

# 小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2019年6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、

- 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果
- 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1B) の計画
- 今後の運用方針
- サイエンス成果

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. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果
  3. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1B)の計画
  4. 今後の運用方針
  5. サイエンス成果
  6. その他
  7. 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。



## 「はやぶさ2」主要精元 (イラスト 池下章裕氏)

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	令和2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



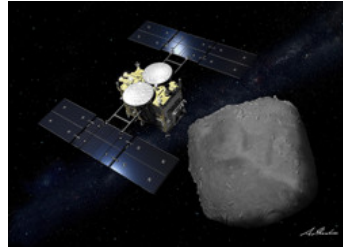
**打ち上げ**  
2014年12月3日



**地球スイングバイ**  
2015年12月3日



**リュウグウ到着**  
2018年6月27日



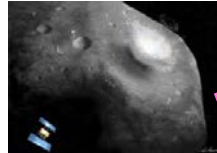
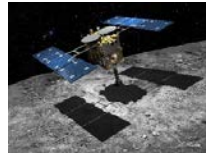
**MINERVA-II-1分離**  
2018年9月21日



**MASCOT分離**  
2018年10月3日

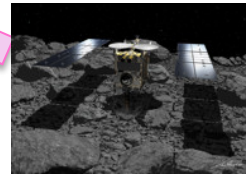


**リュウグウ出発**  
2019年11月～12月



**衝突装置**  
2019年4月5日

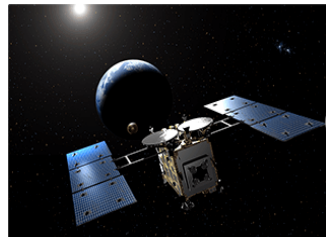
2019年2月22日



**1回目のタッチダウン**

安全を確認後、クレーターまたはクレーター周辺にタッチダウンを行い、地下物質を採取する。

終了 →



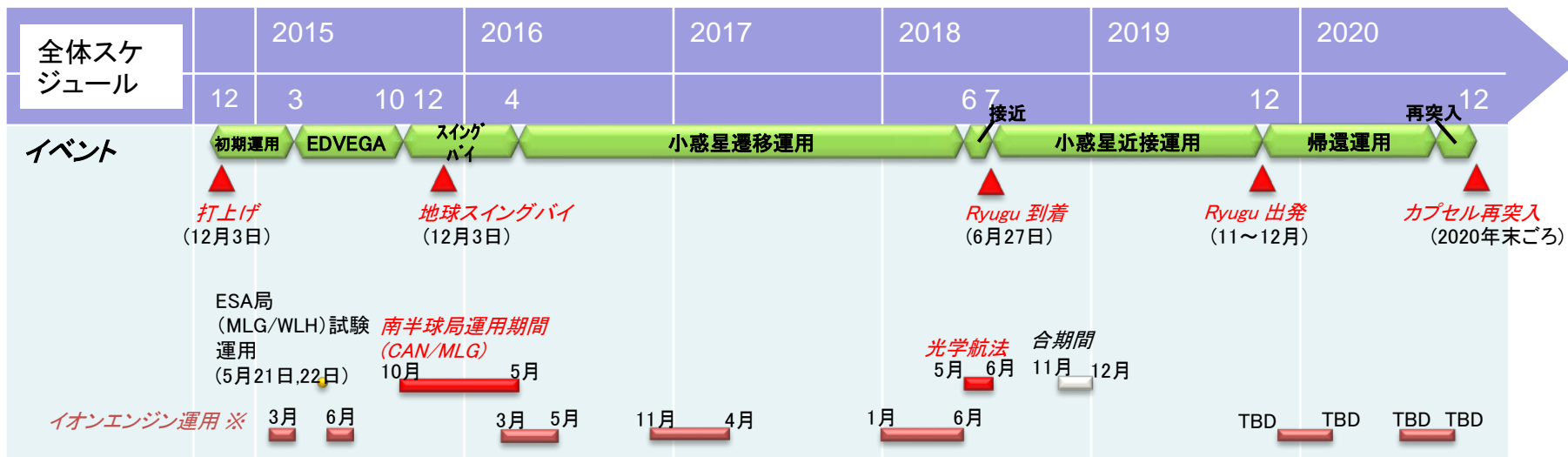
**地球帰還**  
2020年末ごろ

(画像クレジット: 探査機を含むイラストは 池下章裕氏、他はJAXA)



# 1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

- 現状：
- 5月28～30日に低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)を行った。ターゲットマーカをC01領域に投下し、低高度観測を行った。
  - 低高度降下観測運用(PPTD-TM1B)を6月11～13日に行う。本日(6/11)は、降下のための準備を行っている。





## 2. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果



- 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)を5月28日～30日に行った。
- 降下準備を行い(5月28日)、5月29日 12:06(機上、日本時間、以下同様)から降下を開始し、5月30日 11:00に高度約35mに達した。その後、この高度付近でホバリングを開始した。
- 11:09に再び降下を開始し、11:18に高度約9mでターゲットマーカを分離し、探査機は上昇に転じた。最低高度は約8m。
- 探査機は、5月31日にホームポジションに復帰した。
- ターゲットマーカは、目標地点から約3m離れた位置に投下された。
- レーザ高度計(LIDAR)およびレーザレンジファインダ(LRF)の低高度における計測特性や、広角の光学航法カメラ(ONC-W1)によるターゲットマーカの撮影画像の特性を得ることができた。

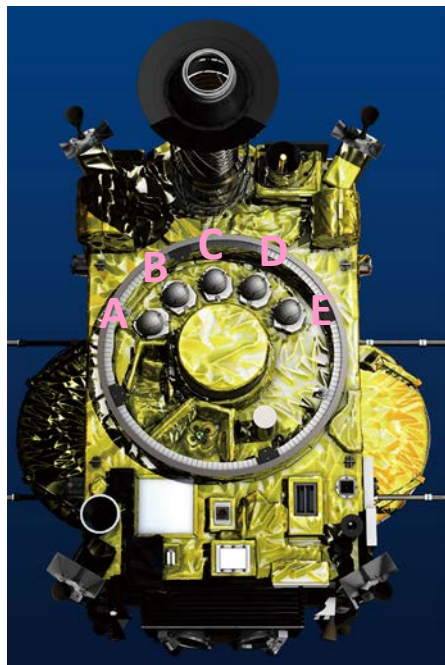




## 2. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果

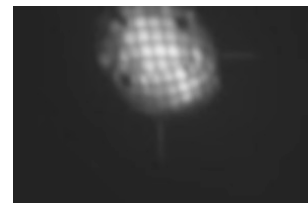


### 二つ目のターゲットマーカ投下成功！

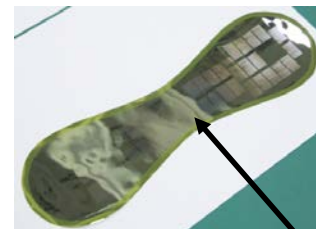


#### ターゲットマーカ

- 本体(ボール)の大きさ: 直径約10cm
- 表面には再帰性反射フィルム
- 4本の棒: 転がり防止
- 内部にはポリイミド小球が多数
- 5つとも公募した名前を記載したシートが挿入されている
- 記載された名前の総数: 183,174件



