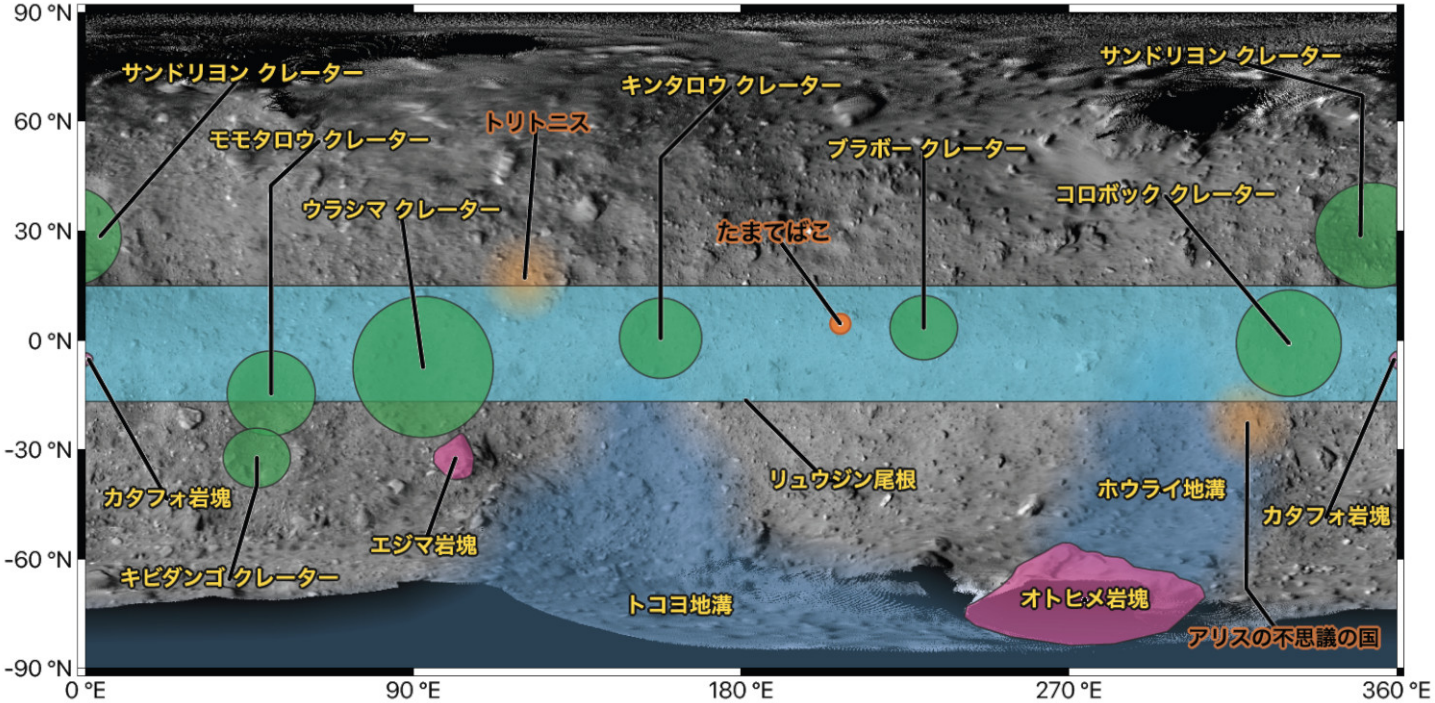
- プロジェクトメンバーから名前を募集して最も多く提案された名称
- 浦島太郎の物語で重要な役割を果たしているものであることに加えて、タッチダウン時にイジェクタが舞い上がる様子が玉手箱からの煙に似ていたため
- サンプル（＝リュウグウのお宝）を採取した地点であるため



（画像のクレジット：JAXA）

3. タッチダウン運用の結果

地名地図（改訂版）



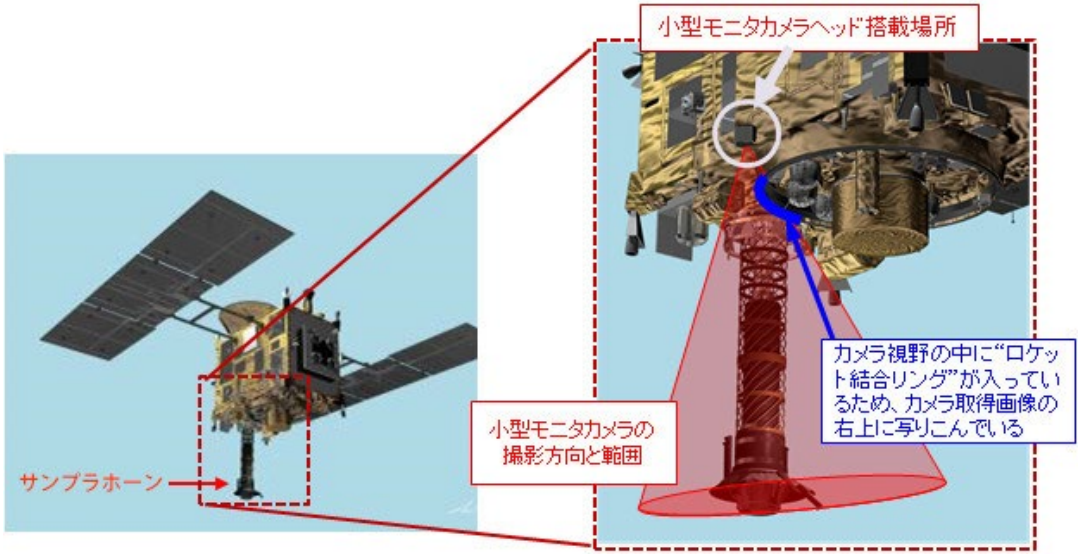
注：トリトニス（MINERVA-II1の着陸地）、アリスの不思議の国（MASCOT着陸地）、たまてばこ（1回目のタッチダウン地点）はニックネーム（愛称）で、国際天文学連合（IAU）に認められた地名ではない。他の地名はIAUで認められた正式名称である。