分離されたターゲットマーカA



名前が記載されたシート

搭載された名前の搭載位置の検索ができます  
検索サイト: <https://www.haya2-campaign.jp/>



名前が記載されたシート

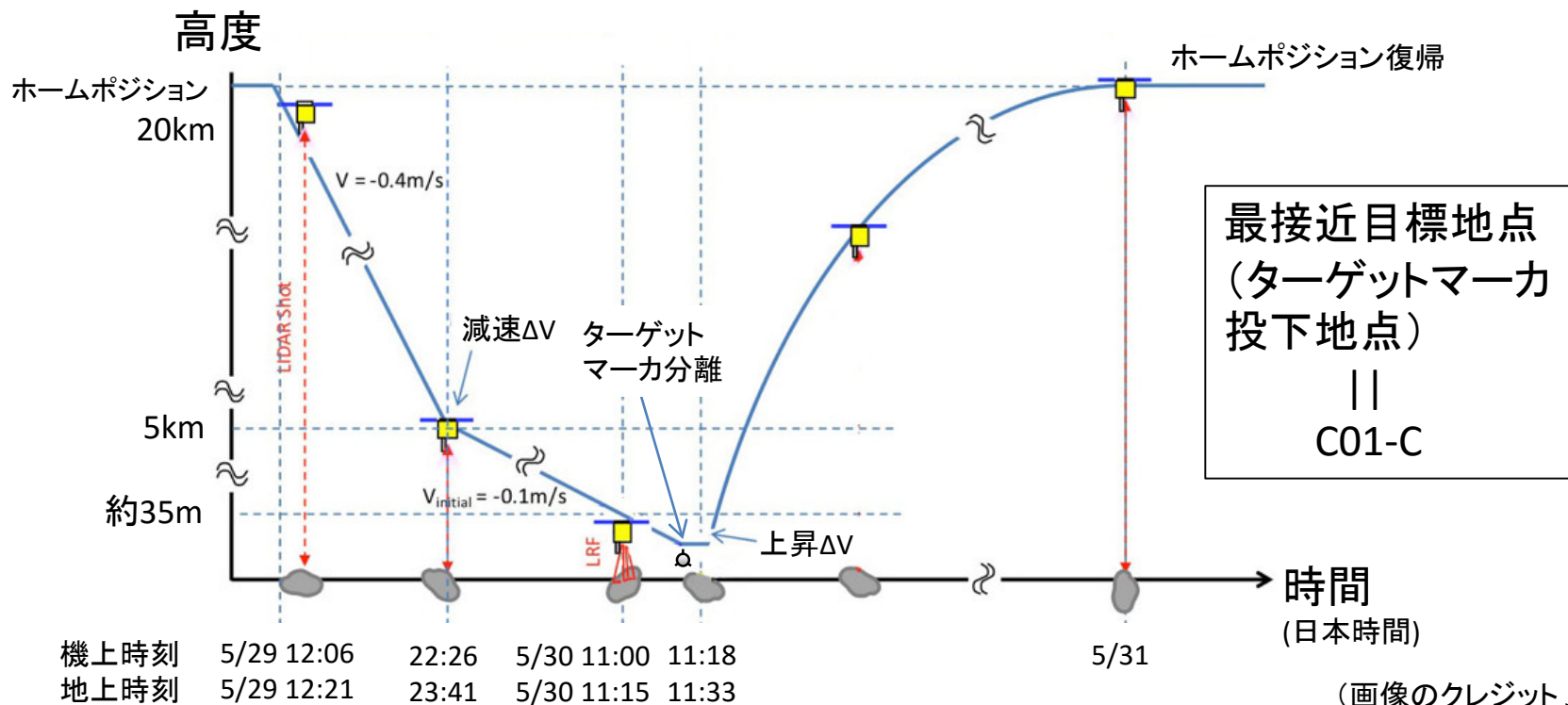
今回はAを分離した。Bは分離済み。(分離の順序: B→A→E→C→D)





# 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果

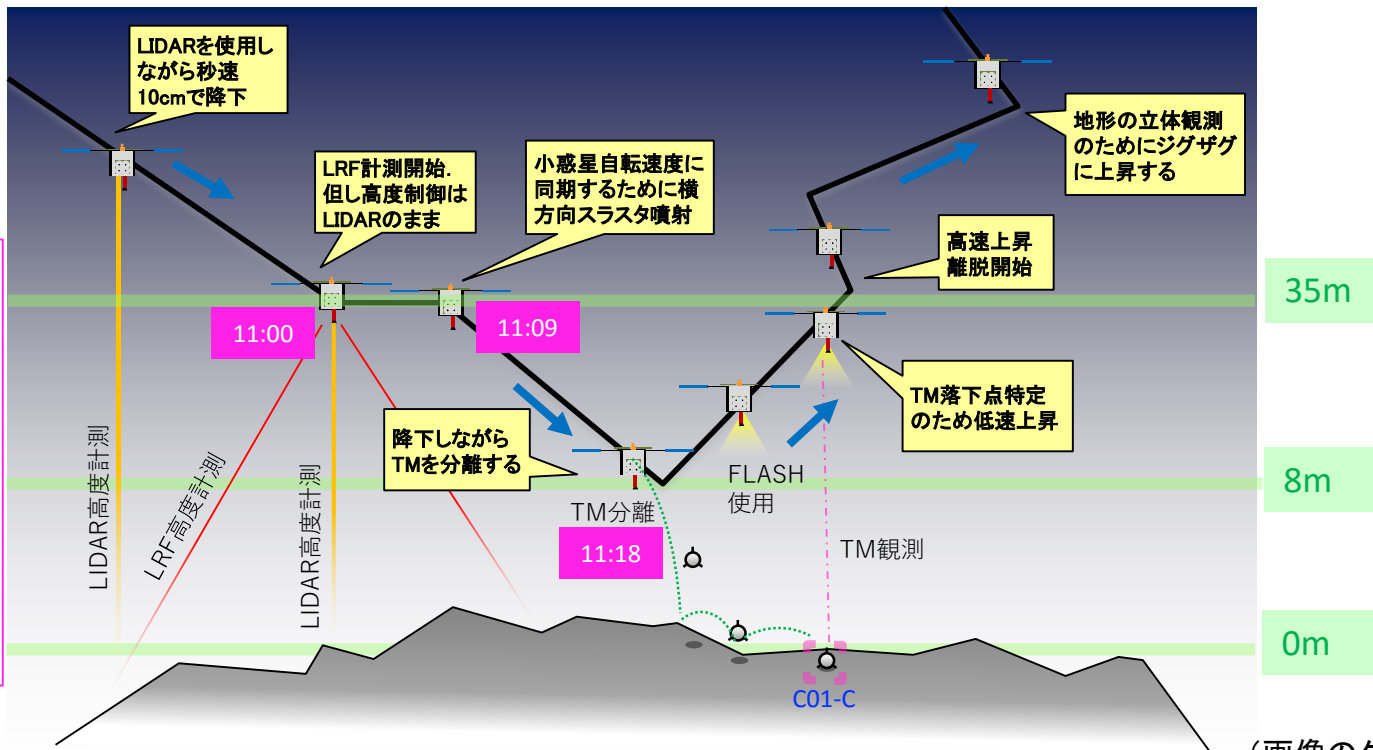
## PPTD-TM1A運用 (実績)