（画像のクレジット：JAXA）

4. CAM-Hによる画像

CAM-H（小型モニタカメラ）

- 寄附金により製作・搭載されたカメラ
- サンプラホーンを撮影

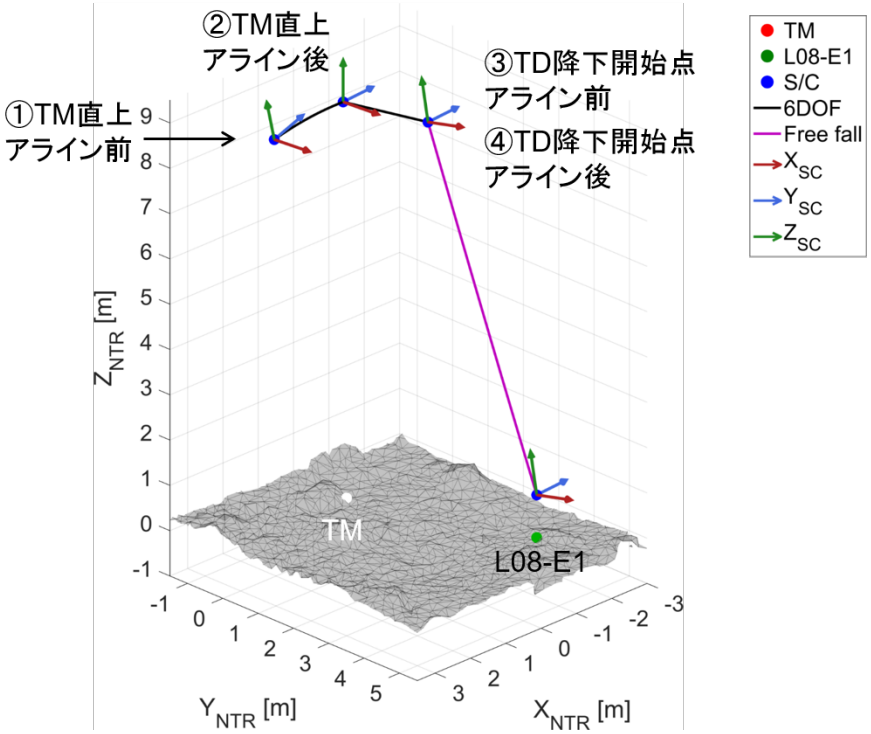


（画像のクレジット：JAXA）

4. CAM-Hによる画像

CAM-Hによる連続撮像シーケンス計画

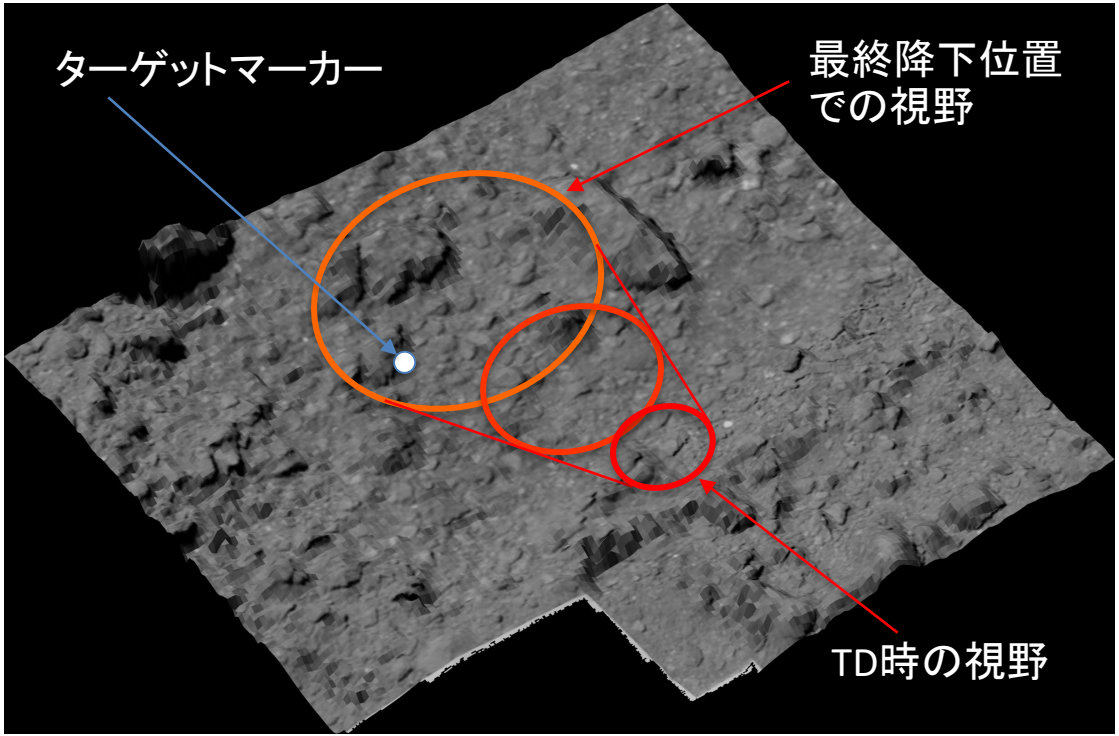
- はやぶさ2はTMを基準に最終降下位置まで直下点高度8.5mを維持して移動する（①⇒②⇒③）
- 最終降下位置で、探査機の姿勢を変更（ヒップアップ）した後（図の④）に、最終降下⊿V（下方におよそ7cm/s）を実施し、その後は自由落下にてタッチダウンする。
- CAM-Hの連続撮像は最終降下⊿Vの59秒前からスタート
- 0.2fps(85秒)⇒1fps(86秒)⇒2fps(25秒)⇒1fps(64秒)⇒0.2fps(85秒)で撮像する自動シーケンス
  ※ fps = frame per second