# 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果

## PPTD-TM1A運用の低高度シーケンス (実績)



※時刻は2019年5月30日の機上での日本時間である。

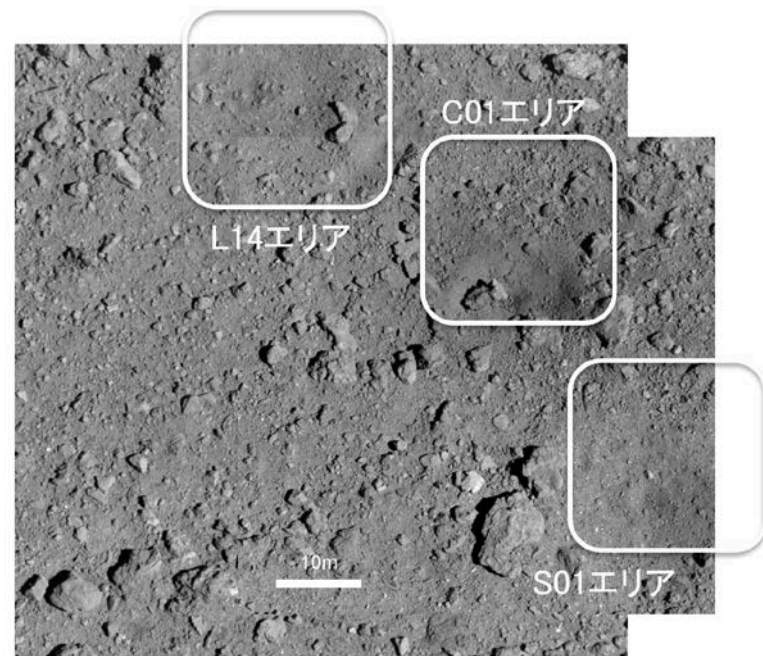
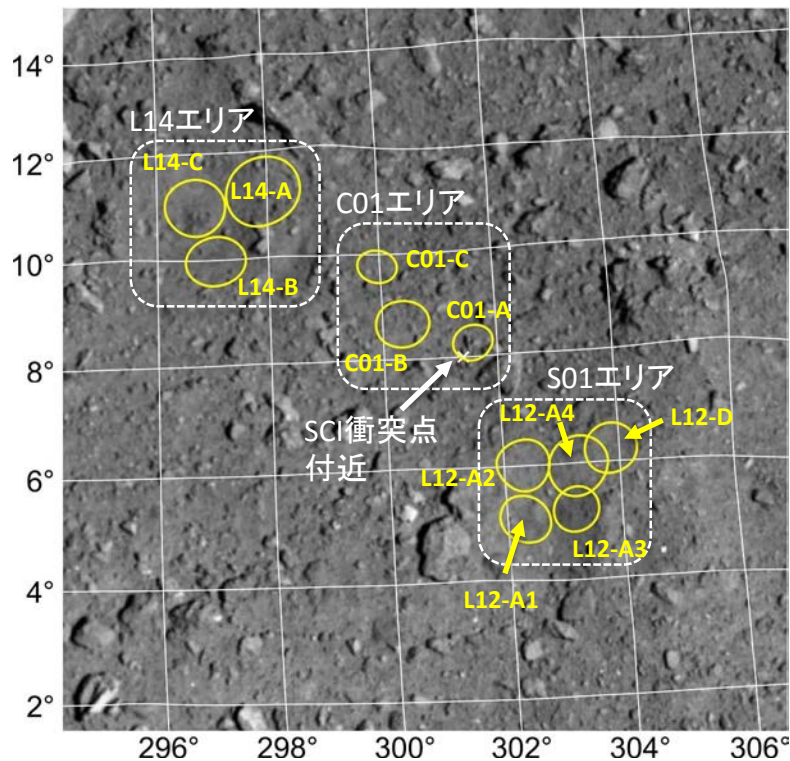
- 11:00 高度約35mに達した時刻
- 11:09 降下を開始した時刻
- 11:18 TMを分離しその後上昇に転じた時刻

(画像のクレジット JAXA)



## 2. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果

### タッチダウン候補地点



(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)



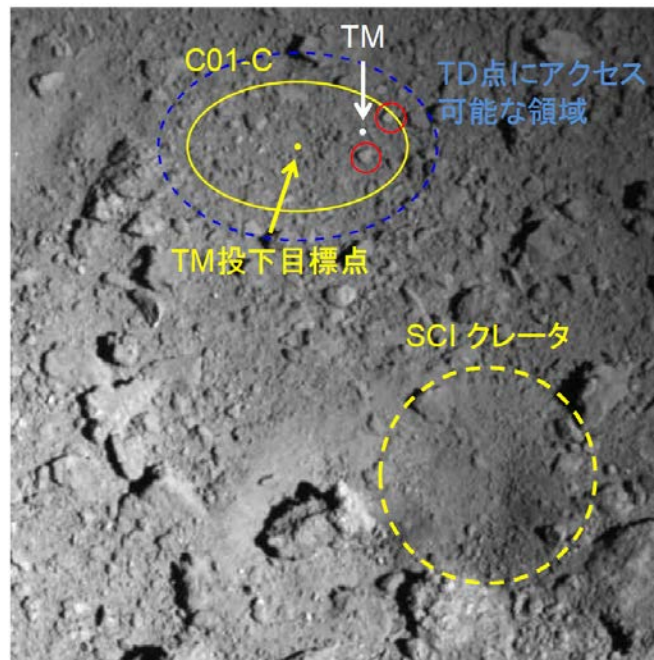
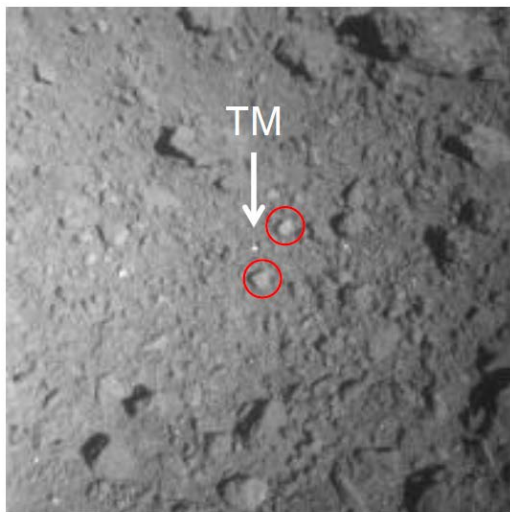
## 2. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果



### ターゲットマーカ投下結果

- 「TD点にアクセス可能な領域」へのTM投下に成功

初公開



(説明図: TMは着地位置を記載したもの)

ONC-W1によって2019年5月30日 11:23(機上、日本時間)に撮影された画像。撮影の高度は約35m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)



## 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果 ターゲットマーカの分離画像 (ONC-W1による)



ONC-W1によって5月30日11:18から11:26(機上、日本時間)にかけて撮影された画像を連続的に合成したもの。探査機高度は約8mから約68m。フラッシュを使用して撮影。(画像のクレジット JAXA、千葉工大)



初公開

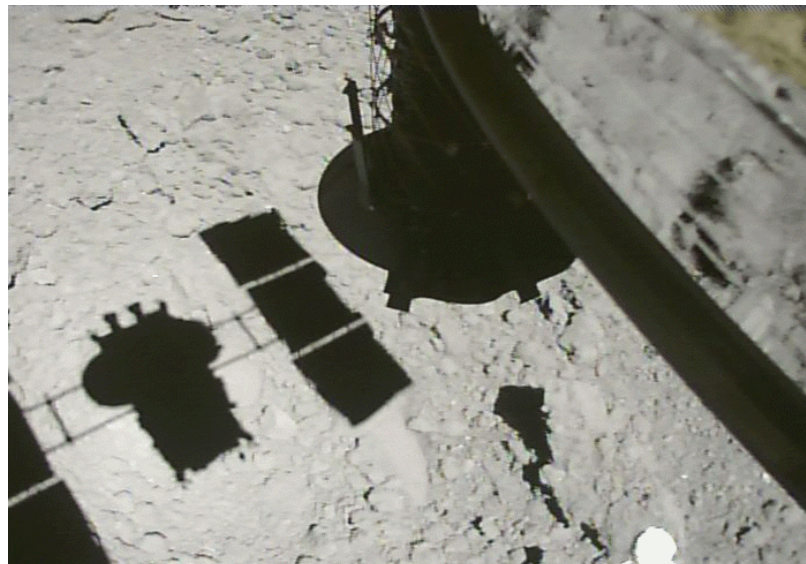
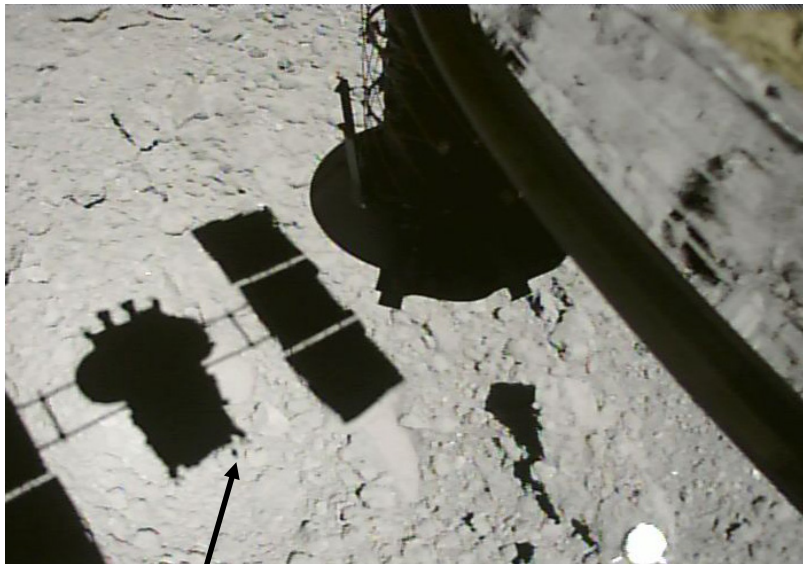
(動画)  
左の画像にほぼ対応する時間帯の動画。フラッシュ無しで撮影。(画像のクレジット JAXA)