（画像のクレジット：JAXA）

4. CAM-Hによる画像

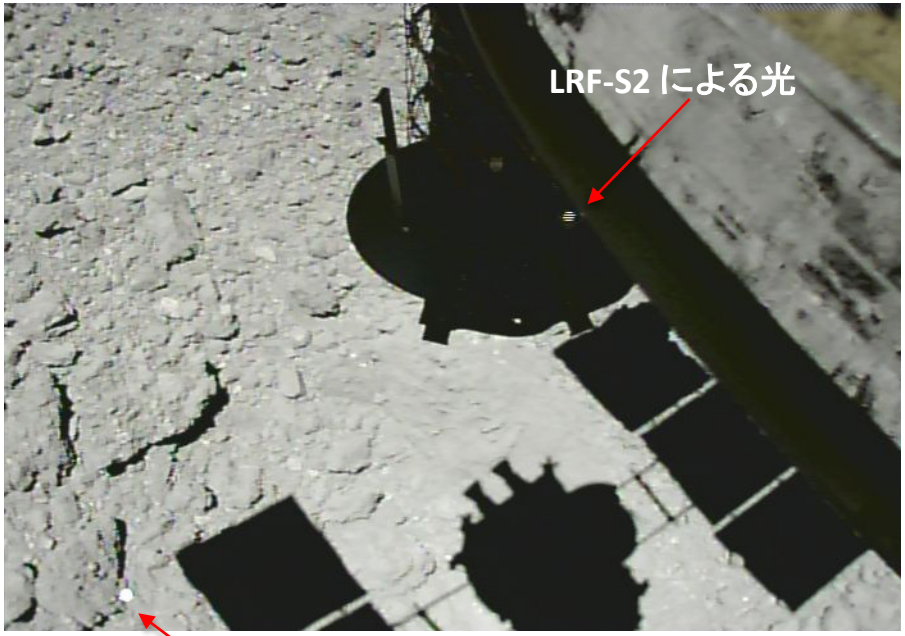
CAM-Hによるタッチダウン連続撮像の視野予測



（画像のクレジット：JAXA）

4. CAM-Hによる画像

CAM-Hによるタッチダウン前後の撮影に成功



ターゲットマーカー

（画像のクレジット：JAXA）

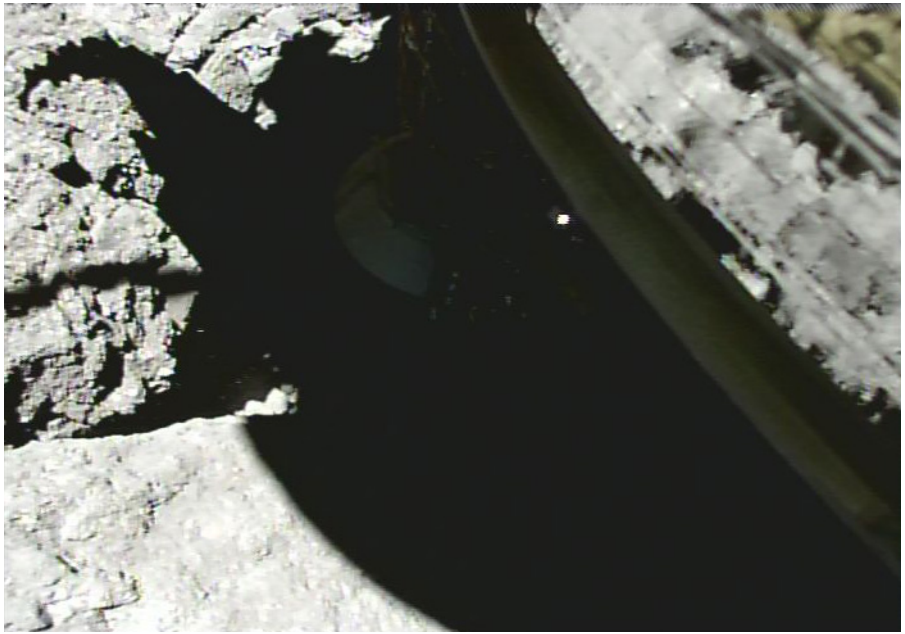
最終降下前：ホバリング中
時刻：2/22 07:26
高度：約8.5m

（時刻：機上、日本時間）

降下中
時刻：2/22 07:28
高度：約4.1m

4. CAM-Hによる画像

CAM-Hによるタッチダウン前後の撮影に成功



タッチダウンの瞬間
時刻：2/22 07:29
高度：約1.0m

上昇⊿V直後
時刻：2/22 07:29
高度：約2.9m

（画像のクレジット：JAXA）

（時刻：機上、日本時間）

4. CAM-Hによる画像

CAM-Hによるタッチダウン前後の撮影に成功

上昇中
時刻：2/22 07:29
高度：約8.0m

上昇中
時刻：2/22 07:30
高度：約49.6m

（画像のクレジット：JAXA）

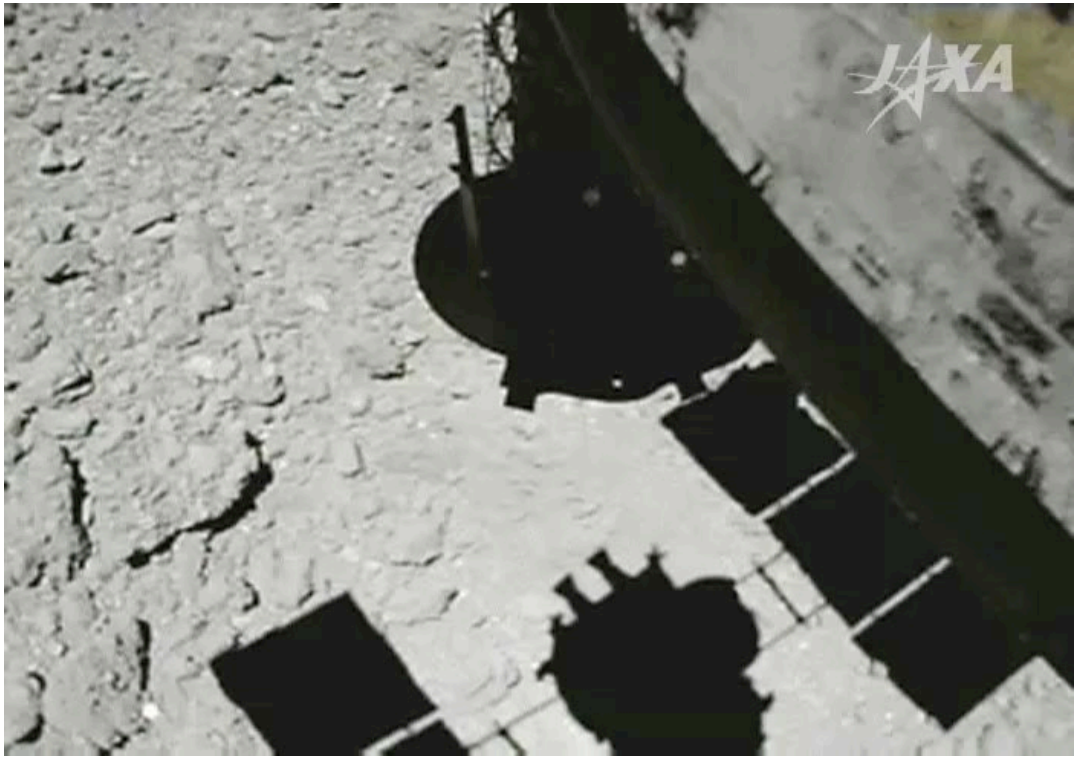
（時刻：機上、日本時間）

4. CAM-Hによる画像

CAM-Hによるタッチダウン前後の撮影（動画）

- 最終降下59秒前から連続撮像をスタートし、撮像頻度を変えながら5分40秒間撮像
- TDの瞬間は1fps（約1秒間隔）で撮像
- 最終高度は約117m

（動画、5倍速）



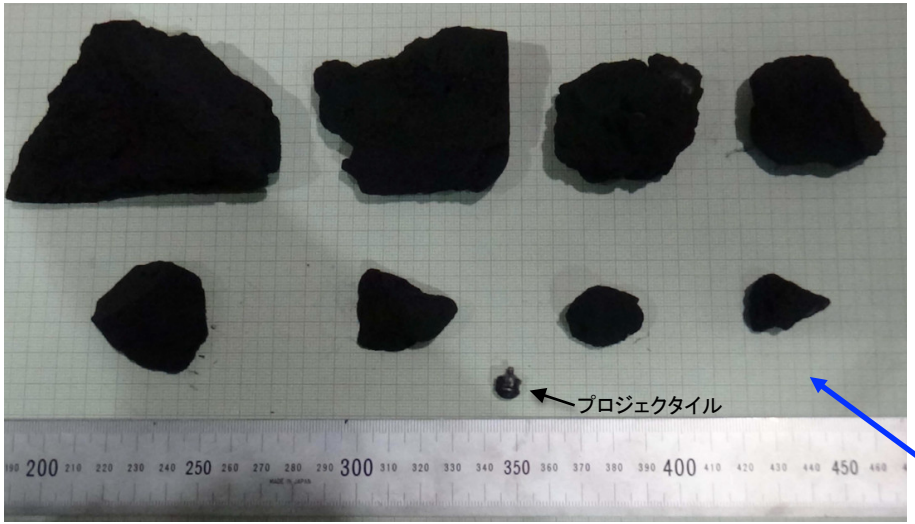
（画像のクレジット：JAXA）

4. CAM-Hによる画像

参考：プロジェクタイル発射実験時の模擬リュウグウ砂礫標的と発射されたプロジェクタイル
（2018年12月28日に行ったプロジェクタイル発射実験より）

プロジェクタイル発射後の
模擬リュウグウ砂礫標的

※模擬リュウグウ砂礫は、
東京大・TeNQで作成



破砕後の模擬リュウグウ砂礫例
（一番下の小さいものは発射されたプロジェクタイル）

発射されたプロ
ジェクタイル

形状がリュウグウ表
面の砂礫と類似？

（画像のクレジット：JAXA、東京大）

5. タッチダウンに関するサイエンスからのコメント

科学的解析は進行中なので、以下は画像からの印象を述べる。

- ONC-W1の直後画像
  - 表面付近の上空に飛散・浮遊する破片・粒子を多く含む領域がありそう。
  - 試料採取用の弾丸およびスラスタ噴射で作られた地表の擦跡もありそう。
  - 飛散する粒子・破片が多数見られる：試料が採取できた可能性が大きい。
  - ONC-W1カメラのレンズに微粒子が付着した可能性がある。
- CAM-Hの画像
  - サンプラホーンは大きな岩にはかからずに接地できたように見える。
  - 地表画像は他の着陸機のものと類似：平均で10 cm程度の石に被われる。
  - タッチダウン後は，直径数十cmに達するような岩も放出されている。
  - 放出破片は板状のものが多く、かなり高空まで達しているように見える。

6. 今後の予定

■運用の予定

- 3月6～8日：降下運用（DO-S01）
- 3月20～22日：降下運用（CRA1）
- 4月1日の週 ：衝突装置（SCI）運用

■海外での発表

- LPSC（The 50th Lunar and Planetary Science Conference）：3月18日～22日、米国、テキサス。「はやぶさ2」のセッションあり。現地メディア向けの説明会も予定。