## 2. 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果

### ターゲットマーカの分離画像(CAM-Hによる)



(動画:  
10倍速)

ターゲットマーカの影

ターゲットマーカ

CAM-Hによって2019年5月30日 11:18(JST、機上)に撮影された画像。探査機の高度は約8mである。

CAM-Hによって2019年5月30日 11:18から1分間撮影された画像。探査機の高度は約8mから約15mまで上昇した。

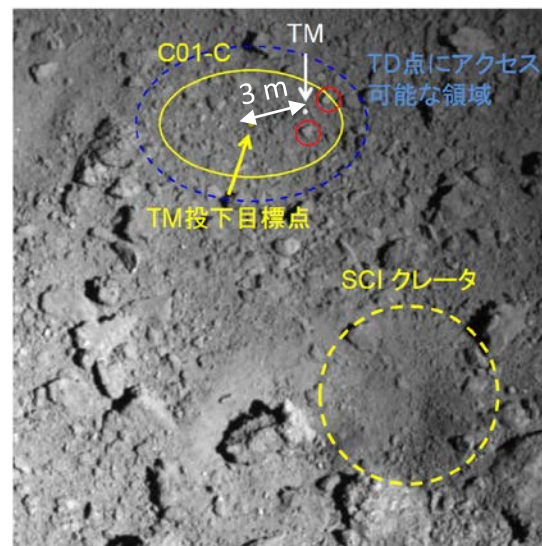
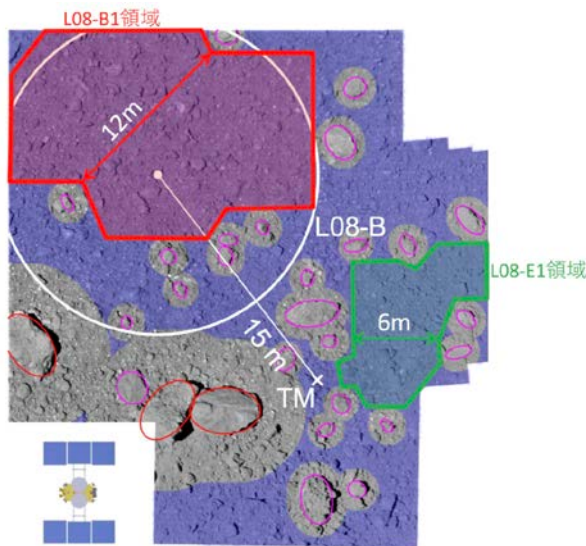
(画像のクレジット JAXA)



## 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果

### 最初のターゲットマーカ投下 (TD1-R3) との比較

- 目標点からのターゲットマーカ位置誤差は、TD1-R3では15mだったが、PPTD-TM1Aでは3mまで小さくすることができた。



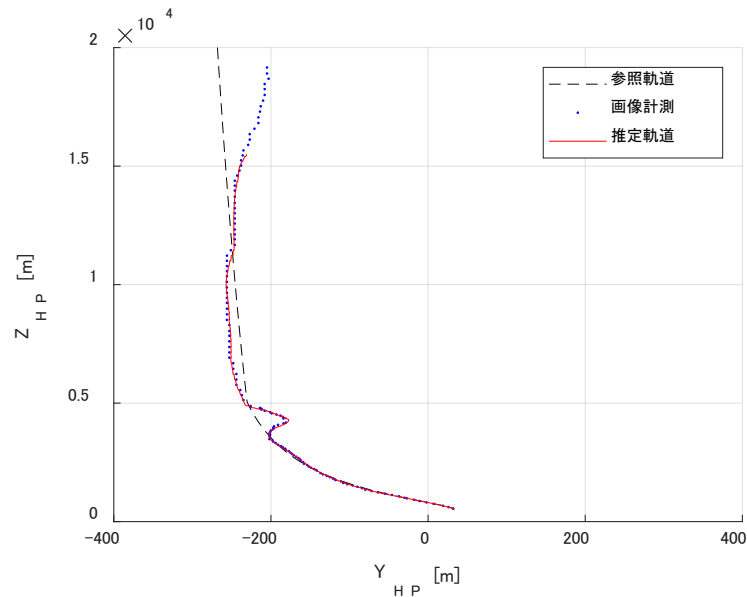
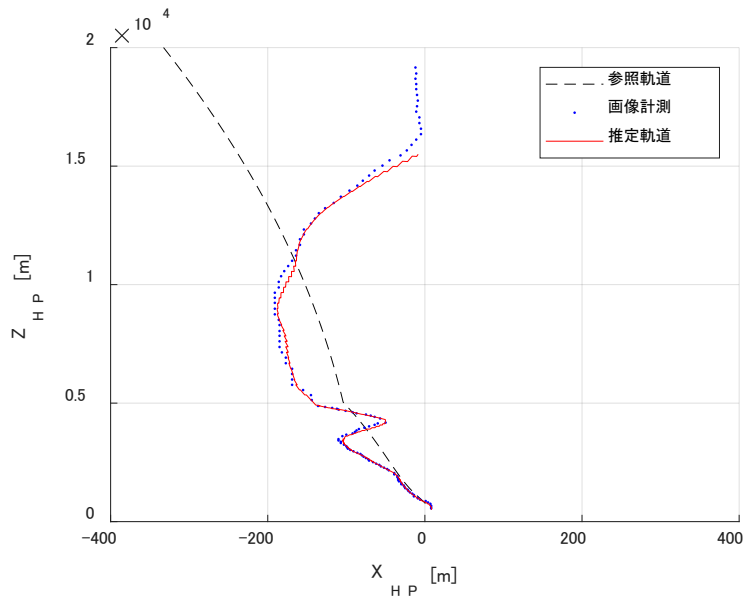
(画像のクレジット: JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研)