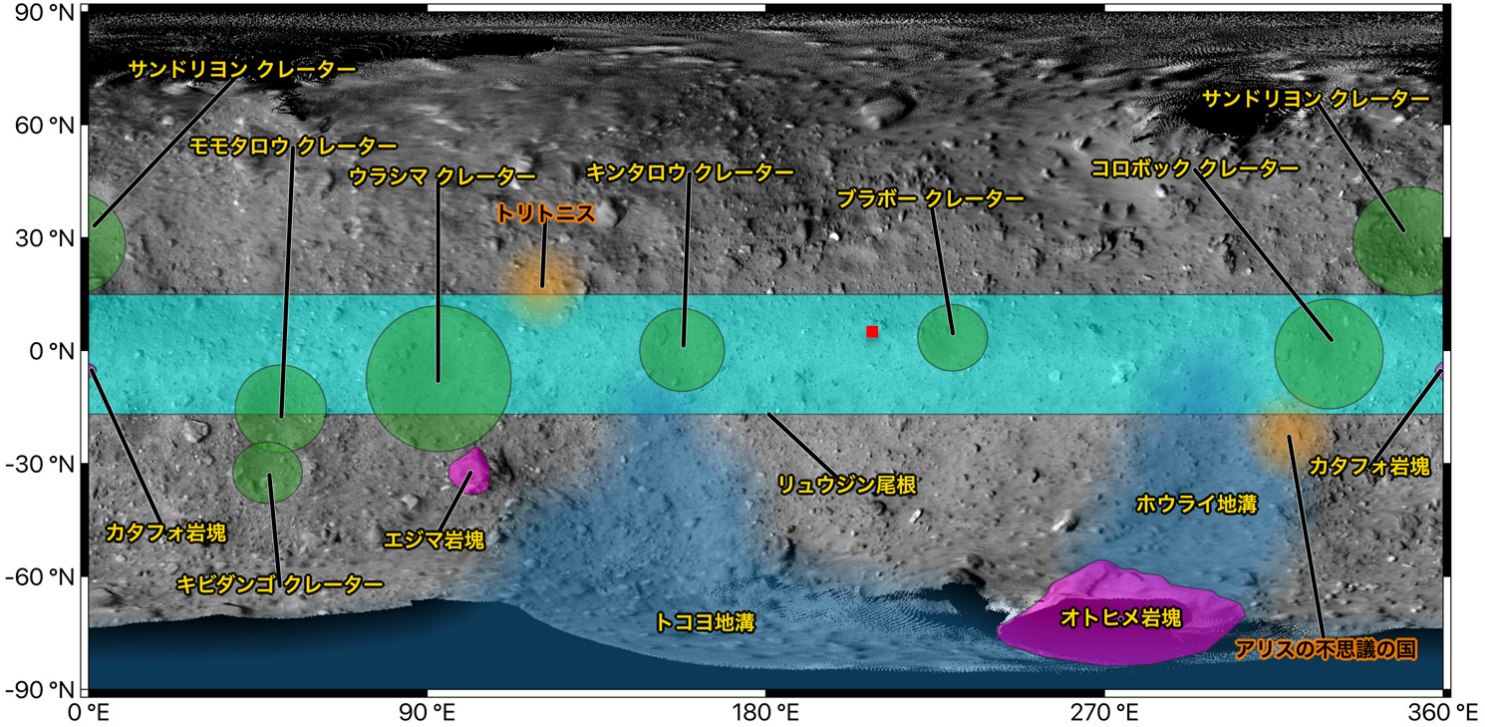
■記者説明会等

- 3月18日 15:00～16:00　定例記者説明会＠JAXA東京事務所

参考資料

タッチダウン位置

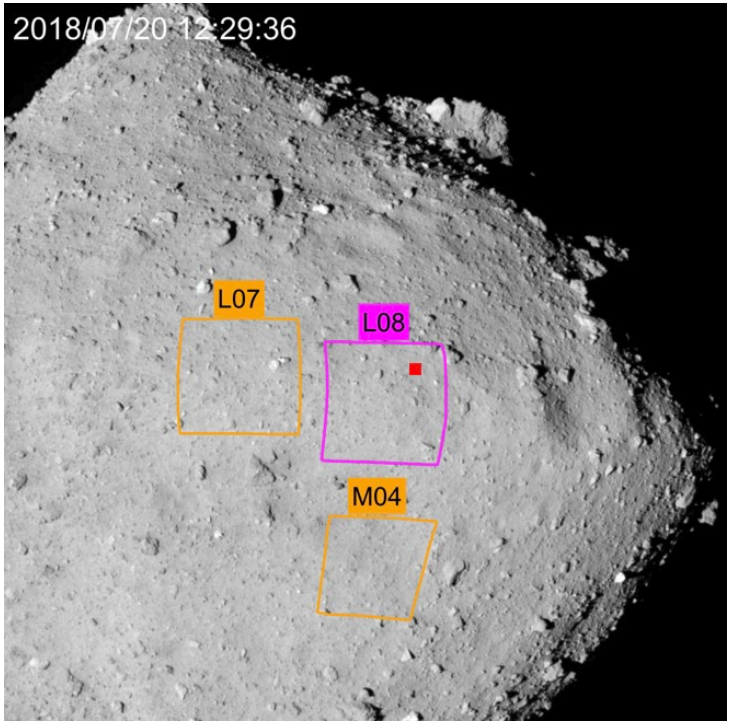
タッチダウンのおおよその位置は、下の図の赤い四角（■）のところとなる。

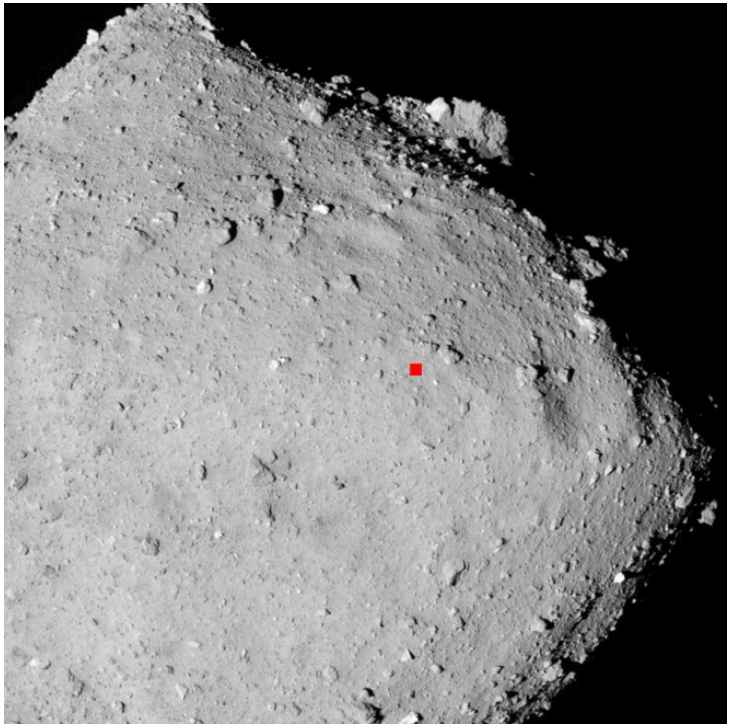


（画像のクレジット：JAXA）

タッチダウン位置

タッチダウンのおおよその位置は、下の図の赤い四角（■）のところとなる。

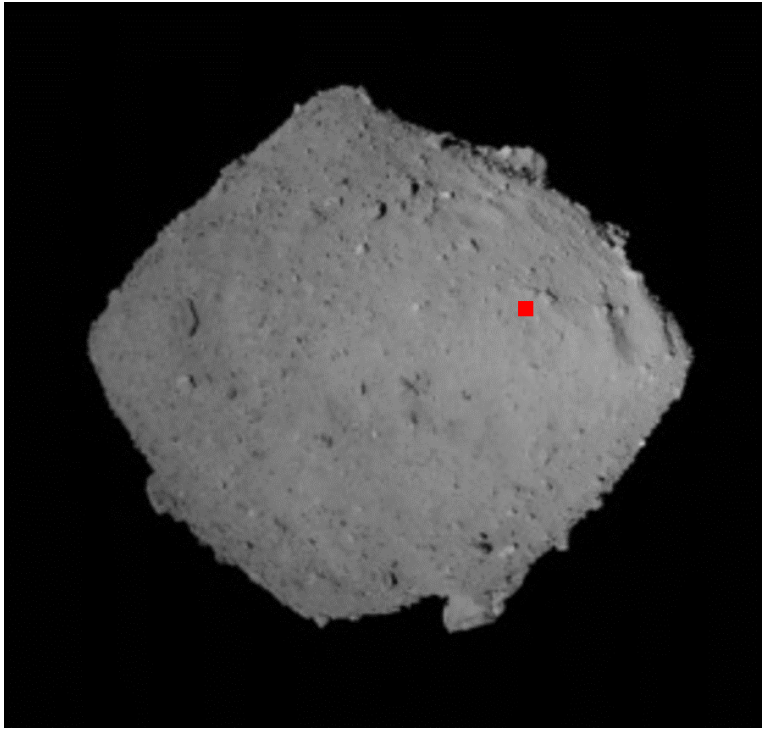




（画像のクレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研）

タッチダウン位置

タッチダウンのおおよその位置は、下の図の赤い四角（■）のところとなる。

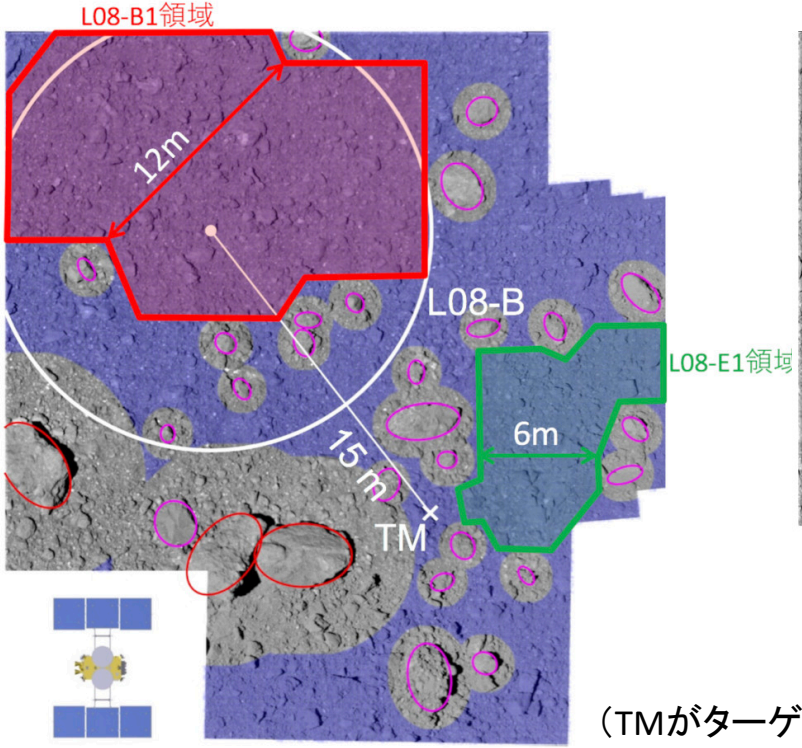


（画像のクレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研）

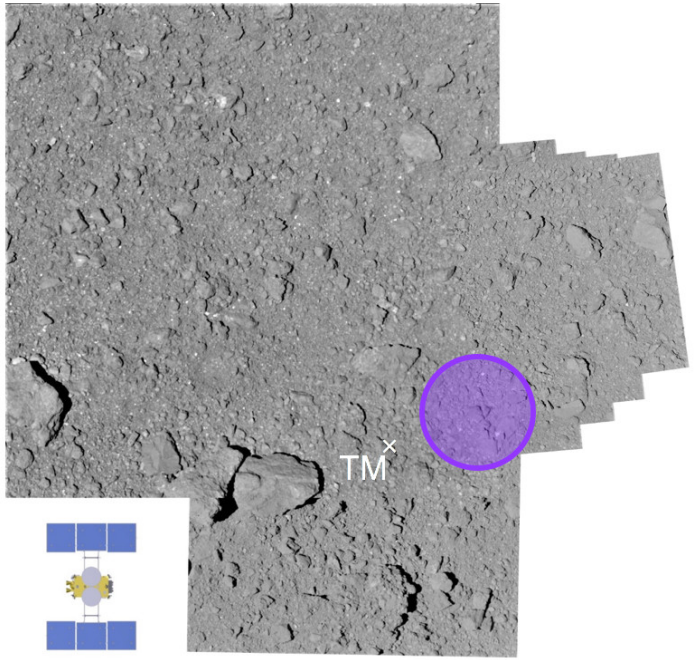
タッチダウン地点

ターゲットマーカ
周辺の領域

タッチダウンの候補地として、L08-B1とL08-E1を設定した。
↓
最終的にL08-E1が選択



TM-Bの位置とタッチダウン候補地



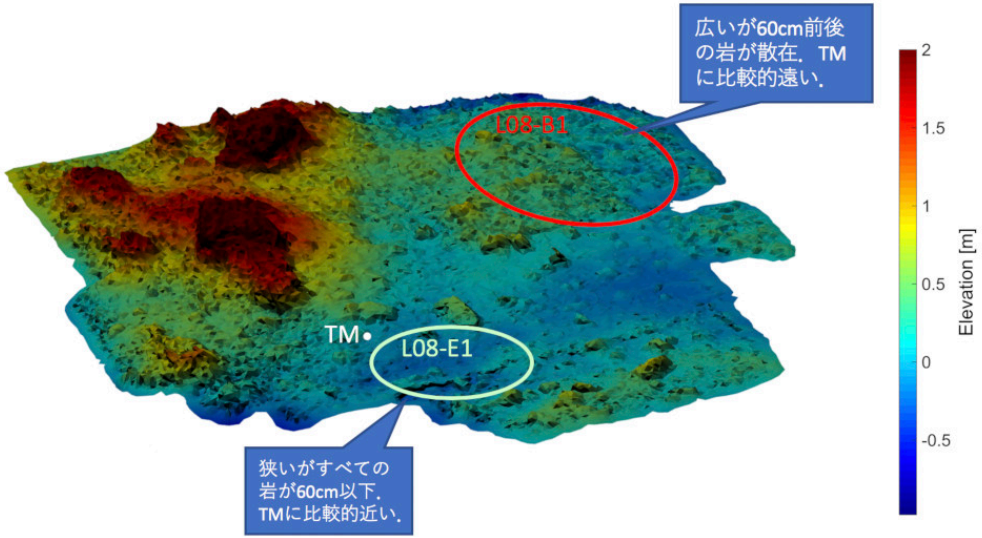
（TMがターゲットマーカの位置を示す）

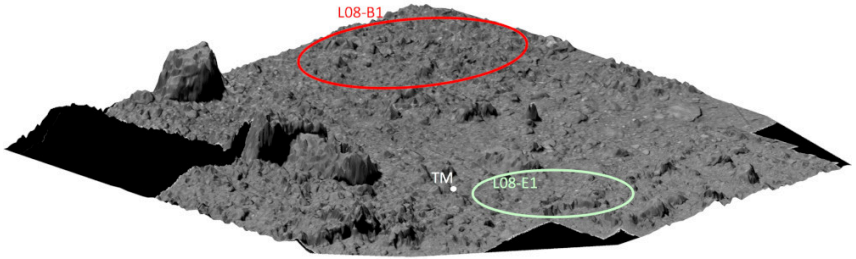
タッチダウン予定地

（画像のクレジット：JAXA）

タッチダウン地点

L08-E1領域

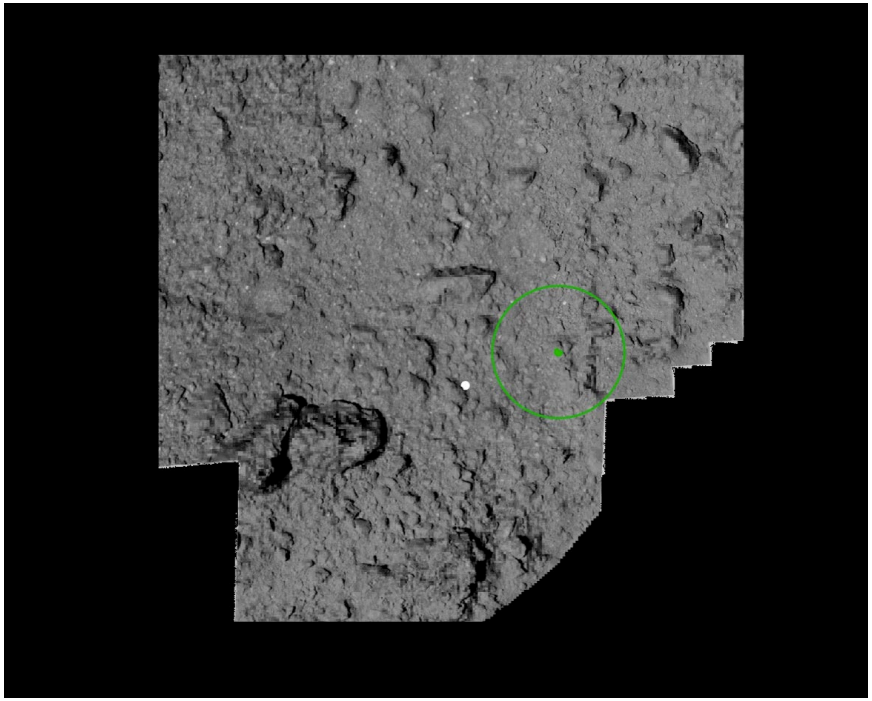




タッチダウン候補地点付近のDEM（Digital Elevation Map）（画像のクレジット：JAXA）

タッチダウン地点

L08-E1領域



（動画）

タッチダウン候補地点付近のDEM（Digital Elevation Map）

（画像のクレジット：JAXA）

タッチダウン運用計画

タッチダウン運用計画の考え方

- 探査機は着陸シーケンス中、常時シーケンスが正常に進行しているかを自己監視している。異常と判断すると、アボート（緊急上昇）を自動で行う。
- アボートが発生すれば、探査機の安全は確保される（＝ミッション失敗ではない）。
- 今回のタッチダウン運用の設計においては、安全を損なわないようアボート条件を厳しく設定している。（特に低高度シーケンス中のチェックポイント①～④での監視）
- アボートが発生した場合、バックアップ期間を使う等して、タッチダウン運用を再実施する。

タッチダウン運用計画＝再実施も含めたタッチダウン完了までの一連の運用群