# 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果

## 降下軌道 (PPTD-TM1A)

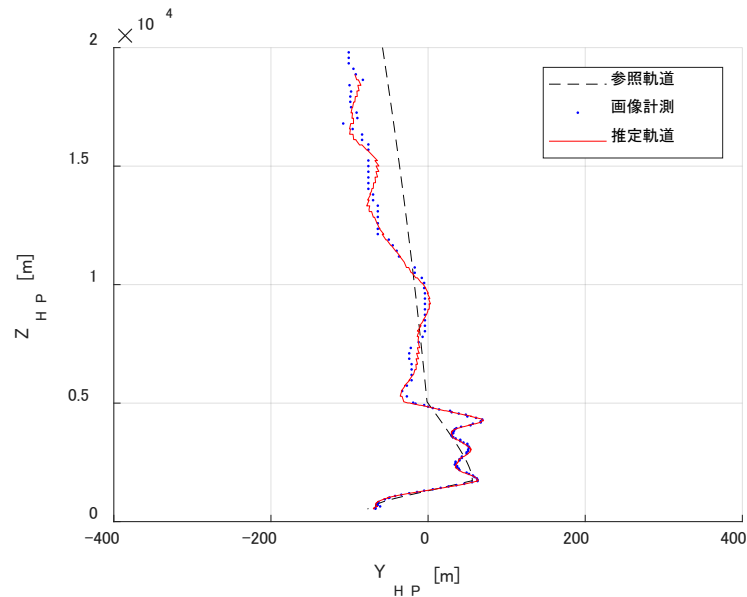
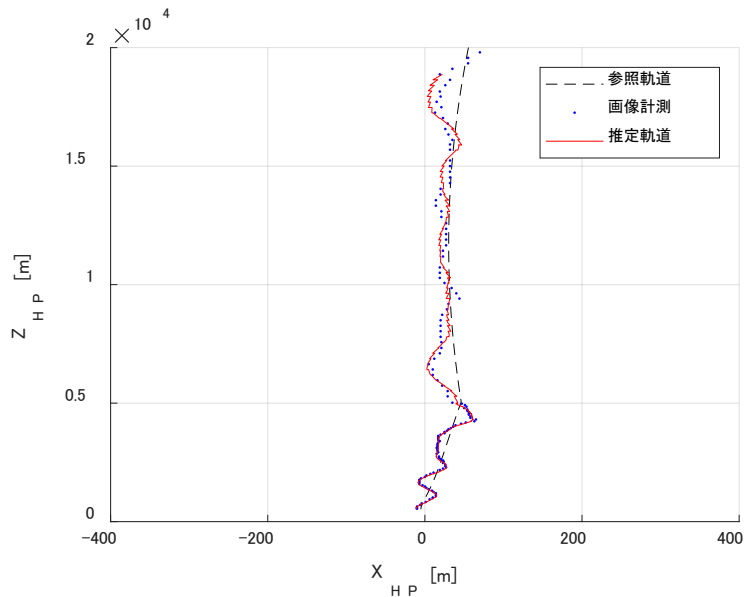


参照軌道に沿って降下できている



## 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果

参考: 2018年10月25日のTD1-R3運用における降下軌道



参照軌道を通り過ぎ、行ったり来たりしてしまっている



## 2. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1A) の結果



### 精度向上要因

- 航法誘導制御系の設計
  - 参照軌道を通り過ぎにくいパラメータ
- 小惑星重力モデルの更新
  - 小惑星形状を考慮したモデル
- 運用シーケンス変更
  - ホバリングからのターゲットマーカ投下



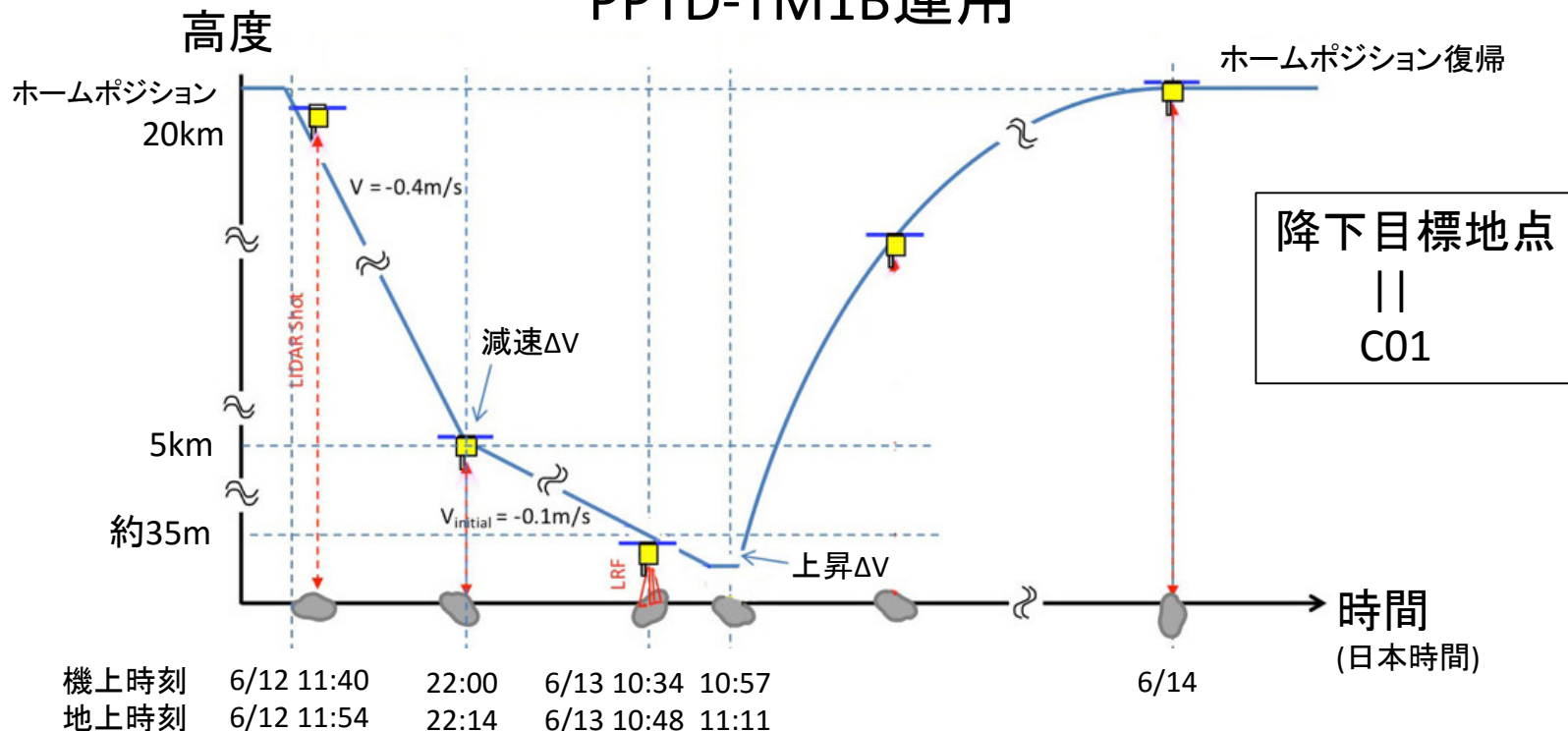
### 3. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1B) の計画

- 2019年6月11日から13日に探査機の降下運用を行う。
- C01領域に降下し、人工クレーターの観測を行う。
- 低高度での探査機運用性確認のためのデータを取得・蓄積する。
- 新たにターゲットマーカを投下することはしない。