タッチダウン運用計画

タッチダウン運用のポイント

当初：

→100m四方のタッチダウン可能領域を想定

- 「はやぶさ」方式のタッチダウン
- ターゲットマーカは、探査機の水平方向速度成分を小惑星表面の速度に合わせるために使用する。
- LRFによって高度を計測するだけでなく、姿勢を表面に平行にする操作を行う。

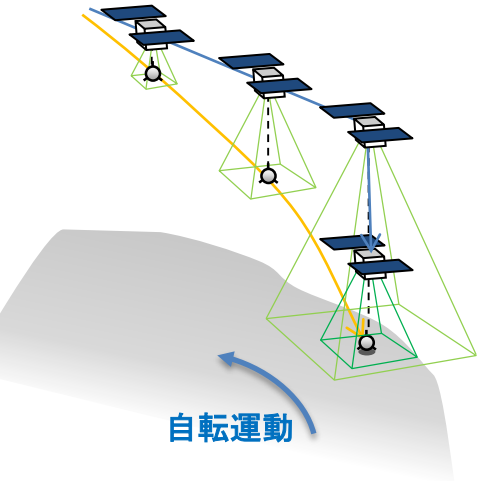
実際：

→約6m幅の領域にタッチダウン

- ピンポイントタッチダウンの手法
- 小惑星表面のターゲットマーカの位置に対して相対的に探査機の位置を制御する。
- LRFは高度計測と安全確認に用い、姿勢制御には使用しない。
- 姿勢は、計画値に基づいて設定する。

タッチダウン運用計画

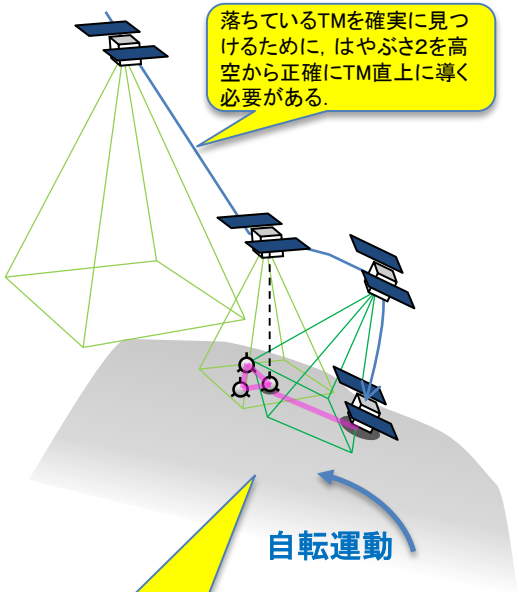
はやぶさ2のピンポイントタッチダウン機能



「はやぶさ」方式

- 分離して落ち行くTMを追尾することで，地表に対する「相対速度」をゼロにして着陸する．
- 分離直後からTMを認識することで，追尾が比較的容易．
- TMを常に視野の中心に入れながら高度を下げる．
- 一度に追尾できるTMは一つだけ．

- TM投下精度で，着陸精度が決まる．



「ピンポイントタッチダウン」方式

- 既に落ちているTMを捕捉し，それに対して指定した「相対位置」に着陸する．（画面内でTMを中心からオフセットさせることができる）
- 複数のTMの配置を認識することが可能．

- TM投下精度とは無関係に，着陸地点を指定できる．
- 今回のタッチダウンでは，一つのTMを使ったピンポイントタッチダウンを実施する．

※TM：ターゲットマーカ

（画像のクレジット：JAXA）

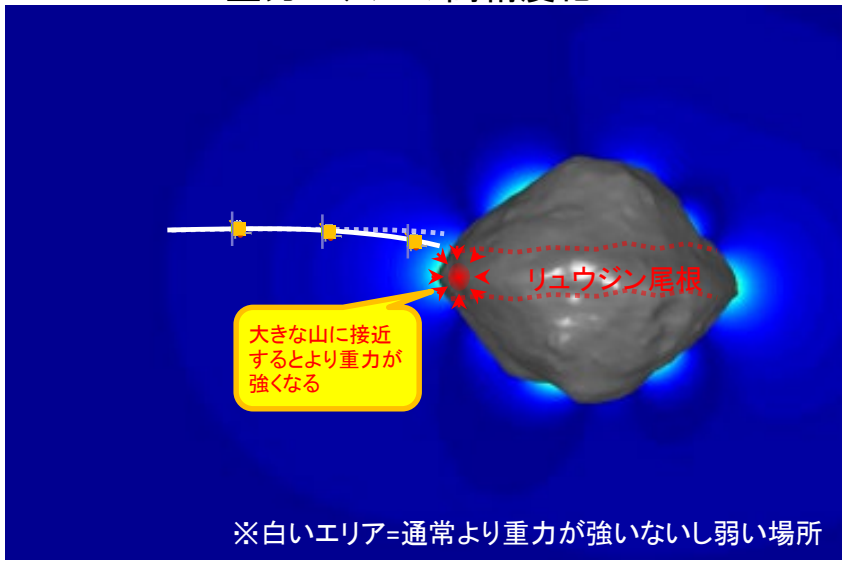
タッチダウン運用計画

高精度着陸実現のために実施した施策

① 小惑星モデルの高精度化，② 自律制御のチューニング，③ 着陸安全余裕の拡大

一例

重力モデルの高精度化

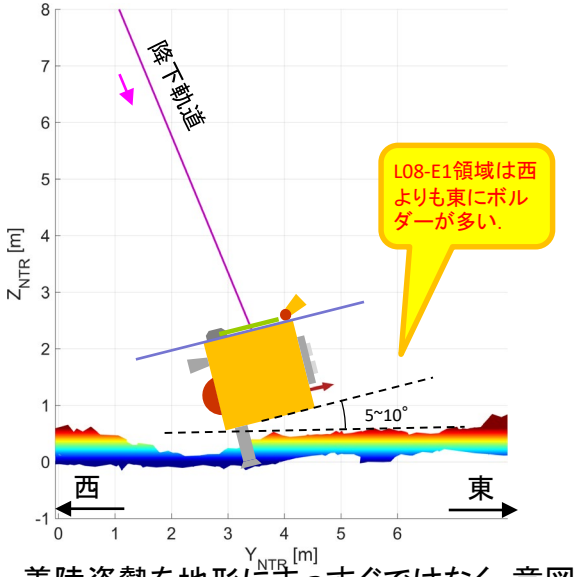


リュウグウは球体ではない．尾根の質量集中により軌道が曲がる効果を考慮した．

（画像のクレジット：JAXA）

一例

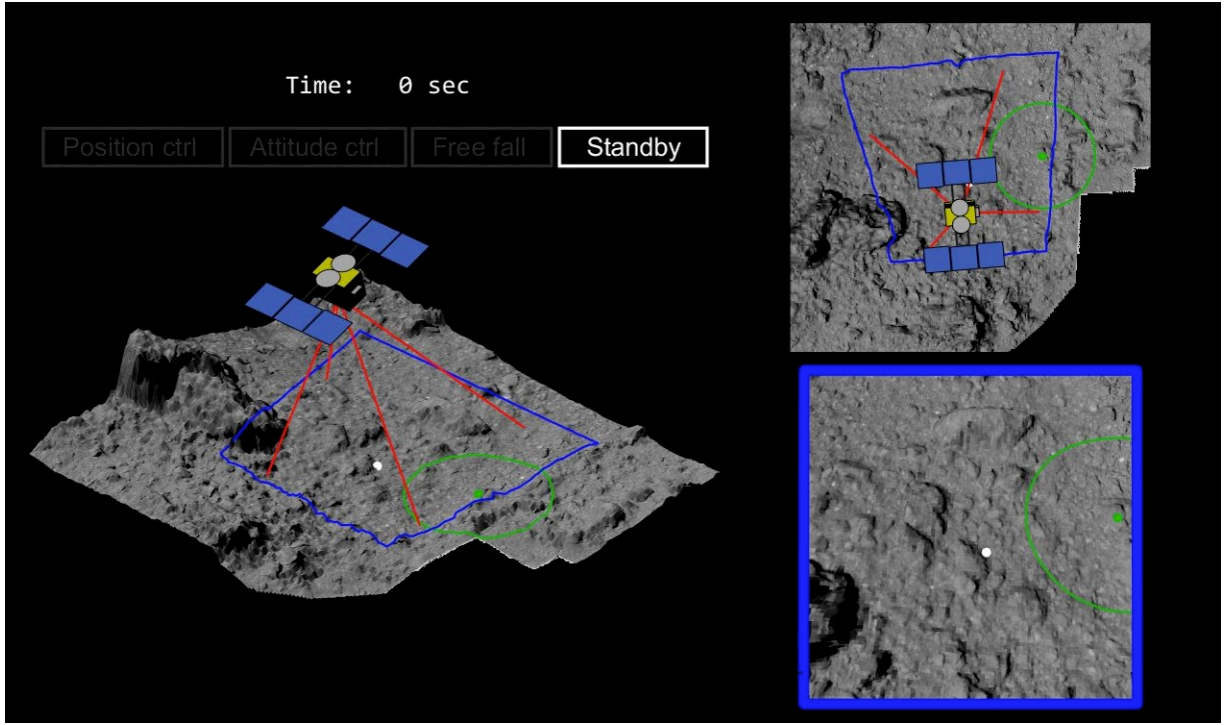
着陸時ヒップアップ姿勢の採用



着陸姿勢を地形にまっすぐではなく，意図的に少し傾けることにより，高いボルダーを回避する．

タッチダウン運用計画

タッチダウン直前の探査機の動き（10倍速動画）



※秒時，姿勢や位置関係はチューニング中のため，今後変化します．

（画像のクレジット：JAXA）