# 3. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1B) の計画

## PPTD-TM1B運用



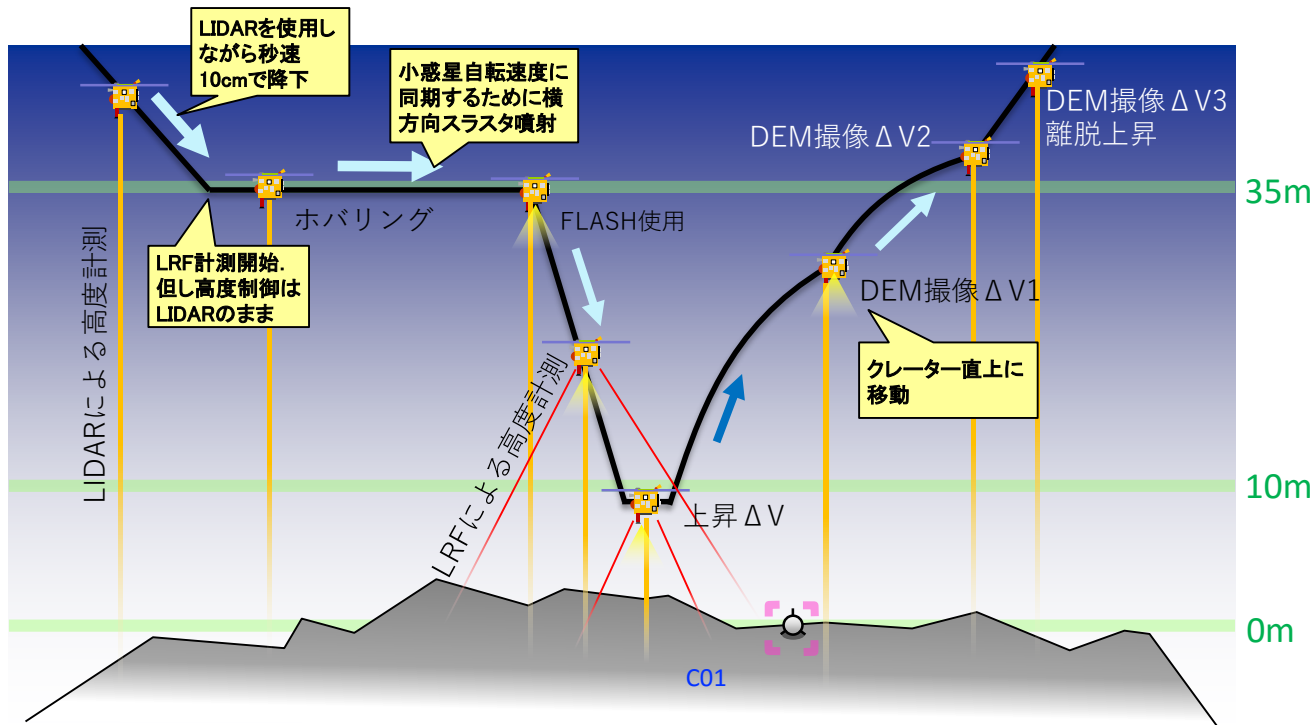
※実際の運用における時刻は、変更される場合がある。

(画像のクレジット JAXA)



# 3. 低高度降下観測運用 (PPTD-TM1B) の計画

## PPTD-TM1B運用の低高度シーケンス



(画像のクレジット JAXA)



# 4. 今後の運用方針



## ■ 5～7月の運用計画の考え方 (情報を更新)

- 現在、リュウグウは太陽へ近づいている(近日点は9月)。今後小惑星表面温度が高くなるため、着陸可能な時期は7月上旬まで。
- クレーター周辺の地形と、探査機の状態を6月中旬までに精査した上で、実際に6月下旬～7月上旬にタッチダウン運用を実施するかを決める。
  - 目標地点:人工クレーターからのイジェクタ(飛散物)がある地域
  - 運用名:「ピンポイントタッチダウン」(PPTD)
- PPTD運用実施前、5～6月に2回ないし3回の低高度降下観測運用を実施する。それにより、着陸候補地点の詳細な地形観測をするとともに、状況に応じて着陸への布石としてターゲットマーカを投下する。
  - 1回目: 5/14～5/16      運用名:PPTD-TM1    →ターゲットマーカは投下できず
  - 2回目: 5/28～5/30      運用名:PPTD-TM1A →ターゲットマーカは投下成功
  - 3回目: 6/11～6/13      運用名:PPTD-TM1B →ターゲットマーカは投下しない
- PPTD-TM1A運用にて、C01-Cへのターゲットマーカ投下に成功した。現在、C01-Cへのタッチダウンの可否の検討を継続中。





# 4. 今後の運用方針



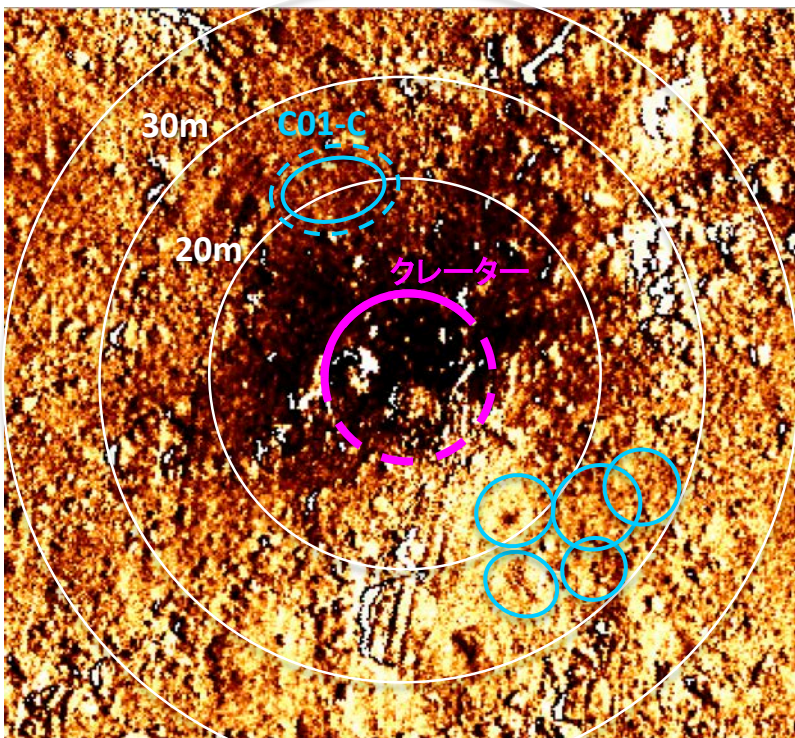
## 第2回タッチダウン運用を行うかどうかのプロジェクトとしての判断

	判断項目	現状	判断
理学的・工学的価値	人工クレーターのイジェクタを採取できる確度が高いかどうか。	人工クレーターの十分近くであるため、イジェクタが表面にある可能性は非常に高い。	○
	理学的な価値が十分高いかどうか。	地下物質採取、複数箇所採取、採取量増大のいずれも、理学的な価値は非常に高い。	○
	工学的な価値が十分高いかどうか。	世界初のマルチサンプリング、地下サンプリングを実証できることの工学的意義は非常に高い。	○
運用成立性	タッチダウンに必要な地形情報が得られているかどうか。	PPTD-TM1およびPPTD-TM1Aの運用で、タッチダウンに必要な地形情報は得られた。	○
	ターゲットマーカがタッチダウン目標点の近くに着地しているかどうか。	C01-Cの中心から3mのところに着地した。	○
	十分安全なタッチダウンシーケンスが設計できるかどうか。	現在検討中。	
探査機状態	第1回タッチダウンで砂塵により受光量が低下した光学系で支障ないかどうか。	現在検討中。	



## 4. 今後の運用方針

### C01付近のSCIクレーターからの放出物



- PPTD候補地点C01-C全域に、SCIクレーターからの放出物(イジェクタ、周囲より暗い)が分布。
- C01-Cのイジェクタ平均厚は暗化の空間分布から約1cmと推定される。
- C01-Cのイジェクタは、深さ0m～約1mから掘削された物質の混合物と推定される。  
※ 数十cm以深の層は、宇宙風化、太陽加熱、宇宙線から守られる。

初公開

ONC画像に地形、照明条件の補正を行うことで作成  
(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, 神戸大学)

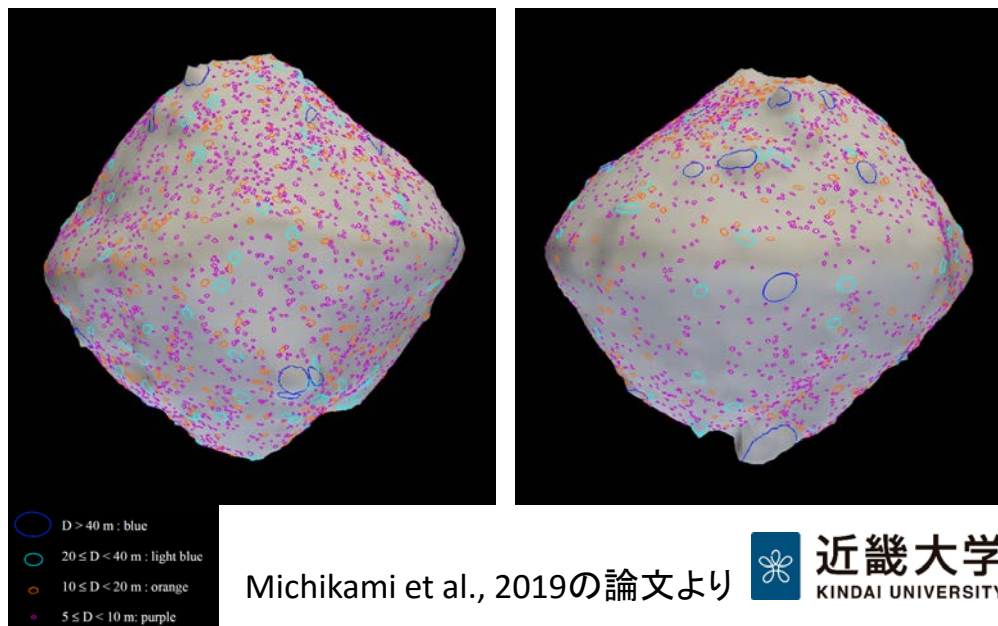
SCI衝突前後(CRA1 → CRA2)の反射率変化。  
コントラスト強調済。黒い部分は衝突後に暗化。



# 5. サイエンス成果

## Icarus 掲載論文: 道上達広 (近畿大学) による

- Michikami, T (Kindai Univ)., and 35 colleagues, 2019. “Boulder size and shape distributions on asteroid Ryugu.” Icarus 331, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.05.019> 掲載日: 2019年5月21日



- 小惑星リュウグウ全体で、1万個以上の岩塊の大きさと形を測定した。5m以上の岩塊は、約4400個存在し、衝突破片と同じような形をしている。これは、ほとんどの岩塊が、リュウグウ母天体の衝突破壊によって形成された破片であることを示唆している。
- 10m以上の岩塊の(単位面積当たり)の数は、これまで探査されたどの小惑星よりも多い。



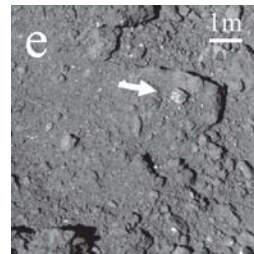
# 5. サイエンス成果

## Michikami, et al. 2019の主要な結論

### ① 岩塊サイズ分布(全球)[5m以上]

10m以上の岩塊の数密度は他の小惑星よりも大きい、サイズ分布のべき指数は-2.65と比較的ゆるやか(大きな岩塊に対して、小さな岩塊が相対的に少ないことを意味している)。

→激しい衝突を経験したラブルパイル天体。小さい岩塊は埋もれている。



埋もれている岩塊  
(Michikami et al., 2019より)

### ② 経度別、緯度別の岩塊の数密度

全体的には、一様。東西方向で少し差異がある。赤道付近の岩塊の数密度小さい。

→赤道付近の岩塊は埋もれているものが多い。

### ③ 近接画像における岩塊のサイズ分布[2cm-数m]

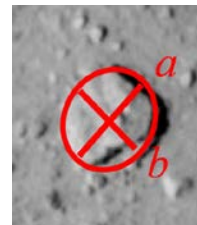
岩塊のサイズが小さくなるほど、べき指数の傾き小さくなる。

→小さな岩塊ほど、埋もれているものが多い。

### ④ 岩塊の形状(2軸比)

小さな岩塊ほど、赤道付近ほど、平均軸比( $b/a$ )は衝突破片形状に近い。

→小さな岩塊ほど、赤道付近ほど、移動している。







# 6. その他



## 受賞

COOL JAPAN協議会より

- 「COOL JAPAN AWARD 2019」を受賞
- 「はやぶさ」・「はやぶさ2」として
- 授賞式: 5月27日、京都御苑閑院宮邸跡



AIRBUS社より

- Airbus Space Dayにおいて「はやぶさ2 特別表彰」を受賞
- 授賞式: 6月4日、東京コンファレンスセンター(品川)
- AIRBUS社はMASCOT搭載カメラに関与





# 7. 今後の予定



## ■ 運用の予定

- 6月11日～13日：低高度降下観測運用 (PPTD-TM1B)

## ■ 記者説明会等

- 6月25日 15:00～：記者説明会 @ 東京事務所



# 記者説明会 第二部

## (個別の質疑)

～2回目のタッチダウンに向けた検討・準備状況～





# はやぶさ2のミッションサクセスクライテリア



ミッション目標	ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
【理学目標1】 C型小惑星の物質科学的特性を調べる。特に鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにする。	小惑星近傍からの観測により、C型小惑星の表面物質に関する、新たな知見を得る。	採取試料の初期分析において、鉱物・水・有機物相互作用に関する新たな知見を得る。	天体スケールおよびマイクロスケールの情報を統合し、地球・海・生命の材料物質に関する新たな科学的成果を上げる。
【理学目標2】 小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の直接探査により、小惑星の形成過程を調べる。	小惑星近傍からの観測により、小惑星の内部構造に関する知見を得る。	衝突体の衝突により起こる現象の観測から、小惑星の内部構造・地下物質に関する新たな知見を得る。	<ul style="list-style-type: none"> <li>衝突破壊・再集積過程に関する新たな知見をもとに小惑星形成過程について科学的成果を挙げる。</li> <li>探査ロボットにより、小惑星の表層環境に関する新たな科学的成果を挙げる。</li> </ul>
【工学目標1】 「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用性を向上させ、技術として成熟させる。	イオンエンジンを用いた深宇宙推進にて、対象天体にランデブーする。	<ul style="list-style-type: none"> <li>探査ロボットを小惑星表面に降ろす。</li> <li>小惑星表面サンプルを採取する。</li> </ul>	N/A
【工学目標2】 衝突体を天体に衝突させる実証を行う。	衝突体を対象天体に衝突させるシステムを構築し、小惑星に衝突させる。	特定した領域に衝突体を衝突させる。	衝突により、表面に露出した小惑星の地下物質のサンプルを採取する。

達成済み

達成確認中

ここを狙う



# 第2回タッチダウン実施の条件



## 第2回タッチダウン運用を行うかどうかのプロジェクトとしての判断

	判断項目	現状	判断
理学的・工学的価値	人工クレーターのイジェクタを採取できる確度が高いかどうか。	人工クレーターの十分近くであるため、イジェクタが表面にある可能性は非常に高い。	○
	理学的な価値が十分高いかどうか。	地下物質採取、複数箇所採取、採取量増大のいずれも、理学的な価値は非常に高い。	○
	工学的な価値が十分高いかどうか。	世界初のマルチサンプリング、地下サンプリングを実証できることの工学的意義は非常に高い。	○
運用成立性	タッチダウンに必要な地形情報が得られているかどうか。	PPTD-TM1およびPPTD-TM1Aの運用で、タッチダウンに必要な地形情報は得られた。	○
	ターゲットマーカがタッチダウン目標点の近くに着地しているかどうか。	C01-Cの中心から3mのところに着地した。	○
	十分安全なタッチダウンシーケンスが設計できるかどうか。	現在検討中。	
探査機状態	第1回タッチダウンで砂塵により受光量が低下した光学系で支障ないかどうか。	現在検討中。	



# 工学的価値



- マルチサンプリング(一つの天体の複数地点からのサンプル採取)、地下サンプリング(人工クレーター噴出物の採取)は、人類がまだ達成したことのない挑戦。宇宙探査の自在性を格段に上げる技術。
- サンプルリターンに関わる主要技術(電気推進航行、光学航法、サンプリング、リエントリ)は「はやぶさ」が達成したが、マルチサンプリング+地下サンプリングは、人工クレーターと並び「はやぶさ2」で計画された未踏技術。
- マルチサンプリングは、探査機のハードウェアやソフトウェア信頼性、運用技術(人的練度)を加えた、総合的な信頼性・技術蓄積が必要とされる運用。



# サイエンス的価値 (by 渡邊誠一郎)



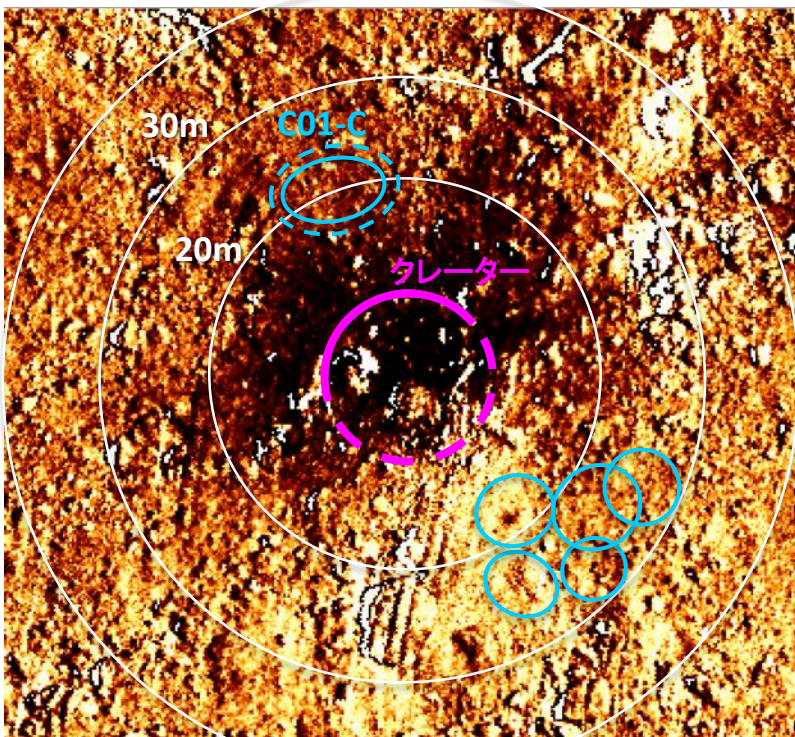
- 2回目のタッチダウン予定地点(C01-C)はSCIクレーターに近く、クレーターにより掘削された地下物質が表面に降り積もっている可能性が高い。
- この地下物質は、1回目に採取された表面試料との比較により、小惑星表層での太陽風や宇宙線による変性の影響を評価できる貴重な価値を持つ。
- 変性が弱ければ、太陽系形成期の情報を詳細に読み出せると期待される。特に影響を受けやすい有機物に関しては地下物質の価値は高い。
- 小惑星表面での混合過程とそのタイムスケールに制約を与えられる。
- 複数点試料の比較から天体の地域的不均質の程度を明らかにできる。
- OSIRIS-RExは試料量では勝るが、単一地点からのみ。はやぶさ2が複数地点から試料を得られれば、質的に追隨を許さない成果となる。
- はやぶさ2のサイエンス(リモセン観測、衝突実験、帰還試料分析)を直結する要となる貴重なサンプルになる期待できる。
- 複数回成功させることで、はやぶさ2のサンプリング運用が高い信頼度をもって確立されたと証明できる。



# C01付近のSCIクレーターからの放出物



(by 杉田精司)



- PPTD候補地点C01-C全域に、SCIクレーターからの放出物(イジェクタ、周囲より暗い)が分布。
- C01-Cのイジェクタ平均厚は暗化の空間分布から約1cmと推定される。
- C01-Cのイジェクタは、深さ0m～約1mから掘削された物質の混合物と推定される。  
※ 数十cm以深の層は、宇宙風化、太陽加熱、宇宙線から守られる。

ONC画像に地形、照明条件の補正を行うことで作成  
(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, 神戸大学)

SCI衝突前後(CRA1 → CRA2)の反射率変化。  
コントラスト強調済。黒い部分は衝突後に暗化。





# 物質分析科学からの2回目タッチダウンへの期待

(by 藪田ひかる)



## ■ リュウグウの特徴である「黒い物質」の成因に迫る

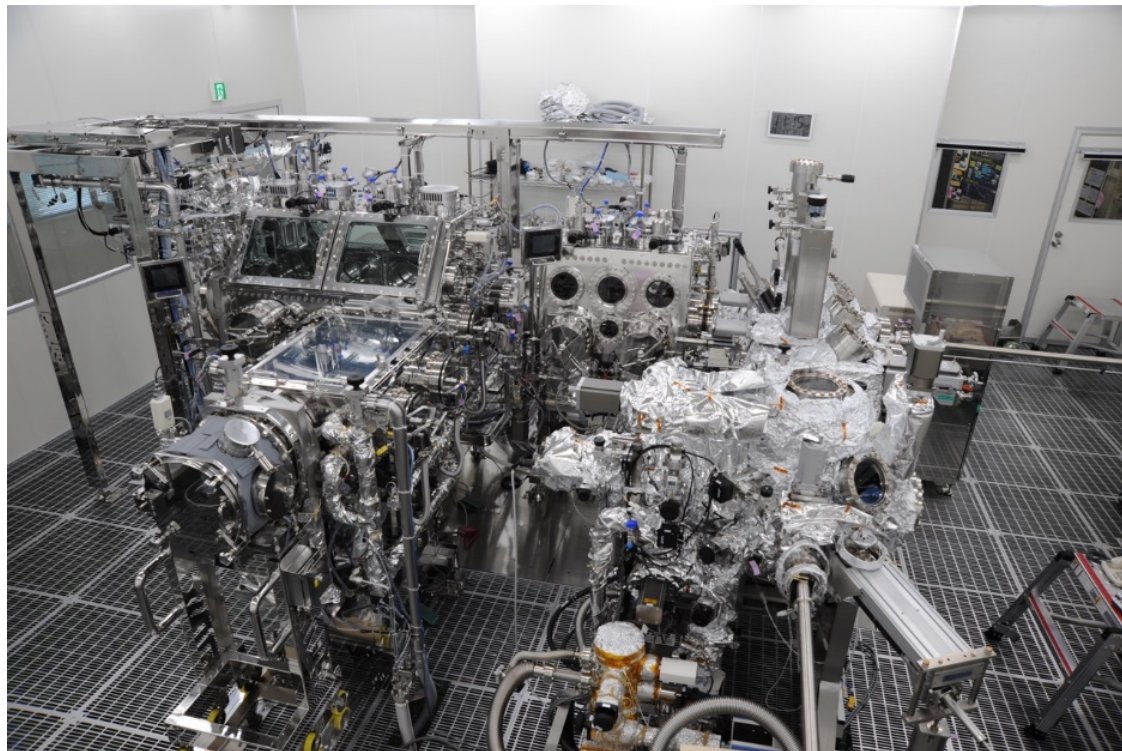
- リュウグウ表面の反射率は我々が知るいかなる隕石のものよりも低く、その成因については様々な可能性が推測されている(有機炭素組成、硫化鉄・酸化鉄組成、加熱・宇宙風化による変性、粒度等)。表面よりクレーターの方が反射率がさらに低いことが判明したことで、黒色物質は、表層で変性を受ける前の成分であるか、SCIの衝突実験生成物である可能性が推測される。その成因説明には、2回目に採取される試料を化学分析することが必要不可欠となる。

## ■ 有機物の化学情報が(おそらく)多い

- (リュウグウ表面物質とスペクトルが類似する)加熱を経験した炭素質隕石中にアミノ酸、カルボン酸、炭化水素、核酸塩基等はほとんど検出されていない(80~90年代当時の報告)。また、不溶性高分子有機物の熱分解、炭化が進む。そのため、2回目のタッチダウンで変性の弱い試料を採取できれば、得られる有機分子の種類と量は増え、太陽系と生命の起源物質解明の手がかりは圧倒的に向上する。
- 1回目に採取された表面試料からも、太陽加熱・宇宙風化によって(分解だけでなく)合成されうる新種の有機分子を初めて探索できる可能性はあるので、その形成過程を理解するためにも2回目に採取された内部試料の分析は非常に重要である。
- 観測では有機物は未同定であり、はやぶさ2ではサンプル分析が唯一の有機物キャラクタリゼーション手段となる。



# はやぶさ2帰還試料受入用クリーンチェンバー (by 安部正真)



(画像のクレジット JAXA)